

Karakteristik dan Variasi Musiman Eddy di Perairan Pasifik Bagian Barat Laut

M. Apdillah Akbar^{1,2*}, Ivonne Milichristi Radjawane^{1,3,4}, Susanna Nurdjaman^{1,4,5},
Gandhi Napitupulu^{3,5}, Rahaden Bagas Hatmaja⁶

¹Program Studi Ilmu Kebumihan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Kota Bandung, Jawa Barat, 40132 Indonesia

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta Pusat, 10610, Indonesia

³Kelompok Keahlian Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan,
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Kota Bandung, Jawa Barat, 40132 Indonesia

⁴Pusat Penelitian Kerjasama Teknologi Kelautan Korea-Indonesia, Institut Teknologi Bandung
Jl. Kebonturi Arjawinangun, Kab. Cirebon, Jawa Barat, 45162 Indonesia

⁵Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Kebonturi Arjawinangun, Kab. Cirebon, Jawa Barat, 45162 Indonesia

⁶Pusat Penelitian Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Jl. Dr. Djunjunan No.133, Pajajaran, Kec. Cicendo, Kota Bandung, Jawa Barat 40173, Indonesia
Email: apdillah.akbar@bmkgo.id

Abstrak

Samudra Pasifik barat laut merupakan wilayah yang penting secara geografis dan ekologis, Samudra ini dilalui *North Equatorial Current (NEC)*, *South Equatorial Current (SEC)*, dan *North Equatorial Counter Current (NECC)*, pertemuan arus-arus tersebut dapat mengakibatkan terbentuknya eddy. Eddy merupakan pola sirkulasi air berputar yang memainkan peran penting dalam transpor massa, energi, dan nutrisi di lautan. Eddy di belahan bumi utara (BBU) yang bergerak berlawanan jarum jam disebut siklonik eddy (CE) dan yang bergerak searah jarum jam disebut antisiklonik eddy (AE). Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi karakteristik dan variasi musiman eddy di perairan Pasifik barat laut. Data harian anomali muka laut dan kecepatan geostropik dari satelit altimetri selama periode tahun 2003 hingga 2022 dianalisis untuk mengidentifikasi eddy berdasarkan ukuran, masa hidup, dan distribusi spasialnya. Deteksi eddy menggunakan metode *hybrid* antara SLA kontur tertutup dan parameter Okubo-Weiss. Ditemukan 435 eddy di perairan Pasifik barat laut dengan AE sebanyak 201 dan CE sebanyak 234 dalam kurun waktu 20 tahun. Hasil menunjukkan pola musiman yang jelas dalam distribusi spasial dan kekuatan eddy. Musim timur memiliki aktivitas eddy yang lebih tinggi daripada musim barat, kemungkinan terkait dengan faktor iklim regional seperti perubahan suhu permukaan laut dan pola angin musiman. Penelitian ini memberikan wawasan penting tentang dinamika eddy di Pasifik barat laut dan dapat dikembangkan untuk pengelolaan sumber daya laut dan mitigasi risiko bencana alam di wilayah tersebut.

Kata kunci: Antisiklonik eddy, Pasifik bagian barat laut, Siklonik eddy, Variasi musiman

Abstract

Characteristics and Seasonal Variations of Eddy in Northwestern Pacific Ocean

The northwestern Pacific Ocean is a region of significant geographical and ecological importance, It is traversed by the North Equatorial Current (NEC), South Equatorial Current (SEC), and North Equatorial Counter Current (NECC), the convergence of which can lead to the formation of eddies.. Eddies are rotating water circulation patterns that play a crucial role in transporting mass, energy, and nutrients in the ocean. Eddies in the Northern Hemisphere, moving counterclockwise, are called cyclonic eddies (CE), while those moving clockwise are called anticyclonic eddies (AE). This study aims to investigate the characteristics and seasonal variations of eddies in the northwestern Pacific Ocean. Satellite altimetry daily data of sea surface anomaly and geostrophic currents from 2003 to 2022 was analyzed to identify eddies based on their size, lifespan, and spatial distribution. The results reveal a distinct seasonal pattern

in eddy spatial distribution and strength. Eddy activity is higher during the eastern season compared to the western season, potentially linked to regional climate factors such as sea surface temperature changes and seasonal wind patterns. Eddy detection was performed using a hybrid method combining closed contour sea level anomaly (SLA) and the Okubo-Weiss parameter. A total of 435 eddies were found in the northwestern Pacific Ocean, with 201 AE and 234 CE over a 20-year period. This research provides valuable insights into eddy dynamics in the northwestern Pacific Ocean and can be applied to marine resource management and natural disaster mitigation in the region. Further research is needed to elucidate the underlying mechanisms of seasonal eddy variations and their implications for broader ocean systems.

Keywords: *Anticyclonic eddy, Cyclonic eddy, Northwest Pacific, Seasonal variation*

PENDAHULUAN

Perairan Pasifik bagian Barat Laut dikenal dengan arus batas barat (*western boundary current*) yang kompleks (Liu *et al.*, 2023) dan dilalui beberapa arus utama, yaitu *North Equatorial Current (NEC)* dan *South Equatorial Current (SEC)*, diantara kedua arus ini terdapat batas yang dikenal dengan *North Equatorial Counter Current (NECC)* (Wyrтки, 1961). NEC di Pasifik terbagi menjadi 2 di utara menjadi Arus Kuroshio dan di selatan menjadi Arus Mindanao. Massa air dari NEC dan SEC yang masuk ke wilayah Indonesia selanjutnya menjadi Arus Lintas Indonesia atau yang dikenal dengan ARLINDO. Dinamika dan pertemuan arus-arus utama tersebut dapat mengakibatkan terjadinya eddy di daerah retrofleksinya.

Mesoscale eddies merupakan eddy yang memiliki skala temporal mingguan hingga bulanan dan skala spasial puluhan hingga ratusan kilometer (Guo & Bishop, 2022; Napitupulu *et al.*, 2024). Gaya coriolis menyebabkan *cold eddy* di BBU berputar berlawanan arah jarum jam atau *Cyclonic Eddy (CE)* dan *warm eddy* berputar searah jarum jam atau *Anticyclonic Eddy (AE)* (Ramadhan *et al.*, 2020). Perbedaan arah gerak ini dapat menyebabkan divergensi dan konvergensi perairan (Suharyo *et al.*, 2020), CE menyebabkan perairan bergerak secara divergen dan menyebabkan terjadinya *upwelling* sehingga meningkatkan produktivitas perairan (Seo *et al.*, 2022; Shafeeque *et al.*, 2021) dan AE menyebabkan perairan bergerak secara konvergen dan menyebabkan terjadinya *downwelling*, meskipun begitu penelitian Mizobata *et al.* (2002) menemukan pada sisi luar eddy memiliki konsentrasi klorofil-a yang lebih tinggi dibandingkan dengan di inti eddy.

Arus eddy merupakan fenomena penting dalam dinamika oseanografi Indonesia, dan penelitian telah mengidentifikasi keberadaannya di sejumlah lokasi strategis. Studi yang dilakukan

oleh Ferdyan *et al.* (2022), Ramadhanty *et al.* (2021), Pranowo *et al.* (2016), dan Kartadikaria *et al.* (2024) menunjukkan bahwa arus eddy dapat ditemukan mulai dari perairan barat Pulau Sumatra hingga perairan selatan Pulau Jawa, serta perairan utara Pulau Papua. Selain itu, perairan di sekitar Laut Banda, Laut Maluku, Laut Seram, Teluk Tomini, Laut Arafura, Laut Timor, Laut Sawu, Selat Karimata, dan Laut Andaman juga menjadi habitat bagi arus eddy (Ferdyan *et al.*, 2022). Penelitian lain oleh Kartadikaria *et al.* (2012) dan Nuzula *et al.* (2016) menunjukkan bahwa arus eddy juga dapat ditemukan di Selat Makassar, Laut Flores, Selat Lombok, dan perairan barat Nusa Tenggara. Di sebelah timur, perairan sekitar Mindanao, Halmahera, dan Selat Malaka juga dilaporkan memiliki kehadiran arus eddy yang signifikan, sebagaimana yang diselidiki oleh Ferdyan *et al.* (2022), Ramadhan *et al.* (2020), dan Simanungkalit *et al.* (2018). Hal ini menunjukkan keberadaan eddy di seluruh perairan Indonesia.

Daerah pembentukan eddy di Perairan Pasifik Barat Laut, yang dipengaruhi oleh arus utama NEC, SEC, dan NECC, memiliki keunikan tersendiri dibandingkan dengan wilayah laut lainnya (Varona *et al.*, 2019). Perairan ini menjadi habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna laut yang kaya, serta memiliki peran penting dalam mengatur iklim regional dan global (Todd *et al.*, 2019). Penelitian tentang eddy di perairan ini tergolong minim, dengan studi yang berfokus pada periode waktu singkat atau wilayah yang terbatas. Hal ini menimbulkan kesenjangan pengetahuan tentang karakteristik dan variasi eddy di Perairan Pasifik Barat Laut dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan variasi musiman eddy di Perairan Pasifik Barat Laut selama 20 tahun (2003-2022) dengan menggunakan metode Okubo-Weiss dan *Sea Level Anomaly (SLA)* kontur tertutup untuk mendeteksi eddy.

MATERI DAN METODE

Daerah pada penelitian ini adalah di Perairan Pasifik bagian Barat Laut dengan batas koordinat 0 – 10° LU dan 130° BT – 141° BT. Data arah dan kecepatan arus u dan v geostropik dan *sea level anomaly* (SLA) berupa data harian diperoleh dari *Marine Copernicus* selama 20 tahun (2003 – 2022) dengan resolusi spasial 0,25° x 0,25°. Data arus u dan v geostropik dan SLA bersumber dari satelit altimetri Copernicus (Sentinel-6A, Sentinel 3A/B) dan beberapa satelit altimetri kolaborasi (Jason-3, Cryosat-2, Topex/Poseidon, Envisat, dan lain-lain).

Pada penelitian ini menggunakan metode hybrid dengan menggabungkan antara parameter Okubo-Weiss dan kriteria geometrik, yang dalam hal ini merupakan SLA. Keberadaan eddy dalam metode ini didefinisikan sebagai wilayah koheren yang terdeteksi dalam kontur SLA tertutup dan parameter Okubo Weiss memiliki nilai yang negatif. Kontur SLA tertutup diperoleh dengan melakukan perhitungan jarak antar grid *longitude* (dx) dan *latitude* (dy), selanjutnya dibuat kontur berdasarkan data SLA dari interval terkecil hingga terbesar, setiap kontur yang terbentuk dilakukan

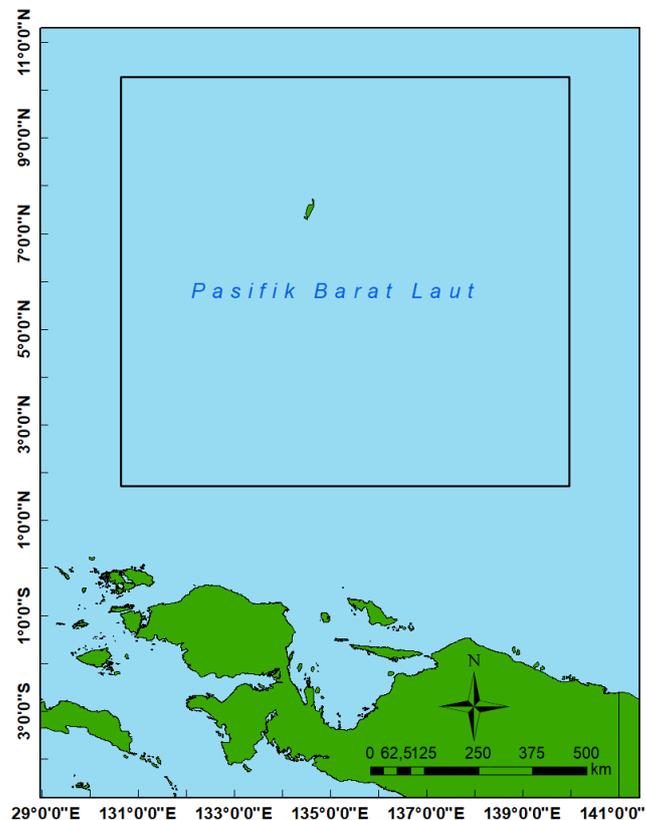
pengecekan untuk memastikan apakah terdapat kontur tertutup yang terbentuk, kontur tertutup dicirikan sebagai kontur yang terbentuk dari titik yang lebih dari dua titik, dengan komponen pembentuk terdapat dua titik dengan *longitude* dan *latitude* yang identik.

Perhitungan Okubo-Weiss dilakukan dengan menggunakan data u dan v geostropik digunakan untuk menghitung nilai regangan normal (S_n), regangan geser (S_s), dan vortisitas relatif (ξ). Hasil perhitungan S_n , S_s , dan ξ digunakan dalam rumus Okubo (1970) dan Weiss (1991) sebagai berikut:

$$W = S_n^2 + S_s^2 + \xi^2$$

dengan $S_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$; $S_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$; dan $\xi = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$.

Sebuah vorteks didefinisikan sebagai sebuah wilayah yang mempunyai nilai vortisitas yang sama dan dengan nilai parameter Okubo-Weiss (W) yang lebih kecil dari nilai ambang batas:



Gambar 1. Daerah kajian penelitian.

$$W_0 = 0,2\sigma_w$$

dengan σ_w merupakan standar deviasi spasial dari W_0 yang diperoleh dari perhitungan nilai kecepatan geostropik.

Eddy dicirikan dengan kontur tertutup dari nilai $W = -W_0$. Melalui parameter W pada persamaan Okubo-Weiss, topologi dari kecepatan permukaan laut dapat dibagi menjadi tiga kategori, jika $W < -W_0$, maka wilayah ini merupakan wilayah eliptik, yang didominasi oleh vortisitas, jika $W > -W_0$ merupakan wilayah hiperbolik, yang didominasi oleh tegangan/deformasi, dan jika $|W| \leq -W_0$ merupakan wilayah bidang dasar.

Nilai radius (R) eddy diestimasi dari kontur tertutup terbesar dari luas permukaan (A), sehingga

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Dalam melacak trayektori eddy digunakan asumsi bahwa pusat arus eddy hari berikutnya merupakan eddy yang sama jika berada pada radius kontur tertutup pada hari sebelumnya. Penven *et al.* (2005) mengemukakan persamaan yang dapat digunakan untuk melacak trayektori eddy, yaitu :

$$X_{e1,e2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta X}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \xi}{\xi_0}\right)^2}$$

dengan ΔX merupakan jarak spasial antara inti eddy (X_{e1} dan X_{e2}), ΔR merupakan variasi diameter, $\Delta \xi$ merupakan variasi vortisitas, X_0 merupakan skala panjang karakteristik, R_0 merupakan tipe radius eddy, dan ξ_0 merupakan karakteristik vortisitas.

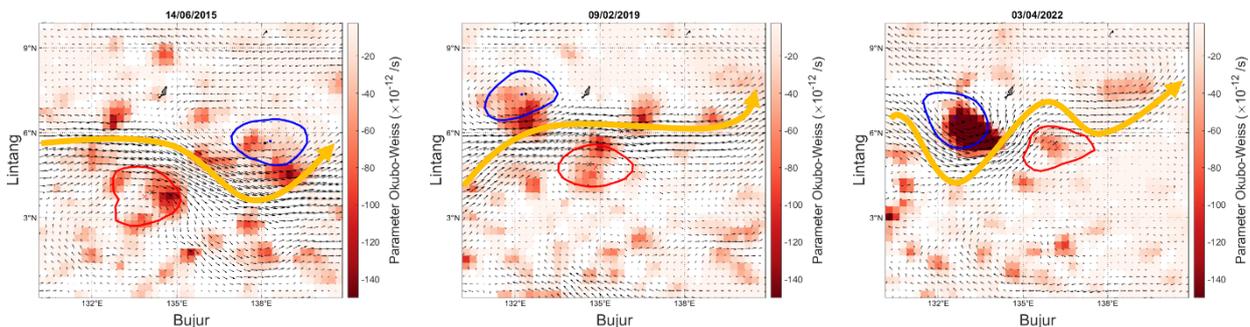
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan Gambar 3, warna merah menunjukkan sebaran AE dan warna biru menunjukkan sebaran CE di Perairan Pasifik bagian Barat Laut. Sebaran AE dan CE dominan berada di atas 4^0 LU, wilayah ini merupakan daerah *North Equatorial Counter Current* (NECC), dimana arus ini mempunyai peran penting dalam pembentukan eddy di Samudera Pasifik Barat Laut (Zhao *et al.*, 2016). Umumnya, NECC berpengaruh terhadap pembentukan CE pada sisi utaranya dan AE pada sisi selatannya, dapat dilihat dari beberapa contoh hasil penelitian (Gambar 2) pada waktu yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh adanya arus yang terpisah dari arus utama (NECC) dan berputar kembali ke arus utamanya, adanya gaya coriolis yang membelokkan arus ke kanan di BBU menyebabkan massa air pada CE akan mengalami divergensi dan AE mengalami konvergensi.

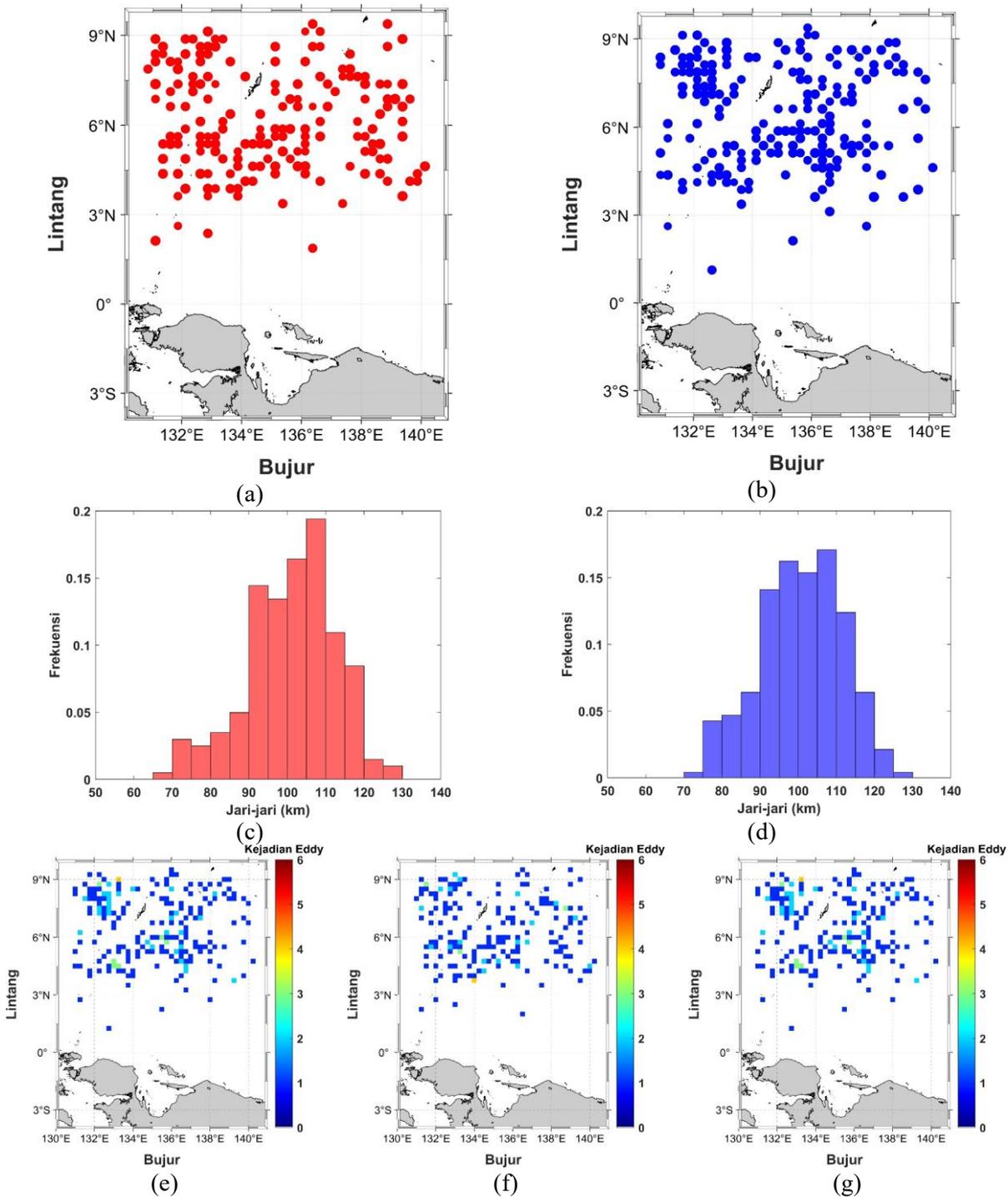
Radius eddy 105 – 110 km memiliki frekuensi kemunculan tertinggi dengan 19% untuk AE dan 17% untuk CE yang dapat dilihat pada Gambar 3c dan 3d. Eddy dengan radius 90 – 110 km merupakan yang paling banyak yang ditemukan di Samudera Pasifik Barat Laut dengan frekuensi kemunculan lebih dari 60%. Titik pusat eddy tersebar merata dan cenderung tidak terbentuk pada titik yang sama di Samudera Pasifik Barat Laut dari lintang $4^0 - 9^0$ LU yang dapat dilihat pada Gambar 3e, warna biru menunjukkan adanya satu kali kejadian eddy pada titik tersebut.

Karakteristik dan Variasi Eddy di Pasifik Barat Laut

Berdasarkan Gambar 4 eddy yang ditemukan selama 2003 – 2022 berjumlah 435 dengan AE sebanyak 201 dan CE sebanyak 234. Eddy di Perairan Pasifik bagian Barat Laut ditemukan setiap bulannya, baik AE maupun CE. Jumlah AE maksimum ditemukan pada bulan April



Gambar 2. Pembentukan AE (lingkaran merah) dan CE (lingkaran biru) di sekitar NECC (garis kuning) pada waktu berbeda-beda.



Gambar 3. Sebaran pusat (a) AE dan (b) CE serta frekuensi radius (c) AE dan (d) CE di Perairan Pasifik Barat Laut selama tahun 2003 – 2022. Sebaran jumlah kejadian (e) total eddy, (f) AE, dan (g) CE di Perairan Barat Laut selama tahun 2003 – 2022.

dengan 21 eddy dan minimum pada bulan Februari dengan 12 eddy, sedangkan jumlah CE maksimum ditemukan pada bulan Januari dengan 28 eddy dan jumlah CE minimum pada bulan Maret dengan 14 eddy.

Masa hidup eddy merupakan lamanya durasi suatu eddy dari mulai terbentuk hingga meluruh. *Mesoscale eddies* memiliki waktu hidup mingguan hingga bulanan, sehingga dalam penelitian ini eddy yang diidentifikasi merupakan eddy dengan masa

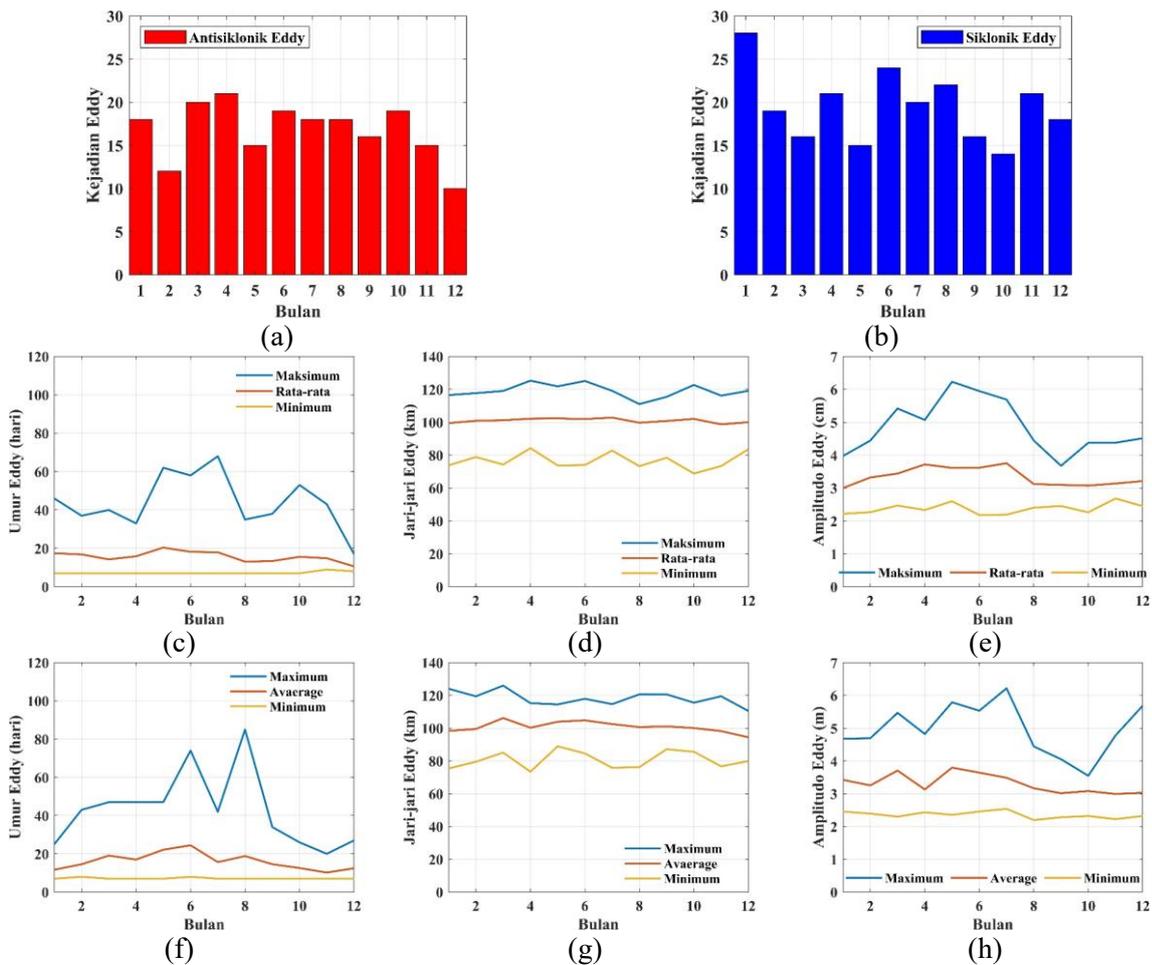
hidup ≥ 7 hari. Masa hidup rata-rata AE adalah 15,7 hari, dengan masa hidup terlama mencapai 70 hari pada bulan Juli. Sedangkan masa hidup rata-rata CE adalah 16,1 hari, dengan masa hidup terlama mencapai 83 hari pada bulan Agustus.

Radius eddy menunjukkan ukuran eddy, dimana *mesoscale eddies* memiliki radius puluhan hingga ratusan kilometer. Rata-rata radius AE yang terbentuk sekitar 100 km dengan ukuran maksimum mencapai 123 km pada bulan April dan ukuran minimum mencapai 65 km di bulan Oktober. Rata-rata radius CE yang terbentuk juga mirip seperti AE, yaitu sekitar 100 km dengan ukuran maksimum sedikit lebih besar dari AE, yaitu 128 km pada bulan Maret dan ukuran minimum mencapai 78 km di bulan April.

Amplitudo eddy merupakan perubahan elevasi muka laut pada pusat eddy. Amplitudo eddy menunjukkan efek akibat terjadinya eddy,

semakin besar amplitudo eddy semakin besar perubahan elevasi muka laut di pusat eddy. Rata-rata amplitudo AE dan CE secara keseluruhan memiliki nilai yang sama sekitar 3 – 4 cm, namun memiliki pola yang berbeda, misal pada Gambar 4e dan 4h amplitudo AE pada bulan April menunjukkan kenaikan dari bulan sebelumnya, sedangkan di bulan yang sama CE mengalami penurunan amplitudo yang signifikan. Amplitudo maksimum AE mencapai 6,2 cm di bulan Mei dan minimum mencapai 2,2 cm di bulan berikutnya. Sama seperti AE, amplitudo maksimum CE juga mencapai 6,2 cm pada bulan Juli dan amplitudo minimum juga mencapai 2,2 cm pada bulan berikutnya.

Jumlah CE ditemukan lebih banyak dan masa hidup CE lebih lama dibandingkan dengan AE, namun AE memiliki radius yang lebih besar. Berdasarkan jumlah, masa hidup, radius, dan



Gambar 4. Jumlah kejadian (a) AE dan (b) CE setiap bulan. (c) Masa hidup, (d) radius, dan (e) amplitudo AE; dan (f) masa hidup, (g) radius, dan (h) amplitudo CE.

amplitudo eddy tidak terdapat perbedaan signifikan, namun memiliki pola variasi bulanan yang berbeda-beda.

Gambar 5a menunjukkan radius rata-rata AE dan CE serta anomalnya setiap bulan. Rata-rata radius AE dan CE tidak terdapat perbedaan signifikan, rata-rata radius AE 101 km dan radius CE 100,8 km, namun untuk anomali AE tertinggi mencapai 4 km terjadi pada bulan April, sedangkan anomali CE terjadi pada bulan berikutnya mencapai 8 km. Berdasarkan gambar 4b menunjukkan CE memiliki masa hidup yang lebih lama dibandingkan AE pada bulan ke 3, 4, 5, 6, 8, 9, dan 12. Gambar 5b menunjukkan masa hidup rata-rata AE dan CE serta anomalnya tiap bulan. Rata-rata masa hidup AE (15,7 hari) dan CE (16,1 hari) juga tidak terdapat perbedaan signifikan, untuk rata-rata masa hidup terlama CE terjadi pada bulan Juni dengan rata-rata 24 hari dan untuk AE terjadi pada bulan sebelumnya, yaitu pada bulan Mei dengan rata-rata masa hidup 21 hari.

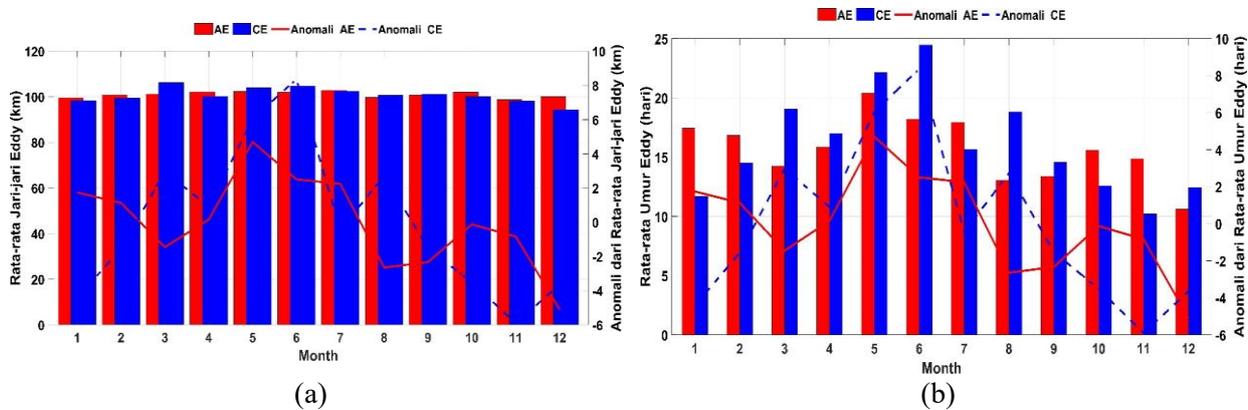
Variasi Eddy terhadap Musim

Penelitian ini membagi distribusi eddy menjadi 4 musim, yaitu musim barat (DJF), musim peralihan I (MAM), musim timur (JJA), dan musim peralihan II (SON) yang ditunjukkan oleh Gambar 6a, b, c, dan d berturut-turut. Berdasarkan musimnya, jumlah AE (CE) yang terbentuk di musim timur, peralihan I, barat, dan peralihan II berturut-turut 40 (65), 56 (52), 55 (66), dan 50 (51). Pembentukan AE terbanyak terjadi pada musim peralihan I dan musim timur, sedangkan pada musim barat AE yang terbentuk paling sedikit dibandingkan musim lainnya. CE banyak terbentuk pada musim barat dan musim timur dan paling sedikit terjadi pada musim peralihan I dan peralihan II.

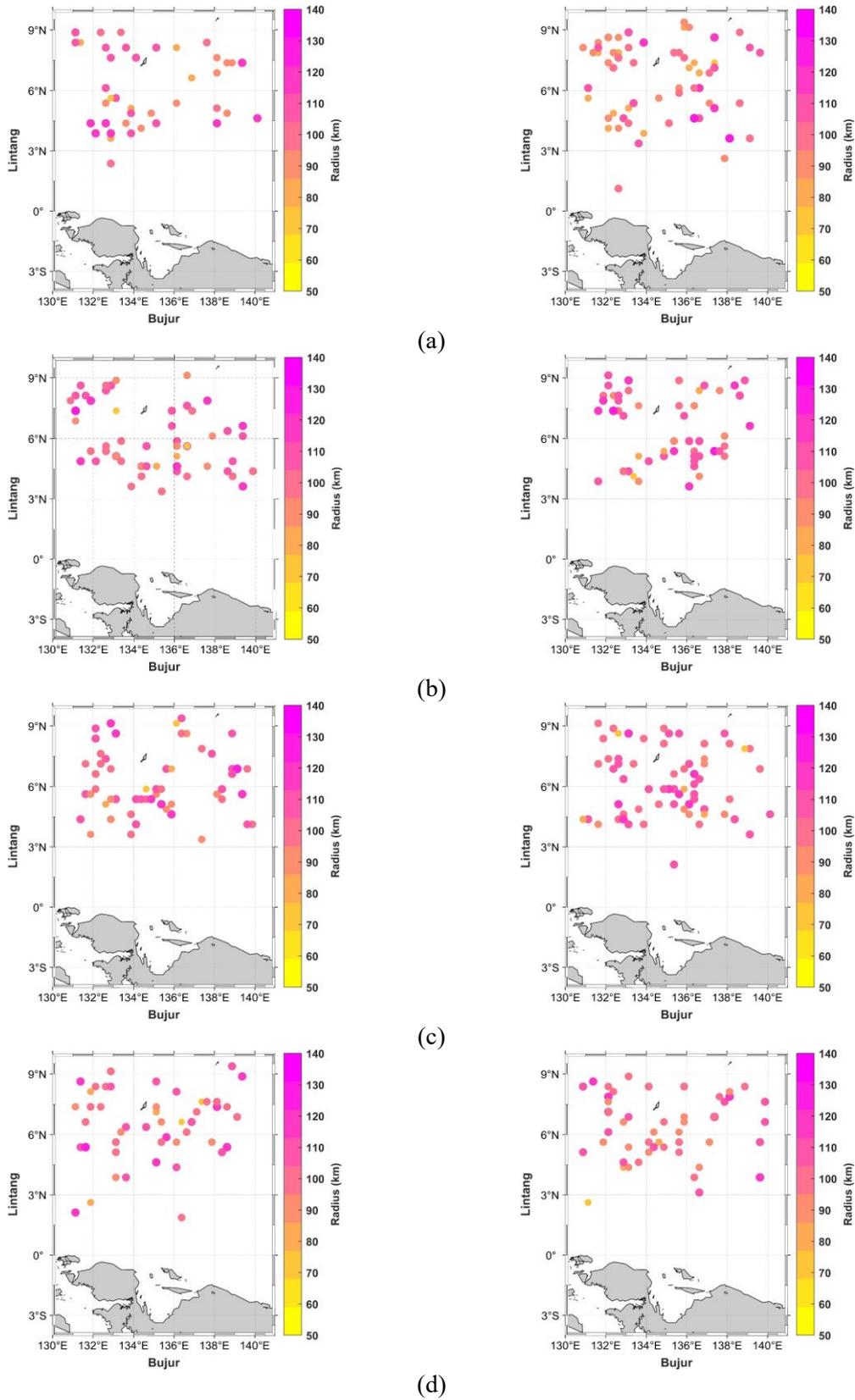
Berdasarkan distribusi radius eddy pada Gambar 5, radius maksimum terbesar (131,7 km) dan minimum terbesar (73,2 km) AE terjadi pada musim barat, namun radius rata-rata AE pada musim barat (97,6 km) dan peralihan II (97,4 km) lebih kecil dibandingkan musim timur (99,3 km) dan musim peralihan I (98 km). Hal ini menunjukkan bahwa pada musim barat ukuran eddy tidak terlalu bervariasi. Musim barat juga menunjukkan rata-rata radius CE yang lebih kecil dibandingkan musim lainnya, dimana rata-rata radius pada musim ini adalah 96 km. Sedangkan, untuk musim lainnya tidak terdapat perbedaan signifikan, rata-rata radius musim peralihan I, musim timur, dan musim peralihan II berturut-turut 99,1; 98,3; dan 97,8 km.

Gambar 7 menunjukkan bahwa eddy yang terbentuk di musim timur memiliki masa hidup yang lebih lama, dengan rata-rata masa hidup AE 10,7 hari dan CE 13,3 hari, serta maksimum masa hidup AE dan CE di musim timur adalah 68 dan 85 hari, dimana terdapat perbedaan signifikan dengan maksimum masa hidup AE & CE pada musim timur (46 & 43 hari), musim peralihan I (62 & 47 hari), dan musim peralihan II (53 & 34 hari). Sedangkan eddy yang terbentuk di musim barat memiliki masa hidup yang lebih sebentar, dengan rata-rata masa hidup AE 7,9 hari dan CE 8,7 hari.

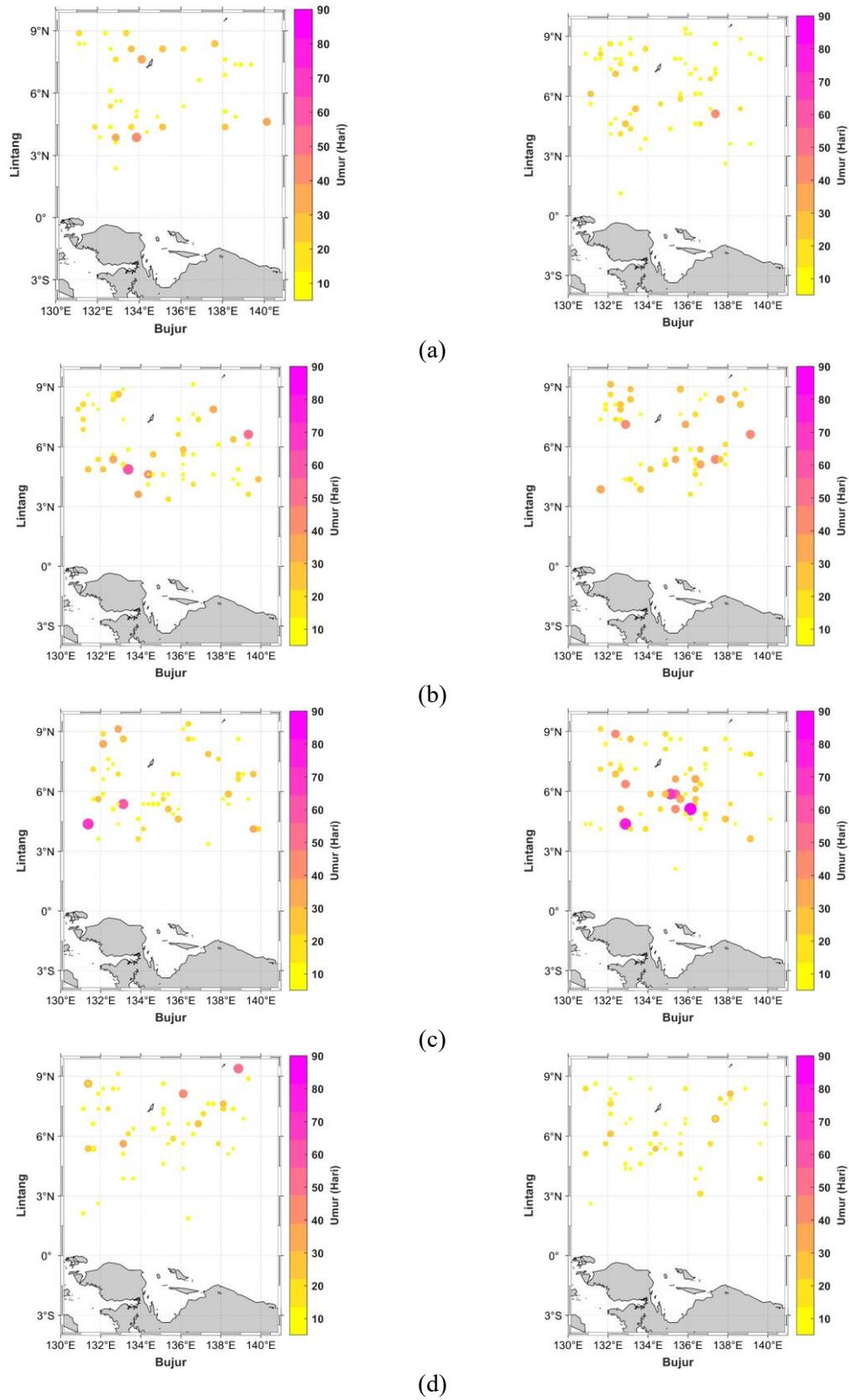
Hasil analisis menunjukkan adanya kesamaan pola dengan menguatnya/melemahnya NECC, dimana saat menguat di musim timur respon eddy menunjukkan peningkatan rata-rata jumlah, radius, dan masa hidup. Sedangkan, saat NECC melemah di musim barat terjadi penurunan rata-rata jumlah, radius, dan masa hidup eddy, serta kurang bervariasi ukuran eddy.



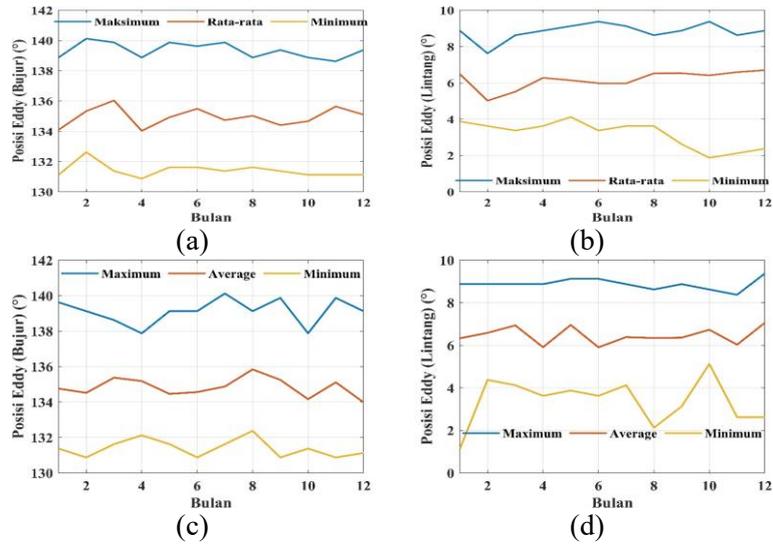
Gambar 5. (a) Rata-rata radius dan rata-rata anomali radius AE(merah) dan CE(biru); (b) Rata-rata masa hidup dan rata-rata anomali masa hidup AE(merah) dan CE(biru).



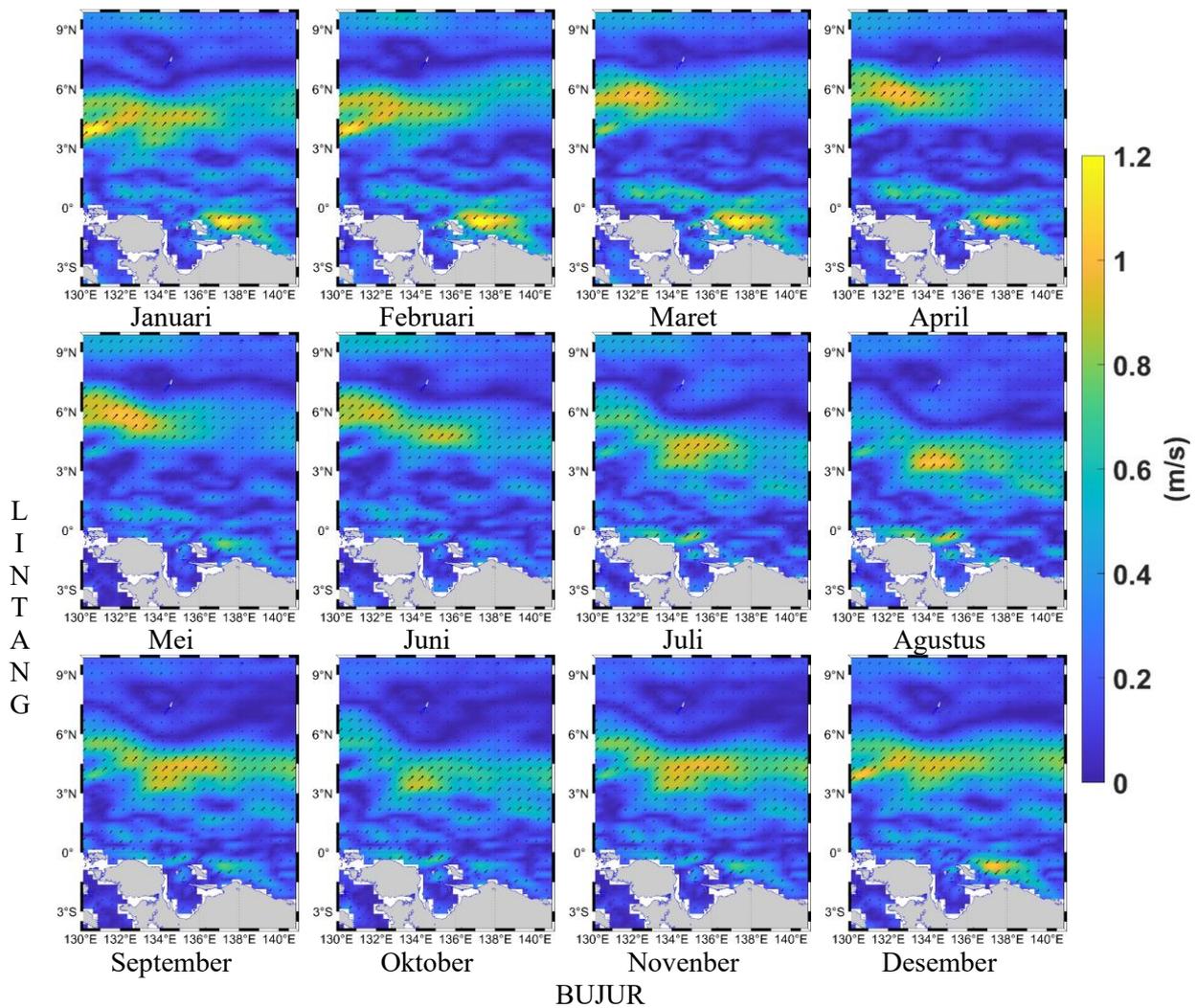
Gambar 6. Distribusi Radius Eddy untuk Antisiklon (kiri) dan Siklonik (kanan) Eddy pada musim (a) Barat, (b) Peralihan I, (c) Timur, dan (d) Peralihan II.



Gambar 7. Distribusi Umur Eddy untuk Antisiklon dan Siklon Eddy pada musim (a) Barat, (b) Peralihan I, (c) Timur, dan (d) Peralihan II.



Gambar 8. Variasi musiman (a) Posisi Bujur dan (b) Posisi Lintang dari antisiklonik eddy. Variasi musiman (c) Posisi Bujur dan (d) Posisi Lintang dari siklonik eddy.



Gambar 9. Klimatologi kecepatan arus permukaan selama 20 tahun pada bulan

Propagasi Eddy

Hasil analisis menunjukkan adanya pola yang sama antara variasi eddy dan pola NECC sehingga perlu melihat pergerakan/propagasi eddy. Propagasi eddy merupakan perambatan/perubahan posisi titik pusat eddy mulai dari terbentuk hingga meluruh. Berdasarkan Gambar 8 menunjukkan bahwa rata-rata kejadian eddy baik AE dan CE berada pada lintang sekitar $5^{\circ} - 7^{\circ}$ LU, sejalan dengan hal tersebut, Gambar 9 menunjukkan bahwa NECC terbentuk di sekitar $4^{\circ} - 6^{\circ}$ LU.

Penguatan dan pelemahan NECC diduga dapat memengaruhi propagasi dan daerah terbentuknya eddy. Berdasarkan Gambar 9 NECC pada bulan maret, agustus, dan november bergeser ke arah timur di ke sekitar 134° BT, serta Gambar 8a dan 8c juga menunjukkan pergeseran pergerakan eddy ke arah timur di sekitar $135^{\circ} - 136^{\circ}$ BT. Pada Gambar 9j, arus NECC di bulan Oktober terlihat paling lemah dibandingkan dengan bulan lainnya, propagasi rata-rata eddy terhadap bujur pada bulan ini juga menunjukkan semakin bergerak ke barat di sekitar 134° BT.

KESIMPULAN

Studi ini mengungkapkan bahwa perairan Pasifik Bagian Barat Laut menunjukkan variasi dan karakteristik eddy yang signifikan secara musiman. Peningkatan karakteristik eddy seperti jumlah, radius, dan masa hidup terjadi pada musim timur dan penurunan karakteristik eddy terjadi pada musim barat. Pola variasi musiman eddy di perairan Pasifik Bagian Barat Laut menunjukkan pola yang sama dengan pelemahan/penguatan NECC. Eddy musiman ini memiliki dampak yang penting dalam proses oseanografi regional dan global, serta mempengaruhi dinamika lingkungan laut secara luas. Analisis data menunjukkan bahwa eddy-eddy musiman ini cenderung bervariasi dalam ukuran, kekuatan, dan lokasi spasialnya sepanjang tahun. Selain itu, terdapat pola yang konsisten dalam distribusi spasial eddy, yang dapat dikaitkan dengan faktor-faktor iklim regional seperti monsun dan fenomena iklim lainnya. Perbedaan tekanan saat terjadi eddy siklonik dan antisiklonik juga dapat dikaji lebih lanjut untuk melihat interaksi laut-atmosfer.

DAFTAR PUSTAKA

Ferdyan, A., Syamsuddin, M.L., Yuliadi, L.P.S., Pranowo, W.S., & Sunarto. 2022. Distribution and Characteristics of Eddies in Indonesian Seas. *Global Scientific Journals*. 10(1): 603-610

- Guo, Y., & Bishop, S.P. 2022. Surface divergent eddy heat fluxes and their impacts on mixed layer eddy-mean flow interactions. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(4): e2021MS002863.
- 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/METRICS.
- Kartadikaria, A.R., Napitupulu, G., Rangga, K., Radjawane, I.M., & Abdullah, F.A.R. 2024. Ketidakseragaman Sebaran Spasial Variabilitas Musiman Eddy di Perairan Barat Laut Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 27(1): 1–16.
- Liu, S., Xu, J., Qiao, L., Li, G., Shi, J., Ding, D., Yu, D., Yang, X., Pan, Y., Liu, S., & Fu, X. 2023. Spatial-temporal variations of short-lived mesoscale eddies and their environmental effects. *Frontiers in Marine Science*, 10: 1069897. doi: 10.3389/FMARS.2023.1069897/BIBTEX.
- Mizobata, K., Saitoh, S.I., Shiimoto, A., Miyamura, T., Shiga, N., Imai, K., Toratani, M., Kajiwara, Y., & Sasaoka, K. 2002. Bering Sea cyclonic and anticyclonic eddies observed during summer 2000 and 2001. *Progress in Oceanography*, 55(1–2): 65–75. doi: 10.1016/S0079-6611(02)00070-8.
- Napitupulu, G., Lukman, A.A., Hatmaja, R.B., Kartadikaria, A.R., Radjawane, I.M., Millina, A.V., Akbar, M.A. & Napitupulu, M.. 2024. Respon Singkat Konsentrasi Klorofil-A Terhadap Perubahan Arus Eddy Permukaan di Wilayah Perairan Teluk Tolo dan Sekitarnya. *Jurnal Geologi Kelautan*, 22(1):26-42. doi: 10.32693/jgk.22.1.2024.877
- Nuzula, F., Permata Sari, L.Y., Laksmi, M., & Purba, N.P. 2016. Variabilitas Temporal Eddy di Perairan Makassar – Laut Flores. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan Unpad*, 7(1): p.484116.
- Penven, P., Echevin, V., Pasapera, J., Colas, F., & Tam, J. 2005. Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110:C10021. doi: 10.1029/2005JC002945
- Pranowo, W.S., Tussadiah, A., Syamsuddin, M.L., Purba, N.P., & Riyantini, I. 2016. Karakteristik dan Variabilitas Eddy di Samudera Hindia Selatan Jawa. *Jurnal Segara*, 12(3): 159–165.

- Ramadhan, M.F., Sugianto, D.N., Wirasatriya, A., Setiyono, H., & Maslukah, L. 2020. Characteristics of Halmahera Eddy and its relation to sea surface temperature, chlorophyll-a, and thermocline layer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 530(1): p. 012039.
- Ramadhanty, F.W., Muslim, M., Kunarso, K., Rochaddi, B., & Ismunarti, D.H. 2021. Pengaruh Fenomena IOD (Indian Ocean Dipole) Terhadap Sebaran Temperatur dan Salinitas di Perairan Barat Sumatera. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(1): 89–99. doi: 10.14710/IJOCE.V3I1.10494.
- Seo, J., Hahm, D., Kim, G., Lee, I., Park, J., Na, T., Park, J.H., Kang, S.K., & Hwang, J. 2022. Insignificant effects of eddies and typhoons on the biogeochemistry of the tropical northwest Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 9: p.983748. doi: 10.3389/FMARS.2022.983748/BIBTEX.
- Shafeeque, M., Balchand, A.N., Shah, P., George, G., Varghese, E., Joseph, A.K., Sathyendranath, S., & Platt, T. 2021. Spatio-temporal variability of chlorophyll-a in response to coastal upwelling and mesoscale eddies in the South Eastern Arabian Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 42(13): 4836–4863.
- 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): p.012002. doi: 10.1088/1755-1315/176/1/012002.
- Suharyo, G., Suharyo, G.B.T., Purba, N.P., Yuliandi, L.P.S., & Syamsuddin, M.L. 2020. Kondisi suhu dan salinitas serta korelasinya dengan variabilitas eddy di Perairan Halmahera dan Mindanao. *Depik*, 9(3): 421–427. doi: 10.13170/depik.9.3.15534.
- Todd, R.E., Chavez, F.P., Clayton, S., Cravatte, S., Goes, M., Graco, M., Lin, X., Sprintall, J., Zilberman, N.V., Archer, M. & Arístegui, J., 2019. Global perspectives on observing ocean boundary current systems. *Frontiers in Marine Science*, 6: p.423.
- Varona, H.L., Veleda, D., Silva, M., Cintra, M., & Araujo, M. 2019. Amazon River plume influence on Western Tropical Atlantic dynamic variability. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 85: 1–15.
- Wyrtki, K. 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian waters (Vol. 2). University of California, Scripps Institution of Oceanography.
- Zhao, J., Li, Y., & Wang, F. 2016. Seasonal variation of the surface North Equatorial Countercurrent (NECC) in the western Pacific Ocean. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 34(6): 1332–1346.