

Respon Suhu Permukaan Laut (SPL) terhadap ENSO di Perairan Masalembu Periode 2010-2019

Fressan Patrick Wangdiarta^{1*}, Anindya Wirasatriya¹ dan Gentio Harsono²

¹Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia

²Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Indonesia
Email: *fressanp45@students.undip.ac.id

Abstrak

Perairan Masalembu secara geografis terletak di antara Pulau Kalimantan, Pulau Jawa, dan Pulau Sulawesi. Kondisi perairan perairan Masalembu dapat dipengaruhi oleh variabilitas iklim, salah satunya ENSO. Tujuan penelitian ini yaitu untuk melakukan analisis spasial-temporal pengaruh ENSO terhadap SPL perairan Masalembu menggunakan metode analisis EOF, serta pengaruhnya terhadap angin dan arus permukaan laut. Metode yang digunakan yaitu dengan pendekatan deskriptif-kuantitatif, dengan metode analisis Empirical Orthogonal Function (EOF) pada data deret waktu selama 10 tahun dari tahun 2010-2019. Data yang digunakan yaitu data observasi SPL harian OSTIA dengan resolusi spasial $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$, data angin ASCAT, dan data arus permukaan *reanalysis*. Pola spasial-temporal SPL diperoleh dalam lima mode EOF dengan total persentase varian sebesar 95.07%. Pada mode-1 menunjukkan pengaruh paling besar dengan persentase varian sebesar 87.96%. Dari mode-1 yang dibandingkan dengan indeks ONI, dapat terlihat pengaruh ENSO pada perairan Masalembu. Secara temporal, PC-1 dan ONI memperlihatkan pada tahun 2010-2012 dan 2017-2018 terjadi fase La-Nina, sedangkan pada tahun 2015-2016 terjadi fase El-Nino. Saat El-Nino, kecepatan angin musim timur akan mengalami penguatan. Sedangkan saat La-Nina kecepatan angin musim barat akan mengalami penguatan. Angin yang mengalami penguatan (pelemahan) akan mempengaruhi kecepatan arus permukaan laut, dimana pada saat kecepatan angin menguat (melemah), kecepatan arus permukaan akan menguat (melemah).

Kata kunci: ENSO, EOF, Suhu Permukaan Laut, Angin, Arus Permukaan Laut

Abstract

Response of Sea Surface Temperature (SST) to Enso in Masalembu Waters for the 2010-2019 Period

Masalembu waters are situated between Kalimantan, Java, and Sulawesi Islands and are affected by climate variability, including ENSO. This study aims to evaluate the impact of ENSO on the SPL of Masalembu waters using the Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis method and its influence on wind and surface ocean currents. The study adopted a descriptive-quantitative approach and conducted EOF analysis on data from 2010-2019, including daily OSTIA SPL observation data with a spatial resolution of $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$, ASCAT wind data, and reanalysis surface current data. The analysis revealed five EOF modes with a total variance of 95.07%, with Mode-1 exhibiting the most significant influence at 87.96% variance. By comparing Mode-1 with the ONI index, the study identified ENSO's influence on Masalembu waters. The study showed that the La-Nina phase occurred in 2010-2012 and 2017-2018, while the El-Nino phase occurred in 2015-2016, and during these periods, the speed of monsoon winds varied. El-Nino strengthened the east monsoon wind, whereas La-Nina increased the speed of the west monsoon wind. These changes in wind strength can affect surface ocean currents, leading to either strengthening or weakening depending on wind speed changes.

Keywords: ENSO, EOF, Sea Surface Temperature (SST), Wind, Sea Surface Current

PENDAHULUAN

Secara geografi perairan Masalembu terletak pada Laut Jawa bagian timur yang bertemu langsung dengan perairan dari Selat Makassar dan perairan dari Laut Flores. Akibat dari letak geografisnya, perairan Masalembu menjadi titik pertemuan arus dari Selat Makassar dan Laut Flores. Pada perairan Masalembu telah menyebabkan banyak kecelakaan yang terjadi di sekitar wilayah perairannya. Hal tersebut disebabkan karena pada bulan-bulan tertentu daerah tersebut kondisi cuaca sangat buruk dengan ombak tinggi dan pusaran arus sangat kuat sekali sehingga sering terjadi kecelakaan kapal. Arus ini sangat dipengaruhi oleh cuaca dan musim.

Tentunya arus musiman ini sangat dipengaruhi juga oleh suhu air laut akibat pemanasan matahari. Selain itu juga perairan Masalembo dipengaruhi oleh faktor Meteorologis seperti pengaruh angin monsoon (Harcici, 2017).

Salah satu variabilitas iklim yang dapat mempengaruhi kondisi oseanografi yaitu fenomena El-Niño Southern Oscillation (ENSO). Fenomena ini terjadi karena adanya penyimpangan kondisi interaksi antara laut dan atmosfer sepanjang Samudera Pasifik sekitar ekuator dari keadaan normalnya sehingga mempengaruhi variabilitas iklim di wilayah ekuator samudera Pasifik dan beberapa bagian bumi (Handoko et al., 2019). Variabilitas iklim ENSO terbagi menjadi tiga yaitu variabilitas saat kondisi normal, El-Niño, dan La Nina. Saat fenomena El-Niño terjadi, suhu permukaan laut di bagian timur Samudera Pasifik meningkat, namun suhu di barat Samudera Pasifik dan sekitar Indonesia mengalami penurunan (penyimpangan) sehingga curah hujan menurun. Hal sebaliknya terjadi pada saat kondisi La Nina. Untuk mengetahui fenomena ENSO, dapat menggunakan indikator anomali dari suhu permukaan laut.

Pada penelitian sebelumnya metode analisis EOF jarang digunakan untuk mengetahui pengaruh ENSO pada perairan Laut Jawa. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Wirasatriya *et al.*, 2017; Mulyana, 2002ab; Gaol dan Sadhotomo 2007), metode yang digunakan merupakan metode kompilasi data deret waktu kejadian ENSO, yang kemudian dilakukan analisis temporal. Pada penelitian yang dilakukan Habibie dan Nuraini (2014), metode yang digunakan yaitu metode Tren linear dan Mann-Kendall test yang merupakan metode pengujian non-parametrik untuk mendeteksi trend pada data time series. Metode ini membandingkan besaran relatif dari data sampel. Pada penelitian ini metode analisis yang akan digunakan merupakan metode analisis Empirical Orthogonal Function (EOF) yang merupakan metode analisis untuk menentukan pola-pola dominan pada data dan berevolusi dalam ruang dan waktu. Metode ini bertujuan untuk mereduksi sekumpulan data yang berukuran besar menjadi beberapa mode EOF tanpa menghilangkan informasi dari data asli. Dengan metode analisis EOF, hasil yang akan diperoleh berupa hasil persebaran spasial dan temporal.

Untuk mengetahui respon suhu permukaan laut terhadap fenomena ENSO, maka parameter yang digunakan berupa anomali suhu permukaan laut (SPL), angin, dan arus laut. Data parameter SPL kemudian akan dilakukan analisis dengan menggunakan metode Empirical Orthogonal Function (EOF) serta dilakukan pendekatan secara deskriptif hubungannya terhadap angin dan arus permukaan laut.

MATERI DAN METODE

Materi Penelitian

Penelitian dibatasi pada wilayah perairan Masalembo yang terletak di antara 2.5°LU–7.2°LS, 113°BT–118°BT dengan meninjau pengaruh ENSO terhadap perubahan SPL secara spasial-temporal serta pengaruhnya terhadap angin dan suhu permukaan laut. Data-data yang digunakan pada penelitian ini meliputi data utama dan data pendukung sepanjang periode waktu 2010 – 2019. Data utama yang digunakan yaitu data suhu permukaan laut yang merupakan data *The Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis* (OSTIA) yang menggunakan data satelit bersama dengan pengamatan in-situ untuk menentukan suhu permukaan laut (Good *et al.*, 2020). Data suhu permukaan laut memiliki resolusi spasial 0.05° x 0.05° dengan *processing level* L4. Data CMEMS OSTIA menyediakan 16534 titik grid secara teratur dari yang mencakup 13879 hari dari 1 Januari 1982 hingga 31 Desember 2019 (Mohamed *et al.*, 2021). Data OSTIA merupakan data harian *global* yang menggabungkan pengamatan in-situ yang diambil dari pelampung dan kapal, output model, dan beberapa *dataset* SPL penginderaan jauh (Redfern *et al.*, 2023; Stark *et al.*, 2007; Donlon *et al.*, 2012). Pada penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang dilakukan oleh Redfern *et al.*, (2023) dengan mengukur perbandingan antara data SPL lapangan yang diambil menggunakan *Argo Float* dengan data satelit seperti MUR25, OSTIA, dan GOES-16, menjelaskan data SPL OSTIA merupakan data SPL yang paling mendekati data lapangan dengan kuadrat kosefisien korelasi (r^2) sebesar 0.88 dan *root mean square error* (RMSE) paling rendah dibanding data satelit lainnya yaitu sebesar 0.59. Kemudian digunakan juga data angin yang (Naeimi dan Wagner, 2010). Data angin yang digunakan memiliki resolusi spasial diakses dari *Marine Copernicus* yang berupa data angin *Advanced Scatterometer* (ASCAT). ASCAT dapat mengukur angin permukaan laut 28 kali lebih akurat daripada pengukuran in-situ, dengan nilai RMSE sebesar 0.78 (Farjami dan Hesari, 2020). dapat menentukan kecepatan dan arah angin permukaan laut dengan menerapkan fungsi model geofisika empiris CMOD5 yang diperoleh dari *Jet Propulsion Laboratory* 0.125° x 0.125° dengan *processing level* L3. ASCAT dapat mengukur angin permukaan laut 28 kali lebih dekat dengan yang diukur di

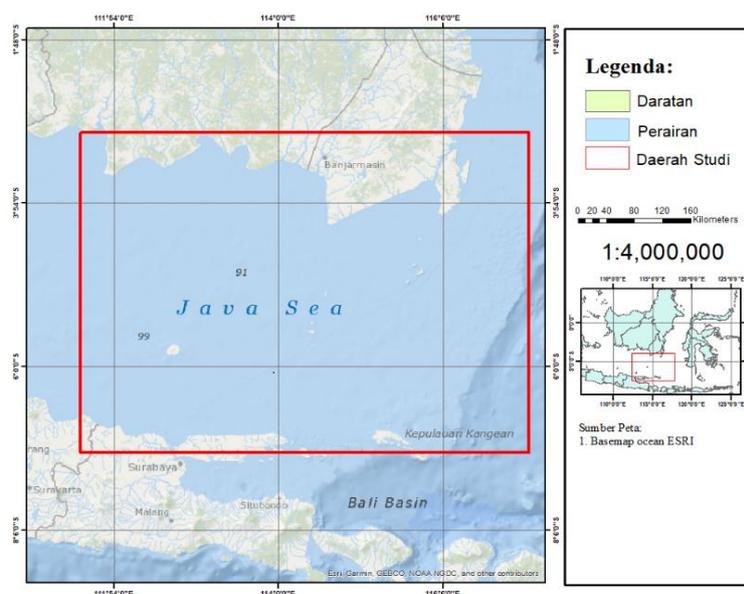
tempat. Lalu data arus permukaan laut yang digunakan merupakan data arus yang diakses dari *Marine Copernicus* yang berupa hasil data model *platform* NEMO pada permukaan laut oleh ECMWF ERA-Interim yang kemudian dianalisis ulang oleh ERA5. Data arus permukaan laut yang digunakan memiliki resolusi spasial $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ dengan *processing level* L4.

Selain itu data pendukung digunakan untuk memperkuat hasil penelitian yang menggunakan data utama. Data yang digunakan meliputi data indeks *Oceanic Niño Index* (ONI) dari tahun 2010 – 2019 yang diperoleh dari *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA) *Climate Prediction Centre* (CPC). Periode hangat (El-Niño) dan dingin (La-Niña) berdasarkan batas $\pm 0,5C$ untuk *Oceanic Niño Index* (ONI) yang diperoleh pada periode dasar 30 tahun yang diperbarui setiap 5 tahun. ONI digunakan untuk mengidentifikasi batas anomali SPL yang di atas rata-rata yang bertahan selama beberapa bulan, meliputi indikasi pertama dari awal dan akhir fase El-Niño (Glantz dan Ramirez, 2020).

Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dan deskriptif. Penggunaan metode kuantitatif-deskriptif karena penelitian ini lebih difokuskan pada data-data dalam bentuk angka-angka yang diperoleh dari wilayah penelitian. Pengumpulan data secara kuantitatif meliputi data SPL, data angin, data arus permukaan laut, dan indeks variabilitas iklim ONI. Kemudian data yang dihasilkan berupa angka-angka kemudian diolah sehingga diperoleh gambaran persebaran SPL secara spasial dan temporal yang akan dikaitkan dengan pengaruh dari variabilitas iklim ENSO yang selanjutnya dikaitkan dengan pola arah dan kecepatan angin serta arus permukaan laut.

Dalam menentukan adanya pengaruh variabilitas iklim ENSO, data SPL digunakan untuk analisis EOF dengan tujuan untuk mencari frekuensi dominan pada wilayah perairan tersebut. SPL digunakan untuk dianalisis EOF dikarenakan SPL merupakan parameter utama dipengaruhi langsung oleh variabilitas iklim ENSO. Pada saat memasuki fase ENSO, akan muncul anomali SPL dimana pada saat fase El-Niño (La-Niña) suhu pada Samudra Pasifik Timur akan lebih panas (dingin), sedangkan suhu pada Samudra Pasifik Barat akan lebih dingin (panas) (Dewanti *et al.*, 2018). Oleh karena itu, SPL akan berperan penting dalam mempengaruhi parameter lain seperti angin dan arus permukaan laut. Berdasarkan hasil EOF yang diperoleh akan dikorelasikan secara temporal dengan indeks ONI. Kemudian data model reanalysis arus permukaan laut dan data angin ditampilkan secara spasial dan diinterpretasikan secara deskriptif berdasarkan hasil analisis EOF pada parameter SPL untuk mendapatkan hubungan sebab akibat dari adanya fenomena ENSO terhadap setiap parameter yang akan ditinjau.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan Data

Metode pengolahan data SPL memiliki beberapa tahapan di dalamnya. Data SPL yang telah diperoleh kemudian akan dikomposit harian menjadi data bulanan menggunakan *Climate Data Operation* (CDO) yang menghasilkan output data dengan format NetCDF (.nc). Data SPL dikomposit harian dari bulan Januari 2010 hingga bulan Desember 2019 menjadi data bulanan. Persamaan matematis yang digunakan dalam proses komposit adalah proses rata-rata pada nilai-nilai selama rentang waktu dari data yang tersedia. Persamaan yang digunakan untuk mengkonversi data harian menjadi rata-rata bulanan yaitu (Putri *et al.*, 2021a; Baffoe *et al.*, 2021):

$$X_i(x, y) = \frac{1}{n_i} * \sum_{t=1}^{n_i} X(t, x, y)$$

Dengan $X_i(x, y)$ yang merupakan rata-rata bulanan/klimatologi, n_i merupakan banyaknya komposit data pada periode bulanan atau klimatologi, $t = 1$ merupakan 1 hari/bulan ke-1, $X(t, x, y)$ merupakan data hari/bulan ke- i pada posisi bujur x , lintang y dan jam ke- t .

Data SPL yang telah dilakukan komposit akan diolah untuk mencari anomali data SPL bulanan. Hal ini dilakukan karena pada saat terjadi fenomena ENSO, pengaruh yang langsung terdampak pada suatu perairan yaitu adanya anomali yang terjadi pada SPL di wilayah perairan tersebut. Persamaan yang digunakan untuk mencari anomali data yaitu (Thomson dan Emery, 2014):

$$X_a = X_i(x, y) - X_i(t)$$

Dimana X_a yang merupakan data anomali bulanan, $X_i(x, y)$ merupakan data rata-rata bulanan/klimatologi, dan X merupakan data rata-rata SPL selama 10 tahun.

Setelah memperoleh data anomali bulanan SPL, data yang telah diperoleh akan dilakukan *detrend* pada deret waktu data anomali. *Detrend* dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan pengaruh tren dalam data, sehingga memudahkan analisis terhadap sinyal periodik atau fluktuasi yang lebih kecil (Kumara *et al.*, 2023). *Detrending* dilakukan untuk membuat data lebih stabil dan memudahkan interpretasi hasil analisis terlebih pada analisis EOF. Persamaan yang digunakan untuk melakukan detrend dapat ditulis (Thomson dan Emery, 2014):

$$y'_m = y_m(t) - \left[\overline{y_m(t)} + b_m(t - \bar{t}) \right]$$

Dimana y'_m merupakan anomali data detrend, $y_m(t)$ merupakan data anomali mentah pada waktu 10 tahun, $\overline{y_m(t)}$ merupakan rata-rata data anomali bulanan, b_m merupakan koefisien regresi yang diperoleh dari analisis regresi linier pada data, dan $(t - \bar{t})$ merupakan tren waktu yang terjadi secara linear.

Data yang sudah dilakukan *detrend* kemudian akan difilter untuk melihat periode dominan fenomena ENSO, sehingga fenomena musiman yang terjadi akan dihilangkan yang dimana ENSO memiliki periode 2-7 tahun. Filter yang digunakan untuk melihat periode dominan ENSO yaitu *Low-Pass Filter*. *Low-pass Filter* merupakan filter yang paling umum digunakan dalam analisis data oseanografi. Dengan filter ini sinyal variabilitas iklim jangka panjang seperti fenomena antar dekade atau antar tahunan dapat ditemukan (Thomson dan Emery, 2014; Kersalé *et al.*, 2022; Tung *et al.*, 2019; Putri *et al.*, 2021b). *Low-pass filter* memungkinkan sinyal frekuensi rendah mengalir, tetapi secara signifikan akan memblokir sinyal frekuensi tinggi. Pada penelitian ini data pada frekuensi 2 tahun dihilangkan dengan tujuan untuk melihat variabilitas antar tahunan yang lebih spesifik. Persamaan yang digunakan dalam *Low-pass filter* yaitu (Thomson dan Emery, 2014):

$$W(\omega) = \sum_{k=-M}^M \omega_k e^{-i\omega k \Delta t}$$

$$\omega = \omega_n = \frac{2\pi n}{(N\Delta t)}$$

$$\begin{aligned} \text{Low-pass: } |W(\omega)| &= 1 \text{ untuk } |\omega| \leq \omega_c \\ &= 0 \text{ untuk } \omega_c \leq |\omega| \end{aligned}$$

Dimana $W(\omega)$ merupakan frekuensi sinyal, $\omega_c = 2\pi f_c$ merupakan frekuensi *cut-off* (2 tahun), $n = 0, \dots, N/2$ dapat disebut juga sebagai respon frekuensi.

Data angin dan arus permukaan laut dari 2010-2019 pertama-tama akan diekstrak harian. Kemudian data angin dan arus permukaan laut akan dikomposit menjadi data bulanan menggunakan bahasa pemrograman *Interactive Data Language* (IDL) dengan menggunakan persamaan untuk mencari arah vektor yang menghasilkan output data dengan format .sav. Data angin dan arus permukaan laut yang sudah dikomposit selanjutnya akan ditampilkan secara vektor untuk memperoleh kecepatan angin serta arah angin dalam U dan V. Dimana U merupakan angin yang bergerak dari barat ke timur dan V merupakan angin yang bergerak dari selatan ke utara. Untuk menghitung kecepatan angin persamaan yang digunakan yaitu:

$$\text{Speed} = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Analisis Data

Analisis data SPL digunakan metode analisis EOF yang bertujuan untuk menentukan pola-pola dominan yang pada suatu data dan berevolusi dalam ruang dan waktu. Cara kerja EOF yaitu dengan mereduksi sekumpulan data yang berukuran besar menjadi beberapa mode EOF tanpa menghilangkan informasi dari data asli (Robial *et al.*, 2016). Analisis EOF diolah menggunakan *software* PyFerret yang memiliki output spasial dan temporal. Hasil analisis EOF nantinya akan korelasikan dengan indeks ONI secara temporal. Sebelum dianalisis, data SPL akan diinterpretasikan dalam bentuk persamaan matriks terlebih dahulu dalam bentuk spasial-temporal $X(t, s)$ yang merepresentasikan nilai pada data X yang memiliki waktu t dan posisi spasial s . Dimana $x_t = (x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tp})^T$, $t = 1, \dots, n$, merupakan nilai data pada suatu daerah pada waktu t . Data yang akan diteliti akan diinterpretasikan dalam bentuk data matriks (Hannachi, 2007):

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{pmatrix}$$

Persamaan EOF dasar yang digunakan dalam penelitian ini digunakan untuk meendapatkan dekomposisi data pada bidang ruang dan waktu $X(t, s)$. Persamaan dasar ini menggunakan persamaan yang ditemukan pada penelitian sebelumnya oleh (Obukhov, 1947; Fukuoka, 1951; Lorenz, 1956):

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s)$$

Dimana M merupakan banyaknya mode di dalam suatu daerah, $u_k(s)$ merupakan fungsi dasar spasial, dan $c_k(t)$ merupakan fungsi perluasan waktu.

Analisis EOF yang digunakan merupakan analisis EOF yang berdasarkan *Singular Value Decomposition* (SVD). Metode SVD yang digunakan berdasarkan konsep aljabar linear (Thomson dan Emery, 2014; Press *et al.*, 1992). SVD memungkinkan dekomposisi sinyal dalam dasar ortogonal sehingga menjadi lebih efektif. Oleh karena itu SVD memungkinkan model empiris yang dihasilkan lebih alami (Bodnar *et al.*, 2022). Misalkan D adalah matriks sembarang yang berukuran $M \times N$ dengan pangkat $(D) = r$. Persamaan dasar EOF SVD dalam bentuk matriks yang digunakan yaitu (Septiawan dan Sopaheluwakan, 2019; Thomson dan Emery, 2014):

$$D = U \begin{bmatrix} S_1 & & & \\ & S_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & S_n \end{bmatrix} V^T$$

$$D = UBVT^T$$

Dimana D merupakan matriks data yang berisikan M baris (titik spasial) dan N kolom (sampel temporal), B merupakan matriks diagonal $M \times N$ dengan $\sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ dan $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$. Selain itu juga U merupakan matriks $M \times M$ yang berada di bagian kiri vektor singular dan V merupakan matriks $N \times N$ yang berada di bagian kanan vektor singular.

Setelah memperoleh hasil eigen pada analisis EOF, presentase varian dapat dihitung menggunakan persamaan yang digunakan oleh (Hannachi, 2007):

$$\text{Presentase Varian} = \frac{100\lambda_k^2}{\sum_{j=1}^P \lambda_k^2} \%$$

Dimana λ_k^2 merupakan nilai eigen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

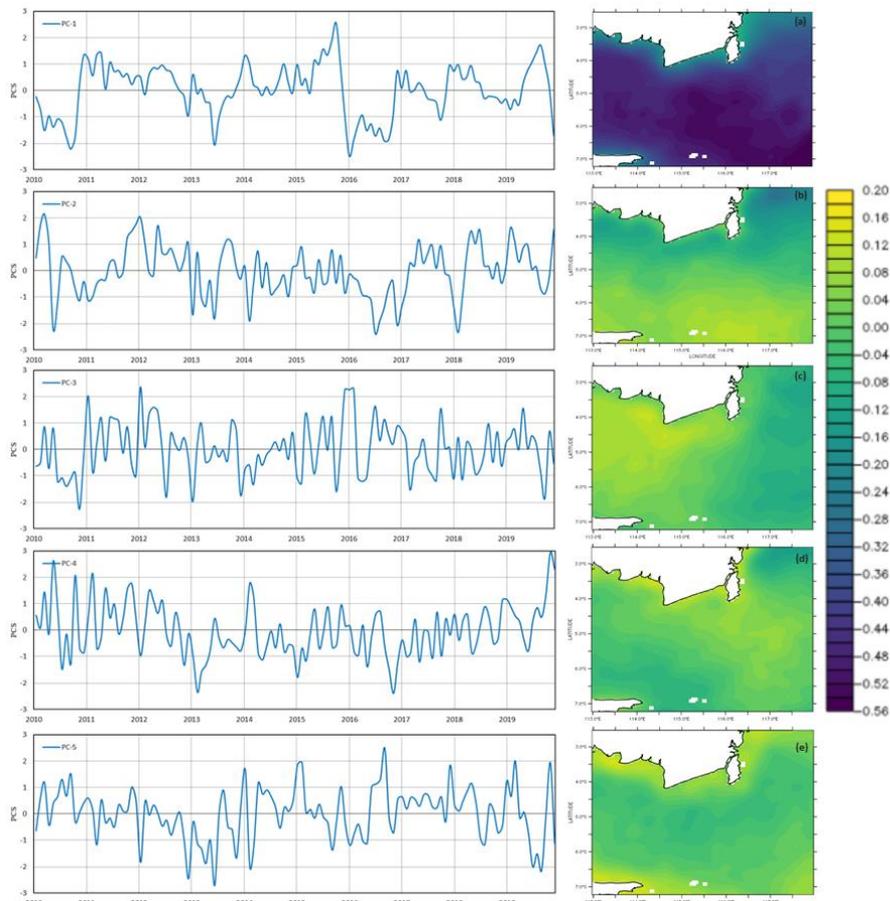
Analisis EOF Pada Suhu Permukaan Laut (SPL)

Analisis EOF dilakukan pada data SPL yang tidak difilter dan data SPL *Low-pass filter* (2 tahun). Hal tersebut bertujuan untuk melihat besar pengaruh ENSO terhadap perairan Masalembu. Pengolahan data SPL yang telah dianalisis EOF dilakukan pada wilayah perairan Masalembu menghasilkan 5 mode EOF secara spasial dan temporal. Mode pada EOF menunjukkan struktur spasial dari suatu variabel atau urutan PC yang dihasilkan dari dekomposisi data. Berdasarkan tabel 1, hasil analisis EOF yang telah diperoleh, menunjukkan hasil presentase varian variabilitas dan nilai eigen pada setiap mode. Nilai eigen berfungsi sebagai penyusun hasil EOF, yang dimana apabila nilai eigen semakin tinggi, maka variabilitas dalam data yang dihasilkan semakin signifikan (Lorenz, 1956). Oleh karena itu, nilai eigen perlu diketahui untuk menganalisis suatu variasi musiman. Pada mode 1 EOF SPL diperoleh persentase varian yang paling tinggi yaitu sebesar 87.96% dengan nilai eigen sebesar 1585, sedangkan pada EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) diperoleh persentase varian sebesar 85.04% dengan nilai eigen sebesar 939, pada mode 2 terlihat perbedaan yang sangat signifikan terhadap mode 1 yaitu diperoleh persentase varian mode 2 EOF SPL sebesar 3.10% dengan nilai eigen 56, sedangkan pada mode 2 EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) diperoleh persentase varian sebesar 3.41%. Mode 3 EOF SPL diperoleh persentase varian sebesar 1.99% dengan nilai eigen 36, sedangkan pada mode 3 EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) diperoleh persentase varian sebesar 2.71% dengan nilai eigen 30. Pada mode 4 dan mode 5 nilai persentase varian dan nilai eigen memiliki perbedaan yang kecil dimana mode 4 EOF SPL diperoleh persentase varian sebesar 1.06% dengan nilai eigen 19, sedangkan mode 4 EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) diperoleh persentase varian sebesar 1.24% dengan nilai eigen 14, dan pada mode 5 EOF SPL diperoleh persentase varian sebesar 0.96% dengan nilai eigen sebesar 17, serta mode 5 EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) diperoleh persentase varian sebesar 1.00% dengan nilai eigen sebesar 11. Berdasarkan hasil tersebut mode 1 merupakan mode yang paling berpengaruh pada perairan Masalembu. Pada tabel 1 hasil mode 2 hingga 5 memiliki persentase varian dengan nilai eigen yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan mode 1 sehingga pengaruhnya terhadap perairan Masalembu sangat kecil.

Persebaran hasil EOF SPL secara spasial ditampilkan pada mode 1 gambar 2(a), perairan Masalembu memiliki nilai anomali SPL negatif yang dominan pada bagian tenggara perairan dengan anomali berkisar pada nilai -0.48 hingga -0.40. Hasil mode 2 EOF gambar 2(b) perairan Masalembu memiliki anomali SPL positif yang dominan berada bagian selatan perairan. Mode 3 EOF gambar 2(c) anomali positif juga terjadi pada bagian barat laut perairan Masalembu. Mode 4 EOF gambar 2(d) anomali positif terjadi pada bagian timur perairan Masalembu yang berbatasan dengan laut Flores. Dan pada mode 5 gambar 2(e) anomali positif dominan terjadi pada daerah dekat daratan. Anomali positif pada mode 2-5 memiliki nilai pada rentang 0.04 hingga 0.12. Selain itu persebaran hasil EOF secara temporal menunjukkan pada mode 1 gambar 2(a) ENSO mengambil peran mempengaruhi perairan Masalembu, yang dimana pada PC-1 terjadi La-Nina kuat pada tahun 2010-2011, 2013-2014, dan 2016-2017, dimana periode tahun tersebut nilai PCS mencapai -1. Sedangkan pada mode 2-5 nilai PCS cenderung positif, dimana pada grafik banyak terjadi fluktuasi kenaikan nilai PCS sehingga dapat diindikasikan adanya fenomena lainnya yang terjadi pada perairan Masalembu selain fenomena ENSO seperti pengaruh musiman.

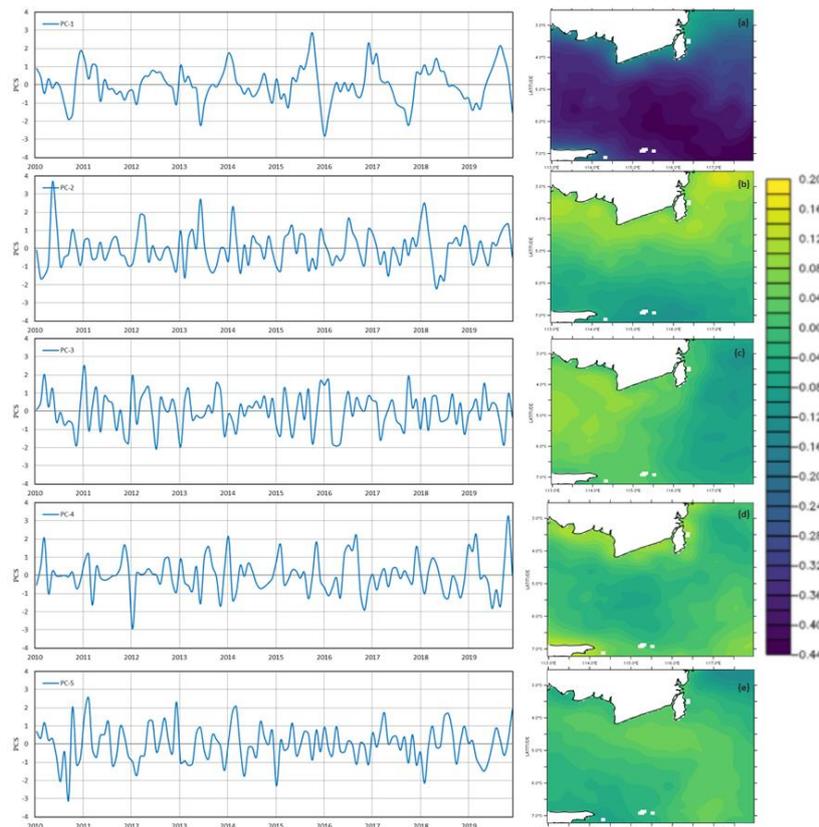
Tabel 1. Hasil analisis EOF SPL secara statistik

No	Statistik EOF SPL		Statistik EOF SPL Low Pass (2 tahun)	
	Persentase Varian (%)	Nilai Eigen	Persentase Varian (%)	Nilai Eigen
	87,96	1585	85.04	939
	3,10	56	3.41	38
	1,99	36	2.71	30
	1,06	19	1.24	14
	0,96	17	1.00	11



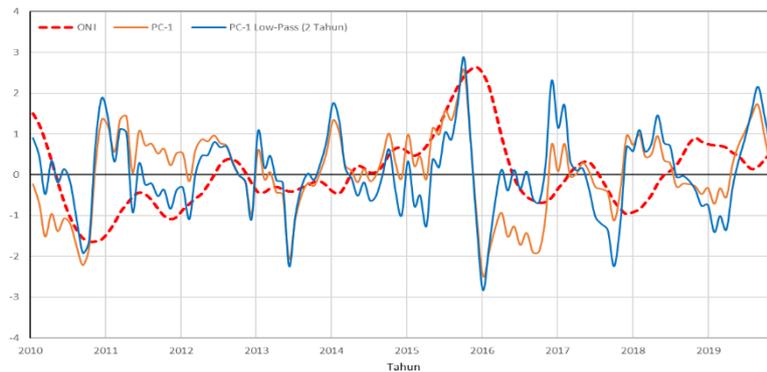
Gambar 2. Persebaran spasial dan temporal PC pada (a) mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3, (d) mode 4, dan (e) mode 5 EOF SPL periode tahun 2010-2019

Persebaran hasil EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) secara spasial diperoleh hasil yang tidak jauh berbeda dengan hasil EOF SPL tanpa filter. Pada mode 1 gambar 3(a) diperoleh nilai anomali PCS negatif yang berkisar -0.36 hingga -0.28. Berbeda dengan mode 1 yang memiliki nilai anomali PCS negatif, mode 2 gambar 3(b) memiliki nilai anomali PCS positif yang dominan berada pada bagian utara perairan Masalembu. Selain itu mode 3 gambar 3(c) memiliki nilai anomali PCS positif yang dominan pada bagian barat perairan Masalembu. Pada mode 4 gambar 3(d) anomali PCS positif dominan terjadi pada daerah dekat daratan. Mode 5 gambar 3(e) memiliki nilai anomali PCS positif yang dominan pada bagian timur perairan Masalembu. Persebaran hasil EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) secara temporal jika dikaitkan dengan hasil spasial menunjukkan jika pengaruh ENSO mulai terlihat yaitu saat SPL memiliki anomali negatif dan berdasarkan PC-1 gambar 3(a) terdapat fenomena La-Nina yang terjadi sehingga perairan Masalembu menjadi dingin. Sebaliknya pada mode 2-5 perairan Masalembu cenderung lebih hangat, sehingga hal ini mengindikasikan adanya variabilitas iklim lainnya yang terjadi pada perairan Masalembu.



Gambar 3. Persebaran spasial dan temporal PC pada (a) mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3, (d) mode 4, dan (e) mode 5 EOF SPL *Low-pass* (2 tahun) periode tahun 2010-2019

Analisis EOF dilakukan dalam dua kondisi tipe data yaitu data yang tidak difilter dan data yang dilakukan *Low-pass filter*. Data yang tidak difilter diharapkan dapat diperoleh sinyal ENSO serta sinyal variabilitas iklim lainnya ikut terhitung dalam nilai eigen yang didapatkan. Dan data yang dilakukan *Low-pass filter* selama periode waktu 2 tahun bertujuan untuk memfokuskan variabilitas antar tahunan, sehingga variabilitas tahunan atau musiman dihilangkan. Dalam penelitian ini diperoleh 5 mode EOF untuk melihat besar pengaruh variabilitas iklim yang terjadi dengan total persentase varian sebesar 95.07%. Sedangkan total persentase varian yang telah difilter diperoleh total varian sebesar 93.4%. Dari hasil mode yang diperoleh, mode dengan persentase paling besar menunjukkan jika mode tersebut merupakan sinyal suatu variabilitas iklim paling berpengaruh (Putra *et al.*, 2020). Mode yang paling besar dari penelitian ini yaitu mode-1 dengan persentase sebesar 87.96%, dan 85.04% untuk EOF yang difilter. Oleh karena itu diputuskan hanya digunakan satu mode yang menggambarkan variabilitas yang paling berpengaruh. Pola spasial pada mode-1 (gambar 2a) menunjukkan nilai negatif yang didominasi pada bagian tengah perairan Masalembu yang kemudian bergerak ke arah tenggara menuju Laut Flores. Pola negatif pada perairan Masalembu ini memiliki pola yang sama seperti ENSO pada fase El-Nino. Dimana pada saat fase El-Nino kolam air hangat akan berada pada bagian timur samudra Pasifik sehingga menyebabkan perairan samudra Pasifik bagian barat menjadi dingin. Hal ini juga selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh (Putri *et al.*, 2021b; Putra *et al.*, 2020; Seprianto *et al.*, 2016) dimana menyatakan bahwa SPL perairan Laut Jawa dan perairan teluk Balikpapan yang dimana posisinya berdekatan dengan perairan Masalembu, dipengaruhi oleh variabilitas antar tahunan yaitu ENSO. Melalui analisa EOF pada wilayah perairan Indo-Pasifik tropis, Putra *et al.*, (2020) menyatakan jika sinyal ENSO terkuat diperoleh pada mode-2 yang dimana keadaan perairan Indonesia pada saat itu memiliki anomali suhu negatif yang menandakan fase El-Nino. Hasil spasial EOF mode-1 yang diperoleh ini juga memiliki kesamaan dengan hasil spasial yang telah difilter. Dimana pada saat mode-1 (gambar 3a) anomali pada perairan Masalembu menunjukkan nilai negatif yang berkaitan erat dengan El-Nino. Dari hasil ini menandakan bahwa sinyal ENSO sudah tertangkap walaupun data anomali bulanan SPL tidak dilakukan *Low-pass filter* untuk menghapus pengaruh musiman.



Gambar 4. Grafik perbandingan antara indeks ONI dan PC-1

Hubungan Indeks ONI dengan Hasil EOF SPL Secara Temporal

Hasil EOF dihubungkan dengan indeks ONI secara temporal untuk mengidentifikasi terjadinya fenomena ENSO pada mode 1, yang dimana secara spasial dihasilkan nilai anomali negatif yang berbeda dengan mode-mode lainnya pada perairan Masalembu dan memiliki persentase varian paling besar dengan nilai 87.96% dan 85.04%. Perbedaan yang terlihat antara data yang tidak difilter dengan data yang telah difilter yaitu pada hasil analisis EOF secara temporal. Dalam hasil grafik perbandingan antara PC mode-1 dengan ONI **gambar 4** dapat terlihat antara hasil mode-1 yang telah difilter memiliki nilai anomali yang mendekati dengan indeks ONI, hal tersebut disebabkan karena sinyal variabilitas tahunan atau musiman telah dihilangkan. Sehingga nilai anomali yang ditampilkan merupakan nilai anomali variabilitas antar tahunan yang terjadi. Berbeda dengan hasil mode-1 yang tidak difilter memiliki hasil yang melebihi jauh daripada hasil indeks ONI. Hal tersebut selaras dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Adam dan Harnik, 2014; Palacios-Hernández *et al.*, 2010), dimana melakukan perbandingan antara hasil temporal PC-1 dengan indeks ONI, dengan grafik PC-1 memiliki pola yang sama dengan indeks ONI. Sehingga memiliki kesimpulan kalau perairan tersebut dipengaruhi oleh ENSO sehingga nilai anomali yang diperoleh memiliki pola yang sama dengan indeks ONI. Berdasarkan indeks ONI dari hasil yang diperoleh pada **gambar 4**, periode La-Nina terjadi pada tahun 2010-2012 dan 2017-2018 yang dimana nilai anomali memiliki nilai lebih dari -0.5. Pada tahun 2010-2012 terjadi peristiwa La-Nina secara bertahap, pada tahun 2010 merupakan tahun transisi dari fase El-Nino menuju fase La-Nina. El-Nino terjadi sebelumnya pada tahun 2009, yang kemudian mulai berganti fase menjadi La-Nina. Menurut penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Wang *et al.*, 2020; McPhaden *et al.*, 2020; Dalton *et al.*, 2020), menemukan jika pada bulan Desember 2009 hingga awal 2010 terjadi El-Nino kuat pada wilayah Pasifik tengah, sehingga dampak yang diberikan terhadap wilayah Indonesia tidak terlalu signifikan. Hal tersebut dapat terlihat pada hasil **gambar 4** dimana PC-1 pada awal tahun 2010 memiliki nilai anomali yang diperoleh tidak mencapai angka 1. Hal ini dikarenakan di saat El-Nino terjadi di Pasifik tengah, posisi kolom air hangat sedang berada di tengah pasifik ekuator membuat perairan wilayah Pasifik barat baru mulai mengalami penurunan suhu permukaan laut. Kemudian pada tahun 2010 kolom air hangat mencapai wilayah Pasifik Barat sehingga menyebabkan La-Nina. Hal ini membuat perairan Indonesia, khususnya Indonesia bagian timur mengalami peningkatan SPL. Pada saat memasuki tahun 2011 nilai PC-1 mengalami peningkatan seiring dengan indeks ONI yang juga mengalami peningkatan hingga pada pertengahan tahun 2011 yang kembali menurun hingga memasuki tahun 2012. Pada saat periode tahun 2013-2014 dan 2018-2019 terjadi peristiwa unik pada hasil PC-1. Dimana pada saat indeks ONI mengalami sedikit penurunan (kenaikan) nilai anomali, di saat yang bersamaan nilai PC-1 mengalami penurunan (kenaikan) yang drastis. Hal ini diduga disebabkan oleh adanya upwelling kuat yang terjadi sehingga massa air dalam naik ke permukaan mengisi massa air yang kosong sehingga terjadi penurunan SPL (Kunarso *et al.*, 2022).

Pada penelitian yang dilakukan Kunarso *et al.*, (2022) pada wilayah perairan Selat Makassar hingga perairan Kalimantan Selatan, menjelaskan pada bulan Juli, Agustus, dan September memiliki intensitas yang kuat. Peristiwa ENSO dapat mempengaruhi massa air suatu perairan sehingga memicu terjadinya upwelling pada suatu wilayah perairan. Kejadian sama juga ditemukan oleh Palacios-Hernández *et al.*, (2010), yang dimana terjadi anomali pada hasil PC terhadap indeks ONI. Palacios-Hernández *et al.*, (2010) mengungkapkan bahwa anomali yang terjadi pada nilai PC memiliki hubungan dengan kolom air panas di perairan ekuator.

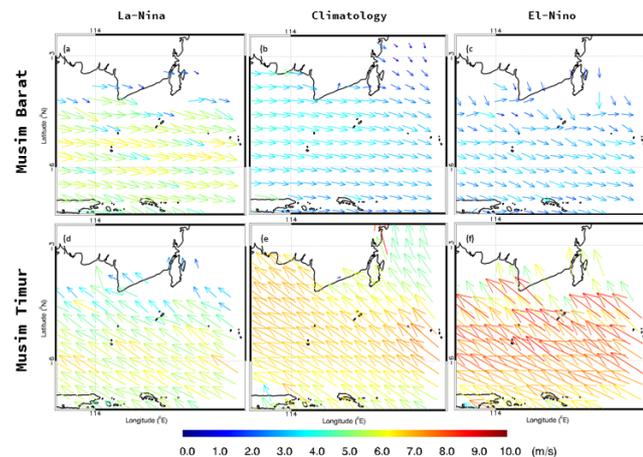
Kolam air panas yang bergerak akan meninggalkan kekosongan massa air di suatu perairan yang membuat terjadi peristiwa upwelling. Pada tahun 2015 terjadi fase El-Nino kuat, dimana nilai PC-1 mengalami peningkatan yang signifikan bersamaan dengan peningkatan nilai indeks ONI dan begitu pula saat terjadi penurunan nilai anomali yang drastis pada indeks ONI, nilai PC-1 juga ikut menurun. Saat mulai memasuki tahun 2016 yang pada saat itu memasuki fase La-Nina, nilai PC-1 menurun drastis karena adanya pengaruh dari La-Nina. Pada nilai PC-1 *Low-pass filter* menunjukkan jika nilai yang diperoleh tidak berbeda jauh dengan hasil indeks ONI, sedangkan pada PC-1 yang tidak difilter memiliki nilai anomali yang jauh lebih kecil dari indeks ONI. Hal ini dapat disebabkan karena pada PC-1 yang tidak difilter, nilai anomali tidak hanya dipengaruhi oleh variabilitas antar tahunan, namun dapat juga disebabkan oleh variabilitas antar musiman sehingga dapat terlihat penurunan nilai anomali yang sangat drastis. Akan tetapi, pada saat indeks ONI mengalami kenaikan nilai anomali nilai PC-1 juga ikut terpengaruhi untuk meningkat. Sehingga akan selalu terdapat pengaruh fenomena ENSO pada hasil nilai PC-1.

Model Arah dan Kecepatan Angin Serta Arus Permukaan Laut

Pola arah dan kecepatan angin di perairan Indonesia dipengaruhi oleh pola angin musiman yaitu angin musim barat dan angin musim timur. Berdasarkan gambar 5 arah dan kecepatan angin dimodelkan pada kondisi normal, El-Nino, dan La-Nina. Angin yang dimodelkan merupakan angin musim barat (Desember, Januari, Februari) dan musim timur (Juni, Juli, Agustus). Periode El-Nino dan La-Nina yang digunakan untuk memodelkan angin berdasarkan hasil yang diperoleh pada gambar 4, yang dimana pada saat El-Nino kuat di tahun 2015 dan pada saat La-Nina kuat di tahun 2010. Berdasarkan hasil yang diperoleh, kecepatan angin musim barat yang bergerak akan diperkuat oleh La-Nina dan melemah saat periode El-Nino. Pada kondisi normal gambar 5b kecepatan dan arah angin musim barat akan bertiup ke arah timur dengan kecepatan angin berada di rentang nilai 3.0-4.0 m/s. Akan tetapi pada saat kondisi La-Nina kecepatan angin musim barat gambar 5a meningkat dari kondisi normal menjadi 5.0-6.0 m/s. Selain itu saat kondisi El-Nino gambar 5c kecepatan angin musim barat akan menurun dari kondisi normal dengan nilai 2.0-3.0 m/s.

Fenomena ENSO mempengaruhi pola pergerakan angin dengan mempengaruhi tekanan udara. Ketika SPL mengalami kenaikan, suhu udara di atasnya akan ikut naik yang menyebabkan peningkatan tekanan udara pada ketinggian yang lebih tinggi. Di sisi lain, apabila SPL mengalami penurunan, suhu udara di atasnya akan ikut turun, sehingga tekanan udara akan meningkat seiring berkurangnya ketinggian. Ketika fase El-Nino kolam air hangat yang berada pada wilayah Pasifik timur akan menyebabkan kondisi SPL pada Pasifik barat menjadi lebih dingin karena terjadi upwelling gelombang Rossby terutama di wilayah Indonesia. Hal itu berakibat pada tekanan udara pada Indonesia Timur, sehingga angin yang berada pada wilayah Indonesia Timur akan bertiup ke arah yang memiliki tekanan udara rendah. Selain itu, ENSO juga dapat terjadi karena adanya anomali SPL yang pada siklus Walker (Bayr et al. 2024; Wang et al. 2021). Siklus Walker merupakan interaksi antara angin pasat dan suhu permukaan laut. Siklus Walker pada keadaan normal siklus Walker terjadi karena adanya perbedaan tekanan atmosfer pada Pasifik Barat dan Timur. Hal tersebut menyebabkan angin pasat bertiup dari arah timur ke barat dan membawa air hangat ke Samudra Pasifik Barat. Akan tetapi pada saat fase El-Nino angin pasat yang bertiup dari timur ke barat mengalami pelemahan sehingga air hangat Samudera Pasifik Barat akan bergerak ke arah timur dan menyebabkan suhu permukaan air laut di bagian timur menjadi lebih tinggi. Namun pada fase La-Nina angin pasat yang bertiup dari timur ke barat mengalami penguatan sehingga air hangat pada Samudra Pasifik Timur bergerak menuju ke Pasifik Barat yang membuat suhu permukaan laut di bagian barat menjadi lebih tinggi

Dari hasil yang diperoleh pada gambar 5, angin dari wilayah Indonesia Timur akan bertiup kuat ke arah Indonesia Barat, sehingga menyebabkan penguatan angin musim timur dari kondisi normalnya gambar 5e. Pada saat musim barat angin yang bergerak dari arah barat ke timur mengalami pelemahan kecepatan karena terjadi benturan antara angin yang bergerak dari arah timur dengan angin yang bergerak dari arah barat. Demikian pula pada saat musim timur gambar 5f angin yang bergerak dari arah timur ke barat mengalami penguatan kecepatan karena angin musim timur ikut bercampur dengan angin yang bergerak dari arah timur yang membawa massa udara kering dari Benua Australia ke wilayah Indonesia (Yananto dan Sibarani, 2016), sehingga menyebabkan Indonesia mengalami musim kemarau yang panjang.



Gambar 5. Persebaran arah dan kecepatan angin pada musim barat dan musim timur saat kondisi La-Nina (a, d), normal (b, e), dan El-Nino (c, f).

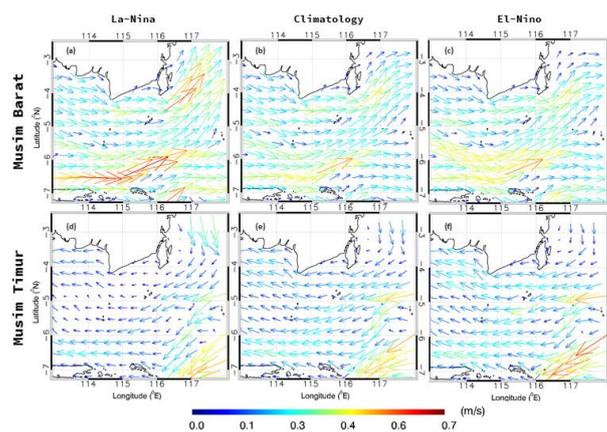
Kemudian angin musim timur yang dimodelkan saat kondisi normal gambar 5e memiliki kecepatan angin berkisar 6.0-7.0 m/s dengan arah angin yang bertiup ke barat laut. Pada saat kondisi La-Nina gambar 5d, kecepatan angin musim timur mengalami pelemahan kecepatan dari kondisi normalnya, yang dimana kecepatan angin berkisar 5.0-6.0 m/s. Namun pada saat kondisi El-Nino gambar 5f, kecepatan angin mengalami penguatan dari kondisi normalnya, yang dimana meningkat menjadi 7.0-9.0 m/s. Ketika fase La-Nina kolom air hangat yang berada pada wilayah Pasifik Barat telah bergerak ke bagian timur Pasifik sehingga menyebabkan SPL pada wilayah Pasifik Timur menjadi lebih hangat dari biasanya. Karena terjadi peningkatan SPL, tekanan udara pada perairan Pasifik Timur mengalami penurunan. Hal tersebut menyebabkan tekanan udara pada wilayah Indonesia timur menjadi lemah akibat adanya penguatan angin yang bergerak dari Benua Asia menuju ke Australia yang membawa massa udara lembab atau basah (Yananto dan Sibarani, 2016), sehingga Indonesia mengalami musim hujan yang panjang. Karena adanya penguatan angin dari Benua Asia melewati wilayah Indonesia, angin musim Barat juga ikut mengalami penguatan dari kondisi normalnya gambar 5b. Angin musim barat yang bertiup ke arah timur ikut mengalami peningkatan kecepatan yang bisa dilihat pada gambar 5a. Demikian pula saat musim timur gambar 5d angin yang bergerak dari arah timur ke barat mengalami pelemahan kecepatan dari kondisi normalnya gambar 5e, karena terjadi benturan antara angin yang bergerak dari arah barat dengan angin yang bergerak dari arah timur. Dari hasil tersebut dapat dikatakan jika pola angin yang bergerak pada perairan Masalembo dapat dipengaruhi oleh fenomena ENSO. Hal tersebut selaras dengan hasil analisa EOF pada SPL perairan Masalembo dimana hasil PC-1 menghasilkan sinyal ENSO.

Arah dan kecepatan arus yang dimodelkan pada penelitian ini merupakan arus permukaan laut yang memiliki kedalaman 0.493 meter. Berdasarkan gambar 6 arah dan kecepatan arus dimodelkan pada kondisi normal, El-Nino, dan La-Nina. Kecepatan dan arah arus yang dimodelkan juga mengikuti waktu angin musim timur dan angin musim barat. arus permukaan laut yang bergerak memiliki keterkaitan dengan angin yang bergerak dan menunjukkan adanya perubahan kecepatan yang disebabkan oleh fenomena ENSO. Pada dasarnya arus permukaan laut merupakan arus yang berada pada perairan dangkal, sehingga dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti gelombang laut, pasang surut, dan angin (Ren *et al.*, 2015; Rochaddi *et al.*, 2021). Arah pergerakan arus permukaan laut juga dapat dipengaruhi oleh angin karena adanya gaya gesek dan tekanan yang diberikan pada angin, namun selain itu juga penyebab arah pergerakan arus disebabkan dapat dipengaruhi oleh faktor lainnya seperti adanya letak topografi pulau dapat merubah arah gerak arus permukaan laut.

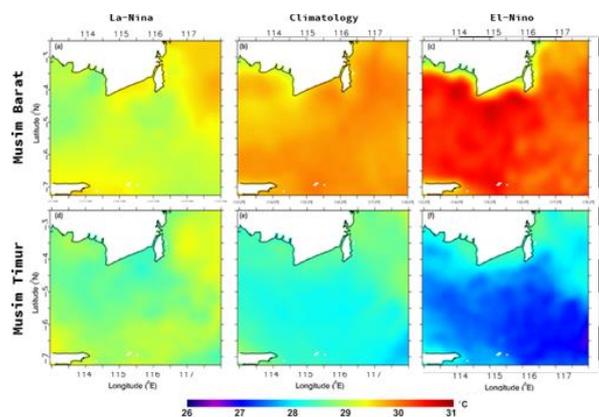
Dari hasil yang diperoleh, kecepatan arus yang bergerak pada periode waktu musim barat dengan kondisi normal gambar 6b memiliki kecepatan yang berkisar 0.2-0.4 m/s dan bergerak ke arah timur serta timur laut. Pola arah pergerakan arus yang bergerak dapat disebabkan karena adanya letak topografi pulau di sekitar perairan Masalembo. Saat kondisi La-Nina gambar 6a kecepatan arus mengalami kenaikan kecepatan menjadi 0.3-0.6 m/s. Pada saat fase La-Nina, arus musim barat gambar 6a yang bergerak mengalami peningkatan kecepatan yang cukup besar. Hal ini dapat disebabkan karena pengaruh kecepatan angin yang juga mengalami penguatan, sehingga gaya untuk membangkitkan arus semakin tinggi yang menyebabkan kecepatan arus semakin bertambah. Selain itu pada kondisi El-Nino menunjukkan pengaruh yang sama seperti

pada saat La-Nina terhadap kecepatan arus. Kecepatan dan arah arus yang dimodelkan pada periode musim barat gambar 6c mengalami sedikit peningkatan dari kondisi normal dengan kecepatan sebesar 0.2-0.5 m/s. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh adanya pengaruh dari pasang surut yang terjadi di pesisir. Pasang surut merupakan salah satu faktor besar yang membangkitkan arus permukaan, terutama di wilayah pesisir. Ketika terjadi pasang surut di pesisir, air laut akan mengalir menuju ke pantai dan meningkatkan volume air laut (Rochaddi *et al.*, 2021). Hal tersebut dapat menghasilkan arus permukaan laut yang lebih kuat di sekitar pesisir.

Kemudian arus musim timur yang dimodelkan pada saat kondisi normal gambar 6e memiliki kecepatan arus berkisar 0.1-0.4 m/s dengan arah arus yang bergerak ke barat dan barat laut. Pada saat kondisi La-Nina gambar 6d kecepatan arus musim timur mengalami sedikit pelemahan dari kondisi normalnya dengan kecepatan 0.05-0.3 m/s. Hal tersebut terjadi dapat dikarenakan oleh kecepatan angin yang mengalami pelemahan pada saat La-Nina. Sedangkan pada saat kondisi El-Nino gambar 6f kecepatan arus mengalami peningkatan dari kondisi normal dengan kecepatan sebesar 0.2-0.7 m/s. Arus yang bergerak dari Laut Flores mengalami sedikit penguatan dari kondisi normalnya. Hal ini disebabkan karena adanya penguatan kecepatan angin sehingga kecepatan arus ikut mengalami penguatan. Angin yang bergerak di atas permukaan laut akan membentuk gelombang sehingga dapat menggerakkan air laut sehingga dapat terbentuk arus permukaan laut. Oleh karena itu, apabila angin semakin kuat maka gaya yang diberikan untuk menggerakkan air laut akan semakin tinggi, sehingga arus laut akan semakin terbentuk dan bergerak lebih cepat. Dari hasil yang diperoleh ini fenomena ENSO juga dapat berpengaruh terhadap arus permukaan melalui angin pada perairan Masalembu. Namun selain itu arah pergerakan arus permukaan laut juga dapat dipengaruhi oleh peristiwa yang terjadi di pesisir perairan Masalembu.



Gambar 6. Persebaran arah dan kecepatan arus pada musim barat dan musim timur saat kondisi La-Nina (a, d), normal (b, e), dan El-Nino (c, f).



Gambar 7. Model persebaran Suhu Permukaan Laut pada saat kondisi La-Nina (a, d), normal (b, e), dan El-Nino (c, f).

Model Persebaran Suhu Permukaan Laut (SPL)

Model persebaran SPL yang diperoleh, merupakan hasil yang diperoleh pada saat kondisi normal, La-Nina, dan El-Nino. Hasil tersebut digunakan untuk memperkuat hasil EOF yang telah diperoleh serta pengaruhnya terhadap angin dan arus permukaan laut. Persebaran SPL yang dimodelkan merupakan kondisi SPL pada musim barat dan musim timur. Kondisi suhu permukaan laut dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor yang salah satunya yaitu angin (Syafik *et al.*, 2013). Adanya angin muson pada perairan Indonesia dapat mempengaruhi SPL melalui peningkatan Transpor Ekman, terjadi pencampuran secara vertikal, dan adanya proses evaporasi sepanjang musim panas, sehingga dapat menyebabkan pendinginan SPL, begitu pula terjadi sebaliknya (Clark *et al.*, 1999; Syafik *et al.*, 2013).

Ketika musim barat saat kondisi normal **Gambar 7b** SPL memiliki suhu berkisar 29-30°C yang termasuk dalam kategori hangat. Namun pada saat memasuki fase La-Nina **Gambar 7a**, SPL mengalami penurunan suhu permukaan dengan suhu yang berkisar 28-29°C. Hal tersebut dapat dikarenakan pada saat bersamaan angin yang bertiup di atas permukaan angin memiliki kecepatan yang tinggi sehingga terjadi gesekan antara angin dan SPL yang menyebabkan penurunan SPL. Saat fase La-Nina, kecepatan angin yang bergerak mengalami penguatan membuat gaya gesek pada laut juga semakin tinggi. Hal ini menyebabkan terjadinya pergerakan massa air permukaan yang mengakibatkan naiknya massa air yang lebih dingin dari lapisan dalam, yang kemudian menggantikan massa air permukaan yang berpindah, sehingga membuat SPL menjadi dingin. Sedangkan saat fase El-Nino SPL **Gambar 7c** mengalami penguatan yang dimana nilai SPL mencapai 30-31°C. Hal tersebut dikarenakan saat fase El-Nino angin yang bertiup mengalami pelemahan kecepatan sehingga gesekan yang terjadi antara SPL dan angin menjadi berkurang. Sehingga membuat proses adveksi dan evaporasi yang terjadi menjadi rendah, hal ini membuat pelepasan panas dari laut menjadi kecil sehingga SPL Musim Barat menjadi lebih tinggi (Syafik *et al.*, 2013).

Saat memasuki musim timur SPL memiliki suhu yang cenderung lebih dingin berkisar 28-29°C pada kondisi normal gambar 9e. Ketika fase La-Nina SPL mengalami kenaikan suhu yang dimana berkisar 29°C, yang dimana pada saat bersamaan angin pada saat fase La-Nina mengalami pelemahan kecepatan. Namun pada saat memasuki fase El-Nino, SPL mengalami penurunan hingga mencapai 27-28°C. Hal ini dapat disebabkan karena kecepatan angin yang menguat pada saat fase El-Nino. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pergantian massa air pada permukaan laut, yang membuat naiknya massa air dingin menuju ke permukaan, sehingga SPL mengalami penurunan. Dari hasil yang diperoleh, dapat terlihat apabila fenomena ENSO sangat berpengaruh terhadap SPL melalui angin yang berhembus.

KESIMPULAN

Persebaran SPL secara spasial dan temporal dapat diperoleh dari hasil analisis EOF dalam bentuk mode *Principal Component* (PC). Analisis EOF dilakukan dengan menggunakan *Low-pass filter* untuk membandingkan besar pengaruh ENSO terhadap wilayah perairan Masalembu. Pada 5 mode EOF SPL yang diperoleh menjelaskan total varian 95.07%. Sedangkan total varian dengan data yang telah difilter diperoleh total varian sebesar 93.4%. Mode-1 merupakan mode yang paling dominan dengan persentase sebesar 87.96% dan 85.06%. Dari mode-1 yang dibandingkan dengan indeks ONI, dapat terlihat pengaruh ENSO pada perairan Masalembu. Secara temporal PC-1 dengan indeks ONI memperlihatkan pada tahun 2010-2012 dan 2017-2018 terjadi fase La-Nina, selain itu pada tahun 2015-2016 terjadi fase El-Nino. Pada musim timur, El Nino (La Nina) memperkuat (memperlemah) kecepatan angin muson sehingga suhu permukaan laut lebih rendah (tinggi) dan kecepatan arus laut lebih tinggi (rendah) dibanding rata-rata klimatologinya. Sedangkan pada musim barat berlaku sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, O., Schneider, T., dan Harnik, N. 2014. Role of changes in mean temperatures versus temperature gradients in the recent widening of the Hadley circulation. *Journal of Climate*, 27(19): 7450-7461.
- Baffoe, G. K., Denkyirah, E. K., Agyeman, K. O., Adjei, E. Y., Osei-Owusu, Y., Asuming-Brempong, S., dan Owusu, K. 2021. Climate change impacts on maize productivity in the Savannah zone of Ghana: Implications for adaptation and mitigation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108463. doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108463

- Bayr, T., Dommenges, D., Martin, T., dan Power, S. B. 2014. The eastward shift of the Walker Circulation in response to global warming and its relationship to ENSO variability. *Climate dynamics*, 43: 2747-2763.
- Bodnar, J. L., Mouhoubi, K., dan Vallet, J. M. 2022. Examples of SVD decomposition contributions to the non-destructive testing of cultural heritage mural paintings using stimulated infrared thermography. *European Physical Journal: Applied Physics*, 97, 75.
- Dalton, S. J., Carroll, A. G., Sampayo, E., Roff, G., Harrison, P. L., Entwistle, K., ... dan Diamond, S. L. 2020. Successive marine heatwaves cause disproportionate coral bleaching during a fast phase transition from El-Niño to La-Niña. *Science of the Total Environment*, 715, 136951.
- Dewanti, Y. P., Muliadi, M., dan Adriat, R. 2018. Pengaruh El-Niño Southern Oscillation (ENSO) Terhadap Curah Hujan di Kalimantan Barat. *PRISMA FISIKA*, 6(3).
- Farjami, H., dan Hesari, A. R. E. 2020. Assessment of sea surface wind field pattern over the Caspian Sea using EOF analysis. *Regional Studies in Marine Science*, 35, 101254.
- Fukuoka A. 1951. A Study of 10-day Forecast (A Synthetic Report), Vol. XXII. *The Geophysical Magazine: Tokyo*; 177–218.
- Gaol, J. L., dan Sadhotomo, B. 2017. Karakteristik dan variabilitas parameter-parameter oseanografi Laut Jawa hubungannya dengan distribusi hasil tangkapan ikan. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 13(3): 201-211.
- Glantz, M. H., dan Ramirez, I. J. 2020. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to enhance societal readiness for El-Niño's impacts. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11: 394-403.
- Good, S., Fiedler, E., Mao, C., Martin, M. J., Maycock, A., Reid, R., ... dan Worsfold, M. 2020. The current configuration of the OSTIA system for operational production of foundation sea surface temperature and ice concentration analyses. *Remote Sensing*, 12(4): 720.
- Habibie, M. N., dan Nuraini, T. A. 2014. Karakteristik dan tren perubahan suhu permukaan laut di indonesia periode 1982-2009. *Jurnal meteorologi dan geofisika*, 15(1).
- Handoko, E. Y., dan Filaili, R. B. 2019. Analisa Fenomena Enso Di Perairan Indonesia Menggunakan Data Altimetri Topex/Poseidon dan Jason Series Tahun 1993–2018. *Geoid*, 14(2): 43-50.
- Hannachi, A., Jolliffe, I. T., dan Stephenson, D. B. 2007. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(9): 1119-1152.
- Harcici, M. C. 2017. Misteri Segitiga “Masalembu” Merupakan Segitiga Bermuda Di Wilayah Indonesia. *Jurnal Sains dan Teknologi Maritim*, (2): 122-131.
- Kersalé, M., Volkov, D. L., Pujiana, K., dan Zhang, H. 2022. Interannual variability of sea level in the southern Indian Ocean: local vs. remote forcing mechanisms. *Ocean Science*, 18(1): 193-212.
- Kumara, K. S., Karunakara, N., dan Mayya, Y. S. 2023. Development of a “222Rn incremented method” for the rapid determination of air exchange rate using soil gas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 257, 107076.
- Kunarso, K., Graharto, S. R., dan Wulandari, S. Y. 2022. Identifikasi Variabilitas Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-A serta Intensitas Upwelling di Selat Makassar. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(2): 206-214.
- Lorenz, E. N. 1956. Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction. *Technical report, Statistical Forecast Project Report 1, Dep of Meteor, MIT*: 49.
- McPhaden, M. J., Santoso, A., dan Cai, W. 2020. Introduction to El Niño Southern Oscillation in a changing climate. *Wiley: El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*, 1-19. ISBN: 9781119548126
- Mohamed, B., Nagy, H., dan Ibrahim, O. 2021. Spatiotemporal variability and trends of marine heat waves in the red sea over 38 years. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 842.
- Mulyana, E. 2002a. Analisis angin zonal di Indonesia selama periode ENSO. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 3(2): 115-120.
- Mulyana, E. 2002b. Hubungan antara ENSO dengan variasi curah hujan di Indonesia. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 3(1): 1-4.
- Naeimi, V., dan Wagner, W. 2010. C-band scatterometers and their applications. *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*, 229-246.
- Obukhov, A. M. 1947. Statistically homogeneous fields on a sphere. *Uspehi Mathematicheskikh Nauk* 2: 196–198.

- Palacios-Hernández, E., Carrillo, L. E., Filonov, A., Brito-Castillo, L., dan Cabrera-Ramos, C. E. 2010. Seasonality and anomalies of sea surface temperature off the coast of Nayarit, Mexico. *Ocean Dynamics*, 60, 81-91.
- Putra, A. P., Atmadipoera, A. S., dan Pariwono, J. I. 2020. Respons suhu permukaan laut dan klorofil-A terhadap kejadian Enso dan Iodm di Wilayah Indo-Pasifik Tropis. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(1), 167-182.
- Putri, I. W., Wirasatriya, A., Ramdani, F., Jalil, A. R., dan Prasetyawan, I. B. 2021a. The El-Niño Southern Oscillation (ENSO) Effect on Upwelling in The North Maluku Sea. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 750, No. 1, p. 012037). *IOP Publishing*.
- Putri, M. R., Sari, T., Anwar, I. P., Mandang, I., Setiawan, A., dan Tatipatta, W. M. 2021b. Analysis of sea level changes in Balikpapan Bay as basic data for strategic planning the new capital city of Republic of Indonesia. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1763, No. 1, p. 012043). *IOP Publishing*.
- Redfern, S., Optis, M., Xia, G., dan Draxl, C. 2023. Offshore wind energy forecasting sensitivity to sea surface temperature input in the Mid-Atlantic. *Wind Energy Science*, 8(1): 1-23.
- Robial, S. M., Nurdiati, S., dan Sopaheluwakan, A. 2016. Analisis Empirical Orthogonal Function (Eof) Berbasis Eigen Value Problem (EVP) Pada Dataset Suhu Permukaan Laut Indonesia. *Journal of Mathematics and Its Applications*, 15(1): 1-12.
- Rochaddi, B., Ismanto, A., dan Suryono, C. A. 2021. Variasi Temporal Karakteristik Arus di Perairan Tanjung Jati Kabupaten Jepara. *Jurnal Kelautan Tropis*, 24(2): 255-264.
- Seprianto, A., Kunarso, K., dan 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.
- Septiawan, P., Nurdiati, S., dan Sopaheluwakan, A. 2019. Numerical analysis using empirical orthogonal function based on multivariate singular value decomposition on indonesian forest fire signal. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 303, No. 1, p. 012053). *IOP Publishing*.
- Syafik, A., Kunarso, K., dan Hariadi, H. 2013. Pengaruh sebaran dan gesekan angin terhadap sebaran suhu permukaan laut Di Samudera Hindia (Wilayah pengelolaan perikanan Republik Indonesia 573). *Journal of Oceanography*, 2(3): 318-328.
- Tung, K. K., Chen, X., Zhou, J., dan Li, K. F. 2019. Interdecadal variability in pan-Pacific and global SST, revisited. *Climate dynamics*, 52, 2145-2157.
- Wang, C., dan Fiedler, P. C. 2006. ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in oceanography*, 69(2-4), 239-266.
- Wang, M., Guo, J. R., Song, J., Fu, Y. Z., Sui, W. Y., Li, Y. Q., ... dan Zuo, W. T. 2020. The correlation between ENSO events and sea surface temperature anomaly in the Bohai Sea and Yellow Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 35, 101228.
- Wang, X. Y., Zhu, J., Chang, C. H., Johnson, N. C., Liu, H., Li, Y., ... dan Li, X. 2021. Underestimated responses of Walker circulation to ENSO-related SST anomaly in atmospheric and coupled models. *Geoscience Letters*, 8(1), 1-13.
- Wirasatriya, A., Prasetyawan, I. B., Triyono, C. D., dan Maslukah, L. 2018. Effect of ENSO on the variability of SST and Chlorophyll-a in Java Sea. *IOP Publishing*, 116(1): 012063.
- Yananto, A., dan Sibarani, R. M. 2016. Analisis kejadian el nino dan pengaruhnya terhadap intensitas curah hujan di wilayah JABODETABEK (studi kasus: periode puncak musim hujan tahun 2015/2016). *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 17(2): 65-73.