Indonesian Journal of Oceanography
November 2026, Vol 8 No 4: 370 - 383
ISSN: 2714-8726

Studi Karakteristik Suhu Permukaan Laut Ekstrem di Selat Makassar: *Extreme Value Analysis*

Saat Mubarrok[1*], Rima Rachmayani[1], Suliskania Nurfitri[1], Ivonne Milichristi Radjawane[1], Esa Fajar Hidayat[2]

[1]Kelompok Keahlian/Keilmuan Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia
[2]Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya
Jl. Veteran, Lowokwaru, Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia
Email: *saatmubarrok@itb.ac.id

Abstrak

Suhu permukaan laut (SPL) ekstrem merupakan indikator penting untuk memahami dinamika oseanografi dan variabilitas iklim di Selat Makassar. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik SPL ekstrem menggunakan pendekatan *Extreme Value Analysis*. Data SPL maksimum tahunan dimodelkan dengan distribusi *Generalized Extreme Value* melalui empat skenario, yaitu model stasioner (M0), model non-stasioner berbasis tren waktu (M1), model non-stasioner berbasis *Oceanic Niño Index* (ONI) (M2), dan model gabungan tren waktu serta ONI (M3). Model terbaik dipilih menggunakan *Akaike Information Criterion* dan diuji menggunakan *Likelihood Ratio Test*. Hasil analisis menunjukkan bahwa frekuensi kejadian SPL maksimum tahunan tertinggi terjadi pada periode April–Juni, sedangkan Januari–Maret dan Juli–September relatif lebih rendah. Model stasioner mendominasi sebagian besar wilayah Selat Makassar, sementara pengaruh tren waktu lebih signifikan di pesisir barat yang berdekatan dengan Pulau Kalimantan. Pengaruh ONI terhadap SPL ekstrem hanya signifikan pada beberapa lokasi di bagian tengah Selat Makassar. Estimasi *return level* 100-tahun menunjukkan SPL ekstrem berkisar antara 30–32,5 °C dengan nilai tertinggi di bagian selatan Selat Makassar. Hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik SPL ekstrem di Selat Makassar umumnya bersifat stasioner, meskipun pengaruh tren jangka panjang dan variabilitas iklim regional tetap perlu dipertimbangkan dalam estimasi risiko dan dampak kejadian ekstrem di Selat Makassar.

Kata kunci : SPL Ekstrem, *Extreme Value Analysis,* Selat Makassar*, Return Level,* ONI

Abstract

Characteristics of Extreme Sea Surface Temperature in the Makassar Strait: An Extreme Value Analysis

Extreme sea surface temperature (SST) is an important indicator for understanding oceanographic dynamics and climate variability in the Makassar Strait. This study aims to investigate the characteristics of extreme SST using the Extreme Value Analysis (EVA) approach. Annual maximum SST data were modeled using the Generalized Extreme Value (GEV) distribution under four scenarios: a stationary model (M0), a non-stationary model incorporating a temporal trend (M1), a non-stationary model based on the Oceanic Niño Index (ONI) (M2), and a combined model including both temporal trend and ONI (M3). The best-performing model was selected using the Akaike Information Criterion and evaluated through the Likelihood Ratio Test. Seasonal analysis revealed that the highest frequency of annual maximum SST events occurred during April–June, whereas January–March and July–September exhibited relatively lower frequencies. The stationary model was identified as the best model over most of the Makassar Strait, while the influence of long-term trends was more pronounced in the western coastal region adjacent to Kalimantan. The effect of ONI on extreme SST was significant only in several locations within the central Makassar Strait. The estimated 100-year return levels ranged from 30 to 32.5 °C, with the highest values concentrated in the southern Makassar Strait. These findings indicate that extreme SST characteristics in the Makassar Strait are predominantly stationary, although long-term trends and climate variability should be considered to improve the accuracy of extreme event risk assessments.

Keywords: *Extreme SST, Extreme Value Analysis, Makassar Strait, Return Level, ONI*

PENDAHULUAN

Suhu permukaan laut (SPL) merupakan salah satu parameter oseanografi yang berperan penting dalam mengendalikan pertukaran energi antara laut dan atmosfer serta memengaruhi dinamika ekosistem laut. Dalam

https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce
DOI: 10.14710/ijoce.v8i4.33214
Diterima/Received: 20-06-2026
Disetujui/Accepted: 20-09-2026

 ISSN: 2714-8726

beberapa dekade terakhir, peningkatan suhu global telah menyebabkan peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian suhu laut ekstrem di berbagai wilayah dunia (Eade *et al.,* 2022; Falga dan Wang 2022; Kessler *et al.,* 2022; Cheng *et al.,* 2023; Mubarrok dan Radjawane, 2025). Kejadian SPL ekstrem dapat memicu berbagai dampak lingkungan, seperti gelombang panas laut (*marine heatwaves,* MHWs) (Ningsih *et al.,* 2023; Beliyana dan Tarya, 2024; Bayhaqi dan Iskandar 2026), pemutihan karang (De Clippele *et al.,* 2023; Nurdjaman *et al.,* 2023; Handiani *et al.,* 2025), perubahan produktivitas primer (Fadhilah *et al.,* 2022; Juita *et al.,* 2025), serta gangguan terhadap sumber daya perikanan (Sartimbul *et al.,* 2023). Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik SPL ekstrem menjadi penting untuk mendukung pengelolaan sumber daya laut dan mitigasi dampak perubahan iklim.

Selat Makassar merupakan salah satu perairan strategis di Indonesia yang berperan sebagai jalur utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo), yaitu sistem arus yang mengalirkan massa air dari Samudra Pasifik menuju Samudra Hindia. Sebagai komponen penting dalam sirkulasi laut global, Arlindo berperan dalam redistribusi panas, garam, dan berbagai sifat massa air yang memengaruhi kondisi oseanografi regional maupun global (Godfrey, 1996; Lee *et al.,* 2002; Hu dan Sprintal, 2016; Feng *et al.,* 2018). Dinamika perairan di Selat Makassar dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk variabilitas musiman yang dikendalikan oleh sistem monsun Asia-Australia (Murtugudde *et al.,* 1998; Guo *et al.,* 2023), fenomena iklim antar-tahunan seperti *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) (Santoso *et al.,* 2022; Kersalé *et al.,* 2022; Lubis *et al.,* 2026), serta interaksi dengan arus laut regional dan proses oseanografi lokal (Murtugudde *et al.,* 1998; Kersalé *et al.,* 2022; Peng *et al.,* 2023). Variabilitas monsun menyebabkan perubahan pola angin, curah hujan, dan sirkulasi laut yang berdampak pada distribusi SPL di wilayah ini (Atmadipoera dan Widyastuti 2014; Syahdan *et al.,* 2021). Di sisi lain, ENSO diketahui mampu memodulasi kondisi termal perairan Indonesia melalui perubahan sirkulasi atmosfer dan laut skala besar, sehingga memengaruhi pola anomali SPL di Selat Makassar (Gordon *et al.,* 2019; Purwandari *et al.,* 2019; Anugrah *et al.,* 2020; Syahdan *et al.,* 2021). Kompleksitas interaksi berbagai proses tersebut menyebabkan karakteristik SPL di Selat Makassar menunjukkan variasi yang signifikan baik secara spasial maupun temporal. Kondisi ini berpotensi meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian SPL ekstrem pada lokasi dan periode tertentu, yang pada akhirnya dapat memengaruhi stabilitas ekosistem laut, produktivitas perikanan, serta berbagai aktivitas sosial dan ekonomi yang bergantung pada sumber daya pesisir dan laut.

Berbagai pendekatan telah digunakan untuk mengidentifikasi kejadian SPL ekstrem, salah satunya MHWs yang mendefinisikan kejadian ekstrem berdasarkan ambang batas persentil tertentu dalam durasi minimum tertentu (Hobday *et al.,* 2016; Ningsih *et al.,* 2023; Beliyana dan Tarya 2024; Bayhaqi dan Iskandar 2026). Meskipun efektif untuk mengkarakterisasi intensitas, durasi, dan frekuensi kejadian panas laut ekstrem, pendekatan ini belum memberikan informasi mengenai probabilitas kejadian yang sangat jarang serta estimasi tingkat ulang (*return level*). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, Teori Nilai Ekstrem (*Extreme Value Theory/Analysis*, EVA) banyak digunakan karena secara khusus dirancang untuk menganalisis perilaku kejadian ekstrem pada bagian ekor (*tail*) distribusi data (Coles 2001; Cheng *et al.,* 2014; Photiadou *et al.,* 2014; Mubarrok dan Jang 2022; Ryu *et al.,* 2025). Melalui distribusi *Generalized Extreme Value* (GEV), EVA memungkinkan estimasi probabilitas kejadian ekstrem dan perhitungan *return level* pada berbagai periode ulang, sehingga lebih sesuai untuk analisis risiko jangka panjang.

Sebagian besar penelitian di Selat Makassar berfokus pada variabilitas rata-rata SPL dan pengaruh fenomena iklim terhadap kondisi oseanografi, sedangkan kajian mengenai SPL ekstrem menggunakan pendekatan statistik ekstrem masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik SPL ekstrem di Selat Makassar menggunakan distribusi GEV, mengevaluasi pengaruh tren waktu dan ENSO terhadap kejadian ekstrem, serta mengestimasi *return level* SPL ekstrem untuk periode ulang 100 tahun.

MATERI DAN METODE

Data

Dalam kajian ini digunakan data SST yang mencakup domain 1°LU-5°LS, 115°BT-120°BT, yang berfokus pada wilayah Selat Makassar. Data utama yang digunakan dalam studi ini adalah data SST yang diperoleh dari produk *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature* (OISST) versi 2, (Huang *et al.,* 2021) yang tersedia secara bebas di https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html. Dataset SST ini memiliki resolusi spasial sebesar 0,25° × 0,25° dan resolusi temporal adalah harian. Rentang waktu data

 ISSN: 2714-8726

mencakup periode dari tahun 1982-2025, sehingga memungkinkan analisis jangka panjang terhadap variabilitas dan tren SST secara spasial dan temporal. Pembaruan dari OISST versi 1 ke versi 2 mencakup beberapa peningkatan penting, salah satunya adalah perubahan format data *in-situ* yang dikumpulkan dari kapal dan *buoy*. Perubahan ini disertai dengan peningkatan signifikan dalam jumlah data dari *buoy* yang digunakan untuk mengoreksi bias pada data SST hasil penginderaan jauh (*satellite-derived* SST) (Huang *et al.,* 2021). Metode koreksi perbedaan suhu antara pengukuran kapal dan *buoy* juga telah disempurnakan guna meningkatkan akurasi pengukuran SST. Metode konversi antara konsentrasi es laut dan SST juga telah direvisi untuk menghilangkan bias suhu hangat yang sebelumnya terdeteksi di wilayah Arktik, sehingga meningkatkan representasi suhu permukaan laut di kawasan es secara lebih realistis (Banzon *et al.,* 2016; Huang *et al.,* 2021).

Meskipun OISST versi 2 memiliki kinerja yang baik untuk analisis SST pada skala global dan regional, penggunaannya pada wilayah pesisir dan perairan semi-tertutup perlu mempertimbangkan keterbatasan resolusi spasialnya. OISST versi 2 memiliki resolusi spasial sekitar 0,25° (~25 km), sehingga variabilitas SST berskala kecil di wilayah yang sempit, dangkal, dan berdekatan dengan daratan dapat kurang terwakili. Studi terdahulu menunjukkan bahwa kesalahan OISST cenderung meningkat di wilayah pesisir dibandingkan dengan laut terbuka, terutama pada daerah dengan kedalaman dangkal dan pencampuran pasang surut yang kuat (Lee dan Park, 2020; Huang *et al.,* 2021). Keterbatasan ini relevan untuk Selat Makassar, khususnya di sekitar pesisir Kalimantan dan Sulawesi, sehingga hasil SST pada area yang berdekatan dengan garis pantai perlu diinterpretasikan secara hati-hati.

Pengolahan Data

Beberapa penelitian telah melakukan studi tentang karakteristik non-stasioner dalam analisis kejadian ekstrem dengan menggunakan metode EVA. Tujuannya adalah untuk mengestimasi parameter distribusi GEV berdasarkan deret data maksimum tahunan (a*nnual maximum records*) (Nadarajah, 2005; Villafuerte *et al*., 2015; Rodrigues *et al*., 2021). Data SST harian terlebih dahulu diekstraksi pada wilayah Selat Makassar. Selanjutnya, nilai maksimum tahunan (*annual maximum SST*) dihitung untuk setiap grid untuk memperoleh deret waktu kejadian SST ekstrem (1982-2025, n=44). *Annual maximum SST* dihitung berdasarkan nilai maksimum dari seluruh data harian pada setiap tahun (Januari–Desember), tanpa melakukan penyaringan berdasarkan musim sebelumnya. Hasil identifikasi waktu terjadinya *annual maximum* menunjukkan bahwa sebagian besar nilai maksimum tahunan terjadi pada periode April–Juni (AMJ), dengan frekuensi rata-rata dari seluruh grid adalah sebesar 50,75%, diikuti oleh Oktober-Desember (OND) sebesar 33,24%, Januari–Maret (JFM) sebesar 12,45%, dan Juli–September (JAS) sebesar 3,56% (Gambar 1). Hasil tersebut menunjukkan bahwa AMJ merupakan periode dominan terjadinya *annual maximum SST* di Selat Makassar, tetapi periode tersebut tidak digunakan sebagai batasan dalam perhitungan *annual maximum*, karena nilai maksimum ditentukan dari seluruh hari dalam satu tahun.

Analisis Nilai Ekstrem

Deret SPL maksimum tahunan dimodelkan menggunakan distribusi GEV. Parameter distribusi, yaitu parameter lokasi (*location parameter*, μ), skala (*scale parameter*, σ), dan bentuk (*shape parameter*, ξ), diestimasi menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) (Coles 2001). Fungsi distribusi kumulatif GEV disajikan pada persamaan berikut:

$$G(x;\mu,\sigma,\xi) = \exp\left\{-\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]_{+}^{-1/\xi}\right\}$$

Parameter bentuk (ξ) menentukan karakteristik ekor distribusi dan membedakan tiga tipe distribusi nilai ekstrem. Distribusi GEV akan mengikuti tipe Gumbel ketika ($\xi = 0$), tipe Fréchet ketika ($\xi > 0$), dan tipe Weibull ketika ($\xi < 0$) (Coles 2001).

Untuk mengidentifikasi karakteristik pada SPL ekstrem di Selat Makassar, penelitian ini menggunakan model GEV stasioner dan non-stasioner. Model stasioner (M0) digunakan sebagai model acuan yang mengasumsikan bahwa karakteristik SPL maksimum tahunan tidak dipengaruhi oleh faktor eksternal, seperti tren jangka panjang, kejadian ENSO, ataupun fenomena iklim lainnya. Sedangkan model non-stasioner (M1–M3) mengakomodasi pengaruh tren jangka panjang dan ENSO melalui perubahan parameter lokasi (μ). Parameter skala (σ) dan parameter bentuk (ξ) dipertahankan konstan pada seluruh model sesuai dengan pendekatan Villafuerte *et al*. (2015).

 ISSN: 2714-8726

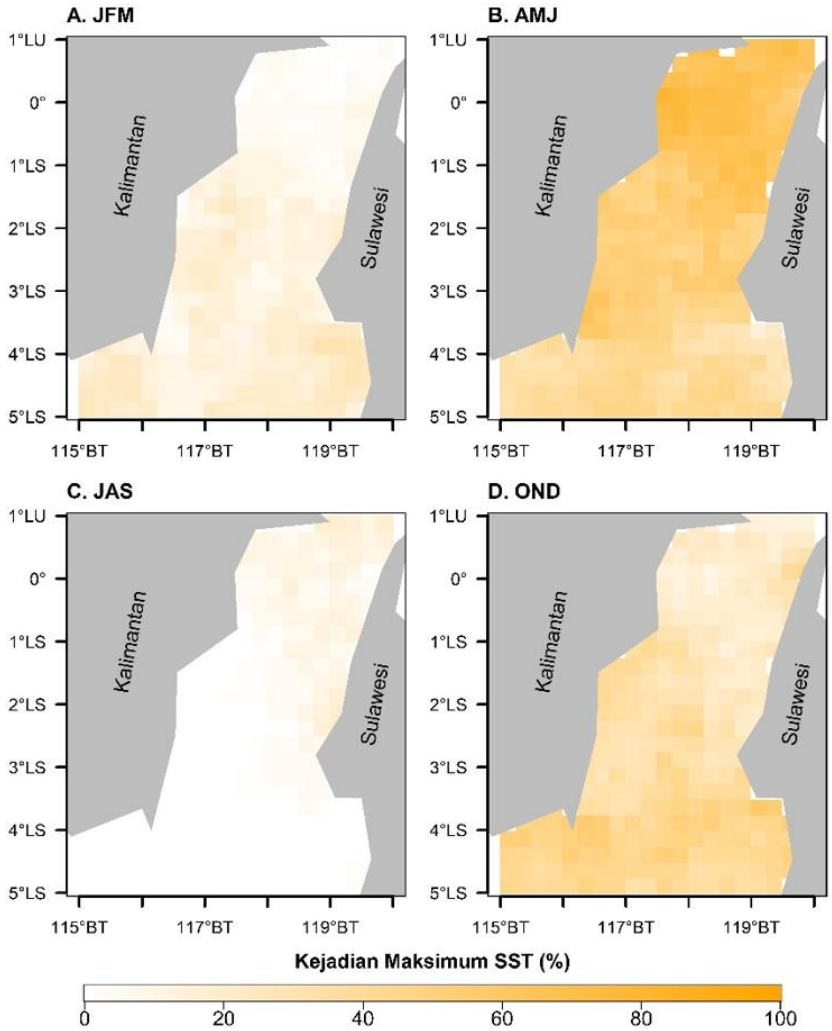
Empat model GEV diterapkan dalam penelitian ini, yaitu model stasioner (M0), model non-stasioner dengan kovariat tren waktu (M1), model non-stasioner dengan kovariat *Oceanic Niño Index* (ONI) (M2) untuk melihat pengaruh ENSO di Samudra Pasifik di Selat Makassar, serta model non-stasioner yang menggabungkan tren waktu dan ONI secara simultan (M3). Data ONI yang digunakan dalam penelitian ini berupa data bulanan yang diperoleh dari NOAA *Climate Prediction Center* (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Untuk merepresentasikan pengaruh ENSO pada setiap tahun pengamatan, digunakan rata-rata nilai ONI selama periode November–Desember–Januari, yang umumnya bertepatan dengan fase puncak ENSO. Formulasi parameter lokasi pada masing-masing model non-stasioner dinyatakan sebagai:

$$M_1: \mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t$$

$$M_2: \mu(t) = \mu_0 + \mu_2 ONI_t$$

$$M_3: \mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t + \mu_2 ONI_t$$

Dengan μ_0 adalah intersep, μ_1 adalah koefisien asosiasi terhadap tren waktu dan μ_2 adalah koefisien asosiasi terhadap ENSO. Nilai *t* adalah tahun dari 1982 hingga 2025. Sedangkan ONI_t adalah ONI pada waktu/tahun ke-*t*, yaitu rata-rata nilai ONI selama periode November–Desember–Januari pada tahun ke-*t*.



Gambar 1. Persentase kejadian SPL maksimum tahunan berdasarkan bulan di Selat Makassar selama periode pengamatan 1982 – 2025, a) Januari-Februari-Maret (JFM), b) April-Mei-Juni (AMJ), c) Juli-Agustus-September (JAS), dan d) Oktober-November-Desember (OND).

 ISSN: 2714-8726

Pemilihan Model Terbaik (*Best-fit Model*)

Untuk menentukan model yang paling sesuai, digunakan *Akaike Information Criterion* (AIC) dan *Likelihood Ratio Test* (LRT) sebagaimana dijelaskan oleh Villafuerte *et al.* (2015) dan Mubarrok dan Jang (2022). Model terbaik dipilih berdasarkan nilai AIC terkecil, karena model tersebut dianggap mampu menjelaskan sebagian besar variasi dalam data dengan kompleksitas yang minimum sehingga lebih diinginkan (Wilks, 2011). Pemilihan model terbaik pada setiap grid dilakukan melalui dua tahapan. Pertama, model dengan nilai AIC terendah diidentifikasi menggunakan persamaan berikut:

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

Dengan k adalah parameter yang diestimasi dan L adalah nilai maksimum fungsi *likelihood* (*maximized likelihood).* Kedua, signifikansi model non-stasioner terhadap model yang lebih sederhana dievaluasi menggunakan LRT untuk menentukan apakah penambahan kovariat memberikan peningkatan kinerja model yang signifikan secara statistik. Uji ini didasarkan pada statistik devians $D = 2(L_A - L_0)$, dengan L_A menyatakan *log-likelihood* maksimum dari model non-stasioner (M1, M2, atau M3). Sedangkan L_0 menyatakan *log-likelihood* maksimum dari model nol M0 (Coles 2001). Statistik D secara asimtotik mengikuti distribusi *chi-square* (χ^2) dengan signifikansi $\alpha = 0{,}05$, dan apabila D lebih besar dari nilai distribusi *chi-square* tersebut maka model non-stasioner tersebut lebih baik dari model stasioner.

Estimasi *Return Level*

Setelah mengidentifikasi model terbaik untuk deret SPL maksimum tahunan pada setiap grid, parameter distribusi GEV yang terestimasi digunakan untuk menghitung nilai *return level* pada *return period* tertentu. Dengan melakukan inversi dari fungsi distribusi kumulatif GEV, diperoleh estimasi tingkat *return level* untuk 100 tahun , yaitu z_{100}, sebagai berikut (Coles 2001; Villafuerte *et al.,* 2015):

$$z_{100} = \mu - \frac{\sigma}{\xi}\left[1 - (-\log\left(1 - \frac{1}{100}\right))^{-\xi}\right]$$

Dengan parameter lokasi (μ), skala (σ), dan bentuk (ξ), diestimasi dari masing-masing model stasioner dan non-stasioner.

HASIL DAN PEMBAHASAN

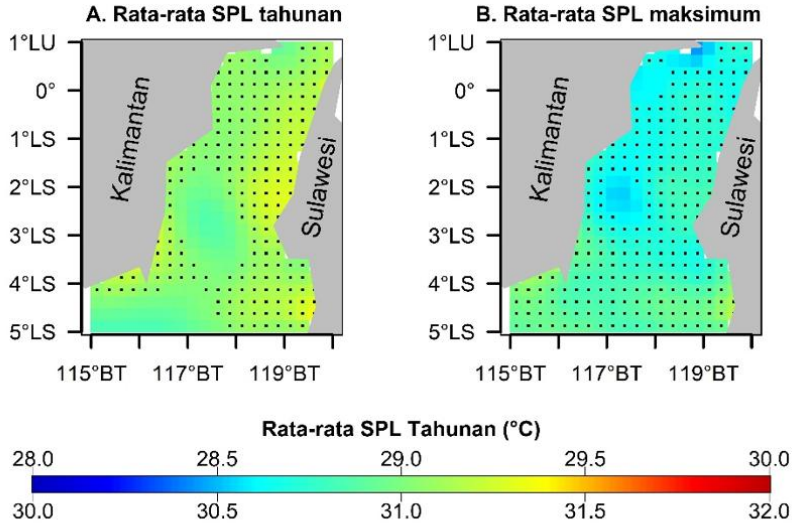
Karakteristik Spasial Suhu Permukaan Laut di Selat Makassar

Distribusi spasial rata-rata SPL tahunan di Selat Makassar ditunjukkan pada Gambar 2A, sedangkan rata-rata SPL maksimum tahunan ditampilkan pada Gambar 2B. Secara umum, rata-rata SPL tahunan berkisar antara 28,0–30,0 °C dan menunjukkan pola spasial yang relatif homogen di seluruh wilayah penelitian. Meskipun demikian, terdapat kecenderungan peningkatan suhu ke arah timur dan utara Selat Makassar, dengan nilai tertinggi ditemukan pada wilayah yang berdekatan dengan pesisir Sulawesi.

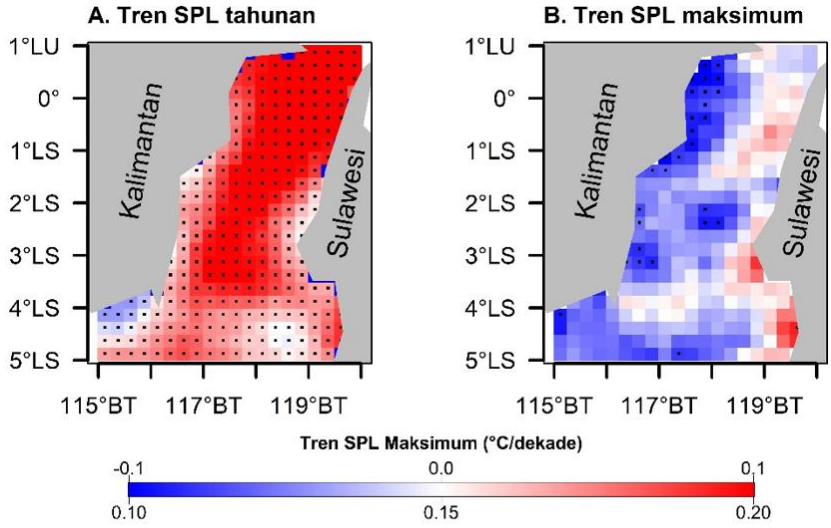
Pola yang serupa juga terlihat pada rata-rata SPL maksimum tahunan yang berkisar antara 30,0–32,0 °C. Nilai SPL maksimum tertinggi umumnya ditemukan pada bagian timur laut Selat Makassar, sedangkan nilai yang relatif lebih rendah teridentifikasi pada bagian tengah hingga barat selat. Perbedaan spasial ini mengindikasikan adanya variasi proses oseanografi yang memengaruhi distribusi panas di wilayah penelitian. Wilayah tengah Selat Makassar menunjukkan SPL rata-rata dan SPL maksimum yang relatif lebih rendah dibandingkan wilayah sekitarnya. Kondisi ini diduga berkaitan dengan keberadaan jalur utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang mengalir dari Laut Sulawesi menuju Laut Flores (Hu dan Sprintal 2016; Feng *et al.,* 2018). Arus tersebut berperan dalam mengangkut massa air yang relatif lebih dingin dari lapisan bawah ke permukaan melalui proses pencampuran vertikal, sehingga menurunkan suhu permukaan laut di bagian tengah selat. Sebaliknya, wilayah pesisir Sulawesi dan bagian selatan Selat Makassar cenderung memiliki suhu yang lebih tinggi. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh perairan yang lebih dangkal dibandingkan bagian tengah selat sehingga lebih responsif terhadap pemanasan atmosfer.

Perbedaan antara rata-rata SPL tahunan dan rata-rata SPL maksimum tahunan menunjukkan bahwa kejadian suhu ekstrem umumnya berada sekitar 1–2 °C lebih tinggi dibandingkan kondisi rata-rata. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun variasi SPL rata-rata relatif kecil, kejadian ekstrem tetap berpotensi menghasilkan anomali suhu yang signifikan. Kondisi tersebut menjadi dasar penting dalam penerapan analisis nilai ekstrem untuk mengevaluasi probabilitas dan risiko kejadian SPL ekstrem di Selat Makassar.

 ISSN: 2714-8726



Gambar 2. Distribusi spasial (A) rata-rata SPL tahunan dan (B) rata-rata SPL maksimum tahunan di Selat Makassar selama periode 1982–2025. Area dengan titik menunjukkan wilayah dengan nilai SPL yang secara statistik signifikan lebih besar dari 29°C (30,5°C untuk SPL maksimum), berdasarkan uji *Student's t-test* satu arah (*one-tailed*) dengan tingkat signifikansi $\alpha < 0{,}001$.



Gambar 3. Distribusi spasial tren SPL selama periode 1982 - 2025 di Selat Makassar berdasarkan (A) rata-rata SPL tahunan dan (B) SPL maksimum tahunan. Titik hitam menunjukkan tren yang signifikan pada tingkat kepercayaan 95% ($p < 0{,}05$).

Berdasarkan Gambar 3A, rata-rata SPL tahunan di Selat Makassar menunjukkan tren peningkatan yang dominan hampir di seluruh wilayah penelitian dengan laju sekitar 0,10–0,20 °C/dekade. Peningkatan suhu yang paling kuat teramati di bagian tengah hingga utara Selat Makassar, sementara beberapa lokasi di bagian barat daya menunjukkan tren yang relatif lemah atau bahkan sedikit negatif. Sebagian besar grid menunjukkan tren yang signifikan secara statistik, mengindikasikan bahwa pemanasan permukaan laut merupakan fenomena yang konsisten di wilayah ini. Tren ini sesuai dengan hasil penelitian Mubarrok dan Radjawane (2025) yang menyatakan bahwa terjadi kenaikan tren yang signifikan khususnya di Perairan Indonesia yang berkorelasi kuat dengan kenaikan tren SPL global.

Berbeda dengan rata-rata SPL tahunan, tren SPL maksimum tahunan pada Gambar 3B memperlihatkan pola spasial yang lebih bervariasi. Sebagian besar wilayah bagian barat dan tengah Selat Makassar

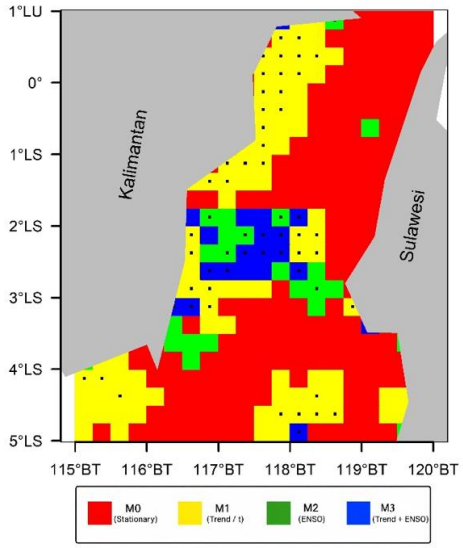
 ISSN: 2714-8726

menunjukkan tren negatif hingga mendekati nilai -0,1°C/dekade, sedangkan tren positif lebih banyak ditemukan di wilayah timur, sebesar 0,05°C/dekade, terutama di dekat pesisir Sulawesi dan bagian selatan selat. SPL maksimum tahunan di bagian barat dan tengah Selat Makassar justru menunjukkan tren negatif atau mendekati nol. Perbedaan antara tren SPL rata-rata dan SPL maksimum tersebut tidak selalu bersifat kontradiktif, karena suhu ekstrem tidak hanya dikontrol oleh perubahan suhu rata-rata, tetapi juga oleh perubahan variabilitas dan bentuk distribusi SPL. Dengan demikian, faktor-faktor yang mengendalikan kondisi klimatologis rata-rata (SPL *mean*) tidak selalu identik dengan faktor yang menentukan kejadian suhu ekstrem (SPL *annual maxima*) (Oliver *et al.,* 2014; Lee dan Park 2022).

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa variabilitas suhu permukaan laut dapat tetap konstan atau bahkan menurun meskipun terjadi peningkatan suhu rata-rata, sehingga perubahan suhu ekstrem tidak selalu mengikuti tren pemanasan suhu rata-ratanya (Oliver *et al.,* 2018; Schlegel *et al.,* 2021). Selain itu, perubahan sirkulasi laut dan adveksi massa air dapat memodifikasi varians SPL dan menghasilkan respons ekstrem yang berbeda dari perubahan SPL rata-rata (Lee *et al.,* 2023). Dalam konteks Selat Makassar, variabilitas regional yang dipengaruhi oleh Arlindo, dinamika monsun, serta fenomena iklim seperti ENSO dapat memodifikasi distribusi dan variabilitas SPL. Interaksi faktor-faktor tersebut dapat membatasi peningkatan nilai SPL ekstrem, meskipun kondisi termal rata-rata terus mengalami pemanasan. Oleh karena itu, tren negatif atau mendekati nol pada SPL maksimum tahunan di bagian barat dan tengah Selat Makassar kemungkinan mencerminkan perubahan variabilitas dan dinamika regional yang menghasilkan respons suhu ekstrem yang berbeda dari tren pemanasan SPL rata-rata. Aspek tersebut akan dikaji lebih lanjut pada penelitian selanjutnya untuk mengidentifikasi mekanisme yang mendasari perbedaan respons antara SPL rata-rata dan SPL ekstrem.

Karakteristik SPL Ekstrem berdasarkan Analisis EVA

Gambar 4 menunjukkan distribusi spasial model GEV terbaik berdasarkan nilai AIC dan uji LRT di Selat Makassar. Secara umum, model stasioner (M0) mendominasi sebagian besar wilayah penelitian, terutama pada bagian timur, selatan, dan pesisir Sulawesi. Dominasi model stasioner menunjukkan bahwa karakteristik SPL ekstrem di sebagian besar Selat Makassar relatif stabil selama periode pengamatan dan tidak memerlukan kovariat tambahan untuk menjelaskan variasinya. Model non-stasioner berbasis tren waktu (M1) terutama ditemukan di wilayah barat dan bagian tengah selat yang berdekatan dengan pesisir Kalimantan. Keberadaan model ini mengindikasikan bahwa perubahan jangka panjang atau tren pemanasan berperan dalam memodifikasi karakteristik SPL ekstrem di wilayah tersebut. Hasil ini konsisten dengan analisis tren SPL yang menunjukkan peningkatan suhu yang signifikan pada sebagian besar wilayah Selat Makassar.



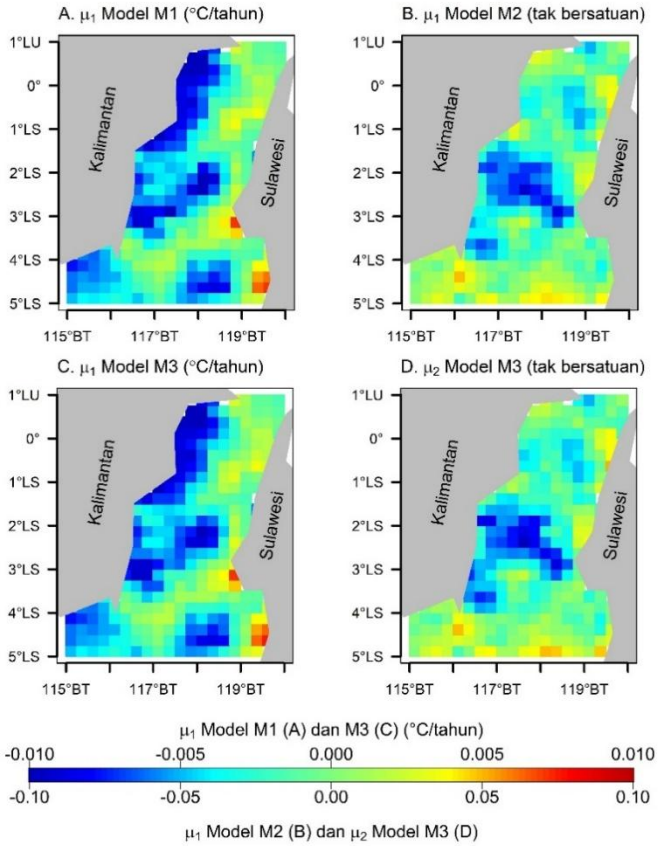
Gambar 4. Distribusi spasial model GEV terbaik untuk suhu permukaan laut (SPL) ekstrem di Selat Makassar berdasarkan kriteria AIC dan uji LRT. M0 menunjukkan model stasioner, sedangkan M1, M2, dan M3 masing-masing merepresentasikan model non-stasioner dengan kovariat tren waktu, ONI, dan kombinasi tren waktu–ONI. Titik hitam menunjukkan lokasi dengan model non-stasioner yang signifikan secara statistik ($p < 0,05$).

 ISSN: 2714-8726

Pengaruh ENSO yang direpresentasikan oleh model M2 hanya teridentifikasi pada beberapa lokasi yang tersebar di bagian tengah dan selatan Selat Makassar. Luas wilayah yang relatif kecil menunjukkan bahwa variabilitas ENSO bukan merupakan faktor dominan yang mengontrol kejadian SPL ekstrem di wilayah penelitian. Meskipun demikian, keberadaan beberapa grid dengan model M2 mengindikasikan bahwa respons SPL ekstrem terhadap ENSO bersifat lokal dan bergantung pada kondisi oseanografi setempat. Model gabungan tren waktu dan ENSO (M3) terkonsentrasi pada bagian tengah Selat Makassar, terutama di sekitar jalur utama Arlindo. Hasil ini menunjukkan bahwa pada wilayah tertentu, variasi SPL ekstrem tidak hanya dipengaruhi oleh tren jangka panjang tetapi juga oleh fluktuasi iklim antar-tahunan yang terkait dengan ENSO. Interaksi kedua faktor tersebut menyebabkan model yang lebih kompleks memberikan representasi yang lebih baik dibandingkan model stasioner maupun model dengan satu kovariat saja.

Secara keseluruhan, dominasi model stasioner menunjukkan bahwa karakteristik SPL ekstrem di Selat Makassar masih relatif stabil dalam skala waktu pengamatan. Namun, keberadaan model non-stasioner pada wilayah tertentu mengindikasikan bahwa tren pemanasan dan variabilitas ENSO tetap berkontribusi terhadap perubahan SPL ekstrem secara spasial. Temuan ini menegaskan bahwa asumsi stasioner masih memadai untuk sebagian besar wilayah Selat Makassar, tetapi pendekatan non-stasioner diperlukan pada lokasi-lokasi tertentu untuk meningkatkan akurasi estimasi risiko kejadian SPL ekstrem dan perhitungan *return level* jangka panjang.

Parameter lokasi pada model non-stasioner menggambarkan perubahan nilai pusat distribusi SPL ekstrem sebagai respons terhadap tren jangka panjang maupun variabilitas iklim yang direpresentasikan oleh ONI. Nilai koefisien yang positif menunjukkan kecenderungan peningkatan SPL ekstrem, sedangkan nilai negatif menunjukkan kecenderungan penurunan SPL ekstrem akibat perubahan kovariat yang digunakan.



Gambar 5. Distribusi spasial parameter lokasi non-stasioner pada model GEV untuk SPL ekstrem di Selat Makassar. Panel (A) dan (C) menunjukkan koefisien tren waktu (μ_1) pada Model M1 dan M3 (°C/tahun), sedangkan panel (B) dan (D) menunjukkan koefisien ONI (μ_2) pada Model M2 dan M3 (tak berdimensi). Nilai positif menunjukkan peningkatan parameter lokasi seiring bertambahnya waktu atau meningkatnya indeks ONI, sedangkan nilai negatif menunjukkan penurunan parameter lokasi.

 ISSN: 2714-8726

Koefisien tren waktu (μ_1) pada Model M1 dan M3 (Gambar 5A dan 5C) memperlihatkan pola spasial yang relatif konsisten di seluruh wilayah Selat Makassar. Nilai (μ_1) umumnya berkisar antara -0,01 hingga 0,01 °C/tahun, yang setara dengan sekitar -0,1 hingga 0,1 °C per dekade. Sebagian besar wilayah bagian barat dan tengah Selat Makassar menunjukkan nilai negatif, terutama pada area yang berdekatan dengan pesisir Kalimantan dan jalur utama Arlindo. Sebaliknya, nilai positif lebih banyak ditemukan pada bagian timur dan selatan selat. Pola ini menunjukkan bahwa pengaruh tren jangka panjang terhadap SPL ekstrem tidak bersifat homogen secara spasial. Meskipun analisis SPL rata-rata menunjukkan kecenderungan pemanasan di sebagian besar wilayah, perubahan pada kejadian ekstrem tahunan tidak selalu mengikuti pola yang sama. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme yang mengontrol kondisi rata-rata dan kondisi ekstrem kemungkinan berbeda, terutama karena SPL ekstrem lebih sensitif terhadap variabilitas antar-tahunan dan proses oseanografi lokal.

Koefisien ONI (μ_2) pada Model M2 dan M3 (Gambar 5B dan 5D) menunjukkan pola spasial yang lebih kompleks dibandingkan koefisien tren waktu. Nilai negatif mendominasi wilayah tengah Selat Makassar, khususnya pada rentang 117–119°BT dan 2–3°LS. Nilai negatif tersebut menunjukkan bahwa fase El Niño (ONI positif) cenderung menurunkan parameter lokasi distribusi SPL ekstrem di wilayah tersebut, sehingga peluang terjadinya SPL maksimum yang sangat tinggi menjadi lebih kecil. Sebaliknya, beberapa wilayah di bagian timur dan selatan menunjukkan nilai positif, mengindikasikan bahwa peningkatan ONI berpotensi meningkatkan SPL ekstrem pada lokasi tersebut. Pola yang berbeda antarwilayah ini mengindikasikan bahwa respons SPL ekstrem terhadap ENSO sangat dipengaruhi oleh karakteristik oseanografi lokal dan interaksi antara atmosfer dan laut.

Dominasi nilai negatif ONI di bagian tengah Selat Makassar dapat dikaitkan dengan dinamika Arlindo yang berperan sebagai jalur utama pertukaran massa air antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Hubungan negatif antara ONI dan parameter lokasi distribusi SPL ekstrem di bagian tengah Selat Makassar menunjukkan bahwa peningkatan ONI berasosiasi dengan penurunan posisi distribusi nilai ekstrem. Respons ini kemungkinan berkaitan dengan kombinasi dinamika Arlindo dan *local surface forcing* selama ENSO. Variabilitas Arlindo di Selat Makassar diketahui dipengaruhi oleh ENSO, dengan transport yang cenderung lebih kuat selama La Niña dan lebih lemah selama El Niño (Susanto *et al.,* 2012; Gordon *et al.,* 2019). Pada kondisi La Niña (ONI negatif), *western Pacific warm pool* cenderung meluas ke arah barat, disertai penguatan transport Arlindo yang dapat meningkatkan suplai massa air hangat ke wilayah Indonesia dan berkontribusi terhadap peningkatan SPL ekstrem. Sebaliknya, selama El Niño (ONI positif), *warm pool* cenderung bergeser ke arah timur dan transport Arlindo melemah, sehingga kondisi termal permukaan di wilayah Indonesia dapat menjadi relatif lebih rendah (Gordon *et al.,* 2019). ENSO juga dapat memodulasi *local surface forcing*, terutama melalui perubahan angin timur–tenggara pada musim timur yang dapat memperkuat upwelling di wilayah selatan Selat Makassar dan membatasi pemanasan SPL permukaan (Nababan *et al.,* 2016; Siahaan *et al.,* 2024). Dengan demikian, hubungan negatif ONI terhadap parameter lokasi kemungkinan mencerminkan respons gabungan antara dinamika Arlindo, stratifikasi, dan *surface forcing* atmosfer terhadap ENSO, sementara wilayah pesisir dan perairan dangkal dapat menunjukkan respons berbeda karena lebih dipengaruhi oleh proses lokal.

Perbandingan antara Model M1 dan M3 menunjukkan bahwa pola spasial koefisien tren waktu relatif serupa, demikian pula antara Model M2 dan M3 untuk koefisien ONI. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh tren jangka panjang dan ENSO terhadap SPL ekstrem cenderung bersifat independen dan tidak mengalami perubahan yang signifikan ketika kedua kovariat dimasukkan secara bersamaan ke dalam model. Temuan ini sejalan dengan hasil pemilihan model terbaik yang menunjukkan bahwa model stasioner masih mendominasi sebagian besar wilayah Selat Makassar, sedangkan pengaruh tren waktu dan ENSO hanya signifikan pada lokasi-lokasi tertentu. Dengan demikian, variabilitas SPL ekstrem di Selat Makassar secara umum masih dikendalikan oleh faktor lokal dan kondisi klimatologis rata-rata, sementara tren jangka panjang dan ENSO berperan sebagai pengontrol sekunder yang memodifikasi karakteristik ekstrem pada wilayah tertentu.

Return Level 100-tahun dari SPL Ekstrem di Selat Makassar

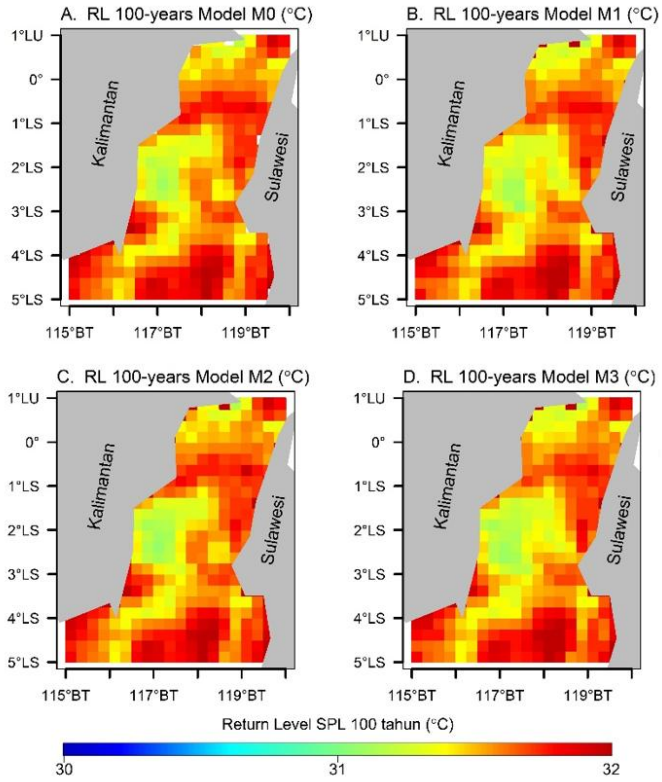
Gambar 6 menyajikan estimasi *return level* (RL) 100-tahun SPL ekstrem di Selat Makassar yang diperoleh dari empat formulasi model GEV, yaitu model stasioner (M0), model non-stasioner berbasis tren waktu (M1), model non-stasioner berbasis ONI sebagai representasi ENSO (M2), dan model gabungan tren waktu serta ONI (M3). Secara umum, keempat model menghasilkan pola spasial RL 100-tahun yang relatif

 ISSN: 2714-8726

konsisten. Nilai RL tertinggi (>31,5°C) terkonsentrasi pada dua wilayah utama, yaitu bagian selatan Selat Makassar di sekitar 4–5°LS dan wilayah timur laut yang berdekatan dengan pesisir Sulawesi pada kisaran 0–1°LU. Sebaliknya, nilai RL yang lebih rendah (sekitar 30,5–31,0°C) membentuk zona memanjang di bagian tengah selat pada kisaran 2–3°LS dan 116–118°BT. Pola ini menunjukkan bahwa distribusi spasial kejadian SPL ekstrem di Selat Makassar sangat dipengaruhi oleh karakteristik klimatologis wilayah, di mana daerah pesisir dan perairan semi-tertutup cenderung memiliki peluang lebih besar mengalami suhu ekstrem dibandingkan bagian tengah selat yang lebih terbuka dan dipengaruhi oleh dinamika massa air Arlindo.

Perbandingan antar model menunjukkan bahwa penambahan kovariat tren waktu maupun ENSO tidak menyebabkan perubahan spasial RL yang signifikan. Pola *hotspot* dan *coldspot* tetap berada pada lokasi yang sama dengan perbedaan magnitudo yang relatif kecil. Hasil ini konsisten dengan peta model terbaik (Gambar 4) yang menunjukkan dominasi model stasioner (M0) pada sebagian besar wilayah Selat Makassar. Dominasi model stasioner mengindikasikan bahwa karakteristik statistik SPL maksimum tahunan relatif stabil sepanjang periode pengamatan sehingga estimasi kejadian ekstrem jangka panjang sebagian besar dapat dijelaskan tanpa memasukkan pengaruh kovariat eksternal.

Meskipun demikian, pengaruh tren jangka panjang tetap teridentifikasi pada beberapa wilayah, terutama di sepanjang pesisir barat Selat Makassar yang berdekatan dengan Kalimantan, sebagaimana ditunjukkan oleh dominasi model M1 pada area tersebut. Hasil ini didukung oleh analisis parameter lokasi non-stasioner (μ_1) yang menunjukkan kecenderungan peningkatan SPL ekstrem seiring waktu. Keberadaan wilayah non-stasioner tersebut menyebabkan estimasi RL pada model M1 dan M3 sedikit lebih tinggi dibandingkan model stasioner, meskipun peningkatannya tidak cukup besar untuk mengubah pola spasial secara keseluruhan.



Gambar 6. Peta spasial *return level* 100-tahun (RL100) suhu permukaan laut (SPL) di perairan Selat Makassar yang diestimasi menggunakan model: (A) M0, model stasioner tanpa kovariat; (B) M1, model dengan kovariat tren waktu linear; (C) M2, model dengan kovariat indeks ONI; dan (D) M3, model gabungan kovariat tren waktu dan ONI. Skala warna menunjukkan nilai RL100 dalam °C, dengan warna biru merepresentasikan nilai RL terendah (~30°C) dan warna merah merepresentasikan nilai RL tertinggi (~32°C).

 ISSN: 2714-8726

Sementara itu, pengaruh ENSO yang direpresentasikan melalui ONI hanya terdeteksi signifikan pada sebagian kecil wilayah tengah Selat Makassar, yang ditunjukkan oleh terpilihnya model M2 dan M3 pada beberapa grid. Nilai koefisien ONI yang relatif kecil mengindikasikan bahwa variabilitas ENSO berkontribusi terhadap fluktuasi SPL ekstrem, namun pengaruhnya tidak dominan dalam menentukan probabilitas kejadian ekstrem jangka panjang. Kondisi ini dapat disebabkan oleh kuatnya pengaruh dinamika lokal dan regional, seperti sistem monsun, sirkulasi Arlindo, serta proses pencampuran dan adveksi massa air yang mengontrol variabilitas termal di Selat Makassar.

Secara keseluruhan, hasil *return level* 100-tahun menunjukkan bahwa kejadian SPL ekstrem dengan suhu mendekati 32°C berpotensi terjadi di beberapa wilayah Selat Makassar dalam periode ulang yang sangat panjang. Namun, karena sebagian besar wilayah lebih baik direpresentasikan oleh model stasioner, maka perubahan risiko SPL ekstrem akibat tren iklim dan ENSO masih relatif terbatas pada skala spasial tertentu.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengkarakterisasi SPL ekstrem di Selat Makassar menggunakan pendekatan EVA berbasis distribusi GEV. Analisis distribusi musiman menunjukkan bahwa sebagian besar kejadian SPL maksimum tahunan terjadi pada periode April–Juni (AMJ), yang mengindikasikan bahwa musim peralihan menuju monsun timur merupakan periode yang paling berpotensi menghasilkan suhu permukaan laut ekstrem di wilayah ini.

Hasil pemilihan model menunjukkan bahwa model stasioner (M0) merupakan model terbaik pada sebagian besar wilayah Selat Makassar. Temuan ini mengindikasikan bahwa karakteristik statistik SPL ekstrem selama periode pengamatan relatif stabil dan belum menunjukkan perubahan yang kuat akibat faktor eksternal. Meskipun demikian, pengaruh tren jangka panjang teridentifikasi pada beberapa wilayah, terutama di pesisir barat Selat Makassar yang berdekatan dengan Kalimantan, yang ditunjukkan oleh dominasi model non-stasioner berbasis tren waktu (M1). Sementara itu, pengaruh variabilitas iklim antar-tahunan yang direpresentasikan oleh indeks ENSO hanya signifikan pada area yang terbatas di bagian tengah Selat Makassar, sehingga kontribusinya terhadap variasi SPL ekstrem secara regional relatif lebih kecil dibandingkan pengaruh dinamika lokal dan regional. Peningkatan ONI berasosiasi dengan penurunan parameter lokasi distribusi SPL ekstrem di bagian tengah Selat Makassar (asosiasi negatif), yang diduga merupakan respons gabungan dinamika Arlindo dan *local surface forcing* terhadap ENSO. Respons tersebut menunjukkan bahwa ENSO memengaruhi karakteristik SPL ekstrem melalui perubahan transport massa air, stratifikasi, dan kondisi atmosfer-laut.

Estimasi return level 100-tahun menunjukkan bahwa SPL ekstrem di Selat Makassar berada pada kisaran 30–32°C, dengan nilai tertinggi terkonsentrasi di wilayah selatan dan timur laut selat. Kesamaan pola spasial return level yang dihasilkan oleh model stasioner maupun non-stasioner menunjukkan bahwa variabilitas internal sistem oseanografi regional, termasuk pengaruh Arlindo, sistem monsun, serta proses adveksi dan pencampuran massa air, masih menjadi faktor dominan yang mengendalikan kejadian SPL ekstrem di kawasan ini.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi stasioner masih mampu merepresentasikan karakteristik SPL ekstrem pada sebagian besar wilayah Selat Makassar. Namun, keberadaan area-area yang menunjukkan sensitivitas terhadap tren pemanasan jangka panjang dan variabilitas ENSO menegaskan bahwa faktor perubahan iklim dan variabilitas iklim tetap perlu diperhitungkan dalam analisis risiko kejadian ekstrem di masa mendatang. Informasi mengenai pola spasial model terbaik dan estimasi return level yang diperoleh dalam penelitian ini dapat menjadi dasar penting untuk mendukung pengelolaan sumber daya laut, mitigasi risiko iklim, serta perencanaan adaptasi terhadap peningkatan kejadian suhu laut ekstrem di Selat Makassar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Program Riset Dosen Muda, Direktorat Riset dan Inovasi (DRI), Institut Teknologi Bandung (ITB) Tahun 2026 melalui penelitian berjudul *"Variabilitas Suhu Permukaan Laut Ekstrem di Perairan Indonesia serta Keterkaitannya dengan Pola Telekoneksi Iklim"* berdasarkan Kontrak Nomor 2235/IT1.B07.1/TA.00/2026. Penulis juga menyampaikan apresiasi yang tinggi kepada *reviewer*

 ISSN: 2714-8726

anonim atas komentar konstruktif dan saran berharga yang telah diberikan, yang sangat membantu dalam meningkatkan kualitas naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Anugrah, N. N., Samad, W., & Berlianty, D. 2020. The Changes in Oceanographic Condition of Makassar Strait Related with El Niño Southern Oscillation (ENSO) Events of 2009–2019. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 618(1): 012017.

Atmadipoera, A. S., & Widyastuti, P. 2014. A Numerical Modeling Study on Upwelling Mechanism in Southern Makassar Strait. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 6(2). https://doi.org/10.29244/jitkt.v6i2.9012

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: 165–176. https://doi.org/10.5194/essd-8-165-2016

Bayhaqi, A., & Iskandar, M. R. 2026. Marine Heatwaves in the Java Sea, Indonesia: Characteristics and Atmospheric Onset Drivers. *Atmosphere-Ocean*, 64(3): 231–243. https://doi.org/10.1080/07055900.2026.2635340

Beliyana, E., & Tarya, A. 2024. Extreme Marine Heatwaves in the Southern Java during 2016. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1350(1): 012001.

Cheng, L., AghaKouchak, A., Gilleland, E., & Katz, R. W. 2014. Non-Stationary Extreme Value Analysis in a Changing Climate. *Climatic Change*, 127(2): 353–369. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1254-5

Cheng, Y., Zhang, M., Song, Z., Wang, G., Zhao, C., Shu, Q., Zhang, Y., & Qiao, F. 2023. A Quantitative Analysis of Marine Heatwaves in Response to Rising Sea Surface Temperature. *Science of the Total Environment*, 881: 163396. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163396

Coles, S. 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London: Springer.

De Clippele, L. H., Díaz, L. A., Andradi-Brown, D. A., Lazuardi, M. E., Iqbal, M., Zainudin, I. M., Prabuning, D., Van Hooidonk, R., Hakim, A., Agung, F., & Dermawan, A. 2023. Evaluating Annual Severe Coral Bleaching Risk for Marine Protected Areas across Indonesia. *Marine Policy*, 148: 105428. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105428

Eade, R., Stephenson, D. B., Scaife, A. A., & Smith, D. M. 2022. Quantifying the Rarity of Extreme Multi-Decadal Trends: How Unusual Was the Late Twentieth Century Trend in the North Atlantic Oscillation? *Climate Dynamics*, 58(5): 1555–1568. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05978-4

Fadhilah, A., Leidonald, R., Susetya, I. E., & Dewinta, A. F. 2022. Analysis of the Relationship between the ENSO Phenomenon, Net Primary Productivity and Catches of Yellowfin Tuna in Sibolga Waters, Indonesia. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 23(9). https://doi.org/10.13057/biodiv/d230909

Falga, R., & Wang, C. 2022. The Rise of Indian Summer Monsoon Precipitation Extremes and Its Correlation with Long-Term Changes of Climate and Anthropogenic Factors. *Scientific Reports*, 12(1): 11985. https://doi.org/10.1038/s41598-022-16240-0

Feng, M., Zhang, N., Liu, Q., & Wijffels, S. 2018. The Indonesian Throughflow, Its Variability and Centennial Change. *Geoscience Letters*, 5(1): 3. https://doi.org/10.1186/s40562-018-0102-2

Godfrey, J. S. 1996. The Effect of the Indonesian Throughflow on Ocean Circulation and Heat Exchange with the Atmosphere: A Review. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12217–12237. https://doi.org/10.1029/95JC03860

Gordon, A. L., Napitu, A., Huber, B. A., Gruenburg, L. K., Pujiana, K., Agustiadi, T., Kuswardani, A., Mbay, N., & Setiawan, A. 2019. Makassar Strait Throughflow Seasonal and Interannual Variability: An Overview. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6): 3724–3736. https://doi.org/10.1029/2018JC014502

Guo, Y., Li, Y., Cheng, L., Chen, G., Liu, Q., Tian, T., Hu, S., Wang, J., & Wang, F. 2023. An Updated Estimate of the Indonesian Throughflow Geostrophic Transport: Interannual Variability and Salinity Effect. *Geophysical Research Letters*, 50(13): e2023GL103748. https://doi.org/10.1029/2023GL103748

 ISSN: 2714-8726

Handiani, D. N., Ningsih, N. S., & Beliyana, E. 2025. Coral Bleaching Occurrence and Its Relation to Marine Heatwave Events in the Southwestern Waters of South Sulawesi, Indonesia, as Part of the Coral Triangle Region. *Journal of Marine Systems*, 104136. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2025.104136

Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C., Benthuysen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., & Holbrook, N. J. 2016. A Hierarchical Approach to Defining Marine Heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141: 227–238. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014

Hu, S., & Sprintall, J. 2016. Interannual Variability of the Indonesian Throughflow: The Salinity Effect. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(4): 2596–2615. https://doi.org/10.1002/2015JC011495

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

Juita, L., Mukhalisah, K., Maulana, M. R., & Asyura, Y. 2025. Analisis Pola Upwelling dan Produktivitas Primer di Perairan Indonesia Timur. *Journal Education, Sociology and Law*, 1(1): 285–302.

Kersalé, M., Volkov, D. L., Pujiana, K., & Zhang, H. 2022. Interannual Variability of Sea Level in the Southern Indian Ocean: Local vs. Remote Forcing Mechanisms. *Ocean Science*, 18(1): 193–212. https://doi.org/10.5194/os-18-193-2022

Kessler, A., Goris, N., & Lauvset, S. K. 2022. Observation-Based Sea Surface Temperature Trends in Atlantic Large Marine Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 208: 102902. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102902

Lee, E. Y., & Park, K.-A. 2020. Validation of Satellite Sea Surface Temperatures and Long-Term Trends in Korean Coastal Regions over Past Decades (1982–2018). *Remote Sensing*, 12(22): 3742. https://doi.org/10.3390/rs12223742

Lee, E. Y., & Park, K. A. 2022. Application of Non-Stationary Extreme Value Analysis to Satellite-Observed Sea Surface Temperature Data for Past Decades. *Frontiers in Marine Science*, 8: 798408. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.798408

Lee, S., Park, M. S., Kwon, M., Park, Y. G., Kim, Y. H., & Choi, N. 2023. Rapidly Changing East Asian Marine Heatwaves under a Warming Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(6): e2023JC019761. https://doi.org/10.1029/2023JC019761

Lee, T., Fukumori, I., Menemenlis, D., Xing, Z., & Fu, L. L. 2002. Effects of the Indonesian Throughflow on the Pacific and Indian Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 32(5): 1404–1429. https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<1404:EOTITO>2.0.CO;2

Lubis, M. Z., Hu, S., Simanjuntak, A. V., Dwinovantyo, A., Arnold, E. E. B., Kausarian, H., Jamjareegulgarn, P., & Suryadarma, M. W. 2026. How the Interannual and Seasonal Variability in Connectivity to ITF and Its Relation to ENSO Events in the Halmahera Sea: A Modeling Approach and Observation. *Regional Studies in Marine Science*, 104792. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2026.104792

Mubarrok, S., & Jang, C. J. 2022. Annual Maximum Precipitation in Indonesia and Its Association to Climate Teleconnection Patterns: An Extreme Value Analysis. *Sola*, 18: 187–192. https://doi.org/10.2151/sola.2022-030

Mubarrok, S., & Radjawane, I. M. 2025. Tren Kenaikan Suhu Permukaan Laut dan Korelasinya dengan Suhu Laut Global Periode 1982–2024. *Geosains Kutai Basin*, 8(2): 49–59. https://doi.org/10.30872/aawsmt98

Murtugudde, R., Busalacchi, A. J., & Beauchamp, J. 1998. Seasonal-to-Interannual Effects of the Indonesian Throughflow on the Tropical Indo-Pacific Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C10): 21425–21441. https://doi.org/10.1029/98JC02063

Nababan, B., Rosyadi, N., Manurung, D., Natih, N. M., & Hakim, R. 2016. The Seasonal Variability of Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a Concentration in the South of Makassar Strait. *Procedia Environmental Sciences*, 33: 583–599. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.112

Nadarajah, S. 2005. Extremes of Daily Rainfall in West Central Florida. *Climatic Change*, 69: 325–342. https://doi.org/10.1007/s10584-005-1812-y

Ningsih, N. S., Gunawan, S. R., Beliyana, E., & Tarya, A. 2023. Marine Heatwave Characteristics in the Makassar Strait and Its Surrounding Waters. *Water*, 15(14): 2645. https://doi.org/10.3390/w15142645

 ISSN: 2714-8726

Nurdjaman, S., Nasution, M. I., Johan, O., Napitupulu, G., & Saleh, E. 2023. Impact of Climate Change on Coral Reefs Degradation at West Lombok, Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(3): 451–463. https://doi.org/10.14710/jkt.v26i3.18540

Oliver, E. C., Wotherspoon, S. J., Chamberlain, M. A., & Holbrook, N. J. 2014. Projected Tasman Sea Extremes in Sea Surface Temperature through the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 27(5): 1980–1998. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00259.1

Oliver, E. C., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., Benthuysen, J. A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A. J., & Holbrook, N. J. 2018. Longer and More Frequent Marine Heatwaves over the Past Century. *Nature Communications*, 9(1): 1324. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9

Peng, Q., Xie, S. P., Huang, R. X., Wang, W., Zu, T., & Wang, D. 2023. Indonesian Throughflow Slowdown under Global Warming: Remote AMOC Effect versus Regional Surface Forcing. *Journal of Climate*, 36(5): 1301–1318. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0331.1

Photiadou, C., Jones, M. R., Keellings, D., & Dewes, C. F. 2014. Modeling European Hot Spells Using Extreme Value Analysis. *Climate Research*, 58(3): 193–207. https://doi.org/10.3354/cr01191

Purwandari, R. N., Mubarrok, S., & Mandang, I. 2019. Sea Surface Temperature Variability in the Makassar Strait during ENSO (El Niño–Southern Oscillation) from the Terra-MODIS Data Sets. *Journal of Physics: Conference Series*, 1282(1): 012052.

Rodrigues, D. T., Goncalves, W. A., Spyrides, M. H. C., Andrade, L. M. B., de Souza, D. O., de Araujo, P. A. A., da Silva, A. C. N., & e Silva, C. M. S. 2021. Probability of Occurrence of Extreme Precipitation Events and Natural Disasters in the City of Natal, Brazil. *Urban Climate*, 35: 100753. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100753

Ryu, J. H., Lee, J. H., & Kang, S. L. 2025. Non-Stationary Temperature Extremes in South Korea: An Extreme Value Analysis of Global Warming Impacts. *Atmospheric Research*, 108388. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108388

Santoso, A., England, M. H., Kajtar, J. B., & Cai, W. 2022. Indonesian Throughflow Variability and Linkage to ENSO and IOD in an Ensemble of CMIP5 Models. *Journal of Climate*, 35(10): 3161–3178. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0485.1

Sartimbul, A., Winata, V. A., Kasitowati, R. D., Iranawati, F., Rohadi, E., Yona, D., Anjeli, U. G., Pranowo, W. S., & Lauro, F. M. 2023. Seasonal Indonesian Throughflow (ITF) across Southern Java Determines Genetic Connectivity of *Sardinella lemuru* (Bleeker, 1835). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 209: 105295. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2023.105295

Schlegel, R. W., Oliver, E. C., & Chen, K. 2021. Drivers of Marine Heatwaves in the Northwest Atlantic: The Role of Air–Sea Interaction during Onset and Decline. *Frontiers in Marine Science*, 8: 627970. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.627970

Siahaan, J. E., Kunarso, K., & Wijaya, Y. J. 2024. Variasi Temporal Dinamika Upwelling di Selat Makassar Periode 2007–2021. *Buletin Oseanografi Marina*, 13(1): 122–135. https://doi.org/10.14710/buloma.v13i1.55838

Susanto, R. D., Ffield, A., Gordon, A. L., & Adi, T. R. 2012. Variability of Indonesian Throughflow within Makassar Strait, 2004–2009. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C9). https://doi.org/10.1029/2012JC008096

Syahdan, M., Atmadipoera, A. S., Susilo, S. B., & Lumban-Gaol, J. 2021. Spatial and Temporal Variability of Satellite Sea Surface Temperature in the Makassar Strait and the Java Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 944(1): 012049.

Villafuerte, M. Q., Matsumoto, J., & Kubota, H. 2015. Changes in Extreme Rainfall in the Philippines (1911–2010) Linked to Global Mean Temperature and ENSO. *International Journal of Climatology*, 35: 2033–2044. https://doi.org/10.1002/joc.4105

Wilks, D. S. 2011. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press.