

Analisis Perubahan Kedalaman Termoklin, Suhu, dan Salinitas di Samudra Pasifik pada Studi Kasus Kejadian La Niña 2011, Normal 2013, dan El Niño 2015

Nurholis^{1*}, Kunarso¹, Azis Rifai¹, Rima Putri Pertiwi¹, Eko Supriyadi²

¹Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia

²Direktorat Meteorologi Maritim, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)
Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta 10720, Indonesia
Email: *nurholis04@students.undip.ac.id

Abstrak

El Niño–Southern Oscillation secara dominan mengendalikan variabilitas struktur termohalin Samudra Pasifik yang berdampak pada cuaca ekstrem dan ekosistem laut. Studi ini memanfaatkan data Marine Copernicus Global Ocean Physics Reanalysis periode 1993–2021. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi variabilitas termal laut dan mengkaji respons terhadap kedalaman termoklin, suhu, dan salinitas dari kejadian ENSO. Kajian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan algoritma pemrograman berbasis komputasi numerik. Area studi berfokus pada Samudra Pasifik ekuatorial yang merupakan pusat wilayah terjadinya ENSO. Hasil studi menunjukkan bahwa di Pasifik ekuator selama fase La Niña (2011), terjadi pendinginan dengan kedalaman termoklin berdasarkan isotherm 20°C mengalami pendangkalan mencapai 102,83 m yang menunjukkan kemiringan termoklin curam karena pengaruh dari *upwelling* dan penguatan angin pasat. Sebaliknya, selama fase El Niño (2015), terjadi pemanasan dan kedalaman termoklin mengalami pendalaman mencapai 110 m yang disebabkan oleh angin pasat melemah, gelombang Kelvin *downwelling*, dan umpan balik positif *Bjerknes*. Variabilitas salinitas di Pasifik timur ketika La Niña menyebabkan penurunan salinitas permukaan yang tidak terlalu signifikan dari klimatologis (34,94 PSU) menjadi 34,89 PSU akibat transportasi massa air, sedangkan ketika El Niño terjadi penurunan salinitas permukaan yang signifikan dari klimatologis (34,94 PSU) menjadi 34,83 PSU akibat peningkatan presipitasi. Hasil ini menunjukkan sistem fisik utama terjadinya redistribusi massa air selama ENSO yang krusial untuk kajian iklim dan produktivitas biologi.

Kata kunci : ENSO, Termoklin, Suhu, Salinitas, Samudra Pasifik

Abstract

Analysis of Changes in Thermocline Depth, Temperature, and Salinity in The Pacific Ocean in Case Studies of the 2011 La Niña, 2013 Normal and 2015 El Niño Events

The El Niño–Southern Oscillation predominantly controls the variability of the Pacific Ocean's thermohaline structure, impacting extreme weather and marine ecosystems. This study utilizes Marine Copernicus Global Ocean Physics Reanalysis data from 1993 to 2021. The objective of this study is to identify ocean thermal variability and assess the response to thermocline depth, temperature, and salinity of ENSO events. This study employs a quantitative approach using a numerical computation-based programming algorithm. The study area focuses on the equatorial Pacific Ocean, which is the epicenter of the ENSO events. The study results show that in the equatorial Pacific during the La Niña phase (2011), cooling occurred with the thermocline depth based on the 20°C isotherm experiencing shoaling reaching 102.83 m, indicating a steep thermocline slope due to the influence of upwelling and the strengthening of the trade winds. Conversely, during the El Niño phase (2015), there was warming and the thermocline depth deepened to 110 m due to weakening trade winds, Kelvin downwelling waves, and positive Bjerknes feedback. Salinity variability in the eastern Pacific during La Niña caused a less significant decrease in surface salinity from climatological (34.94 PSU) to 34.89 PSU due to water mass transport, while during El Niño there was a significant decrease in surface salinity from climatological (34.94 PSU) to 34.83 PSU due to increased precipitation. These results indicate the main physical system of water mass redistribution during the ENSO, which is crucial for climate research and biological productivity studies.

Keywords : ENSO, Thermocline, Temperature, Salinity, Pacific Ocean

PENDAHULUAN

El Niño–Southern Oscillation (ENSO) adalah variabilitas iklim global yang merepresentasikan variasi musiman hingga antar tahunan suhu permukaan laut dan tekanan atmosfer di Samudra Pasifik ekuatorial dan bagian dalam laut di bawah permukaan (Tan *et al.*, 2025). Fenomena ini terjadi dalam jangka waktu sekitar 2–7 tahun dengan ditandai oleh anomali *sea surface temperature* (SST) (McPhaden *et al.* 2020). Fenomena ENSO memberikan implikasi signifikan terhadap karakteristik oseanografi, lingkungan, dan iklim global termasuk distribusi panas laut, struktur termal kolom air, kelimpahan ekosistem laut, variabilitas termoklin, suhu, salinitas, dan sangat mempengaruhi anomali tingkat presipitasi (L’Heureux *et al.* 2024). Dinamika ENSO diklasifikasikan menjadi fase hangat (El Niño), fase dingin (La Niña) sebagai anomali iklim, dan fase netral atau kondisi normal yang menjadi kontributor utama terhadap variabilitas iklim global (Jia *et al.* 2025; Vialard *et al.* 2025). ENSO memberikan dampak berskala global terhadap kehidupan manusia dan sektor sosio-ekonomi melalui pengaruhnya terhadap pemanasan global akibat efek rumah kaca (Geng *et al.* 2022), pemutihan karang laut, *marine heatwaves* (Cai *et al.* 2021), siklon tropis, bahaya risiko kekeringan, dan banjir (Zhang *et al.*, 2018). Inti fisik dari ENSO berada pada keterkaitan sistem umpan balik skala luas antara dinamika atmosfer dan lautan di kawasan Pasifik tropis, yang memicu pergeseran massa air hangat secara zonal dan disertai dengan perubahan sirkulasi angin pasat, serta struktur termohalin di laut.

Samudra Pasifik tropis merupakan perairan yang mempunyai fenomena oseanografi penting, yakni terjadinya fenomena-fenomena fisik dan dinamis di lautan yang mendukung keberadaan fenomena ENSO. ENSO dikendalikan oleh interaksi antara gelombang Kelvin dan gelombang Rossby yang berdampak pada perubahan sirkulasi atmosfer global, pola variabilitas cuaca, dan variasi kedalaman termoklin (McPhaden *et al.* 2020; Pinault, 2022; Abhik *et al.* 2025; Vialard *et al.* 2025). Menurut Abhik *et al.* (2025), kejadian ENSO dipengaruhi oleh variasi Sirkulasi Walker yang mengatur respons sirkulasi atmosfer zonal terhadap anomali SST di seluruh Pasifik ekuatorial. Sirkulasi Walker melemah selama El Niño dan menguat selama La Niña (Santoso *et al.*, 2019). Perubahan pada permukaan laut selama kejadian ENSO dapat menjalar sampai interior laut melalui dinamika kolom air yang secara khusus teridentifikasi melalui variabilitas lapisan termoklin. Lapisan termoklin merupakan zona transisi vertikal dengan gradien suhu terbesar yang memisahkan lapisan campuran (*mixed layer*) yang hangat di atas dan lapisan dalam (*deep layer*) yang dingin di bawah (McPhaden *et al.*, 2020). Kedalaman termoklin berhubungan dengan fluktuasi suhu secara vertikal yang berubah sangat tajam, sehingga erat kaitannya dengan gradien suhu vertikal maksimum (Romero *et al.*, 2023; Vialard *et al.*, 2025). Garis isoterm 20°C sering digunakan sebagai indikator kedalaman termoklin di Pasifik ekuatorial.

Dampak ENSO terhadap SST telah banyak dikaji seperti penelitian oleh (Wirasatriya *et al.*, 2017) namun respons tiga dimensi dari struktur termohalin laut secara spasial-temporal, terutama variabilitas vertikal dari termoklin, suhu, dan salinitas di Samudra Pasifik ekuatorial masih memerlukan penjelasan yang lebih komprehensif. Pemahaman tentang evolusi spasial dan temporal parameter-parameter ini selama berbagai fase ENSO sangat penting untuk perubahan transportasi panas laut (Cheng *et al.* 2019), memvalidasi model iklim (Liao *et al.*, 2021), dan memprediksi dampak pada produktivitas biologis. Studi sebelumnya oleh Kunarso *et al.* (2012), telah berhasil mengungkapkan hubungan antara ENSO dengan parameter oseanografi seperti suhu dan klorofil-a di perairan regional Indonesia menggunakan indeks iklim (SOI dan anomali SST Niño3.4). Hasil dari penelitian-penelitian tersebut menyatakan bahwa analisis vertikal parameter oseanografi sangat krusial untuk menganalisis keterkaitan antara fenomena iklim global seperti fenomena ENSO dengan kondisi oseanografinya. Namun, fokus analisis yang komprehensif pada dinamika kolom air di pusat wilayah pembentuk ENSO, yaitu Samudra Pasifik ekuatorial masih terbatas. Pengkajian mendalam terkait bagaimana termoklin, suhu, dan salinitas merespons secara dinamis terhadap setiap fase ENSO akan memberikan pengetahuan mengenai mekanisme fisik yang mengendalikan stratifikasi dan sirkulasi laut di kawasan Pasifik.

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, penelitian ini mempunyai tujuan untuk menganalisis variabilitas spasial dan temporal dari kedalaman termoklin di Samudra Pasifik ekuatorial selama fase El Niño, La Niña, dan kondisi normal. Kemudian mengkaji struktur vertikal suhu dan salinitas, serta perubahannya yang terkait dengan osilasi ENSO. Selanjutnya dilakukan kuantifikasi perbedaan karakteristik termohalin tersebut antara periode ENSO yakni El Niño (tahun 2015), La Niña (tahun 2011), serta kondisi normal (tahun 2013). Mengingat terjadinya peningkatan emisi gas rumah kaca antropogenik yang cenderung semakin meningkat, sehingga pemahaman ini tidak hanya krusial untuk meningkatkan prediktabilitas iklim tetapi juga menjadi informasi bagi pengelolaan lingkungan dan sumber daya alam berkelanjutan khususnya di bidang kelautan, termasuk sektor perikanan, keanekaragaman hayati, dan membantu mengurangi risiko bencana.

MATERI DAN METODE PENELITIAN

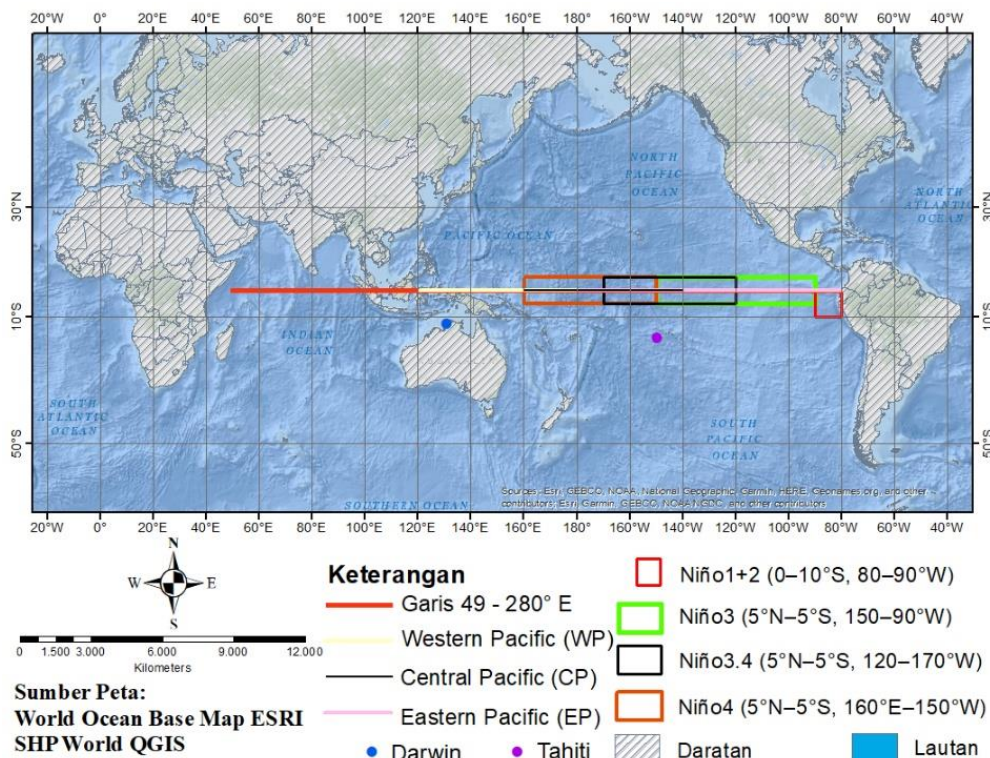
Materi Penelitian

Penelitian memanfaatkan data Suhu (Satuan: °C) dan Salinitas (Satuan: *Practical Salinity Unit* - PSU) yang bersumber dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), khususnya produk *Global Ocean Physics Reanalysis* (GLORYS12V1) yang diperoleh dari model oseanografi numerik yakni *Nucleus for European Modelling of the Ocean* (NEMO). Data reanalisis ini mempunyai resolusi spasial 0,083° x 0,083° (sekitar 9 km x 9 km) dan memberikan cakupan global secara historis untuk variabel fisika laut. Resolusi data yang digunakan berupa temporal bulanan dengan periode dari 1 Januari 1993–1 Juni 2021. Wilayah penelitian dari garis *longitude*: 49°E–280°E dan garis *latitude*: garis ekuatorial (0°). Analisis vertikal dilakukan dari dekat permukaan (0,49 meter) hingga kedalaman <500 meter untuk mencakup variabilitas di lapisan campuran (*mixed layer*) dan lapisan termoklin. Acuan klasifikasi fase ENSO dari nilai ONI yang bersumber dari NOAA Climate Prediction Center (<https://ggweather.com/enso/oni.htm>). Untuk menganalisis dampak ENSO, dipilih tiga tahun representatif yang masing-masing menggambarkan fase El Niño, La Niña, dan normal yaitu 2015 (El Niño sangat kuat), 2011 (La Niña kuat), dan 2013 (kondisi normal). Pemilihan tahun tersebut didasarkan pada nilai *Oceanic Niño Index* (ONI) yang konsisten menunjukkan intensitas dan durasi setiap fase, sehingga memungkinkan perbandingan yang jelas terhadap kondisi klimatologi.

Area Studi

Studi ini berfokus pada Samudra Pasifik ekuatorial, yakni wilayah inti terjadinya kejadian ENSO (Gambar 1). Domain studi mencakup area dari 120°BT hingga 80°BB (atau 120°E–280°E dalam notasi bujur timur) di sepanjang ekuator (0°LU). Guna mendeteksi respons yang berbeda terhadap fase-fase ENSO, area studi dibagi menjadi tiga wilayah utama berdasarkan karakteristik oseanografinya:

1. Pasifik Barat/*Western Pacific* (WP): 120°BT–180°BT (120°E–180°E), terkait dengan *Western Pacific Warm Pool* (WPWP).
2. Pasifik Tengah/*Central Pacific* (CP): 160°BT–220°BT (160°E–220°E), sering menjadi pusat pergeseran pemanasan selama kejadian El Niño Modoki.
3. Pasifik Timur/*Eastern Pacific* (EP): 180°BT–80°BB (180°E–280°E), terkait dengan *Cold Tongue* (CT) di ekuator.



Gambar 1. Area studi

Metode Pengolahan Data

Penelitian ini mengimplementasikan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan algoritma pemrograman berbasis komputasi numerik untuk menganalisis variabilitas termal bawah permukaan laut di Samudra Pasifik ekuatorial. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software* MATLAB 2024a untuk menentukan kedalaman lapisan termoklin, dimana matriks profil suhu vertikal diekstraksi secara zonal untuk mengukur kedalaman termoklin yang didefinisikan sebagai kedalaman isotherm 20°C merujuk pada batas lapisan campuran (*mixed layer*) dan volume air hangat (Santoso *et al.*, 2017). Analisis statistik dilakukan untuk mengkomputasi anomali suhu dan standar deviasi kedalaman termoklin terhadap rata-rata klimatologis periode 1993–2021 (29 tahun) untuk menentukan pola asimetri zonal termoklin antar fase ENSO. Studi kasus juga dilakukan pada El Niño sangat kuat (2015), fase La Niña kuat (2011), dan fase normal/kondisi netral (2013).

Data suhu dan salinitas temporal bulanan bersumber dari CMEMS untuk periode 1993–2021 dengan format *Network Common Data Form version 4* (NetCDF-4) ekstensi .nc digunakan sebagai data input. Data klimatologi bulanan dihitung dari periode 29 tahun sebagai kondisi *baseline*. Rata-rata klimatologi untuk setiap bulan k (misalnya: Januari, Februari, dan Maret - JFM) di komposit menjadi data bulanan klimatologi dengan mengelompokkan data SST mengacu pada persamaan (Wirasatriya *et al.*, 2017):

$$\bar{X}_k(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i(x, y, t)$$

Keterangan: $\bar{X}_k(x, y)$ adalah nilai klimatologi untuk bulan k pada posisi (x, y) ; n adalah jumlah tahun dalam periode komposit (29 tahun); $i = 1$ adalah periode pengamatan ke- i pada bulan komposit; dan $X_i(x, y, t)$ adalah data bulanan ke- i komposit pada posisi bujur (x), lintang (y), dan waktu (t).

Salah satu indikator utama untuk mendeteksi peristiwa El Niño dan La Niña adalah melalui pemantauan nilai ONI. ONI dapat digunakan untuk menunjukkan kondisi nilai anomali SST dengan pusat anomali berada di wilayah Niño3.4 (Gambar 1). Indeks Niño3.4 adalah rata-rata anomali SST di wilayah Pasifik ekuatorial tengah hingga timur (5°S hingga 5°N, 170°W hingga 120°W), dimana atmosfer global secara umum merespons kuat terhadap variasi SST dan digunakan sebagai indeks utama untuk prakiraan operasional ENSO (Santoso *et al.*, 2017). Menurut Glantz & Ramirez. (2020), ONI ditentukan berdasarkan anomali SST di wilayah Niño3.4 yang bergerak selama 3 bulan berdasarkan periode dasar 30 tahun yang diperbarui setiap 5 tahun. Menurut L'Heureux *et al.* (2024), klasifikasi fase ENSO berdasarkan nilai ONI menggunakan ambang batas sebagai berikut: anomali nilai ONI kurang dari -0,5°C yakni kondisi fase La Niña (*cooling*), nilai ONI berada pada interval -0,5°C sampai 0,5°C yakni kondisi normal atau netral, dan nilai ONI lebih dari +0,5°C yakni kondisi fase El Niño (*warming*) selama minimal 5 musim berturut-turut yang saling tumpang tindih.

Gradien suhu antara dua level kedalaman yang berurutan dihitung untuk setiap profil menggunakan persamaan (Song *et al.*, 2007; Kurnarso *et al.*, 2012):

$$G_j = \frac{T_{j+1} - T_j}{D_{j+1} - D_j}$$

Keterangan: G_j = gradien suhu vertikal terhadap kedalaman j dan $j+1$ (°C/m); T_j = suhu pada kedalaman D_j (°C); T_{j+1} = suhu pada kedalaman D_{j+1} (°C); D_j dan D_{j+1} = kedalaman perairan berturut-turut (m).

Kedalaman termoklin diidentifikasi sebagai kedalaman dimana gradien suhu vertikal mencapai nilai maksimum. Menurut Romero *et al.* (2023), menyatakan bahwa secara umum kedalaman gradien suhu vertikal maksimum merupakan kedalaman dari termoklin. Batas antara lapisan campuran (*mixed layer*) dan lapisan termoklin ditentukan mengacu pada kedalaman suhu air mencapai 20°C. Hal ini merujuk pada Santoso *et al.* (2017), yang menyatakan bahwa volume air hangat atau yang biasanya disebut *Warm Water Volume* (WWV) menggunakan sumber massa air pada batas tajam yang memisahkan perairan atas yang hangat dari perairan yang lebih dalam yang dingin (biasanya ditandai oleh isotherm 20°C). Dalam konteks ini, ditentukan nilai gradien suhu vertikal ($\partial T(z)/\partial z$) yang maksimum di dalam suatu kolom air yakni perubahan suhu mencapai $\geq 0,05^\circ\text{C}/\text{m}$. Kedalaman termoklin mengacu pada (Stern, 1975; Kurnarso *et al.*, 2012) dapat di rumuskan sebagai:

$$H = \{ \Delta T / (\max \partial T(z) / \partial z) \}$$

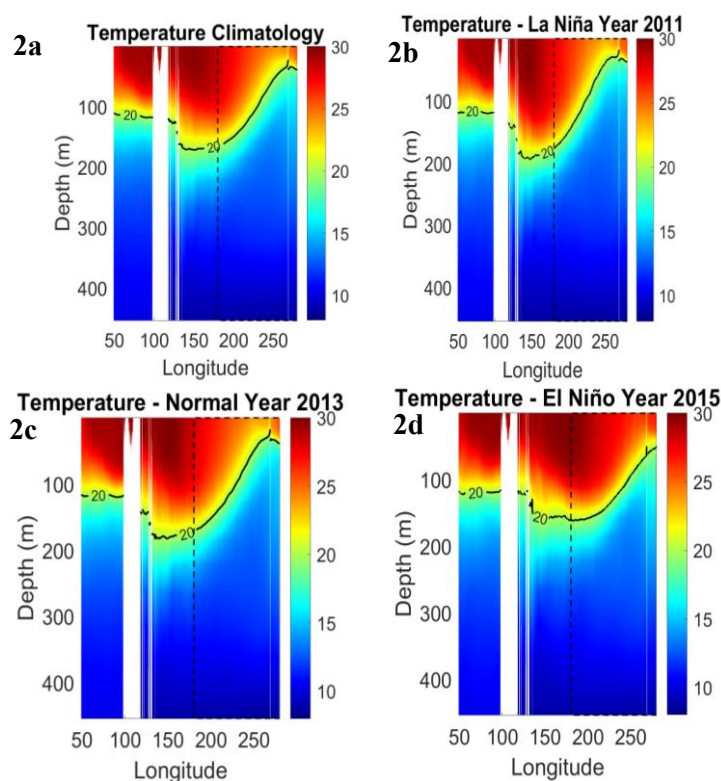
Keterangan: H adalah kedalaman lapisan termoklin; ΔT adalah gradien suhu; $\partial T(z)/\partial z$ adalah perubahan suhu terhadap kedalaman ($\max dT/dz$); Max: mencari nilai maksimum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Distribusi Gradien Suhu Secara Vertikal

Profil transek suhu pada kedalaman termoklin yang didekati dengan isotherm 20°C (*Depth of 20°C isotherm – D20*) menunjukkan variabilitas yang signifikan sebagai respons terhadap fase ENSO (Gambar 2). Fenomena ENSO terjadi karena interaksi antara samudra (El Niño/SST) dan atmosfer (*Southern Oscillation*) yang mencakup tekanan SOI dan angin pasat yang terjadi secara periodik dan berhubungan dengan kekuatan dari Sirkulasi Walker di Samudra Pasifik tropis (Zhang *et al.*, 2018; L’Heureux *et al.*, 2024). El Niño terkait dengan Osilasi Selatan mempunyai karakteristik sebagai perbedaan tekanan udara antara wilayah Tahiti (EP) dan Darwin (WP) (McPhaden *et al.*, 2020; Ávila *et al.*, 2026) yang memiliki hubungan erat dengan angin pasat karena bagian penggerak utama variabilitas sistem Sirkulasi Walker. Akibat dari adanya angin pasat yang bergerak karena perbedaan dari gaya gradien tekanan tersebut sehingga terbentuklah Sirkulasi Walker (Pinault, 2022). Pada fase El Niño tekanan rendah teramati di wilayah Tahiti, sedangkan tekanan di Darwin (Australia) lebih tinggi dari normal. Hal sebaliknya akan terjadi ketika fase La Niña.

Guna memahami mekanisme perkembangan dan peluruhan ENSO, penting untuk mengkaji evolusi anomali suhu bawah permukaan karena anomali tersebut menyediakan kondisi kandungan panas laut melalui *recharge* dan *discharge* (Xue & Kumar, 2017). Menurut Tan *et al.* (2025), proses *recharge* dan *discharge* air laut di Pasifik ekuatorial dikaitkan dengan *cyclic evolution* dari ENSO dan diwakili oleh indeks volume air hangat (WV), yang didefinisikan sebagai anomali rata-rata bulanan dari kedalaman isotherm 20°C (D20). Berdasarkan hasil analisis didapatkan bahwa secara klimatologis (periode 1993–2021), rata-rata kedalaman termoklin di sepanjang Pasifik ekuator berada pada 100 meter (Gambar 2a). Sementara itu, selama kejadian El Niño sangat kuat (2015), kedalaman termoklin rata-rata mengalami pendalaman menjadi 110 meter (Gambar 2d). Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa fase El Niño (2015) di Pasifik ekuator, terjadi anomali pemanasan yang sangat signifikan dengan rata-rata positif sebesar +0,962°C dan nilai maksimum mencapai +4,728°C (Gambar 2d). Anomali positif (+) yang ekstrem ini menegaskan intensitas peristiwa El Niño (2015) sebagai salah satu yang terkuat dalam sejarah (Xue & Kumar, 2017; Santoso *et al.*, 2019).



Gambar 2. Transek kedalaman suhu sekitar ekuator pada 4 kondisi. Area putih menyatakan keberadaan daratan, garis putus-putus menyatakan letak Samudra Pasifik timur, sedangkan garis hitam solid menyatakan batas *isotherm* pada suhu 20°C (D20). Satuan suhu dalam (°C) dan variabel suhu: thetao. Sumber data berasal dari CMEMS dengan resolusi temporal bulanan

Anomali Pemanasan di Pasifik ekuator selama El Niño dihubungkan dengan Sirkulasi Walker yang lebih lemah dari kondisi netral yang teridentifikasi dengan melemahnya angin pasat di sepanjang ekuator, tekanan atmosfer rendah, dan termoklin yang dalam di Pasifik timur (Gambar 2d). Hal ini diperkuat oleh kajian (Cai *et al.*, 2021; Pinault, 2022; Abhik *et al.*, 2025; Jia *et al.*, 2025) yang menyatakan bahwa peningkatan anomali SST di Pasifik ekuatorial tengah dan timur berinteraksi dalam umpan balik positif *Bjerknes*, dimana anomali SST selama fase El Niño akan melemahkan gradien SST zonal barat-timur ekuatorial yang pada akhirnya melemahkan angin pasat, memperkuat anomali angin barat, dan memperdalam termoklin. Pada puncak kejadian El Niño, anomali angin barat skala global mendorong air hangat menjauh dari Indonesia yang menyebabkan penurunan suhu laut dan pendangkalan termoklin di Pasifik barat yang berkontribusi pada terjadinya *upwelling* dan kondisi kekeringan atau musim kemarau di wilayah Indonesia.

Selanjutnya ketika fase La Niña (2011), kedalaman termoklin rata-rata lebih dangkal dibandingkan fase El Niño yaitu tercatat 102,83 meter yang merepresentasikan termoklin menjadi curam (Gambar 2b). Pada fase La Niña (2011) terjadi anomali pendinginan (negatif) dengan rata-rata sebesar $-0,202^{\circ}\text{C}$ dan nilai minimum mencapai $-1,725^{\circ}\text{C}$ di sepanjang Pasifik ekuator. Menurut Hu *et al.* (2017), anomali SST yang dingin di Pasifik mengakibatkan peningkatan gradien SST zonal yang terkait dengan peningkatan tegangan angin permukaan dan penguatan Sirkulasi Walker, serta peningkatan kemiringan termoklin. Hal tersebut didukung oleh McPhaden *et al.* (2020), yang menegaskan bahwa ketika fase La Niña akan menciptakan kemiringan yang lebih curam pada termoklin. Kondisi ini dipengaruhi oleh angin pasat menguat yang mendorong akumulasi massa air hangat lebih kuat ke arah Pasifik barat yang memicu *upwelling* yang masif di Pasifik timur. Akibatnya, termoklin menjadi sangat dangkal di Pasifik timur karena pengaruh *upwelling* yang intensif dan terjadi pendalaman di Pasifik barat karena penumpukan massa air hangat. Sehingga lapisan termoklin naik ke permukaan di sebagian besar area, khususnya terlihat dengan jelas di bagian Pasifik timur (Gambar 2b). Dengan kata lain, hembusan angin barat cenderung terjadi lebih sering selama fase El Niño dan hembusan angin timur terjadi lebih sering selama fase La Niña (McPhaden *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2025). Menurut Timmermann *et al.* (2018), anomali angin ekuator barat (timur) menghasilkan gelombang Kelvin yang menyebabkan *downwelling* (*upwelling*), yang memperdalam (mendangkal) termoklin di Pasifik timur dan mengurangi (meningkatkan) efisiensi *upwelling* klimatologis. Pernyataan tersebut didukung oleh Tan *et al.* (2025), yang menyatakan bahwa indeks positif (negatif) mewakili aktivitas gelombang Kelvin *downwelling* (*upwelling*), yang mendukung perkembangan El Niño (La Niña). Sementara itu, ketika fase normal (2013) menghasilkan rata-rata kedalaman termoklin mencapai 102,74 meter (Gambar 2c). Pada fase tersebut menghasilkan anomali suhu rata-rata mendekati nol ($+0,016^{\circ}\text{C}$) yang mengindikasikan keseimbangan termal tanpa gangguan dinamis seperti gelombang Kelvin dan gelombang Rossby yang signifikan yang biasanya memicu terjadinya anomali suhu ekstrem dan penyesuaian termoklin (Wang, 2018; Pinault, 2022).

Analisis gradien suhu vertikal yang mendefinisikan kekuatan termoklin, menunjukkan nilai rata-rata sebesar $0,126^{\circ}\text{C}/\text{m}$ pada rata-rata kedalaman termoklin 113,60 meter. Nilai gradien suhu vertikal ini merepresentasikan tingkat stratifikasi atau kestabilan kolom air, dimana angka yang tinggi mengindikasikan adanya transisi suhu yang drastis. Semakin tinggi gradien suhu vertikal maka kolom air cenderung semakin stabil. Lapisan ini berfungsi sebagai penghalang efektif terhadap pencampuran vertikal antara lapisan permukaan yang hangat dan lapisan dalam yang dingin, yang memiliki implikasi penting bagi proses biogeokimia dan produktivitas biologis di lautan melalui pertumbuhan fitoplankton pada proses naiknya massa air laut (*upwelling*) yang kaya nutrisi seperti nitrat dan fosfat ke permukaan (Sprintall *et al.*, 2019).

Analisis Profil Vertikal Suhu

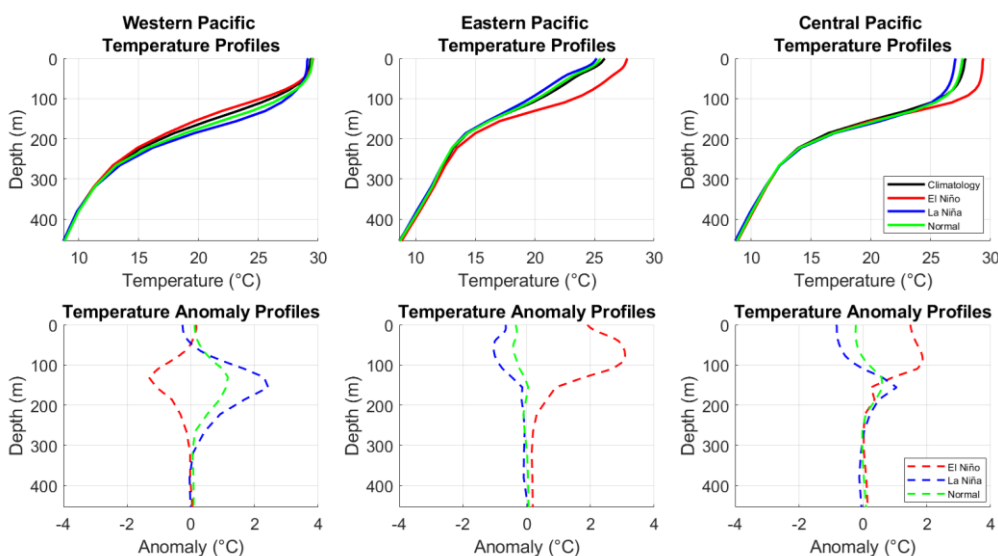
Profil suhu secara vertikal merepresentasikan secara visual terkait variabilitas suhu terhadap kedalaman. Variabilitas suhu laut dapat diakibatkan oleh pengaruh dari perbedaan kedalaman penetrasi matahari yang memengaruhi distribusi suhu lapisan atas sehingga memengaruhi *sea surface temperature* (SST) serta kandungan panas laut. Kedalaman penetrasi bergantung pada konsentrasi klorofil (Gupta *et al.*, 2024). Penetrasi cahaya akan cenderung mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kedalaman, sehingga seiring bertambahnya kedalaman maka akan menciptakan zona disfotik yang mempunyai intensitas cahaya rendah sampai zona afotik dengan kondisi gelap total tanpa adanya cahaya matahari pada kedalaman ekstrem.

Berdasarkan hasil analisa anomali suhu vertikal secara regional, terlihat adanya asimetri termal yang jelas antara wilayah EP, CP, dan WP yang berkaitan dengan fase ENSO pada setiap wilayah (Gambar 3). Di wilayah EP dan CP pada saat fase El Niño (2015) menunjukkan peningkatan suhu (terjadi pemanasan) dengan

rata-rata anomali positif (+) secara berturut-turut sebesar $+1,926^{\circ}\text{C}$ dan $+1,246^{\circ}\text{C}$, sedangkan di wilayah WP menunjukkan pola yang berkebalikan. Saat fase El Niño (2015), di wilayah WP justru mengalami anomali negatif (-) yang menunjukkan terjadi pendinginan dengan rata-rata anomali mencapai $-0,102^{\circ}\text{C}$ yang ditandai oleh menipisnya kolam air hangat (*warm pool*) karena berpindah ke arah timur. Sebaliknya, pada fase La Niña (2011), wilayah EP dan CP mengalami anomali negatif (terjadi pendinginan) dengan nilai anomali rata-rata secara berturut-turut mencapai $-0,618^{\circ}\text{C}$ dan $-0,474^{\circ}\text{C}$, yang merepresentasikan penguatan *upwelling* akibat intensifikasi angin pasat timur, sedangkan wilayah WP menunjukkan anomali positif (terjadi pemanasan) dengan nilai anomali sebesar $+0,242^{\circ}\text{C}$. Peningkatan suhu (pemanasan) di wilayah WP menunjukkan penumpukan massa air panas sebagai *warm pool*. Hal tersebut selaras dengan kajian Jin *et al.* (2024), yang menyatakan bahwa variasi kecenderungan kandungan panas laut (*Ocean Heat Content Tendency* – OHCT) di WP sangat konsisten dengan perubahan transportasi panas laut (*Ocean Heat Transport* – OHT). Variabilitas WPWP mendapatkan panas dari transportasi panas ke arah barat di batas timur oleh arus ekuator utara dan selatan atau yang disebut dengan *North Equatorial Current* (NEC) dan *South Equatorial Current* (SEC). Kedua arus tersebut membawa air hangat yang mengalir menuju WP dan terjadi penumpukan panas di WPWP. Sehingga, penumpukan massa air hangat di bagian WP ini meningkatkan kedalaman lapisan campuran (*mixed layer*) dan menekan lapisan termoklin lebih dalam. Fenomena ini berkaitan dengan mekanisme yang konsisten dengan teori pengisian ulang (*recharge*) panas ekuatorial (Timmermann *et al.*, 2018; Wang, 2018).

ENSO berperan sebagai pengatur penumpukan panas di Pasifik dan adanya pelepasan dan pengisian ulang *Ocean Heat Content* – OHC (Cheng *et al.*, 2019). Teori pengisian ulang (*recharge*) berkaitan dengan osilasi kandungan panas laut dengan ditandai oleh akumulasi panas di ekuator yang terjadi secara berkelanjutan selama siklus ENSO. Sebelum fase El Niño terjadi *recharge* (*Warm Water Volume* - WWV meningkat), kemudian selama tahap perkembangan dan fase puncak El Niño terjadi penurunan kuat kandungan panas atau pelepasan (*discharge*), dan pengisian ulang selama fase puncak La Niña (Cheng *et al.*, 2019; Vialard *et al.*, 2025; Tan *et al.*, 2025).

Ketidakeimbangan di setiap regional (EP, CP, dan WP) antara fase El Niño dan fase La Niña ini menunjukkan fenomena asimetri ENSO. Kondisi ini diperkuat oleh Guan *et al.* (2019), yang menegaskan bahwa kejadian yang berhubungan dengan fenomena El Niño dan La Niña diakibatkan oleh mekanisme umpan balik samudra terhadap asimetri ENSO. Sementara itu, fase normal di wilayah WP, anomali suhu positif mencapai $+0,309^{\circ}\text{C}$ merepresentasikan wilayah Indo-Australia sebagai *Western Pacific Warm Pool* (WPWP) yang terbentuk akibat transportasi massa air hangat oleh Sirkulasi Walker. Berbanding terbalik dengan wilayah EP menunjukkan anomali negatif sampai $-0,252^{\circ}\text{C}$ dan di wilayah CP yang menunjukkan anomali negatif mencapai $-0,069^{\circ}\text{C}$, yang mengindikasikan *Cold Tongue* (CT) di ekuator khususnya di Pasifik timur akibat fenomena *upwelling* yang intensif. Dengan demikian, wilayah CT menghangat secara signifikan selama fase El Niño di wilayah Pasifik timur dan mendingin selama fase La Niña.

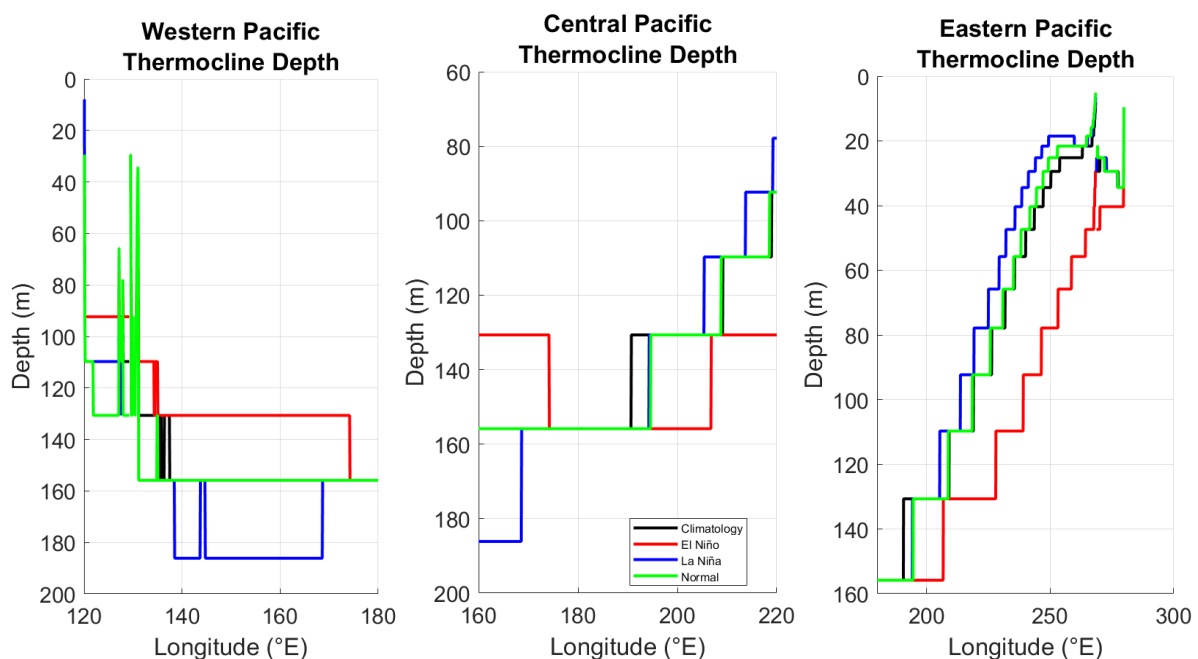


Gambar 3. Profil Vertikal Suhu Regional (WP, EP, dan CP)

Plot Perbandingan Kedalaman Termoklin

Plot perbandingan kedalaman termoklin pada Gambar 4 menunjukkan perubahan struktur termal laut secara spasial pada kondisi ENSO. Meskipun di wilayah EP bervariasi secara spasial, posisi termoklin saat El Niño (garis merah) secara konsisten berada jauh lebih dalam dibandingkan kondisi klimatologis (garis hitam), La Niña (garis biru), dan normal (garis hijau), terutama di kawasan sekitar garis bujur 210°E–280°E. Sementara itu, termoklin di wilayah EP pada fase La Niña (garis biru), menunjukkan kedalaman yang lebih dangkal dibandingkan termoklin kondisi klimatologis, El Niño, dan kondisi normal (ditunjukkan garis biru berada paling atas). Termoklin yang dangkal di EP pada fase La Niña mempermudah terjadinya fenomena *upwelling* dari bawah permukaan ke permukaan dimana nutrien terangkat ke permukaan mendekati zona eufotik. Sebaliknya, di wilayah WP menunjukkan fenomena berlawanan. Pada saat El Niño, termoklin di WP mengalami pendangkalan, karena massa air hangat tersebut terbuang (*discharge*) ke arah timur. Perubahan pola kedalaman ini menegaskan adanya perubahan kemiringan termoklin yaitu saat fase El Niño, kemiringan termoklin menjadi lebih landai di sepanjang Pasifik, sedangkan saat fase La Niña, kemiringan termoklin menjadi lebih curam dengan perbedaan kedalaman yang signifikan antara Pasifik barat dan Pasifik timur (Timmermann *et al.*, 2018; Cheng *et al.*, 2019).

Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa di wilayah WP, saat fase La Niña (2011), kedalaman termoklin mencapai nilai rata-rata 161,9 meter, sedangkan ketika fase El Niño (2015) nilai rata-rata kedalaman termoklin tercatat 124,4 meter. Termoklin menjadi lebih dalam ketika La Niña ini menunjukkan fase pengisian panas di kolam air hangat (*warm pool*) di Pasifik barat. Sebaliknya, di wilayah EP selama fase La Niña (2011) mengalami pendangkalan termoklin dengan kedalaman mencapai 72,9 meter, sedangkan saat fase El Niño (2015) terjadi pendalaman termoklin signifikan dengan kedalaman mencapai 107,3 meter. Pada wilayah CP saat fase La Niña (2011), rata-rata kedalaman termoklin tercatat 142,3 meter, sedangkan saat fase El Niño (2015) kedalaman termoklin rata-rata mencapai 144,3 meter. Saat fase El Niño di Pasifik timur terjadi pendalaman termoklin akibat lapisan dingin menekan ke kedalaman yang lebih dalam, sehingga menghambat terjadinya fenomena *upwelling*, dan memperkuat anomali suhu yang panas. Hal ini selaras dengan kajian oleh Geng *et al.* (2024), yang menyatakan bahwa penurunan angin pasat terkait dengan melemahkan *upwelling* dan memperdalam termoklin di Pasifik timur ekuatorial. Dengan demikian, di wilayah EP menunjukkan bahwa termoklin saat El Niño lebih dalam dibandingkan termoklin saat fase La Niña, sedangkan di wilayah WP menunjukkan termoklin saat fase La Niña lebih dalam dibandingkan termoklin saat fase El Niño.

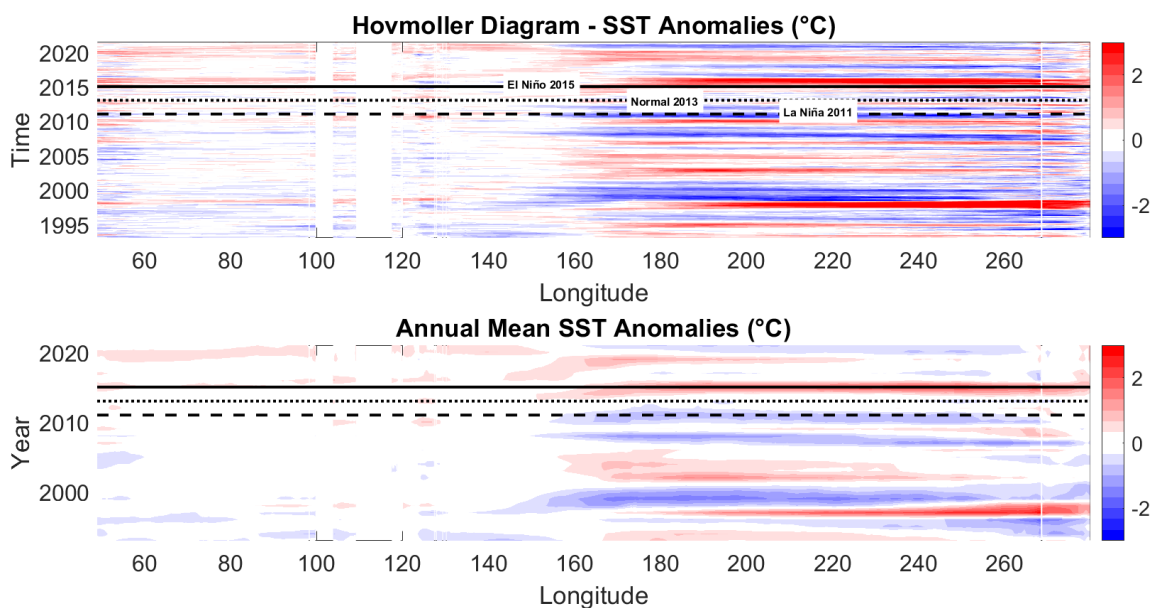


Gambar 4. Kedalaman Termoklin Regional (WP, CP, dan EP)

Berdasarkan analisis kedalaman termoklin dan anomali suhu laut ketika fase normal, menunjukkan bahwa termoklin di Pasifik barat mengalami pendalaman (*deepening*) termoklin dengan kedalaman mencapai +148,9 meter. Kondisi ini mencegah pendinginan permukaan dan menjaga keseimbangan *Western Pacific* sebagai *Warm Pool*. Pada fase normal, terjadinya perbedaan gradien tekanan udara di Tahiti (EP) lebih tinggi dibandingkan di Darwin/Indo-Australia (WP). Sementara itu, pada fase normal di Pasifik timur menunjukkan pendangkalan (*shoaling*) termoklin dengan kedalaman rata-rata mencapai +79,1 meter. Sebagaimana dinyatakan oleh Vialard *et al.* (2025), bahwa pada fase normal, termoklin menjadi lebih dangkal di Pasifik timur dan mengalami pendalaman di Pasifik barat. Termoklin yang dangkal di wilayah EP karena pengaruh dari angin pasat yang menyebabkan massa air yang hangat di EP tertransport ke arah barat atau di wilayah WPWP sehingga di wilayah EP terjadi kekosongan massa air. Massa air dingin yang kaya nutrisi dan klorofil-a dari lapisan dalam akan terangkat ke lapisan permukaan untuk mengisi kekosongan massa air sehingga terjadi fenomena *upwelling*. Arus bawah permukaan ekuator atau *Equatorial Undercurrent* (EUC) mengangkut air dingin dari bawah permukaan yang memasok air ke wilayah *upwelling*. Arus ini berperan dalam iklim dan biogeokimia regional, melalui pengangkutan air dingin yang kaya nutrisi ke permukaan dalam jumlah besar yang memberi suplai ke wilayah *upwelling* yang disebut *Cold Tongue* (Quintana *et al.*, 2021).

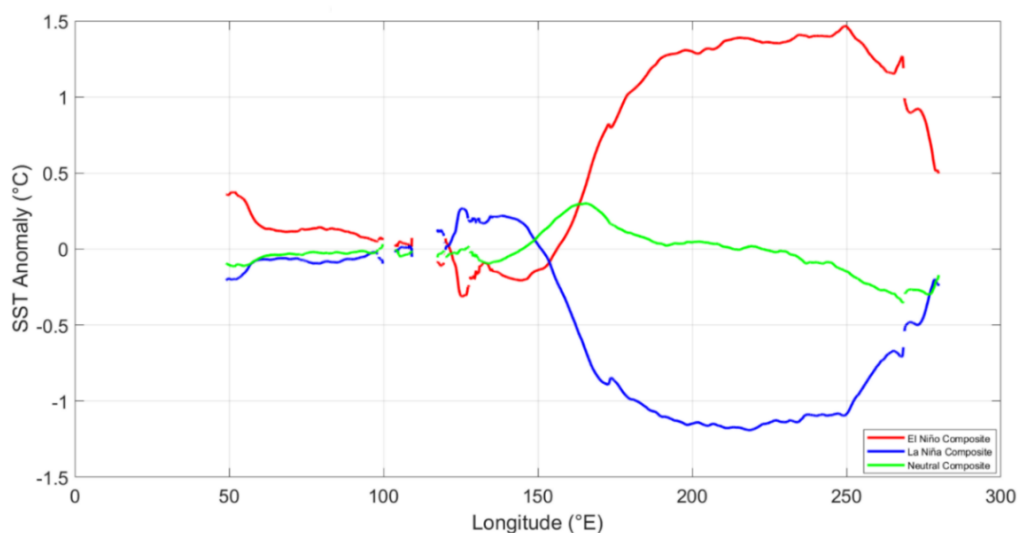
Diagram Hovmöller dan Analisa Komposit Anomali SST

Identifikasi anomali suhu laut menggunakan analisis Diagram Hovmöller. Diagram Hovmöller merepresentasikan data-data oseanografi secara temporal berdasarkan perbandingan koordinat garis lintang dan garis bujur terhadap waktu. Gambar 5 bagian atas adalah anomali SST rata-rata data bulanan, sedangkan gambar bagian bawah adalah analisis anomali rata-rata tahunan SST yang merata-ratakan anomali suhu untuk setiap tahunnya. Berdasarkan hasil analisa diagram Hovmöller terlihat perbedaan visual yang jelas antar fase ENSO. Pada fase El Niño tahun 2015 menunjukkan anomali SST meningkat (merah), pada fase netral tahun 2013 terjadi dalam kondisi normal (putih), dan pada fase La Niña tahun 2011 terjadi pendinginan (biru). Pada fase El Niño (2015), secara visual menunjukkan garis solid panjang warna merah yang menyebar dari Pasifik tengah sampai Pasifik timur. Sebaliknya, pada saat fase La Niña (2011) ditandai dengan garis putus panjang warna biru yang menyebar di Pasifik tengah sampai Pasifik timur, menunjukkan terjadinya pendinginan permukaan laut yang signifikan. Pada fase normal (2013) ditandai dengan garis putus pendek warna putih di sebagian besar area sepanjang ekuatorial yang mengindikasikan tidak adanya anomali suhu yang signifikan. Dari diagram Hovmöller tersebut, fase La Niña kuat yang divisualisasikan warna biru teramati pula pada kejadian tahun 1998/00 dan 2007/08. Demikian juga kejadian fase El Niño sangat kuat yang divisualisasikan warna merah terjadi juga pada tahun 1997/98 (Santoso *et al.*, 2019), terutama di Niño3.4 wilayah Pasifik tengah dan Pasifik timur yang paling sering digunakan sebagai indikator utama dari peristiwa ENSO.

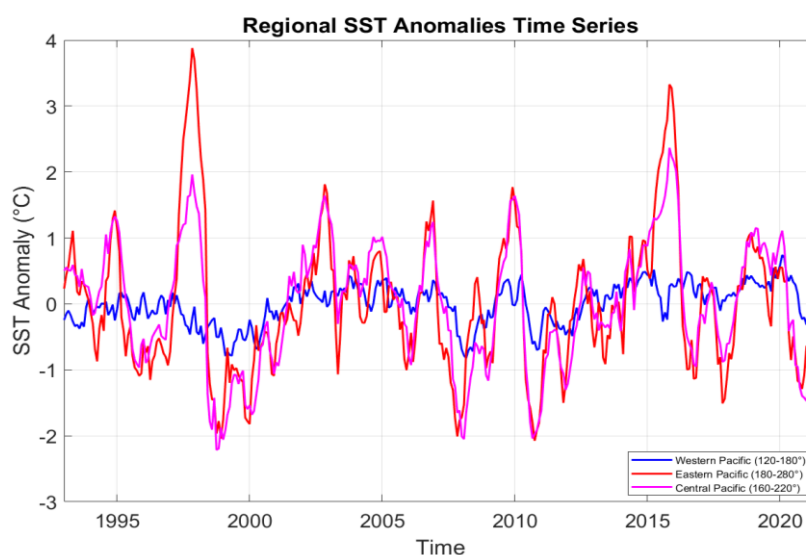


Gambar 5. Hovmöller Anomali SST

Gambar 6 menunjukkan hasil analisa komposit anomali SST dari fase ENSO. Dari gambar terlihat bahwa komposit anomali SST saat El Niño berlawanan dengan komposit anomali SST saat La Niña. Hal ini dibuktikan bahwa di wilayah Pasifik tengah sampai Pasifik timur (sekitar garis 160°E–280°E), ketika El Niño (garis merah), nilai komposit SST menunjukkan anomali positif yang menunjukkan terjadinya pemanasan (peningkatan suhu) hingga mencapai +1,5°C. Sebaliknya, saat La Niña (garis biru), komposit SST menjadi lebih rendah yang merepresentasikan terjadi pendinginan (penurunan suhu) dengan anomali SST negatif mencapai suhu sekitar -1,2°C. Fenomena ini berbanding terbalik dengan di wilayah WP sekitar garis 120°E–160°E yang mencakup wilayah Indonesia. Komposit SST saat El Niño (garis merah), menunjukkan nilai anomali SST negatif (pendinginan) karena pengaruh dari angin pasat yang melemah sehingga massa air hangat yang biasanya terakumulasi di bagian barat telah berpindah ke arah timur. Sedangkan pada fase La Niña di wilayah WP menunjukkan komposit anomali SST positif (pemanasan) karena penumpukan air hangat yang didorong oleh penguatan angin pasat ke arah barat. Sementara itu pada kondisi netral, di wilayah sepanjang ekuator menunjukkan nilai komposit anomali SST yang mendekati nol yang merepresentasikan dalam kondisi normal. Pada wilayah Niño3 [150°W–90°W atau 210°E–270°E dalam notasi bujur timur (BT)] menunjukkan lebih sensitif ketika fase El Niño di wilayah *Eastern Pacific* (EP) dengan ditunjukkan oleh meningkatnya anomali suhu yang signifikan (Gambar 6). Pernyataan tersebut konsisten dengan kajian oleh Guan *et al.* (2019), yang menyatakan bahwa komposit El Niño lebih kuat daripada peristiwa La Niña di wilayah Niño3.



Gambar 6. Komposit Anomali SST Berdasarkan Fase ENSO

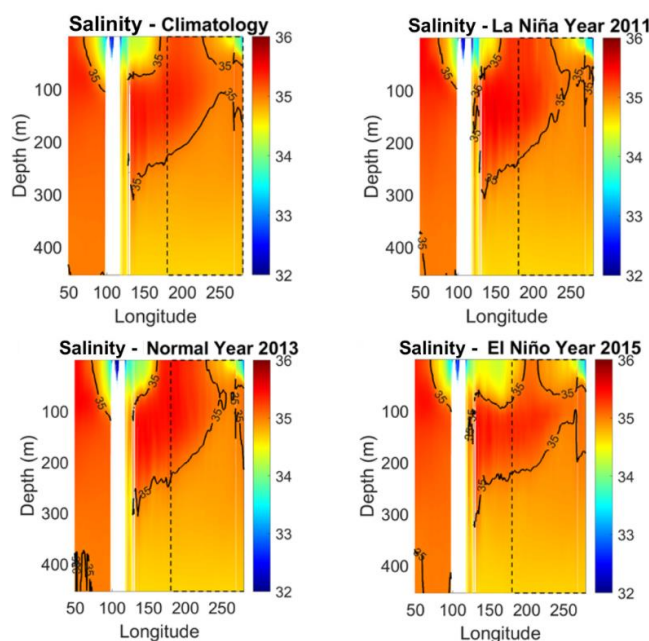


Gambar 7. Anomali SST Regional (WP, CP, dan EP)

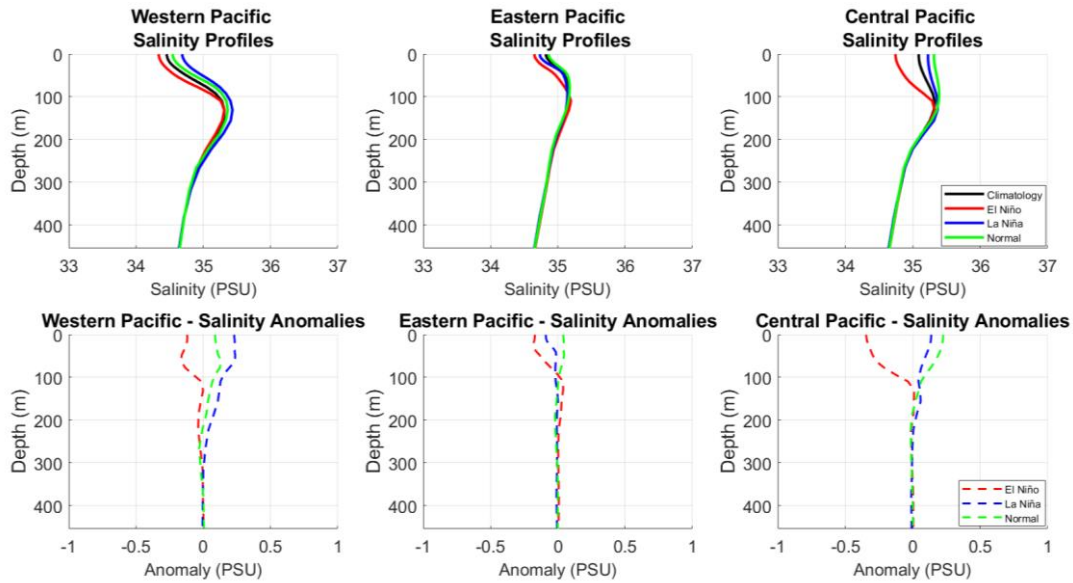
Gambar 7 menunjukkan variabilitas anomali SST terbesar di Samudra Pasifik. Anomali SST signifikan terlihat di wilayah CP (warna ungu) dan wilayah EP (warna merah). Sedangkan di wilayah *Western Pacific* (WP) yang divisualisasikan oleh warna biru, tidak mengindikasikan fluktuasi yang signifikan. ENSO dicirikan oleh peristiwa hangat yang kuat di *Eastern Pacific* (EP) atau peristiwa hangat ringan dan dingin yang kuat di *Central Pacific* (CP) dengan dampak yang berbeda pada iklim global (Geng *et al.*, 2022). Fenomena ENSO terjadi secara bergantian antara fase El Niño yang hangat dan fase La Niña yang dingin. SST ENSO menunjukkan pusat anomali yang beragam, mulai dari wilayah EP hingga WP. Menurut Liao *et al.* (2021), menyatakan bahwa ENSO dicirikan oleh anomali *sea surface temperature* (SST) yang memuncak kuat di musim dingin di Pasifik tropis bagian tengah sampai timur selama fase matang yang berhubungan dengan perubahan signifikan dalam struktur termal samudra dan sirkulasi atmosfer. Anomali suhu di Pasifik timur hingga Pasifik tengah berada pada indeks Niño3, dan Niño3.4 (Gambar 1). Indeks Niño3.4 (5°N sampai 5°S, 120°W sampai 170°W) adalah indeks utama untuk memantau ENSO. Dengan demikian, wilayah EP dan CP merupakan pusat utama variabilitas anomali SST ENSO yang dominan.

Analisa salinitas

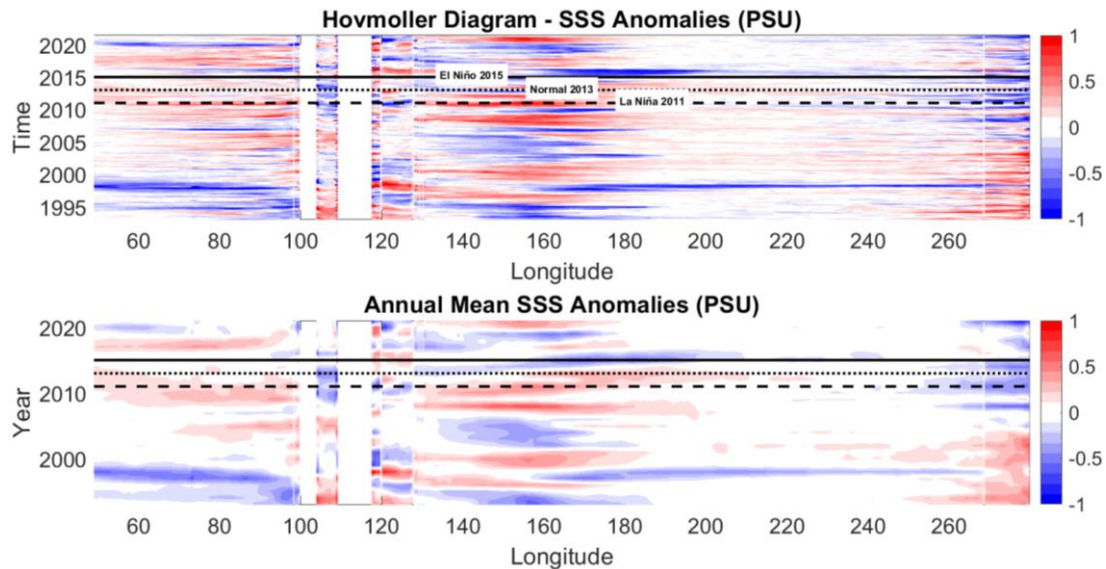
Berdasarkan visualisasi profil vertikal salinitas (Gambar 8), terlihat perbedaan salinitas secara spasial yang signifikan di Pasifik timur dan Pasifik barat antara fase La Niña (2011) dan fase El Niño (2015). Salinitas air laut memiliki variabilitas antar tahun yang terkait erat dengan fenomena ENSO. Menurut Wang *et al.* (2024), *sea surface salinity* memengaruhi perkembangan dan intensitas ENSO melalui penyesuaian piknoklin laut (perubahan gradien densitas yang kuat) dan perambatan gelombang Kelvin yang memengaruhi stratifikasi vertikal laut dan redistribusi panas. Variabilitas antar tahunan salinitas permukaan laut diduga berperan aktif dalam perkembangan dan pertumbuhan peristiwa ENSO (Xue & Kumar, 2017). Hasil kajian dari statistik anomali SSS merepresentasikan perubahan salinitas secara zonal sebagai respons terhadap kejadian ENSO. Pada wilayah EP selama El Niño dan La Niña, parameter salinitas menunjukkan visual biru dan putih yang menunjukkan salinitas rendah (Gambar 10). Berdasarkan analisis statistik selama fase La Niña di wilayah EP, nilai salinitas rata-rata tercatat sebesar 34,89 PSU dengan standar deviasi (std) $\pm 0,42$ PSU. Apabila dibandingkan dengan nilai salinitas klimatologinya sebesar 34,94 PSU, salinitas sebesar 34,89 PSU mempunyai anomali negatif yang kecil yaitu mencapai $-0,045$ PSU dengan standar deviasi $\pm 0,118$ PSU. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun saat fase La Niña di EP memicu kondisi yang lebih dingin, namun salinitas di EP relatif stabil sebesar 34,89 PSU dan hanya mengalami sedikit penurunan dari nilai salinitas klimatologi.



Gambar 8. Profil vertikal salinitas wilayah ekuator pada 4 kondisi. Area putih menyatakan keberadaan daratan, garis putus-putus menyatakan letak Samudra Pasifik timur, dan garis hitam solid menyatakan batas *isohaline* pada 35 PSU



Gambar 9. Profil Vertikal Salinitas Regional (WP, EP, dan CP)



Gambar 10. Hovmöller Anomali Salinitas

Penurunan salinitas selama La Niña diakibatkan oleh pengaruh penguatan angin pasat yang memicu arus zonal mentransportasikan massa air bersalinitas tinggi dari EP hingga CP masuk ke wilayah WP. Pada fase El Niño di wilayah EP, nilai salinitas mengalami penurunan yang signifikan hingga mencapai salinitas rata-rata $34,83 \pm \text{std } 0,33$ PSU. Apabila dibandingkan dengan salinitas klimatologi, nilai salinitas ini mempunyai anomali negatif sebesar $-0,103 \pm \text{std } 0,135$ PSU. Anomali salinitas ketika fase El Niño ($-0,103$ PSU) di EP lebih tinggi dibandingkan anomali ketika fase La Niña ($-0,045$ PSU) karena akibat peningkatan presipitasi (Gambar 9). Hasil analisis data menunjukkan bahwa di wilayah EP tercatat salinitas tertinggi pada tahun normal (2013) dengan salinitas sebesar 34,96 PSU.

Berdasarkan hasil analisa pada fase La Niña tahun 2011 di wilayah WP, menunjukkan anomali SSS mendominasi warna merah yang merepresentasikan terjadinya anomali SSS yang signifikan (Gambar 10). Nilai salinitas terjadi peningkatan hingga mencapai rata-rata sebesar $34,90 \pm \text{std } 0,50$ PSU yang mana lebih tinggi dibandingkan dengan klimatologis yakni hanya 34,72 PSU dengan menghasilkan anomali positif (+) tercatat $+0,178 \pm \text{std } 0,188$ PSU (Gambar 9). Data kuantitatif ini membuktikan bahwa ketika La Niña di WP terjadi efek presipitasi yang kalah dominan dibandingkan mekanisme adveksi horizontal yang menunjukkan

dominasi oleh terjadinya pengaruh mekanisme massa air. Selaras dengan temuan Chi *et al.* (2021), yang mengonfirmasi bahwa mode variabilitas salinitas di Samudra Pasifik bukan hanya dari faktor tingkat presipitasi saja, melainkan juga sangat ditentukan oleh adveksi horizontal. Nilai rata-rata salinitas mencapai 34,90 PSU menunjukkan adanya penguatan angin pasat sehingga massa air bersalinitas tinggi dari EP dan CP yang terdorong masuk ke perairan Indonesia dapat mengubah karakteristik perairan menjadi lebih asin. Sementara itu, ketika fase El Niño menunjukkan respons yang lebih kompleks. Dari diagram Hovmöller tersebut, di wilayah WP pada saat fase El Niño tahun 2015, menunjukkan anomali SSS mendominasi warna biru yang menggambarkan terjadinya penurunan salinitas. Hasil data statistik menunjukkan nilai anomali salinitas negatif (-) sebesar $-0,096 \pm \text{std } 0,248$ PSU dengan nilai salinitas secara rata-rata berada pada nilai $34,63 \pm \text{std } 0,35$ PSU dimana nilai tersebut sedikit lebih rendah dari nilai salinitas secara klimatologi (34,72 PSU). Analisis statistik pada fase El Niño di WP, menunjukkan tingginya nilai standar deviasi ($\pm 0,248$ PSU) yang nilainya melampaui rata-rata anomalnya ($-0,096$ PSU) yang mengindikasikan perubahan salinitas di wilayah kajian dipengaruhi oleh dinamika laut salah satunya oleh pergerakan massa air. Hal tersebut diperkuat melalui temuan Farrar & Plueddemann (2019), yang menyatakan dalam studi diagnosis mengenai variabilitas salinitas menegaskan pentingnya keseimbangan antara fluks turbulen bawah permukaan dan adveksi horizontal. Mekanisme inilah yang menjelaskan anomali salinitas di WP dapat terjadi akibat transportasi massa air. Temuan tersebut selaras dengan penelitian oleh Qi *et al.* (2019), menemukan bahwa ketika El Niño, anomali SSS negatif (-) muncul di Pasifik barat (WP). Menurut Yuan *et al.* (2026), mengungkapkan bahwa SSS di WPWP berhubungan erat dengan fase ENSO dan migrasi/pergeseran *Inter-Tropical Convergence Zone* (ITCZ), dengan kondisi yang lebih tawar selama El Niño dan kondisi yang lebih asin selama La Niña.

KESIMPULAN

Perubahan kedalaman termoklin menunjukkan pola osilasi asimetri yang konsisten yakni pada saat fase El Niño (2015), terjadi pendangkalan termoklin di Pasifik barat (WP) dan pendalaman termoklin di Pasifik timur (EP) yang memicu peningkatan SST di Pasifik tengah hingga timur dengan rata-rata anomali SST di EP mencapai $+1,926^{\circ}\text{C}$, serta memicu penurunan salinitas yang signifikan. Selama fase La Niña (2011), terjadi pendangkalan termoklin di Pasifik timur yang memicu penurunan *sea surface temperature* dengan rata-rata anomali SST sebesar $-0,618^{\circ}\text{C}$ dan memicu penurunan salinitas yang tidak signifikan. Sementara itu, di wilayah Pasifik barat mengalami pemanasan selama fase La Niña dengan rata-rata anomali SST mencapai $+0,242^{\circ}\text{C}$ dan mengalami pendinginan selama fase El Niño dengan rata-rata anomali SST mencapai $-0,102^{\circ}\text{C}$. Pada fase normal (2013) merepresentasikan kondisi keseimbangan Sirkulasi Walker yang menjaga distribusi suhu tetap hangat, tekanan rendah, dan terjadi konveksi di Pasifik barat sebagai *Western Pacific Warm Pool* (WPWP), sedangkan Pasifik timur menjadi dingin dan tekanan tinggi sebagai *Cold Tongue* (CT).

DAFTAR PUSTAKA

- Abhik, S., Dommengot, D., McGregor, S., Zhu, J., ... & Abe-Ouchi, A. 2025. Stronger And Prolonged El Niño-Southern Oscillation in the Early Eocene Warmth. *Nature Communications*, 16(1): 1-13.
- Ávila, A. B., Ortega-García, S., Jakes-Cota, U., Moncayo-Estrada., & Villalobos, H. 2026. Spatial and Temporal Variability Of Sea Surface Temperature Anomalies in the Eastern Pacific Ocean (2000-2020): implications for ENSO monitoring. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 54(1): 1-14.
- Cai, W., Santoso, A., Collins, M., Dewitte, B., Karamperidou, C., ...& Zhong, W. 2021. Changing El Niño-Southern OSCILLATION in a Warming Climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9): 628-644.
- Cheng, L., Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Mayer, M., Balmaseda, M., & Zhu, J. 2019. Evolution of Ocean Heat Content Related to ENSO. *Journal of Climate*, 32(12): 3529-3556.
- Chi, J., Qu, T., Du, Y., Qi, J., & Shi, P. 2022. Ocean Salinity Indices of Interannual Modes in The Tropical Pacific. *Climate Dynamics*, 58(1): 369-387. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05911-9>
- Farrar, J. T., & Plueddemann, A. J. 2019. On the Factors Driving Upper-Ocean Salinity Variability at The Western Edge of the Eastern Pacific Fresh Pool. *Oceanography (Washington, DC)*, 32(2): 30-39.
- Geng, T., Cai, W., Jia, F., & Wu, L. 2024. Decreased ENSO post-2100 in Response To Formation Of A Permanent El Niño-Like State Under Greenhouse Warming. *Nature Communications*, 15(1): 1-10.
- Geng, T., Cai, W., Wu, L., Santoso, A., Wang, G., Jing, Z., ... & McPhaden, M. J. 2022. Emergence Of Changing Central-Pacific and Eastern-Pacific El Niño-Southern Oscillation in a Warming Climate. *Nature Communications*, 13(1): 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33930-5>

- Glantz, M. H., & Ramirez, I. J. 2020. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to enhance societal readiness for El Niño's impacts. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(3): 394-403.
- Guan, C., McPhaden, M. J., Wang, F., & Hu, S. 2019. Quantifying The Role Of Oceanic Feedbacks on ENSO Asymmetry. *Geophysical Research Letters*, 46(4): 2140-2148. <https://doi.org/10.1029/2018GL081332>
- Gupta, H., Deogharia, R., & Sil, S. 2024. Influence of the Solar Penetration Depth And Heat-Fluxes on the Sea Surface Temperature Using An Ocean Mixed Layer Model. *Regional in Marine Science*, 74: 103551.
- Hu, Z. Z., Kumar, A., Huang, B., Zhu, J., & Ren, H. L. 2017. Interdecadal Variations of ENSO around 1999/2000. *Journal of Meteorological Research*, 31(1): 73-81.
- Jia, F., Cai, W., Geng, T., Gan, B., Zhong, W., Wu, L., & McPhaden, M. J. 2025a. Transition from multi-year La Niña to strong El Niño rare but increased under global warming. *Science Bulletin*, 70(5): 756-764.
- Jin, L., Liu, C., Cao, N., Liao, X., Xue, Y., Bao, R., ... & Liang, M. 2024. Tracking the variability of the western Pacific warm pool heat content over 1980–2020. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1-15.
- Kunarmo, Hadi, S., Ningsih, N.S., & Baskoro, M. S. 2012. Perubahan Kedalaman Dan Ketebalan Termoklin Pada Variasi Kejadian ENSO, IOD Dan Monsun di Perairan Selatan Jawa Hingga Pulau Timor. *Ilmu Kelautan*, 17(2): 87-98. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.17.2.87-98>
- L'Heureux, M. L., Tippett, M. K., Wheeler, M. C., Nguyen, H., Narsey, S., Johnson, N., ... & Di Liberto, T. 2024. A Relative Sea Surface Temperature Index for Classifying ENSO Events in a Changing Climate. *Journal of climate*, 37(4): 1197-1211. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0406.1>
- Liao, H., Wang, C., & Song, Z. 2021. ENSO phase-locking biases from the CMIP5 to CMIP6 Models and a Possible Explanation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 189: 1-11.
- McPhaden, M. J., Santoso, A., & Cai, W. 2020. Introduction to El Niño Southern Oscillation in a changing climate. *El Niño Southern Oscillation in a changing climate*, 1-19. DOI:10.1002/9781119548164
- Pinault, J. L. 2022. A Review of The Role of The Oceanic Rossby Waves in Climate Variability. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4): 1-25. <https://doi.org/10.3390/jmse10040493>
- Qi, J., Zhang, L., Qu, T., Yin, B., Xu, Z., ... & Qin, Y. 2019. Salinity Variability in The Tropical Pacific During the Central-Pacific and Eastern-Pacific El Niño Events. *Journal of Marine Systems*, 199: 1-14.
- Quintana, G. M. R., Marsh, R., & Icochea Salas, L. A. 2021. Interannual Variability in Contributions of The Equatorial Undercurrent (EUC) to Peruvian upwelling source water. *Ocean Science*, 17(5): 1385-1402.
- Romero, E., Tenorio-Fernandez, L., Portela, E., Montes-Aréchiga, J., & Sánchez-Velasco, L. 2023. Improving The Thermocline Calculation Over The Global Ocean. *Ocean Science*, 19(3): 887-901.
- Santoso, A., Hendon, H., Watkins, A., Power, S., Dommenges, D., England, M. H., ... & Delage, F. 2019. Dynamics and Predictability of El Niño–Southern Oscillation: An Australian Perspective on Progress and challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3): 403-420.
- Santoso, A., Mcphaden, M. J., & Cai, W. 2017. The defining characteristics of ENSO EXTREMES and The Strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4): 1079-1129. <https://doi.org/10.1002/2017RG000560>
- Song, L. M., Zhang, Y., & Zhou, Y. 2007. The Relationship Between The Thermocline and The Catch Rate of *Thunnus obesus* in the tropical areas of the Indian Ocean. *IOTC-WPTT T-14-rev1*:1-13.
- Sprintall, J., Gordon, A. L., Wijffels, S. E., Feng, M., Hu, S., Koch-Larrouy, A., ... & Setiawan, A. 2019. Detecting Change in the Indonesian Seas. *Frontiers in Marine Science*, 6: 1-24.
- Stern, M. E. 1975. *Ocean Circulation Physics*. Penerbit Academic Press. New York.
- Tan, W., Hu, Z. Z., Liu, Y., & McPhaden, M. J. 2025. Evolution and Prediction Of The La Niña Conditions in 2024/25. *Environmental Research Communications*, 7(12): 1-13.
- Timmermann, A., An, S. I., Kug, J. S., Jin, F. F., Cai, W., Capotondi, A., M., Lengaigne, M., McPhaden., Stein, K., ... Zhang, X. 2018. El Niño-Southern Oscillation Complexity. *Nature*, 559(7715): 535-545.
- Vialard, J., Jin, F. F., Mcphaden, M. J., Cai., ... & Thual, S. 2025. The El Niño Southern Oscillation Recharge Oscillator Conceptual Model: Achievements and future prospects. *Reviews of Geophysics*, 63(1):1-38.
- Wang, C. 2018. A review of ENSO theories. *National Science Review*, 5(6): 813-825.
- Wang, H., Hu, S., Guan, C., & Li, X. 2024. The Role of SSS in ENSO Forecasting in the 21st Century. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 7(1): 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00763-6>
- Wirasatriya, A., R. Y. Setiawan., & P. Subardjo. 2017. The Effect of ENSO on the Variability of Chlorophyll-a and Sea Surface Temperature in the Maluku Sea. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12): 1-6. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2745207>

- Xue, Y., & Kumar, A. 2017. Evolution of the 2015/16 El Niño and historical perspective since 1979. *Science China Earth Sciences*, 60(9): 1572-1588. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-0106-9>
- Yuan, R., Zhang, R., Jiang, L., Li, T., Russell, J., Zhang, F., ... & Xu, S. 2026. Precession-driven Salinity Feedback In The Western Pacific Warm Pool: Insights From Alkenone Hydrogen Isotopes Over The Past 450 kyr. *npj Climate and Atmospheric Science*. 9(60): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41612-026-01335-6>
- Zhang, T., Huang, B., Yang, S., Chen, J., & Jiang, X. 2018. Dynamical and Thermodynamical Influences of the Maritime Continent on ENSO evolution. *Scientific Reports*, 8(1): 1-9.