

Analisis Spasial Kontribusi Kedalaman Laut Terhadap Karakteristik Arus Musiman di Selat Sunda

Tatang Rusmana¹, Danar Guruh Pratomo², Khomsin³

¹ Tatang Rusmana, Stasiun Meteorologi Maritim Merak, BMKG. Serang.

² Danar Guruh Pratomo, Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

³ Khomsin, Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Received: 12 November 2025

Revised: 16 December 2025

Accepted: 29 December 2025

Corresponding Author:

Tatang Rusmana

trusmana28@gmail.com

© 2025 Kappa Journal is licensed under
a Creative Commons Attribution-
NonCommercial-ShareAlike 4.0
International License



DOI:

<https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.33461>

Abstrak: Selat Sunda memiliki peran oseanografi yang strategis karena menghubungkan Laut Jawa dengan Sumatera melalui Selat Sunda. Metode yang digunakan meliputi pemanfaatan data batimetri GEBCO dan data arus reanalysis CMEMS periode 1993–2020, ekstraksi profil vertikal arus zonal dan meridional hingga kedalaman 60 m, serta analisis korelasi Pearson antara kecepatan arus dan kedalaman dengan tujuan untuk menganalisis kontribusi kedalaman dasar laut terhadap karakteristik arus laut musiman secara spasial dan vertikal di Selat Sunda, serta mengkaji hubungan linier antara kedalaman dan kecepatan arus pada skala multi-musim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi kedalaman laut memberikan pengaruh signifikan terhadap dinamika arus musiman, ditunjukkan oleh korelasi negatif yang konsisten antara kedalaman dan kecepatan arus pada seluruh musim. Pada musim JJA, pengaruh Muson Tenggara menghasilkan lapisan campuran yang tebal hingga sekitar ± 40 m dengan struktur arus yang relatif homogen dan magnitudo tertinggi ($\approx 0,7-0,8$ m/s). Sebaliknya, musim DJF memperlihatkan struktur arus yang lebih kompleks dan bersifat baroklinik, ditandai oleh pembalikan arah antara lapisan permukaan dan lapisan bawah. Secara keseluruhan, interaksi antara morfologi dasar laut, sistem monsun, dan proses hidrodinamika regional memainkan peranan penting dalam membentuk variabilitas arus di Selat Sunda. Temuan ini memiliki implikasi penting bagi pengembangan kajian oseanografi fisis serta dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung perencanaan keselamatan pelayaran, pengelolaan wilayah pesisir, dan mitigasi risiko kelautan di Selat Sunda.

Keywords: kedalaman dasar laut; arus musiman; Selat Sunda; batimetri.

Pendahuluan

Selat Sunda, yang terletak di bagian barat Pulau Jawa, memiliki peran oseanografi yang strategis karena menghubungkan Laut Jawa dengan Sumatera melalui Selat Sunda. Dinamika arus di wilayah ini sangat kompleks, dipengaruhi oleh sistem monsun Asia-Australia, *Madden Julian Oscillation* (MJO) (Haryanto dkk., 2021), dan pertukaran air antara Laut Indonesia dan Samudra Hindia melalui Selat Sunda (Potemra dkk.,

2016), dan variasi kondisi batimetri. Topografi dasar laut yang berkaitan dengan kedalaman memainkan peran krusial dalam memengaruhi sifat arus, terutama arus permukaan dan arus pasang surut. Aliran ARLINDO yang melintasi wilayah tersebut dipengaruhi oleh kontur batimetri dasar laut (Lutfi 2021), yang berperan dalam menentukan jalur serta kekuatan arus. Kondisi batimetri dangkal di Teluk Banten turut memengaruhi penyebaran arus setempat dan pola pergerakan

How to Cite:

Rusmana, T., Pratomo, D. G., & Khomsin, K. (2025). Analisis Spasial Kontribusi Kedalaman Laut Terhadap Karakteristik Arus Musiman di Selat Sunda. *Kappa Journal*, 9(3), 430-438. <https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.33461>

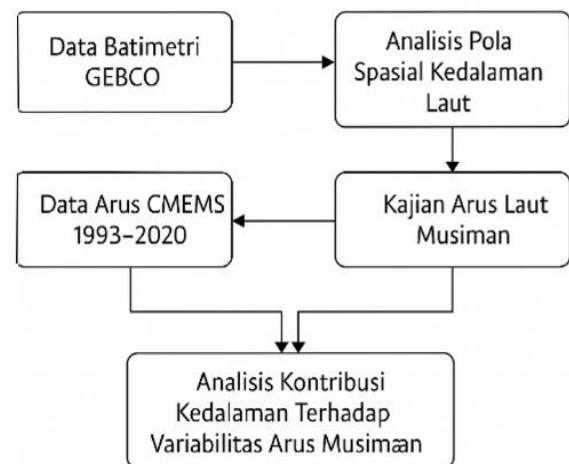
sedimen, yang pada akhirnya membentuk karakteristik kawasan pesisir dan perairan di sekitarnya (Prihantono dkk., 2018). Selain itu, sistem monsun Asia-Australia yang menciptakan pola sirkulasi berbeda antara monsun barat (November-Maret) dan monsun timur (April-Oktober) memberikan pengaruh signifikan terhadap variabilitas arus seasonal di perairan ini (Rahmawitri dkk., 2016). Meskipun variasi kedalaman di Perairan Banten diketahui signifikan, kontribusi spesifik dari morfologi dasar laut terhadap karakteristik variabilitas arus seasonal masih memerlukan kajian lebih mendalam.

Penelitian sebelumnya mengenai dinamika arus di Perairan Banten umumnya menitikberatkan pada pengaruh monsoon (Serodja dkk., 2023), pasang surut (Racman dkk., 2023), serta variabilitas musiman. Beberapa penelitian memang menunjukkan bahwa topografi dasar laut memiliki peran penting dalam memengaruhi dinamika arus, tetapi hubungan spesifiknya dengan variabilitas musiman dan intraseasonal di Perairan Banten belum dibahas secara mendalam.

Meskipun demikian, integrasi analisis profil vertikal arus pada resolusi multi-musim dengan pendekatan data klimatologis standar normal *World Meteorological Organization (WMO)* di Selat Sunda masih terbatas belum banyak dibahas secara eksplisit dalam penelitian-penelitian sebelumnya. Padahal, variabilitas arus laut ini penting untuk memahami dinamika laut, transportasi sedimen (Cahyani dkk., 2024), dan interaksi dengan fenomena oseanografi lainnya. Kurangnya informasi ini menyebabkan tantangan dalam perencanaan manajemen sumber daya kelautan dan mitigasi risiko bencana di wilayah pesisir Banten. Oleh karena itu, penelitian ini dibatasi pada: analisis pola spasial kedalaman laut menggunakan data batimetri dari *General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)*; pengkajian arus laut musiman berdasarkan data CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*) periode 1993-2020; fokus pada interaksi antara morfologi dasar laut (kedalaman) dengan kecepatan dan arah arus pada skala seasonal, sementara parameter oseanografi lain seperti suhu dan salinitas tidak dicakup.

Penelitian ini dirumuskan untuk menjawab pertanyaan: Bagaimana distribusi spasial morfologi dasar laut di Selat Sunda, sejauh mana pengaruh morfologi dasar laut terhadap kecepatan dan arah arus laut musiman di wilayah tersebut, dan bagaimana hubungan antara kedalaman dan variabilitas arus musiman. Penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi dan menganalisis pola spasial kedalaman laut di Selat Sunda; serta menganalisis kontribusi kedalaman terhadap variabilitas arus pada skala seasonal.

Secara keseluruhan, penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan mengenai interaksi antara morfologi dasar laut dan arus musiman, memberikan kontribusi penting dalam bidang oseanografi fisis, khususnya terkait analisis spasial. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan memberikan informasi yang bermanfaat bagi pengelolaan sumber daya kelautan, perencanaan mitigasi bencana, pembangunan infrastruktur kelautan, serta mendukung kebijakan kelautan, perikanan, dan aktivitas pelayaran yang lebih aman di wilayah Selat Sunda.



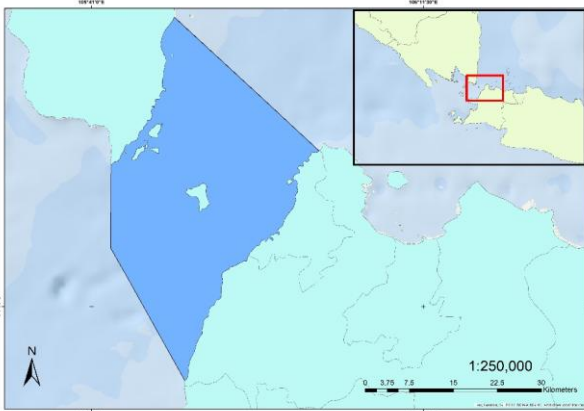
Gambar 1. Skema Penelitian

Metode

Data yang digunakan merupakan data reanalisis arus *zonal* (u) dan *meridional* (v) bulanan berdasarkan ketersediaan data dari CMEMS yaitu periode 1993-2020 dari CMEMS, data ini merupakan asimilasi dari model dan pengamatan *in-situ* sehingga data akan semakin berkualitas selaras dengan banyaknya alat-alat pengamatan yang terasimilasi, periode data mendekati kriteria standar normal iklim yang ditetapkan WMO (*World Meteorological Organization*) yaitu 1991-2020 (WMO, 2021) yang dibagi dalam empat dataset arus musiman (DJF, MAM, JJA, SON) yang disimpan dalam format NetCDF. dan data spasial batimetri dari GEBCO dengan format GeoTIFF.

Pada tahap awal, pembacaan shapefile lokasi penelitian dilakukan untuk memperoleh batas spasial penelitian, yang selanjutnya digunakan dalam membentuk *masking* spasial sehingga seluruh nilai arus di luar area kajian diubah menjadi NaN dan tidak memengaruhi proses perhitungan statistik. Nilai kedalaman juga difilter dengan batas maksimal 160 meter sesuai data dasar laut terdalam di area penelitian sehingga hanya kedalaman (z_i) yang memenuhi ($z_i \leq 160, m$) yang digunakan dalam analisis. Setelah penyesuaian spasial dan kedalaman dilakukan, data

arus *zonal* (u) dan *meridional* (v) pada tiap musim kemudian dihitung nilai rata-ratanya untuk setiap lapisan kedalaman. Rata-rata arus pada kedalaman (z_k) dihitung menggunakan seluruh grid valid dalam



wilayah kajian melalui formulasi:

$$\bar{u}(z_k) = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} u_n(z_k), \quad \bar{v}(z_k) = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} v_n(z_k) \quad (1)$$

dengan (N_k) adalah jumlah sampel valid pada kedalaman tersebut. Proses ini menghasilkan profil vertikal kecepatan arus yang merepresentasikan kondisi musiman pada seluruh kolom perairan.

Untuk memastikan bahwa korelasi mencerminkan hubungan fisik, variabel kedalaman direstrukturisasi sehingga urut dari permukaan ke dasar dan selanjutnya diubah menjadi variabel negatif melalui transformasi $z_{\text{corr}} = -z$. Transformasi ini penting karena arah numerik kedalaman dalam dataset sering kali berbanding terbalik dengan representasi fisik kolom air. Persamaan Korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui hubungan arus terhadap kedalaman dapat dilihat pada rumus (1). Data kedalaman (x) disandingkan dengan (y) yang merupakan variabel data arus.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

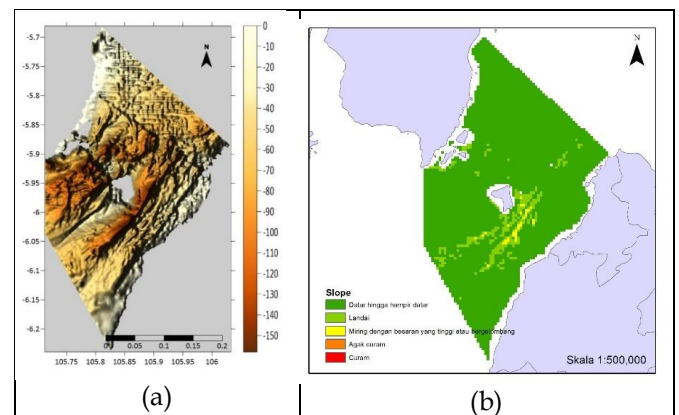
Tanda korelasi menjadi parameter penting: nilai ($r < 0$) menunjukkan bahwa kecepatan arus cenderung menurun seiring bertambahnya kedalaman, sedangkan ($r > 0$) menunjukkan kecenderungan sebaliknya. Nilai korelasi ini kemudian diverifikasi melalui visualisasi profil vertikal arus, di mana kedalaman digambarkan dalam sumbu negatif untuk mencerminkan struktur kolom air secara fisik. Pendekatan terintegrasi ini memastikan bahwa hasil korelasi yang diperoleh akurat secara numerik, konsisten dengan dinamika oseanografi, serta valid digunakan untuk menginterpretasikan pengaruh kedalaman dan struktur kolom air terhadap variasi arus musiman di Selat Sunda.

Metode korelasi pearson yang digunakan masih memiliki kelemahan karena tidak menangkap pola korelasi lokal yang beragam dari data kedalaman secara spasial.

Gambar 2. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian mengacu kepada wilayah perairan maritim yang menjadi tanggung jawab Stasiun Meteorologi Maritim Merak – Cilegon (BMKG, 2025) di Selat Sunda Bagian Utara dimana kegiatan vital pelayaran perlu dukungan hasil penelitian-penelitian yang relevan dalam bidang oseanografi untuk mendukung keselamatan dan keberlangsungan aktifitas kemaritiman.

Hasil dan Pembahasan



Gambar 3. (a) Peta Batimetri Selat Sunda Bagian Utara. (b) Peta *Slope* Dasar Laut Selat Sunda Bagian Utara.

Disajikan dalam gambar 3 (a) morfologi dasar laut Selat Sunda bagian utara menunjukkan topografi yang kompleks dengan rentang kedalaman hingga >160 meter, ditandai oleh keberadaan punggung vulkanik, lembah sempit memanjang, serta lereng curam terutama di sekitar Pulau Sangiang. Struktur palung memanjang yang berorientasi barat daya-timur laut mengindikasikan pengaruh proses tektonik dan vulkanik yang masih aktif, sementara alur dalam di tengah selat berperan sebagai jalur utama pertukaran massa air antara Laut Jawa dan Samudra Hindia (Nadira dkk. 2023). Kondisi batimetri ini memungkinkan terjadinya penguatan arus musiman, turbulensi lokal, serta dinamika hidrodinamika yang kompleks, sehingga menjadikan konfigurasi dasar laut sebagai faktor penting dalam mengontrol karakteristik arus dan proses oseanografi di Selat Sunda bagian utara.

Peta kemiringan lereng di Selat Sunda bagian utara menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah perairan didominasi oleh kelas lereng datar hingga hampir datar dan landai, yang ditandai dengan sebaran

warna hijau tua dan hijau muda pada area yang luas. Namun, di sekitar Pulau Sangiang dan sepanjang jalur memanjang dari barat daya ke timur laut muncul zona dengan kemiringan lebih besar—ditandai warna kuning—yang mengindikasikan keberadaan dasar laut yang miring dan bergelombang, sejalan dengan pola punggung dan lembah sempit yang terlihat pada citra batimetri sebelumnya. Distribusi kemiringan ini menegaskan bahwa topografi dasar laut di wilayah tersebut masih dipengaruhi oleh aktivitas geologi dan menjadi faktor penting dalam mengontrol dinamika arus, turbulensi lokal, serta pola transportasi massa air.

Profil vertikal arus *zonal* pada gambar 4 menunjukkan variasi musiman yang jelas dari komponen kecepatan arus *zonal* (u) terhadap kedalaman hingga 60 m dengan menggunakan konvensi oseanografi di mana nilai positif menandakan arus yang bergerak ke arah timur dan nilai negatif menunjukkan arus yang mengalir ke arah barat. Secara umum, dinamika arus pada lokasi pengamatan didominasi oleh aliran baratan sepanjang tahun, meskipun intensitas dan struktur vertikalnya menunjukkan perubahan signifikan antarperiode musiman.

Pada periode DJF (Desember-Februari), arus *zonal* tampak memiliki intensitas paling lemah dibandingkan musim lainnya. Kecepatan permukaan hanya berkisar antara (-0.02) hingga (-0.03) m/s, menunjukkan energi kinetik arus yang sangat rendah. Profil vertikal pada musim ini juga memperlihatkan perubahan arah arus dengan bertambahnya kedalaman, di mana arus barat yang lemah pada lapisan atas bertransisi menjadi arus timuran pada kedalaman lebih dari 45 m. Fenomena ini mengindikasikan adanya stratifikasi kolom air yang lebih kuat serta kemungkinan munculnya *undercurrent* bawah permukaan akibat lemahnya pengaruh angin Muson Barat yang cenderung melawan aliran *zonal* latar belakang.

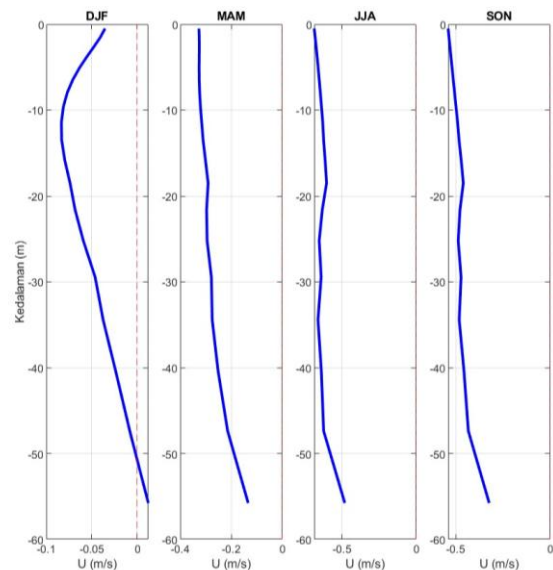
Perubahan karakter arus mulai terlihat pada musim MAM (Maret-Mei) yang merupakan periode peralihan pertama. Pada musim ini arus *zonal* menguat secara konsisten ke arah barat, dengan kecepatan permukaan mencapai sekitar (-0.3) m/s. Seluruh kolom air dari permukaan hingga 60 m menunjukkan arah aliran yang relatif seragam. Homogenitas ini mencerminkan penyesuaian respons lautan terhadap perubahan pola angin menjelang musim timuran, di mana dorongan atmosfer mulai membangun kembali aliran baratan yang lebih kuat setelah fase pelemahan pada DJF.

Musim JJA (Juni-Agustus) menandai fase puncak penguatan arus *zonal* ke arah barat. Arus pada musim ini memperlihatkan struktur *barotropic-like*, ditandai dengan keseragaman arah arus dari permukaan hingga kedalaman 60 m. Kecepatan permukaan mencapai nilai mendekati (-0.5) m/s, menjadikannya periode dengan

intensitas arus paling kuat sepanjang tahun. Homogenitas arus dari permukaan hingga kedalaman 60 m menunjukkan dominasi pengadukan vertikal oleh angin Muson Tenggara yang intens, sebagaimana juga dilaporkan oleh Haryanto dkk. (2021) pada wilayah perairan Indonesia bagian barat

Kondisi tersebut sebagian besar masih dipertahankan hingga musim SON (September-November). Meskipun musim ini merupakan periode peralihan kedua, profil arus tetap menunjukkan arus baratan yang kuat dengan kecepatan berkisar antara (-0.4) hingga (-0.5) m/s. Sedikit pelemahan hanya terlihat pada kedalaman 50–60 m, namun secara keseluruhan struktur vertikalnya masih sangat mirip dengan JJA. Hal ini menunjukkan bahwa momentum arus yang terbentuk pada puncak Muson Tenggara masih berlanjut sebelum mengalami reduksi signifikan menjelang perubahan kembali ke pola DJF.

Secara keseluruhan, profil vertikal arus *zonal* menunjukkan pengaruh kuat sistem angin muson terhadap dinamika kolom air. Pola ini konsisten dengan temuan (Rahmawitri, dkk. 2016) yang melaporkan pelemahan arus dan meningkatnya stratifikasi kolom air di Selat Sunda selama Muson Barat akibat melemahnya gaya geser angin permukaan.



Gambar 4. Profil Vertikal Arus Zonal

Profil vertikal arus *meridional* pada gambar 5 menunjukkan variasi kecepatan komponen (v) terhadap kedalaman hingga 60 m pada empat periode musiman, yaitu DJF, MAM, JJA, dan SON, dengan konvensi bahwa nilai positif menunjukkan arus yang bergerak ke arah utara dan nilai negatif menunjukkan arus yang mengalir ke arah selatan. Secara umum, arus *meridional* pada lokasi pengamatan didominasi oleh aliran selatan sepanjang tahun, meskipun intensitas dan struktur

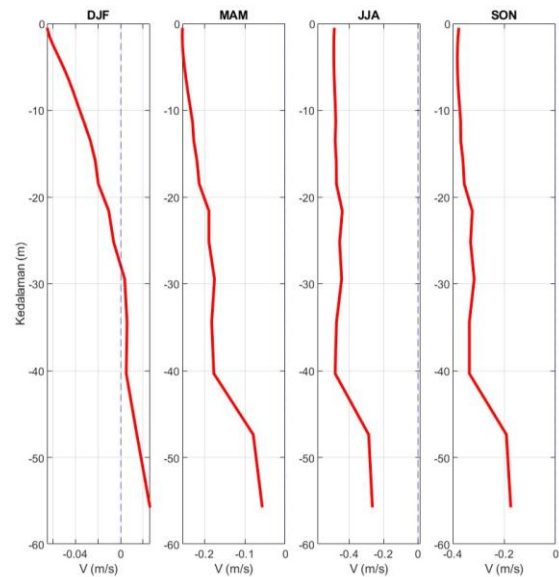
vertikalnya memperlihatkan variasi signifikan antarperiode musiman. Pada musim DJF, arus *meridional* tampak sangat lemah dengan perubahan arah yang jelas terhadap kedalaman. Lapisan permukaan hingga sekitar 25 m memperlihatkan aliran selatan yang sangat kecil, mendekati (-0.06) m/s, sementara pada kedalaman lebih dalam arus berbalik arah menjadi utara dengan magnitudo yang juga rendah. Rentang skala kecepatan yang kecil mengindikasikan bahwa energi kinetik arus *meridional* pada periode ini berada pada tingkat minimum, serupa dengan karakteristik arus *zonal* pada musim yang sama, yang umumnya mencerminkan lemahnya pengaruh angin Muson Barat terhadap dinamika permukaan laut.

Kondisi mulai berubah pada musim MAM yang ditandai dengan penguatan arus selatan sepanjang kolom air. Meskipun kecepatan pada permukaan sangat kecil, profil vertikal menunjukkan peningkatan signifikan ke arah negatif dengan bertambahnya kedalaman, terutama di bawah 40 m, di mana kecepatan arus ke selatan dapat mencapai sekitar (-0.1) m/s. Adanya tekukan (infleksi) pada kedalaman sekitar 40 m mengindikasikan lapisan transisi yang memisahkan zona permukaan dan lapisan bawah.

Pada musim JJA, arus *meridional* mencapai intensitas maksimum dengan aliran ke selatan yang sangat kuat, mencapai (-0.5) m/s di permukaan. Struktur vertikal pada periode ini menunjukkan pola yang sangat homogen dari permukaan hingga kedalaman sekitar 40 m, mengindikasikan terbentuknya *mixed layer* yang dalam. Di bawah 40 m, kecepatan arus mulai menurun drastis, menunjukkan batas bawah lapisan tercampur dan sekaligus menandai keberadaan daerah stratifikasi termal atau densitas yang lebih kuat seperti pycnocline yang menghambat transfer momentum dari permukaan. Pola ini masih dipertahankan pada musim SON, meskipun dengan intensitas yang sedikit lebih lemah pada lapisan dalam. Kecepatan permukaan berkisar (-0.4) m/s dan struktur vertikal tetap menunjukkan lapisan tercampur yang kuat di bagian atas, diikuti oleh perlambatan signifikan di kedalaman 40–60 m akibat meningkatnya viskositas internal dan berkurangnya pengaruh angin.

Sintesis dari keempat musim menunjukkan bahwa arus *meridional* di lokasi ini sangat dikendalikan oleh dinamika musiman. Dominasi aliran ke selatan hampir sepanjang tahun, kecuali pembalikan lemah pada lapisan dalam DJF, mencerminkan pengaruh kuat sistem angin muson. Kombinasi antara arus *zonal* yang cenderung baratan dan arus *meridional* yang mengarah ke selatan menghasilkan resultan arus yang bergerak ke arah barat daya, terutama pada musim JJA dan SON ketika pengaruh Muson Tenggara berada pada intensitas maksimum. Pada musim ini, peningkatan gaya geser angin tidak hanya memperkuat arus

permukaan tetapi juga memperdalam lapisan tercampur hingga sekitar 40 m. Sebaliknya, pada DJF, perairan mengalami pelemahan momentum yang drastis sehingga arus menjadi sangat lemah dan tidak stabil secara vertikal. Temuan ini menegaskan bahwa variasi musiman memegang peranan dominan dalam menentukan struktur dan intensitas arus *meridional*, serta mempengaruhi pola transport massa air secara keseluruhan di wilayah kajian. Pola serupa juga ditemukan oleh Racman dkk. (2023) di perairan pesisir Banten, meskipun dengan skala spasial yang lebih lokal.



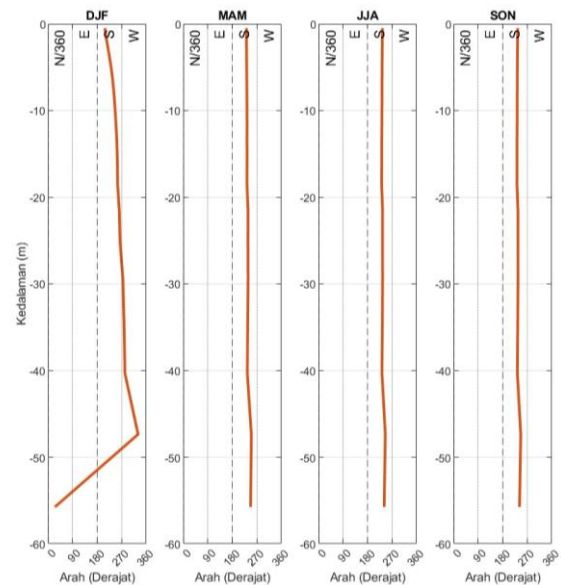
Gambar 5. Profil Vertikal Arus *Meridional*

Pada gambar 6 profil arah arus memperlihatkan variasi musiman yang kuat dengan menunjukkan arah pergerakan massa air dalam rentang $(0^\circ) - (360^\circ)$, di mana nilai $(0^\circ/360^\circ)$ mewakili arah utara, (90°) timur, (180°) selatan, dan (270°) barat. Secara umum, grafik arah ini mengindikasikan ke mana arus bergerak, sehingga interpretasi arah sangat bergantung pada posisi kurva pada sumbu derajat tersebut. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa profil arah arus selama musim DJF, MAM, JJA, dan SON menampilkan dinamika vertikal yang sangat berbeda antara musim Barat dan musim Timur serta kedua periode peralihannya. Pada musim DJF, arah arus menunjukkan struktur vertikal yang paling kompleks. Lapisan permukaan hingga sekitar 45 m berada dalam kisaran $(200^\circ) - (250^\circ)$, yang menunjukkan bahwa arus bergerak ke arah barat daya, konsisten dengan komponen *zonal* dan *meridional* yang sebelumnya menunjukkan aliran ke barat dan selatan. Namun, pada

kedalaman yang lebih dalam, arah arus mengalami perubahan yang sangat tajam, bergerak menuju kisaran $(30^\circ) - (50^\circ)$ yang menunjukkan aliran berlawanan arah menuju timur laut. Perubahan arah yang kontras antara lapisan atas dan bawah ini merupakan indikasi kuat adanya stratifikasi densitas dan aliran baroklinik, di mana kolom air tidak bergerak secara seragam melainkan terpecah menjadi dua massa air dengan arah yang saling berlawanan akibat dominasi gaya gradien tekanan pada lapisan yang lebih dalam ketika pengaruh angin permukaan melemah pada musim Barat.

Berbeda dengan kondisi pada DJF, ketiga periode lainnya—MAM, JJA, dan SON—menunjukkan pola arah yang hampir identik dengan sedikit variasi intensitas. Pada ketiga musim tersebut, kurva arah membentuk garis yang relatif vertikal dari permukaan hingga dasar, mengindikasikan sifat barotropik di mana arah arus tidak mengalami perubahan terhadap kedalaman. Arah dominan berkisar antara $(240^\circ) - (250^\circ)$, yang menunjukkan aliran konsisten ke arah barat daya sepanjang kolom air. Meski kecepatan arus pada grafik sebelumnya menunjukkan pelemahan di lapisan dalam, arah arus tetap stabil, menandakan massa air bergerak sebagai satu kesatuan yang kuat terutama pada musim JJA ketika energi arus mencapai nilai maksimum akibat pengaruh angin Muson Tenggara. Musim MAM dan SON menunjukkan kondisi serupa namun dengan intensitas yang lebih moderat, terutama SON yang mulai memperlihatkan pelemahan arus di lapisan bawah meskipun arah tetap barotropik.

Sintesis dari keseluruhan hasil—yang menggabungkan komponen *zonal*, *meridional*, dan arah arus—menunjukkan bahwa perairan pada lokasi studi sangat dipengaruhi oleh sistem angin muson dengan dominasi pergerakan massa air menuju barat daya hampir sepanjang tahun. Puncak kekuatan arus terjadi pada musim JJA di mana kolom air berada dalam kondisi tercampur baik dan bergerak serempak dalam satu arah dominan yang stabil. Sebaliknya, pada musim DJF, ketika pengaruh angin muson melemah atau berbalik, kolom air tidak lagi bergerak secara seragam sehingga terjadi pemisahan arah antara lapisan permukaan dan lapisan dalam. Pada kondisi ini, arus permukaan bergerak lemah ke barat daya, sementara arus bawah bergerak berlawanan ke timur laut, yang kemungkinan besar didorong oleh gaya gradien tekanan bawah permukaan ketika gaya geser angin tidak lagi mendominasi. Temuan ini menguatkan bahwa dinamika arus di wilayah ini adalah sistem musiman yang sangat kuat, dengan karakteristik barotropik pada sebagian besar tahun dan kondisi baroklinik yang menonjol pada musim Barat.



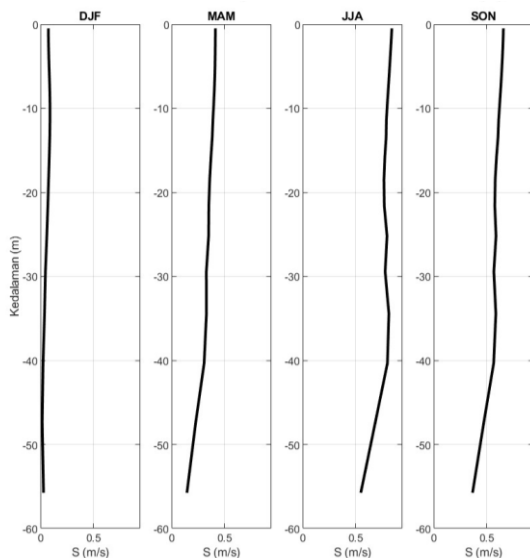
Gambar 6. Profil Vertikal Arah Arus (derajat)

Magnitudo kecepatan arus total merupakan nilai skalar hasil perpaduan komponen *zonal* (u) dan *meridional* (v), dihitung menggunakan persamaan $S = \sqrt{(u^2 + v^2)}$. Grafik kecepatan arus total dengan kedalaman 0–60 m memperlihatkan bagaimana energi kinetik arus berubah secara vertikal pada setiap musim. Sumbu X menunjukkan besar kecepatan (0 hingga ± 0.8 m/s), sementara sumbu Y menunjukkan kedalaman. Semakin jauh garis berada di kanan, semakin besar energi arus; garis vertikal menandakan kecepatan seragam dan garis miring menunjukkan adanya *vertical shear*.

Pada periode DJF, kecepatan arus berada pada kondisi minimum. Pada gambar 7 profil terlihat hampir berupa garis lurus yang menempel di dekat nilai nol (< 0.1 m/s), menandakan perairan berada pada kondisi paling tenang. Meskipun analisis arah sebelumnya menunjukkan perubahan drastis antara lapisan atas dan bawah, besarnya energi arus yang sangat lemah membuat dinamika pada musim ini didominasi oleh kondisi atmosfer yang tidak memiliki gaya penggerak yang signifikan. Situasi ini dapat terjadi karena lemahnya sistem angin muson barat atau adanya pembatalan gaya antara arus latar belakang dan angin permukaan.

Memasuki musim MAM, kecepatan arus mulai meningkat dengan nilai permukaan berkisar 0.2–0.3 m/s. Profil vertikal menunjukkan pola penurunan kecepatan yang halus menuju kedalaman, suatu karakteristik umum ketika energi dari angin permukaan secara bertahap mereduksi ke bawah akibat gesekan. Pola ini mengindikasikan kondisi transisi dari fase tenang menuju penguatan muson tenggara.

Musim JJA memperlihatkan puncak energi arus. Garis grafik berada paling kanan, menunjukkan kecepatan permukaan mencapai sekitar 0.7–0.8 m/s. Yang paling mencolok adalah keberadaan lapisan campuran yang sangat tebal, yaitu dari permukaan hingga sekitar 40 meter. Garis yang hampir tegak pada kedalaman tersebut menandakan bahwa kolom air bergerak dengan kecepatan hampir seragam, menunjukkan adanya pengadukan kuat oleh angin muson tenggara yang intens. Di bawah 40 m, garis mulai miring, menunjukkan melemahnya pengaruh angin dan meningkatnya dominasi gaya gesek internal.



Gambar 7. Profil Vertikal Kecepatan Arus (m/s)

Pada periode SON, pola vertikal hampir sama dengan JJA namun dengan magnitudo sedikit menurun. Kecepatan permukaan umumnya berada pada kisaran 0.5–0.6 m/s. Meski angin muson mulai melemah, struktur lapisan campuran tetap terlihat hingga kedalaman sekitar 30–40 meter sebelum mengalami perlambatan menuju dasar. Hal ini menandakan bahwa residu energi dari fase puncak muson masih berperan mempertahankan homogenitas kecepatan di lapisan atas.

Secara keseluruhan, integrasi empat grafik hidrodinamika (komponen *zonal*, *meridional*, arah, dan magnitudo total) menunjukkan bahwa dinamika arus di lokasi penelitian sangat dikendalikan oleh rezim angin muson. Musim JJA merupakan periode dominan dengan kecepatan maksimum dan struktur barotropik hingga 40 meter, sementara DJF menunjukkan kondisi unik berupa arus yang lemah tetapi terstratifikasi dengan arah lapisan atas dan bawah yang berlawanan. Kedalaman sekitar 40 meter tampaknya menjadi batas kritis yang memisahkan lapisan yang dipengaruhi langsung oleh pengadukan angin dan lapisan yang

dikendalikan oleh proses gesekan internal serta struktur stratifikasi. Pola musiman ini memberikan gambaran komprehensif mengenai interaksi antara atmosfer dan lautan yang membentuk karakteristik arus seasonal di wilayah penelitian.

Nilai korelasi Pearson table 1 mencerminkan seberapa kuat perubahan kecepatan mengikuti kedalaman secara linier; nilai yang mendekati ± 1 menunjukkan hubungan yang sangat kuat, sementara nilai yang mendekati 0 menandakan hubungan yang lemah. Tanda negatif yang muncul pada seluruh musim menggambarkan kecenderungan kecepatan arus yang menurun terhadap kedalaman, hal yang umum dalam proses oseanografi dimana gesekan dan viskositas menyebabkan reduksi energi pada lapisan yang semakin dalam. Seluruh nilai signifikansi yang sangat kecil (p -value jauh di bawah 0.05) menegaskan bahwa hubungan ini bukan terjadi secara kebetulan, tetapi mencerminkan fenomena fisik yang nyata di kolom air.

Pada musim peralihan MAM dan SON, nilai korelasi *zonal* dan *meridional* sangat tinggi, masing-masing mencapai -0.93 hingga -0.95 pada MAM dan sekitar -0.88 hingga -0.89 pada SON. Nilai yang mendekati -1 ini menunjukkan bahwa perubahan kecepatan dari permukaan hingga kedalaman terjadi secara sangat teratur dan linier. Karakteristik ini sejalan dengan bentuk grafik vertikal yang mulus, tanpa adanya patahan ekstrem atau lapisan tercampur yang terlalu dominan. Energi angin yang tidak terlalu kuat pada kedua musim ini menghasilkan gradien kecepatan yang lebih stabil dan bertahap, mencerminkan adanya keseimbangan antara gaya gesek dan struktur densitas air.

Musim DJF menampilkan dinamika yang lebih kompleks karena terdapat perbedaan mencolok antara komponen *zonal* dan *meridional*. Komponen *meridional* memiliki korelasi yang sangat tinggi (-0.96), menunjukkan bahwa meskipun arus pada musim ini sangat lemah, perubahan kecepatan dari permukaan hingga kedalaman tetap mengikuti pola linier yang kuat. Sebaliknya, komponen *zonal* hanya memiliki korelasi sedang (-0.67). Nilai yang lebih rendah ini konsisten dengan bentuk profil *zonal* DJF yang melengkung dan tidak mengikuti garis lurus, mencerminkan adanya proses stratifikasi atau shear internal yang menyebabkan perubahan arah dan kecepatan arus tidak sepenuhnya mengikuti pola linier sederhana.

Pada musim JJA, nilai korelasi untuk komponen *zonal* dan *meridional* menjadi yang terendah dibandingkan musim lainnya, masing-masing sebesar -0.67 dan -0.79 . Unikny, korelasi yang lebih rendah ini bukan menunjukkan hubungan yang lemah secara fisik, melainkan merupakan bukti statistik keberadaan (*mixed layer*) yang kuat. Pada grafik vertikal JJA,

kecepatan arus hampir seragam dari permukaan hingga kedalaman sekitar 40 meter, membentuk garis tegak lurus sebelum membelok tajam di bawah kedalaman tersebut.

Tabel 1. Korelasi Pearson (r) dan Signifikansi (p) Antara Arus dan Kedalaman

Periode Musim	U_Depth (r)	P_Value U	V_Depth (r)	P_Value V
DJF	-0.67523	1.5126 × 10 ⁻³	-0.96567	2.1982×10 ⁻¹¹
MAM	-0.9313	7.1056 × 10 ⁻⁹	-0.95799	1.19 × 10 ⁻¹⁰
JJA	0.67432	1.5435 × 10 ⁻³	-0.7915	5.4187 × 10 ⁻⁵
SON	0.88331	5.4275 × 10 ⁻⁷	-0.89098	3.1286 × 10 ⁻⁷

Secara keseluruhan, kombinasi antara nilai korelasi dan signifikansi statistik memperkuat interpretasi grafis mengenai dinamika kolom air di wilayah penelitian. Kedalaman terbukti berperan penting dalam mengontrol variasi kecepatan di seluruh musim. Musim peralihan memperlihatkan struktur kolom air yang stabil dengan gradien kecepatan yang teratur, musim JJA menunjukkan dominasi proses pencampuran yang menghasilkan lapisan homogen hingga sekitar 40 meter, sementara musim DJF memperlihatkan struktur yang lebih kompleks, terutama pada komponen *zonal* yang tidak mengikuti pola linier sederhana. Sinergi antara pola statistik dan visual ini memberikan dasar ilmiah yang kuat mengenai bagaimana perubahan musiman dan gaya atmosfer memengaruhi karakteristik arus vertikal di perairan lokasi studi.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dicatat. Pertama, data yang digunakan merupakan data reanalysis CMEMS yang meskipun unggul dalam cakupan temporal jangka panjang, tetap memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan dinamika arus skala kecil dan proses lokal, terutama di wilayah dengan topografi kompleks seperti Selat Sunda. Kedua, analisis difokuskan pada hubungan linier antara kedalaman dan kecepatan arus, sehingga belum sepenuhnya menangkap kemungkinan hubungan nonlinier atau pengaruh faktor oseanografi lain seperti suhu, salinitas, dan pasang surut. Ketiga, kedalaman analisis dibatasi hingga 60 m, sehingga dinamika arus pada lapisan yang lebih dalam belum terakomodasi secara menyeluruh.

Meskipun demikian, temuan penelitian ini memiliki implikasi penting baik secara ilmiah maupun praktis. Secara ilmiah, hasil penelitian ini menegaskan bahwa integrasi analisis profil vertikal arus dan korelasi kedalaman pada skala musiman merupakan

pendekatan yang efektif untuk memahami dinamika kolom air di wilayah selat sempit dan kompleks. Secara praktis, informasi mengenai kedalaman kritis lapisan campuran (~40 m) dan periode musim dengan energi arus maksimum (JJA) dapat dimanfaatkan untuk mendukung perencanaan keselamatan pelayaran, penentuan jalur pelayaran yang lebih aman, serta mitigasi risiko kelautan di Selat Sunda. Selain itu, pemahaman mengenai interaksi antara morfologi dasar laut dan arus musiman juga relevan bagi pengelolaan wilayah pesisir dan perencanaan infrastruktur kelautan di wilayah Banten.

Kesimpulan

Integrasi analisis profil vertical arus pada resolusi multi-musim dengan pendekatan data klimatologis dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kedalaman dasar laut memiliki kontribusi penting terhadap karakteristik arus musiman di Selat Sunda. Kedalaman berpengaruh langsung terhadap distribusi kecepatan arus, baik untuk komponen zonal maupun meridional, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai korelasi negatif yang signifikan pada seluruh musim. Variabilitas arus sangat terkait dengan dinamika monsun, dengan pola arus baratan-ke selatan yang dominan pada MAM hingga SON, serta kondisi arus yang lemah dan lebih kompleks pada DJF. Musim JJA menjadi periode dengan energi arus tertinggi, ditandai oleh lapisan campuran yang kuat hingga ±40 m dan struktur barotropik yang stabil. Sebaliknya, musim DJF menampilkan struktur baroklinik yang ditandai oleh pembalikan arah antara lapisan permukaan dan bawah. Secara keseluruhan, interaksi antara faktor atmosfer dan morfologi dasar laut membentuk pola arus vertikal yang khas, sehingga pemahaman mengenai keduanya menjadi penting untuk mendukung pengelolaan wilayah pesisir, mitigasi bencana, serta aktivitas kelautan di Selat Sunda.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada pihak-pihak yang memberikan dukungan terhadap penelitian ini. Penelitian di danai dari sumber dana DIPA Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (PPSDM BMKG).

Daftar Pustaka

BMKG. (2025). *Keputusan Kepala Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Tentang Unit Kerja Dan Unit Pelaksana Teknis Layanan Informasi Meteorologi Maritim*.

Cahyani, A., W, N. Z., Arrochim, A., & Olivia, T. (2024). *Pemodelan Arus Pasang Surut dan Transpor Sedimen 2D Menggunakan Metode di Perairan*

- Kalimantan Barat pada Bulan Juli 2024. *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 6(2), 87-96. <https://doi.org/10.62703/jhi.v6i2.117>
- Haryanto, Y. D., Riama, N. F., Purnama, D. R., Pradita, N., Ismah, S. F., Suryo, A. W., Fadli, M., Hananto, N. D., Li, S., & Susanto, R. D. (2021). Effect Of Monsoon Phenomenon On Sea Surface Temperatures In Indonesian Throughflow Region And Southeast Indian Ocean. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 56(6), 914-923. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.56.6.80>
- Lutfi, M. (2021). Insight of Numerical Simulation for Current Circulation on the Steep Slopes of Bathymetry and Topography in Palu Bay, Indonesia. *Fluids*, 6(7), 234. <https://doi.org/10.3390/fluids6070234>
- Nadira, A. I., Ismanto, A., Hakim, A. R., & Ramdhani, A. (2023). Tinjauan Pengaruh Pasang Surut Terhadap Arus Permukaan Menggunakan Data HF Radar di Perairan Selat Sunda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(4), 256-264. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i4.16834>
- Potemra, J. T., Hacker, P. W., Melnichenko, O., & Maximenko, N. (2016). Satellite estimate of freshwater exchange between the Indonesian Seas and the Indian Ocean via the Sunda Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7), 5098-5111. <https://doi.org/10.1002/2015JC011618>
- Prihantono, J., Fajrianto, I. A., & Kurniadi, Y. N. (2018). Pemodelan Hidrodinamika Dan Transpor Sedimen Di Sekitar Tanjung Pontang, Kabupaten Serang – Banten. *Jurnal Kelautan Nasional*, 1(2). <https://doi.org/10.15578/jkn.v1i2.6614>
- Racman, R. A., Armono, H. D., Istiyanto, D. C., Wardani, K. S., Khoirunnisa, H., & Wijayanti, R. (2023). Study of Hydrodynamic Patterns of Tanjung Pasir Banten Waters to Support the NCICD Sea Wall Development Plan. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 8(1), 1-9. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.1.10801>
- Rahmawitri, H., Saleh Atmadipoera, A., & Suryo Sukoraharjo, S. (2016). Pola Sirkulasi Dan Variabilitas Arus Di Perairan Selat Sunda. *Jurnal Kelautan Nasional*, 11(3), 141. <https://doi.org/10.15578/jkn.v11i3.6115>
- Serodja, C. M., Ismanto, A., Hakim, A. R., & Ramdhani, A. (2023). Analisa Pengaruh Angin Monsoon Timur terhadap Arus Permukaan Berdasarkan Data HF Radar di Perairan Selat Sunda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(4), 11-18. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i4.15672>
- WMO. (2021). WMO collection of the Climatological Standard Normals for 1991-2020. https://extranet.wmo.int/edistrib_exped/grp_p rs/_en/2011_2022_Archives/Archives%202021/16953-2021-S-CS-CMP-CLINO9120-en.pdf