

Variabilitas Profil Kecepatan Suara di Laut Banda pada Muson Barat dan Timur

Variability of Sound Speed Profile in the Banda Sea During West and East Monsoon

Ratna Juita Sari^{1*}, Amir Yarkhasy Yuliardi¹, Agung Tri Nugroho¹, Diah Ayu Rahmalia¹, Agustina Sartika Yos Ekaristi Manik²

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, 53122 Indonesia

²Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tanjungpinang 29115 Indonesia

*Korespondensi: ratna.juita@unsoed.ac.id

Copyright ©2025, Author. Published by the Fisheries Science Study Program, Faculty of Science and Technology, Muhammadiyah University of Sidenreng Rappang, Article Info: Received: August 26, 2025; Revised: August 28, 2025; Accepted: September 1, 2025; Published: October 25, 2025

Abstrak

Kecepatan suara di laut merupakan parameter kunci bagi aplikasi akustik bawah laut, seperti komunikasi, navigasi, dan sistem sonar. Nilai kecepatan suara dipengaruhi oleh suhu, salinitas, dan tekanan, sehingga sangat sensitif terhadap dinamika oseanografi musiman. Meskipun Laut Banda dikenal sebagai salah satu pusat *upwelling* terkuat di Indonesia, kajian yang secara spesifik menilai variabilitas musiman profil kecepatan suara di wilayah ini masih terbatas. Studi ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan karakteristik suhu, salinitas, dan kecepatan suara antara periode muson barat dan timur di Laut Banda. Data suhu dan salinitas bulanan tahun 2023 dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) dengan resolusi spasial $0,083^\circ \times 0,083^\circ$ diolah menggunakan *Ocean Data View* (ODV). Kecepatan suara dianalisis distribusi horizontal dan vertikalnya pada kedalaman 0, 150, dan 300 m, serta profil vertikal hingga 500 m. Pada muson barat (Januari), suhu permukaan lebih tinggi ($29,5\text{--}31^\circ\text{C}$) dan kecepatan suara maksimum ($1543\text{--}1546\text{ m/s}$), dengan termoklin lebih dalam akibat *downwelling*. Sebaliknya, pada muson timur (Juli), suhu permukaan lebih rendah ($26,5\text{--}28,5^\circ\text{C}$), haloklin lebih dangkal ($34,7\text{--}35,2\text{ PSU}$ pada $50\text{--}150\text{ m}$), dan kecepatan suara permukaan menurun ($1538\text{--}1541\text{ m/s}$), mencerminkan *upwelling* musiman. Minimum kecepatan suara konsisten pada $300\text{--}500\text{ m}$ ($1496\text{--}1505\text{ m/s}$). Temuan ini menegaskan bahwa suhu merupakan faktor dominan pengontrol kecepatan suara, dengan implikasi penting bagi perencanaan operasi akustik bawah laut di Perairan Indonesia Timur.

Kata kunci: Kecepatan suara, Laut Banda, muson, salinitas, suhu

Abstract

Sound speed in the ocean is a key parameter for underwater acoustic applications, such as communication, navigation, and sonar systems. Sound speed is influenced by temperature, salinity, and pressure, making it highly sensitive to seasonal oceanographic dynamics. Although the Banda Sea is recognized as one of the strongest *upwelling* centers in Indonesia, studies specifically addressing the seasonal variability of sound speed profiles in this region remain limited. This study aims to analyze the differences in temperature, salinity, and sound speed characteristics between the west and east monsoon periods in the Banda Sea. Monthly temperature and salinity data for 2023 from the *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) with a spatial resolution of $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ were processed using *Ocean Data View* (ODV). Sound speed was analyzed in terms of its horizontal and vertical distributions at depths of 0, 150, and 300 m, as well as vertical profiles down to 500 m. During the west monsoon (January), surface temperature was higher ($29.5\text{--}31^\circ\text{C}$) and sound speed reached maximum values ($1543\text{--}1546\text{ m/s}$), with a deeper thermocline due to *downwelling*. In contrast, during the east monsoon (July), surface temperature was lower ($26.5\text{--}28.5^\circ\text{C}$), the halocline was shallower ($34.7\text{--}35.2\text{ PSU}$ at $50\text{--}150\text{ m}$), and surface sound speed decreased ($1538\text{--}1541\text{ m/s}$), reflecting seasonal *upwelling*. Minimum sound speed was consistently observed at $300\text{--}500\text{ m}$ ($1496\text{--}1505\text{ m/s}$). These

findings highlight temperature as the dominant factor controlling sound speed, with important implications for the planning of underwater acoustic operations in eastern Indonesian waters.

Keywords: Banda Sea, monsoon, salinity, sound speed, temperature

PENDAHULUAN

Laut Banda merupakan kawasan perairan laut dalam berbentuk cekungan (basin) yang terletak di antara Paparan Sunda di sebelah barat dan Paparan Sahul di sebelah timur. Kawasan ini memiliki topografi dasar laut yang kompleks, dengan cekungan dalam di bagian barat dan palung laut di bagian timur. Struktur topografi tersebut berperan penting dalam mengatur pola sirkulasi serta pertukaran massa air di kawasan ini (Wijaya *et al.*, 2018). Karakteristik massa air di Laut Banda juga dipengaruhi oleh pertemuan dua jalur utama *Indonesian Throughflow (ITF)*, yaitu jalur barat yang membawa massa air bersuhu rendah dan bersalinitas rendah dari Selat Makassar, serta jalur timur yang mengangkut massa air lebih hangat dan bersalinitas tinggi dari Laut Halmahera dan Laut Maluku. Kedua jalur arus tersebut bertemu di Laut Banda sebelum akhirnya mengalir menuju Samudra Hindia melalui Celah Timor dan Selat Ombai (Wyrski, 1961; Gordon & Fine, 1996; Atmadipoera *et al.*, 2009).

Dinamika musiman turut memberikan pengaruh terhadap kondisi massa air di Laut Banda (Atmadipoera *et al.*, 2022). Pada periode muson barat (Desember–Februari), terjadi proses *downwelling* akibat akumulasi massa air permukaan yang berasal dari Laut Jawa dan Laut Flores. Kondisi ini menyebabkan peningkatan suhu permukaan laut, penurunan salinitas, serta berkurangnya konsentrasi unsur hara. Sebaliknya, pada periode muson timur (Juni–Agustus), dominasi aliran massa air ke arah Laut Flores dan Laut Jawa disertai melemahnya suplai air dari Samudra Pasifik memicu proses *upwelling*. Proses ini mengangkat massa air dari lapisan dalam ke permukaan, sehingga suhu permukaan menurun, salinitas meningkat, dan konsentrasi unsur hara bertambah (Wyrski, 1961; Gordon & Sudanto, 2001; Atmadipoera *et al.*, 2022).

Variabilitas massa air tersebut berkontribusi terhadap perubahan parameter oseanografi, seperti suhu permukaan laut, salinitas, dan konsentrasi klorofil-*a* (Wyrski, 1961; Kunarso *et al.*, 2011; Cao & Zhang, 2017). Laut Banda diketahui mengalami fluktuasi suhu musiman, terutama pada lapisan permukaan, yang sangat dipengaruhi oleh pola muson (Kida & Richards, 2009). Selain itu, suhu laut memiliki keterkaitan langsung dengan salinitas. Suhu laut yang tinggi umumnya mengindikasikan tingkat salinitas yang tinggi, karena suhu yang tinggi menyebabkan penguapan air laut, meninggalkan garam yang kemudian larut kembali ke dalam laut dan meningkatkan kadar salinitas (Harvianto *et al.*, 2015). Oleh karena itu, suhu dan salinitas merupakan dua faktor oseanografi yang memainkan peran penting dalam aspek fisik lingkungan perairan (Kalangi *et al.*, 2012; Suhana, 2018) sekaligus variabel penting yang berhubungan langsung dengan kecepatan rambat suara dalam air laut.

Kecepatan rambat suara dalam medium akustik dikenal sebagai kecepatan suara. Di dalam air laut, parameter ini dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu suhu, salinitas, dan kedalaman. Secara umum, kecepatan suara meningkat seiring dengan kenaikan suhu, salinitas, serta tekanan hidrostatik yang berbanding lurus dengan kedalaman. Secara estimatif, peningkatan suhu sebesar 1°C dapat menambah kecepatan rambat suara sekitar 4,0 m/s, kenaikan salinitas sebesar 1 psu meningkatkan kecepatan sekitar 1,4 m/s, sedangkan kedalaman 1 km dapat menambah kecepatan sekitar 17 m/s (Erbe *et al.*, 2022). Variasi suhu dan salinitas laut tidak hanya terjadi secara horizontal, sebagaimana terlihat pada distribusi permukaan laut musim panas di belahan bumi utara, tetapi juga berlangsung lebih tajam secara vertikal. Oleh karena itu, lautan kerap dimodelkan sebagai lapisan-lapisan horizontal yang tersusun secara vertikal, masing-masing dengan karakteristik fisik yang khas. Pemahaman mengenai profil vertikal suhu dan salinitas sangat penting untuk menjelaskan mekanisme rambatan suara di berbagai wilayah geografis, terutama karena adanya perbedaan reflektivitas antar lapisan yang tinggi (Benoit-Bird *et al.*, 2017).

Kecepatan suara di laut merupakan elemen mendasar dalam observasi lingkungan laut karena informasi yang akurat mengenai profil kecepatan suara sangat penting untuk mendukung berbagai aplikasi seperti eksplorasi kelautan, komunikasi bawah air, sistem sonar, transmisi data bawah laut, serta penelitian lingkungan laut (Suharyo *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2025). Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variabilitas profil kecepatan suara di Laut Banda pada periode muson barat (Januari) dan muson timur (Juli) Tahun 2023, guna memahami pengaruh dinamika musiman terhadap karakteristik propagasi akustik di kawasan tersebut.

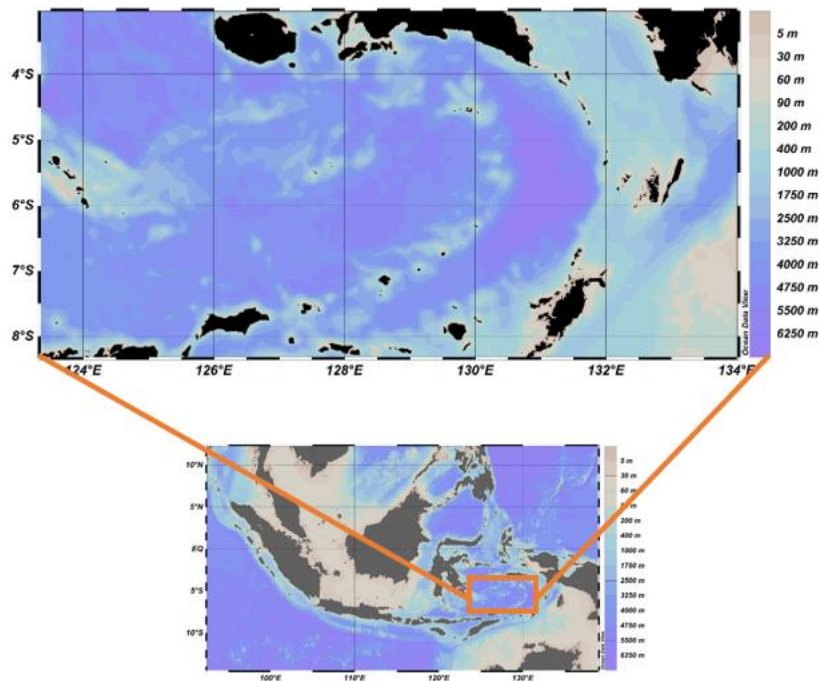
METODE PENELITIAN

Area penelitian

Penelitian dilakukan di Laut Banda dengan cakupan koordinat 124° – 134° BT dan 4° – 8° LS (Gambar 1). Area ini dipilih karena merupakan bagian cekungan dalam yang berperan penting dalam dinamika oseanografi Indonesia dan dipengaruhi oleh sistem muson Asia–Australia. Analisis dibatasi hingga kedalaman 500 m, yang meliputi lapisan permukaan, termoklin, dan transisi menuju laut dalam (Atmadipoera *et al.*, 2009; Sprintall *et al.*, 2010; Kunarso *et al.*, 2011).

Sumber data

Dataset yang digunakan berasal dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), produk *reanalysis global* dengan resolusi spasial $0,083^{\circ} \times 0,083^{\circ}$ ($\approx 1/12^{\circ}$), resolusi temporal bulanan, dan cakupan vertikal penuh hingga 5500 m. Periode analisis difokuskan pada Januari 2023 (mewakili muson barat) dan Juli 2023 (mewakili muson timur) untuk menyoroti perbedaan musiman utama. Variabel yang digunakan adalah suhu ($^{\circ}\text{C}$), salinitas (PSU), dan kedalaman (m).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pengolahan data

Data suhu dan salinitas dalam format *NetCDF* diproses menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV; Schlitzer, 2023). Proses pengolahan dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu melakukan *subsetting* domain sesuai koordinat area studi, dilanjutkan dengan *masking* untuk menghilangkan nilai pada daratan sehingga hanya tersisa *grid* laut. Selanjutnya, data diperiksa kualitasnya dengan hanya menggunakan nilai yang memiliki *quality control flag* baik. Untuk menghasilkan peta sebaran suhu, salinitas, dan kecepatan suara, dilakukan interpolasi spasial menggunakan skema bawaan ODV.

Perhitungan kecepatan suara

Kecepatan suara dihitung secara otomatis menggunakan fungsi bawaan ODV dengan rumus UNESCO yang dikembangkan oleh Chen dan Millero (1977). Rumus ini merupakan standar internasional untuk menghitung kecepatan rambat suara di laut berdasarkan kombinasi suhu, salinitas, dan tekanan hidrostatik (kedalaman). Secara umum, formulasi ini dinyatakan sebagai:

$$c(S, T, P) = cw(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)^{1.5} + D(T, P)^2$$

dengan $c(S, T, P)$ adalah kecepatan suara (m/s), S salinitas (PSU), T suhu ($^{\circ}\text{C}$), dan P tekanan (dbar). Komponen $cw(T, P)$ merepresentasikan kecepatan suara dalam air murni tanpa salinitas, sedangkan $A(T, P)$, $B(T, P)$, dan $D(T, P)$ adalah koefisien polinomial yang menggambarkan pengaruh salinitas terhadap kecepatan suara pada berbagai kondisi suhu dan tekanan.

Rumus ini dipilih karena telah diterima secara luas sebagai metode standar untuk perhitungan kecepatan suara di air laut. Persamaan ini memiliki jangkauan validitas yang luas, yaitu suhu 0–40 °C, salinitas 0–40 PSU, dan tekanan 0–1000 bar, dengan deviasi standar 0,19 m/s (Wong & Zhu, 1995). Dengan demikian, formula ini relevan untuk menganalisis kondisi oseanografi di Laut Banda yang memiliki variasi musiman suhu permukaan antara 26,5–31 °C dan salinitas permukaan 33,6–34,5 PSU.

Analisis spasial dan vertikal

Analisis dilakukan pada tiga kedalaman yang mewakili karakteristik kolom air, yakni permukaan pada 0 m, lapisan termoklin pada 150 m, serta lapisan transisi menuju laut dalam pada 300 m (Atmadipoera *et al.*, 2009; Sprintall *et al.*, 2010; Kunarso *et al.*, 2011). Kedalaman 0 m dipilih karena mewakili lapisan permukaan yang sangat dipengaruhi oleh interaksi atmosfer-laut. Kedalaman 150 m mewakili lapisan termoklin utama, yaitu zona dengan perubahan suhu yang tajam sehingga menjadi batas stratifikasi vertikal antara lapisan permukaan dan lapisan dalam. Sementara itu, kedalaman 300 m dipilih untuk menggambarkan lapisan transisi menuju laut dalam, di mana kondisi massa air sudah lebih stabil dan kurang dipengaruhi oleh dinamika permukaan.

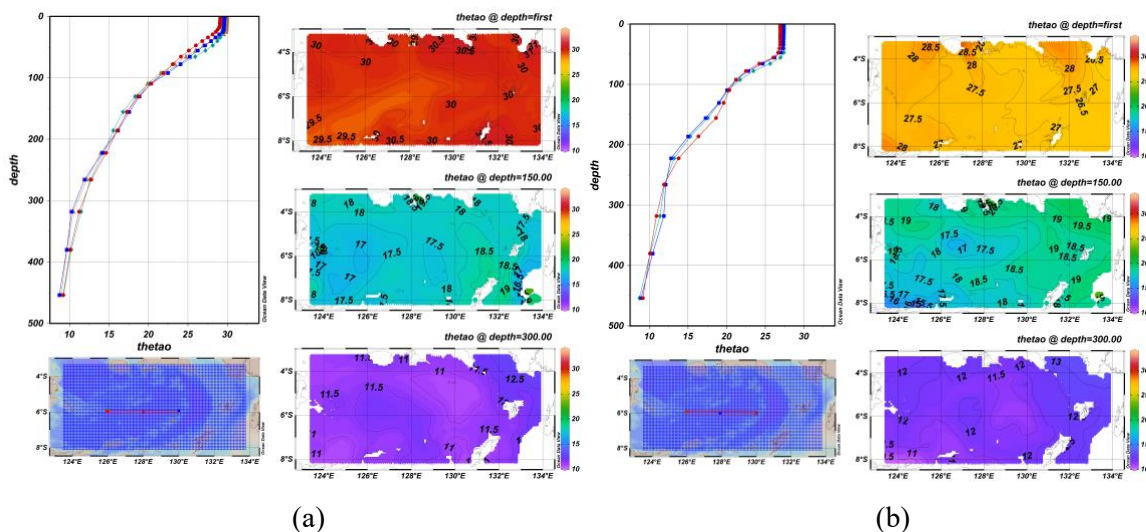
Distribusi spasial suhu, salinitas, dan kecepatan suara pada setiap kedalaman dianalisis untuk mengidentifikasi pola musiman di Laut Banda. Selain itu, dibuat profil vertikal rata-rata dari seluruh area studi untuk membandingkan struktur kolom air pada periode muson barat dan timur. Analisis dilengkapi dengan penampang zonal dan meridional guna menunjukkan variasi spasial serta posisi minimum kecepatan suara yang umumnya terjadi pada kedalaman 300–500 m.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variabilitas Suhu

Distribusi suhu laut di Laut Banda pada bulan Januari dan Juli 2023 menunjukkan pola variasi musiman yang jelas, baik secara vertikal maupun horizontal, serta konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya (Putra *et al.*, 2023; Ismail *et al.*, 2024; Tubalawony *et al.*, 2024). Pada bulan Januari (muson barat), distribusi suhu menampilkan struktur vertikal khas dengan suhu permukaan relatif tinggi dan penyebaran horizontal yang merata. Pada lapisan permukaan (0–50 m), suhu berkisar antara 29,5–31°C, dengan nilai tertinggi terpusat di wilayah timur laut dan tengah Laut Banda. Di lapisan termoklin (50–150 m), suhu turun tajam hingga 16–20°C, menandakan gradien termal yang kuat dengan termoklin yang lebih dalam dan lebar. Pada kedalaman 300 m, suhu lebih seragam (11–12,5°C), dengan sedikit pendinginan di bagian barat laut. Secara umum, wilayah timur laut Laut Banda cenderung lebih hangat dibandingkan wilayah lainnya, baik di permukaan maupun kedalaman menengah, mengindikasikan dominasi massa air hangat di wilayah tersebut (Gambar 2a). Pada bulan Juli (muson timur), pola distribusi suhu laut menunjukkan pengaruh kuat dari fenomena *upwelling* musiman. Suhu permukaan tercatat lebih rendah dibandingkan Januari, yaitu 26,5–28,5°C,

dengan pendinginan paling kuat di bagian barat dan selatan Laut Banda. Lapisan termoklin lebih dangkal dan curam, terbentuk pada kedalaman 50–100 m dengan gradien suhu tajam. Pada kedalaman 150 m, suhu relatif stabil ($15,5\text{--}20^{\circ}\text{C}$), namun wilayah bersuhu rendah meluas ke arah selatan, menandakan intensifikasi *upwelling*. Di kedalaman lebih dari 200 m, suhu menurun cepat, mencapai $10\text{--}12^{\circ}\text{C}$ pada 500 m. Pola ini memperlihatkan jelas bahwa angin muson tenggara memicu *upwelling*, mendorong naiknya massa air dingin dari lapisan dalam ke permukaan dan menyebabkan pendangkalan termoklin (Gambar 2b). Fenomena ini sejalan Tubalawony *et al.* (2024) menyatakan bahwa variasi lapisan termoklin dan dinamika lapisan permukaan berperan penting dalam memengaruhi variasi suhu perairan. Jika terjadi pengangkatan massa air (*upwelling*), maka suhu permukaan menurun dan lapisan termoklin menjadi lebih dangkal. Sebaliknya, pendalaman posisi termoklin mengindikasikan bahwa distribusi massa air dingin bergeser ke kedalaman yang lebih besar. Dinamika perairan Laut Banda bersifat musiman sebagai respons terhadap tiupan angin muson. Habibullah *et al.* (2021) melaporkan bahwa suhu permukaan Laut Banda secara musiman ditentukan oleh *upwelling* yang terjadi pada periode Juli–September dan *downwelling* pada Januari–Maret.



Gambar 2. Suhu pada bulan Januari (muson barat) (a) dan Juli (muson timur) (b)

Penyebab utama *upwelling* di Laut Banda adalah pengaruh *Ekman transport* dan *Ekman pumping*. Mekanisme ini dipicu oleh angin muson tenggara yang mendorong massa air permukaan ke arah barat, menciptakan kekosongan di wilayah timur Laut Banda, sehingga massa air lebih dingin dari lapisan bawah terangkat ke permukaan (Ratnawati *et al.*, 2016; Gordon & Sudanto, 2001). *Ekman pumping* memberikan kontribusi signifikan terhadap *upwelling* baik pada periode muson timur (JJA: Juni–Agustus) maupun muson barat (DJF: Desember–Februari), meskipun dengan intensitas berbeda. *Upwelling* maksimum terjadi pada muson timur (JJA), yang ditandai dengan

penurunan suhu permukaan laut (SPL) serta peningkatan konsentrasi klorofil-*a* sebagai indikator produktivitas primer (Sukresno & Suniada, 2010). Fenomena ini juga tercermin pada distribusi suhu vertikal hingga kedalaman lebih dari 200 m, yang memperlihatkan stratifikasi termal kuat (Wijaya *et al.*, 2018). Retraubun *et al.* (2023) dan Kusuma *et al.* (2017) menegaskan bahwa suhu permukaan yang sangat rendah di Laut Banda selama Juni–Oktober merupakan indikasi kuat terjadinya *upwelling*, dengan intensitas tertinggi pada bulan Agustus.

Variabilitas Salinitas

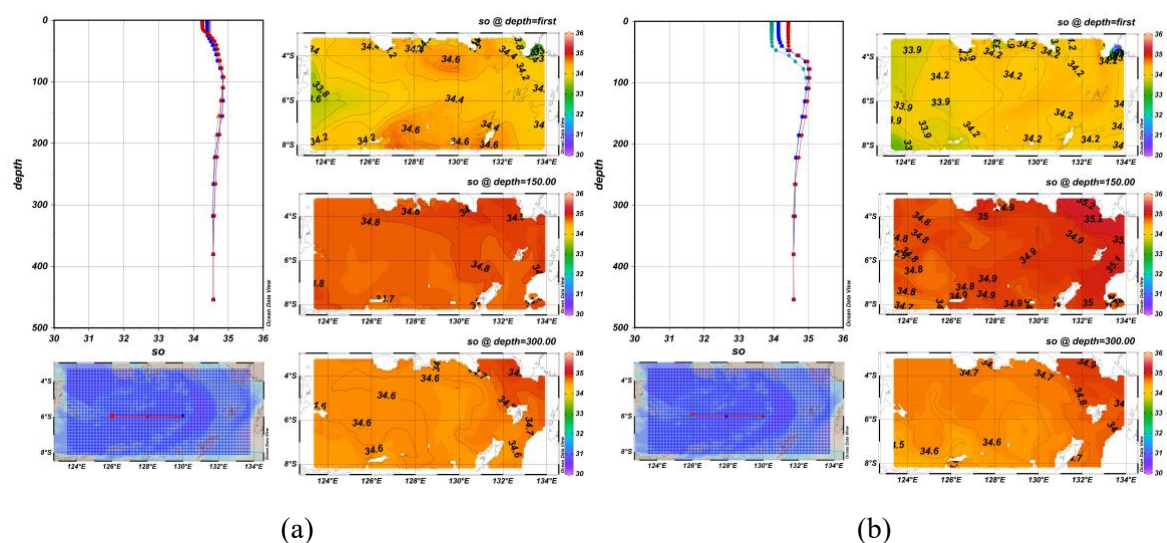
Distribusi salinitas Laut Banda pada bulan Januari (muson barat) menunjukkan karakteristik vertikal dan horizontal yang mencerminkan pengaruh musiman, khususnya pada lapisan permukaan hingga kedalaman menengah. Salinitas permukaan (0–50 m) bervariasi cukup tinggi, berkisar antara 33,6–34,5 PSU, dengan nilai terendah terdistribusi di wilayah barat dan barat laut. Secara vertikal, salinitas meningkat secara bertahap dari permukaan hingga kedalaman 150 m, membentuk lapisan haloklin yang dalam dan bertahap. Pada kedalaman 150 m, salinitas rata-rata mencapai 34,7–34,9 PSU, sedangkan pada kedalaman 300 m, salinitas cenderung homogen dengan kisaran sekitar 34,6 PSU. Wilayah timur laut Laut Banda menunjukkan nilai salinitas sedikit lebih tinggi >34,7 PSU, yang mengindikasikan stabilitas dan minimnya pengaruh pencampuran vertikal di lapisan bawah. Pola distribusi ini mencerminkan adanya stratifikasi salinitas yang kuat, di mana lapisan permukaan dipengaruhi oleh input air tawar, sementara lapisan lebih dalam tetap stabil akibat terbatasnya gangguan atmosferik dan dinamika vertikal (Gambar 3a)

Pada bulan Juli (muson timur), profil salinitas menunjukkan pola yang berbeda, dengan nilai salinitas permukaan yang relatif rendah dan lebih seragam, berkisar antara 33,9–34,2 PSU. Nilai ini lebih rendah dibandingkan bulan Januari, dan menunjukkan pola horizontal yang homogen di seluruh wilayah Laut Banda. Secara vertikal, salinitas meningkat tajam pada kedalaman 50–150 m, membentuk haloklin yang dangkal dan curam berkisar 34,7–35,2 PSU. Struktur ini mengidentifikasi adanya proses *upwelling* musiman yang membawa massa air asin dari lapisan dalam menuju permukaan. Namun, rendahnya salinitas permukaan yang disertai distribusi horizontal yang seragam mengindikasikan kemungkinan adanya pengaruh tambahan seperti pencampuran massa air atau pergeseran pola sirkulasi regional yang memodifikasi respons permukaan terhadap *upwelling*. Pada kedalaman 300 m, salinitas tetap tinggi dan stabil di kisaran 34,6 PSU, dan wilayah timur laut Laut Banda menunjukkan nilai salinitas sedikit lebih tinggi >34,7 PSU, mencerminkan kestabilan massa air dalam yang tidak banyak terpengaruh oleh dinamika permukaan (Gambar 3b)

Secara vertikal, salinitas perairan Laut Banda meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman. Namun, pada kedalaman yang sama, salinitas dapat bervariasi secara horizontal maupun musiman. Variasi salinitas di lapisan termoklin sangat dipengaruhi oleh dinamika lapisan permukaan laut serta pergerakan massa air di dalamnya. Pada muson barat, angin muson barat laut mendorong massa air permukaan dari wilayah barat Indonesia menuju ke timur, menyebabkan akumulasi air di

Laut Banda dan memicu proses *downwelling*. Sebaliknya, pada muson timur, angin muson tenggara menggerakkan massa air ke arah barat, mengurangi volume air permukaan dan memicu terjadinya *upwelling*. Perbedaan dinamika ini tercermin dalam distribusi salinitas di batas atas lapisan termoklin, di mana pada muson barat salinitas relatif lebih rendah 33,9–34,2 PSU, sedangkan pada muson timur meningkat hingga 34,7–35,2 PSU. Rendahnya salinitas pada muson barat terutama disebabkan oleh dominasi massa air dari perairan Indonesia barat—melalui Laut Jawa dan Laut Flores—yang memiliki salinitas lebih rendah dibandingkan massa air dari lapisan dalam yang terangkat ke permukaan saat muson timur (Atmadipoera *et al.*, 2019; Ismail *et al.*, 2020; Tubalawony *et al.*, 2024).

Kondisi salinitas di Laut Banda dipengaruhi oleh masukan air tawar dari wilayah sekitarnya yang bekerja bersamaan dengan pola angin muson. Angin muson berperan membawa massa air lapisan permukaan masuk dan keluar dari Laut Banda (Handoko *et al.*, 2024). Selama muson barat (Desember–Maret), angin muson barat laut mendorong massa air dengan salinitas rendah dari Laut Jawa dan Selat Makassar menuju Laut Banda. Masukan ini diperkuat oleh tingginya curah hujan dan limpasan sungai, sehingga terbentuk lapisan permukaan dengan salinitas rendah (<34 PSU) yang berada di atas massa air



Gambar 3. Salinitas pada bulan Januari (muson barat) (a) dan Juli (muson timur) (b)

asin dari lapisan bawah. Kondisi tersebut menciptakan stratifikasi salinitas yang kuat dan menghasilkan lapisan penghalang (*barrier layer*). Sebaliknya, pada muson timur (Juni–September), angin muson tenggara mendorong pencampuran horizontal serta memicu *upwelling*, sehingga massa air asin dari lapisan termoklin terangkat ke permukaan (Atmadipoera *et al.*, 2019). Proses *upwelling* ini tidak hanya meningkatkan salinitas permukaan, tetapi juga menurunkan suhu permukaan laut serta meningkatkan konsentrasi klorofil-a akibat suplai nutrisi dari laut dalam. Meskipun demikian,

pengamatan menunjukkan bahwa distribusi salinitas permukaan pada bulan Juli lebih rendah (33,9–34,2 PSU) dan lebih seragam dibandingkan bulan Januari (33,6–34,5 PSU), kondisi tersebut juga sesuai dengan temuan Wijaya *et al.* (2018) dan Amri *et al.* (2024) bahwa bahwa distribusi vertikal salinitas di Laut Banda pada periode muson barat lebih tinggi di atas 34 PSU sampai pada kedalaman > 200 m. Sehingga mengindikasikan adanya faktor tambahan yang memengaruhi variabilitas musiman.

Ismail *et al.* (2023) menyatakan bahwa perubahan musiman pada salinitas lapisan campuran di Laut Banda lebih dipengaruhi oleh adveksi massa air dengan salinitas rendah daripada oleh fluks air tawar yang berasal dari presipitasi maupun evaporasi. Fenomena biasanya terjadi pada akhir musim barat laut dan periode transisi muson antara Februari hingga April, ketika massa air dengan salinitas rendah terdorong ke timur dari Laut Jawa menuju Laut Banda. Aliran ini dapat memperlambat atau menunda munculnya sinyal *upwelling* yang biasanya terjadi pada pertengahan tahun, termasuk pada bulan Juli.

Variabilitas Kecepatan Suara

Kecepatan suara di lapisan permukaan Laut Banda pada bulan Januari (muson barat) menunjukkan nilai relatif tinggi, berkisar antara 1543–1546 m/s, dengan maksimum teramati di wilayah utara. Kondisi ini mencerminkan suhu permukaan laut yang hangat dan salinitas sedang, yang merupakan ciri khas periode muson barat. Seiring bertambahnya kedalaman, kecepatan suara mengalami penurunan signifikan hingga kedalaman sekitar 150 m, dengan nilai berkisar antara 1515–1520 m/s. Penurunan ini mencerminkan pengaruh penurunan suhu air laut dan menandai keberadaan lapisan termoklin. Pada kedalaman 300 m, kecepatan suara berada pada kisaran 1497–1501 m/s dan cenderung homogen dengan variasi spasial yang terbatas. Pada lapisan ini, suhu air yang lebih rendah dan stabil, serta salinitas yang relatif tinggi.

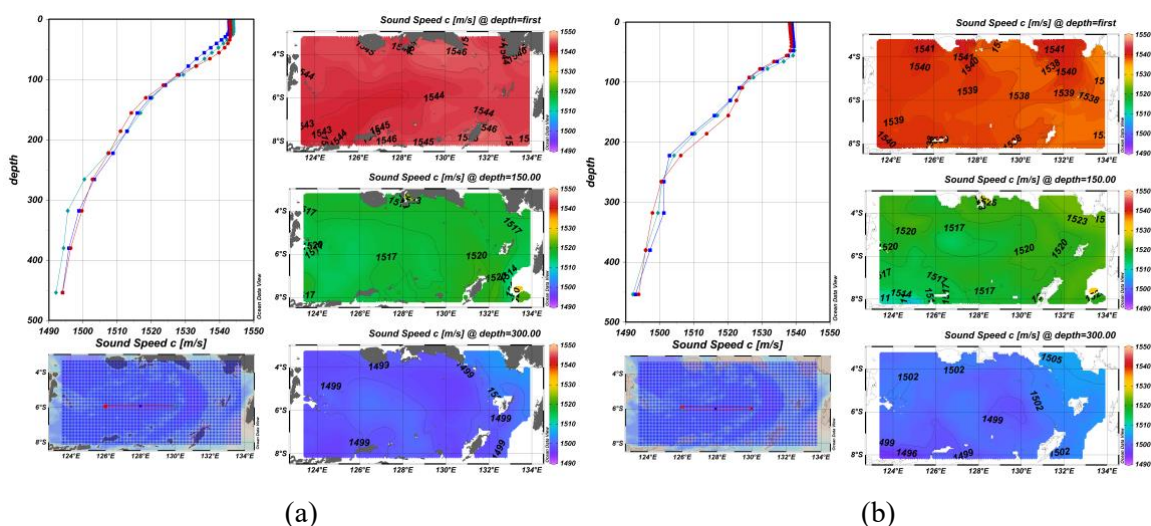
Pada bulan Juli (muson barat), kecepatan suara di lapisan permukaan Laut Banda berada pada kisaran 1538–1541 m/s, sedikit lebih rendah dibandingkan bulan Januari. Nilai ini mencerminkan suhu permukaan laut yang lebih dingin akibat pengaruh *upwelling* musiman, dengan pola distribusi kecepatan relatif seragam secara horizontal. Pada kedalaman sekitar 150 m, kecepatan suara menurun tajam menjadi 1513–1522 m/s, mengindikasikan lapisan termoklin yang lebih dangkal dan curam dibandingkan periode muson barat. Nilai yang lebih rendah di wilayah selatan dan tenggara Laut Banda memperlihatkan pengaruh langsung dari massa air dingin yang terangkat ke permukaan akibat proses *upwelling*. Pada lapisan lebih dalam, yakni kedalaman 300 hingga 500 m, kecepatan suara mencapai nilai minimum yang relatif homogen, berkisar antara 1496–1505 m/s, di lapisan ini pengaruh atmosfer dan dinamika permukaan laut semakin berkurang.

Karakteristik oseanografi Laut Banda secara umum dipengaruhi oleh dinamika muson (Amri *et al.*, 2024; Putra *et al.*, 2023). Menurut Wyrтки (1961), pola angin musiman di wilayah ini terbagi menjadi muson barat (angin barat laut), muson timur (angin tenggara), dan muson peralihan (angin

transisi). Pergantian muson menyebabkan perubahan distribusi suhu dan salinitas yang memengaruhi kecepatan rambat suara di laut (Winanta *et al.*, 2015; Erbe *et al.*, 2022). Secara umum, kecepatan suara berbanding lurus dengan suhu, berbanding terbalik dengan salinitas dan kedalaman, serta dipengaruhi oleh arus, letak geografis, dan pertukaran massa air (Agustinus *et al.*, 2023; Erbe *et al.* 2025).

Hasil penelitian ini memperkuat temuan Winanta *et al.* (2015) melalui analisis data CTD pada bulan Juni 2010, batas atas termoklin berada pada kedalaman 51–88 m dengan kecepatan suara berkisar 1500,9–1538,7 m/s dan pada November 2014, termoklin tercatat pada kedalaman 30–95 m dengan kecepatan suara 1495,8–1537,5 m/s. Hasil model Januari–Juni 2014 juga memperlihatkan kedalaman termoklin lebih dalam (50–250 m) dengan kecepatan suara 1466–1506 m/s, sedangkan pada Juli–Oktober 2014 termoklin naik hingga 5–180 m dengan kecepatan suara 1470–1502 m/s. Pola ini sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana pada muson barat (Januari) kecepatan suara permukaan lebih tinggi akibat suhu laut yang hangat, sementara pada muson timur (Juli) terjadi penurunan kecepatan suara permukaan yang berkaitan dengan upwelling musiman yang membawa massa air dingin ke lapisan atas

Hasil analisis variabilitas kecepatan suara di Laut Banda menunjukkan bahwa suhu merupakan faktor dominan baik pada muson barat maupun timur. Hal ini sejalan dengan temuan Agustinus *et al.* (2023), yang melaporkan adanya hubungan positif antara suhu dan kecepatan suara, di mana kenaikan suhu menyebabkan percepatan rambat suara. Sebaliknya, salinitas menunjukkan hubungan negatif, yaitu semakin tinggi salinitas maka kecepatan suara cenderung menurun.



Gambar 4. Kecepatan suara pada bulan Januari (muson barat) (a) dan Juli (muson timur) (b)

Profil kecepatan suara yang dibentuk oleh suhu, salinitas, dan tekanan (kedalaman) menentukan pola perambatan gelombang akustik di laut. Variasi vertikal menghasilkan pola jalur propagasi yang berbeda, mulai dari *direct path* (DP) dan *bottom bounce* (BB) yang sederhana, hingga

pola kompleks seperti *surface duct* (SD), *convergence zone* (CZ), *deep sound channel* (DSC), dan *reliable acoustic path* (RAP) (Urlick, 1983). Perubahan gradien kecepatan suara mengakibatkan pembiasan jalur rambat sesuai hukum Snell. Pemahaman profil vertikal ini penting untuk aplikasi akustik bawah air, seperti komunikasi bawah laut, karakteristik oseanografi, navigasi laut, klasifikasi sedimen, eksplorasi kelautan dan perikanan (Suharyo *et al.*, 2018; Hidayat *et al.*, 2024; Handoko *et al.*, 2025; Putra *et al.*, 2024; Putra *et al.*, 2025; Yuan *et al.*, 2025; Zahran *et al.*, 2025).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan adanya variabilitas musiman suhu, salinitas, dan kecepatan suara di Laut Banda sebagai respons terhadap dinamika muson. Pada muson barat (Januari 2023), suhu permukaan tinggi (29,5–31 °C), termoklin lebih dalam, dan kecepatan suara permukaan lebih tinggi (1543–1546 m/s), konsisten dengan proses *downwelling*. Sebaliknya, pada muson timur (Juli 2023), suhu permukaan menurun (26,5–28,5 °C), termoklin dangkal, salinitas permukaan lebih homogen, dan kecepatan suara lebih rendah (1538–1541 m/s), mencerminkan pengaruh *upwelling*. Secara vertikal, salinitas meningkat dengan kedalaman dan membentuk haloklin; pada muson timur haloklin lebih dangkal (34,7–35,2 PSU pada 50–150 m) dibandingkan muson barat yang lebih dalam. Minimum kecepatan suara konsisten pada kedalaman 300–500 m (1496–1505 m/s). Hasil ini menegaskan bahwa suhu merupakan faktor dominan yang mengontrol kecepatan suara, sedangkan salinitas memperkuat pada lapisan tertentu. Variasi vertikal kecepatan suara berimplikasi pada pembentukan jalur propagasi akustik, termasuk *surface duct*, *convergence zone*, dan *deep sound channel*. Temuan ini penting bagi aplikasi komunikasi, navigasi, dan operasi sonar bawah laut. Namun, keterbatasan penelitian berupa penggunaan data *reanalysis* dan cakupan waktu terbatas menuntut penelitian lanjutan dengan validasi in-situ dan seri data lebih panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) yang telah menyediakan data *reanalysis* oseanografi yang menjadi dasar penelitian ini. Apresiasi juga diberikan kepada pengembang perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV) yang mempermudah proses pengolahan dan visualisasi data. Penulis turut berterima kasih kepada para reviewer anonim atas saran dan masukan konstruktif yang membantu meningkatkan kualitas naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Agustinus, A., Pranowo, W. S., Manik, H. M., Rahmatullah, A., dan Aji, T. 2023. Relationship between water mass characters to sound velocity profiler (SVP) in the Sulawesi Sea. *Depik – Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan, Pesisir dan Perikanan*. Vol. 12: 346–353.

- Amri, F., Eladawy, A., dan Handoko, R. 2024. Sea surface temperature budget in Indonesian seas: the role of vertical turbulent flux and its east–west variations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1350: 012005. doi:10.1088/1755-1315/1350/1/012005.
- Atmadipoera, A. S., Koch-Larrouy, A., Madec, G., Grelet, J., Baurand, F., Jaya, I., dan Dadou, I. 2022. Part I: Hydrological properties within the eastern Indonesian throughflow region during the INDOMIX experiment . *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. Vol. 182: 103735. doi:10.1016/j.dsr.2022.103735.
- Atmadipoera, A., Molcard, R., Madec, G., Wijffels, S., Sprintall, J., Koch-Larrouy, A., Jaya, I., dan Supangat, A. 2009. Characteristics and variability of the Indonesian throughflow water at the outflow straits (Lombok, Ombai and Timor). *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. Vol. 56(11): 1942–1954.
- Benoit-Bird, K. J., Moline, M. A., dan Southall, B. L. 2017. Prey in oceanic sound scattering layers organize to get a little help from their friends. *Limnology and Oceanography*. Vol. 62(6): 2788–2798. doi:10.1002/lno.10606.
- Cao, L., dan Zhang, H. 2017. The role of biological rates in the simulated warming effect on oceanic CO₂ uptake. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. Vol. 122: 1098–1106.
- Chen, C. T., dan Millero, F. J. 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 62(5): 1129–1135. doi:10.1121/1.381646.
- Erbe, C., Duncan, A., dan Vigness-Raposa, K. J. 2022. Introduction to sound propagation under water Dalam: *Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1*. Cham: Springer International Publishing. hlm. 185–216.
- Gordon, A. L., dan Fine, R. A. 1996. Pathways of water between the Pacific and Indian oceans in the Indonesian seas. *Nature*. Vol. 379(6561): 146–149.
- Gordon, A. L., dan Sudanto, R. D. 2001. Banda Sea surface layer divergence. *Ocean Dynamics*. Vol. 52: 2–10. doi:10.1007/s10236-001-8172-6.
- Gordon, A. L., Susanto, R. dan Vranes, K. 2003. Cool Indonesian throughflow as a consequence of restricted surface layer flow. *Nature* 425, 824–828 <https://doi.org/10.1038/nature02038>
- Habibullah, A. D., dan Tarya, A. 2021. Sea surface temperature variability in Indonesia and its relation to regional climate indices. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 925: 012008. doi:10.1088/1755-1315/925/1/012008.
- Handoko, D., Manik, H. M., Hestirianoto, T., Priandana, K., dan Che Hasan, R. 2025. Acoustic sediment classification using high-frequency (400 kHz) multibeam data in Pari water of Seribu Island, Indonesia. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*. Vol. 30(1).
- Handoko, E., Hayati, N., Syariz, M., dan Hanansyah, M. 2024. Analysis of Chlorophyll-a Variability in the Eastern Indonesian Waters Using Sentinel-3 OLCI from 2020-2021. *Forum Geografi*, 38(1), 74–82. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v38i1.2361>
- Harvianto, L., Parengkuan, M., Koropitan, A. F., dan Agustiadi, T. 2015. Analisis diagram T–S berdasarkan parameter oseanografis di perairan Selat Lombok. *Surya Octagon Interdisciplinary Journal of Science and Technology*. Vol. 1(1): 103–119.
- Hidayat, T., Manik, H. M., Himayah, S., Zuraida, R., Atmadipoera, A. S., dan Priatna, A. 2024. Analisis pelagic habitat index ikan tuna mata besar (*Thunnus obesus*) menggunakan data satelit dan hidroakustik di perairan Banggai Kepulauan. *Geomatika*. Vol. 30(2): 89–102.
- Ismail, M. F. A., Karstensen, J., Ribbe, J., Arifin, T., Chandra, H., Akhwady, R., Yulihastin, E., Basit, A., dan Budiman, A. S. 2023. Seasonal mixed layer temperature and salt balances in the Banda Sea observed by an Argo float. *Geoscience Letters*. Vol. 10: 10. doi:10.1186/s40562-023-00266-x.
- Ismail, M. F. A., Karstensen, J., Sulaiman, A., Priyono, B., Budiman, A. S., Basit, A., dan lainnya. 2024. Observations of barrier layer seasonal variation in the Banda Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 129: e2023JC020829. doi:10.1029/2023JC020829.
- Ismail, M. F. A., Taofiqurohman, A., dan Purwandana, A. 2020. Circulation dynamics of the Banda Sea estimated from Argo profiles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 584(1): 012017. doi:10.1088/1755-1315/584/1/012017.

- Kalangi, P. N. I., Masengi, K. W. A., Iwata, M., Pangalila, F. P. T., dan Mandagi, I. F. 2012. Profil salinitas dan suhu di Teluk Manado pada hari-hari hujan dan tidak hujan. *Jurnal Perikanan dan Kelautan Tropis*. Vol. 8(3): 95–98. doi:10.35800/jpkt.8.3.2012.2443.
- Kida, S., dan Richards, K. J. 2009. Seasonal sea surface temperature variability in the Indonesian Seas. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 114(C6): C06016. doi:10.1029/2008JC005150.
- Kunarso, H. S., Ningsih, N. S., dan Baskoro, M. S. 2011. Variabilitas suhu dan klorofil-a di daerah upwelling pada variasi kejadian ENSO dan IOD di perairan Selatan Jawa sampai Timor. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*. Vol. 16(3): 171–180.
- Kusuma, D. W., Murdimanto, A., Aden, L. Y., Sukresno, B., Jatisworo, D., dan Hanintyo, R. 2017. Sea surface temperature dynamics in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 98: 012038.
- Putra, D. R., Natih, N. M. N., dan Purwandana, A. 2023. Seasonal variation of mixed layer depth and thermocline thickness from the CTD Argo float data in the Southern Makassar Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1137(1): 012010. Doi:10.1088/1755-1315/1137/1/012010.
- Putra, E. I., Atmadipoera, A. S., Manik, H. M., Harsono, G., dan Purwandana, A. 2025. Oceanographic characteristics in the three international Indonesian Archipelago Sea Lanes (IASLs) region: Implications for underwater acoustics system. *Scientific Journal of Fisheries & Marine/Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*. Vol. 17(2).
- Putra, E. I., Atmadipoera, A., Manik, H., Harsono, G., Purwandana, A., dan Hascaryo, A. 2024. Distribution and characteristics of internal waves observed during the Jala Citra Expedition 2-2022 Banda. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*. Vol. 29(3): 359–371. Doi:10.14710/ik.ijms.29.3.359-371.
- Ratnawati, H. I., Hidayat, R., Bey, A., dan June, T. 2016. Upwelling di Laut Banda dan pesisir Selatan Jawa serta hubungannya dengan ENSO dan IOD. *Omni-Akuatika*. Vol. 12(3): 119–139. Doi:10.20884/1.oa.2016.12.3.134.
- Retraubun, A. S. W., Tubalawony, S., Masrikat, J. A. N., dan Hukubun, R. D. 2023. Analysis of sea surface temperature and chlorophyll-a and its relationship with catch results flying fish eggs in the waters of the Kei Islands. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. Vol. 9(12): 11311–11324. Doi:10.29303/jppipa.v9i12.6240.
- Schlitzer, R. (2022). Ocean Data View . <https://odv.awi.de>.
- Sprintall, J., Wijffels, S. E., Molcard, R., dan Jaya, I. 2010. The Indonesian throughflow during 2004–2006 as observed by the INSTANT program. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. Vol. 50: 115–128. doi:10.1016/j.dynatmoce.2009.12.002.
- Suhana, M. P. 2018. Karakteristik sebaran menegak dan melintang suhu dan salinitas perairan Selatan Jawa. *Dinamika Maritim*. Vol. 6(2).
- Suharyo, O. S., Adrianto, D., dan Hidayah, Z. 2018. Pengaruh pergerakan massa air dan distribusi parameter temperatur, salinitas dan kecepatan suara pada komunikasi kapal selam. *Jurnal Kelautan*. Vol. 11(2): 186–194. doi:10.21107/jk.v11i2.4521.
- Sukresno, B., dan Suniada, K. I. 2010. Observasi pengaruh ENSO terhadap produktivitas primer dan potensi perikanan dengan menggunakan data satelit di Laut Banda. *Globe*. Vol. 10(2): 97–107.
- Tubalawony, S., Hukubun, R. D., dan Kalay, D. E. 2024. The seasonal variations of the thermocline in the Banda Sea and its water mass characteristics. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. Vol. 10(Special Issue): 534–545. Doi:10.29303/jppipa.v10iSpecialIssue.9071.
- Urick, R. J. 1983. Principles of underwater sound . 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Wijaya, A., Priyono, B., dan Mahdalena, N. C. 2018. Karakteristik spasial temporal kondisi oseanografi Laut Banda dan hubungannya dengan potensi sumberdaya perikanan. *JFMR – Journal of Fisheries and Marine Research*. Vol. 2(2): 75–85. Doi:10.21776/ub.jfmr.2018.002.02.4.
- Winanta, J., Kuswardani, A. R. T. D., Setiadi, H., dan Riyadi, N. 2015. Studi lapisan thermocline untuk menentukan pola perambatan gelombang suara (Studi kasus Laut Banda). *Jurnal Chart Datum*. Vol. 1(2): 143–150. doi:10.37875/chartdatum.v1i2.112.



-
- Wong, G. S. K., dan Zhu, S. 1995. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1732–1736. <https://doi.org/10.1121/1.413048>
- Wyrтки, K. 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian waters (NAGA Report Vol. 2). La Jolla: Scripps Institution of Oceanography.
- Yuan, H., Tang, Q., Ai, S., dan Liu, Y. 2025. Advanced sparse representation techniques for ocean sound velocity and comparative performance analysis . *Geomatic and Information Science of Wuhan University*. doi:10.13203/j.whugis20240282.
- Zahran, H., Manik, H. M., Zulfikar, M., dan Nurdin, N. 2025. Koreksi mistie pada seismik single channel menggunakan single beam echosounder di perairan Bintan Selatan. *Jurnal Geologi Kelautan*. Vol. 22(2).