JURNAL LAUT PULAU, 5 (2): 68 - 78
E-ISSN: 2830-1676
DOI: https://doi.org/10.30598/jlpvol5iss2pp68-78

Respon Suhu Laut dan Struktur Termal Kolom Air terhadap *Forcing* Angin Monsun di Laut Banda

Response of Sea Surface Temperature and Water Column Thermal Structure to Monsoon Wind Formic in the Banda Sea

Pedro El-Roy Wattimury[1*], Maulana Ahmad Isman Tubaka[1], Farrel Siraj[1], Ludi Kinlihu[1]
[1]Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Pattimura, Ambon, Indonesia
*Corresponding author: E-mail: wattimurypedro32@gmail.com

(Received: 14 September 2026, Accepted: 23 November 2026, Online: 25 November 2026)

Abstract

The Banda Sea is influenced by the Asian–Australian monsoon system. This study compared ocean currents, winds, near-surface temperature (0.494 m, used as an approximation of sea surface temperature), and vertical thermal structure during 2024–2025 using monthly Copernicus Marine and ERA5 data. During the Southeast Monsoon (June–September), near-surface temperature was 1.92 °C lower and the mean wind vector magnitude was 2.35 m/s higher than during the remaining months. Cooling of at least 1 °C covered 97.91% of the valid ocean grid area. Monthly temperature and wind magnitude were negatively correlated (r = −0.812). In the profile subregion, the 20 °C isotherm was 13.28 m shallower on average. Cooling there was stronger in 2024, while isotherm shoaling was greater in 2025. Together, the surface and subsurface patterns are consistent with possible upwelling in the profile subregion. The difference between years indicates that the magnitude of near-surface cooling and isotherm shoaling did not vary in step during the study period.

Keywords: *Banda Sea, Monsoon Wind, Sea Surface Temperature,Thermocline, Upwelling*

Abstrak

Laut Banda dipengaruhi oleh sistem monsun Asia–Australia. Penelitian ini membandingkan arus laut, angin, suhu dekat permukaan (0,494 m, dipakai sebagai pendekatan suhu permukaan laut), dan struktur termal vertikal selama 2024–2025 menggunakan data bulanan Copernicus Marine dan ERA5. Selama Monsun Tenggara (Juni–September), suhu dekat permukaan rata-rata 1,92 °C lebih rendah dan besar vektor angin rata-rata 2,35 m/s lebih tinggi dibandingkan bulan lainnya. Pendinginan setidaknya 1 °C mencakup 97,91% luas sel laut valid. Suhu dan besar vektor angin berkorelasi negatif pada deret bulanan (r = −0,812). Di subwilayah profil, isoterm 20 °C rata-rata lebih dangkal 13,28 m. Pendinginan di subwilayah tersebut lebih kuat pada 2024, sedangkan pendangkalan isoterm lebih besar pada 2025. Pola permukaan dan bawah permukaan ini konsisten dengan kemungkinan upwelling di subwilayah profil. Perbedaan antartahun menunjukkan bahwa besarnya pendinginan dekat permukaan dan pendangkalan isoterm tidak selalu berubah sebanding selama periode kajian.

Kata Kunci: Laut Banda, Angin Monsun, Suhu Permukaan Laut, Termoklin, Upwelling

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
OPEN ACCESS

PENDAHULUAN

Laut Banda merupakan cekungan dalam di perairan Indonesia dan bagian dari jalur Arus Lintas Indonesia yang menghubungkan Samudra Pasifik dan Hindia (Gordon, 2005). Dinamika perairan Indonesia berkaitan dengan sirkulasi laut dan variabilitas atmosfer regional (Sprintall et al., 2014). Di Laut Banda, pembalikan angin monsun mengubah sirkulasi lapisan atas (Hutahaean & Wilson, 1992). Selama Monsun Tenggara, transpor Ekman dapat menyebabkan divergensi permukaan dan mendorong naiknya air yang lebih dingin dari lapisan bawah (Gordon & Susanto, 2001).

Pemodelan numerik regional menunjukkan bahwa angin monsun merupakan penggerak utama variabilitas suhu permukaan musiman di perairan Indonesia (Kida & Richards, 2009). Di Laut Banda, pola suhu permukaan juga berubah antartahun (Iskandar, 2010). Meski pendinginan selama Monsun Tenggara telah didokumentasikan, dengan kondisi dingin yang menonjol sekitar Juli–Agustus (Tristianto et al., 2021), besarnya pendinginan dekat permukaan dan pendangkalan isoterm masih perlu dibandingkan pada cakupan wilayah yang sama. Pengaruh angin lokal dan pengaruh dari luar cekungan memberi konteks untuk menafsirkan perbedaan antartahun tersebut (Rachmayani et al., 2019).

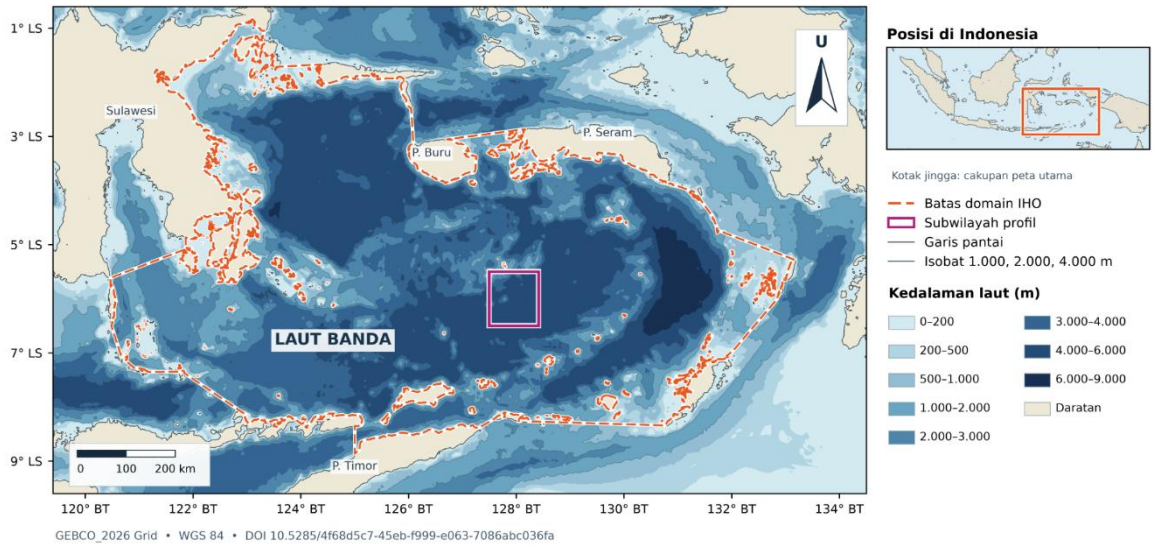
Kajian terdahulu memetakan indikasi upwelling di Laut Banda menggunakan suhu permukaan, klorofil-a, angin, dan arus (Putra et al., 2017). Suhu permukaan dan klorofil-a juga digunakan untuk menelaah perubahan pola upwelling pada berbagai kondisi ENSO dan IOD (Nurafifah et al., 2022). Data permukaan memberi informasi terbatas tentang kedalaman lapisan termal serta kesesuaian perubahan suhu dekat permukaan dengan perubahan di bawahnya.

Penelitian ini mendeskripsikan variasi spasial dan temporal suhu dekat permukaan, angin, dan arus di Laut Banda selama 2024–2025. Analisis mengukur lokasi, intensitas, dan luas pendinginan selama Monsun Tenggara, lalu membandingkan besarnya pendinginan dengan perubahan kedalaman isoterm 20 °C pada sel-sel yang sama di subwilayah analisis profil. Perbandingan antartahun digunakan untuk menilai apakah kedua indikator berubah searah dan sebanding. Hubungan suhu, angin, dan isoterm digunakan untuk membahas indikasi upwelling serta batas interpretasinya.

METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di perairan Laut Banda, dengan domain kajian mencakup koordinat sekitar 120–134° BT dan 0–9° LS. Batas wilayah perairan Laut Banda mengacu pada standar International Hydrographic Organization (IHO) sebagaimana dipublikasikan dalam Limits of Oceans and Seas (S-23) (Gambar 1). Analisis difokuskan pada dinamika variabilitas periode Januari 2024 hingga Desember 2025. Analisis vertikal dilakukan pada subwilayah 127,50–128,42° BT dan 5,50–6,50° LS. Subwilayah ini dipilih untuk membandingkan pendinginan dekat permukaan dan perubahan kedalaman isoterm 20 °C di bagian dalam cekungan yang jauh dari pesisir (Gambar 1), dengan menggunakan sel yang memiliki profil suhu valid sepanjang periode kajian. Pengamatan sebelumnya mendokumentasikan variasi musiman struktur lapisan atas Laut Banda (Ismail et al., 2024).



Gambar 1 Peta Lokasi Penelitian

Metode Pengambilan Data

Data suhu potensial (thetao) dan komponen arus (uo, vo) berasal dari produk Global Ocean Physics Analysis and Forecast (GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024) dengan resolusi sekitar 0,0833° × 0,0833° (Copernicus Marine Service, tanpa tahun). ID dataset bulanan suhu dan arus masing-masing adalah cmems_mod_glo_phy-thetao_anfc_0.083deg_P1M-m_202406 dan cmems_mod_glo_phy-cur_anfc_0.083deg_P1M-m_202406. Deret suhu dan arus dekat permukaan menggunakan level 0,494 m. Suhu potensial pada level teratas model ini dipakai sebagai pendekatan suhu permukaan laut dan selanjutnya disebut suhu dekat permukaan, karena datanya berasal dari produk analisis dan prakiraan, bukan dari pengukuran satelit atau pengukuran langsung pada permukaan laut. Perbandingan dengan kajian berbasis citra satelit perlu dilakukan dengan hati-hati karena perbedaan kedalaman dan produk data. Komponen angin 10 m (u10, v10) berasal dari data bulanan ERA5 pada level tunggal dengan resolusi 0,25° × 0,25° (Copernicus Climate Change Service, tanpa tahun). Hersbach et al. (2020) menjelaskan sistem reanalisis ERA5. Data berupa rata-rata bulanan kalender. Suhu Desember 2024 dilengkapi dari dataset dan versi yang sama sehingga deret analisis mencakup 24 bulan.

Metode Analisis Data

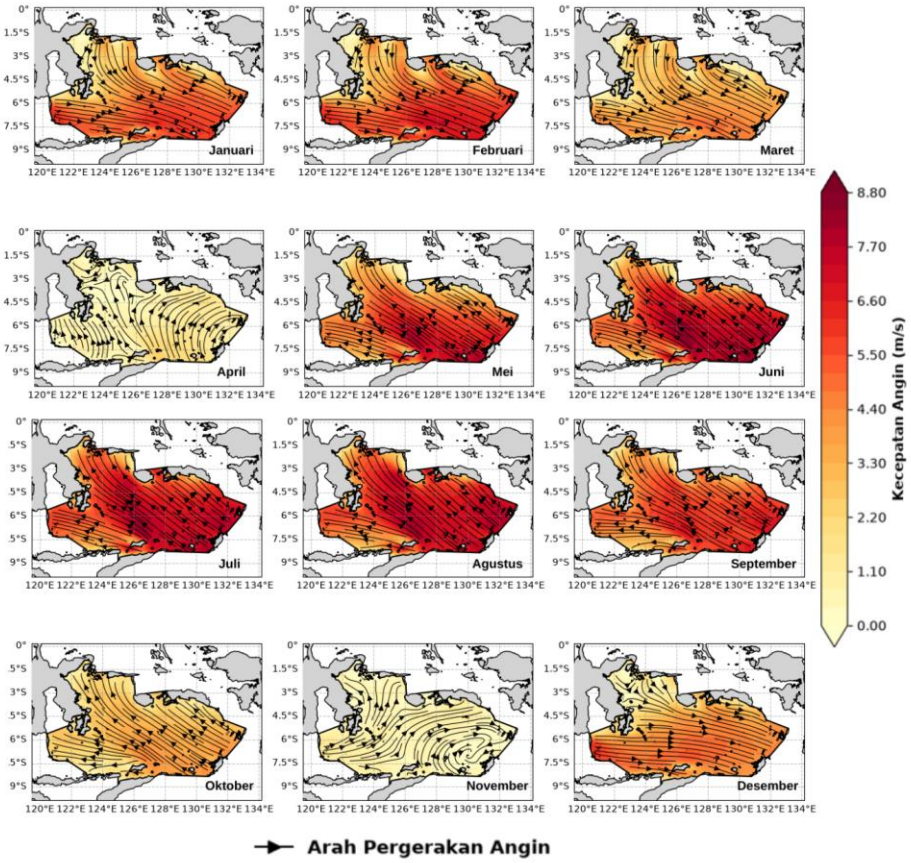
Analisis Python menggunakan grid asli tiap produk. Sel dipilih berdasarkan posisi pusatnya terhadap poligon batas IHO (S-23) dan dipertahankan jika valid pada seluruh bulan. Rata-rata wilayah menggunakan bobot kosinus lintang. Besar vektor angin dan arus dihitung dari komponen bulanan tiap sel sebelum dirata-ratakan secara spasial. Peta angin dan arus menggunakan interpolasi komponen untuk visualisasi pola aliran. Peta selisih suhu dihitung pada grid asli dengan mengurangkan rata-rata bulan lainnya dari rata-rata Juni–September, dengan bobot sama per bulan. Cakupan pendinginan dihitung dari luas sel laut valid. Kedalaman isoterm 20 °C dihitung melalui interpolasi linear antara dua level suhu bersebelahan pada persilangan pertama dari permukaan dan dirata-ratakan dengan bobot kosinus lintang pada 155 sel yang valid selama 24 bulan.

Korelasi Pearson dilaporkan secara deskriptif. Bentuk hubungan diperiksa pada diagram pencar dan dibandingkan dengan korelasi peringkat Spearman. Pengaruh satu bulan diperiksa dengan menghitung ulang Pearson setelah setiap bulan dikeluarkan secara bergantian. Autokorelasi diperiksa pada jeda satu bulan. Pengaruh siklus kalender ditinjau secara eksploratif dengan mengorelasikan selisih 2025 dikurangi 2024 untuk 12 pasangan bulan yang sama. Deret mencakup dua siklus tahunan dan bulan berurutan saling berkaitan, sehingga kontras musiman dilaporkan tanpa uji-t independen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dinamika Spasial-Temporal Angin, Suhu Permukaan Laut, dan Arus

Peta angin (Gambar 2) memperlihatkan penguatan angin di bagian tengah dan timur Laut Banda selama Juni–September dan pelemahan pada bulan transisi. Arah angin juga berbalik antarmusim: pada musim barat, misalnya Januari, garis alir mengarah ke timur hingga tenggara, sedangkan pada Juni–September garis alir mengarah ke barat laut, yaitu angin yang berasal dari tenggara.

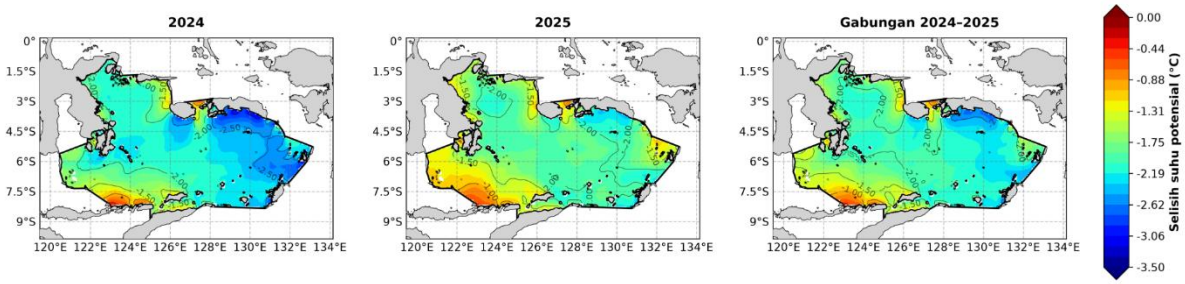


Gambar 2 Pola bulanan besar vektor dan arah angin 10 m di Laut Banda

Pada peta bulan Juli, angin relatif lebih lemah di tepi utara dekat Sulawesi dan di tepi selatan dekat Nusa Tenggara, yang kemungkinan dipengaruhi daratan di sekitarnya. Penguatan di bagian tengah dan timur sejalan dengan peran angin tenggara sebagai penggerak sirkulasi lapisan atas Laut Banda selama monsun tenggara (Hutahaean & Wilson, 1992). Kecepatan angin yang lebih tinggi

menghasilkan tegangan angin yang lebih besar, yang dapat memperkuat transpor Ekman dan pencampuran vertikal.

Peta selisih musiman (Gambar 3) menunjukkan bahwa seluruh 7.954 sel laut valid lebih dingin pada Juni–September dibandingkan bulan lainnya pada kedua tahun. Selisih rata-rata berbobot mencapai −2,09 °C pada 2024 dan −1,74 °C pada 2025. Selisih lokal terbesar mencapai −3,30 °C pada 130,42° BT dan 3,67° LS pada 2024, serta −2,54 °C pada 131,08° BT dan 7,92° LS pada 2025. Secara gabungan, 97,91% luas sel valid, sekitar 665.342 km², mengalami pendinginan setidaknya 1 °C. Selisih di setiap sel membandingkan dua kelompok bulan, sedangkan minimum deret waktu pada Gambar 5 menunjukkan nilai terendah dari 24 rata-rata bulanan seluruh wilayah. Sel dengan pendinginan terbesar pada 2024 berada di perairan dekat Seram. Pada sel pesisir seperti ini, adveksi lokal dan pencampuran di sekitar lereng atau perairan dangkal juga dapat memengaruhi suhu. Sinyal pencampuran pasang surut pada suhu permukaan terkonsentrasi di selat, alur, dan ambang yang sempit, dengan sinyal yang lebih luas di sekitar Laut Seram, sedangkan cekungan dalam Laut Banda menunjukkan sinyal yang kecil (Ray & Susanto, 2016). Karena itu, sel dekat Seram sebaiknya ditafsirkan terpisah dari pola cekungan dalam. Pemilihan subwilayah profil di cekungan dalam (Gambar 1) sejalan dengan hal ini, meskipun peran pencampuran pasang surut tidak diuji dalam penelitian ini.



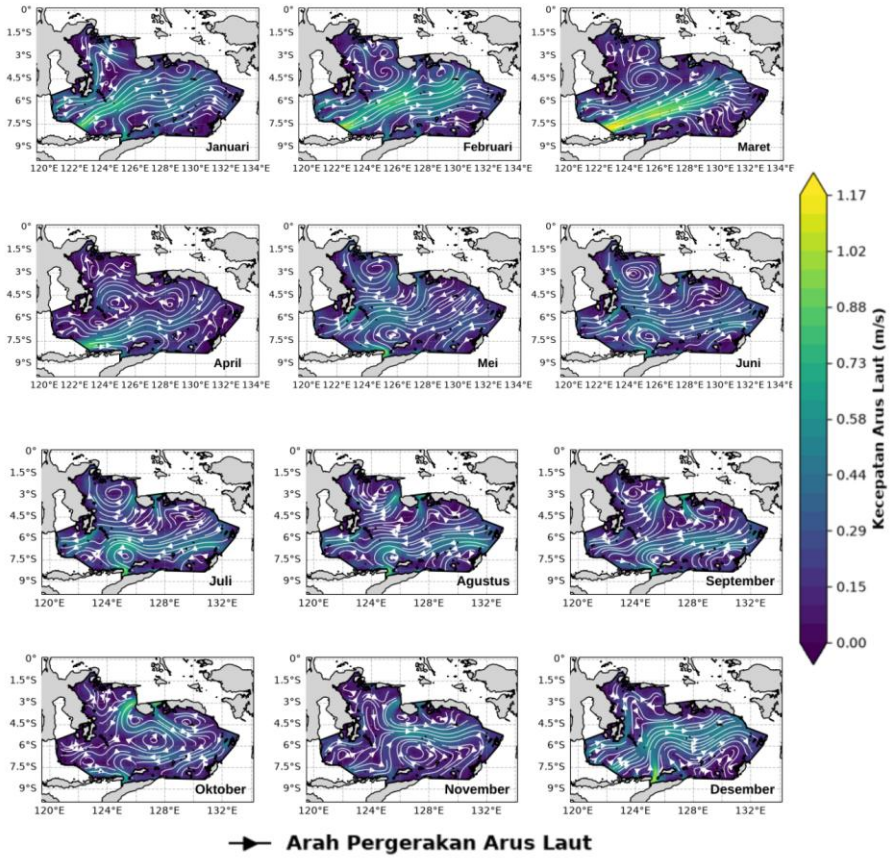
Gambar 3 Selisih suhu potensial permukaan antara Juni-September dan bulan lainnya.

Pada Gambar 3, pendinginan terkuat tahun 2024 membentuk inti di bagian timur laut hingga timur cekungan (sekitar 128,5–132° BT dan 3,5–6,5° LS) dengan selisih lebih rendah dari −2,5 °C. Pada 2025 inti tersebut melemah dan pendinginan lebih seragam, sekitar −2 °C, di bagian tengah cekungan. Pendinginan paling lemah, sekitar −0,5 hingga −1,5 °C, terdapat di tepi selatan dekat Nusa Tenggara, bagian barat daya, dan bagian barat laut dekat Sulawesi, dan wilayah tepi ini lebih luas pada 2025. Secara visual, pendinginan terkuat bertepatan dengan angin kuat di bagian tengah dan timur (Gambar 2), sedangkan pendinginan terlemah bertepatan dengan tepi cekungan yang anginnya relatif lemah. Kecocokan spasial ini belum dihitung secara kuantitatif. Di dekat pulau, perairan dangkal dan pencampuran lokal juga dapat membatasi kontras musiman, sehingga pola tepi tidak dapat dikaitkan hanya dengan angin.

Pendinginan yang hampir seragam di seluruh sel laut valid mengindikasikan bahwa proses penyebabnya bekerja pada skala cekungan, bukan pada satu fitur lokal. Di kawasan Banda–Arafura, penurunan suhu lapisan campuran pada Mei–Agustus dikaitkan dengan insolasi yang paling kecil dan angin tenggara yang kuat, sehingga terjadi kehilangan panas permukaan dan pendinginan oleh proses vertikal (Halkides et al., 2011). Kontribusi terbesar terhadap tendensi suhu musiman di sana berasal dari fluks panas permukaan, yang diperkuat oleh pencampuran vertikal turbulen (Halkides et al., 2011). *Upwelling* Ekman yang diturunkan dari angin juga dilaporkan berkorelasi baik dengan suhu lapisan campuran musiman di Laut Banda (Gordon & Susanto, 2001). Dengan demikian, selisih suhu pada

Gambar 3 kemungkinan merupakan gabungan dari kehilangan panas, pencampuran, dan *upwelling*, dan kontribusi masing-masing tidak dapat dipisahkan dengan data yang dipakai.

Peta arus (Gambar 4) memperlihatkan pola aliran berpusar yang posisi dan bentuknya berubah antarpanel. Pola ini dikenali secara visual dari garis alir. Persistensi, vortisitas, dan pengaruh interpolasi belum diuji, sehingga identifikasi eddy masih memerlukan pemeriksaan kuantitatif. Kajian sebelumnya telah mendokumentasikan eddy di Laut Banda (Hanifah & Ningsih, 2016). Rata-rata besar vektor arus tidak mengikuti puncak angin. Nilainya tertinggi pada Januari–Februari 2024, sekitar 0,34 m/s, menurun hingga sekitar 0,18 m/s pada November 2024, dan pada 2025 lebih rendah dan relatif datar (Gambar 5c).

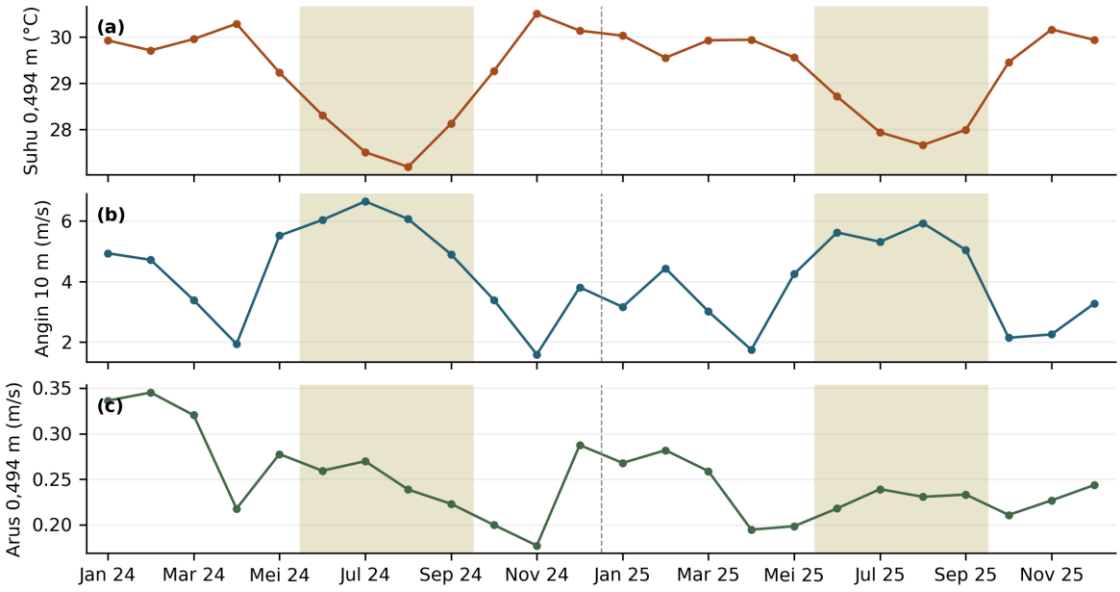


Gambar 4 Pola bulanan besar vektor dan arah arus pada permukaan di Laut Banda.

Selisih antara Monsun Tenggara dan bulan lainnya hanya −0,014 m/s (Tabel 1), kecil dibandingkan rentang variasi bulanan sepanjang deret. Kondisi ini mengindikasikan bahwa arus pada 0,494 m dipengaruhi proses selain angin lokal, misalnya aktivitas *eddy* dan sirkulasi yang lebih luas, tetapi penelitian ini tidak menguji kontribusi keduanya.

Deret bulanan 2024–2025 (Gambar 5) menghasilkan korelasi Pearson sebesar −0,812 untuk suhu–angin, 0,091 untuk suhu–arus, dan 0,349 untuk angin–arus. Diagram pencar suhu–angin menunjukkan kecenderungan menurun. Pada pasangan ini, Spearman mencapai −0,851 dan Pearson berkisar antara −0,844 dan −0,785 ketika satu bulan dikeluarkan bergantian. Diagram pencar suhu–arus memperlihatkan sebaran tanpa kecenderungan yang jelas (Spearman −0,043). Sebaran angin–arus menunjukkan kecenderungan positif yang lebih lemah daripada hubungan suhu–angin (Spearman 0,383). Autokorelasi jeda satu bulan bernilai positif untuk suhu (0,746), angin (0,489), dan arus

(0,554), sehingga koefisien ditafsirkan secara deskriptif tanpa nilai p. Pada selisih bulan sepadan antartahun, korelasi suhu–angin melemah menjadi −0,533, yang menunjukkan bahwa siklus musiman bersama dapat berkontribusi pada kuatnya korelasi deret asli.



Gambar 5 Deret bulanan rata-rata wilayah suhu dekat permukaan, angin, dan arus di Laut Banda, 2024–2025. Arsiran menandai Juni–September.

Deret waktu angin (Gambar 5b) memperlihatkan dua minimum setiap tahun, pada April dan sekitar Oktober–November, yang mengapit maksimum pada Juni–September. Pola ini mengikuti pergantian monsun dan dua periode transisi di antaranya. Selama Monsun Tenggara angin tidak hanya lebih kuat tetapi juga lebih stabil, dengan simpangan baku antarbulan 0,59 m/s, kira-kira setengah dari 1,20 m/s pada bulan lainnya (Tabel 1). Puncak angin 2025, sekitar 5,9 m/s pada Agustus, lebih rendah dan terjadi satu bulan lebih lambat daripada puncak 2024 (6,65 m/s pada Juli). Perbedaan ini sejalan dengan pendinginan rata-rata yang lebih kecil pada 2025 (Gambar 3), sedangkan pendangkalan isoterm justru lebih besar pada 2025, sehingga respons permukaan dan bawah permukaan tidak hanya mengikuti kekuatan angin tahunan. Pemulihan suhu pada September–November 2024 berlangsung cepat ketika angin turun dari sekitar 4,9 menjadi 1,6 m/s, yang mengindikasikan bahwa pendinginan permukaan bersifat sementara dan mengikuti penurunan angin.

Korelasi negatif yang kuat antara suhu dan angin sejalan dengan peran angin monsun sebagai penggerak utama variabilitas suhu permukaan musiman di perairan Indonesia (Kida & Richards, 2009). Namun, kedua deret mengikuti siklus tahunan yang sama sehingga koefisien ini menggambarkan keterkaitan musiman, bukan hubungan sebab-akibat. Korelasi suhu–arus yang hampir nol kemungkinan muncul karena besar vektor arus rata-rata wilayah merangkum aliran dengan arah yang berbeda-beda, sehingga ukuran ini tidak menangkap divergensi. Divergensi lapisan permukaan merupakan mekanisme pengangkatan air yang telah dibahas untuk Laut Banda (Gordon & Susanto, 2001). Ukuran yang lebih sesuai untuk menelaah *upwelling* adalah divergensi atau ikal tegangan angin, yang belum dihitung dalam penelitian ini. Selama Monsun Tenggara, suhu dekat permukaan rata-rata 1,92 °C lebih rendah dan besar vektor angin 2,35 m/s lebih tinggi dibandingkan bulan lainnya (Tabel 1). Rata-rata besar vektor arus turun sekitar 0,014 m/s. Suhu bulanan rata-rata wilayah mencapai minimum 27,19 °C pada Agustus 2024, satu bulan setelah puncak angin rata-rata

wilayah pada Juli 2024 sebesar 6,65 m/s. Waktu minimum tersebut kemungkinan mencerminkan pendinginan yang terakumulasi selama angin kuat, karena suhu lapisan campuran menurun sepanjang Mei–Agustus di kawasan ini (Halkides et al., 2011).

Tabel 1 Statistik musiman parameter oseanografi Laut Banda, 2024-2025 (24 bulan)

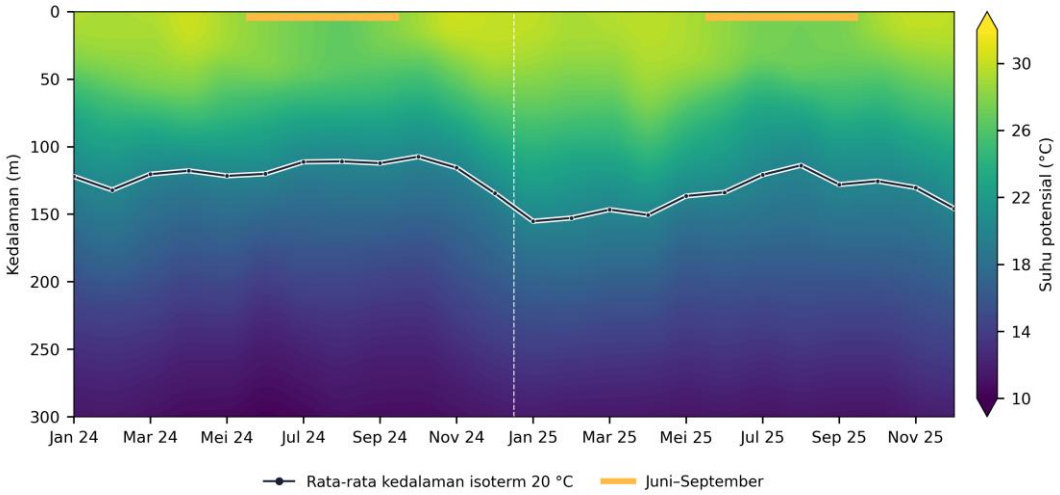
Variabel	Monsun Tenggara (n=8)	Musim Lainnya (n=16)	Selisih rerata
SPL (°C)	27,93 ± 0,48	29,85 ± 0,36	−1,92
Besar vektor angin (m/s)	5,70 ± 0,59	3,35 ± 1,20	+2,35
Besar vektor arus (m/s)	0,239 ± 0,018	0,253 ± 0,053	−0,014

Nilai musiman disajikan sebagai rata-rata ± simpangan baku antarbulan.

Struktur Vertikal Kolom Air dan Keterkaitan Antarvariabel

Diagram waktu–kedalaman (Gambar 6) menunjukkan bahwa isoterm 20 °C rata-rata lebih dangkal selama Juni–September pada kedua tahun. Pada 155 sel di subwilayah profil, kedalaman rata-rata gabungan berubah dari 132,22 m pada bulan lainnya menjadi 118,94 m selama Juni–September, atau lebih dangkal 13,28 m. Pendangkalan mencapai 7,81 m pada 2024 dan 18,75 m pada 2025. Pada sel yang sama, suhu dekat permukaan selama Juni–September lebih rendah 2,18 °C pada 2024 dan 1,90 °C pada 2025.

Angin yang lebih kuat, suhu dekat permukaan yang lebih rendah, dan isoterm yang lebih dangkal konsisten dengan kemungkinan *upwelling* di subwilayah profil. Pendinginan lebih besar pada 2024, sementara pendangkalan lebih besar pada 2025. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kedua indikator perlu ditafsirkan bersama. Isoterm 20 °C yang lebih dangkal berarti air termoklin yang lebih dingin berada lebih dekat ke permukaan sehingga lebih mudah tercampur ke lapisan atas saat angin kuat. Proses bawah permukaan, terutama pencampuran vertikal turbulen, memang memperkuat pendinginan lapisan campuran musiman di kawasan Banda–Arafura (Halkides et al., 2011). Suhu dekat permukaan juga dipengaruhi pertukaran panas permukaan, sedangkan kedalaman isoterm mencerminkan struktur termal bawah permukaan, sehingga keduanya tidak selalu berubah searah antartahun. Variabilitas iklim antartahun seperti ENSO dan IOD dapat memodulasi pendinginan musiman di Laut Banda (Nurafifah et al., 2022). Aliran lintas Indonesia juga diketahui melambat dan mendangkal saat El Niño (Sprintall et al., 2014). Fase ENSO dan IOD pada 2024–2025 tidak dianalisis di sini, sehingga penyebab perbedaan antartahun belum dapat ditentukan. Peran relatif divergensi, adveksi, dan pertukaran panas permukaan belum dapat dipisahkan dengan analisis ini.



Gambar 6 Penampang melintang suhu potensial hingga 300 m pada subwilayah profil.

Pengamatan di Laut Banda menunjukkan bahwa lapisan penghalang mengalami variasi musiman (Ismail et al., 2024), sehingga kedalaman isoterm saja hanya menggambarkan aspek termal struktur kolom air. Kajian transpor Ekman di perairan selatan Sumatra Barat memberi contoh bahwa pengaruh angin monsun terhadap sirkulasi dapat ditelaah dengan menghitung transpor secara eksplisit (Siregar et al., 2026). Di Laut Halmahera, angin juga telah dikaji bersama variasi suhu dan salinitas permukaan, memberi konteks regional bagi penafsiran hubungan angin dan suhu di Laut Banda (Tubalawony et al., 2023). Rata-rata bulanan juga tidak menangkap variabilitas intramusiman. Pada fase aktif MJO, misalnya, data Argo di Laut Banda mencatat anomali suhu negatif sekitar 0,3 °C di lapisan campuran dan pendalaman lapisan campuran sekitar 25 m (Nabil et al., 2023). Pola pada penelitian ini karenanya mewakili kondisi rata-rata musiman, bukan variasi pada skala mingguan.

KESIMPULAN

Pada 2024–2025, pendinginan dekat permukaan di Laut Banda meluas hampir di seluruh perairan selama Monsun Tenggara dan bertepatan dengan angin yang lebih kuat dan lebih stabil. Hubungan negatif antara suhu dan angin pada skala bulanan mencerminkan keterkaitan musiman yang kuat, tetapi tidak membuktikan sebab-akibat, dan pendinginan tersebut kemungkinan merupakan gabungan kehilangan panas permukaan, pencampuran vertikal, dan *upwelling* yang tidak dapat dipisahkan dengan data yang dipakai. Pendinginan terkuat berada di bagian timur laut hingga timur cekungan dan terlemah di tepi cekungan, dan lokasinya berbeda antartahun, sehingga rata-rata wilayah hanya menggambarkan sebagian variasi spasialnya.

Pada subwilayah profil, pendinginan dekat permukaan disertai pendangkalan isoterm 20 °C, pola yang konsisten dengan kemungkinan *upwelling*. Tahun dengan angin lebih kuat (2024) menunjukkan pendinginan permukaan lebih besar, tetapi pendangkalan isoterm lebih besar pada 2025, sehingga respons permukaan dan bawah permukaan tidak hanya mengikuti kekuatan angin tahunan, dan penyebab perbedaan antartahun belum dapat ditentukan karena fase ENSO dan IOD tidak dianalisis. Kecepatan arus rata-rata wilayah tidak mengikuti siklus angin. Kesimpulan ini dibatasi oleh dua tahun data bulanan dan satu subwilayah profil. Kajian lanjutan dengan deret yang lebih panjang,

data beresolusi lebih tinggi, perhitungan divergensi atau ikal tegangan angin, serta data *in situ* diperlukan untuk memisahkan kontribusi tiap proses.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Copernicus Marine Service (CMEMS) dan Copernicus Climate Change Service (C3S) melalui Climate Data Store (CDS) atas ketersediaan data oseanografi dan reanalisis atmosfer yang digunakan secara terbuka dalam penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Farelio Wattimury atas penyediaan fasilitas perangkat komputasi yang menunjang tahapan pengolahan dan analisis data dalam penelitian ini.

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN (AI)

Penulis menyatakan bahwa tidak ada teknologi berbasis kecerdasan buatan (AI) yang digunakan dalam penyusunan, analisis, atau pembuatan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Copernicus Climate Change Service. Tanpa tahun. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present [Dataset]. Climate Data Store. https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7

Copernicus Marine Service. Tanpa tahun. Global Ocean Physics Analysis and Forecast (GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024) [Dataset]. https://doi.org/10.48670/moi-00016

GEBCO Bathymetric Compilation Group 2026. 2026. The GEBCO_2026 Grid [Dataset]. NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC. https://doi.org/10.5285/4f68d5c7-45eb-f999-e063-7086abc036fa

Gordon AL. 2005. Oceanography of the Indonesian Seas and their throughflow. *Oceanography,* 18(4): 14–27. https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.01

Gordon AL., Susanto RD. 2001. Banda Sea surface-layer divergence. *Ocean Dynamics,* 52(1): 2–10. https://doi.org/10.1007/s10236-001-8172-6

Halkides D., Lee T., Kida S. 2011. Mechanisms controlling the seasonal mixed-layer temperature and salinity of the Indonesian seas. *Ocean Dynamics,* 61: 481–495. https://doi.org/10.1007/s10236-010-0374-3

Hanifah F., Ningsih NS. 2016. The characteristic of eddies in the Banda Sea. *Advances and Applications in Fluid Mechanics,* 19(4): 889–902. https://doi.org/10.17654/FM019040889

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan RJ., Holm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnóti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut JN. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* 146(730): 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Hutahaean W., Wilson RE. 1992. Upper layer circulation in the Banda Sea in response to the onset of monsoon winds. *Marine Research Indonesia,* 28: 81–95. https://doi.org/10.14203/mri.v28i0.415

Iskandar I. 2010. Seasonal and interannual patterns of sea surface temperature in Banda Sea as revealed by self-organizing map. *Continental Shelf Research,* 30(9): 1136–1148. https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.03.003

Ismail MFA., Karstensen J., Sulaiman A., Priyono B., Budiman A., Basit A., Purwandana A., Arifin T. 2024. Observations of barrier layer seasonal variation in the Banda Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 129(6): e2023JC020829. https://doi.org/10.1029/2023JC020829

Kida S., Richards KJ. 2009. Seasonal sea surface temperature variability in the Indonesian Seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 114: C06016. https://doi.org/10.1029/2008JC005150

Nabil N., Atmadipoera AS., Nugroho D., Naulita Y., Koch-Larrouy A. 2023. Observed anomaly of temperature and mixed layer depth associated with the Madden Julian Oscillation (MJO) active phase in the Banda Sea, Indonesia. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences,* 28(4): 369–382. https://doi.org/10.14710/ik.ijms.28.4.369-382

Nurafifah UO., Zainuri M., Wirasatriya A. 2022. Pengaruh ENSO dan IOD terhadap distribusi suhu permukaan laut dan klorofil-a pada periode upwelling di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography,* 4(3): 74–85. https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i3.14971

Putra II., Sukmono A., Wijaya AP. 2017. Analisis pola sebaran area upwelling menggunakan parameter suhu permukaan laut, klorofil-a, angin dan arus secara temporal tahun 2003–2016 (studi kasus Laut Banda). *Jurnal Geodesi Undip,* 6(4): 157–168. https://doi.org/10.14710/jgundip.2017.18140

Rachmayani R., Ningsih NS., Februarianto M., Abdullah FAR. 2019. Response of upwelling variability to the local and remote forcing in the Banda Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 339(1): 012024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/339/1/012024

Ray RD., Susanto RD. 2016. Tidal mixing signatures in the Indonesian seas from high-resolution sea surface temperature data. *Geophysical Research Letters,* 43(15): 8115–8123. https://doi.org/10.1002/2016GL069485

Siregar A., Anjasman A., Johan S., Norfahmi SH., Lizalidiawati L. 2026. Seasonal variation of Ekman transport in the southern waters of West Sumatra. *Jurnal Kelautan Tropis,* 29(1): 70–80. https://doi.org/10.14710/jkt.v29i1.30594

Sprintall J., Gordon AL., Koch-Larrouy A., Lee T., Potemra JT., Pujiana K., Wijffels SE. 2014. The Indonesian seas and their role in the coupled ocean-climate system. *Nature Geoscience,* 7: 487–492. https://doi.org/10.1038/ngeo2188

Tristianto G., Wulandari SY., Suryoputro AAD., Handoyo G., Zainuri M. 2021. Studi variabilitas upwelling di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography,* 3(1): 25–35. https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i1.9764

Tubalawony S., Kalay D., Buamona Z. 2023. Variabilitas suhu dan salinitas di Laut Halmahera. *Jurnal Laut Pulau*: Hasil Penelitian Kelautan, 2(2): 6–16. https://doi.org/10.30598/jlpvol2iss2pp6-16