

Tren Suhu Permukaan Laut, Anomali Ekstrem, dan Keterkaitannya dengan ENSO di Teluk Tomini dan Perairan Sekitarnya Periode 2003–2025

Faizal Kasim^{*1}, Sri Rahayu Kalaka¹, Sitty Ainsyah Habibie², Melisa Juliana Sau²

¹Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan teknologi Perikanan, Universitas Negeri Gorontalo

²Jurusan Manajemen Sumber Daya Perairan, Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan, Universitas Negeri Gorontalo
Jl. Jendral Sudirman No. 6 Kota Gorontalo, Gorontalo Indonesia
Email: *faizalkasim@ung.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengkaji tren jangka panjang suhu permukaan laut (SPL) dan respons spasial terhadap ENSO di Teluk Tomini, Laut Maluku/Seram, dan Laut Sulawesi menggunakan data NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (NOAA CDR OISST v2.1) periode 2003–2023 dengan validasi data 2024–2025. Analisis regresi linier menunjukkan tren pemanasan signifikan di seluruh wilayah dengan laju 0,025–0,033 °C tahun⁻¹. Analisis korelasi mengungkap heterogenitas respons yang kontras; Laut Maluku/Seram menunjukkan korelasi negatif yang signifikan ($r = -0,499$) terhadap indeks ONI, mengkonfirmasi perannya sebagai jalur transmisi sinyal Pasifik. Sebaliknya, Teluk Tomini dan Laut Sulawesi menunjukkan korelasi yang lemah, mengindikasikan dominasi faktor oseanografi lokal. Validasi terhadap data aktual 2024–2025 menunjukkan deviasi suhu yang berada sedikit di bawah garis tren prediksi, menandakan adanya modulasi variabilitas antartahun terhadap pemanasan jangka panjang. Temuan ini menegaskan bahwa strategi adaptasi perikanan di kawasan ini memerlukan pendekatan spesifik lokasi yang mengintegrasikan indikator iklim global dan dinamika lokal.

Kata kunci : Suhu permukaan laut, Tren pemanasan, ENSO, NOAA OISST, Validasi model, Teluk tomini

Abstract

Trends in Sea Surface Temperature, Extreme Anomalies, and Their Relationship with ENSO in Tomini Bay and Adjacent Waters during 2003–2025

This study examines long-term Sea Surface Temperature (SST) trends and spatial responses to ENSO in Tomini Bay, the Molucca/Seram Sea, and the Celebes Sea using NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (NOAA CDR OISST v2.1) data for the period 2003–2023, with validation using 2024–2025 data. Linear regression analysis indicates significant warming trends across all regions at rates of 0.025–0.033 °C year⁻¹. Correlation analysis reveals contrasting spatial heterogeneity; the Molucca/Seram Sea exhibits a significant negative correlation ($r = -0.499$) with the ONI, confirming its role as a transmission pathway for Pacific signals. Conversely, Tomini Bay and the Celebes Sea demonstrate weak correlations, indicating the dominance of local oceanographic factors. Validation against 2024–2025 actual data reveals temperature deviations slightly below the predicted trend line, highlighting the modulation of long-term warming by inter-annual variability. These findings underscore the need for location-specific fishery adaptation strategies in this region that integrate both global climate indicators and local dynamics.

Keywords: Sea surface temperature, Warming trend, ENSO, NOAA OISST, Model validation, Tomini Bay

PENDAUULUAN

Suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature*/SST) memainkan peranan kritis dalam sistem iklim global karena merupakan parameter fisik utama yang mengontrol pertukaran panas, momentum, dan uap air antara laut dan atmosfer, sehingga secara langsung memengaruhi pola cuaca, sirkulasi atmosfer, dan iklim global (Stewart, 2008). Variabilitas SST berhubungan erat dengan mekanisme perubahan iklim yang sedang berlangsung, di mana pemanasan global menjadi salah satu akar penyebab perubahan pola SST di berbagai

cekungan samudra. Pola SST di Samudra Pasifik, misalnya, diketahui mengatur sirkulasi *Walker* dan memengaruhi dinamika atmosfer tropis serta gelombang Rossby yang berkontribusi terhadap kondisi iklim di lintang yang lebih tinggi (Wills *et al.*, 2022). Dalam konteks ini, SST juga menjadi indikator utama fenomena iklim seperti El Niño dan La Niña yang berdampak luas pada anomali curah hujan dan kondisi meteorologi regional, termasuk di wilayah Indonesia (Pratama *et al.*, 2022). Mengingat peran fundamental SST dalam pengaturan iklim global dan regional serta implikasinya terhadap ketidakpastian proyeksi pemanasan di masa depan, pemantauan SST yang akurat menjadi kunci untuk meningkatkan pemahaman dinamika iklim dan mendukung perumusan kebijakan mitigasi dan adaptasi perubahan iklim yang lebih efektif (Espinosa & Zelinka, 2024; Kang *et al.*, 2023).

Di samping perannya dalam sistem iklim global, SST juga memiliki implikasi langsung terhadap dinamika ekosistem laut dan sumber daya perikanan. Variasi SST sangat berkaitan dengan tingkat kesuburan perairan, di mana suhu permukaan yang relatif lebih rendah sering kali mengindikasikan terjadinya proses *upwelling* yang membawa massa air kaya nutrisi ke lapisan permukaan dan meningkatkan konsentrasi klorofil-a serta produktivitas primer (Rosalina *et al.*, 2025). Perubahan kondisi fisik ini akan memengaruhi struktur rantai makanan laut dan persebaran organisme, khususnya kelompok ikan pelagis yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan ketersediaan pakan. Ikan tuna sebagai salah satu komoditas pelagis besar, misalnya, diketahui memiliki preferensi kisaran suhu tertentu dan menunjukkan respon kuat terhadap anomali SST dalam hal pola migrasi, lokasi *fishing ground*, dan keberhasilan penangkapan (Febryanti, 2023). Dengan demikian, pemahaman mengenai dinamika SST tidak hanya penting untuk kajian iklim, tetapi juga krusial bagi pengelolaan perikanan berbasis ekosistem, terutama di wilayah-wilayah produktif seperti Teluk Tomini dan perairan sekitarnya yang menjadi habitat dan jalur raya penting bagi tuna.

Teluk Tomini merupakan salah satu teluk tropis semi-tertutup di Indonesia timur yang dicirikan oleh batimetri yang kompleks, mulai dari sistem terumbu karang dangkal hingga cekungan dalam, sehingga mendorong heterogenitas spasial dalam sirkulasi dan produktivitas laut (Kusnida *et al.*, 2009). Wilayah ini dipengaruhi secara kuat oleh sistem angin monsun serta konektivitasnya dengan perairan sekitarnya, termasuk Laut Maluku/Laut Seram dan Laut Sulawesi, yang dapat memicu proses pencampuran vertikal dan *upwelling* serta meningkatkan biomassa fitoplankton dan produktivitas primer di musim-musim tertentu (Setiawan & Habibi, 2011). Sebagai basis jaring makanan pelagis, fitoplankton mengendalikan aliran energi menuju tingkat trofik yang lebih tinggi, termasuk komunitas ikan dan sumber daya perikanan (Petrik *et al.*, 2020; Saba *et al.*, 2021), sehingga perubahan pada SST yang memengaruhi stratifikasi kolom air, suplai nutrisi, dan intensitas *upwelling* akan berdampak langsung maupun tidak langsung pada fungsi ekosistem dan potensi hasil tangkapan. Pengamatan satelit sebelumnya menunjukkan bahwa perairan di dalam Teluk Tomini dapat merespons sinyal iklim berskala besar secara berbeda dibandingkan perairan terbuka di sekitarnya, dengan korelasi yang relatif lebih lemah terhadap ENSO (Suniada, 2021), yang mengindikasikan adanya modulasi lokal terhadap sinyal iklim global. Meskipun demikian, sebagian besar kajian yang ada masih berfokus pada variabilitas musiman klorofil-a atau analisis titik lokal, dan belum banyak yang secara khusus menelaah tren jangka panjang SST, pola anomali ekstrem, serta keterkaitannya dengan ENSO secara terpadu di Teluk Tomini dan perairan sekitarnya. Celah pengetahuan tersebut menjadi dasar penelitian ini, yang bertujuan untuk mengkaji tren suhu permukaan laut, mengidentifikasi anomali ekstrem, dan mengevaluasi hubungan SST dengan ENSO di Teluk Tomini, Laut Seram, dan Laut Sulawesi pada periode 2003–2025.

MATERI DAN METODE

Kerangka Umum Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis data satelit untuk menganalisis dinamika suhu permukaan laut (Sea Surface Temperature, SST), anomali suhu ekstrem, serta keterkaitannya dengan fenomena *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) di Teluk Tomini dan perairan sekitarnya. Analisis utama dilakukan pada skala tahunan untuk periode 2003–2023, sedangkan data tahun 2024–2025 digunakan sebagai pengamatan lanjutan (*extended observation*) untuk menilai kecenderungan terbaru kondisi pemanasan laut.

Secara umum, tahapan penelitian meliputi: (1) penetapan wilayah kajian, (2) pengambilan dan pengolahan data SST satelit menggunakan platform *Google Earth Engine* (GEE), (3) perhitungan *trend* dan anomali SST, (4) identifikasi anomali ekstrem berbasis ambang statistik, dan (5) analisis keterkaitan SST dengan indeks ENSO (Oceanic Niño Index/ONI) pada beberapa skala waktu.

Wilayah Kajian

Wilayah kajian terdiri atas tiga area perairan yang dipilih untuk merepresentasikan variasi kondisi oseanografi di kawasan Teluk Tomini dan sekitarnya, yaitu: Teluk Tomini, mewakili perairan semi-tertutup di Indonesia tengah yang dikelilingi daratan Sulawesi dan memiliki karakteristik sirkulasi lokal yang relatif terlindung. Laut Maluku/Seram, sebagai proksi perairan internal Indonesia yang berada di sisi luar Teluk Tomini dan memiliki konektivitas dengan laut-laut sekitarnya. Laut Sulawesi, mewakili perairan terbuka yang berhadapan langsung dengan Samudra Pasifik barat dan menerima sinyal iklim berskala besar secara lebih langsung.

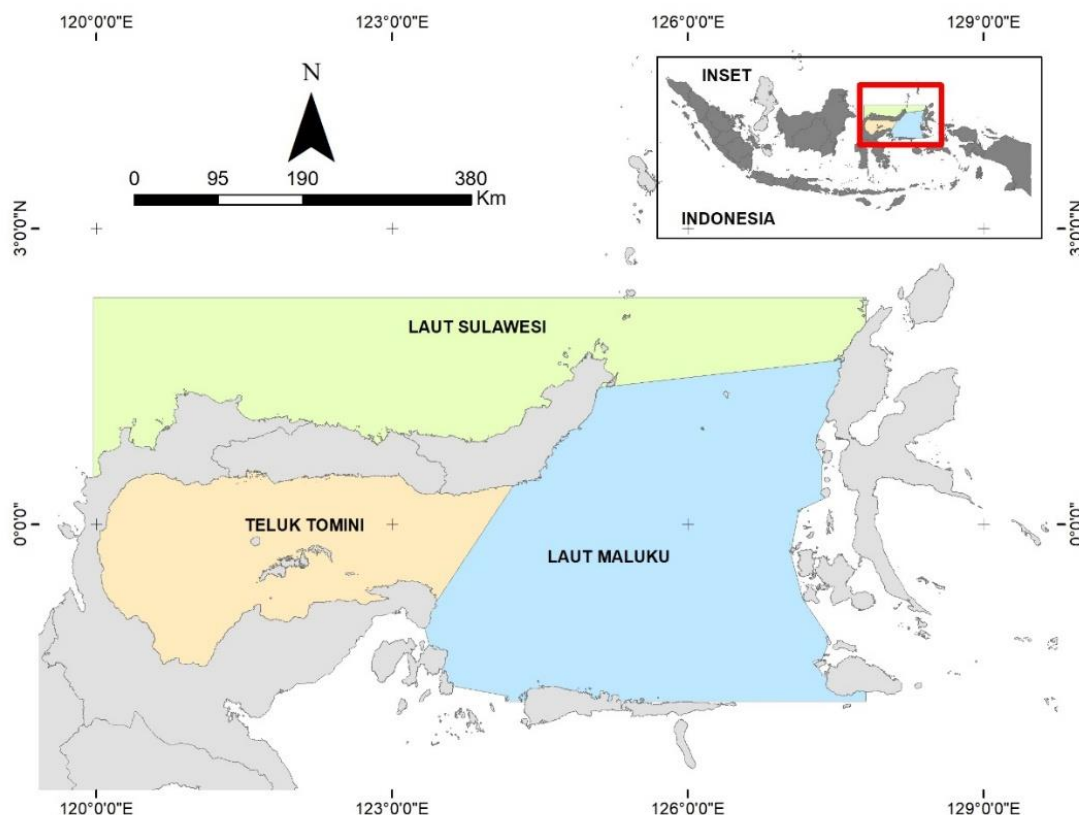
Batas spasial masing-masing wilayah ditetapkan dalam bentuk poligon vektor pada platform *Google Earth Engine*, berdasarkan pertimbangan letak geografis, posisi relatif terhadap Teluk Tomini, serta kedekatan dengan jalur sirkulasi laut regional.

Data Penelitian

Data Suhu Permukaan Laut (SST)

Data SST yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan produk *NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature* (NOAA CDR OISST v2.1) versi final dengan resolusi spasial $1/4^\circ$ (~ 25 km). Dataset ini menyediakan SST harian yang dikonstruksi dari kombinasi data satelit, kapal, dan buoy, serta melalui koreksi bias dan interpolasi spasial untuk menghasilkan cakupan global yang konsisten (Banzon *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2021; Reynolds *et al.*, 2007).

Data SST diakses dan diperoleh melalui platform *Google Earth Engine* (GEE), menggunakan koleksi NOAA/CDR/OISST/V2_1, dengan rentang ketersediaan data yang digunakan dalam ekstraksi 1 Januari 2003 hingga 30 September 2025. Untuk analisis kuantitatif (tren dan korelasi), penelitian ini difokuskan pada periode 2003–2023, sedangkan data 2024–2025 dihimpun sebagai pengamatan lanjutan (extended observation) dan tidak dimasukkan dalam perhitungan parameter tren regresi linier maupun korelasi utama.



Gambar 1. Lokasi wilayah kajian di kawasan Teluk Tomini dan perairan sekitarnya di Indonesia bagian tengah

Pengolahan data SST dilakukan melalui tahapan berikut: Pemanggilan dan penyaringan data. Dataset NOAA OISST v2.1 dipanggil dari katalog GEE, kemudian difilter berdasarkan rentang waktu penelitian. Wilayah kajian didefinisikan sebagai poligon batas wilayah Teluk Tomini, Laut Seram, dan Laut Sulawesi yang digunakan sebagai *area of interest* (AOI). Perhitungan rata-rata SST bulanan per wilayah. Untuk setiap kombinasi tahun–bulan pada masing-masing AOI, citra SST harian dirata-ratakan secara temporal dalam satu bulan (monthly mean). Selanjutnya, nilai SST bulanan dihitung sebagai rata-rata spasial di dalam poligon AOI menggunakan fungsi *reduceRegion* dengan *Reducer.mean*. Tahap ini menghasilkan deret waktu SST bulanan (YYYY-MM) untuk tiap wilayah. Agregasi menjadi rata-rata SST tahunan (Jan–Des). Deret SST bulanan kemudian diagregasi menjadi SST tahunan berdasarkan tahun kalender (Januari–Desember) dengan menghitung rerata dari 12 nilai bulanan pada setiap tahun. Agregasi tahunan dilakukan di luar GEE menggunakan Python/Excel untuk memastikan konsistensi perhitungan dan kemudahan analisis lanjutan. Ekspor data hasil ekstraksi. Data SST bulanan hasil ekstraksi diekspor dari GEE dalam format CSV, kemudian digunakan sebagai input untuk perhitungan SST tahunan dan analisis statistik/visualisasi lanjutan.

Data Indeks ENSO (ONI)

Variabilitas ENSO dalam penelitian ini direpresentasikan oleh Oceanic Niño Index (ONI) yang dipublikasikan oleh NOAA. ONI didefinisikan sebagai anomali suhu permukaan laut di wilayah Niño 3.4 (5°LU–5°LS, 120°–170°BB) yang dihitung sebagai rata-rata berjalan tiga bulanan (3-month running mean; misalnya DJF, JFM, FMA, MAM, dan seterusnya). Nilai ONI diperoleh dalam format teks (ascii) dari laman resmi NOAA (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni.ascii.txt>) dan digunakan pada periode 2003–2023 untuk menjaga kesetaraan periode observasi dengan deret SST tahunan yang dianalisis dalam penelitian.

Untuk menyelaraskan skala waktu ONI dengan SST rata-rata tahunan, nilai ONI 3-bulanan tersebut dikonversi menjadi ONI tahunan (Tabel 1), dengan menghitung rata-rata aritmetika dari 12 nilai ONI 3-bulanan (DJF–NDJ) pada setiap tahun analisis, mengikuti label tahun pada data NOAA. Agregasi ini digunakan untuk memperoleh indikator ENSO pada skala antartahun (frekuensi rendah) yang sebanding dengan penggunaan SST tahunan sebagai variabel respon, dan pendekatan serupa telah digunakan dalam studi klimatologi/meteorologi yang menganalisis ENSO pada skala antartahun (misalnya Kambezidis, 2024; Nissen *et al.*, 2022).

Kami menegaskan bahwa pengubahan ONI 3-bulanan menjadi ONI tahunan bersifat “tricky” karena ENSO dapat memodulasi SST secara musiman; oleh sebab itu, agregasi tahunan ini secara inheren menghaluskan variasi musiman ENSO dan berpotensi mengurangi informasi fase-musim (Tabel 1). Dengan demikian, penelitian ini tidak mengeksplorasi respons musiman secara eksplisit (misalnya ONI DJF, MAM, JJA, SON) maupun analisis lag berbasis musim/bulan. Analisis musiman yang lebih rinci direncanakan sebagai kajian lanjutan menggunakan data resolusi musiman untuk mengevaluasi perbedaan respons SST terhadap ENSO antar-musim.

Tabel 1. Nilai rata-rata tahunan indeks ENSO (Oceanic Niño Index/ONI) periode 2003–2023 yang digunakan sebagai data input dalam analisis keterkaitan SST–ENSO.

Tahun	ONI rata-rata tahunan	Tahun	ONI rata-rata tahunan
2003	0.25	2014	0.2
2004	0.45	2015	1.55
2005	0.04	2016	0.42
2006	0.07	2017	-0.12
2007	-0.61	2018	0.09
2008	-0.78	2019	0.58
2009	0.28	2020	-0.27
2010	-0.48	2021	-0.64
2011	-0.78	2022	-0.85
2012	-0.06	2023	0.9
2013	-0.23		

Analisis Tren Suhu Permukaan Laut

Analisis tren jangka panjang SST dilakukan untuk periode 2003–2023 menggunakan regresi linier sederhana antara SST tahunan (rerata Januari–Desember) dan tahun pengamatan pada masing-masing wilayah. Model yang digunakan menggunakan rumus;

$$SST_t = a + b \cdot t + \varepsilon_t$$

dengan SST_t = suhu permukaan laut rata-rata tahunan pada tahun ke- t , a = intercept, b = koefisien tren (kemiringan) yang menyatakan laju perubahan SST ($^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$), ε_t = galat (error) model. Dari hasil regresi, dihitung nilai kemiringan (b), koefisien determinasi (R^2), dan nilai p untuk menilai signifikansi statistik tren. Koefisien b diinterpretasikan sebagai laju pemanasan (atau pendinginan) tahunan pada masing-masing wilayah kajian.

Perhitungan Anomali SST dan Identifikasi Anomali Ekstrem

Anomali SST tahunan dihitung relatif terhadap kondisi “normal” menggunakan *baseline* klimatologis 2003–2012 pada masing-masing wilayah:

$$\text{Anomali } SST_t = SST_t - \overline{SST}_{2003-2012}$$

di mana $\overline{SST}_{2003-2012}$ adalah rata-rata SST tahunan selama periode *baseline* untuk masing-masing wilayah. Kejadian anomali ekstrem diidentifikasi menggunakan ambang persentil ke-90 dari distribusi anomali SST tahunan (periode analisis 2003–2023). Tahun dengan anomali di atas ambang tersebut diklasifikasikan sebagai kejadian ekstrem dan diinterpretasikan sebagai kondisi pemanasan tahunan yang tidak biasa.

Analisis Keterkaitan SST dengan ENSO (ONI)

Keterkaitan SST dengan ENSO dianalisis menggunakan korelasi *Pearson* antara SST tahunan dan ONI tahunan untuk periode 2003–2023. Analisis difokuskan pada Lag-0 (tahun yang sama), yaitu membandingkan SST pada tahun ke- t dengan ONI tahunan pada tahun ke- t , untuk menilai sejauh mana variabilitas ENSO pada skala antartahun tercermin pada SST tahunan di Teluk Tomini, Laut Seram/Laut Maluku, dan Laut Sulawesi. Nilai koefisien korelasi (r) dihitung secara terpisah untuk masing-masing wilayah kajian dan diinterpretasikan berdasarkan tanda serta besarnya. Sejalan dengan pertimbangan fisik bahwa respons ENSO terhadap SST umumnya berlangsung pada skala bulanan hingga musiman, penelitian ini tidak menerapkan korelasi lag tahunan (misalnya lag-1 atau lag-2 tahun) karena kurang bermakna secara interpretasi. Analisis lag yang lebih relevan secara fisik (lag bulanan/musiman) direncanakan pada studi lanjutan menggunakan data SST dan ONI pada resolusi waktu musiman/bulanan.

Pengamatan Lanjutan Periode 2024–2025

Meskipun analisis tren dan korelasi utama difokuskan pada periode 2003–2023, data SST tahun 2024–2025 tetap dihimpun sebagai pengamatan lanjutan untuk mengevaluasi konsistensi kondisi terbaru terhadap tren jangka panjang. Untuk setiap wilayah, nilai SST prediksi tahun 2024 dan 2025 dihitung dari persamaan regresi linier yang diperoleh pada periode 2003–2023, kemudian dibandingkan dengan SST aktual hasil pengamatan satelit pada tahun yang sama. Analisis ini bersifat evaluatif dan tidak mengubah parameter regresi maupun hasil korelasi utama yang dihitung hanya dari periode 2003–2023.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Umum Suhu Permukaan Laut

Secara umum, ketiga wilayah kajian berada pada kisaran SST tropis yang hangat dan relatif stabil. Deret SST yang dianalisis berasal dari NOAA CDR OISST v2.1 yang diproses di Google Earth Engine untuk memperoleh SST bulanan pada masing-masing poligon wilayah (Teluk Tomini, Laut Seram, dan Laut Sulawesi), kemudian diekspor dan diagregasi menjadi SST tahunan (Jan–Des). Dengan prosedur ini, Tabel 2 dan Gambar 2 merepresentasikan deret SST tahunan yang sama. Selama periode 2003–2023, Teluk Tomini memiliki rata-rata SST tahunan tertinggi ($29,74^{\circ}\text{C}$), diikuti Laut Sulawesi ($29,33^{\circ}\text{C}$) dan Laut Seram ($29,04^{\circ}\text{C}$). Simpangan baku yang relatif kecil ($0,23$ – $0,33^{\circ}\text{C}$) menunjukkan variasi antar-tahun yang sempit, namun tetap memperlihatkan kecenderungan pemanasan ketika diamati pada rentang waktu yang panjang.

Rentang SST minimum–maksimum juga konsisten dengan karakter perairan tropis, dengan SST minimum 28,54–29,41 °C dan SST maksimum 29,61–30,16 °C (Tabel 2). Teluk Tomini cenderung lebih hangat dibanding dua wilayah lainnya, yang secara oseanografis dapat dikaitkan dengan karakter perairan semi-tertutup dan relatif lebih terlindung dari pengaruh langsung samudra terbuka, sehingga pertukaran massa air dan pelepasan panas dapat lebih terbatas dibanding perairan yang lebih terbuka. Sementara itu, Laut Seram/Laut Maluku menunjukkan variabilitas antar-tahun yang sedikit lebih besar (simpangan baku tertinggi), mengindikasikan dinamika regional yang lebih responsif terhadap variasi atmosfer–laut dan perubahan massa air pada skala antartahun.

Gambar 2 memperlihatkan bahwa meskipun SST tahunan berfluktuasi di sekitar nilai rata-rata masing-masing wilayah, garis tren linier menunjukkan kecenderungan peningkatan SST yang konsisten. Temuan visual ini selanjutnya dikonfirmasi melalui analisis tren linier pada subbagian berikutnya (Tabel 3).

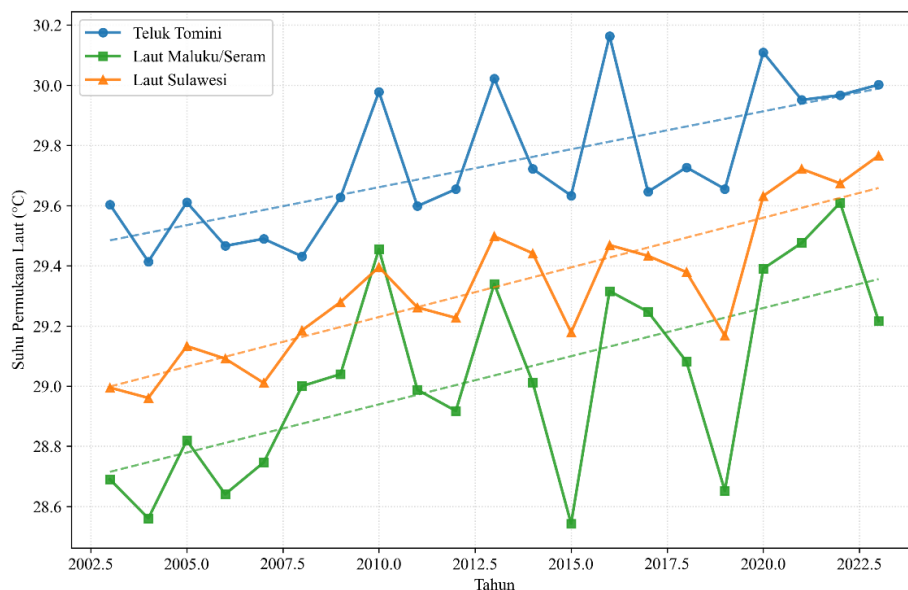
Tren Suhu Permukaan Laut 2003–2023

Analisis tren linier SST tahunan berdasarkan data NOAA CDR OISST v2 menunjukkan bahwa ketiga wilayah kajian mengalami pemanasan yang konsisten selama periode 2003–2023 (Tabel 3). Laju peningkatan SST tertinggi teridentifikasi di Laut Sulawesi dengan slope sekitar +0,0329 °C/tahun dan koefisien determinasi $R^2 \approx 0,72$, yang menunjukkan bahwa lebih dari 70% variasi SST tahunan dapat dijelaskan oleh tren waktu. Hal ini mengindikasikan sinyal pemanasan yang kuat dan relatif stabil di wilayah tersebut.

Di Laut Maluku/Seram, laju pemanasan tercatat sekitar +0,0320 °C/tahun dengan $R^2 \approx 0,37$, sedangkan di Teluk Tomini sebesar +0,0253 °C/tahun dengan $R^2 \approx 0,47$ (Tabel 3). Meskipun nilai R^2 di Teluk Tomini dan Laut Maluku/Seram lebih rendah dibandingkan Laut Sulawesi, nilai p yang kecil ($p < 0,01$ untuk seluruh wilayah) menunjukkan bahwa ketiga tren tersebut signifikan secara statistik.

Tabel 2. Statistik deskriptif suhu permukaan laut (SST) tahunan pada tiga wilayah kajian untuk periode 2003–2023 berdasarkan data NOAA CDR OISST v2.1

Wilayah	Rata-rata SST (°C)	Simpangan baku (°C)	SST minimum (°C)	SST maksimum (°C)	N (tahun)
Teluk Tomini	29,74	0,23	29,41	30,16	21
Laut Maluku/ Seram	29,04	0,33	28,54	29,61	21
Laut Sulawesi	29,33	0,24	28,96	29,77	21



Gambar 2. Variabilitas temporal dan tren linier Suhu Permukaan Laut (SST) di tiga wilayah perairan (Teluk Tomini, Laut Maluku/Seram, dan Laut Sulawesi) periode 2003–2023. Garis putus-putus mengindikasikan pola peningkatan SST jangka panjang di ketiga lokasi tersebut.

Anomali SST dan Kejadian Ekstrem

Untuk menilai deviasi SST terhadap kondisi normal jangka panjang, dihitung anomali SST tahunan menggunakan periode 2003–2012 sebagai baseline klimatologis. Pola anomali pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa ketiga wilayah mengalami fluktuasi positif dan negatif terhadap rata-rata jangka panjang, dengan beberapa tahun menonjol sebagai anomali positif yang kuat.

Berdasarkan analisis distribusi anomali, ambang batas ekstrem ditetapkan pada persentil ke-90 untuk masing-masing wilayah. Nilai ambang ini berkisar antara 0,428–0,555 °C (Tabel 4). Tahun-tahun dengan anomali di atas ambang batas tersebut diklasifikasikan sebagai kejadian ekstrem. Di Teluk Tomini, tahun ekstrem teridentifikasi pada 2016 dan 2020; di Laut Maluku/Seram pada 2021 dan 2023; sedangkan di Laut Sulawesi pada 2010 dan 2022 (Tabel 4).

Pola ini menunjukkan bahwa kejadian anomali hangat ekstrem tidak selalu muncul secara serempak di semua wilayah, melainkan dapat bergeser secara spasial dan temporal. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh kombinasi antara sinyal iklim berskala besar (seperti ENSO) dan proses-proses lokal, seperti *upwelling*, sirkulasi regional, dan pengaruh monsun.

Keterkaitan SST dengan ENSO (ONI)

Untuk mengevaluasi respon termal perairan terhadap variabilitas iklim global, dilakukan analisis korelasi Pearson antara rata-rata SST tahunan dan indeks ENSO (ONI) selama periode 2003–2023. Analisis ini difokuskan pada hubungan simultan (*simultaneous correlation*) guna mengidentifikasi bagaimana anomali suhu permukaan laut di ketiga wilayah kajian merespons fase El Niño dan La Niña pada tahun kejadian yang sama. Hasil analisis statistik pada Tabel 5 mengungkapkan temuan menarik terkait variasi spasial respon suhu perairan. Laut Maluku/Seram teridentifikasi sebagai satu-satunya wilayah yang memiliki hubungan korelasi yang signifikan secara statistik dengan indeks ENSO, ditunjukkan oleh nilai koefisien $r = -0,499$ dan nilai $p = 0,021$ ($p < 0,05$). Nilai negatif yang cukup kuat ini mengindikasikan bahwa dinamika suhu di Laut Maluku/Seram sangat responsif terhadap forcing iklim global; di mana fase El Niño (ONI positif) secara konsisten diikuti oleh penurunan suhu permukaan laut, dan sebaliknya fase La Niña memicu peningkatan suhu. Tingginya sensitivitas di wilayah ini kemungkinan besar disebabkan oleh posisinya yang dilalui langsung oleh jalur utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang membawa sinyal massa air dari Samudra Pasifik.

Sebaliknya, hasil yang berbeda ditemukan pada Laut Sulawesi dan Teluk Tomini. Berdasarkan Tabel 5, kedua wilayah ini menunjukkan korelasi yang lemah dan tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$), dengan nilai koefisien korelasi masing-masing hanya -0,165 dan -0,046. Khusus untuk Laut Sulawesi, meskipun merupakan perairan terbuka yang berbatasan langsung dengan Pasifik, rendahnya korelasi tahunan mengindikasikan bahwa pada skala waktu inter-annual, variabilitas suhu permukaannya mungkin lebih didominasi oleh interaksi atmosfer lokal atau dinamika arus regional yang kompleks, sehingga sinyal ENSO tidak terekam sejelas di Laut Maluku. Sementara di Teluk Tomini, respon yang sangat lemah ($r \approx 0$) menegaskan dominasi faktor lokal (seperti geomorfologi teluk semi-tertutup) yang meredam pengaruh variabilitas iklim global.

Pola hubungan statistik ini terkonfirmasi secara visual melalui Gambar 4. Pada panel (b) Laut Maluku/Seram, sebaran titik data memperlihatkan pola linier yang jelas dengan garis tren regresi yang menurun curam dari zona latar belakang biru (fase La Niña) menuju zona merah muda (fase El Niño). Hal ini kontras dengan panel (a) Teluk Tomini dan (c) Laut Sulawesi, di mana titik-titik data tersebar lebih acak (*scattered*) dan garis regresi cenderung landai, memvalidasi bahwa anomali SST di kedua wilayah tersebut tidak memiliki ketergantungan linier yang kuat terhadap siklus ENSO selama periode pengamatan.

Tren Pemanasan Suhu Permukaan Laut di Kawasan Teluk Tomini dan Sekitarnya

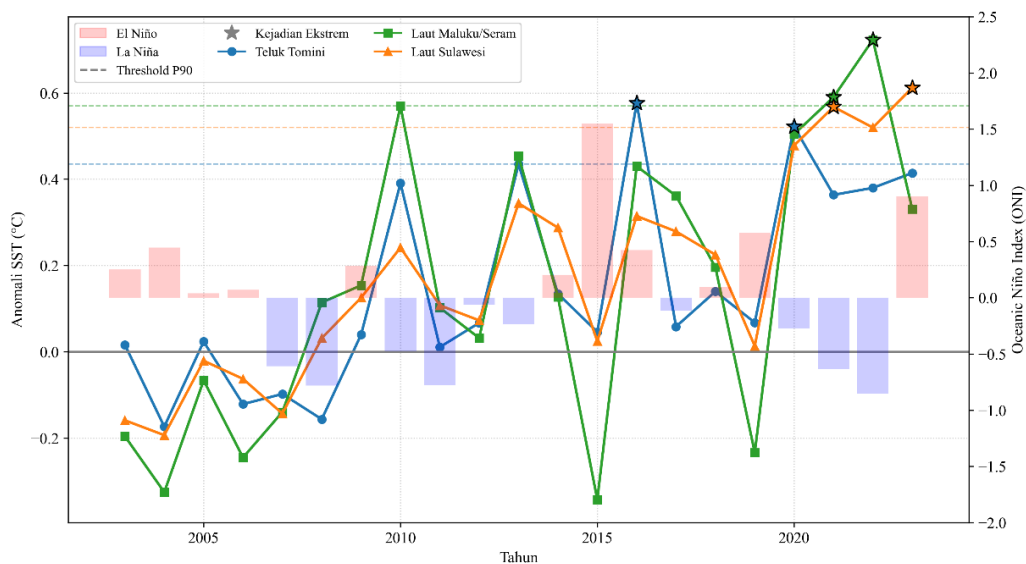
Hasil analisis regresi linier jangka panjang (2003–2023) menunjukkan bahwa seluruh wilayah kajian mengalami tren peningkatan suhu permukaan laut (SST) yang signifikan secara statistik ($p < 0,05$), dengan laju pemanasan yang bervariasi di ketiga wilayah (Tabel 3). Laut Sulawesi mencatat laju pemanasan tertinggi sebesar 0,033 °C/tahun (setara 0,33 °C/dekade), diikuti oleh Laut Maluku/Seram (0,032 °C/tahun) dan Teluk Tomini (0,025 °C/tahun). Laju pemanasan di kawasan ini terindikasi lebih cepat dibandingkan tren rata-rata pemanasan Lautan Indonesia periode decadal 1982–2020 yang dilaporkan oleh Iskandar *et al.* (2020), sebesar $0,19 \pm 0,04$ °C/dekade. Akselerasi pemanasan yang teramati di kawasan timur Indonesia, khususnya di perairan terbuka seperti Laut Sulawesi dan Maluku, yang mendukung hipotesis bahwa perairan tropis tertentu bertindak sebagai "hotspot" yang sangat sensitif terhadap penguatan sinyal perubahan iklim global (Mulyani, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

Tabel 3. Parameter tren linier suhu permukaan laut (SST) tahunan pada tiga wilayah kajian untuk periode 2003–2023.

Wilayah	<i>Slope</i> (°C/tahun)	Intersep	R^2	p -value	Signifikansi
Teluk Tomini	0.025	-21.046	0.463	0.001	Signifikan
Laut Maluku/Seram	0.032	-35.439	0.374	0.003	Signifikan
Laut Sulawesi	0.033	-37.097	0.720	<0.001	Signifikan

Tabel 4. Ambang batas anomali ekstrem (persentil ke-90) dan tahun-tahun kejadian anomali SST tahunan ekstrem di setiap wilayah kajian selama periode 2003–2023.

Wilayah	Ambang ekstrem (persentil 90%, °C)	Tahun-tahun ekstrem	Jumlah kejadian
Teluk Tomini	0.435	2016, 2020	2
Laut Maluku/Seram	0.570	2021, 2022	2
Laut Sulawesi	0.520	2021, 2023	2

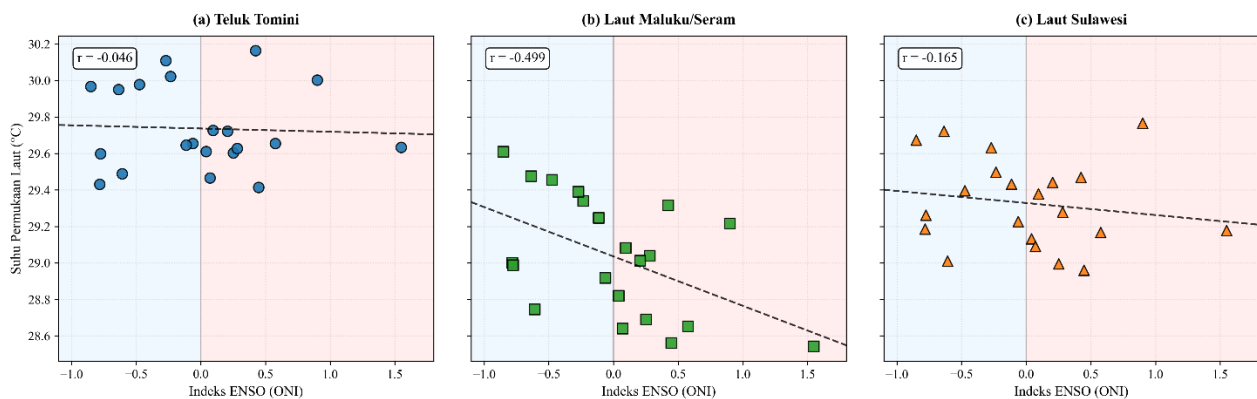


Gambar 3. Variabilitas anomali Suhu Permukaan Laut (SST) tahunan relatif terhadap baseline 2003–2012 di Teluk Tomini, Laut Maluku/Seram, dan Laut Sulawesi (sumbu kiri) yang disandingkan dengan Oceanic Niño Index (ONI) tahunan (sumbu kanan) periode 2003–2023. Grafik batang ONI memperlihatkan fase El Niño (positif) dan La Niña (negatif) yang berkoinsidensi dengan fluktuasi SST. Garis putus-putus menunjukkan ambang batas persentil ke-90, dan simbol bintang (★) menandai tahun-tahun kejadian pemanasan ekstrem.

Secara regional, variasi laju pemanasan ini mencerminkan interaksi kompleks antara penguatan (*forcing*) iklim global dan karakteristik fisik lokal. Laju pemanasan yang tinggi di Laut Maluku/Seram konsisten dengan posisinya sebagai jalur utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang mentransfer massa air hangat dari Pasifik Barat, sehingga sangat responsif terhadap variabilitas termal samudra tersebut (Katavouta *et al.*, 2022). Hal ini diperkuat oleh hasil analisis korelasi (Tabel 5) yang menunjukkan bahwa Laut Maluku/Seram memiliki konektivitas terkuat dengan indeks ENSO ($r = -0.499$, $p < 0.05$). Sebaliknya, laju pemanasan yang sedikit lebih rendah di Teluk Tomini (0,025 °C/tahun) kemungkinan mencerminkan pengaruh dari geomorfologi teluk semi-tertutup. Di wilayah ini, dinamika percampuran massa air internal dan pola sirkulasi angin darat-laut diduga berperan dalam memodulasi atau "memfilter" sebagian sinyal pemanasan eksternal, meskipun secara umum teluk ini tetap mengikuti tren pemanasan sistemik regional (Handoko *et al.*, 2023; Iskandar *et al.*, 2020).

Tabel 5. Koefisien korelasi Pearson (r) antara suhu permukaan laut (SST) tahunan dan indeks ENSO (ONI) pada skala waktu tahun yang sama (lag-0) untuk periode 2003–2023.

Wilayah	Koefisien Korelasi (r)	P-value	Interpretasi
Teluk Tomini	-0.046	0.843	Sangat Lemah / Non-Signifikan
Laut Maluku/Seram	-0.499	0.021	Sedang / Signifikan
Laut Sulawesi	-0.165	0.476	Lemah / Non-Signifikan



Gambar 4. Diagram pencar (scatter plot) hubungan antara suhu permukaan laut (SST) tahunan dan indeks ENSO (ONI) di: (a) Teluk Tomini, (b) Laut Maluku/Seram, dan (c) Laut Sulawesi selama periode 2003–2023. Garis putus-putus menunjukkan tren regresi linier. Latar belakang berwarna biru merepresentasikan fase La Niña (dingin), sedangkan latar belakang merah muda merepresentasikan fase El Niño (hangat). Hanya Laut Maluku/Seram yang menunjukkan pola hubungan linier yang jelas.

Validasi Tren dan Pengamatan Lanjutan 2024–2025

Untuk memvalidasi konsistensi tren pemanasan jangka panjang, dilakukan analisis komparatif antara nilai SST aktual tahun 2024–2025 dengan nilai prediksi yang dihitung menggunakan model regresi linier berbasis data historis 2003–2023. Perbandingan ini (Tabel 6 dan Gambar 5) bertujuan untuk mengevaluasi apakah kondisi suhu terkini konsisten dengan jalur (trajectory) pemanasan yang diproyeksikan model.

Hasil analisis menunjukkan dinamika spasial yang kontras pada tahun 2024. Teluk Tomini mencatat suhu aktual sebesar 30,14 °C, atau lebih tinggi 0,13 °C dibandingkan nilai prediksi tren (30,01 °C). Deviasi positif ini kemungkinan merupakan respon residual terhadap kondisi hangat perairan semi-tertutup pasca El Niño 2023. Sebaliknya, perairan terbuka seperti Laut Maluku/Seram dan Laut Sulawesi pada tahun 2024 justru menunjukkan suhu aktual yang sedikit lebih rendah dari prediksi, dengan deviasi masing-masing -0,08 °C dan -0,15 °C.

Memasuki tahun 2025, seluruh wilayah kajian secara serentak menunjukkan deviasi negatif. Secara visual pada Gambar 5, hal ini terlihat dari posisi simbol bintang (data aktual) di ketiga wilayah yang seluruhnya berada di bawah garis putus-putus (proyeksi tren). Teluk Tomini mencatat deviasi terbesar (-0,15 °C), diikuti oleh Laut Sulawesi (-0,05 °C) dan Laut Maluku/Seram (-0,04 °C). Fenomena deviasi negatif pada 2025 ini mengindikasikan adanya mekanisme pendinginan skala regional—kemungkinan terkait transisi menuju fase La Niña atau IOD negatif—yang mampu meredam sementara laju pemanasan permukaan laut sehingga berada sedikit di bawah garis tren linier dekadal. Temuan ini menegaskan bahwa meskipun tren pemanasan jangka panjang (2003–2023) adalah nyata dan signifikan, variabilitas iklim antartahun tetap memegang peranan krusial dalam memodulasi fluktuasi suhu aktual di sekitar garis tren tersebut.

Anomali SST Ekstrem dan Kaitannya dengan Variabilitas Iklim

Analisis deviasi suhu terhadap baseline klimatologis 2003–2012 memperlihatkan kemunculan sejumlah anomali positif kuat yang diklasifikasikan sebagai kejadian ekstrem berdasarkan ambang persentil ke-90

(Tabel 4). Sebagaimana Sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 3, tahun-tahun ekstrem tersebut—seperti 2016, 2020, 2021, 2022, dan 2023, di mana teramati beriringan dengan periode ketika indeks iklim global (ENSO dan/atau IOD) berada pada fase kuat (Dewi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2024). Keselarasan waktu ini mengindikasikan bahwa anomali panas ekstrem di kawasan ini sekedar fenomena lokal yang terisolasi, melainkan merupakan bagian dari respon regional terhadap variabilitas iklim berskala besar.

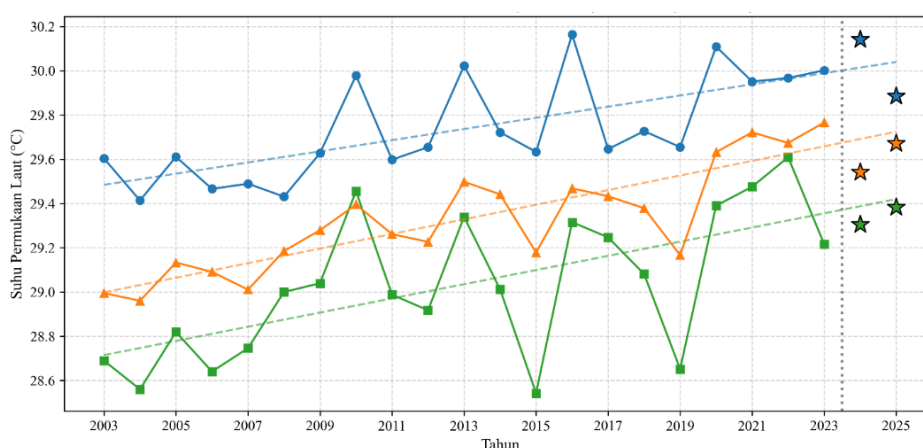
Namun demikian, distribusi kejadian ekstrem ini tidak seragam di ketiga wilayah. Laut Maluku/Seram dan Laut Sulawesi mencatat kejadian ekstrem pada tahun-tahun terakhir (2021–2023), yang konsisten dengan periode La Niña berkepanjangan (Triple-dip La Niña) yang membawa massa air hangat ke Pasifik Barat dan perairan Indonesia timur. Sementara itu, Teluk Tomini mencatat kejadian ekstrem pada tahun 2016 dan 2020, pola yang sedikit berbeda yang menegaskan peran penting faktor lokal. Sebagaimana terungkap dalam analisis korelasi (Tabel 5), respon SST di Teluk Tomini ($r = -0.046$) dan Laut Sulawesi ($r = -0.165$) terhadap ENSO tidak sekuat dan signifikan di Laut Maluku/Seram ($r = -0.499$). Hal ini menjelaskan mengapa dampak termal dari variabilitas iklim global dapat teramplifikasi atau teredam secara berbeda di setiap perairan tergantung pada dinamika oseanografi lokal masing-masing (Amri *et al.*, 2024; Katavouta *et al.*, 2022).

Secara ekologis, anomali ekstrem yang teridentifikasi ini dapat dipandang sebagai sinyal awal kejadian gelombang panas laut (marine heatwave) tahunan. Frekuensi kejadian ekstrem yang meningkat seiring tren pemanasan jangka panjang berpotensi membawa dampak serius bagi ekosistem perairan, termasuk risiko pemutihan karang (coral bleaching), perubahan struktur komunitas plankton, serta pergeseran habitat ikan pelagis ekonomis penting di kawasan Teluk Tomini dan sekitarnya (Jones *et al.*, 2022; Krawczyk *et al.*, 2020).

Tabel 6. Perbandingan nilai SST prediksi (berdasarkan model tren linier 2003–2023) dengan nilai SST aktual pengamatan tahun 2024 dan 2025.

Wilayah	Tahun	Prediksi (°C)	Aktual (°C)	Selisih/Deviasi
Teluk Tomini	2024	30.01	30.14	0.13
	2025	30.04	29.89	-0.15
Laut Maluku/Seram	2024	29.39	29.31	-0.08
	2025	29.42	29.38	-0.04
Laut Sulawesi	2024	29.69	29.54	-0.15
	2025	29.72	29.67	-0.05

(Keterangan: Deviasi positif (+) menunjukkan suhu aktual lebih panas dari prediksi, deviasi negatif (-) menunjukkan lebih dingin).



Gambar 5. Validasi tren suhu permukaan laut (SST). Garis solid menunjukkan data observasi historis (2003–2023) yang digunakan untuk membangun model regresi, sedangkan garis putus-putus merepresentasikan proyeksi tren linier. Simbol bintang (★) menandai data aktual tahun 2024 dan 2025 yang dibandingkan terhadap nilai prediksi tren tersebut.

Heterogenitas Respon Regional SST terhadap Sinyal ENSO

Perbedaan respons termal yang kontras antarwilayah (seperti yang dirangkum dalam Tabel 5 dan Gambar 4) menjadi salah satu temuan kunci dalam penelitian ini. Berbeda dengan asumsi umum bahwa seluruh perairan Indonesia timur merespons ENSO secara seragam, hasil analisis menunjukkan bahwa Laut Maluku/Seram memiliki sensitivitas tertinggi ($r = -0,499$; $p < 0,05$) terhadap indeks ONI. Kuatnya korelasi negatif di wilayah ini mengonfirmasi perannya sebagai jalur utama aliran massa air Indonesian *Throughflow* (Arlindo) cabang timur. Sebagai "zona transmisi" yang terhubung langsung dengan Samudra Pasifik Barat, Laut Maluku/Seram menerima perambatan sinyal termal ENSO dengan distorsi yang minim, sehingga fase El Niño (La Niña) secara konsisten memicu penurunan (peningkatan) suhu permukaan laut yang signifikan (Choi *et al.*, 2020; Krawczyk *et al.*, 2020).

Sebaliknya, lemahnya korelasi yang teridentifikasi di Laut Sulawesi ($r = -0,165$) dan Teluk Tomini ($r = -0,046$) mengindikasikan bahwa variabilitas suhu di kedua wilayah ini tidak dikontrol secara dominan oleh siklus ENSO tahunan. Pada Laut Sulawesi, meskipun merupakan perairan terbuka, kompleksitas dinamika arus regional, seperti interaksi dengan Arus Mindanao dan pusaran arus (eddies) lokal, kemungkinan besar mengaburkan sinyal linear dari Pasifik (Xue & Li, 2023; Zhao *et al.*, 2023). Sementara di Teluk Tomini, respon yang sangat lemah menegaskan dominasi proses lokal. Geomorfologi teluk yang semi-tertutup menyebabkan dinamika suhu lebih banyak ditentukan oleh interaksi atmosfer-laut lokal, pola angin monsun, dan sirkulasi internal teluk, yang bekerja memodulasi atau bahkan meredam pengaruh forcing iklim global (Amri *et al.*, 2024; Katavouta *et al.*, 2022). Dengan demikian, penggunaan indeks ONI sebagai prediktor tunggal variabilitas suhu hanya relevan untuk wilayah terbuka seperti Laut Maluku, namun kurang efektif untuk wilayah kompleks seperti Laut Sulawesi dan Teluk Tomini (Dewi *et al.*, 2020; Mulyani, 2023).

Implikasi terhadap Ekosistem Laut dan Perikanan Tuna

Dari sudut pandang ekologi, tren pemanasan jangka panjang dan keberadaan anomali SST ekstrem yang teridentifikasi di ketiga wilayah kajian berpotensi mengubah stabilitas ekosistem pelagis. Studi di perairan Indonesia timur menunjukkan bahwa kenaikan suhu permukaan yang berkelanjutan sering kali diikuti oleh penguatan stratifikasi kolom air (Hanansyah *et al.*, 2024). Stratifikasi yang semakin kuat dapat menghambat mekanisme pengadukan (mixing) vertikal yang krusial untuk menyuplai nutrisi dari lapisan dalam ke zona eufotik. Dalam jangka panjang, kondisi ini berisiko menurunkan produktivitas primer fitoplankton, yang merupakan basis energi bagi jaring makanan perikanan pelagis (Hersbach *et al.*, 2020; Kwiatkowski *et al.*, 2020).

Secara spesifik bagi perikanan tuna, heterogenitas respon terhadap ENSO yang ditemukan dalam studi ini memiliki implikasi manajemen yang penting. Bagi Laut Maluku/Seram, kuatnya korelasi dengan ENSO mengisyaratkan bahwa indeks iklim global dapat digunakan sebagai indikator awal yang andal untuk memprediksi variabilitas habitat termal tuna. Namun, bagi Teluk Tomini dan Laut Sulawesi, lemahnya pengaruh ENSO menuntut pendekatan prediksi yang lebih berfokus pada pemantauan variabel oseanografi lokal (seperti *chlorophyll-a* dan arus lokal) daripada sekadar mengandalkan indeks iklim global. Peningkatan frekuensi anomali panas ekstrem, seperti yang teramati pada validasi data 2024–2025, juga berpotensi memicu pergeseran jalur (rute) migrasi tuna menjauhi perairan yang terlalu hangat (thermal stress), yang pada akhirnya akan memengaruhi efisiensi penangkapan dan ketahanan pangan masyarakat pesisir di kawasan ini (Wibawa *et al.*, 2021). Temuan ini merekomendasikan perlunya model habitat tuna yang adaptif secara spasial, dengan memperhitungkan bobot pengaruh iklim global dan lokal yang berbeda di setiap wilayah perairan.

Keterbatasan dan Arah Penelitian Lanjutan

Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai tren pemanasan dan respon termal perairan terhadap ENSO, namun memiliki beberapa keterbatasan yang perlu digarisbawahi sebagai konteks bagi pengembangan studi selanjutnya.

Pertama, analisis dalam studi ini difokuskan pada korelasi simultan (simultaneous correlation) pada skala tahunan untuk mengidentifikasi hubungan jangka panjang. Konsekuensinya, dinamika temporal yang lebih halus—seperti variabilitas musiman (monsun barat vs. timur) dan respon tertunda (lagged response) dalam hitungan bulan—belum dieksplorasi secara mendalam. Padahal, sebagaimana dilaporkan oleh Amri *et al.* (2024) dan Handoko *et al.* (2023), variabilitas musiman memegang peranan krusial dalam memodulasi suhu permukaan laut di perairan Indonesia. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk menerapkan

analisis deret waktu resolusi bulanan atau musiman (DJF, MAM, JJA, SON) guna memetakan fase tunda (time-lag) perambatan sinyal panas dari Pasifik ke Teluk Tomini secara lebih presisi.

Kedua, penelitian ini menggunakan ONI sebagai indeks iklim tunggal. Hasil analisis kami yang menunjukkan lemahnya korelasi di Teluk Tomini dan Laut Sulawesi mengindikasikan bahwa indeks global seperti ONI tidak cukup untuk menjelaskan variabilitas suhu di perairan yang didominasi proses lokal. Studi mendatang perlu mengintegrasikan indeks iklim majemuk, termasuk *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan indeks monsun, serta parameter oseanografi lokal seperti arus permukaan dan stratifikasi vertikal, untuk mendapatkan gambaran utuh mengenai mekanisme *forcing* yang bekerja di wilayah kompleks ini (Dewi *et al.*, 2020; Ratnawati *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

Ketiga, validasi awal yang dilakukan terhadap data aktual 2024–2025 menunjukkan adanya deviasi antara prediksi model tren linier dengan kondisi riil di lapangan. Hal ini membuka peluang riset baru untuk mengembangkan model prediksi yang lebih *robust*, misalnya menggunakan pendekatan *machine learning* atau model regresi non-linier, yang mampu mengakomodasi anomali jangka pendek. Di sisi aplikasi praktis, integrasi antara data proyeksi oseanografi ini dengan data tangkapan riil perikanan tuna akan menjadi langkah strategis. Hal ini krusial untuk membangun sistem peringatan dini (*early warning system*) yang adaptif terhadap fenomena gelombang panas laut (*marine heatwave*), guna mendukung keberlanjutan perikanan di kawasan Teluk Tomini dan sekitarnya (Jones *et al.*, 2022; Wibawa *et al.*, 2021).

KESIMPULAN

Penelitian ini mengonfirmasi bahwa kawasan perairan Teluk Tomini dan sekitarnya mengalami tren pemanasan suhu permukaan laut (SST) yang signifikan dan nyata sepanjang periode 2003–2023, dengan laju pemanasan berkisar antara 0,025 hingga 0,033 °C/tahun. Laju pemanasan tertinggi teridentifikasi di perairan terbuka Laut Sulawesi dan Laut Maluku/Seram, yang menegaskan posisi kawasan Indonesia timur sebagai hotspot yang sensitif terhadap penguatan sinyal perubahan iklim global. Sementara itu, Teluk Tomini menunjukkan laju pemanasan yang sedikit lebih lambat, mencerminkan peran geomorfologi teluk semi-tertutup dalam memodulasi transfer panas regional. Analisis korelasi dan validasi data aktual mengungkapkan adanya heterogenitas respon spasial yang kontras. Laut Maluku/Seram teridentifikasi sebagai wilayah dengan konektivitas terkuat terhadap variabilitas ENSO, di mana fase El Niño secara konsisten memicu penurunan suhu yang signifikan. Sebaliknya, respon di Laut Sulawesi dan Teluk Tomini terbukti lemah dan tidak signifikan terhadap indeks ONI tunggal, mengindikasikan dominasi faktor oseanografi lokal. Lebih lanjut, pengamatan data aktual tahun 2024–2025 menunjukkan adanya deviasi suhu yang berada sedikit di bawah garis tren prediksi jangka panjang, yang memvalidasi bahwa variabilitas iklim antartahun tetap berperan krusial dalam meredam atau mengamplifikasi laju pemanasan dekadal. Temuan ini membawa implikasi strategis bagi pengelolaan ekosistem laut dan perikanan pelagis. Mengingat respon terhadap iklim global tidak seragam, strategi adaptasi perikanan tuna di Teluk Tomini tidak dapat sepenuhnya bergantung pada indeks ENSO, melainkan harus berbasis pada pemantauan parameter lokal. Penelitian lanjutan sangat disarankan untuk mengintegrasikan indeks iklim majemuk (seperti IOD dan monsun) serta data oseanografi in-situ (arus dan klorofil-a) guna membangun model prediksi habitat yang lebih presisi dan sistem peringatan dini terhadap potensi gelombang panas laut (*marine heatwave*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ini merupakan bagian dari Penelitian Kolaborasi Dosen-Mahasiswa Dengan Judul “Analisis Temporal Perubahan Parameter Oseanografi di Teluk Tomini dan Dampaknya terhadap Distribusi Ikan Tuna” yang dibiayai melalui dana RAKPT FKTP-UNG Nomor Kontrak 1853/UN47.B10/PT.01.03/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, F., Eladawy, A., & Nakamura, T. 2024. Sea Surface Temperature Budget in Indonesian Seas: The Role of Vertical Turbulent Flux and Its East–west Variations. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1350(1): 12005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1350/1/012005>
- Banzon, V., Smith, T. M., Chin, T. M., Liu, C., & Hankins, W. 2016. A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth System Science Data*, 8(1): 165–176. <https://doi.org/10.5194/essd-8-165-2016>
- Choi, N., Lee, M., Cha, D., Lim, Y., & Kim, K. 2020. Decadal Changes in the Interannual Variability of Heat

- Waves in East Asia Caused by Atmospheric Teleconnection Changes. *Journal of Climate*, 33(4): 1505–1522. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0222.1>
- Dewi, Y. W., Wirasatriya, A., Sugianto, D. N., Helmi, M., Marwoto, J., & Maslukah, L. 2020. Effect of ENSO and IOD on the Variability of Sea Surface Temperature (SST) in Java Sea. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 530(1): 12007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/530/1/012007>
- Espinosa, Z., & Zelinka, M. D. 2024. The Shortwave Cloud-SST Feedback Amplifies Multi-Decadal Pacific Sea Surface Temperature Trends: Implications for Observed Cooling. *Geophysical Research Letters*, 51(18): e2024GL111039. <https://doi.org/10.1029/2024gl111039>
- Febryanti, H. R. 2023. Pendugaan Potensi Lokasi Fishing Ground Ikan Tuna Sirip Kuning (Thunnus Albacares) Berdasarkan Parameter Oseanografi Dengan Sistem Informasi Geografis Di WPP-NRI 572: Perairan Sumatera Barat. Undergraduate Thesis Fakultas Peternakan Universitas Jambi.
- Hanansyah, M. P., Handoko, E. Y., & Muryono, M. 2024. Spatio-Temporal Variation of Chlorophyll-a Around the Flores Sea, Java Sea, and Makassar Strait and Its Relationship With Temperature and Salinity. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1418(1): 12036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1418/1/012036>
- Handoko, E. Y., Syariz, M. A., & Wicaksono, K. W. 2023. Analisis Suhu Permukaan Laut Sawu Tahun 2021 Menggunakan Citra Sentinel-3. *Jurnal Sains Informasi Geografis*, 6(2): 57. <https://doi.org/10.31314/j.sig.v6i2.2403>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, Á., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J. P., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A. J., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. 2020. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Huang, B., Liu, C., Banzon, V., Freeman, E., Graham, G., Hankins, B., Smith, T., & Zhang, H.-M. 2021. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *Journal of Climate*, 34(8): 2923–2939. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0166.1>
- Iskandar, I., Mardiansyah, W., Lestari, D. O., & Masumoto, Y. 2020. What Did Determine the Warming Trend in the Indonesian Sea? *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1): 20. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00334-2>
- Jones, B. L., Unsworth, R. K. F., Nordlund, L. M., Ambo-Rappe, R., Nafie, Y. A. L., Lopez, M. R., Udagedara, S., & Cullen-Unsworth, L. C. 2022. Local Ecological Knowledge Reveals Change in Seagrass Social–Ecological Systems. *Oceans*, 3(3): 419–430. <https://doi.org/10.3390/oceans3030028>
- Kambezidis, H. D. 2024. Atmospheric Processes over the Broader Mediterranean Region: Effect of the El Niño–Southern Oscillation? *Atmosphere*, 15(3): 268. <https://doi.org/10.3390/atmos15030268>
- Kang, S. M., Yu, Y., Deser, C., Zhang, X., Kang, I., Lee, S., Rodgers, K. B., & Ceppi, P. 2023. Global Impacts of Recent Southern Ocean Cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(30): e2300881120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2300881120>
- Katavouta, A., Polton, J. A., Harle, J. D., & Holt, J. 2022. Effect of Tides on the Indonesian Seas Circulation and Their Role on the Volume, Heat and Salt Transports of the Indonesian Throughflow. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 127(8): e2022JC018524. <https://doi.org/10.1029/2022jc018524>
- Krawczyk, H., Zinke, J., Browne, N. K., Struck, U., McIlwain, J. L., O’Leary, M., & Garbe-Schönberg, D. 2020. Corals Reveal ENSO-driven Synchrony of Climate Impacts on Both Terrestrial and Marine Ecosystems in Northern Borneo. *Scientific Reports*, 10(1): 3678. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60525-1>
- Kusnida, D., Subarsyah, S., & Nirwana, B. 2009. Basement Configuration of the Tomini Basin deduced from Marine Magnetic Interpretation. *Indonesian Journal on Geoscience*, 4(4): 269–274. <https://doi.org/10.17014/ijog.4.4.269-274>
- Kwiatkowski, L., Torres, O., Bopp, L., Aumont, O., Chamberlain, M. A., Christian, J. R., Dunne, J. P., Gehlen, M., Ilyina, T., John, J. G., Lenton, A., Li, H., Lovenduski, N. S., Orr, J. C., Palmiéri, J., Santana-Falcón, Y., Schwinger, J., Séférian, R., Stock, C. A., ... Ziehn, T. 2020. Twenty-First Century Ocean Warming, Acidification, Deoxygenation, and Upper-Ocean Nutrient and Primary Production Decline From CMIP6 Model Projections. *Biogeosciences*, 17(13): 3439–3470. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3439-2020>
- Mulyani, A. S. 2023. Literature Study on Conditions of Sea Surface Temperature and Seawater Rise in Indonesia Detected by Remote Sensing. *Suan Sunandha Science and Technology Journal*, 10(2): 186–194. <https://doi.org/10.53848/ssstj.v10i2.390>

- Nissen, C., Timmermann, R., Hoppema, M., Gürses, Ö., & Hauck, J. 2022. Abruptly attenuated carbon sequestration with Weddell Sea dense waters by 2100. *Nature Communications*, 13(1): 3402. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30671-3>
- Petrik, C. M., Stock, C. A., Andersen, K. H., Denderen, P. D. v., & Watson, J. R. 2020. Large Pelagic Fish Are Most Sensitive to Climate Change Despite Pelagification of Ocean Food Webs. *Frontiers in Marine Science*, 7: 588482. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.588482>
- Pratama, G. B., Nurani, T. W., Mustaruddin, M., & Herdiyeni, Y. 2022. Hubungan Parameter Oseanografi Perairan Terhadap Pola Musim Ikan Pelagis Di Perairan Palabuhanratu. *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*, 13(1): 67–78. <https://doi.org/10.24319/jtpk.13.67-78>
- Ratnawati, H. I., Makarim, S., & Yu, W. (2024). A Strange Negative Indian Ocean Dipole (IOD) in 2022. *Bio Web of Conferences*, 106, 3002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410603002>
- Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., & Schlax, M. G. 2007. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20(22): 5473–5496. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>
- Rosalina, D., Rizkiah, R., Handayani, E., Wardono, S., Sutrisno, B. O., Ismail, R. ., Sabilah, N. A., Leilani, A., & Alfira, A. 2025. Pemetaan Sebaran Suhu Permukaan Laut Dan Klorofil-a Menggunakan Data Citra Satelit Aqua Modis Di Perairan Selat Makassar. *Jurnal Kelautan*, 18(1): 31–39.
- Saba, G., Burd, A., Dunne, J. P., Hernández-León, S., Martin, A. H., Rose, K. A., Salisbury, J., Steinberg, D. K., Trueman, C. N., Wilson, R. W., & Wilson, S. E. 2021. Toward a Better Understanding of Fish-based Contribution to Ocean Carbon Flux. *Limnology and Oceanography*, 66(5): 1639–1664. <https://doi.org/10.1002/lno.11709>
- Setiawan, R. Y., & Habibi, A. 2011. Satellite Detection of Summer Chlorophyll-a Bloom in the Gulf of Tomini. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4): 944–948. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2011.2163926>
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction to physical oceanography*. Department of Oceanography Texas A & M University. [https://www.uv.es/hegigui/Kasper/por Robert H Stewart.pdf](https://www.uv.es/hegigui/Kasper/por%20Robert%20H%20Stewart.pdf)
- Suniada, K. I. 2021. Variability Of Sea Surface Temperature At Fisheries Management Area 715 In Indonesia And Its Relation To The Monsoon, ENSO And Fishery Production. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 17(2): 99. <https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2020.v17.a3370>
- Wibawa, B., Fauzi, I., Novianti, D. A., Shabrina, N., Saputra, A. D., & Latief, S. A. 2021. Development of Sustainable Infrastructure in Eastern Indonesia. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 832(1): 12045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/832/1/012045>
- Wills, R. C. J., Dong, Y., Proistosescu, C., Armour, K. C., & Battisti, D. S. 2022. Systematic Climate Model Biases in the Large-Scale Patterns of Recent Sea-Surface Temperature and Sea-Level Pressure Change. *Geophysical Research Letters*, 49(17): e2022GL100011. <https://doi.org/10.1029/2022gl100011>
- Xue, M., & Li, T. (2023). To What Extent Does ENSO Rectify the Tropical Pacific Mean State? *Climate Dynamics*, 61(7–8): 3875–3891. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06750-6>
- Zhang, Y., Wu, J., Zheng, Y., & Luo, J. 2024. Impacts of Atmospheric Internal Variations on the Variability of Sea Surface Temperature Based on the Hydra-SINTEX Model. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 129(9): e2023JD040325. <https://doi.org/10.1029/2023jd040325>
- Zhao, J., Sung, M., Park, J., Luo, J., & Kug, J. 2023. Part I Observational Study on a New Mechanism for North Pacific Oscillation Influencing the Tropics. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 6(1): 15. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00336-z>