

Ketidakteragaman Sebaran Spasial Variabilitas Musiman Eddy di Perairan Barat Laut Indonesia

Aditya R. Kartadikaria^{1,2,4*}, Gandhi Napitupulu^{1,2}, Kalaka Rangga³,
Ivonne Milichristi Radjawane^{1,2,4}, Faizal Ade Rahmahuddin Abdullah¹

¹Kelompok Keahlian Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10, Kota Bandung, 40132

²Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Kebonturi, Kabupaten Cirebon, 45162

³Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10, Kota Bandung, 40132

⁴Pusat Pengembangan Wilayah Pesisir dan Laut

Jl. Ganesa No. 10, Bandung, 40132

Email: a.r.kartadikaria@itb.ac.id

Abstract

Nonuniformity of Spatial Distribution of Seasonal Eddy Variability in Northwest Indonesian Waters

Sea level anomaly (SLA) data spanning from 1993 – 2022 were used to analyze the characteristic of eddy current in Northwest Indonesian. An improved winding angle method was used and was able to detect 1663 anticyclonic eddies (AEs) and 1748 cyclonic eddies (CEs). The average eddy lifespan is approximately four weeks. The eddy in the West Indonesian Ocean has a radius ranging from 40 – 100 km and a high number of mesoscale eddy (radius more than 100 km) detected in the northern area of West Indonesian Ocean (4° N - 10° N). The eddy kinetic energy (EKE) increased proportionally with their radius, whereas the eddy vorticity decreased proportionally with their increasing radius. The seasonal cycles of eddy circulation in the west Indonesian Ocean were differ for both AEs and CEs, where AEs were dominated during east monsoon season (JJA) and CEs came with longer periods from November to March, yet for both AEs and CEs they have similar radius per month. During weak periods of both eddies, their meridional distributions differ; CEs tend to be formed in relatively lower latitude, while AEs were concentrated in relatively higher latitude.

Keywords: Eddy Current Circulation, Northwest Indonesian Ocean, Winding Angle

Abstrak

Data anomali permukaan laut/sea level anomaly (SLA) dalam kurun waktu 1993 – 2022 digunakan untuk mempelajari karakteristik sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia. Metode *Winding Angles* yang telah dimodifikasi mampu mendeteksi 1663 anticyclonic eddies (AE) dan 1748 cyclonic eddies (CE). Rata-rata umur eddy yang terdeteksi adalah sekitar empat minggu. Mayoritas sirkulasi arus eddy memiliki radius 40 – 100 km dan eddy dengan radius berskala meso (lebih dari 100 km) banyak terkonsentrasi di bagian utara (4° N - 10° N) perairan barat laut Indonesia. Nilai energi kinetik eddy (EKE) bertambah sebanding dengan pertambahan radius, sedangkan nilai vortisitas berbanding terbalik dengan radius. Sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia pada musim timur (JJA) didominasi oleh AE, sedangkan CE mendominasi di musim barat (DJF) dengan periode yang lebih panjang dari November hingga Maret, namun dengan rata-rata radius yang sama setiap bulannya. Pada saat periode di mana kejadian eddy minimum, ditemukan perbedaan letak distribusi meridional eddy bervortisitas tinggi yang menunjukkan CE lebih didukung pembentukannya pada lintang yang lebih rendah daripada AE.

Kata kunci : Perairan barat laut Indonesia, Sirkulasi Arus Eddy, Winding Angle

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki karakteristik perairan yang unik dan kompleks. Hal ini dapat terjadi karena lokasi geografis Indonesia yang berada pada pertemuan dua benua dan dua samudra (Yamanaka, 2016). Akibatnya, terjadi pertemuan beberapa massa air dari daerah luar di beberapa titik di Indonesia. Indonesia bagian barat khususnya, menjadi titik pertemuan beberapa jenis arus laut seperti arus ekuator/ *Equatorial Jet* (EJ) (Yamanaka, 2016), *Southern Mozambique Current* (SMC) (Fischer & Uenzelmann-Neben, 2018), dan *Bay of Bengal Current* (Makarim *et al.*, 2019). Pada daerah

pertemuan arus dapat terjadi sirkulasi arus eddy akibat adanya pertemuan arus yang berbeda medan kecepatan pada perairan tersebut (Anderson *et al.*, 2021).

Eddy adalah pusaran di permukaan laut yang terbentuk akibat interaksi permukaan laut dengan fenomena fisis lainnya seperti gesekan angin, topografi dan morfologi pulau, atau konvergensi arus (Yu *et al.*, 2022). Struktur sirkulasi eddy memiliki skala spasial yang berkisar antara puluhan hingga ratusan kilometer dengan skala temporal yang berkisar antara mingguan hingga bulanan (Bôas *et al.*, 2019). Eddy menjadi salah satu fenomena oseanografi yang menarik untuk diteliti oleh para ahli oseanografi karena pengaruhnya yang besar terhadap aspek biologis, fisik laut, dan dinamika atmosfer di atasnya (Cabrera *et al.*, 2022). Pengaruh kuat atau lemahnya terhadap ketiga aspek tersebut diatas dapat menjadi indikasi peran eddy di perairan tersebut (Vinayachandran *et al.*, 2021).

Sirkulasi arus eddy tergolong skala meso jika memiliki radius yang besar (radius > 15 km). Eddy skala meso dalam sirkulasi arus laut merupakan aktivitas yang cukup dominan dalam mempengaruhi kejadian di laut (Sun *et al.*, 2019). Sirkulasi arus eddy dapat menjadi faktor yang dominan dalam sebuah cekungan tertutup atau perairan semi tertutup (Zhan *et al.*, 2019). Sirkulasi arus eddy memiliki peranan penting pada proses hidrodinamika di daerah tersebut (Asfahani *et al.*, 2020) dan juga ekosistem dari laut di daerah tersebut (Tangke *et al.*, 2020), sehingga dapat juga mempengaruhi kondisi ekonomi dan sosial di sekitar daerah sirkulasi arus eddy tersebut. Meskipun banyaknya pengaruh dari sirkulasi arus eddy pada daerah yang terdapat arus eddy, penelitian mengenai sirkulasi arus eddy masih sangat sedikit.

Penelitian mengenai sirkulasi arus eddy di sekitar Perairan Indonesia pertama kali dilakukan di Samudra Pasifik bagian barat oleh Takahashi pada tahun 1959 dengan menggunakan data temperatur dan salinitas untuk mengetahui peta arus dari topografi laut yang dinamis (Takahashi, 1959). Pada penelitian tersebut, ternyata ditemukan daerah dingin berbentuk elips yang bergerak berlawanan putaran jarum jam di Samudra Pasifik. Perputaran arus pada daerah tersebut diidentifikasi sebagai sirkulasi arus eddy (Chen *et al.*, 2002). Perputaran arus ini membuktikan adanya fenomena sirkulasi arus eddy di Indonesia, lebih tepatnya pada daerah Indonesia bagian timur laut yang berbatasan dengan Samudra Pasifik bagian barat (Pargaonkar & Vinayachandran, 2022). Keberadaan eddies juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh (Arruda & Nof, 2003) berdasarkan data drifter yang ditempatkan di daerah Dome Eddy Mindanao. Terdapat eddy besar seperti layaknya kubah atau *dome* di daerah Mindanao yang memiliki diameter melebihi 250 km. Kartadikaria *et al.*, 2012 melakukan penelitian tentang "Lombok Eddy Train"(LET) di lokasi daerah strategi antara Selat Makassar dan Selat Lombok dan menemukan bahwa LET sering terjadi pada bulan Februari dan Maret dengan penggerak utamanya adalah antisiklonik Lombok eddy. Jika wilayah tengah, timur, utara dan selatan Indonesia sudah terdapat penelitian terkait eddy ini, di penelitian ini kami membahas statistik kinematika eddy yang terjadi pada wilayah barat Indonesia yang masih minim.

Arus eddy di Indonesia dapat ditemukan pada perairan barat Pulau Sumatra hingga perairan selatan Pulau Jawa, yaitu perairan utara Pulau Papua (Hao *et al.*, 2021; Hatayama *et al.*, 1996), Laut Banda, Laut Maluku, Laut Seram, Teluk Tomini, Laut Arafura, Laut Timor, Laut Sawu, Selat Karimata, Laut Andaman (Hatayama *et al.*, 1996; Makarim *et al.*, 2019), Selat Makassar, Laut Flores, dan perairan barat Nusa Tenggara (Kartadikaria *et al.*, 2012), perairan Mindanao, Halmahera, dan Selat Malaka (Purba *et al.*, 2021; Simanungkalit *et al.*, 2018). Namun, penelitian terdahulu masih dominan berfokus pada wilayah perairan Indonesia bagian timur dan tengah. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi sirkulasi arus eddy yang ada pada perairan barat Indonesia dan sekitarnya menggunakan metode *winding angle* dan melakukan analisis kinematika sirkulasi arus eddy pada perairan tersebut. Data yang digunakan berasal dari AVISO yang merekam sea level anomaly (SLA) di daerah kajian pada tahun 1993 – 2023. Penelitian menggunakan metode *winding angle* (WA)

masih terhitung baru di perairan Indonesia. Mengingat bahwa perairan Indonesia banyak dipengaruhi oleh sirkulasi arus yang terjadi dari luar perairan Indonesia, maka pengetahuan akan karakteristik sirkulasi arus eddy di perairan Indonesia menjadi penting.

MATERI DAN METODE

Data

Perairan Indonesia bagian Barat akan menjadi fokus utama kajian sirkulasi arus eddy. Daerah kajian berada pada rentang 0° N - 10° N dan 90° E - 105° E dipilih sebagai wilayah yang digunakan untuk analisis kinematika sirkulasi arus eddy. Wilayah ini mencakup daerah selat dan daerah yang berbatasan langsung dengan samudra Hindia sehingga layak untuk digunakan untuk melakukan analisis karakteristik sirkulasi arus eddy.

Deteksi Eddy dengan Winding Angle

Deteksi sirkulasi arus eddy menggunakan metode *winding angle*. Metode *winding angle* merupakan metode deteksi sirkulasi arus eddy berdasarkan anomali yang terjadi pada permukaan laut (Heiles *et al.*, 2022). Data yang digunakan dalam rentang 30 tahun (1993-2022) agar analisa sirkulasi arus eddy pada musim yang berbeda dapat dilakukan dengan lebih baik. Dalam analisis, data yang digunakan adalah data mingguan yang didapat dari data harian SLA. Nilai ini cukup baik untuk digunakan pada daerah kajian karena nilai eror dari data SLA dari AVISO baru secara signifikan dapat mempengaruhi data apabila menggunakan data dengan skala waktu bulanan atau skala waktu yang lebih panjang (Santana *et al.*, 2020).

Dalam melakukan deteksi sirkulasi arus eddy, dapat dilakukan dengan beberapa cara salah satunya *winding angle* (WA). Penggunaan metode WA akan lebih efisien dibanding penggunaan metode *Okubo-Weiss* (OW) karena WA memiliki nilai eror yang lebih kecil dengan taksiran yang tidak terlampaui tinggi seperti pada metode OW (Chaigneau *et al.*, 2008). Metode ini digunakan dengan cara melakukan asumsi bahwa streamline yang berada di sekitar pusat eddy berbentuk mendekati lingkaran atau spiral, kemudian menentukan streamlines dengan menggunakan medan kecepatan geostropik yang didapatkan dari SLA (Zhan *et al.*, 2014). Kecepatan geostropik pada penelitian ini sudah memperhitungkan suku beta-plane dimana efek Coriolis pada ekuator akan ditentukan oleh nilai beta-plane ini seperti pada suku kedua para ruas sebelah kanan di Persamaan (1).

$$f = f_0 + \frac{2\Omega \cos \phi_0}{r} y \quad (1)$$

dengan f_0 adalah parameter Coriolis pada lintang ϕ_0 yang berjarak secara meridional y dari Ekuator. Ω adalah laju rotasi sudut bumi dengan jari-jari bumi, r . Kemudian, dilakukan perhitungan nilai penjumlahan (α) dari sudut streamlines. Lengkungan yang searah jarum jam akan melambangkan nilai α negatif dan lengkungan yang berlawanan arah jarum jam akan melambangkan nilai α positif. Apabila terdapat streamlines dengan nilai WA absolut lebih besar daripada 2π , maka akan dianggap sebagai rotasi tertutup. Seringkali, nilai $\alpha_{wi} < \pm 2\pi$ digunakan untuk mencari *winding streamlines* yang tidak mencapai satu rotasi penuh (Zhan *et al.*, 2014),

Metode WA mengidentifikasi struktur sirkulasi arus eddy dengan cara mendefinisikan titik pusat eddy dan putaran di sekitar *streamline* tertutup. Langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut, yaitu: 1. Titik pusat potensial dari *Anticyclonic Eddy* (AE) dan *Cyclonic Eddy* (CE) diidentifikasi dengan mencari *sea level* maksimum/minimum lokal yang pada wilayah pengamatan; 2. *Streamline* dihitung pada sekeliling pusat eddy dengan menggunakan medan arus geostropik yang didapatkan dari SLA; 3. *Streamline* tertutup dipilih dengan mencari *streamline* yang memiliki nilai WA absolut lebih atau sama dengan 2π (Liu *et al.*, 2020); 4. Pusat eddy diidentifikasi dengan menentukan titik potensial yang dikelilingi oleh *streamline* tertutup; 5. *Streamline* tertutup yang dimiliki oleh titik pusat eddy yang sama dimasukkan ke dalam satu *cluster*, dengan *streamline* terluar menjadi

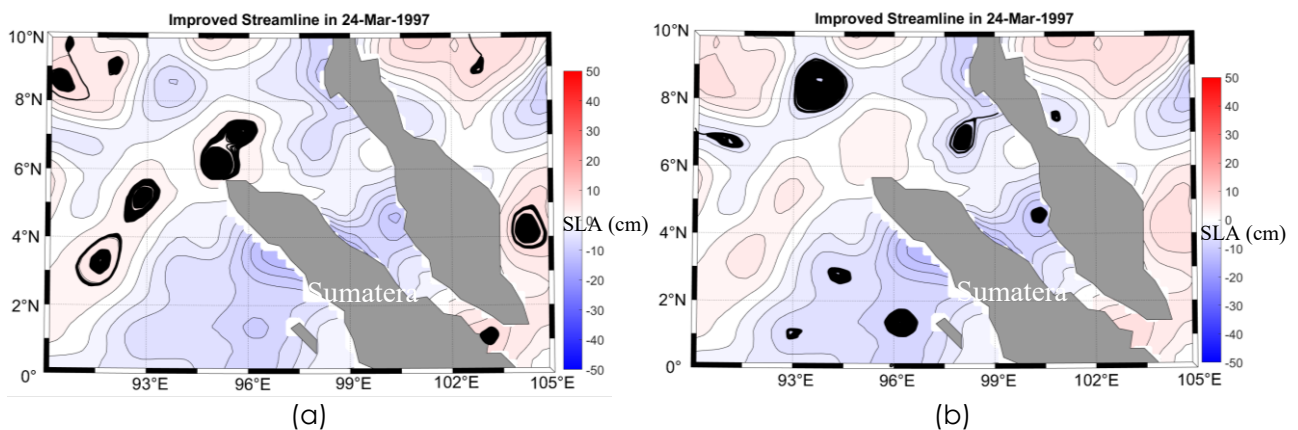
karakteristik dari pinggiran eddy; dan 6. Jari-jari eddy didefinisikan dengan menggunakan $R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$, dengan A sebagai area yang dibatasi oleh pinggiran eddy. Penggunaan metode WA hanya mendeteksi sirkulasi arus eddy tertutup. Namun, pada beberapa kasus terdapat sirkulasi arus eddy yang terdeteksi di dekat pantai. Pada saat pusat sirkulasi arus eddy berada pada dekat pantai, medan kecepatan arus akan kehilangan bentuknya. Hal ini mengakibatkan *streamline* yang menandakan pinggiran dari sirkulasi arus eddy tersebut menjadi terbuka (Yuan *et al.*, 2019).

Untuk melakukan perhitungan radius yang lebih akurat, dilakukan penambahan langkah kerja pada algoritma WA (Zhan *et al.*, 2014), yaitu: 1. Untuk setiap eddy yang terdeteksi, jarak antara pusat eddy dan pusat dari setiap *streamline* dihitung, termasuk yang tertutup maupun terbuka; 2. *Streamline* yang telah dihitung dan memiliki jarak yang lebih kecil dari radius *pre-defined* eddy dikumpulkan; dan 3. Pinggiran eddy didefinisikan ulang oleh *streamline* terluar ditambah juga dengan data yang telah dikumpulkan pada langkah sebelumnya (Heiles *et al.*, 2022). Hasil deteksi sirkulasi arus eddy menggunakan metode WA yang telah dimodifikasi berhasil mendeteksi lebih banyak sirkulasi arus eddy, terutama titik pusat eddy yang memiliki *streamline* semi tertutup akibat adanya batas daratan (Zhan *et al.*, 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data SLA dari AVISO pada rentang tahun 1993-2022 dipakai untuk menganalisa karakteristik sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia. Metode WA yang telah dimodifikasi dipakai untuk mendeteksi sirkulasi arus eddy berdasarkan SLA. Deteksi dan analisis AE dan CE akan dilakukan secara terpisah.

Gambar 1 menunjukkan salah satu contoh hasil deteksi sirkulasi arus eddy dengan menggunakan metode WA. Sirkulasi arus eddy yang terdeteksi berdasarkan *streamline* ditandai oleh garis berwarna hitam yang melingkar. Wilayah AE terdeteksi pada SLA yang bernilai positif, sedangkan wilayah CE terdeteksi pada SLA yang bernilai negatif di BBU. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu (Chaigneau *dkk.*, 2009; Zhan *dkk.*, 2014) yang menyatakan bahwa AE akan memiliki SLA bernilai positif dan CE akan memiliki SLA bernilai negatif di BBU. Nilai komponen geostropik yang didapatkan dalam pengolahan data di dekat ekuator, khususnya pada rentang 0° - 2°N memiliki eror yang cukup besar (Arbic *et al.*, 2022). Hal ini dapat terjadi karena nilai Coriolis di dekat ekuator sangat kecil sehingga diperlukan analisa menggunakan arus semi-geostropik. Namun, dalam analisa penelitian ini keadaan tersebut diabaikan dan menganggap bahwa nilai Coriolis tidak dapat menjaga geostropiknya. Batasan ini mengakibatkan sirkulasi arus eddy di dekat ekuator tidak terdeteksi dengan sempurna.



Gambar 1. Hasil deteksi sirkulasi arus eddy menggunakan metode WA pada 24 Maret 1997: (a) AE dan (b) CE.

Daerah Distribusi Sirkulasi Arus Eddy

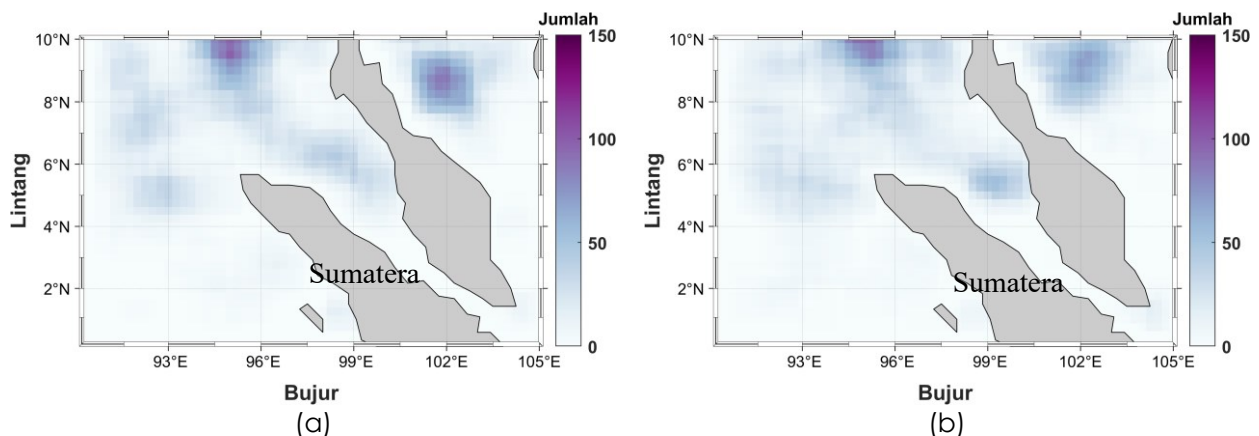
Gambar 2 menunjukkan distribusi dari daerah arus eddy, dihitung berdasarkan jumlah dari sirkulasi arus eddy yang terbentuk pada daerah tersebut selama 30 tahun dari data SLA yang digunakan. Data SLA memiliki periode 7 harian sehingga eddy yang memiliki umur kurang dari satu minggu tidak disertakan dalam analisis. Distribusi dari sirkulasi arus eddy pada daerah kajian secara umum memiliki persebaran yang sama antara AE (Gambar 2a) dan CE (Gambar 2b). Sirkulasi arus eddy pada bagian utara daerah kajian memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian selatan. Pembentukan CE memiliki frekuensi yang lebih besar dibandingkan dengan AE. Hal ini dapat dilihat dari daerah dengan frekuensi eddy yang lebih besar. Frekuensi terbanyak yang terjadi dalam satu grid (resolusi 0,25° x 0,25°) adalah 148 kejadian untuk AE dan 147 untuk CE.

Di perairan barat laut Indonesia, sirkulasi arus eddy terkonsentrasi pada bagian utara daerah kajian yaitu di utara 4°N. Angin musiman menjadi faktor penting dalam peningkatan aktivitas sirkulasi eddy di Teluk Bengal yang berbatasan dengan daerah utara penelitian (Wyrki, 1961). Penelitian oleh (Cheng *et al.*, 2018) menunjukkan bahwa sirkulasi arus eddy terbentuk di sekitar 10°N kemungkinan terbentuk akibat adanya angin ekuator. Beberapa eddy terdeteksi pada bagian utara Selat Malaka (4°N - 6°N dan 96°E - 102°E) kemungkinan disebabkan oleh interaksi daerah batas daratan. Daerah tersebut memiliki arus yang relatif kuat dan akibat adanya daerah batas daratan yang cukup luas menyebabkan adanya peningkatan aktivitas sirkulasi arus eddy.

Aktivitas eddy di pesisir barat Sumatera sangat rendah, namun terdeteksi beberapa daerah yang memiliki cukup banyak aktivitas eddy yaitu mendekati 50 kejadian dalam satu grid. Pada daerah ekuator, dideteksi eddy yang lebih sedikit dibandingkan dengan daerah utara penelitian. Adanya penurunan kecepatan geostropik pada daerah dekat ekuator mengakibatkan aktivitas sirkulasi arus eddy pada daerah tersebut tergolong rendah dibandingkan dengan bagian utara. Beberapa daerah di bagian dekat ekuator bahkan tidak memiliki sirkulasi arus eddy sama sekali (bernilai 0) selama waktu pengamatan.

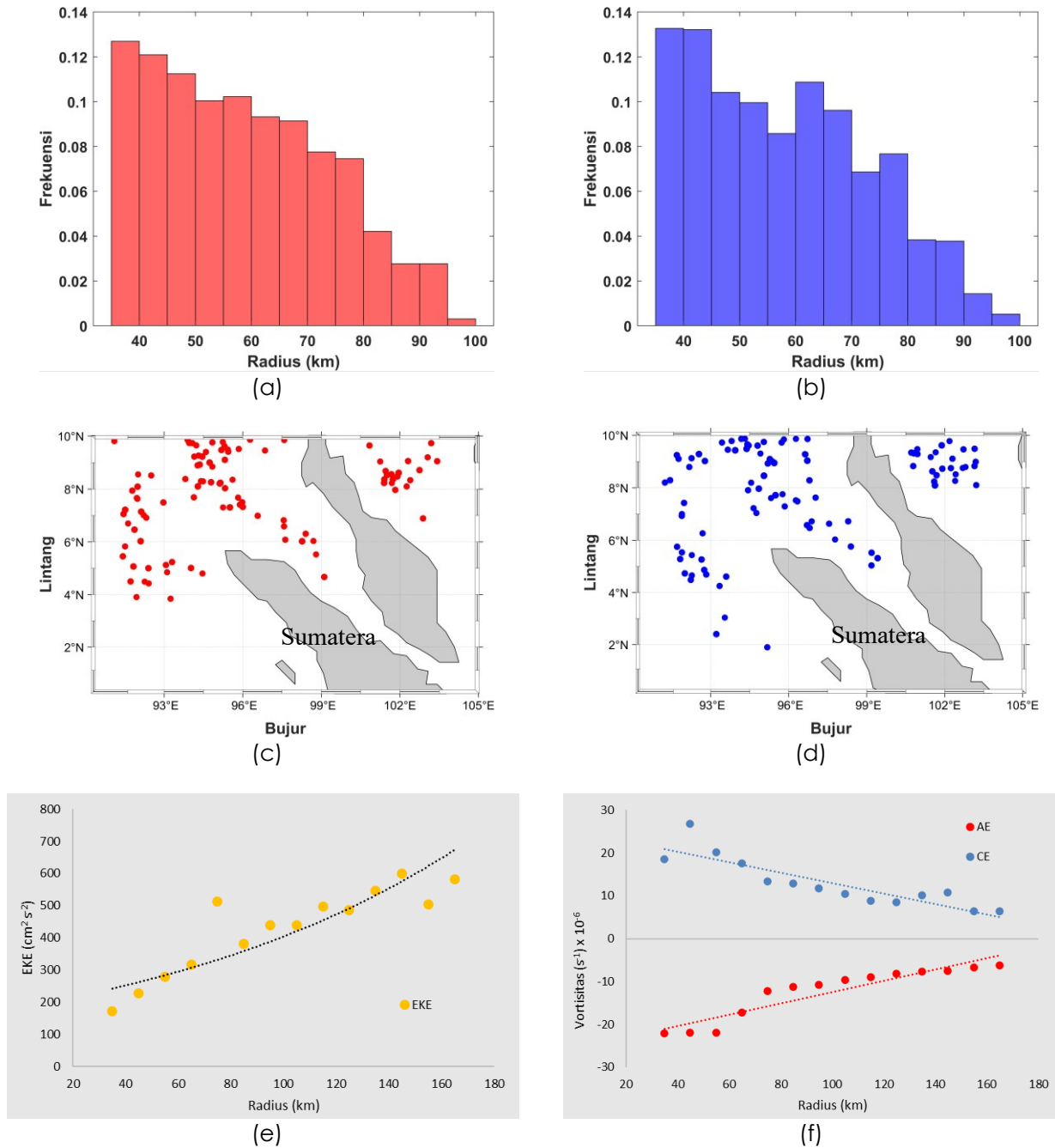
Radius Sirkulasi Arus Eddy

Data SLA yang didapatkan memiliki grid 1/4° sehingga, sirkulasi arus eddy dengan diameter di bawah 35 km mungkin tidak terdeteksi dengan baik (Chaigneau *et al.*, 2009; Zhan *et al.*, 2019). Oleh karena itu, sirkulasi arus eddy yang digunakan dalam analisis adalah yang memiliki radius lebih dari 35 km. Batasan ini mengakibatkan sirkulasi arus eddy yang terdeteksi berkurang sekitar 25% dari seluruh eddy yang terdeteksi. Namun, mayoritas dari sirkulasi arus eddy (1663 AE dan CE 1748 untuk eddy yang berumur lebih dari 2 minggu) masih dapat memberikan gambaran besar dari hasil penelitian mengenai sirkulasi arus eddy pada perairan barat laut Indonesia.



Gambar 2. Daerah distribusi sirkulasi arus eddy dari Januari 1993 sampai Desember 2022: (a) AE dan (b) CE.

Gambar 3a dan Gambar 3b menunjukkan probabilitas radius sirkulasi arus eddy. Sirkulasi arus eddy pada perairan barat laut Indonesia memiliki besar radius 35 – 170 km, dengan rata-rata sekitar 78 km. Tidak ada perbedaan yang signifikan dari distribusi radius AE dan CE. Sirkulasi arus eddy dengan radius 40 – 100 km terdeteksi lebih sering dibanding skala radius lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa daerah perairan barat laut Indonesia didominasi oleh sirkulasi arus eddy dengan skala sub-meso.



Gambar 3. Distribusi radius sirkulasi arus eddy: (a) probabilitas radius sirkulasi arus eddy antisiklon (AE); (b) probabilitas radius sirkulasi arus eddy siklon (CE); sebaran pusat (c) eddy antisiklon (AE) dan (d) eddy siklon (CE) dengan skala meso (120 - 170 km); (e) Distribusi rata-rata EKE terhadap radius; dan (f) distribusi rata-rata dari vortisitas relatif untuk AE (merah) dan CE (biru) terhadap radius.

Gambar 3c dan Gambar 3d menunjukkan daerah sebaran sirkulasi arus eddy dengan radius 120 – 170 km di perairan barat laut Indonesia. Visualisasi dilakukan untuk melihat daerah sebaran pusat eddy dengan radius skala meso (120 – 170 km). Pola sebaran AE dan CE dengan skala meso memiliki kecenderungan yang sama. Terlihat bahwa sirkulasi arus eddy dengan radius berskala meso banyak terdeteksi di bagian utara di antara $\sim 5^{\circ}\text{N}$ dan $\sim 9^{\circ}\text{N}$. Hal ini disebabkan karena daerah dekat ekuator memiliki nilai geostropik yang lebih kecil, sehingga sedikit terdapat sirkulasi arus eddy dengan radius yang besar. Daerah utara juga merupakan daerah yang dekat dengan perairan luas dan jauh dari daerah batas daratan. Hal ini menyebabkan sirkulasi arus eddy dapat terbentuk tanpa dipengaruhi oleh syarat batas daratan, sehingga memiliki radius yang lebih besar. Pada bagian Selat Malaka selatan ($2^{\circ}\text{N} - 4^{\circ}\text{N}$ dan $99^{\circ}\text{E} - 105^{\circ}\text{E}$), tidak terdapat sirkulasi arus eddy skala meso. Lebar perairan yang tidak mencapai 120 km menjadi penyebab utama tidak terdapatnya sirkulasi arus eddy dengan radius lebih dari 120 km di daerah tersebut.

Gambar 3e menunjukkan bahwa sirkulasi arus eddy memiliki EKE yang semakin besar sebanding dengan perubahan radius yang semakin besar. Radius eddy dengan nilai ~ 80 km berada jauh dari garis linear karena beberapa eddy terdeteksi di daerah Selat Malaka dengan nilai arus yang tinggi. Dengan melihat Gambar 3f dapat juga diketahui bahwa nilai vortisitas relatif untuk AE dan CE berkurang saat radius bertambah. Hal ini membuktikan bahwa sirkulasi arus eddy dengan radius yang kecil akan memiliki EKE yang rendah namun, memiliki rotasi yang tinggi (Chaigneau *et al.*, 2009). Sirkulasi arus eddy yang lebih besar cenderung memiliki energi yang lebih besar. Hal ini terlihat dari nilai EKE yang lebih besar, namun memiliki rotasi yang lebih lemah.

Frekuensi Sirkulasi Arus Eddy

Gambar 4a menunjukkan distribusi frekuensi sirkulasi arus eddy antisiklon dan siklon di perairan barat laut Indonesia. Daerah distribusi dari frekuensi eddy dihitung dengan cara penjumlahan frekuensi total ($EF = F_{AE} + F_{CE}$) yang merepresentasikan setiap grid daerah yang memiliki sirkulasi arus eddy. Daerah dengan warna yang lebih biru menunjukkan daerah dengan frekuensi eddy yang lebih besar. Nilai frekuensi total terbesar yang terdapat dalam satu grid adalah 191 kejadian. Sirkulasi arus eddy banyak terdapat di bagian utara daerah penelitian pada bagian utara 4°N . Pada bagian selatan, warna biru menjadi warna yang dominan. Hal ini menunjukkan bahwa daerah tersebut terdapat sedikit sirkulasi arus eddy. Sebaran frekuensi sirkulasi arus eddy memiliki perbedaan jika melihat dengan sebaran nilai EKE pada Gambar 4b. Nilai EKE menunjukkan nilai yang sangat tinggi di antara $2^{\circ}\text{N} - 6^{\circ}\text{N}$. Besarnya nilai EKE, tetapi kecilnya frekuensi sirkulasi arus eddy yang terdeteksi pada daerah Selat Malaka menunjukkan bahwa nilai EKE tersebut didapat dari arus lokal yang kuat terdapat pada celah sempit di daerah Selat Malaka (Haditjar *et al.*, 2020; Wibowo *et al.*, 2022). Daerah yang terdapat banyak sirkulasi arus eddy pada bagian utara daerah penelitian ($5^{\circ}\text{N} - 10^{\circ}\text{N}$) memiliki rentang nilai EKE yang lebih kecil, yaitu mendekati 0 hingga $600 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ yang ditunjukkan dengan wilayah berwarna biru pada Gambar 4b.

Gambar 4c menunjukkan distribusi dari polaritas eddy di perairan barat Indonesia selama 30 tahun pengamatan. Polaritas eddy merupakan probabilitas suatu titik dalam sirkulasi arus eddy berputar secara siklon ataupun antisiklon yang dihitung menggunakan persamaan $(F_{AE} - F_{CE}) / (F_{AE} + F_{CE})$ dengan F adalah frekuensi eddy. Jenis eddy dengan polaritas positif adalah AE sedangkan polaritas negatif merupakan CE. Secara keseluruhan, distribusi polaritas eddy pada daerah perairan barat laut Indonesia didominasi oleh CE. Namun, pada beberapa titik ditemukan adanya nilai polaritas AE yang kuat, khususnya pada bagian $0^{\circ}\text{N} - 4^{\circ}\text{N}$. Meskipun nilai frekuensi pada daerah tersebut sangat kecil, nilai polaritas eddy menunjukkan angka $\sim 60\%$ yang menandakan bahwa daerah tersebut merupakan daerah yang dominan dengan AE.

Umur Sirkulasi Arus Eddy

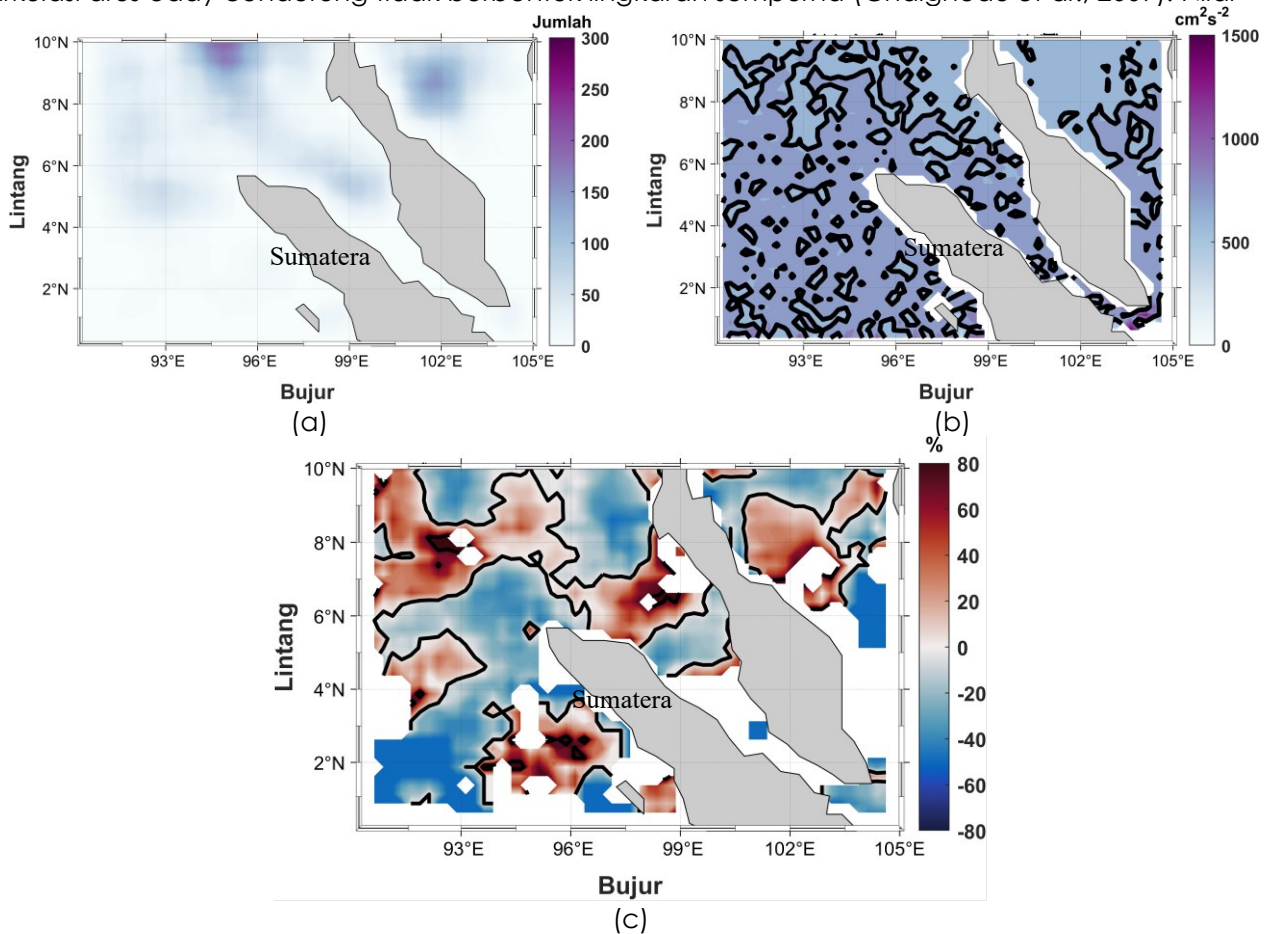
Distribusi umur dari sirkulasi arus eddy pada perairan barat laut Indonesia ditunjukkan oleh Gambar 4a dan 4b. Rata-rata umur sirkulasi arus eddy antisiklon adalah 32 hari (~ 4 minggu) dan

eddy siklon adalah 33 hari (~4 minggu). Tidak didapatkan perbedaan signifikan dalam distribusi umur sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia. Gambar 5 menunjukkan bahwa umur dari sirkulasi arus eddy dengan umur pendek, berkurang secara drastis. Secara keseluruhan, sirkulasi arus eddy dengan umur di bawah 10 minggu berkontribusi dalam 96% dari total sirkulasi arus eddy. Nilai ini membuktikan bahwa sirkulasi arus eddy dengan umur yang panjang sangat jarang ditemukan di perairan barat laut Indonesia.

Sebaran umur sirkulasi arus eddy pada perairan barat laut Indonesia ditunjukkan oleh Gambar 5c dan 5d. Sirkulasi arus eddy dengan umur lebih dari 10 minggu tidak ditemukan di daerah dekat ekuator. Hal ini menunjukkan bahwa daerah pembentukan sirkulasi arus eddy berpengaruh terhadap umur eddy tersebut. Hal serupa juga terjadi di perairan sekitar Selat Malaka. Umur sirkulasi arus eddy di daerah tersebut cenderung rendah. Hal ini disebabkan karena adanya batas daratan yang berpengaruh pada pusaran dari arus eddy tersebut. Di perairan barat laut Indonesia, bagian utara daerah penelitian (4°N - 10°N) memiliki umur eddy yang lebih panjang untuk eddy siklon maupun antisiklon. Bagian utara di perairan barat laut Indonesia terhubung langsung dengan perairan lepas, jauh dari daratan, dan jauh dari ekuator sehingga cenderung memiliki umur sirkulasi arus eddy yang relatif lebih lama.

Parameter Kinematis Sirkulasi Arus Eddy

Tabel 1 menunjukkan parameter kinematis dari sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia. Secara garis besar, nilai vortisitas AE dan CE memiliki nilai rata-rata yang mirip yaitu $\sim 10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Nilai total deformasi dari AE dan CE memiliki nilai $\sim 3,8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ yang menandakan bahwa sirkulasi arus eddy cenderung tidak berbentuk lingkaran sempurna (Chaigneau *et al.*, 2009). Nilai



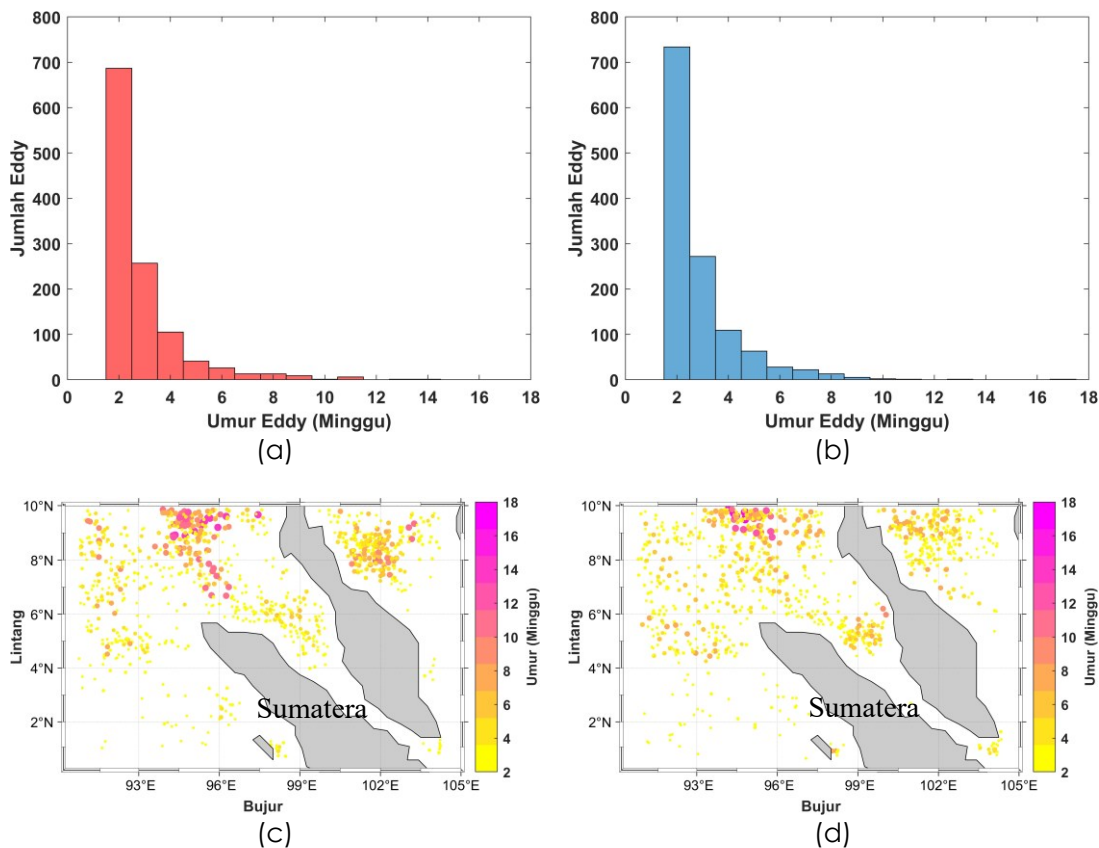
Gambar 4. Distribusi dari sifat rata-rata eddy: (a) frekuensi total eddy; (b) EKE, garis hitam merupakan kontur bernilai 700 cm^2s^{-2} ; (c) polaritas eddy, garis hitam merupakan kontur bernilai nol.

deformasi untuk *shear* dan *stretch* dapat menggambarkan bentuk dari lingkaran eddy di perairan barat laut Indonesia. Pada AE, nilai *shear* negatif dan *stretch* positif yang menunjukkan bahwa eddy cenderung mengalami kompresi di timur laut-barat daya dan di selatan-utara serta mengalami ekstensi di barat laut-tenggara dan di barat-timur. Nilai *shear* positif dan *stretch* negatif pada CE menunjukkan bahwa eddy cenderung mengalami kompresi di bagian barat laut-tenggara dan barat-timur dan mengalami ekstensi di timur laut-barat daya dan selatan-utara (Shee *et al.*, 2024). Nilai divergensi yang mendekati nol untuk AE dan CE menunjukkan bahwa sirkulasi arus eddy cenderung stabil dan hampir tidak ada air yang keluar masuk pusaran (Zhan *et al.*, 2019).

Variabilitas Musiman

Untuk melihat variabilitas musiman dari sirkulasi arus eddy, dilakukan visualisasi bulanan dari beberapa parameter eddy. Nilai EKE tidak dimasukkan dalam analisis variabilitas musiman karena di perairan barat laut Indonesia, nilai EKE yang tinggi banyak ditemukan di Selat Malaka bukan akibat dari sirkulasi arus eddy melainkan arus lokal akibat celah yang sempit di daerah tersebut.

Pada Gambar 6a, menunjukkan jumlah titik pusat eddy yang terdeteksi di perairan barat laut Indonesia setiap bulannya. Jumlah kejadian CE secara total, memiliki jumlah yang hampir sebanding dan hanya 15% lebih banyak daripada AE. Ternyata jika dilihat frekuensi bulannya CE memiliki waktu kejadian puncak yang lebih lama ketimbang AE. Jumlah titik pusat eddy AE dan CE berbeda pada musim tertentu. Saat JJA (muson timur), nilai AE memiliki nilai yang lebih besar sedangkan pada DJF (muson barat) nilai CE memiliki nilai yang lebih besar. Jumlah titik pusat eddy yang berbanding terbalik antara jumlah AE dan CE pada setiap musimnya menunjukkan bahwa sirkulasi



Gambar 5. Distribusi umur sirkulasi arus eddy: (a) AE dan (b) CE. Sebaran umur sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia: (c) AE dan (d) CE.

Tabel 1. Parameter kinematis Eddy

Eddy Antisiklon ($\times 10^{-6} s^{-1}$)				
Parameter Eddy	Rata-rata	Standar deviasi	Minimum	Maksimum
<i>Vorticity</i>	-8,10	16,58	-459,35	111,06
<i>Shearing deformation</i>	-0,82	12,15	-312,84	122,13
<i>Stretching deformation</i>	0,12	6,53	-59,70	146,81
<i>Total deformation</i>	4,08	12,99	0,03	345,58
<i>Divergence</i>	-0,07	1,23	-41,22	4,89
Eddy Siklon ($\times 10^{-6} s^{-1}$)				
Parameter Eddy	Rata-rata	Standard deviasi	Minimum	Maksimum
<i>Vorticity</i>	9,71	25,29	-48,62	498,65
<i>Shearing deformation</i>	-0,13	11,13	-199,13	211,94
<i>Stretching deformation</i>	-0,42	10,06	-221,54	115,39
<i>Total deformation</i>	4,55	14,25	0,08	291,74
<i>Divergence</i>	0,08	1,23	-12,75	26,65

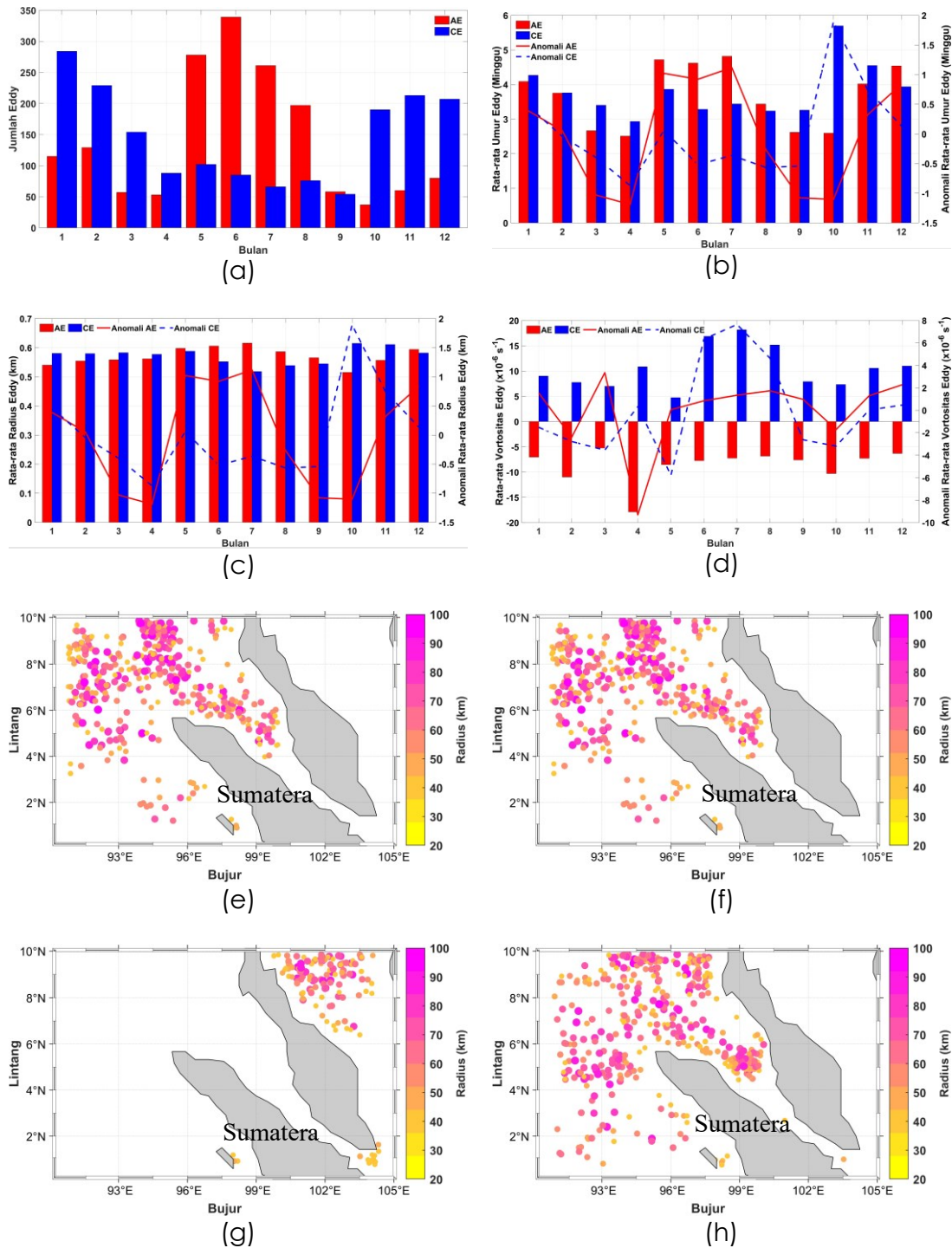
arus eddy di perairan barat laut Indonesia sangat dipengaruhi oleh musim. Rata-rata umur eddy yang terdeteksi ditunjukkan oleh Gambar 6b. Rata-rata umur eddy yang terdeteksi juga menunjukkan pola musiman yang sesuai dengan jumlah pusat eddy yang terdeteksi. Pengaruh musim menyebabkan adanya pergantian yang seimbang antara sirkulasi arus eddy siklon dan antisiklon berumur panjang. Hal ini terlihat jelas dari garis anomali yang memiliki nilai berbanding terbalik antara AE dan CE pada musim JJA maupun DJF. Namun, pengaruh umur yang memiliki anomali tinggi terjadi pada saat eddy tersebut (baik AE maupun CE) berada pada musim puncak kejadiannya. Pada saat puncak eddy, umur eddy menjadi lebih panjang 1-2 minggu dari nilai umur rata-rata tahunannya. Umur puncak yang sama antara CE dan AE menunjukkan bahwa keduanya mungkin disebabkan karena pengaruh gaya utama yang sama, yaitu pola musiman angin.

Gambar 6c menunjukkan rata-rata radius eddy bulanan yang terdeteksi di perairan barat laut Indonesia. Nilai rata-rata radius eddy cenderung stabil sepanjang tahun untuk AE dan CE. Keduanya memiliki nilai yang mirip dan tidak ditemukan adanya perbedaan radius yang signifikan yaitu berada di rentang 70 – 80 km. Hal ini menunjukkan bahwa sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia didominasi oleh eddy dengan skala sub-meso. Gambar 6d menunjukkan rata-rata vortisitas bulanan di perairan barat laut Indonesia. Nilai rata-rata vortisitas CE di bulan JJA lebih tinggi dibandingkan dengan AE dan terus menurun hingga bulan DJF saat nilai vortisitas AE yang terus mengalami peningkatan. Hal ini ditunjukkan juga oleh garis anomali vortisitas untuk AE dan CE. Garis anomali terlihat memuncak untuk CE di JJA dan pada NDJ untuk AE. Akan tetapi hal yang menarik adalah bahwa ketika vortisitas CE pada JJA yang tinggi, CE memiliki umur dan frekuensi eddy yang tinggi sedangkan radiusnya kecil. Dengan vortisitas yang tinggi dan umur yang lama, sangat mungkin CE ini mengangkat lapisan termoklin yang turut meningkatkan produktivitas perairan. Dugaan ini perlu dipelajari lebih lanjut dan tidak menjadi bahasan dalam kegiatan penelitian ini.

Umur dari sirkulasi arus eddy memiliki hubungan dengan radius. Ketika radius eddy lebih besar, eddy cenderung memiliki umur yang lebih panjang namun dengan nilai vortisitas yang lebih kecil. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 6b dan Gambar 6d saat DJF, rata-rata umur CE lebih tinggi dan vortisitas yang rendah. Sedangkan pada saat JJA, rata-rata umur AE lebih tinggi dan vortisitas yang rendah.

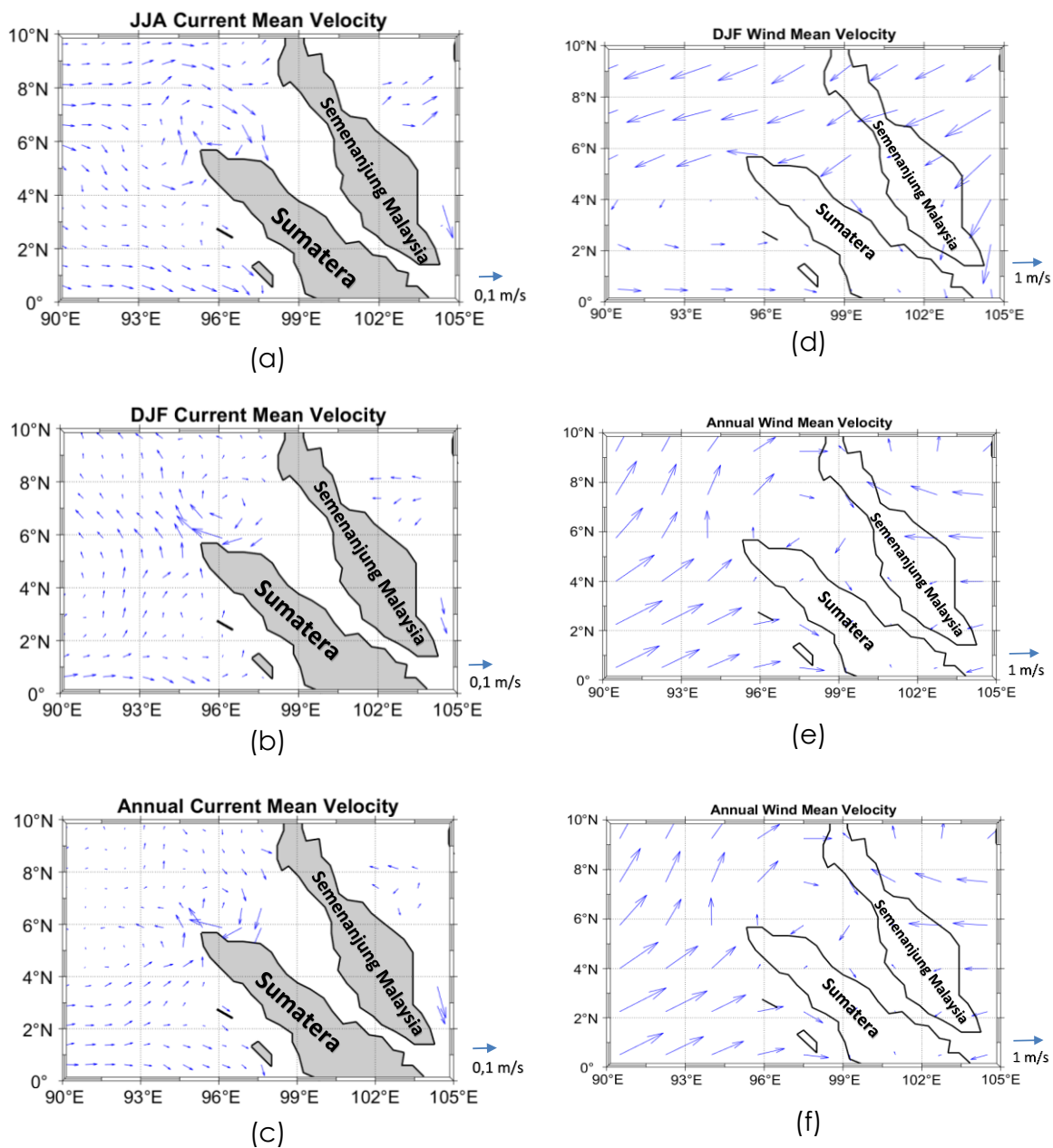
Untuk melihat pola sebaran sirkulasi arus eddy dengan radius 35 – 100 km pada DJF dan JJA, dilakukan visualisasi pada Gambar 6e hingga 6g. Pola sebaran sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia sangat mengikuti pola musiman. Gambar 6e menunjukkan bahwa pola sebaran AE saat JJA banyak terapat di perairan barat Sumatera. Pada Gambar 6h menunjukkan bahwa hal serupa terjadi pada CE saat DJF. Keduanya membuktikan bahwa pola sirkulasi arus eddy yang

terbentuk di perairan barat laut Indonesia memiliki pola sebaran musiman. Pola sebaran AE saat DJF (saat AE berfrekuensi kejadian rendah) dapat dilihat pada Gambar 6f. Terlihat bahwa sebaran kejadiannya banyak terfokus pada daerah timur Malaysia dan bagian utara daerah penelitian.



Gambar 6. Variabilitas musiman dari parameter eddy: (a) jumlah pusat eddy yang terdeteksi dari tahun 1995 – 2015; (b) rata-rata umur eddy per bulan; (c) rata-rata radius eddy; (d) rata-rata vortisitas eddy. Sebaran pusat eddy dengan radius 40 – 100 km pada musim: (e) AE saat JJA; (f) AE saat DJF; (g) CE saat JJA; (h) CE saat DJF.

Bagian utara daerah penelitian berbatasan langsung dengan Teluk Bengal. Pada bulan Januari dan Februari, arus ekuator utara/north equatorial current (NEC) memiliki intensitas yang kuat di dan bergerak menuju Teluk Bengal melewati perairan barat Indonesia sehingga eddy antisiklon banyak terbentuk (Haditiar *et al.*, 2020). Perubahan sebaran CE terlihat pada musim JJA, dimana CE memiliki frekuensi kejadian yang rendah dengan lokasi kejadian yang tidak sama dengan AE disaat musim berfrekuensi rendah. CE pada saat JJA menempati lintang yang tidak sama dengan AE pada saat sama-sama dimusim lemahnya (Gambar 6g). Saat JJA untuk CE dimana sebaran eddy terlihat terkonsentrasi pada lintang lebih rendah. Diduga hal tersebut disebabkan oleh SMC yang bergerak dari barat laut daerah penelitian atau Teluk Bengal dan menuju ke selatan Indonesia menyebabkan pusat eddy bergeser dan cenderung terbentuk di lintang yang lebih rendah.



Gambar 7. Visualisasi rata – rata arus permukaan dari Mercator di perairan barat laut Indonesia saat: (a) JJA; (b) DJF; (c) tahunan. Distribusi spasial kecepatan angin (u_{10} dan v_{10}) rata-rata saat: (d) JJA; (e) DJF; (f) tahunan.

Pola sirkulasi arus permukaan untuk setiap periode waktu JJA dan DJF ditunjukkan oleh Gambar 7. Pada periode JJA (Gambar 7a), pola arus menunjukkan adanya pergerakan menuju arah selatan dari barat laut daerah penelitian. Hal ini membuktikan bahwa sirkulasi arus eddy yang terbentuk pada periode JJA juga dipengaruhi oleh pola arus regional tersebut dimana nilai CE pada saat JJA cenderung terbentuk di bagian selatan ($4^{\circ}\text{N} - 6^{\circ}\text{N}$) daerah penelitian. Nilai ini juga didukung oleh kecepatan angin yang terekam pada periode JJA (Gambar 7b). Nilai angin bergerak ke arah timur laut daerah penelitian dan akibat adanya gaya Coriolis menghasilkan nilai kecepatan permukaan yang menuju ke arah selatan dan tenggara di daerah penelitian. Sebaliknya pada saat DJF (Gambar 7c), pola arus menunjukkan pergerakan ke arah utara daerah penelitian. Hal ini membuktikan bahwa terdapat pengaruh arus yang berpengaruh terhadap pembentukan sirkulasi arus eddy yang cenderung ke utara pada DJF. Nilai ini juga didukung oleh kecepatan angin yang terekam pada periode DJF (Gambar 7d). Nilai angin bergerak ke arah barat daerah penelitian, akibat adanya gaya Coriolis akan menghasilkan nilai kecepatan arus yang menuju utara daerah penelitian.

Pola arus rata – rata tahunan di perairan barat laut Indonesia ditunjukkan oleh Gambar 7c. Pola arus tersebut menunjukkan bahwa di bagian dekat ekuator memiliki resultan rata – rata yang dominan ke timur pada bagian selatan ($0^{\circ}\text{N} - 4^{\circ}\text{N}$). Nilai ini sesuai dengan beberapa penelitian yang menyatakan adanya arus yang selalu bergerak ke arah timur di bagian ekuator di setiap musim (Phillips *et al.*, 2021). Pola arus rata - rata di bagian utara daerah penelitian ($4^{\circ}\text{N} - 10^{\circ}\text{N}$) memiliki nilai yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tersebut berubah-ubah arahnya pada setiap musim sehingga memiliki rata – rata tahunan yang relatif lebih kecil. Pola angin rata – rata tahunan ditunjukkan oleh Gambar 7f. Pola angin di perairan barat laut Indonesia menunjukkan bahwa daerah tersebut didominasi oleh angin ke arah utara dan menunjukkan pola yang mirip seperti pada bulan JJA. Resultan angin rata – rata tahunan di lintang rendah ($0^{\circ}\text{N} - 4^{\circ}\text{N}$) memiliki arah yang cenderung ke timur menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki arah angin yang juga cenderung ke arah timur pada musim-musim transisi.

Secara umum dapat disimpulkan bahwa musim sangat berpengaruh terhadap pola sebaran sirkulasi arus eddy di perairan barat laut Indonesia. Namun, secara khusus pada musim dimana eddy tersebut lemah terlihat distribusi lintang dimana eddy tersebut terbentuk. Dari data vortisitas didapat juga pada saat jumlah eddy ini minimum, vortisitas eddy tersebut bernilai cukup tinggi.

KESIMPULAN

Deteksi sirkulasi arus eddy menggunakan metode WA dengan menggunakan data SLA tahun 1993 – 2022. Selama tahun 1993 – 2022 di perairan barat laut Indonesia, terdeteksi 1663 AE dan 1748 CE. Pola musiman antara AE dan CE silih berganti dengan periode CE yang lebih panjang dari pada periode AE. Radius sirkulasi arus eddy yang terdeteksi pada perairan barat laut Indonesia berada pada rentang 35 – 170 km dengan rata-rata 78 km. Perairan barat laut Indonesia didominasi oleh eddy dengan skala sub-meso (40 – 100 km) dan eddy berskala meso banyak terdeteksi di bagian utara perairan barat laut Indonesia. Secara umum, radius eddy bertambah sebanding dengan pertambahan EKE. Sebaliknya, vortisitas rata – rata eddy berkurang saat radius eddy bertambah. Sirkulasi arus eddy banyak ditemukan di bagian utara perairan barat laut Indonesia dan semakin jarang ditemukan ketika mendekati ekuator. Beberapa eddy juga ditemukan di perairan Selat Malaka bagian utara. Peta polaritas eddy menunjukkan bahwa CE terdeteksi lebih banyak dan merata sedangkan AE hanya terkonsentrasi pada beberapa titik. Nilai EKE tidak sebanding dengan daerah sebaran frekuensi eddy kemungkinan akibat lebih dominannya kecepatan arus lokal dibanding kecepatan arus akibat eddy. Sirkulasi arus eddy yang terdeteksi mempunyai pola musiman. AE pada JJA (muson timur) dan CE pada DJF (muson barat) dan hadir dalam jumlah yang signifikan pada periode awal (November) dan akhir musim barat (Maret). Umur eddy yang lebih panjang juga sebanding dengan peningkatan jumlah eddy yang terdeteksi baik AE maupun CE. Pada musim dimana AE dan CE lemah, terlihat bahwa distribusi kejadiannya berbeda dimana CE terkonsentrasi di lintang yang lebih rendah daripada AE.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemendikbudristek) melalui program penelitian Fundamental Reguler 2023, dengan Kontrak Hibah Penelitian (RGC) Nomor: 110/E5/PG.02.00.PL/2023;274/IT1.B07.1/SPP-LPPM/VI/2023. Selain itu, dukungan lainnya melalui pendanaan dari MTCRC Joint Research Project 2023 dan P3MI tahun 2019. Kami berterima kasih kepada Dr. Peng Zhan, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China atas kontribusi kode sumber deteksi eddy. Serta, terima kasih atas dukungan Kemendikbudristek, LPPM-Institut Teknologi Bandung (ITB), dan MTCRC-Oceanografi ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, D., Spicer Bak, A., Brodie, K.L., Cohn, N., Holman, R.A., & Stanley, J. (2021). Quantifying optically derived two-dimensional wave-averaged currents in the surf zone. *Remote Sensing*, 13(4), 690. doi: 10.3390/RS13040690
- Arbic, B. K., Elipot, S., Brasch, J. M., Menemenlis, D., Ponte, A. L., Shriver, J. F., Yu, X., Zaron, E. D., Alford, M. H., Buijsman, M. C., Abernathey, R., Garcia, D., Guan, L., Martin, P. E., & Nelson, A. D. (2022). Near-Surface Oceanic Kinetic Energy Distributions From Drifter Observations and Numerical Models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(10), e2022JC018551. doi: 10.1029/2022JC018551
- Arruda, W. Z., & Nof, D. (2003). The Mindanao and Halmahera Eddies—Twin Eddies Induced by Nonlinearities. *Journal of Physical Oceanography*, 33(12), 2815–2830. doi: 10.1175/1520-0485(2003)033
- Asfahani, K., Krokos, G., Papadopoulos, V.P., Jones, B.H., Sofianos, S., Kheireddine, M., & Hoteit, I. (2020). Capturing a Mode of Intermediate Water Formation in the Red Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2019JC015803. doi: 10.1029/2019JC015803
- Bôas, A.B.V., Arduin, F., Ayeş, A., Bourassa, M.A., Brandt, P., Chapron, B., Cornuelle, B.D., Farrar, J.T., Fewings, M.R., Fox-Kemper, B., Gille, S.T., Gommenginger, C., Heimbach, P., Hell, M.C., Li, Q., Mazloff, M.R., Merrifield, S.T., Mouche, A., Rio, M.H., ... Seville, E.V. (2019). Integrated Observations of Global Surface Winds, Currents, and Waves: Requirements and Challenges for the Next Decade. *Frontiers In Marine Science*, 6(425), 434339. doi: 10.3389/FMARS.2019.00425
- Cabrera, M., Santini, M., Lima, L., Carvalho, J., Rosa, E., Rodrigues, C., & Pezzi, L. (2022). The southwestern Atlantic Ocean mesoscale eddies: A review of their role in the air-sea interaction processes. *Journal of Marine Systems*, 235, 103785. doi: 10.1016/J.JMARSYS.2022.103785
- Chaigneau, A., Eldin, G., & Dewitte, B. (2009). Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007). *Progress in Oceanography*, 83(1–4), 117–123. doi: 10.1016/J.POCEAN.2009.07.012
- Chaigneau, A., Gizolme, A., & Grados, C. (2008). Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography*, 79(2–4), 106–119. doi: 10.1016/j.pocean.2008.10.013
- Chen, W., Graf, H.F., & Takahashi, M. (2002). Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter. *Geophysical Research Letters*, 29(22), 30–31. doi: 10.1029/2002GL016062
- Cheng, X., McCreary, J.P., Qiu, B., Qi, Y., Du, Y., & Chen, X. (2018). Dynamics of Eddy Generation in the Central Bay of Bengal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9), 6861–6875. doi: 10.1029/2018JC014100
- Fischer, M. D., & Uenzelmann-Neben, G. (2018). Neogene Modifications of Circulation in the Northeastern African-Southern Ocean Gateway. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(12), 4673–4693. doi: 10.1029/2018GC007644
- Haditjar, Y., Putri, M. R., Ismail, N., Muchlisin, Z. A., Ikhwan, M., & Rizal, S. (2020). Numerical study of tides in the Malacca Strait with a 3-D model. *Heliyon*, 6(9), e04828. doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E04828
- Hao, Z., Xu, Z., Feng, M., Li, Q., & Yin, B. (2021). Spatiotemporal Variability of Mesoscale Eddies in the Indonesian Seas. *Remote Sensing 2021*, Vol. 13, Page 1017, 13(5), 1017. doi: 10.3390/RS13051017

- Hatayama, T., Awaji, T., & Akitomo, K. (1996). Tidal currents in the Indonesian Seas and their effect on transport and mixing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5), 12353–12373. doi: 10.1029/96JC00036
- Heiles, B., Chavignon, A., Hingot, V., Lopez, P., Teston, E., & Couture, O. (2022). Performance benchmarking of microbubble-localization algorithms for ultrasound localization microscopy. *Nature Biomedical Engineering* 2021 6:5, 6(5), 605–616. doi: 10.1038/s41551-021-00824-8
- Kartadikaria, A.R., Miyazawa, Y., Nadaoka, K., & Watanabe, A. (2012). Existence of eddies at crossroad of the Indonesian seas. *Ocean Dynamics*, 62(1), 31–44. doi: 10.1007/S10236-011-0489-1/FIGURES/13
- Liu, F., Zhou, H., & Wen, B. (2020). DEDNet: Offshore Eddy Detection and Location with HF Radar by Deep Learning. *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 126, 21(1), 126. doi: 10.3390/S21010126
- Makarim, S., Sprintall, J., Liu, Z., Yu, W., Santoso, A., Yan, X. H., & Susanto, R.D. (2019). Previously unidentified Indonesian Throughflow pathways and freshening in the Indian Ocean during recent decades. *Scientific Reports* 2019 9:1, 9(1), 1–13. doi: 10.1038/s41598-019-43841-z
- Pargaonkar, S.M., & Vinayachandran, P.N. (2022). The Irrawaddy River Jet in the Andaman Sea During the Summer Monsoon. *Frontiers in Marine Science*, 9, 849179. doi: 10.3389/FMARS.2022.849179/BIBTEX
- Phillips, H.E., Tandon, A., Furue, R., Hood, R., Ummenhofer, C.C., Benthuyssen, J.A., Menezes, V., Hu, S., Webber, B., Sanchez-Franks, A., Cherian, D., Shroyer, E., Feng, M., Wijesekera, H., Chatterjee, A., Yu, L., Hermes, J., Murtugudde, R., Tozuka, T., ... Wiggert, J. (2021). Progress in understanding of Indian Ocean circulation, variability, air-sea exchange, and impacts on biogeochemistry. *Ocean Science*, 17(6), 1677–1751. doi: 10.5194/OS-17-1677-2021
- Purba, N.P., Pranowo, W.S., Ndah, A.B., & Nanlohy, P. (2021). Seasonal variability of temperature, salinity, and surface currents at 0° latitude section of Indonesia seas. *Regional Studies in Marine Science*, 44, 101772. doi: 10.1016/J.RSMA.2021.101772
- Santana, R., Costa, F.B., Mignac, D., Santana, A.N., Vidal, V.F. da S., Zhu, J., & Tanajura, C.A.S. (2020). Model sensitivity experiments on data assimilation, downscaling and tides for the representation of the Cape São Tomé Eddies. *Ocean Dynamics*, 70(1), 77–94. doi: 10.1007/S10236-019-01307-W/FIGURES/14
- Shee, A., Sil, S., & Deogharia, R. (2024). Three-dimensional characteristics of mesoscale eddies in the western boundary current region of the Bay of Bengal using ROMS-NPZD. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 105, 101424. doi: 10.1016/J.DYNATMOCE.2023.101424
- Simanungkalit, Y.A., Pranowo, W.S., Purba, N.P., Riyantini, I., & Nurrahman, Y. (2018). Influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomena on Eddies Variability in the Western Pacific Ocean. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 176(1), 012002. doi: 10.1088/1755-1315/176/1/012002
- Sun, B., Liu, C., & Wang, F. (2019). Global meridional eddy heat transport inferred from Argo and altimetry observations. *Scientific Reports* 2019 9:1, 9(1), 1–10. doi: 10.1038/s41598-018-38069-2
- Takahashi, T. (1959). Micro-meteorological Observations and Studies over the Sea. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 37(6), 281–283. doi: 10.2151/JMSJ1923.37.6_281
- Tangke, U., Katiandagho, B., & Rochmady Rochmady (2020). Nutritional Adequacy Rate (RDA) and Nutritional Value Information (ING) of Tuna Kering Kayu Fish Canned with Tuna Fish Bone Flour Substitution. *Agrikan: Jurnal Agribisnis Perikanan*, 13(2), 352–357. doi: 10.29239/J.AGRIKAN.13.2.352-357
- Vinayachandran, P. N. M., Masumoto, Y., Roberts, M. J., Huggett, J. A., Halo, I., Chatterjee, A., Amol, P., Gupta, G. V. M., Singh, A., Mukherjee, A., Prakash, S., Beckley, L. E., Raes, E. J., & Hood, R. (2021). Reviews and syntheses: Physical and biogeochemical processes associated with upwelling in the Indian Ocean. *Biogeosciences*, 18(22), 5967–6029. doi: 10.5194/BG-18-5967-2021
- Wibowo, M.A., Tanjung, A., Rifardi, Elizal, Mubarak, Yoswaty, D., Susanti, R., Muttaqin, A.S., Fajary, F.R., & Anwika, Y.M. (2022). Understanding the Mechanism of Currents through the Malacca Strait Study Case 2020 – 2022 : Mean state, Seasonal and Monthly Variation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1118(1), 012069. doi: 10.1088/1755-1315/1118/1/012069

- Wyrski, K. (1961). Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report Volume 2. Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961. *Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961*, 2(Naga Report), 195.
- Yamanaka, M.D. (2016). Physical climatology of Indonesian maritime continent: An outline to comprehend observational studies. *Atmospheric Research*, 178–179, 231–259. doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2016.03.017
- Yu, F., Wang, M., Qian, S., & Chen, G. (2022). Multisatellite observations of smaller mesoscale eddy generation in the Kuroshio Extension. *Acta Oceanologica Sinica*, 41(9), 137–148. doi: 10.1007/S13131-022-1996-2/METRICS
- Yuan, D., Song, X., Yang, Y., & Dewar, W.K. (2019). Dynamics of Mesoscale Eddies Interacting With a Western Boundary Current Flowing by a Gap. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6), 4117–4132. doi: 10.1029/2019JC014949
- Zhan, P., Krokos, G., Guo, D., & Hoteit, I. (2019). Three-Dimensional Signature of the Red Sea Eddies and Eddy-Induced Transport. *Geophysical Research Letters*, 46(4), 2167–2177. doi: 10.1029/2018GL081387
- Zhan, P., Subramanian, A.C., Yao, F., & Hoteit, I. (2014). Eddies in the Red Sea: A statistical and dynamical study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(6), 3909–3925. doi: 10.1002/2013JC009563