

Tren Kenaikan Suhu Permukaan Laut dan Korelasinya dengan Suhu Laut Global Periode 1982-2024

^{1,2*}Saat Mubarrok, dan ^{1,3,4}Ivonne Milichristi Radjawane

¹Kelompok Keahlian/Keilmuan Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi
Kebumian, Institut Teknologi Bandung

²Program Studi S1 Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung

³Program Studi S3 Sains Kebumian, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi
Bandung

⁴Korea-Indonesia Marine Technology Cooperation Research Centre (MTCRC)

*Corresponding: saatmubarrok@itb.ac.id

Manuscript received: July 3, 2025; Revised: August 3, 2025; Accepted: August 5, 2025

ABSTRACT

As a maritime continent located between the Pacific and Indian Oceans, Indonesia plays a pivotal role in global ocean-atmosphere interactions and climate variability, particularly through its influence on sea surface temperature (SST) patterns that affected by global warming. This study investigates long-term and monthly trends of SST in the Indonesian seas over the period 1982–2024 and examines their relationship with global SST trends. Daily SST data from the Optimum Interpolation SST (OISST) dataset were aggregated to monthly means, and trend analysis was conducted using the Sen's slope estimator. Results show that the annual mean SST in the Indonesian seas ranges between 27.5°C and 29.5°C, with a standard deviation of 0.5 to 1.2°C. The long-term SST trend reaches up to 0.03°C/year, with the most pronounced warming occurring in the northern Papua near the southwestern Pacific. In contrast, the southern coasts of Java-Sumatra exhibit less significant trends. Comparison of regional and global SST time series indicates that the Indonesian SST trend has a higher amplitude (0.020°C/year) compared to the global trend (0.018°C/year). A significant correlation ($r = 0.59$, $p.val < 0.001$) is observed between Indonesian and global SST trends, with the highest correlations found in northern Papua and northern Sumatra. Interannual SST variability in Indonesia also exceeds that of the global ocean, indicating a more dynamic regional response. Monthly trend analysis reveals a pronounced increase during December, particularly in northern Papua and North Maluku. These findings highlight the importance of regional SST monitoring and its linkage to broader global climate dynamics.

Keywords: Sea Surface Temperature (SST), Trends, Indonesian Seas, Global Warming, Sen's Slope Estimation

ABSTRAK

Sebagai negara maritim yang terletak di antara Samudra Pasifik dan Hindia, Indonesia memegang peranan penting dalam interaksi laut-atmosfer global dan variasi iklim dunia, terutama dengan adanya dinamika dan variasi suhu permukaan laut atau *sea surface temperature* (SST) dalam kondisi pemanasan global. Penelitian ini bertujuan untuk melihat tren rata-rata tahunan dan bulanan dari SST lokal dan kaitannya dengan kenaikan SST global di lautan Indonesia dalam kurun waktu 1982-2024. Data yang digunakan adalah dataset reanalisis dari *Optimum Interpolation SST* (OISST) harian yang dirata-ratakan menjadi bulanan dan nilai tren didapatkan dari metode *Sen's slope estimator*. Hasil menunjukkan bahwa rata-rata SST tahunan berkisar antara 27,5°C sampai 29,5°C dengan standar deviasi berkisar

antara 0,5°C sampai 1,2°C. Tren signifikan dari kenaikan SST jangka panjang maksimum didapatkan berada di daerah utara Pulau Papua yang mencapai nilai 0,03°C/tahun. Tren yang tidak signifikan juga ditemukan di pantai selatan (barat) Pulau Jawa (Sumatra). Perbandingan antara *time series* SST lokal dan global menunjukkan bahwa tren SST di wilayah Indonesia memiliki amplitudo yang lebih tinggi (0,020°C/tahun) dibandingkan dengan tren global (0,018°C/tahun). Terdapat korelasi signifikan ($r = 0,59$; $p.val < 0,001$) antara tren SST Indonesia dan global, dengan korelasi tertinggi ditemukan di wilayah utara Pulau Papua dan utara Pulau Sumatra. Variabilitas SST antar-tahunan di Indonesia juga lebih tinggi dibandingkan dengan lautan global, yang menunjukkan respons regional yang lebih dinamis. Analisis tren bulanan menunjukkan peningkatan pada bulan Desember, khususnya di wilayah utara Pulau Papua dan Maluku. Studi ini menjelaskan pentingnya dinamika SST regional dan keterkaitannya dengan iklim global yang lebih luas.

Kata Kunci: *Sea Surface Temperature (SST)*, Tren, Laut Indonesia, Pemanasan Global, Estimasi *Sen's slope*

1. PENDAHULUAN

Suhu permukaan laut atau *sea surface temperature* (SST) merupakan salah satu parameter oseanografi yang paling krusial dalam memahami dinamika laut dan iklim, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Sebagai negara kepulauan yang terletak di antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, Indonesia menunjukkan kondisi SST yang sangat dinamis [1, 2], yang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti radiasi matahari [3], sirkulasi laut [4], angin monsun, serta fenomena iklim global seperti *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) [5] dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) [6, 7].

Variabilitas SST di wilayah Indonesia memiliki peran penting dalam mengendalikan pola cuaca, distribusi curah hujan [8], dan produktivitas ekosistem laut [1, 9]. Perubahan SST dapat memengaruhi pola migrasi ikan, memicu kejadian pemutihan karang [10], serta memengaruhi dinamika sistem monsun Asia-Australia [11]. Oleh karena itu, pemantauan dan pemahaman terhadap pola SST di Indonesia sangat krusial untuk perencanaan kelautan dan perikanan, serta dalam merumuskan strategi mitigasi perubahan iklim.

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa pola spasial-temporal SST di perairan Indonesia secara dominan dipengaruhi oleh osilasi tahunan dan semi-tahunan yang erat kaitannya dengan siklus monsun [12, 13]. Pola tahunan teramati hampir di seluruh wilayah, sedangkan sinyal semi-tahunan lebih menonjol di sepanjang jalur dari Laut Timor hingga Laut Cina Selatan [13]. Selain pola musiman, tren pemanasan jangka panjang juga telah terdeteksi seiring dengan peningkatan suhu global [7, 14, 15].

Analisis tren menggunakan uji Mann-Kendall terhadap data SST periode 1982 hingga 2009 menunjukkan adanya pemanasan yang signifikan di sebagian besar perairan Indonesia, terutama di laut-laut dalam seperti Selat Makassar, Laut Banda, dan sekitar Pulau Biak [6]. Pemanasan ini berkisar antara 0,5°C hingga 1,1°C selama musim hujan (Desember–Februari) dan sebagian besar dipengaruhi oleh dinamika sirkulasi laut seperti Arus Lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow/ITF*) dan Arus Khatulistiwa Selatan (*South Equatorial Current*) [7].

Studi ini meneliti pola spasial dan temporal tren SST di wilayah Indonesia dalam kaitannya dengan pemanasan SST global [15]. Penelitian ini memanfaatkan data

reanalisis selama 43 tahun (1982–2024) dan mengeksplorasi korelasi dengan rata-rata SST global untuk mengungkap pola spasial-temporal yang lebih rinci dan tervalidasi. Dengan menganalisis pengaruh pemanasan SST global terhadap variabilitas SST regional di Indonesia, studi ini memberikan wawasan penting mengenai dinamika iklim tropis, khususnya di wilayah yang memiliki peran kunci dalam interaksi laut-atmosfer pada skala regional maupun global.

2. MATERI DAN METODE

2.1 Data

Dalam kajian ini digunakan data SST yang mencakup domain 10°LU - 15°LS , 90°BT - 145°BT , yang berfokus pada wilayah Indonesia dan sekitarnya (*Maritime Continent*). Data utama yang digunakan dalam studi ini adalah data SST yang diperoleh dari produk *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature* (OISST) versi 2, [17] yang tersedia secara bebas di <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>. Dataset SST ini memiliki resolusi spasial sebesar $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ dan resolusi temporal adalah harian. Rentang waktu data 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*). Selain itu, data suhu laut dari *Argo floats* juga telah digunakan untuk memperkuat proses koreksi bias satelit (https://sio-argo.ucsd.edu/RG_Climatology.html).

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 [17, 18].

2.2 Metode

Metode pertama yang digunakan adalah dengan melihat rata-rata aritmatik (*arithmetic mean*) klimatologi dari SST selama 43 tahun dari tahun 1982 - 2024. Rumus rata-rata aritmatik yang digunakan adalah:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

Dimana A merupakan nilai rata-rata SST pada satu grid, n adalah jumlah data yang mewakili jumlah waktu pengamatan, dan T adalah nilai SST pada waktu ke- i . Nilai rata-rata ini kemudian diuji menggunakan uji *Student's t-test* untuk menguji signifikansi terhadap hipotesis bahwa rata-rata SST lebih besar dari 28°C [19], dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,001$. Standar deviasi untuk nilai rata-rata aritmatik ditentukan dengan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (2)$$

Untuk menganalisis tren SST pada setiap grid, metode yang digunakan dalam studi ini adalah estimasi *Sen's Slope* [20]. Metode ini merupakan pendekatan non-parametrik yang tidak mengasumsikan distribusi tertentu dari data, sehingga sangat sesuai untuk menganalisis data lingkungan yang cenderung tidak memenuhi asumsi normalitas. Metode ini melakukan estimasi kemiringan tren dengan menyesuaikan garis regresi linear terhadap titik-titik data melalui

pemilihan median dari seluruh kemiringan garis yang terbentuk oleh pasangan titik data. Dibandingkan dengan metode regresi kuadrat terkecil (*ordinary least squares*), estimasi *Sen's Slope* memiliki sejumlah keunggulan, antara lain lebih tahan/stabil terhadap pencilan (*outlier*) dan dapat digunakan untuk pengujian signifikansi tren meskipun distribusi residual tidak normal. Selain itu, metode ini terbukti lebih akurat untuk data dengan distribusi miring (*skewed*) atau variansi tidak homogen [21, 22]. Oleh karena itu, estimasi *Sen's Slope* merupakan salah satu metode non-parametrik yang paling banyak digunakan dalam analisis tren jangka panjang pada data lingkungan dan iklim. Persamaan yang digunakan untuk menghitung tren dengan estimasi *Sen's Slope* adalah [20]:

$$\text{median} \left\{ X_{i,j} = \frac{(SST_i - SST_j)}{i-j} \right\}, 1 \leq i < j \quad (3)$$

dengan X adalah slope antara dua data SST, i dan j adalah urutan data dengan i lebih besar dari j .

Untuk menganalisis hubungan antara SST global dan SST lokal di wilayah Indonesia, dilakukan analisis korelasi *Pearson*. Nilai SST global dihitung dengan merata-ratakan nilai SST pada area antara 50°LU hingga 50°LS, dengan tujuan menghindari pengaruh variabilitas suhu laut di wilayah kutub dan berfokus pada zona ekuator dan tropis. Selanjutnya, nilai SST global tersebut dibandingkan dengan SST pada setiap grid di wilayah studi menggunakan nilai koefisien korelasi *Pearson*. Uji signifikansi dilakukan untuk menentukan kekuatan hubungan statistik antara keduanya dengan tingkat signifikansi (α) sebesar 0,001. Nilai 0,001 merupakan nilai yang diambil berdasarkan beberapa penelitian terdahulu yang menghubungkan variasi iklim dengan parameter radiasi

matahari [23] dan juga parameter kesehatan pantai [24]. Rumus yang digunakan untuk menghitung nilai koefisien korelasi *Pearson* (CC) adalah sebagai berikut:

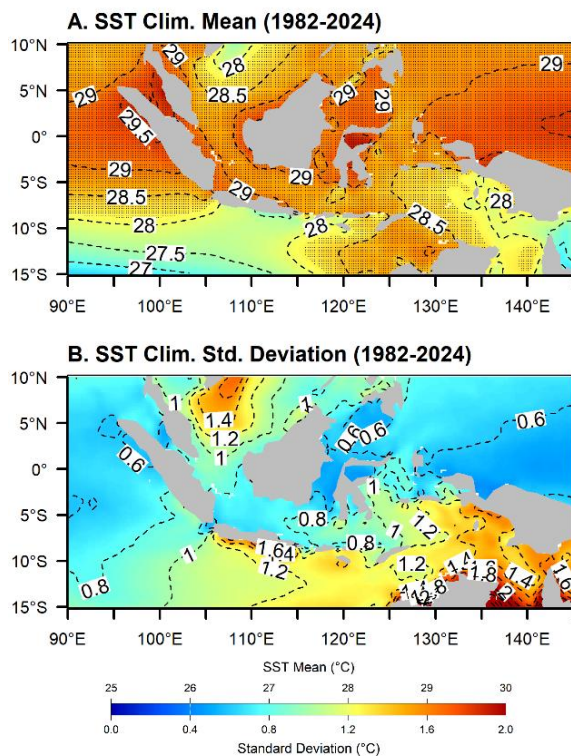
$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}} \quad (4)$$

dengan G_i dan $\bar{G}$ adalah masing-masing SST global dan rata-ratanya, T_i dan $\bar{T}$ adalah masing-masing SST di perairan Indonesia dan rata-ratanya. Dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa nilai koefisien korelasi 1 sampai dengan 0,5 dapat dikategorikan sebagai korelasi kuat dengan tingkat signifikansi (α) kurang dari 0,001. Sedangkan, nilai koefisien korelasi kurang dari 0,5 dikategorikan sebagai korelasi yang rendah atau lemah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan nilai rata-rata SST dari tahun 1982-2024 (Gambar 1A), didapatkan nilai rata-rata SST di Indonesia berkisar 27,5 °C hingga 29,5 °C, dengan nilai SST yang cukup tinggi ditemukan pada daerah sekitar perairan utara Pulau Papua (Samudra Pasifik bagian barat), bagian barat Pulau Sumatra (Samudra Hindia bagian timur), dan Teluk Tomini. Nilai SST yang relatif rendah, sekitar 27,5°C, teridentifikasi di wilayah perairan selatan Pulau Jawa, namun tidak menunjukkan signifikansi statistik. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi SST yang tinggi ini disebabkan oleh adanya mekanisme *upwelling* yang disebabkan oleh fenomena angin musiman [25, 26]. Sebaliknya, area dengan nilai SST yang signifikan (Gambar 1A) umumnya memiliki suhu rata-rata di atas 28°C. Ambang batas suhu ini digunakan dengan mengacu pada definisi "kolam air hangat" (*warm pool*) di Samudra Pasifik, yang

umumnya ditandai oleh suhu permukaan laut $\geq 28^{\circ}\text{C}$ [19, 27].

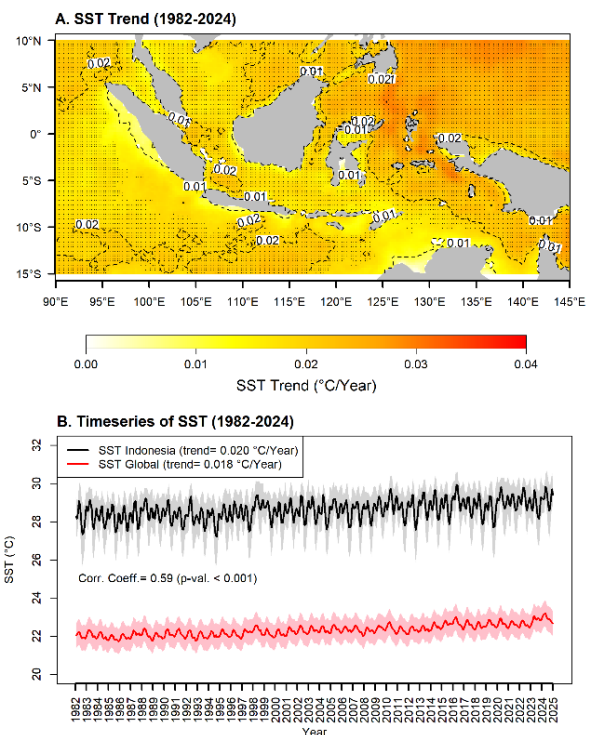


Gambar 1. (A) Rata-rata SST berdasarkan data OISST dari tahun 1982 hingga 2024. Garis kontur adalah setiap $0,5^{\circ}\text{C}$. Area yang diarsir menunjukkan wilayah dengan nilai SST yang secara statistik signifikan lebih besar dari 28°C , berdasarkan uji *Student's t-test* satu arah (*one-tailed*) dengan tingkat signifikansi $\alpha < 0,001$. (B) Standar deviasi dari rata-rata SST berdasarkan data OISST dari tahun 1982 hingga 2024. Garis kontur adalah setiap $0,2^{\circ}\text{C}$.

Gambar 1B menunjukkan standar deviasi dari nilai rata-rata SST di perairan Indonesia. Nilai standar deviasi berkisar antara $0,6^{\circ}\text{C}$ hingga $1,6^{\circ}\text{C}$. Nilai variasi SST yang cukup tinggi terlihat pada pantai selatan Pulau Jawa sedangkan nilai variasi yang cukup rendah terlihat pada daerah dengan nilai rata-rata SST yang cukup tinggi yang berada pada Selat Makassar, Pantai Barat Pulau Sumatra, dan Perairan Utara Pulau Papua.

Gambar 2A menunjukkan distribusi spasial nilai tren dari SST di perairan Indonesia dan sekitarnya berdasarkan nilai estimasi *Sen's Slope* selama periode 1982

hingga 2024. Nilai tren dihitung dalam satuan $^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$. Secara umum, terlihat adanya peningkatan suhu yang signifikan di hampir seluruh wilayah perairan tropis Indonesia, dengan tren berkisar antara $0,01$ hingga $0,04^{\circ}\text{C}$ per tahun. Area dengan intensitas warna lebih merah menunjukkan laju pemanasan yang lebih tinggi. Beberapa wilayah dengan tren tertinggi, seperti bagian Laut Banda, Laut Arafura, dan Perairan Timur Indonesia, menunjukkan nilai tren mendekati $0,04^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$. Sebaliknya, wilayah Selatan Jawa dan sebagian perairan barat Sumatra memiliki tren yang lebih rendah ($\sim 0,01$ – $0,02^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$). Hasil ini cenderung lebih rendah dari penelitian sebelumnya yang menunjukkan tren sebesar $0,04^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$ di perairan Selatan Jawa [28].

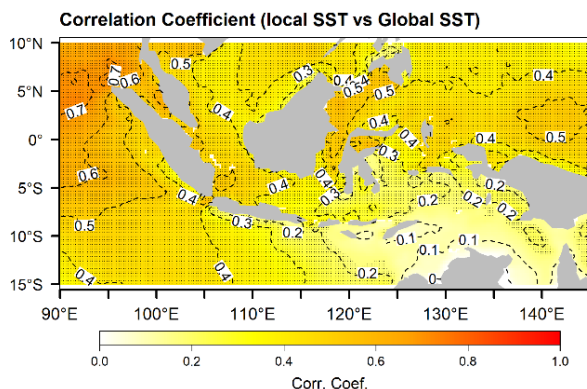


Gambar 2. (A) Tren SST spasial berdasarkan data OISST dari tahun 1982 hingga 2024. Garis kontur adalah setiap $0,01^{\circ}\text{C}$. Area yang diarsir menunjukkan wilayah dengan nilai tren SST yang secara statistik signifikan lebih besar atau lebih kecil dari 0°C , berdasarkan uji *Student's t-test* dua arah (*two-tailed*) dengan tingkat signifikansi $\alpha < 0,001$. (B) Grafik deret waktu (*time series*) dari rata-rata SST berdasarkan data OISST dari tahun

1982 hingga 2024. Garis berwarna hitam menunjukkan rata-rata SST di perairan Indonesia dan sekitarnya dan garis berwarna merah menunjukkan rata-rata SST global dihitung pada lintang 50°LU–50°LS. Area berwarna abu menunjukkan standar deviasi spasial dari SST di perairan Indonesia. Sedangkan area berwarna merah muda menunjukkan standar deviasi spasial dari SST global dikali faktor 0,1.

Gambar 2B menunjukkan deret waktu (*time series*) SST rata-rata untuk wilayah Indonesia dan global selama periode 1982–2024. Rata-rata SST global dihitung pada lintang 50°LU–50°LS untuk menghindari pengaruh variabilitas di wilayah kutub [29], sedangkan rata-rata SST Indonesia dihitung pada area yang mencakup wilayah maritim Indonesia.

Hasil analisis menunjukkan bahwa SST di wilayah Indonesia mengalami tren peningkatan sebesar 0,020°C per tahun, sedikit lebih tinggi dibandingkan tren global sebesar 0,018°C per tahun. Korelasi antara keduanya ditunjukkan oleh koefisien korelasi *Pearson* sebesar 0,59 dengan nilai $p < 0,001$, yang mengindikasikan hubungan yang signifikan secara statistik. Hal ini menunjukkan bahwa variasi suhu laut di Indonesia secara umum mengikuti pola pemanasan global, meskipun dengan adanya perbedaan spasial dan dinamika regional yang khas di wilayah tropis.



Gambar 3. Peta spasial koefisien korelasi *Pearson* antara lokal SST dengan global SST. Lokal SST mengacu pada *time series* SST

dimasing-masing grid, sedangkan global SST adalah *time series* SST yang dirata-ratakan pada lintang 50°LU sampai dengan 50°LS. Area diarsir menunjukkan bahwa korelasi antara lokal SST dengan global SST adalah signifikan secara statistik dengan tingkat signifikansi $\alpha < 0,001$.

Gambar 3 di atas menunjukkan peta koefisien korelasi *Pearson* antara SST lokal pada setiap grid di wilayah maritim Indonesia dan sekitarnya, dibandingkan dengan rata-rata SST global (lintang 50°LU–50°LS) selama periode 1982–2024. Secara umum, nilai koefisien korelasi (*Corr. Coef.*) berkisar antara 0,2 hingga 0,7, dengan pola spasial yang menunjukkan tingkat keterkaitan yang bervariasi antar wilayah. Area dengan korelasi tinggi ($\geq 0,5$) banyak ditemukan di perairan barat Indonesia seperti Laut Andaman, Selat Malaka, dan bagian utara Laut Jawa, yang mengindikasikan bahwa variasi SST di wilayah-wilayah tersebut cenderung mengikuti fluktuasi suhu global.

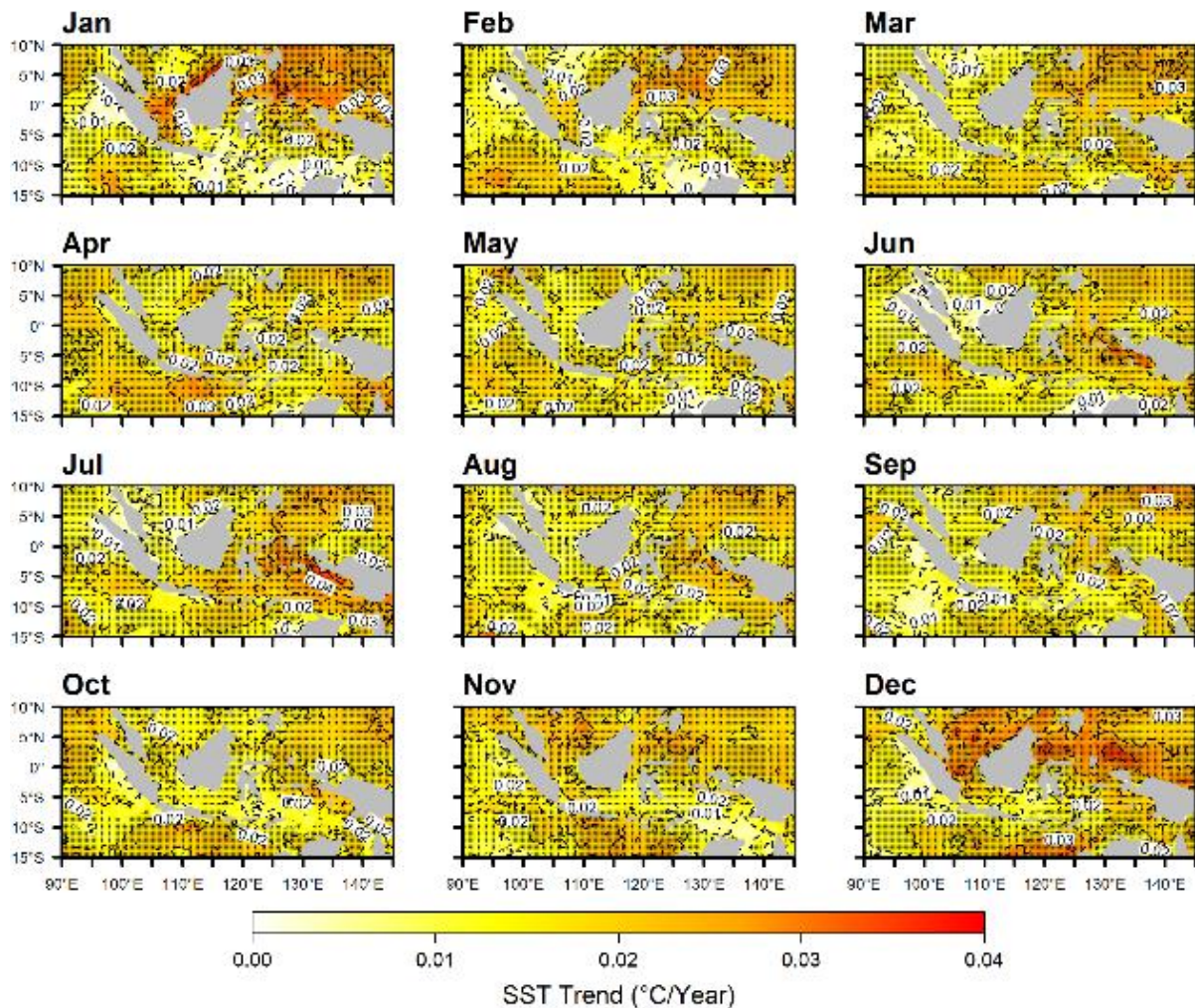
Sebaliknya, beberapa wilayah di bagian timur dan selatan Indonesia, seperti perairan selatan Papua, Laut Arafura, dan perairan selatan Jawa, menunjukkan koefisien korelasi yang lebih rendah (sekitar 0,2–0,4). Hal ini mengindikasikan bahwa dinamika SST di wilayah-wilayah tersebut lebih dipengaruhi oleh proses lokal atau regional, seperti sirkulasi regional, *upwelling*, atau fenomena iklim seperti ENSO dan IOD, dibandingkan dengan pengaruh langsung dari tren pemanasan global. Penelitian sebelumnya juga menjelaskan bahwa SST lokal sangat bervariasi terhadap kondisi atmosfer dan iklim di wilayah tersebut [6, 28, 30].

Hasil analisis tren SST bulanan selama periode 1982–2024 menunjukkan bahwa wilayah maritim Indonesia mengalami pemanasan sepanjang tahun dengan variasi spasial dan musiman (Gambar 4). Nilai tren SST berkisar antara 0,01 hingga 0,04°C per

tahun, dengan intensitas pemanasan yang cenderung bervariasi antar bulan dan wilayah.

Pada bulan-bulan peralihan menuju musim kemarau (April–Juni), tren pemanasan cenderung melandai. Beberapa wilayah, terutama di sekitar Kalimantan, bagian barat

Papua, dan utara Jawa, menunjukkan tren yang lebih rendah ($\sim 0,01\text{--}0,02^\circ\text{C}/\text{tahun}$), mencerminkan melemahnya laju pemanasan musiman. Namun demikian, pemanasan tetap terjadi secara merata.



Gambar 4. Tren SST bulanan spasial berdasarkan data OISST dari tahun 1982 hingga 2024. Garis kontur adalah setiap $0,01^\circ\text{C}$. Area yang diarsir menunjukkan wilayah dengan nilai tren SST yang secara statistik signifikan lebih besar dari 0°C , berdasarkan uji *Student's t-test* satu arah (*one-tailed*) dengan tingkat signifikansi $\alpha < 0,001$.

Selama musim kemarau (Juli–September), pemanasan SST menguat kembali, khususnya di wilayah selatan dan timur Indonesia seperti Laut Timor, Laut Arafura, dan perairan selatan Nusa Tenggara. Nilai tren pada bulan Juli dan Agustus menunjukkan hotspot pemanasan dengan nilai melebihi $0,03^\circ\text{C}/\text{tahun}$. Pada bulan September, meskipun tren sedikit melemah, wilayah

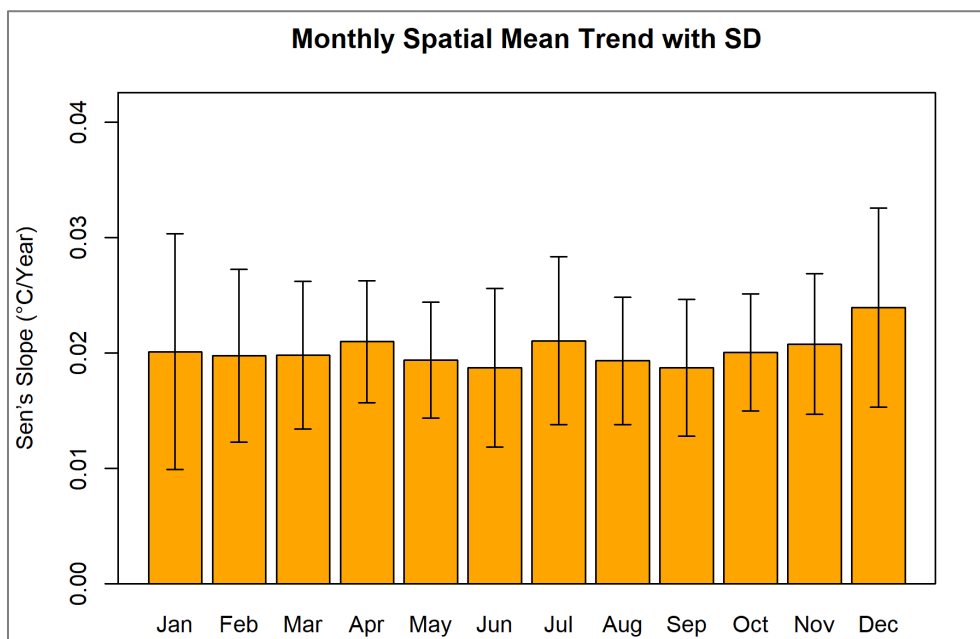
selatan masih menunjukkan pemanasan yang relatif tinggi.

Memasuki musim peralihan menuju hujan (Oktober–November), pemanasan kembali menguat di sebagian wilayah, khususnya di sekitar Sulawesi dan Laut Banda. Penelitian sebelumnya menunjukkan variasi SST di Laut Banda didominasi oleh pengaruh *eddy* skala meso, angin permukaan, radiasi matahari dan

transport Ekman [30]. Tren ini kemudian mencapai puncaknya kembali pada bulan Desember. Pola musiman ini menunjukkan bahwa wilayah Indonesia tidak hanya mengalami pemanasan secara umum akibat perubahan iklim global, tetapi juga dipengaruhi oleh dinamika musiman dan regional seperti monsun Asia-Australia, arus laut, serta proses-proses oseanografi seperti *upwelling* di selatan Jawa dan NTT.

Selama musim hujan (Desember–Februari), tren pemanasan terlihat cukup

intens, terutama di perairan barat dan tengah Indonesia seperti Laut Jawa, Laut Banda, dan sekitar Sulawesi. Beberapa wilayah menunjukkan laju pemanasan lebih dari $0,03^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$, mengindikasikan bahwa periode ini merupakan salah satu fase dengan pemanasan paling kuat secara spasial. Kondisi ini berlanjut hingga Maret, dengan penyebaran tren yang mulai meluas ke wilayah timur Indonesia.



Gambar 5. Rata-rata tren spasial bulanan SST di wilayah Indonesia selama periode 1982–2024. Diagram batang menunjukkan nilai tren berdasarkan kemiringan *Sen's Slope* ($^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$) untuk setiap bulan, sedangkan garis vertikal menunjukkan standar deviasi antar grid. Seluruh bulan menunjukkan tren pemanasan, dengan nilai tertinggi tercatat pada bulan Desember

.Grafik pada Gambar 5 menyajikan nilai rata-rata tren suhu permukaan laut (SST) bulanan secara spasial di wilayah Indonesia selama periode 1982–2024, yang dihitung berdasarkan kemiringan tren *Sen's Slope*. Setiap batang menunjukkan besarnya tren SST dalam $^{\circ}\text{C}$ per tahun, sementara garis *error bar* mencerminkan deviasi standar antar grid, yang merepresentasikan tingkat variabilitas spasial untuk setiap bulan.

Secara umum, seluruh bulan menunjukkan tren positif, mengindikasikan bahwa pemanasan SST terjadi sepanjang tahun. Nilai rata-rata tren berada dalam kisaran sekitar $0,018\text{--}0,025^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$, yang relatif seragam antar bulan, namun dengan beberapa perbedaan yang dapat diamati.

Bulan Desember menunjukkan rata-rata tren spasial tertinggi, mendekati $0,025^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$, dengan deviasi standar yang juga cukup besar, menandakan adanya

wilayah-wilayah tertentu yang mengalami pemanasan signifikan pada bulan ini. Bulan-bulan lain dengan tren yang cenderung lebih tinggi meliputi Oktober dan November, yang menunjukkan awal penguatan tren menjelang musim hujan (Desember-Januari-Februari).

Sementara itu, bulan Juni dan Juli menunjukkan nilai tren rata-rata yang sedikit lebih rendah dibanding bulan lainnya, meskipun perbedaannya tidak terlalu mencolok. Hal ini sejalan dengan hasil peta tren bulanan sebelumnya (Gambar 4) yang menunjukkan pelemahan relatif pada tren SST di beberapa wilayah selama musim kemarau.

Deviasi standar yang cukup besar pada semua bulan menunjukkan bahwa meskipun ada pemanasan secara rata-rata, tingkat intensitasnya bervariasi antar wilayah, yang mengindikasikan pentingnya peran faktor-faktor lokal dan regional dalam memodulasi pemanasan laut.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa selama periode 1982–2024, SST di wilayah Indonesia mengalami tren pemanasan yang konsisten sepanjang tahun, dengan laju sekitar $0,020^{\circ}\text{C}$ per tahun—sedikit lebih tinggi dari tren global ($0,018^{\circ}\text{C}$ per tahun). Terdapat hubungan signifikan antara SST Indonesia dan global ($r = 0,59$; $p < 0,001$), yang menunjukkan pengaruh kuat pemanasan global, meskipun variabilitas lokal tetap berperan.

Secara spasial, wilayah utara dan Laut Jawa menunjukkan korelasi tinggi dengan SST global, sementara wilayah selatan, seperti Nusa Tenggara Timur dan selatan Papua, menunjukkan korelasi lebih rendah—kemungkinan dipengaruhi oleh dinamika lokal seperti *upwelling* dan arus lintas Indonesia (ITF). Secara musiman, pemanasan

lebih kuat terjadi pada musim hujan (Oktober–Desember) dan cenderung melemah pada musim kemarau di beberapa wilayah selatan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Indonesia mengalami pemanasan laut yang sejalan dengan perubahan iklim global, dengan variasi spasial dan musiman yang penting untuk diperhatikan dalam strategi adaptasi kelautan dan pesisir.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak Direktorat Riset dan Inovasi Institut Teknologi Bandung (DRI ITB) skema Program Riset ITB Tahun 2025 Batch II dan Program *Overseas Research Grant, The Asahi Glass Foundation* 2025 yang telah memberikan dukungan pendanaan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Dukungan finansial dari kedua skema ini memberikan fondasi yang kuat dalam memahami dinamika suhu permukaan laut di wilayah Indonesia dalam konteks perubahan iklim global.

6. REFERENSI

- [1] Kusuma, D., Murdimanto, A., Aden, L., Sukresno, B., Jatisworo, D., Hanintyo, R. (2017), Sea surface temperature dynamics in Indonesia. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Yogyakarta, Indonesia, 27–28 September 2017; p. 012038
- [2] Santoso, T. W., Kunarso, K., & Marwoto, J. (2021), Analisa Spasial dan Temporal Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a selama 2 Dekade di Perairan Indonesia. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(4), 370–381.
- [3] Tresnawati, R., Wirasatriya, A., Wibowo, A., Susanto, R. D., Widiaratih, R.,

- Setiawan, J. D., Kurang, R. Y. (2024), Long term of sea surface temperature prediction for Indonesia seas using multi time-series satellite data for upwelling dynamics projection, *Remote Sens. Appl.: Society and Environment* 33 101117.
- [4] Yuliardi, A. Y., Sukma, R., Prayogo, L., Heltria, S., & Putra, M. (2024). Analisis Distribusi Suhu Permukaan Laut (SPL) dan Pola Arus di Perairan Palang Tuban dan Area Sekitarnya: *Jurnal Miyang: Ronggolawe Fisheries and Marine Science Journal*, 4(1), 7-11.
- [5] Yeh, S. W., Ham, Y. G., & Lee, J. Y. (2012). Changes in the tropical Pacific SST trend from CMIP3 to CMIP5 and its implication of ENSO. *Journal of Climate*, 25(21), 7764-7771.
- [6] Habibie, M. N., & Nuraini, T. A. (2014). Karakteristik dan tren perubahan suhu permukaan laut di Indonesia periode 1982-2009. *Jurnal meteorologi dan geofisika*, 15(1).
- [7] Ihara, C., Kushnir, Y., & Cane, M. A. (2008). Warming trend of the Indian Ocean SST and Indian Ocean dipole from 1880 to 2004. *Journal of Climate*, 21(10), 2035-2046.
- [8] 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.
- [9] Kessler, A., Goris, N., & Lauvset, S. K. (2022). Observation-based Sea surface temperature trends in Atlantic large marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, 208, 102902.
- [10] Puspasari, R., Rahmadi, P., Rahmawati, P. F., & Samu-Samu, A. S. (2015). Interaksi variabilitas iklim dengan ekosistem terumbu karang dan sumber daya ikan karang. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 21(4), 211-220.
- [11] Nuryanto, D. E. (2012). Keterkaitan Antara Monsun Indo-Australia dengan Variabilitas Musiman Curah Hujan di Benua Maritim Indonesia Secara Spasial Berbasis Hasil Analisis Data Satelit TRMM. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(2).
- [12] Aldrian, E., & Dwi Susanto, R. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(12), 1435-1452.
- [13] Habibullah, A. D., & Tarya, A. (2021). Sea surface temperature variability in Indonesia and its relation to regional climate indices. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 925, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- [14] Xu, Z., Ji, F., Liu, B., Feng, T., Gao, Y., He, Y., & Chang, F. (2021). Long-term evolution of global sea surface temperature trend. *International Journal of Climatology*, 41(9), 4494-4508.
- [15] Lian, T., Shen, Z., Ying, J., Tang, Y., Li, J., & Ling, Z. (2018). Investigating the uncertainty in global SST trends due to internal variations using an improved trend estimator. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(3), 1877-1895.
- [16] 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.

- [17] Banzon, V., Smith, T. M., Chin, T. M., Liu, C., and Hankins, W., 2016: A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 165–176, doi:10.5194/essd-8-165-2016
- [18] Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473–5496, doi:10.1175/JCLI-D-14-00293.1
- [19] De Deckker, P. (2016). The Indo-Pacific Warm Pool: critical to world oceanography and world climate. *Geoscience Letters*, 3(1), 20.
- [20] Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- [21] Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water resources research*, 18(1), 107-121.
- [22] Ebrahim, M. A. H., & Al-Nasser, A. D. (2005). Estimating the slope of simple linear regression in the presence of outliers. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 4(2), 15.
- [23] Whitney, M. M. (2021). Observed and forecasted global warming pressure on coastal hypoxia. *Biogeosciences Discussions*, 2021, 1-19.
- [24] Nasution, B., Sinaga, G. H. D., Nurahman, A., & Siagian, R. C. (2023). Investigating the relationship between climate variables and solar activity: a regression analysis approach. *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, 7(2), 211-218.
- [25] Wirasatriya, A., Setiawan, J. D., Sugianto, D. N., Rosyadi, I. A., Haryadi, H., Winarso, G., et al. (2020). Ekman dynamics variability along the southern coast of Java revealed by satellite data. *Int. J. Remote Sens.* 41, 8475–8496. doi: 10.1080/01431161.2020.1797215
- [26] Rachman, H. A., Setiawati, M. D., Hidayah, Z., Syah, A. F., Nandika, M. R., Lumban- Gaol, J., As-syakur, A. R., & Syamsudin, F. (2024). Dynamic of upwelling variability in southern Indonesia region revealed from satellite data: Role of ENSO and IOD. *Journal of Sea Research*, 202, Article 102543. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102543>
- [27] Jin L, Liu C, Cao N, Liao X, Xue Y, Bao R, Fan L, Zhu L, Su Q, Yang K, Zheng R, Chang S and Liang M (2024) Tracking the variability of the western Pacific warm pool heat content over 1980–2020. *Front. Earth Sci.* 12:1377715.
- [28] Syaifullah, M. D. (2015). Suhu permukaan laut perairan indonesia dan hubungannya dengan pemanasan global. *Jurnal Segara*, 11(2), 103-113.
- [29] Xie, S. P., Deser, C., Vecchi, G. A., Ma, J., Teng, H., & Wittenberg, A. T. (2010). Global warming pattern formation: Sea surface temperature and rainfall. *Journal of Climate*, 23(4), 966-986.
- [30] Napitupulu, G., Fekranie, N. A., Millina, A. V., Putri, M. R., Kartadikaria, A. R., Setiawan, A., ... & Fajary, F. R. (2025). Seasonal variability of surface Heat Transport in the Banda Sea. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 41(2), 105.