

## Variasi Temporal Dinamika Upwelling di Selat Makassar Periode 2007-2021

Jane E. V. Siahaan, Kunarso\*, Yusuf Jati Wijaya

Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia  
Email: kunarso@lecturer.undip.ac.id

### Abstrak

Selat Makassar merupakan lintasan utama dari Arus Lintas Indonesia (ARLINDO). Letak geografis ini menyebabkan Selat Makassar memiliki variabilitas *upwelling* yang tinggi. Tujuan penelitian ini adalah mengkaji variabilitas musiman *upwelling* secara spasial dan temporal di Selat Makassar berdasarkan indeks *upwelling*, klorofil-a, nilai Rrs 443 dan 555, SPL (Suhu Permukaan Laut), SSHA (*Sea Surface Height Anomalies*) dan EMT (*Ekman Mass Transport*). Data yang digunakan pada penelitian ini adalah klorofil-a dari OC-CCI (*Ocean Colour Climate Change Initiative*), SPL dari OISST (*Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*), angin dari ASCAT (*Advanced Scatterometer*), serta SSHA, Rrs 443, dan Rrs 555 dari situs *marine Copernicus* yang diolah dengan metode komposit menggunakan *software* IDL (*Interactive Data Language*) dan NCL (*NCAR Command Language*). Puncak *upwelling* terjadi pada bulan Agustus (musim timur) yang ditandai dengan penurunan SPL (26.66 °C) dan SSHA (-2.27cm), EMT (5.27 m<sup>2</sup>/s), serta peningkatan klorofil-a hingga 0.80 mg/m<sup>3</sup>, dan indeks *upwelling* yang bernilai positif (0.948 °C). Hasil Rrs 443 dan Rrs 555 yang tergolong rendah mengindikasikan bahwa terdapat kelimpahan fitoplankton pada Selat Makassar. Musim timur (JJA) EOF1 dan PC1 sebesar 40.0 % serta EOF2 dan PC2 sebesar 10.9%. Hasil EOF1 memiliki pola yang mirip dengan peta spasial klimatologi klorofil-a. Hal tersebut dipengaruhi oleh faktor fisik seperti angin. Nilai anomali positif maupun negatif dipengaruhi fenomena iklim seperti El Nino dan La Nina yang terjadi pada tiap tahunnya. Pada hasil EOF juga didapatkan variabilitas tinggi pada daerah di sekitar 4° – 6° LS.

**Kata kunci:** EOF, Klorofil-a, Selat Makassar, *Upwelling*

### Abstract

#### *Temporal Variations in Upwelling Dynamics in the Makassar Strait for the 2007-2021 Period*

*The Makassar Strait is the main route of the Indonesian Cross Flow (ARLINDO). This geographical location causes the Makassar Strait to have high upwelling variability. The aim of this research is to examine the seasonal variability of upwelling spatially and temporally in the Makassar Strait based on the upwelling index, chlorophyll-a, Rrs 443 and 555 values, SST (Sea Surface Temperature), SSHA (Sea Surface Height Anomalies) and EMT (Ekman Mass Transport). The data used in this research are chlorophyll-a from OC-CCI (Ocean Colour Climate Change Initiative), SST from OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature), wind from ASCAT (Advanced Scatterometer), and SSHA, Rrs 443, and Rrs 555 from the Copernicus marine site which were processed using the composite method using IDL (Interactive Data Language) and NCL (NCAR Command Language) software. The peak of upwelling occurred in August (eastern season) which was marked by a decrease in SST (26.66 °C) and SSHA (-2.27cm), EMT (5.27 m<sup>2</sup>/s), as well as an increase in chlorophyll-a up to 0.80 mg/m<sup>3</sup>, and the upwelling index is positive (0.948 °C). The results of Rrs 443 and Rrs 555 which are relatively low indicate that there is an abundance of phytoplankton in the Makassar Strait. East monsoon (JJA) EOF1 and PC1 is 40.0% and EOF2 and PC2 is 10.9%. The EOF1 results have a similar pattern to the spatial map of chlorophyll-a climatology. This is influenced by physical factors such as wind. Positive and negative anomaly values are influenced by climate phenomena such as El Nino and La Nina which occur every year. The EOF results also show high variability in the area around 4° – 6° South Latitude.*

**Keywords:** EOF, Chlorophyll-a, Makassar Strait, *Upwelling*

\*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v13i1.55838

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 24-06-2023

Disetujui/Accepted : 12-01-2024

**PENDAHULUAN**

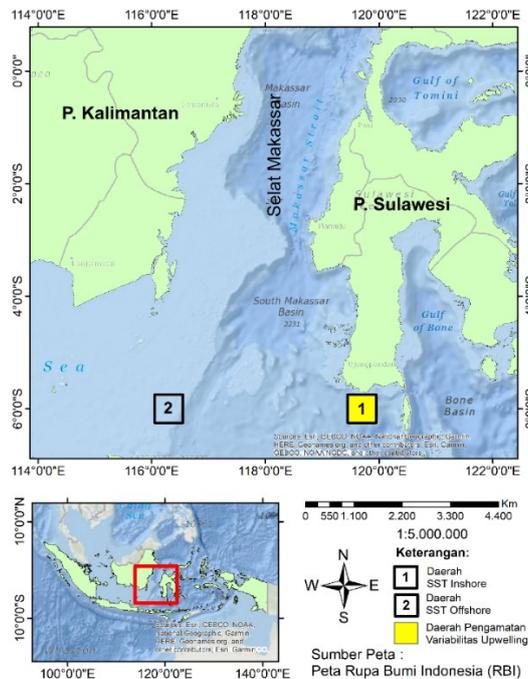
Laut Indonesia memainkan peran penting dalam system dan iklim global karena Indonesia dilalui oleh ARLINDO yang mengalir dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia. ARLINDO melewati perairan antara Mindanao dan Halmahera dengan Selat Makassar sebagai jalur utamanya (Susanto *et al.*, 2012). Letak geografis dari Selat Makassar ini yang menyebabkan Selat Makassar memiliki variabilitas *upwelling* yang tinggi. Proses terjadinya pengangkatan massa air di selatan Selat Makassar terjadi karena adanya pertemuan antara dua massa air dari Laut Flores dan Selat Makassar yang bergerak ke Laut Jawa. Hal tersebut menyebabkan pergerakan massa air permukaan ke arah barat dan munculnya ruang kosong di bagian barat Selat Makassar yang merupakan titik awal kemunculan *upwelling* (Tomascik dan Mah, 2013). Selain pengaruh dari massa air dalam selat, keadaan iklim di luar selat (pola pergerakan angin) juga dapat memengaruhi variabilitas *upwelling*. Hal tersebutlah yang menyebabkan penelitian fenomena *upwelling* pada Selat Makassar penting untuk dilakukan. Penelitian *upwelling* di Selat Makassar juga dapat bermanfaat untuk studi serta pemanfaatan sumber daya perairan di perairan Indonesia bagian Timur.

Penelitian tentang *upwelling* di Selat Makassar telah dilakukan oleh banyak peneliti

seperti yang dilakukan oleh Nababan *et al.* (2016), Utama *et al.* (2017), dan Zainuddin *et al.* (2021). Penelitian *upwelling* di Selat Makassar telah dilakukan secara *in situ* maupun dengan penginderaan jauh. Selain itu parameter pelengkap untuk mengidentifikasi fenomena *upwelling* adalah SPL dan transpor Ekman (EMT) (Benazzouz *et al.* 2014). Namun penelitian terdahulu tersebut hanya berfokus pada proses *upwelling* yang disebabkan oleh perubahan fisik, kimia, serta biologi. Sedangkan dalam penelitian menyertakan perhitungan indeks *upwelling* dan penggunaan metode analisis EOF pada parameter klorofil-a tiap musim di Selat Makassar dengan rentang waktu yang panjang. Maka dari itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji variabilitas musiman *upwelling* secara spasial dan temporal di Selat Makassar berdasarkan indeks *upwelling*, klorofil-a, nilai Rrs 443 serta 555, SPL, SSHA, dan EMT guna pemanfaatan sumber daya perairan di kawasan tersebut.

**MATERI DAN METODE**

Penelitian ini dilakukan dengan pengolahan data satelit di Selat Makassar dengan batas area kajian pada koordinat 1,82°LS – 6,36 ° LS dan 115,02 ° BT – 121,02 ° BT (Gambar 1) yang diambil selama 15 tahun dari bulan Januari 2007 sampai bulan Desember tahun 2021.



**Gambar 1.** Peta Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan data SPL dari GHRSSST yang akan digunakan untuk menghasilkan indeks *upwelling* berdasarkan data suhu, data angin dari satelit ASCAT (MetOp) yang akan diolah menjadi EMT, data sebaran klorofil-a didapatkan dari OC-CCI yang digunakan untuk data analisis dengan metode EOF, data SSHA yang didapatkan dari satelit altimetri, dan data Rrs 443 dan Rrs 555 yang diunduh dari situs <https://resources.marine.copernicus.eu>.

Data – data tersebut diambil mulai dari bulan Januari 2007 sampai bulan Desember 2021 (15 tahun) di perairan selat Makassar dengan batas area kajian pada koordinat 1,82°LS – 6,36 ° LS dan 115,02 ° BT – 121,02 ° BT.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kuantitatif. Metode penelitian kuantitatif adalah penelitian yang terencana, terstruktur, dan sistematis dari awal hingga pembuatan desain penelitiannya. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif untuk mendeskripsikan dan menjelaskan data yang telah diperoleh, dan menarik kesimpulan dari fenomena serta hasil penelitian dengan menggunakan angka – angka. Pendekatan ini berfungsi untuk memberi gambaran terhadap objek yang diteliti melalui data atau sampel yang telah dikumpulkan. Data yang dikumpulkan adalah data yang sesuai dengan masalah yang ada dan sesuai dengan tujuan penelitian (Sugiyono, 2009). Data yang akan dikumpulkan pada penelitian ini adalah data klorofil-a yang diperoleh dari OC-CCI, Rrs 443, Rrs 555 dari situs marine copernicus, SPL dari OISST, SSHA dari marine copernicus, dan data angin dari ASCAT. Data yang telah dikumpulkan tersebut kemudian akan diproses dan dianalisis sesuai dengan teori yang telah dipelajari agar dapat memperoleh kesimpulan.

### Pengumpulan Data

Data SPL diperoleh dari OISST yang diunduh dari *website* <http://www.remss.com/> dengan resolusi spasial 8x8 km. Data klorofil-a dari OC-CCI yang diunduh dari situs <https://rsg.pml.ac.uk/thredds/catalog-cci.html> dengan 4x4 km. Data angin diperoleh dari ASCAT dengan resolusi spasial 0.125°x 0.125° serta data SSHA dengan resolusi 0.25° x 0.25° yang diunduh dari *website*: <https://resources.marine.copernicus.eu>. Data-data tersebut diunduh data harian selama Januari 2007 hingga Desember 2021 sedangkan untuk data pendukung Rrs 443 dan Rrs 555 diunduh bulanan selama Januari 2007 hingga

Desember 2021 dari situs <https://resources.marine.copernicus.eu>. Data – data tersebut diunduh dengan format data *Net Common Data File* (NetCDF).

### Pengolahan SPL, klorofil a, angin, Rrs 443 serta Rrs 555, dan SSHA

Data SPL, klorofil a, angin, Rrs 443 serta Rrs 555, dan SSHA yang berformat NetCDF dihitung menjadi komposit bulanan (*monthly*) lalu kemudian menjadi kompilasi data klimatologi. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* IDL (*Interactive Data Language*).

$$\bar{X}_{(x,y)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi(x, y, t)$$

Keterangan:  $\bar{X}_{(x,y)}$  = rata-rata bulanan (*monthly climatology*);  $xi(x, y, t)$  = Data harian ke-1 pada posisi bujur (x), lintang (y), dan hari ke-t;  $n$  = jumlah data dalam 1 bulan;  $i = 1$  = Hari ke-1

### Pengolahan Pengolahan EMT

Posisi Selat Makassar yang berdekatan dengan garis khatulistiwa sehingga besar gaya Coriolis akan semakin kecil. Oleh karena hal tersebut, maka EMT dapat dihitung dengan mengikuti persamaan Hsieh dan Boer pada tahun 1992, yaitu sebagai berikut.

$$\tau = \rho_a C_d U_{10}^2 \tag{1}$$

$$EMT_x = \frac{(\delta\tau_x + f\tau_y)}{\rho_\omega(f^2 + \delta^2)} \tag{2a}$$

$$EMT_y = \frac{(\delta\tau_y - f\tau_x)}{\rho_\omega(f^2 + \delta^2)} \tag{2b}$$

Di mana  $\rho_a$  adalah densitas udara (1.25 kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_\omega$  adalah densitas air laut (1025 × 103 kg/m<sup>3</sup>),  $C_d$  adalah koefisien drag,  $U_{10}$  adalah kecepatan angin 10 m di atas permukaan laut,  $\delta$  adalah parameter pembuangan gesekan (480<sup>-1</sup> hari), dan  $f$  adalah parameter Coriolis.  $EMT_x$  dan  $EMT_y$  masing-masing menunjukkan EMT dalam arah zonal dan meridional.

### Pengolahan Indeks *Upwelling* Berdasarkan Suhu

Indeks *upwelling* berbasis suhu atau *Temperature Upwelling Index* (TUI) dapat dihitung dari selisih antara suhu permukaan laut di wilayah lepas pantai (*offshore*) dan dekat pantai (*inshore*). Wilayah lepas pantai sebagai perwakilan wilayah yang tidak dipengaruhi oleh *upwelling* sedangkan wilayah dekat pantai adalah wilayah

yang dipengaruhi oleh *upwelling*. Perbedaan wilayah yang digunakan untuk menghitung indeks *upwelling* dapat menentukan perbedaan suhu pada wilayah yang dipengaruhi *upwelling* dan tidak dipengaruhi *upwelling*. Menurut Benazzouz *et al.* (2014), persamaan indeks *upwelling* berdasarkan suhu adalah sebagai berikut.

$$TUI = SST_{offshore} - SST_{inshore}$$

**Metode Analisis Data**

*Empirical Orthogonal Function* (EOF) memiliki tujuan untuk menyederhanakan variabilitas dari suatu dataset dengan membentuk variabel baru yang dapat menggambarkan pola keseluruhan dataset dengan baik (Qiu dan Zhou, 2019). Data yang digunakan untuk metode analisis EOF adalah klorofil-a dari OC-CCI yang diolah dengan *software* NCL. Variabel baru tersebut berupa pola spasial (EOF) dan pola temporal atau *principal component* (PC).

Bidang yang akan dianalisis akan diproses terlebih dahulu untuk mendapatkan matriks data anomali  $X_{m \times n}$ . Kemudian untuk matriks kovarians sampel dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$C_{m \times m} = \frac{1}{n} X X^T \tag{1}$$

Matriks  $V = [V_1, V_2, \dots, V_n]$  dengan unsur kolom adalah vektor ciri – vektor ciri yang berpadanan dengan akar ciri yang tertata dari matriks  $C$ . Akar – akar ciri tersebut tidak boleh sama, maka vektor ciri yang bersesuaian bersifat saling bebas (Ismunarti, 2013). Matriks  $C$  dapat diuraikan berdasarkan menjadi lebih lanjut sebagai berikut:

$$C_{m \times m} V_{m \times m} = V_{m \times m} \Lambda_{m \times m} \tag{2}$$

Pada persamaan tersebut  $\Lambda$  adalah vektor satuan berisi vektor singular yang berpadanan dengan nilai singular. Di mana vektor singular merupakan vektor satuan.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_m \end{bmatrix}$$

Nilai singular terurut dengan urutan menurun dari nilai terbesar hingga terkecil seperti  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$ . Vektor singular yang sesuai dengan setiap nilai singular dapat disebut dengan EOF. Misalnya, vektor satuan yang

bersesuaian dengan  $\lambda_1$  adalah mode EOF pertama, yang merupakan kolom pertama dari matriks  $V$ , yaitu  $EOF_1 = V_1$ , dan seterusnya,  $EOF_n = V_n$ .

*Principal Component* (PC) dapat dihitung dengan memproyeksikan EOF ke matriks data asli  $X$ , yang menghasilkan koefisien waktu yang sesuai dengan semua vektor singular spasial, yaitu sebagai berikut.

$$PC_{m \times n} = V_{m \times m}^T \times X_{m \times n} \tag{3}$$

Setiap baris data dalam PC adalah koefisien waktu yang sesuai dengan setiap vektor satuan. Misalnya, PC1 adalah koefisien waktu yang sesuai dengan EOF1. Dengan cara ini, matriks data asli  $X$  dapat didekomposisi menjadi EOF dan PC dengan bidang ruang dan waktu.

$$X = EOF \times PC \tag{4}$$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Variabilitas Klorofil-a**

Klorofil-a yang tinggi pada perairan dapat mengindikasikan terjadinya fenomena *upwelling* pada perairan tersebut. Pada wilayah Selat Makassar terdapat intensitas klorofil-a tertinggi pada bulan Agustus (musim timur) sebesar 0.80 mg/m<sup>3</sup>, hal tersebut dapat membuktikan terjadinya puncak *upwelling* di Selat Makassar terutama pada bagian Selatan Selat Makassar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kunarso *et al.* (2022) di Selat Makassar, konsentrasi klorofil-a terendah terjadi pada bulan November (musim peralihan II) sebesar 0,28 mg/m<sup>3</sup> dan tertinggi terjadi pada bulan Agustus (musim timur) sebesar 1,86 mg/m<sup>3</sup>. Menurut Inaku (2011), konsentrasi klorofil-a yang mulai meningkat pada bulan Juni dan mencapai nilai maksimum pada bulan Agustus. Sedangkan pada akhir musim peralihan II (oktober) diperkirakan sebagai akhir dari fenomena *upwelling*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan klorofil-a bulan November pada Selat Makassar hanya mencapai 0.24 mg/m<sup>3</sup>, nilai tersebut merupakan nilai yang terendah dibandingkan dengan bulan lainnya. Hal tersebut juga dapat mengindikasikan terjadinya *downwelling* pada bulan November di Selat Makassar. Konsentrasi klorofil-a semakin tinggi ketika mendekati pesisir (dekat pantai) dari perairan Selat Makassar bagian Selatan. Pada peta spasial juga dapat dilihat distribusi konsentrasi klorofil-a di sekitar pulau Kalimantan memiliki nilai yang besar pula.

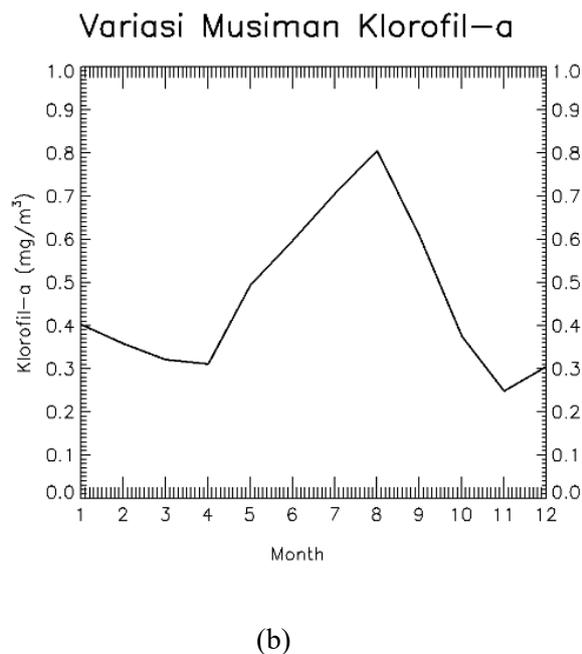
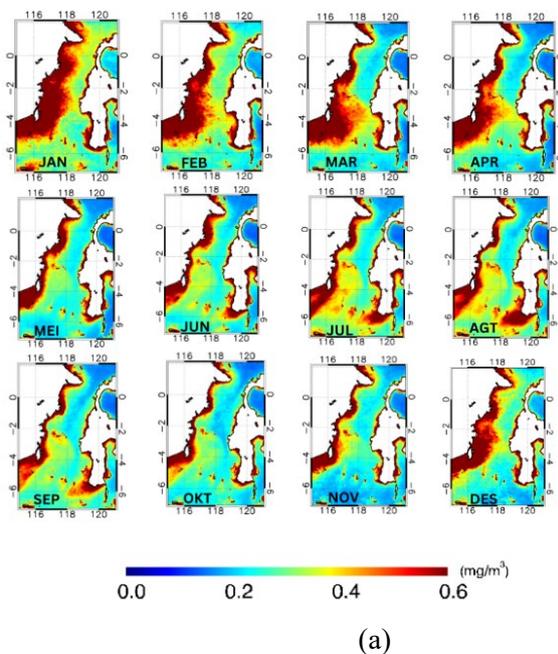
**Analisis EOF**

Analisis EOF pada parameter klorofil-a dilakukan selama 12 bulan selama periode 2007 hingga 2021 yang dibagi berdasarkan musim, yaitu musim barat (bulan DJF), musim peralihan I (bulan MAM), musim timur (bulan JJA), dan musim peralihan II (bulan SON). Hasil yang diperoleh dari pengolahan tersebut cukup bervariasi. Pada bulan DJF EOF1 sebesar 51.6 % sedangkan untuk mode kedua atau EOF2 bulan DJF sebesar 8.3% dari total varians sama halnya dengan nilai varians pada PC1 dan PC2 pada bulan tersebut. Pola yang diperoleh dari grafik PC adalah pola tahunan atau *interannual*. EOF1 bulan DJF memiliki karakteristik yang mirip karena pengaruh monsun barat yang terjadi pada bulan DJF. Selama bulan DJF tekanan angin mengalir dari Selat Karimata menuju Laut Jawa dan berlanjut ke arah timur. Saat melewati Selat Makassar bagian Selatan membelok ke arah tenggara. Tekanan angin di Selat Makassar mengalir dari utara ke arah selatan dan ketika bertemu dengan aliran angin yang berasal dari Laut Jawa, angin tersebut akan berbelok ke arah tenggara pula (Syahdan *et al.*, 2021). Nilai anomali relatif positif selama periode 2007 hingga 2021. Nilai anomali positif tertinggi didapatkan pada tahun 2015 hingga 2016 pada PC1 DJF. Hal tersebut dapat disebabkan oleh fenomena iklim seperti El Nino yang sangat kuat pada tahun

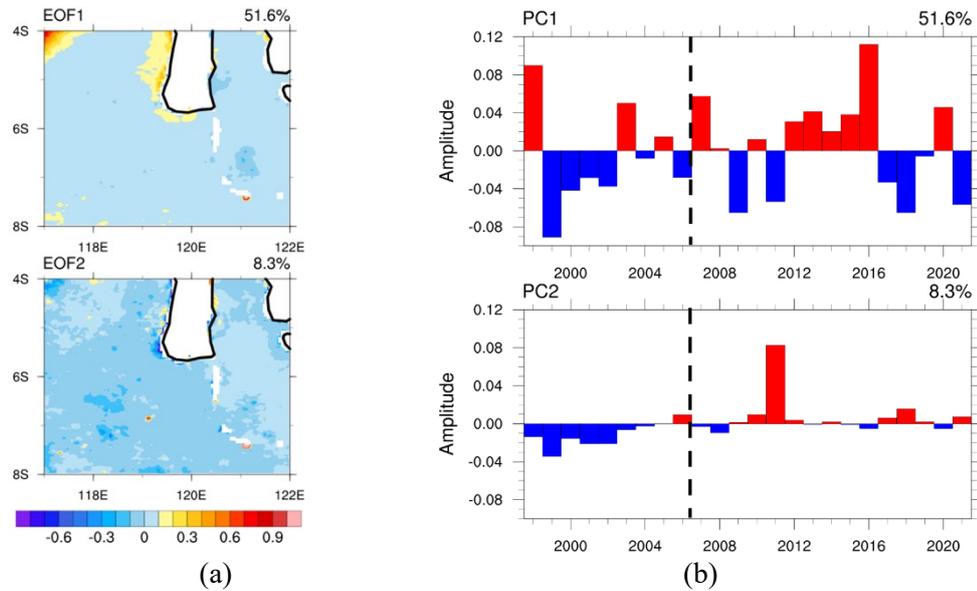
2015/2016 sehingga memengaruhi nilai anomali pada parameter klorofil-a.

Bulan MAM EOF1 menjelaskan 35% dan EOF2 bulan MAM menjelaskan 13.1% dari keseluruhan varians sama halnya dengan nilai varians pada PC1 dan PC2 pada bulan tersebut. EOF1 memiliki kemiripan dengan hasil peta spasial klimatologi klorofil-a pada bulan MAM. Hasil tersebut mirip dengan bulan sebelumnya yaitu bulan DJF karena masih mendapat pengaruh dari monsun barat. Pada peta spasial klimatologibulan MAM dan EOF1 bulan MAM memiliki pola persebaran klorofil-a yang mirip. Nilai anomali pada MAM juga relatif positif, namun terdapat perbedaan pada PC1 yang memiliki pola *decadal* sedangkan PC2 berpola tahunan (*interannual*). Nilai anomali tertinggi pada PC1 bulan MAM terdapat pada tahun 2010 hal tersebut juga dapat dipengaruhi oleh fenomena iklim yang terjadi misalnya El Nino menengah pada tahun 2009/2010 atau La nina yang sangat kuat pada tahun 2010/2011.

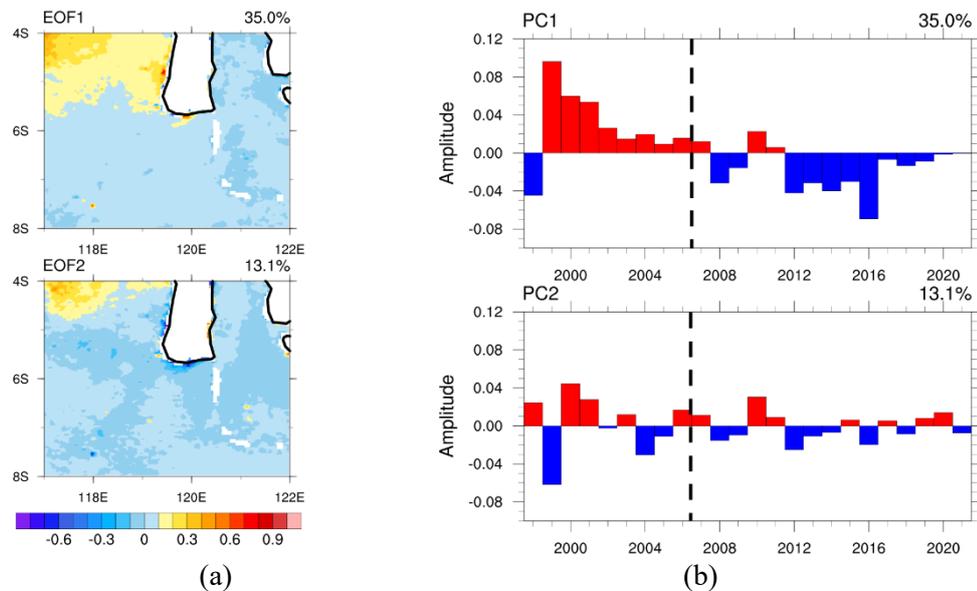
Bulan JJA memiliki variabilitas yang tinggi dan anomali yang relatif positif. EOF1 dan PC1 menjelaskan 40% sementara EOF2 dan PC2 menjelaskan 10.9% dari keseluruhan varians. EOF1 pada bulan JJA memiliki kemiripan dengan hasil peta spasial klimatologi klorofil-a di bulan JJA. Pola persebaran konsentrasi pada peta spasial



**Gambar 2.** Hasil Pengolahan Data Peta Sebaran (a) dan grafik (b) Klorofil-a Klimatologi Bulanan Tahun 2007 – 2021 di Perairan Selat Makassar



**Gambar 3.** Hasil Pengolahan Data EOF 1 dan 2 bulan DJF (a) dan PC 1 dan 2 bulan DJF (b) di Selat Makassar



**Gambar 4.** Hasil Pengolahan Data EOF 1 dan 2 bulan MAM (a) dan PC 1 dan 2 bulan MAM (b) di Selat Makassar

klimatologi klorofil-a dan sebaran varibilitas EOF1 dan memiliki pola dan letak mirip. Pola klorofil-a dapat dipengaruhi oleh monsun timur yang arah tekanan angin permukaannya ke arah barat laut yang menjadi sangat intensif ketika memasuki Laut Flores. Tekanan angin dengan arah ini terus masuk ke Selat Makassar bagian selatan, Laut Jawa, dan Selat Karimata. Pada periode monsun timur, arah angin sebagian dibelokkan ke arah utara saat mencapai Selat Makassar bagian selatan (Syahdan *et al.*, 2021). EOF2 bulan sebelumnya, yaitu DJF

dan MAM memiliki karakteristik yang mirip dengan EOF2 pada bulan JJA (sama halnya dengan bulan SON) yang memiliki persebaran klorofil-a dengan anomali negatif. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh peristiwa La Nina yang terjadi pada area tersebut. Menurut Seprianto *et al.* (2016), pengaruh variabilitas SPL dan klorofil-a terjadi pada periode – periode khusus, yaitu ketika fenomena El Nino kuat berlangsung bersamaan dengan IOD positif kuat memicu terjadinya SPL dingin dan klorofil-a tinggi, selanjutnya ketika

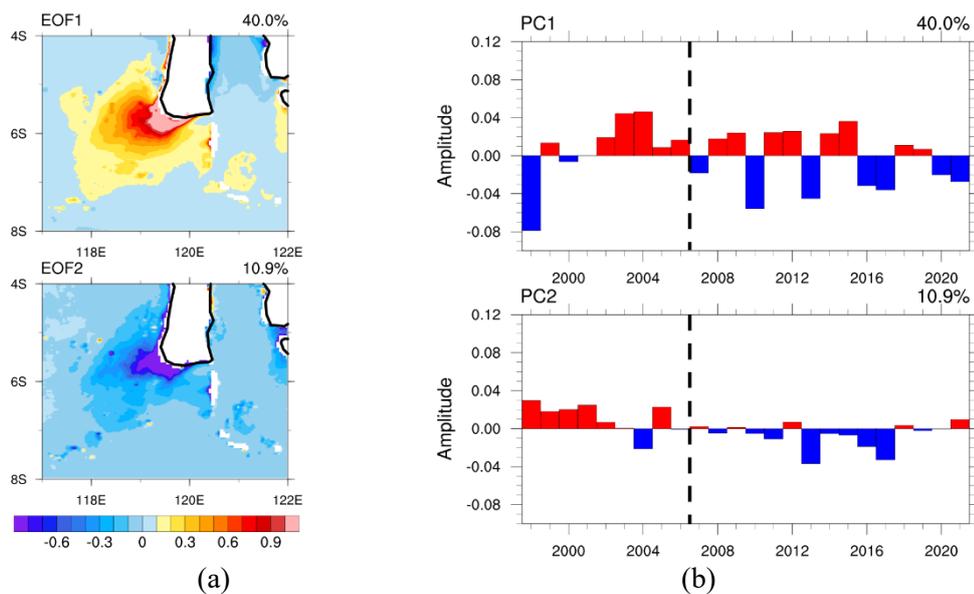
fenomena La Nina kuat berlangsung bersamaan dengan IOD negatif kuat memicu terjadinya SPL hangat dan konsentrasi klorofil-a rendah. Peristiwa La nina tersebut juga berpengaruh pada peningkatan transpor massa air dan SPL di lintasan yang dilalui ITF (Syahdan *et al.*, 2021). Variabilitas antartahun saat El nino terjadi menyebabkan SST minimum sedangkan SST maksimum terjadi pada saat peristiwa La nina. Pola tersebut dapat terjadi ketika fenomena La nina (Jordain *et al.*, 2013). Mode PC1 dan PC2 di JJA cenderung *interannual*. PC1 dan PC2 bulan JJA cenderung memiliki nilai anomali yang positif. PC1 bulan JJA memiliki nilai anomali tertinggi pada tahun 2015 sedangkan PC2 bulan JJA memiliki nilai anomali tertinggi pada tahun 2021. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh fenomena iklim seperti El Nino yang sangat kuat pada tahun 2015/2016 atau La Nina menengah pada tahun 2020/2021.

Bulan SON EOF1 dan PC1 menjelaskan 57.4% dan EOF2 dan PC2 menjelaskan 19.5% dari keseluruhan varians. Pola persebaran klorofil-a pada EOF1 memiliki kemiripan dengan peta spasial klimatologi klorofil-a pada bulan SON. Pola EOF1 dan EOF2 SON mirip dengan JJA dengan variabilitas rendah. Hal tersebut disebabkan oleh monsun timur yang memengaruhi variabilitas pada bulan SON. PC1 bulan SON nilai anomalnya positif dan nilai tertinggi pada tahun 2014 hal ini karena pada tahun tersebut terjadi El-Nino. PC2 bulan SON nilai anomali yang kecil dan cenderung negative dengan nilai tertinggi pada tahun 2011.

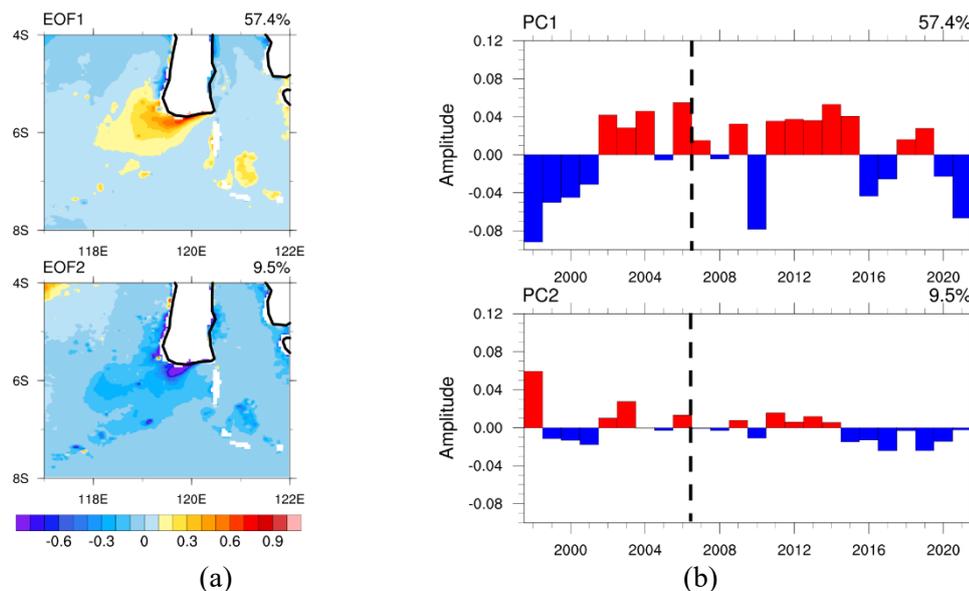
Menurut Wijaya dan Hisaki (2021), kejadian El Nino tercatat pada tahun 2006/2007, 2009/2010, 2014/2015, dan 2015 /2016. Sedangkan La Nina, yakni pada tahun 2007/2008, 2008/2009, 2010/2011, 2011/2012, dan 2016/2017. Nilai anomali positif maupun negatif yang didapatkan dapat dipengaruhi oleh fenomena yang terjadi pada tiap tahunnya. Menurut Wirasatriya *et al.* (2021), anomali positif klorofil-a banyak muncul di perairan Indonesia bagian barat, yaitu Selat Malaka, Laut Cina Selatan, Laut Jawa, Selat Makassar, Laut Sulawesi, dan laut sepanjang bagian utara Kepulauan Sunda Kecil. Hal tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh untuk anomali positif dominan yang ada di Perairan Selat Makassar. Pada hasil EOF juga didapatkan variabilitas tinggi pada daerah di sekitar 4° – 6° LS.

**Rrs 443 dan Rrs 555**

Peta persebaran klorofil-a pada Gambar 2 dapat diestimasi keberadaan klorofil-a (fitoplankton) maupun sedimentasinya dengan menggunakan data satelit yang diolah menjadi peta spasial yang mampu membandingkan klorofil-a dan sedimentasi yang dapat terjadi pada lokasi tersebut. Data satelit yang digunakan untuk mengestimasi keberadaan klorofil-a adalah Rrs 443 dan Rrs 555. Rrs 443 dan Rrs 555 memperkirakan keberadaan fitoplankton dan sedimen tersuspensi. Hal tersebut disebabkan karena kuatnya penyerapan (reflektan) Rrs 443 oleh fitoplankton (Rrs 555 oleh sedimen tersuspensi). Dengan demikian, semakin tinggi aph 443 dan bbb 555



**Gambar 5.** Hasil Pengolahan Data EOF 1 dan 2 bulan JJA (a) dan PC 1 dan 2 bulan JJA (b) di Selat Makassar



**Gambar 6.** Hasil Pengolahan Data EOF 1 dan 2 bulan SON (a) dan PC 1 dan 2 bulan SON (b) klorofil-a di Selat Makassar

menunjukkan semakin banyak biomassa fitoplankton dan semakin tinggi konsentrasi sedimen tersuspensi. Selain itu, area dengan Rrs 443 rendah (Rrs 555 tinggi) sesuai dengan area dengan aph 443 tinggi (bbp 555 tinggi), yang menunjukkan koefisien penyerapan fitoplankton yang tinggi pada 443 nm, dan koefisien hamburan balik partikulat yang tinggi, pada 555 nm. Dengan demikian, pengamatan klorofil-a di daerah kedua bisa jadi bias dengan kondisi air yang keruh (Wirasatriya *et al.*, 2021). Hal tersebut dapat diamati dengan melihat tinggi maupun rendahnya nilai yang ditampilkan pada masing – masing peta spasial di Selat Makassar. Pada Gambar 7(a) ditampilkan nilai yang berkisar 0.00345 s/r (pada bulan Februari) hingga 0.00522 s/r (pada bulan Oktober) untuk Rrs 443. Pada Gambar 7(b) ditampilkan nilai Rrs 555 yang berkisar 0.00213 s/r (pada bulan Agustus) hingga 0.00318 s/r (pada bulan Desember). Hasil yang diperoleh dari pengolahan Rrs 443 dan 555 menghasilkan nilai yang tergolong rendah. Menurut Munandar *et al.* (2023), Rrs 443 nm yang rendah dapat mengindikasikan kuatnya penyerapan Rrs 443 nm oleh fitoplankton sedangkan nilai Rrs 555 nm yang rendah menunjukkan sedimen tersuspensi yang rendah. Dari pernyataan tersebut dapat disimpulkan bahwa keberadaan klorofil-a di Selat Makassar tergolong kuat dengan sedimentasi yang rendah. Kontaminasi yang minim dari sedimentasi juga dapat membuat Selat Makassar menjadi

daerah penelitian yang ideal untuk variabilitas *upwelling* berdasarkan klorofil-a.

#### SPL

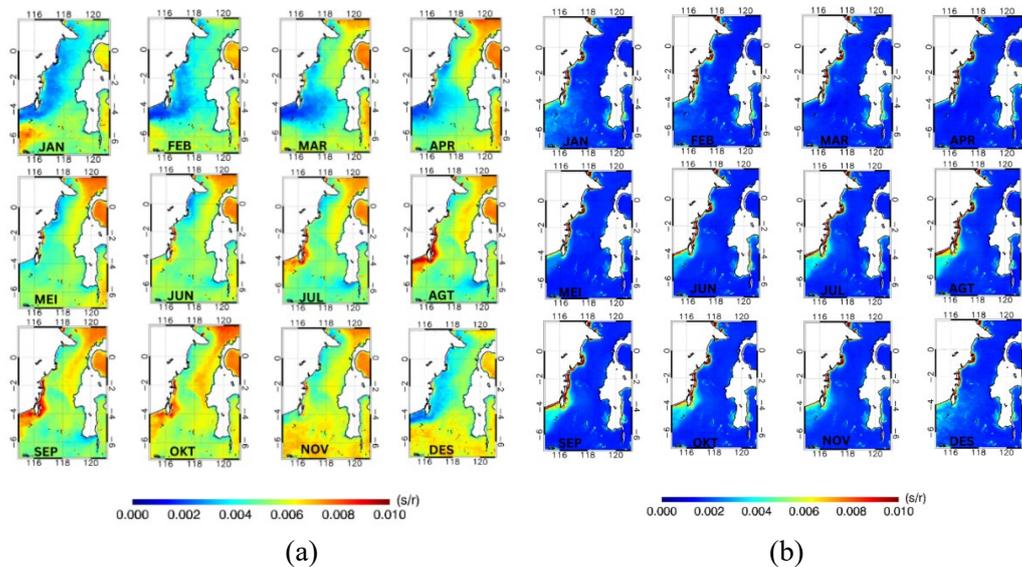
Parameter lain yang dapat menjadi indikator *upwelling* pada suatu perairan adalah SPL. Nilai SPL yang diperoleh pada Selat Makassar dapat dilihat pada Gambar 5. menampilkan puncak tertinggi nilai SPL terjadi pada bulan Desember mencapai 29.85°C dan nilai terendah pada musim timur yaitu bulan Agustus mencapai 26.85°C. Kisaran suhu pada Selat Makassar ada pada rentang 26 - 31°C. Pola penyebaran SPL di bagian selatan Perairan Selat Makassar pada bulan Desember-Februari (musim barat) memperlihatkan penyebaran suhu yang relatif tinggi. Memasuki awal periode musim timur yaitu bulan Mei mulai terlihat adanya penurunan suhu di bagian selatan Selat Makassar. Penurunan tersebut berlanjut hingga pada bulan Juni dan Juli yang mengindikasikan adanya gejala permulaan *upwelling* (Inaku, 2011). Menurut Atmadipoera dan Widastuti (2014), secara umum variasi SPL pada Selat Makassar berkisar 26.5°C hingga 30°C. Suhu rendah terjadi pada bagian timur selat sekitar 5.7°LS-5.9°LS pada musim timur. Hal ini dapat terjadi karena adanya fenomena naiknya massa air di lapisan bawah ke lapisan permukaan dengan kata lain terjadi *upwelling*. Pernyataan tersebut juga sesuai dengan hasil yang telah diperoleh pada penelitian ini, pada bulan Agustus di perairan Selat

Makassar terjadi puncak *upwelling* karena adanya penurunan suhu.

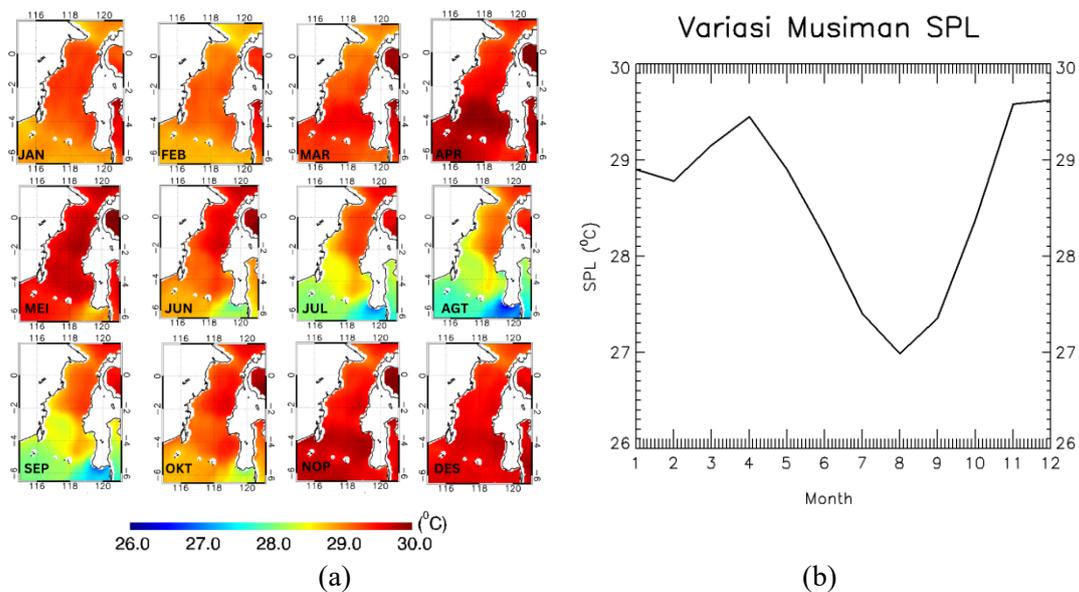
**SSHA**

SSHA dapat menjadi indikator terjadinya *upwelling* pada perairan Selat Makassar. Pada studi sebelumnya yang dilakukan oleh Radjawane dan Azminuddin (2016), Selat Makassar mengalami peningkatan rata – rata tinggi muka air laut bulanan saat Noerthwest Monsoon berkisar 3-9 cm. Permukaan laut meningkat dari utara ke bagian selatan Selat Makassar. Ketinggian maksimum

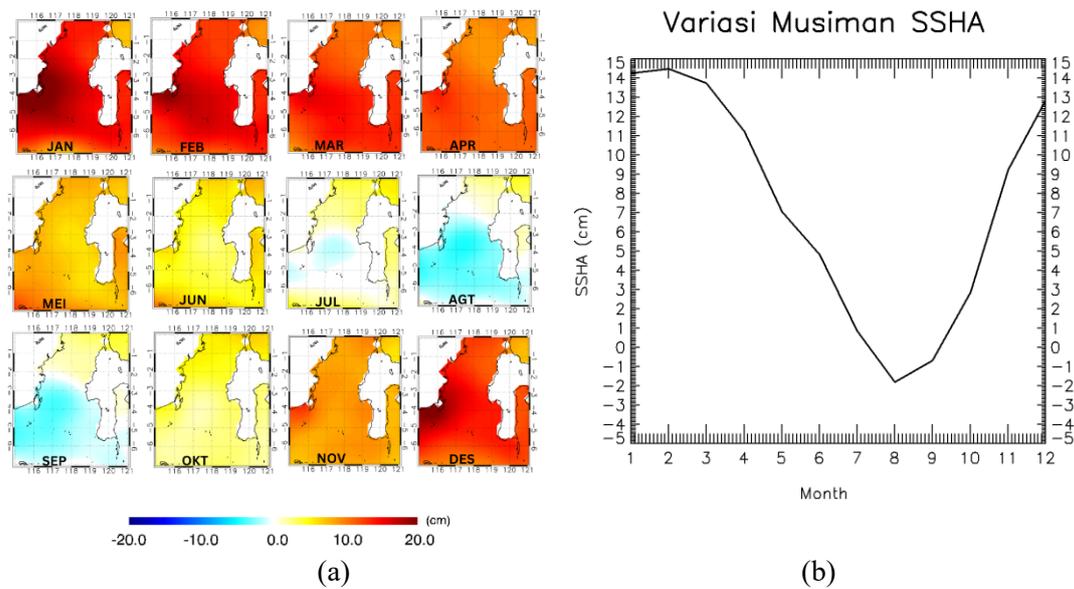
terdapat pada bagian Selatan selat pada akhir bulan Februari. Sedangkan saat Southeast Monsoon pada bulan Juni hingga Agustus tinggi muka air laut mengalami penurunan hingga -1 sampai -8cm, penurunan muka laut dari utara ke selatan selat. Pernyataan tersebut sesuai dengan data yang diperoleh pada penelitian ini (Gambar 6), yaitu SSHA pada bulan Februari memiliki nilai tertinggi sebesar 15.28cm dan paling rendah pada bulan Agustus sebesar -2.27cm yang menunjukkan adanya potensi terjadinya *upwelling* pada musim timur di Selat Makassar.



**Gambar 7.** Hasil Pengolahan Data Peta Estimasi Keberadaan Klorofil-a Rrs 443 (a) dan Rrs 555 (b) Klimatologi Bulanan Tahun 2007 – 2021 di Perairan Selat Makassar



**Gambar 8.** Hasil Pengolahan Data Peta Sebaran (a) dan grafik (b) SPL Klimatologi Bulanan Tahun 2007 – 2021 di Perairan Selat Makassar



**Gambar 9.** Hasil Pengolahan Data Peta Sebaran (a) dan grafik (b) SSHA Klimatologi Bulanan Tahun 2007 – 2021 di Perairan Selat Makassar

**Hubungan SPL, Klorofil-a, dan SSHA**

Nilai – nilai yang tertera pada Tabel 1 diperoleh dari daerah pengamatan variabilitas *upwelling* pada koordinat 5.75 – 6.25°LS dan 119.45 – 119.95°BT (kotak kuning) di Gambar 1 Hubungan suhu SPL, klorofil – a, dan SSHA dapat dilihat pada Gambar 10 Grafik tersebut menunjukkan nilai parameter SPL dan SSHA cenderung memiliki kesamaan pada bulan Agustus (musim timur), yaitu keduanya memiliki nilai terendah sebesar 26.85°C dan -2.2cm. Kedua parameter tersebut sama – sama memiliki nilai terendah pada bulan Agustus. Hal tersebut juga sesuai dengan rata – rata musiman pada kedua parameter tersebut. SPL pada bulan DJF sebesar 29.15°C, bulan MAM sebesar 29.13°C, bulan JJA sebesar 27.33°C, dan bulan SON sebesar 28.35°C. SSHA pada bulan DJF sebesar 14.66cm, bulan MAM sebesar 10.55, bulan JJA sebesar 0.86cm, dan bulan SON sebesar 3.85cm. Hasil rata – rata musiman SPL maupun SSHA memiliki nilai terendah pada musim barat (bulan JJA). Sedangkan untuk parameter klorofil-a nilai tertinggi terdapat pada bulan Agustus sebesar 0.80 mg/m<sup>3</sup>. Hasil rata – rata musiman pada parameter klorofil-a pada bulan DJF sebesar 0.35 mg/m<sup>3</sup>, bulan MAM sebesar 0.37 mg/m<sup>3</sup>, bulan JJA sebesar 0.70 mg/m<sup>3</sup>, dan bulan SON sebesar 0.41 mg/m<sup>3</sup>. Nilai rata – rata musiman terbesar klorofil-a terdapat pada musim barat (bulan JJA).

Pernyataan yang diperoleh dari tiga parameter tersebut dapat mengindikasikan terjadinya fenomena *upwelling* pada daerah tersebut.

**EMT**

Menurut Utama *et al.* (2017), angin muson tenggara (*Southeast Monsoon*) yang berhembus di sekitar selatan Selat Makassar dapat menjadi faktor penyebab terjadinya *upwelling*. Angin tersebut berpotensi mengangkut massa air yang dikenal sebagai *Ekman transport*. Pola intensitas transpor selama periode Mei hingga Agustus, intensitas transportasi mengalami peningkatan. Pada bulan agustus transport Ekman meningkat hingga mencapai nilai 8.50 m<sup>2</sup>/s. Hal tersebut sesuai dengan nilai yang diperoleh pada penelitian ini, yaitu nilai tertinggi Ekman transport terdapat pada bulan Agustus sebesar 5.27 m<sup>2</sup>/s dengan arah menjauhi pantai. Menurut Kunarso *et al.* (2022), pola pergerakan angin dari arah tenggara menuju barat dan barat laut yang cenderung sejajar dengan garis pantai di selatan Selat Makassar. Transpor Ekman yang membawa massa air bergerak menjauhi pantai menuju ke arah Barat Daya. Transpor Ekman yang mengakibatkan *upwelling*, yaitu saat suhu permukaan laut (SPL) menjadi lebih dingin dan konsentrasi klorofil-a menjadi tinggi. Hal tersebut diperkuat lagi melalui penelitian yang dilakukan oleh Wirasatriya *et al.* (2021), pada daerah Belahan Bumi Selatan (BBS) angin timur

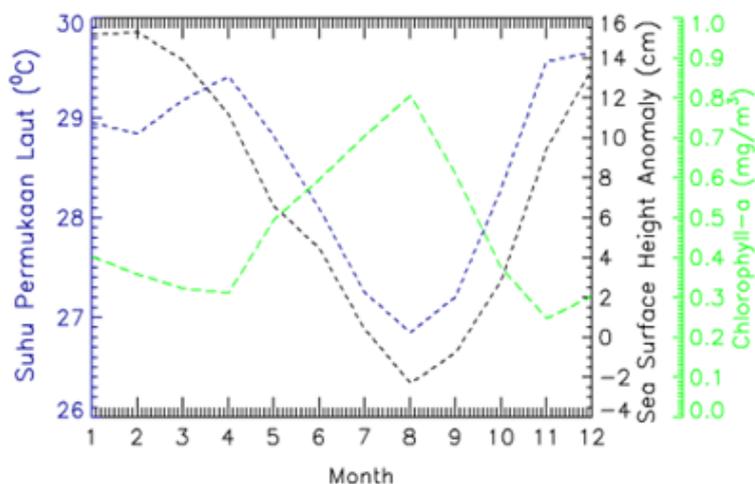
yang kuat dapat menghasilkan Ekman transpor lepas pantai ke arah selatan yang dapat mengurangi nilai SPL dan meningkatkan konsentrasi klorofil-a yang berarti terjadi fenomena *upwelling* pada daerah pantai tersebut. Menurut Benazzouz *et al.* (2014), transpor Ekman dan anomali SPL memiliki keterkaitan intrinsik yang dapat digunakan sebagai variabel pelengkap untuk menyelidiki status *upwelling*. Pada penelitian tersebut juga mendapatkan korelasi musiman yang tinggi dan signifikan antara angin meridional dan indeks *upwelling* berdasarkan suhu.

### Indeks *Upwelling*

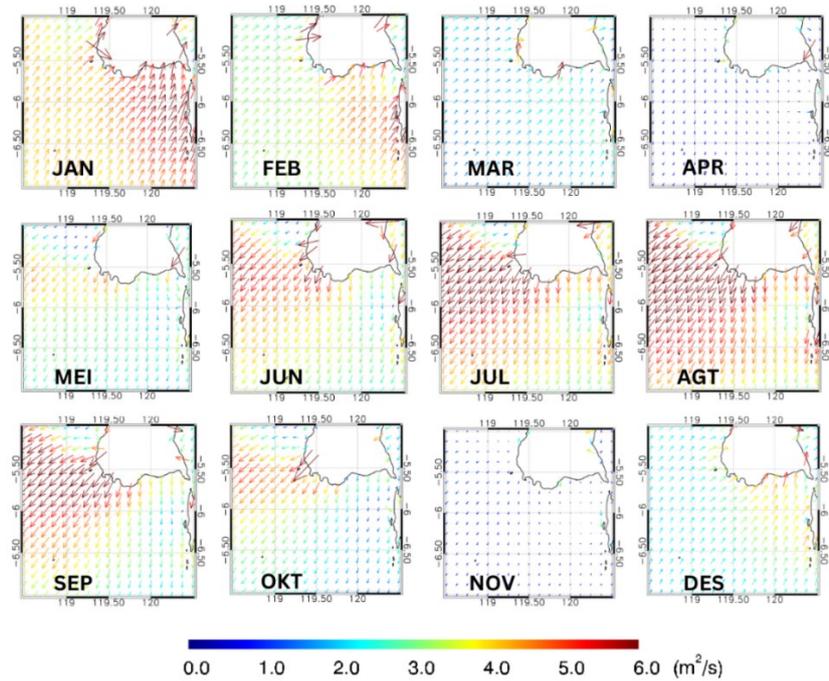
Indeks *upwelling* berdasarkan suhu dapat didefinisikan sebagai wilayah yang memiliki perbedaan SPL di lepas pantai dan dekat pantai. Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 12 adalah grafik klimatologi bulanan indeks *upwelling* selama 15 tahun. Nilai indeks *upwelling* pada perairan tersebut berkisar antara  $-0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$  hingga  $0.948\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nilai tertinggi indeks *upwelling* terjadi ada bulan Agustus (musim timur) sebesar  $0.948\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Secara umum nilai TUI selama muson tenggara

**Tabel 1.** Variabilitas Bulanan Klimatologi SPL, Klorofil-a, dan SSHA selama 15 tahun (Januari 2007 – Desember 2021) di Selat Makassar

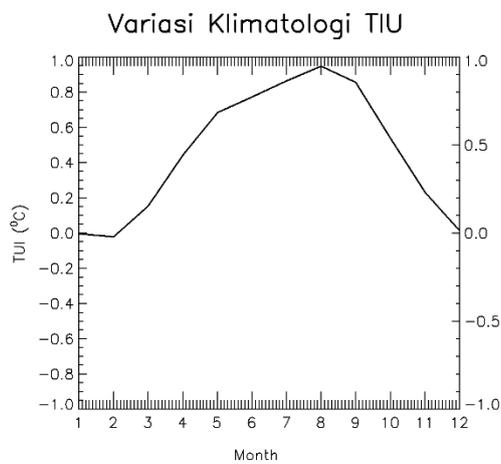
Bulanan Klimatologi			
Bulan	SPL ( $^{\circ}\text{C}$ )	Klorofil-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	SSHA (cm)
1	28.95789	0.40232	15.19476
2	28.84182	0.35810	15.28580
3	29.17665	0.32209	13.92815
4	29.42021	0.31110	11.16855
5	28.82290	0.49428	6.58207
6	28.08881	0.59768	4.45421
7	27.25461	0.70527	0.42788
8	26.85382	0.80573	-2.27815
9	27.21170	0.61021	-0.74457
10	28.29170	0.37569	2.85745
11	29.56926	0.24793	9.44950
12	29.66229	0.30528	13.51768



**Gambar 10.** Hasil Pengolahan Data Grafik Hubungan SPL, Klorofil-a, dan SSHA



**Gambar 11.** Hasil Pengolahan Data Peta Sebaran Vektor EMT Klimatologi Bulanan Tahun 2007 – 2021 di Perairan Selat Makassar



**Gambar 12.** Grafik Klimatologi Bulanan Indeks *Upwelling* berdasarkan Suhu Bulanan Klimatologi Tahun 2007 – 2021 di Perairan Selat Makassar

memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan musim barat. TUI yang memiliki nilai positif menandakan SPL di lepas pantai (*offshore*) jauh lebih hangat dibandingkan dengan dekat pantai (*inshore*). Besarnya nilai indeks *upwelling* sendiri dapat dipengaruhi oleh *La Nina* dan *El Nino*, seperti pada penelitian yang telah dilakukan oleh Atmadiapoera *et al.* (2020), nilai TUI negatif pada saat *La Nina* sedangkan pada saat *El Nino* TUI bernilai positif.

**KESIMPULAN**

Variabilitas *upwelling* di Selat Makassar fluktuatif setiap tahun. Puncak *upwelling* terjadi pada bulan Agustus (musim timur) dengan indeks *upwelling* berdasarkan suhu yang bernilai positif, penurunan SPL dan SSHA, serta peningkatan EMT dan klorofil-a. Suhu rata-rata musiman terendah pada bulan JJA. Nilai SSHA juga bervariasi dan nilai terendah pada bulan JJA. Klorofil-a tertinggi pada bulan Agustus dan rata-rata musiman

tertinggi pada JJA. Penggunaan Rrs 443 dan Rrs 555 mengindikasikan kelimpahan fitoplankton. Variabilitas utama terlihat dalam analisis EOF1 dan PC1 pada masing-masing musim dan dipengaruhi oleh faktor fisik seperti angin. Selat Makassar memiliki variabilitas upwelling yang tinggi, terutama di sekitar  $4^{\circ}$  -  $6^{\circ}$  LS hal tersebut dapat dipengaruhi oleh fenomena iklim tahunan El Nino dan La Nina.

## DAFTAR PUSTAKA

- Atmadipoera, A.S., & Widyastuti, P. 2014. A numerical modeling study on upwelling mechanism in southern Makassar Strait. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 6(2):355-371. doi: 10.29244/jitkt.v6i2.9012
- Benazzouz, A., Mordane, S., Orbi, A., Chagdali, M., Hilmi, K., Atillah, A., Lluís P.J., & Hervé, D. 2014. An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-based approach—The case of the Canary Current upwelling system. *Continental Shelf Research*, 81: 38-54.
- Hsieh, W.W., & Boer, G.J. 1992. Global Climate Change And Ocean Upwelling. *Fisheries Oceanography*, 1(4): 333-338.
- Inaku, D.F. 2011. Analisis pola sebaran dan perkembangan area *upwelling* di bagian selatan Selat Makassar. *Jurnal Administrasi dan Kebijakan Kesehatan Indonesia*, 25(2): p.105533.
- Ismunarti, D.H. 2013. Analisis komponen utama pada hubungan distribusi spasial komunitas fitoplankton dan faktor lingkungan. *Ilmu Kelautan*, 18(1):14-19.
- Jourdain, N.C., Gupta, A.S., Taschetto, A.S., Ummerhofer, C.C., Moise, A.F., & Ashok, K. 2013. The Indo-Australian monsoon and its relationship to ENSO and IOD in reanalysis data and the CMIP3/CMIP5 simulations. *Climate dynamics*, 41: 3073-3102.
- Kunarso, K., Graharto, S.R., & Wulandari, S.Y. Identifikasi Variabilitas Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-A serta Intensitas Upwelling di Selat Makassar. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(2): 206-214.
- Munandar, B., Wirasatriya, A., Sugianto, D.N., Susanto, R.D., & Purwandana, A. 2023. Distinct mechanisms of chlorophyll-a blooms occur in the Northern Maluku Sea and Sulu Sill revealed by satellite data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 102: p.101360.
- Nababan, B., Rosyadi, N., Manurung, D., Natih, N. M., & Hakim, R. 2016. The seasonal variability of sea surface temperature and chlorophyll-a concentration in the south of Makassar Strait. *Procedia Environmental Sciences*. 33: 583-599.
- Qiu, S., & Zhou, W. 2019. Variation in summer rainfall over the Yangtze River region during warming and Hiatus periods. *Atmosphere*, 10(4): p.173.
- Radjawane, I.M., & Azminuddin, F. 2016. Seasonal and semi-annual variability of sea surface height in Makassar Strait. *Journal of Physics: Conference Series*. 739(1):p.012067.
- Seprianto, A., Kunarso, K., & Wirasatriya, A. 2016. Studi pengaruh El Niño Southern Oscillation (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD) terhadap variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a di perairan Karimunjawa. *Journal of Oceanography*, 5(4): 452-461.
- Sugiyono. 2009. *Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R & D*. Alfabeta, Bandung.
- Susanto, R.D., Ffield, A., Gordon, A.L. & Adi, T.R. 2012. Variability of Indonesian throughflow within Makassar Strait, 2004–2009. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117:C9.
- Syahdan, M., Atmadipoera, A.S., Susilo, S.B., & Lumban-Gaol, J. 2021. Spatial and temporal variability of satellite sea surface temperature in the Makassar Strait and the Java Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 944(1): p.012049.
- Tomascik, T. & Mah, A.J. 2013. *Ecology of the Indonesian Seas*. Tuttle Publishing
- Utama, F.G., Atmadipoera, A.S., Purba, M., Sudjono, E.H., & Zuraida, R. 2017. Analysis of upwelling event in Southern Makassar Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 54(1): p.012085.
- Wibowo, M.A., Radjawane, I.M., & Sofian, I. 2020. Understanding The Mechanism Of Seasonal *Upwelling* And Downwelling At The Southern Coast Of Makassar Strait. *Berkala Perikanan Terubuk*, 48(1): 361-371.
- Wijaya, Y. J., & Hisaki, Y. 2021. Differences in the reaction of north equatorial countercurrent to the developing and mature phase of ENSO events in the western Pacific Ocean. *Climate*, 9(4):p.57.

Wirasatriya, A., Susanto, R. D., Kunarso, K., Jalil, A. R., Ramdani, F., & Puryajati, A. D. 2021. Northwest monsoon upwelling within the Indonesian seas. *International Journal of Remote Sensing*, 42(14): 5433-5454.

Wirasatriya, A., Susanto, R.D., Setiawan, J.D., Ramdani, F., Iskandar, I., Jalil, A.R., Puryajati, A.D., Kunarso K., & Maslukah, L. 2021. High Chlorophyll-a Areas along the

Western Coast of South Sulawesi-Indonesia during the Rainy Season Revealed by Satellite Data. *Remote Sensing*, 13(23): p.4833.

Zainuddin, M., & Muhiddin, A.H. 2021. On The Relationship Between Area Of Upwelling And Potential Fishing Zone In Makassar Strait. *Jurnal Ilmu Kelautan: SPERMONDE*, 7(2): 29-33.