

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Laut merupakan komponen utama dalam sistem iklim bumi yang berperan sebagai penyerap karbon alami. Lautan telah menyerap sekitar $25 \pm 2\%$ emisi karbon dioksida (CO_2) antropogenik yang dilepaskan ke atmosfer sehingga berperan penting dalam mengurangi laju peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Mekanisme utama yang mendukung proses tersebut merupakan *Biological Carbon Pump* (BCP). BCP merupakan rangkaian proses biologis yang mentransfer karbon dari lapisan permukaan menuju perairan dalam melalui aktivitas fotosintesis fitoplankton dan ekspor material organik (Gruber *et al.*, 2023). Konsentrasi klorofil-a dalam oseanografi digunakan sebagai indikator biomassa fitoplankton karena berkaitan erat dengan aktivitas fotosintesis dan produktivitas primer laut. Biomassa yang dihasilkan akan mengalami transformasi menjadi *Particulate Organic Carbon* (POC). POC merupakan fraksi karbon organik yang berada dalam bentuk partikel tersuspensi di kolom air dan berperan penting dalam proses ekspor karbon ke laut dalam. Distribusi klorofil-a dan POC dapat digunakan untuk mengevaluasi dinamika produktivitas biologis serta efisiensi BCP pada suatu wilayah perairan (Behrenfeld dan Boss, 2018).

Samudera Hindia merupakan salah satu cekungan samudera tropis yang memiliki dinamika oseanografi sangat kompleks akibat interaksi berbagai sistem sirkulasi regional dan global. Distribusi panas, salinitas, dan karakteristik biogeokimia di wilayah ini dikendalikan oleh SEC yang mengangkut massa air hangat menuju bagian barat Samudera Hindia serta ITF yang mentransfer massa air dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia melalui perairan Indonesia sehingga memodifikasi struktur suhu, salinitas, dan kandungan nutrisi di wilayah timur Samudera Hindia (Sprintall *et al.*, 2019). Sistem monsun Asia–Australia menyebabkan perubahan musiman pada pola angin, sirkulasi permukaan, dan kedalaman termoklin yang berpengaruh terhadap proses pencampuran vertikal dan distribusi nutrisi (Hu & Sprintall, 2017). Fenomena IOD memengaruhi variasi suhu permukaan laut, produktivitas primer, serta distribusi biogeokimia melalui perubahan pola angin dan intensitas *upwelling* pada skala antar-tahunan. Interaksi antara SEC, ITF, sistem monsun, dan IOD menghasilkan kondisi oseanografi yang

dinamis sehingga mendukung pembentukan *mesoscale eddies* di Samudera Hindia (Schott et al., 2009; Koshlyakov & Belokopytov, 2020).

Mesoscale eddies merupakan struktur pusaran laut berukuran sekitar 10–300 km yang berperan penting dalam mengatur pertukaran massa air, panas, nutrisi, dan material biogeokimia antara lapisan permukaan dan lapisan bawah laut (McGillicuddy, 2016). *Cyclonic eddy* dicirikan oleh divergensi massa air permukaan yang memicu proses *upwelling* sehingga massa air kaya nutrisi terangkat menuju lapisan eufotik. Kondisi tersebut meningkatkan pertumbuhan fitoplankton yang ditunjukkan oleh peningkatan konsentrasi klorofil-a serta akumulasi POC. Anticyclonic eddy menyebabkan konvergensi massa air yang menghasilkan proses *downwelling* sehingga lapisan kaya nutrisi terdorong ke kedalaman lebih besar (McGillicuddy, 2016). Akibatnya produktivitas primer di lapisan permukaan cenderung menurun dan perairan berkembang menjadi kondisi dengan konsentrasi klorofil-a dan POC permukaan yang relatif rendah (García et al., 2026).

Penelitian mengenai hubungan antara *mesoscale eddies* dan produktivitas biologis masih menggunakan data penginderaan jauh satelit yang hanya merepresentasikan kondisi lapisan permukaan laut. Data satelit pada dasarnya dapat mengidentifikasi keberadaan eddy dan variasi klorofil-a permukaan secara efektif tetapi pendekatan tersebut tidak dapat menggambarkan struktur vertikal kolom air yang berperan penting dalam proses transport nutrisi dan karbon (Addey, 2022). Keterbatasan tersebut menyebabkan respons vertikal parameter biogeokimia terhadap dinamika eddy, khususnya di Samudera Hindia yang memiliki karakteristik oseanografi kompleks. Pemanfaatan BGC-Argo Float menjadi pendekatan yang penting karena mampu menyediakan pengamatan in situ secara vertikal dan kontinu sehingga memungkinkan analisis keterkaitan antara dinamika fisik dan proses biogeokimia pada berbagai kedalaman (Addey, 2022).

BGC-Argo Float merupakan platform observasi oseanografi otonom yang mampu memperoleh profil vertikal parameter fisik dan biogeokimia dari permukaan hingga kedalaman lebih dari 1.000 m. Instrumen ini mengukur berbagai parameter penting seperti temperatur, salinitas, oksigen terlarut, klorofil-a, dan *particulate backscattering coefficient* pada panjang gelombang 700 nm (bbp700). Keunggulan utama BGC-Argo Float adalah

kemampuannya menyediakan profil vertikal parameter fisik dan biogeokimia dengan interval pengamatan vertikal sekitar 5 m pada lapisan atas (0–100 m), kemudian sekitar 10–50 m pada lapisan yang lebih dalam hingga kedalaman sekitar 2.000 m, serta melakukan pengamatan berulang setiap sekitar 10 hari. Resolusi vertikal tersebut memungkinkan identifikasi perubahan struktur kolom air dan distribusi parameter biogeokimia secara lebih rinci dibandingkan data penginderaan jauh berbasis satelit yang hanya merepresentasikan kondisi permukaan laut. Penelitian Koestner *et al.* (2022) menunjukkan bahwa kombinasi bbp700 dan klorofil-a mampu menghasilkan estimasi POC yang lebih akurat dibandingkan pendekatan berbasis satu parameter.

Penelitian mengenai pengaruh *mesoscale eddies* terhadap produktivitas primer dan distribusi klorofil-a secara khusus mengevaluasi variasi vertikal klorofil-a dan POC berdasarkan posisi BGC-Argo Float terhadap struktur eddy di Samudera Hindia masih relatif terbatas. Menurut penelitian Addey *et al.*, (2022) berfokus pada analisis distribusi klorofil-a permukaan menggunakan data satelit sehingga belum mampu menggambarkan variasi vertikal parameter biogeokimia di dalam struktur eddy. Penelitian lain oleh Strutton *et al.*, (2023) membandingkan karakteristik umum antara *cyclonic* dan *anticyclonic eddy* menggunakan data BGC-Argo, namun belum mengevaluasi secara khusus pengaruh posisi pengamatan (*core, edge, maupun outer eddy*) terhadap variasi vertikal klorofil-a dan POC. Posisi float di dalam struktur eddy berpotensi menghasilkan respons fisik dan biogeokimia yang berbeda akibat variasi intensitas *upwelling, downwelling*, dan transport lateral massa air. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis “Variasi vertikal Klorofil-a dan *Particulate Organic Carbon* berdasarkan posisi BGC-Argo Float terhadap struktur eddy di Samudera Hindia” bertujuan untuk meningkatkan pemahaman mengenai keterkaitan antara dinamika mesoscale dan proses biogeokimia laut.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang berjudul “Variasi Klorofil-a dan *Particulate Organic Carbon* berdasarkan Posisi BGC-Argo Float terhadap Struktur Eddy di Samudera Hindia”, yaitu :

1. Bagaimana karakteristik eddy beserta posisi BGC-Argofloat terhadap eddies di Samudera Hindia?
2. Bagaimana struktur fisik kolom air yang terdiri dari *temperature*, densitas potensial, *brunt-vaissala frequency*, dan MLD di Samudera Hindia berdasarkan data BGC-Argo Float ?
3. Bagaimana konsentrasi klorofil-a di Samudera Hindia berdasarkan data BGC-Argo Float ? dan,
4. Bagaimana variasi Klorofil-a dan POC di Samudera Hindia berdasarkan data BGC-Argo Float ?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang berjudul “Variasi Klorofil-a dan *Particulate Organic Carbon* berdasarkan Posisi BGC-Argo Float terhadap Struktur Eddy di Samudera Hindia”, yaitu :

1. Mengidentifikasi eddy beserta posisi BGC -Argofloat terhadap *eddies* di Samudera Hindia
2. Menganalisis struktur fisik kolom air yang terdiri dari *temperature*, densitas potensial, *brunt-vaissala frequency*, dan MLD di Samudera Hindia berdasarkan data BGC-Argo Float
3. Menganalisis konsentrasi klorofil-a di Samudera Hindia berdasarkan data BGC-Argo Float, dan
4. Mengestimasi nilai POC dan menganalisis respon POC berdasarkan parameter optik $bbp(700)$ dari data BGC-Argo Float di Samudra Hindia

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian dari penelitian yang berjudul “Variasi Klorofil-a dan *Particulate Organic Carbon* berdasarkan Posisi BGC-Argo Float terhadap Struktur Eddy di Samudera Hindia”, yaitu :

1. Penelitian ini memberikan pengembangan ilmu oseanografi fisik dan biogeokimia laut terkait interaksi antara dinamika eddy, klorofil-a, dan POC

2. Penelitian ini memberikan informasi mengenai kontribusi eddy terhadap siklus karbon laut yang berperan dalam perubahan iklim
3. Penelitian ini dapat menjadi referensi untuk peneliti selanjutnya dalam mengkaji dinamika karbon organik di Samudera Hindia terkait siklus karbon laut.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan penelitian dari penelitian yang berjudul “Variasi Klorofil-a dan *Particulate Organic Carbon* berdasarkan Posisi BGC-Argo Float terhadap Struktur Eddy di Samudera Hindia”, yaitu :

1. Penelitian ini dilakukan di wilayah Samudera Hindia bagian timur
2. Periode penelitian dibatasi pada bulan Januari 2024 hingga April 2024
3. Data *in situ* yang digunakan berasal dari BGC-Argo Float dengan ID 2903467
4. Analisis difokuskan pada hubungan posisi BGC-Argo Float terhadap struktur eddy dan tidak mencakup estimasi fluks karbon atau laju ekspor karbon