

Variasi Konsentrasi Klorofil-a di Perairan Maluku Utara Pada Fenomena ENSO Modoki Tahun 2009-2010

Puspaningtyas Mutiaraputri Reksajaya*, Kunarso dan Muhammad Zainuri

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

Abstrak

Perubahan iklim dan pemanasan global selama beberapa tahun belakangan menyebabkan perbedaan dan variasi pada fenomena ENSO. Anomali fenomena ENSO yang muncul dimana terdapat kenaikan suhu pada permukaan laut di wilayah Pasifik Tengah yang dikelilingi oleh anomali lain berupa suhu rendah pada ujung wilayah Pasifik Timur dan Barat disebut sebagai El Niño Modoki. Berdasarkan beberapa kajian referensi tentang pengaruh fenomena ENSO, terutama El Niño, konsentrasi klorofil-a mengalami kenaikan sementara SPL mengalami penurunan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pola variasi klorofil-a terhadap ENSO di Laut Maluku Utara dengan menggunakan metode Interactive Data Language. Hasil analisis menunjukkan bahwa perairan Maluku Utara mengalami kenaikan konsentrasi klorofil-a yang terpusat pada Teluk Ruli dan Teluk Kao bersamaan dengan kenaikan SPL yang terpusat pada Laut Sulawesi dan Laut Halmahera pada saat terjadinya fenomena El Niño Modoki 2009-2010.

Kata kunci: ENSO, Modoki, konsentrasi klorofil-a, perairan Maluku Utara

Abstract

The Chlorophyll-a Concentration Variation in the Northern Maluku Seas during the ENSO Modoki Event of 2009-2010

Timbulsloko Waters is located in Sayung Demak District with sloping topography and low elevation. This is one of the reasons why this area is vulnerable to flooding, either due to the impact of rising sea levels or due to land subsidence. The Timbulsloko water area is influenced by tidal conditions and ocean currents, which change depending on the season. This is related to the height of the land surface in Sayung District, which is at the lowest and highest tide levels. This research aims to determine the formzahl value and the value of the tidal harmonic components in Timbulsloko. Additionally, it seeks to determine the planned sea level value for January–February 2022. The data used is primary data, namely tides, secondary data includes wind and sea level rise data. Tide data is collected using a tide gauge, the tidal data processing method is carried out using the Admiralty and Least Square methods. The results showed the HHWL value was 53.17 cm, the Admiralty method formzahl was 8.49 cm, the HHWL value was 593.08 cm, and the least squares formzahl was 5.48 cm. The obtained DWL value is 0.84 m. The root mean square error resulting from the least squares method is 17.80 cm.

Keywords: ENSO, Modoki, chlorophyll-a concentration, Southern Maluku seas.

PENDAHULUAN

El Niño Southern Oscillation (ENSO) adalah sebuah fenomena atmosferik yang memiliki pengaruh besar terhadap suhu permukaan laut (SPL) di daerah Samudera Pasifik. Fenomena ENSO dibedakan menjadi dua jenis, yaitu siklus El Niño yang menyebabkan penurunan suhu permukaan laut di Pasifik Tengah hingga wilayah khatulistiwa timur, dan siklus La Nina yang menyebabkan kenaikan suhu permukaan laut di wilayah yang sama. Selain suhu permukaan laut, ENSO juga dapat menyebabkan perubahan pada variasi iklim seperti curah hujan dan pola angin pada ketinggian dan wilayah tertentu (Feng, *et. al.*, 2019).

Feng, *et. al.* (2019), Capotondi, *et. al.* (2021), dan Karnakaus (2013) mengatakan bahwa terdapat perbedaan serta variasi pada amplitudo, evolusi temporal, dan pola ruang pada fenomena ENSO yang terjadi selama beberapa tahun terakhir. Salah satu variasi ENSO terlihat pada musim panas tahun 2004 saat terjadi peristiwa El Niño yang ditunjukkan oleh adanya kenaikan suhu pada permukaan laut di wilayah Pasifik Tengah, namun kenaikan suhu ini dikelilingi oleh anomali lain berupa suhu rendah pada ujung wilayah Pasifik Timur dan Barat. Peristiwa ini kemudian disebut sebagai peristiwa El Niño Modoki (Capotondi, *et. al.*, 2021).

Nilai index EMI pada tahun 2010 menunjukkan nilai negatif yang mengindikasikan fenomena ENSO Modoki (As-syakur, 2015), sementara data nilai index EMI yang diambil dari *National Oceanic dan Atmospheric Administration*, pada tahun 2009 juga menunjukkan adanya kemunculan kolam panas di daerah Pasifik Tengah yang mengindikasikan adanya peristiwa ENSO Modoki.

Salah satu pengaruh peristiwa ENSO di wilayah perairan Indonesia diantaranya adalah perannya dalam kenaikan dan penurunan konsentrasi klorofil-a, terutama pada peristiwa El Niño yang membuat konsentrasi klorofil-a mengalami kenaikan (Hadiman, *et. al.*, 2016; Wirasatriya, *et. al.*, 2017; Dewi, *et. al.*, 2018). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola variasi klorofil-a terhadap ENSO di Laut Maluku Utara dengan menggunakan metode *Interactive Data Language*.

MATERI DAN METODE

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder, yaitu data Indeks El Niño Modoki (EMI) yang diambil dari laman *psl.noaa.gov* dalam bentuk tabel berisi nilai EMI setiap bulan hingga tahun 2018, dan data konsentrasi klorofil-a yang diambil dari laman *oceancolour.org* yang merupakan produk *Ocean Color CCI Project* milik *ESA Climate Change Initiative* pada wilayah perairan Maluku Utara selama 7 tahun (2004 – 2010). Data lain yang digunakan sebagai data pendukung meliputi data SPL dan angin yang diambil dari laman *remss.com* pada wilayah perairan Maluku Utara selama 7 tahun (2004 – 2010). Penelitian ini berlokasi di perairan Maluku Utara pada posisi geografis 124° BT - 130° BT dan garis bujur 4°LU - 0° LU yang mencakup bagian dari Laut Maluku dan Laut Halmamera. Parameter yang dikuantifikasi terdiri dari parameter ENSO Modoki yang diambil dalam bentuk indeks (EMI), dimana dalam EMI, dinyatakan bahwa fenomena ENSO Modoki terjadi bila nilai EMI lebih dari +0.7.

Metode analisis dilakukan dengan mengacu pada analisis yang bersumber dari beberapa penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pengaruh fenomena ENSO, terutama fenomena El Niño, pada konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia umumnya menyebabkan kenaikan, sementara SPL mengalami penurunan. Oleh karena itu, dengan mempertimbangkan anomali SPL, fenomena ENSO diidentifikasi dengan anomali SPL dan dicocokkan dengan nilai Index EMI yang diambil dari *National Oceanic dan Atmospheric Administration* untuk memastikan fenomena ENSO Modoki.

Pengolahan data SPL, klorofil-a, dan angin dilakukan menggunakan bantuan bahasa pemrograman IDL (*Interactive Data Language*). Data SPL dan klorofil-a yang digunakan didapatkan dari citra satelit dan merupakan data rata-rata harian (*daily*) selama tujuh tahun (2004 – 2010). Data SPL dan klorofil-a diunduh dalam bentuk data *.nc dan diolah dengan cara dilakukan proses *extract* menggunakan perangkat lunak IDL. Setelah dilakukan *extract*, dilakukan komposit data harian menggunakan **Persamaan (1)** untuk mendapatkan nilai rata-rata SPL dan klorofil-a bulanan setiap tahun dengan rumus komposit (Wirasatriya, *et. al.*, 2017):

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

Keterangan:

- $\bar{X}b(x, y)$ = Rata-rata bulanan
- $xi(x, y, t)$ = Data harian ke-i pada posisi bujur x, lintang y dan hari ke-t
- n = Jumlah hari dalam 1 bulan
- $i = 1$ = Hari ke-1
- *Jika xi = NaN, maka data tersebut tidak mempunyai nilai (data kosong) dan tidak dimasukkan dalam perhitungan rata-rata

Data angin berupa data rata-rata harian selama tujuh tahun (2004 – 2010) dan terdiri dari komponen angin zonal (timur-barat (*u*)) dan meridional (utara-selatan (*v*)). Data angin harian di ekstrak dan dikompositkan menjadi data rata-rata harian dengan perangkat lunak IDL untuk memperoleh nilai kecepatan dalam arah *u* dan *v*, lalu disimpan dalam format (*.sav). Untuk mendapat kecepatan dan arah angin digunakan:

$$\begin{aligned}
 V &= \sqrt{u^2 + v^2} & (2) \\
 \theta &= 90 - \left| \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \right|; u > 0, v < 0 \\
 \theta &= 90 + \left| \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \right|; u > 0, v > 0 \\
 \theta &= 270 - \left| \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \right|; u < 0, v < 0 \\
 \theta &= 270 + \left| \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \right|; u < 0, v > 0
 \end{aligned}$$

Keterangan:

- u = komponen angin zonal (timur – barat) (m/s)
- v = komponen angin meridional (utara – selatan) (m/s)
- V = kecepatan angin (m/s)
- θ = arah angin ($^{\circ}$)

Hasil ekstrak data angin meliputi kecepatan dan arah angin. Data angin harian kemudian dirata-rata untuk mendapatkan data bulanan setiap tahun, dengan menggunakan rumus komposit yang sama.

Analisa korelasi digunakan untuk mengetahui keeratan hubungan antar variabel analisis. Metode uji korelasi yang digunakan dalam analisis adalah analisis korelasi silang yang menggunakan rumus Persamaan (3). Korelasi ini digunakan untuk memprediksi suatu hubungan data masukan (x) dengan data keluaran (y):

$$r = \frac{n\Sigma XY - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{\sqrt{[n\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2][n\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2]}} \quad (3)$$

Keterangan:

- r = Nilai korelasi
- n = Banyaknya pasangan data X dan Y
- ΣX = Total jumlah dari variabel X
- ΣY = Total jumlah dari variabel Y
- ΣX^2 = Kuadrat dari total jumlah variabel X
- ΣY^2 = Kuadrat dari total jumlah variabel Y
- ΣXY = Hasil perkalian dari total jumlah X dan Y

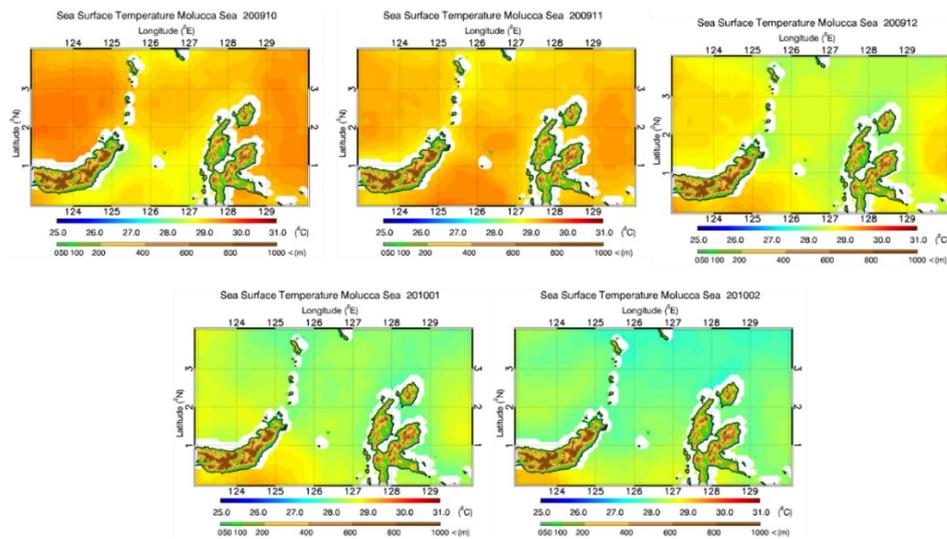
Nilai korelasi berkisar pada interval $-1 \leq 1$, dimana jika korelasi bernilai positif, maka hubungan antara dua variabel bersifat searah. Sebaliknya, jika korelasi bernilai negatif, maka hubungan antara dua variabel bersifat berlawanan. Hasil korelasi terbagi kedalam beberapa kriteria berdasarkan nilai koefisien korelasi yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kekuatan Hubungan Uji Korelasi

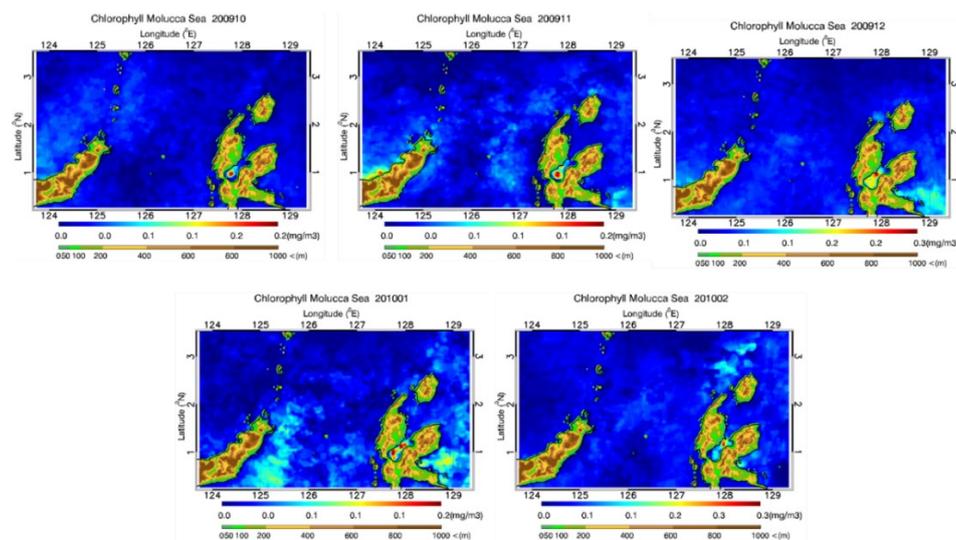
Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,000 - 0,199	Sangat Rendah
0,200 - 0,399	Rendah
0,400 - 0,599	Sedang
0,600 - 0,799	Kuat
0,800 - 1,000	Sangat Kuat

HASIL DAN PEMBAHASAN
El Niño Modoki 2009-2010

Hasil analisis terhadap suhu permukaan laut periode Oktober 2009 – Februari 2010 di perairan Maluku Utara menunjukkan suhu permukaan laut mengalami kenaikan maksimal pada bulan ketiga, yaitu pada bulan Desember 2009 dengan nilai 29,5°C yang terpusat pada Laut Sulawesi dan Laut Halmamera, sementara nilai terendah adalah 28,5°C yang terjadi pada bulan Oktober 2009. Nilai suhu tertinggi pada periode Oktober 2009 – Februari 2010 yang mencapai nilai 29,5°C memperlihatkan sebuah anomali kenaikan SPL yang dapat diklasifikasikan sebagai peristiwa ENSO Modoki (Gambar 1). Hal ini juga ditunjukkan oleh data nilai indeks ENSO yang memperlihatkan kenaikan suhu di daerah NINO-4 dan NINO-3.4 yang dimulai sejak musim panas tahun 2009 dengan anomali kenaikan SPL yang berpusat pada bagian tengah Pasifik, serta nilai indeks EMI yang memperlihatkan peristiwa ENSO Modoki pada bulan November 2009 hingga Januari 2010.



Gambar 1. SPL Perairan Maluku Utara pada El Niño Modoki Oktober 2009 - Februari 2010



Gambar 2. Konsentrasi Klorofil-a Perairan Maluku Utara pada El Niño Modoki Oktober 2009 - Februari 2010

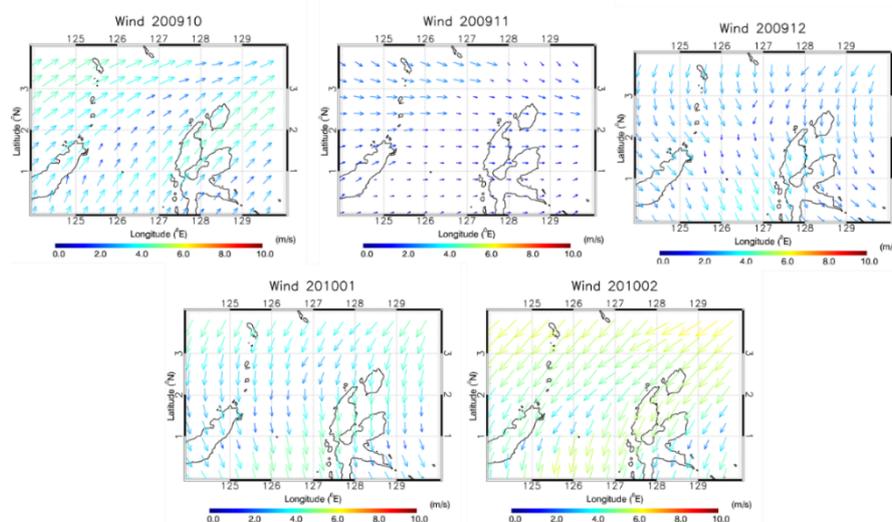
Hasil analisis terhadap konsentrasi klorofil-a periode Oktober 2009 – Februari 2010 di perairan Maluku Utara menunjukkan konsentrasi klorofil-a mengalami kenaikan pada bulan yang sama saat suhu permukaan laut di perairan Maluku Utara berada di puncak, yaitu pada bulan Desember 2009 dengan nilai 0.031 mg/m^3 yang berpusat pada Teluk Buli dan Teluk Kao, dan menyebar pada Januari 2010 hingga ke Laut Halmamera dan Laut Maluku, sementara nilai terendah adalah 0.015 mg/m^3 yang terjadi pada bulan Oktober 2009. Nilai konsentrasi klorofil-a tertinggi pada periode Oktober 2009 – Februari 2010 yang mencapai nilai $0,031 \text{ mg/m}^3$ memperlihatkan sebuah anomali kenaikan konsentrasi yang terjadi bersamaan dengan kenaikan SPL pada Desember 2009. Hal ini menunjukkan perbedaan yang umumnya terjadi pada fenomena El Niño, dimana konsentrasi klorofil-a akan mengalami kenaikan seiring dengan nilai SPL yang turun.

Hasil analisis terhadap arah dan kecepatan angin periode Oktober 2009 – Februari 2010 di perairan Maluku Utara menunjukkan kecepatan tertinggi terjadi pada bulan Februari 2010 yang berkisar pada nilai $5 \text{ m/s} - 6 \text{ m/s}$ dan bergerak menuju selatan dari timur laut. Arah angin pada Desember 2009 - Februari 2010 memperlihatkan angin muson barat yang bergerak dari Asia menuju Australia, sementara pada November 2009 yang merupakan musim peralihan tampak memperlihatkan anomali angin barat bergerak menuju timur.

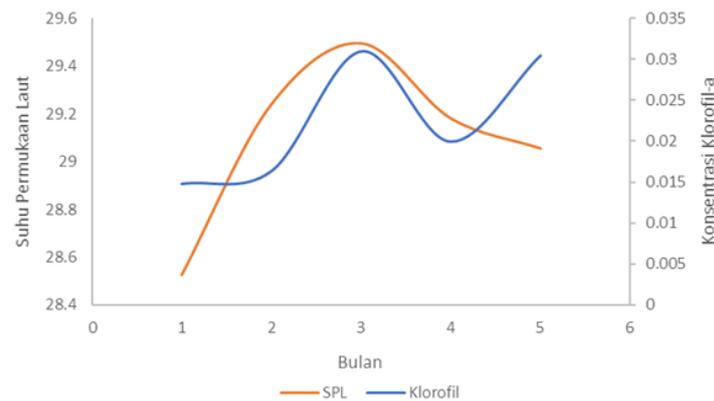
Hasil dari uji korelasi rata-rata pada saat peristiwa El Niño Modoki tahun 2009-2010 adalah $0,61$ yang menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang kuat antar variabel. Hal ini membuktikan bahwa pada saat SPL naik, maka konsentrasi klorofil-a juga akan mengalami kenaikan. SPL mengalami kenaikan pada bulan Oktober 2009 dengan nilai $28,5^\circ\text{C}$, kemudian mengalami kenaikan pada bulan November dan Desember 2009 dengan nilai rata-rata $29,3^\circ\text{C}$. Pada bulan Januari 2010, nilai SPL adalah $29,1^\circ\text{C}$, dan semakin menurun hingga bulan Februari 2010 dengan nilai 29°C . Sementara itu, dapat dilihat bahwa konsentrasi klorofil-a mengalami kenaikan pada bulan yang sama. Pada bulan Oktober 2009, konsentrasi klorofil-a memiliki rata-rata nilai $0,015 \text{ mg/m}^3$, kemudian mengalami sedikit kenaikan pada bulan November 2009 dengan nilai rata-rata $0,016 \text{ mg/m}^3$. Klorofil-a mengalami kenaikan drastis pada bulan berikutnya dengan nilai rata-rata $0,031 \text{ mg/m}^3$ sebelum mengalami penurunan pada bulan Januari 2010 dengan nilai rata-rata $0,019 \text{ mg/m}^3$. Pada bulan Februari 2010, konsentrasi klorofil-a kembali mengalami kenaikan drastis dengan nilai $0,030 \text{ mg/m}^3$.

El Niño Konvensional 2004-2005

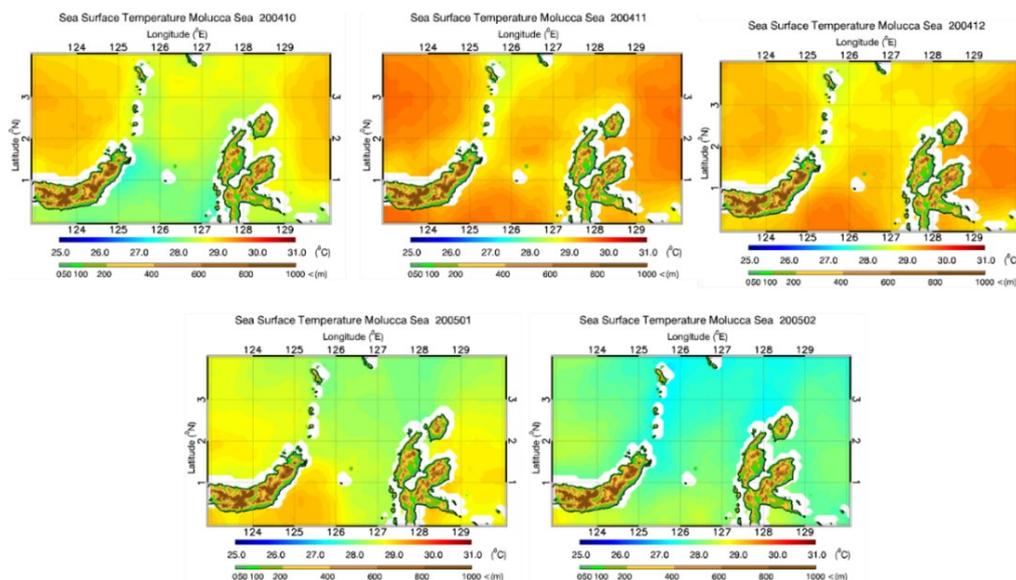
Hasil analisis terhadap suhu permukaan laut periode Oktober 2004 – Februari 2005 di perairan Maluku Utara menunjukkan suhu permukaan laut mengalami kenaikan maksimal pada bulan Desember 2004 dengan nilai $29,7^\circ\text{C}$ yang terpusat pada Laut Sulawesi dan Laut Halmamera, sementara nilai terendah adalah $27,9^\circ\text{C}$ yang terjadi pada bulan Oktober 2004. Nilai SPL pada periode Oktober 2004 – Februari 2005 yang tampak lebih rendah bila dibandingkan dengan rata-rata nilai SPL selama 7 tahun di perairan Maluku Utara membuktikan adanya peristiwa El Niño konvensional yang juga ditunjukkan oleh data nilai indeks ENSO yang memperlihatkan peristiwa El Niño konvensional lemah pada tahun 2004-2005.



Gambar 3. Kondisi Angin Perairan Maluku Utara pada El Niño Modoki Oktober 2009 - Februari 2010



Gambar 4. Perbandingan Konsentrasi Klorofil dan SPL pada El Niño Modoki Oktober 2009 - Februari 2010



Gambar 5. SPL Perairan Maluku Utara pada El Niño Konvensional Oktober 2004 - Februari 2005

Hasil analisis terhadap konsentrasi klorofil-a periode Oktober 2004 – Februari 2005 di perairan Maluku Utara menunjukkan klorofil-a tertinggi terjadi saat SPL di Perairan Maluku Utara mengalami penurunan pada bulan Februari 2005 dengan nilai $0,033 \text{ mg/m}^3$ yang berpusat pada Teluk Buli dan Teluk Kao, sementara nilai terendah adalah $0,014 \text{ mg/m}^3$ yang terjadi pada bulan Januari 2005 saat SPL masih bernilai tinggi di perairan Maluku Utara dan menyebar di wilayah Teluk Buli, Teluk Kao, dan Laut Sulawesi. Nilai konsentrasi klorofil-a memperlihatkan kenaikan ketika nilai SPL mengalami penurunan pada Februari 2005.

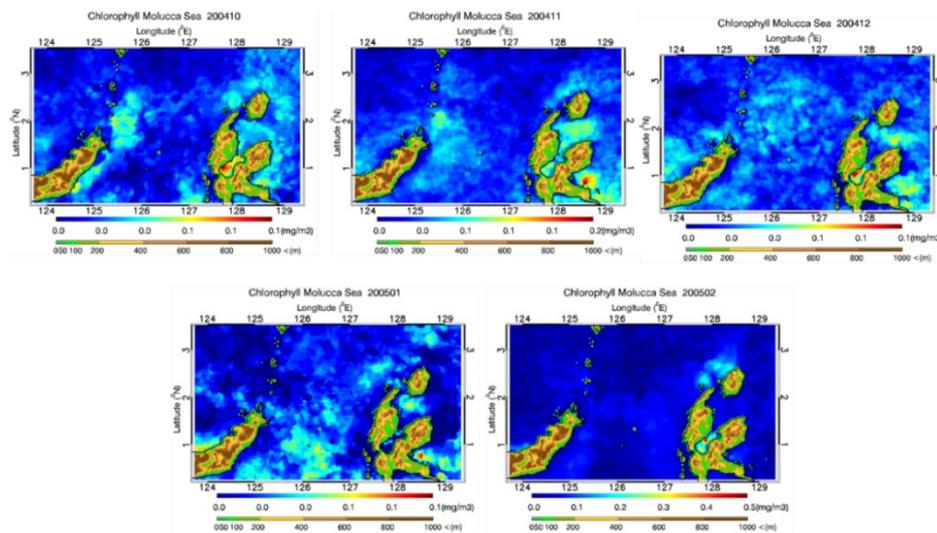
Hasil analisis terhadap arah dan kecepatan angin periode Oktober 2004 – Februari 2005 di perairan Maluku Utara menunjukkan kecepatan tertinggi terjadi pada bulan Februari 2005 pada nilai $5 \text{ m/s} - 6 \text{ m/s}$ dan bergerak menuju selatan dari timur laut. Arah angin pada Desember 2004 - Februari 2005 memperlihatkan angin muson barat yang bergerak dari Asia menuju Australia, sementara pada musim peralihan November 2004 tampak memperlihatkan anomali angin barat yang membuat angin bergerak dari barat menuju timur.

Hasil dari uji korelasi rata-rata pada saat peristiwa El Niño Konvensional tahun 2004-2005 adalah $-0,55$ yang menunjukkan korelasi kuat pada arah yang berlawanan. SPL mengalami kenaikan dari bulan Oktober 2004 dengan nilai $27,9^\circ\text{C}$, kemudian mengalami kenaikan pada bulan November dan Desember 2004 dengan nilai rata-rata $29,5^\circ\text{C}$. Pada bulan Januari 2005, nilai SPL adalah $29,4^\circ\text{C}$, dan semakin menurun hingga bulan

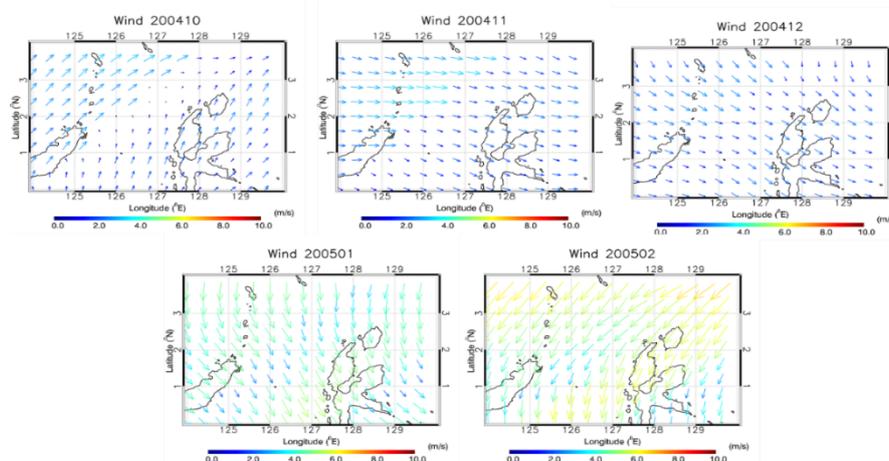
Februari 2005 dengan nilai 28,9°C. Sementara itu, dapat dilihat bahwa konsentrasi klorofil-a mengalami penurunan pada saat kenaikan SPL. Pada bulan Oktober 2004, konsentrasi klorofil-a memiliki rata-rata nilai 0,018 mg/m³, kemudian mengalami sedikit kenaikan pada bulan November 2004 dengan nilai rata-rata 0,026 mg/m³. Klorofil-a mengalami sedikit penurunan pada bulan berikutnya dengan nilai rata-rata 0,02 mg/m³ sebelum mengalami penurunan drastic pada bulan Januari 2005 dengan nilai rata-rata 0,014 mg/m³. Pada bulan Februari 2005, konsentrasi klorofil-a kembali mengalami kenaikan drastis dengan nilai 0.033 mg/m³.

La Nina Konvensional 2008-2009

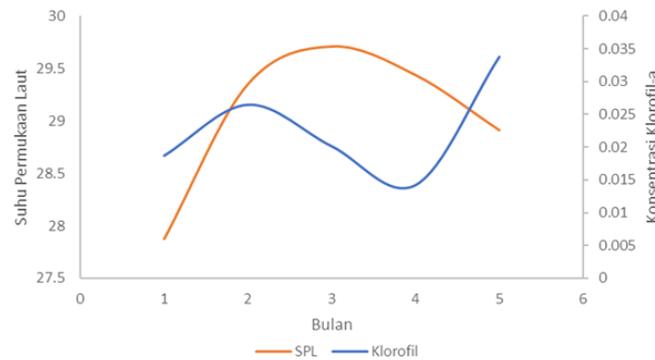
Hasil analisis terhadap suhu permukaan laut periode Oktober 2008 – Februari 2009 di perairan Maluku Utara menunjukkan kisaran 28,9°C – 29,6°C, dimana suhu permukaan laut mengalami kenaikan maksimal pada bulan ketiga, yaitu pada bulan November 2008 dengan nilai 29,6°C yang terpusat pada Laut Maluku dan Laut Halmamera, sementara nilai terendah adalah 28,7°C yang terjadi pada bulan Oktober 2008. Nilai SPL pada periode Oktober 2008 – Februari 2009 tampak lebih tinggi bila dibandingkan dengan rata-rata nilai SPL selama 7 tahun di perairan Maluku Utara yang membuktikan adanya La Nina konvensional. Hal ini juga ditunjukkan oleh data nilai indeks ENSO yang memperlihatkan peristiwa La Nina konvensional pada tahun 2008-2009 dibuktikan dengan nilai negatif pada wilayah NINO-3.4 dan mencapai puncak pada Januari 2009.



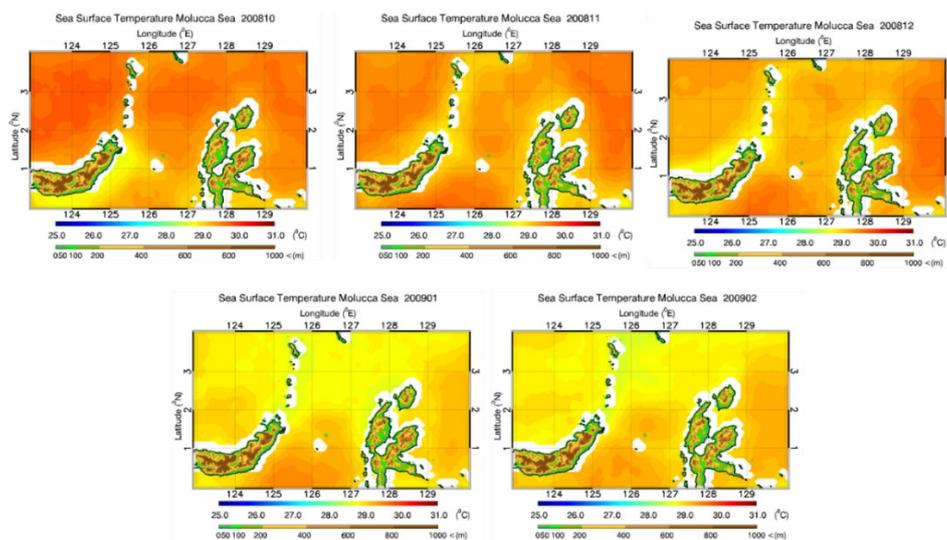
Gambar 6. Konsentrasi Klorofil-a Perairan Maluku Utara pada El Niño Konvensional Oktober 2004 – Februari 2005



Gambar 7. Kondisi Angin Perairan Maluku Utara pada El Niño Konvensional Oktober 2004 - Februari 2005



Gambar 8. Grafik Perbandingan Konsentrasi Klorofil dan SPL pada El Niño Konvensional Oktober 2004 – Februari 2005



Gambar 9. SPL Perairan Maluku Utara pada Keadaan La Nina Konvensional Oktober 2008 - Februari 2009

Hasil analisis terhadap konsentrasi klorofil-a periode Oktober 2008 – Februari 2009 di perairan Maluku Utara menunjukkan kisaran 0.0091 mg/m³ – 0.02 mg/m³, konsentrasi klorofil-a tertinggi terjadi saat SPL di Perairan Maluku Utara mengalami penurunan pada bulan Februari 2009 dengan nilai 0.02 mg/m³ yang berpusat pada Teluk Buli dan Teluk Kao, sementara nilai terendah adalah 0,0092 mg/m³ yang terjadi pada bulan Januari 2009 saat terjadi kenaikan SPL di perairan Maluku Utara dan menyebar di wilayah Teluk Buli, Teluk Kao, dan Laut Halmamera.

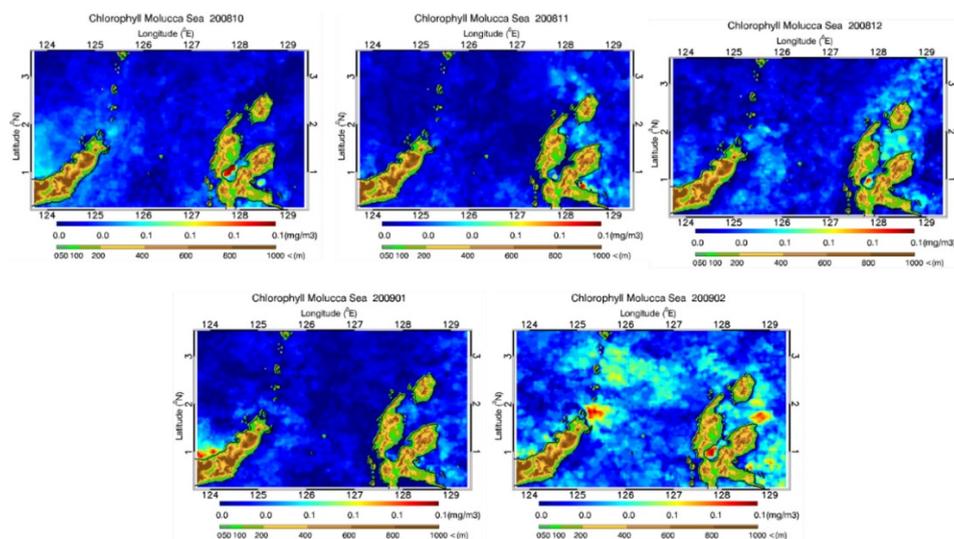
Hasil analisis terhadap arah dan kecepatan angin periode Oktober 2008 – Februari 2009 di perairan Maluku Utara menunjukkan nilai yang berkisar antara 1 m/s – 4 m/s, dimana kecepatan tertinggi terjadi pada bulan Februari 2009 yang berkisar pada nilai 2 m/s – 4 m/s dan bergerak menuju selatan dari utara dan timur laut. Arah angin pada Desember 2008 - Februari 2009 memperlihatkan angin muson barat yang bergerak dari Asia menuju Australia, sementara pada Oktober 2008 dan November 2008 yang merupakan musim peralihan tampak memperlihatkan angin lemah yang bergerak menuju utara dan selatan.

Hasil dari uji korelasi rata-rata pada saat peristiwa La Nina Konvensional tahun 2008-2009 adalah -0,63 yang menunjukkan korelasi kuat pada arah yang berlawanan. SPL pada bulan Oktober 2008 memiliki nilai 28,7°C, kemudian mengalami kenaikan pada bulan November dan Desember 2008 dengan nilai rata-rata 29,6°C. Pada bulan Januari 2009, nilai SPL adalah 29,4°C, dan semakin menurun hingga bulan Februari 2009 dengan nilai 29,1°C. Sementara itu, dapat dilihat bahwa konsentrasi klorofil-a mengalami perubahan seiring dengan perubahan SPL. Pada bulan Oktober 2008, konsentrasi klorofil-a memiliki rata-rata nilai 0,015 mg/m³, kemudian mengalami penurunan pada bulan November 2008 dengan nilai rata-rata 0,0094 mg/m³. Klorofil-a

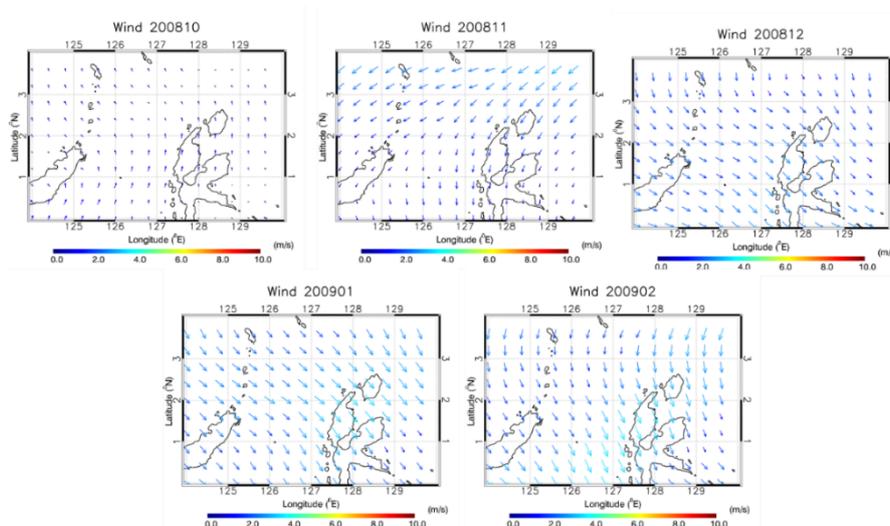
mengalami kenaikan kembali pada bulan berikutnya dengan nilai rata-rata 0,015 mg/m³ sebelum mengalami penurunan kembali pada bulan Januari 2009 dengan nilai rata-rata 0,0091 mg/m³. Pada bulan Februari 2009, konsentrasi klorofil-a kembali mengalami kenaikan drastis dengan nilai 0.02 mg/m³.

Perbandingan SPL dan Konsentrasi Klorofil-a pada Peristiwa ENSO

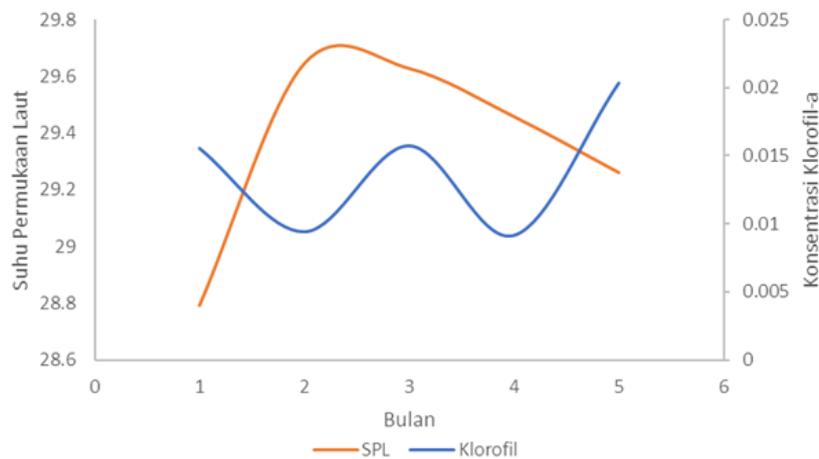
Hasil analisis terhadap suhu permukaan laut memperlihatkan SPL di perairan Maluku Utara pada Oktober 2009 – Februari 2010 memiliki variasi yang lebih konstan bila dibandingkan SPL pada Oktober 2004 – Februari 2005 dan Oktober 2008 – Februari 2009 walaupun rata-rata nilai SPL pada Oktober 2009 – Februari 2010 saat terjadinya El Niño Modoki cenderung lebih rendah daripada rata-rata nilai SPL selama 7 tahun terakhir. Sementara itu, rata-rata SPL tertinggi terjadi pada Oktober 2008 – Februari 2009 saat terjadinya La Nina Konvensional, dan rata-rata SPL terendah terjadi pada pada Oktober 2004 – Februari 2005 saat terjadinya El Niño Konvensional. SPL pada perairan Maluku Utara secara keseluruhan tampak mengalami kenaikan yang cukup signifikan pada bulan Desember, sementara nilai SPL terendah tampak terlihat pada bulan Oktober.



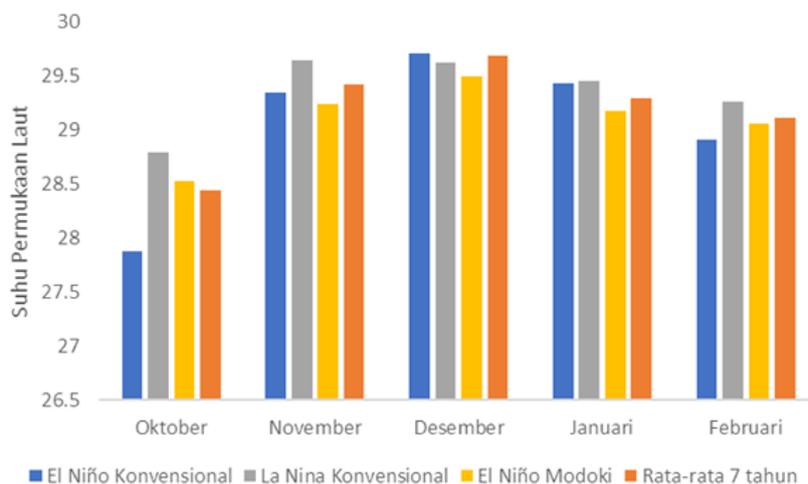
Gambar 10. Konsentrasi Klorofil-a Perairan Maluku Utara pada Keadaan La Nina Konvensional Oktober 2008 - Februari 2009



Gambar 11. Kondisi Angin Perairan Maluku Utara pada Keadaan La Nina Konvensional Oktober 2008 - Februari 2009



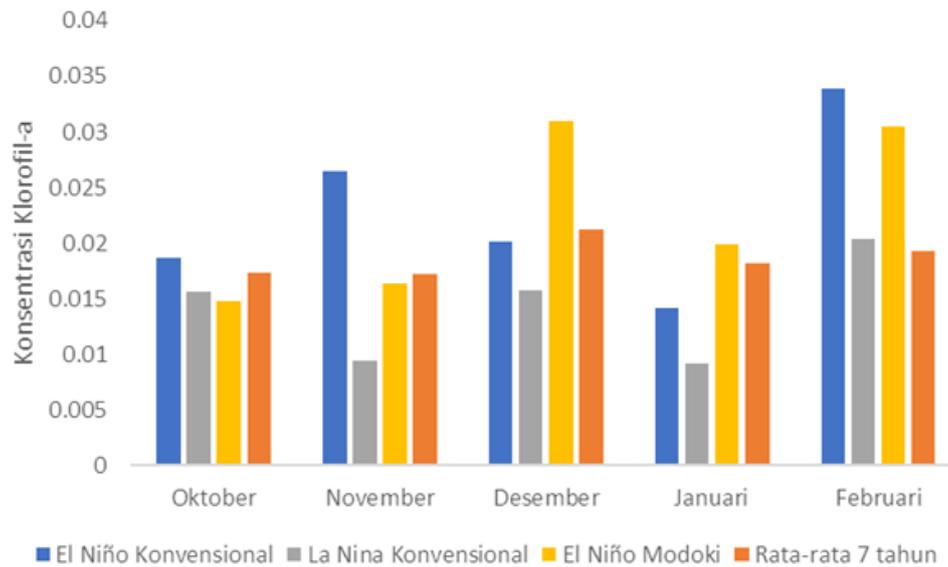
Gambar 12. Grafik Perbandingan Konsentrasi Klorofil dan SPL pada La Nina Konvensional Oktober 2008 - Februari 2009



Gambar 13. Grafik Perbandingan Suhu Permukaan Laut pada El Niño Konvensional 2004-2005, La Nina Konvensional 2008-2009, El Niño Modoki 2009-2010 Terhadap Rerata 7 Tahun

Hasil analisis terhadap konsentrasi klorofil-a memperlihatkan nilai konsentrasi klorofil-a di perairan Maluku Utara yang lebih bervariasi. Perbedaan yang paling signifikan terlihat dari bulan November, Desember, Februari. Pada November 2004, terlihat bahwa konsentrasi klorofil-a pada waktu tersebut memiliki nilai rata-rata yang paling tinggi. Akan tetapi pada bulan berikutnya, kenaikan konsentrasi klorofil-a paling drastis terjadi pada Desember 2009, sebelum mengalami penurunan bersama dengan rata-rata tahun lainnya. Konsentrasi klorofil-a pada Februari 2005 adalah konsentrasi klorofil-a paling tinggi selama 7 tahun terakhir. Rata-rata nilai konsentrasi klorofil-a tertinggi terjadi pada pada Oktober 2004 – Februari 2005 saat terjadinya El Niño Konvensional, sementara rata-rata nilai konsentrasi klorofil-a terendah terjadi pada pada Oktober 2008 – Februari 2009 saat terjadinya La Nina Konvensional. Konsentrasi klorofil-a pada Oktober 2009 – Februari 2010 saat El Niño Modoki memiliki kenaikan tertinggi terjadi pada Desember 2009 dan Februari 2010.

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, terlihat konsentrasi klorofil-a pada Februari 2005 adalah konsentrasi klorofil-a paling tinggi selama 7 tahun terakhir, yaitu dengan nilai mencapai 0,034 mg/m³. Hal ini sesuai dengan pendapat Hadiman, *et al.* (2016), Wirasatriya, *et al.* (2017), Dewi, *et al.* (2018), Kunarso, *et al.* (2018), dan Kunarso *et al.* (2019) yang mengatakan bahwa fenomena El Niño membuat konsentrasi



Gambar 14. Grafik Perbandingan Konsentrasi Klorofil-a pada El Niño Konvensional 2004-2005, La Nina Konvensional 2008-2009, El Niño Modoki 2009-2010 Terhadap Rerata 7 Tahun

klorofil-a naik seiring dengan nilai SPL yang turun. Konsentrasi klorofil-a pada tahun 2004-2005 saat terjadinya fenomena El Niño cenderung lebih tinggi dengan nilai $0,0227 \text{ mg/m}^3$ bila dibandingkan dengan tahun 2008-2009 saat terjadinya fenomena La Nina dengan nilai 0.014 mg/m^3 dan tahun 2009-2010 saat terjadinya fenomena El Niño Modoki dengan nilai $0,0225 \text{ mg/m}^3$. Tingginya konsentrasi klorofil-a pada tahun 2004-2005 saat fenomena El Niño sejalan dengan nilai SPL yang lebih rendah, sementara konsentrasi klorofil-a pada tahun 2008-2009 saat peristiwa La Nina memiliki konsistensi sebaliknya. Pada fenomena El Niño Modoki 2009-2010, konsentrasi klorofil-a tampak memiliki variasi naik dan turun, dimana konsentrasi klorofil-a mengalami kenaikan bersamaan dengan kenaikan nilai SPL.

Variasi sebaran konsentrasi klorofil-a dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter, terutama pada fenomena El Niño Modoki yang terjadi pada tahun 2009-2010. Secara umum, titik konsentrasi klorofil-a dipengaruhi oleh kekuatan dan luas wilayah anomali angin barat. Menurut Gierach, Lee, Turk, dan McPhaden (2012), penurunan konsentrasi klorofil-a pada akhir tahun 2009 dipengaruhi oleh anomali angin barat yang lebih kuat, sehingga menyebabkan arus permukaan yang bergerak ke arah timur. Hal ini dapat terlihat pada gambar 7, dimana angin pada bulan November bergerak menuju timur. Arus ini bergerak melewati perairan hangat yang tidak memiliki banyak nutrisi, sehingga sebagai akibatnya, konsentrasi klorofil-a mengalami penurunan. Anomali ini pernah terjadi pula pada fenomena El Niño tahun 1997-1998. Kenaikan nilai konsentrasi klorofil-a yang drastis pada Desember 2009 disebabkan oleh adanya *upwelling* dan *mixing* yang menyebabkan nutrisi naik ke permukaan. Gierach, *et al.* (2012) berpendapat bahwa kenaikan klorofil-a pada Desember 2009 disebabkan oleh *upwelling* dan *mixing* yang membawa konsentrasi nutrisi yang lebih tinggi dari lapisan termoklin atau nutriklin ke permukaan laut, seperti yang terlihat pada gambar 7 dimana angin memiliki kecepatan yang cukup signifikan hingga bulan Februari 2010.

Lee *et al.*, (2014) juga mengatakan bahwa variabilitas konsentrasi klorofil-a yang disebabkan oleh dua jenis fenomena El Niño, yang diantaranya adalah fenomena El Niño tahun 2009-2010, dipengaruhi oleh *upwelling* pesisir, yang mendorong arus dingin dan penuh nutrisi ke atas permukaan laut. Nilai konsentrasi klorofil-a yang besar berada di daerah Teluk Ruli dan Teluk Kao karena topografi perairan yang dangkal membantu proses *mixing*.

KESIMPULAN

Variabilitas iklim (El Niño Modoki, El Niño Konvensional, La Nina Konvensional) terhadap konsentrasi klorofil-a di perairan Maluku Utara pada tahun 2009-2010 terjadi dengan kenaikan konsentrasi klorofil-a yang terpusat pada Teluk Ruli dan Teluk Kao. Keadaan tersebut terjadi bersamaan dengan kenaikan SPL yang

terpusat pada Laut Sulawesi dan Laut Halmamera pada saat terjadinya fenomena El Niño Modoki 2009-2010. Konsentrasi klorofil-a paling tinggi terjadi pada bulan Desember 2009 dengan nilai rata-rata 0,031 mg/m³ yang mengalami peningkatan hingga 0,014 mg/m³ dari konsentrasi klorofil-a pada bulan November 2009, nilai rata-rata konsentrasi klorofil-a pada periode Oktober 2009 – Februari 2010 adalah 0,0225 mg/m³. Nilai ini mendekati rata-rata konsentrasi klorofil-a pada fenomena El Niño Konvensional periode Oktober 2004 – Februari 2005 yang mencapai 0,0227 mg/m³, dan lebih tinggi daripada rata-rata konsentrasi klorofil-a pada fenomena La Nina Konvensional periode Oktober 2008 – Februari 2009 yang bernilai 0,014 mg/m³.

DAFTAR PUSTAKA

- As-syakur, A. R. 2015. Spatio-Temporal Variations of Rainfall and SPL Anomaly over Indonesia During ENSO Modoki Event in 2010. *Journal of Marine and Aquatic Science* 1: 23-29.
- Capotondi, A., A. T. Wittenberg, M. Newman, E. D. Lorenzo, J. Yu, P. Braconnot, J. Cole, B. Dewitte, B. Giese, E. Guilyardi, F. Jin, K. Karnauskas, B. Kirtman, T. Lee, N. Schneider, Y. Xue, dan S. Yeh. 2015. Understanding ENSO Diversity. *American Meteorological Society*: 921-938.
- Capotondi, A., A. T. Wittenberg, J. Kug, K. Takahasi, dan M. J. McPhaden. ENSO Diversity. *El Nino Southern Oscillation in a Changing Climate, Geophysical Monograph*: 253.
- Couto, A. B., N. J. Holbrook, dan A. M. Maharaj. 2013. Unravelling Eastern Pacific and Central Pacific ENSO Contributions in South Pacific Chlorophyll-a Variability Through Remote Sensing. *Remote Sensing* 5: 4067-4087.
- Constantin, A. 2020. Frictional Effects in Wind-Driven Ocean Currents. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*.
- Dewi, D. M. P. R., D. Fatmasari, A. Kurniawan, dan M. A. Munandar. 2018. The Impact of ENSO on Regional Chlorophyll-a Anomaly in the Arafura Sea. *The 2nd International Symposium on Marine and Fisheries Research IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 139.
- Feng, Ying, X. Chen, dan Ka-Kit Tung. 2019. ENSO Diversity and The Recent Appearance of Central Pacific ENSO. *Climate Dynamics*.
- Fingas, M. 2019. Remote Sensing for Marine Management. *World Seas: An Environmental Evaluation*: 103-119.
- Gierach, M. M., T. Lee, D. Turk, dan M. J. McPhaden. 2012. Biological Response to the 1997-98 and 2009-10 El Niño Events in the Equatorial Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters* 39.
- Hadiman, M. Ali, dan A. Safiril. 2016. Analisis Pengaruh El Niño 2004-2005 Terhadap Konsentrasi Klorofil-a di Perairan Maluku Utara. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika* 3(3): 21-25.
- Hermawan, I., A. Setiawan, dan N. Pusparini. 2017. Pola Distribusi Konsentrasi Klorofil-a di Laut Maluku Berdasarkan Pengamatan In Situ INDESO Joint Expedition Program dan Data Penginderaan Jauh. *Jurnal Segara* 13(3): 149-157.
- Karnauskas, K. B. 2013. Can We Distinguish Canonical El Niño from Modoki? *Geophysical Research Letters* 40: 5246-5251.
- Kunarso, A. Wirasatriya, Irwani, A. Satriadi, M. Helmi, H. Prayogi, B. Munandar. 2019. Impact of Climate Variability to Aquatic Productivity and Fisheries Resources in Jepara Waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 246.
- Kunarso, M. Zainuri, R. Ario, B. Munandar, dan H. Prayogi. 2018. Impact of Monsoon to Aquatic Productivity and Fish Landing at Pesawaran Regency. *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science*: 1-11.
- Lee, K., S. Yeh, J. Kug, dan J. Park. 2014. Ocean Chlorophyll Response to Two Types of El Niño Events in an Ocean-Biogeochemical Coupled Model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*: 933-952.
- Llansola-Portoles, M. J., F. Li, P. Xu, S. Streckaite, C. Ilioaia, C. Yang, A. Gall, A. A. Pascal, R. Croce, dan B. Robert. 2020. Tuning Antenna Function Through Hydrogen Bonds to Chlorophyll a. *BBA Bioenergetics* 1861.
- Maisyarah, S., A. Wirasatriya, J. Marwoto, P. Surbadjo, I. B. Prasetyawan. 2019. The Effect of the ENSO on the Variability of SPL and Chlorophyll-a in the South China Sea. *The 4th International Conference on Tropical and Coastal Region Eco Development IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 246.
- Munandar, B., A. Wirasatriya, D. N. Sugianto, Ambariyanto, dan Sunaryo. 2021. Respon Kecepatan Angin Terhadap Variabilitas Klorofil-a di Laut Filipina dan Maluku Bagian Utara. *Buletin Oseanografi Marina* 10(3): 269-276.

- Pisano, A., S. Marullo, V. Artale, F. Falcini, C. Yang, F. E. Leonelli, R. Santoleri, dan B. B. Nardelli. 2020. New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. *Remote Sensing* 12: 132.
- Purba, N.P., dan W. S. Pranowo. 2015. *Dinamika Oseanografi, Deskripsi Karakteristik Massa Air dan Sirkulasi Laut*. ISBN: 978-608-0810-20-1: 192.
- Purwanti, I., Y. Prasetyo, A. P. Wijaya. 2017. Analisis Pola Persebaran Klorofil-a, Suhu Permukaan Laut, dan Arah Angin Untuk Identifikasi Kawasan Upwelling Secara Temporal Tahun 2003-2016 (Studi Kasus: Laut Halmahera). *Jurnal Geodesi Undip* 6(4): 506-516.
- Radenac, M., F. Léger, A. Singh, dan T. Delcroix. 2012. Sea Surface Chlorophyll Signature in the Tropical Pacific During Eastern and Central Pacific ENSO Events. *Journal of Geophysical Research* 117.
- Rifai, A., B. Rochaddi, U. Fadika, J. Marwoto, dan H. Setiyono. 2020. Kajian Pengaruh Angin Musim Terhadap Sebaran Suhu Permukaan Laut (Studi Kasus: Perairan Pengandaran Jawa Barat). *Indonesian Journal of Oceanography* 2(1).
- Safitri, S. 2015. El Niño, La Nina, dan Dampaknya Terhadap Kehidupan di Indonesia. *Jurnal Criksetra* 4(8): 153-156.
- Sugiyono. 2009. *Metode Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta, Bandung.
- Trijayanto, D. P., dan B. M. Sukojo. 2015. Analisa Nilai Klorofil Dengan Menggunakan Data MODIS, VIIRS, dan In Situ (Studi Kasus: Selat Madura). *Geoid* 11(1): 34-39.
- Wang, X., W. Tan, C. Wang. 2017. A New Index for Identifying Different Types of El Niño Modoki Events. *Climate Dynamic* 50: 2753–2765.
- Wahyuni, Muliadi, dan Apriansyah. 2018. Hubungan ENSO dan El Niño Modoki Terhadap Suhu Permukaan Laut di Laut Arafuru. *PRISMA FISIKA* 6(3): 195-199.
- Windari, E. H., A. Faqih, dan E. Hermawan. 2012. El Niño Modoki dan Pengaruhnya Terhadap Perilaku Curah Hujan Monsunal di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 13(3): 149-160.
- Wirasatriya, A., R. Y. Setiawan, dan P. Subardjo. 2017. The Effect of ENSO on the Variability of Chlorophyll-a and Sea Surface Temperature in the Maluku Sea. *IEEE Journal of the Selected Topic in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10(12): 5513-5518.
- Wirasatriya, A., I. B. Prasetyawan, C. D. Triyono, Muslim, dan L. Maslukah. 2018. Effect of ENSO on the Variability of SPL and Chlorophyll-a in Java Sea. *The 3rd International Conference on Tropical and Coastal Region Eco Development IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 116.