

Kajian Spasial dan Temporal Klorofil-a di Selat Makassar: Variasi Musiman dan Antar Tahunan

Istna Nabila Zulfa^{1*}, Anindya Wirasatriya², Aris Ismanto²

¹Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

²Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro.

Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

Email: istnanabilazulfa@students.undip.ac.id

Abstrak

Selat Makassar merupakan perairan yang menghubungkan Laut Sulawesi di utara dengan Laut Jawa di selatan. Penelitian ini mengkaji variabilitas klorofil-a di Selat Makassar, khususnya di perairan Pulau Laut dan selatan Makassar dilihat dari variasi musiman dan antar tahunan dengan melihat pengaruh ENSO. Data penelitian menggunakan data berbasis citra satelit yang dianalisis melalui perataan klimatologi bulanan, pembuatan grafik time series dan analisis korelasi. Secara umum sebaran spasial dari klorofil-a di Selat Makassar menunjukkan bahwa daerah pesisir memiliki kandungan klorofil-a lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lepas pantai yang berada di tengah Selat Makassar. Pesisir timur Kalimantan memiliki klorofil-a yang cenderung lebih tinggi dibandingkan pesisir barat Sulawesi. Secara musiman, klorofil-a tertinggi terjadi pada bulan Desember yang bernilai 0.57 mg/m³ untuk rata-rata di seluruh area penelitian, sedangkan yang memiliki klorofil-a rendah yaitu pada bulan September bernilai 0.47 mg/m³. Fluktuasi klorofil ini dipengaruhi angin dan curah hujan. Di perairan Pulau Laut, variasi klorofil-a secara signifikan dipengaruhi curah hujan yang akan meningkatkan run-off sungai yang membawa nutrient dari daratan ke laut, sedangkan di perairan selatan Makassar, angin mempengaruhi fluktuasi klorofil-a melalui mekanisme upwelling. Analisis korelasi menunjukkan bahwa di perairan selatan Makassar dan Pulau Laut, faktor ENSO lebih berpengaruh terhadap curah hujan dibandingkan dengan angin. Oleh karena itu, klorofil-a di perairan Pulau Laut cenderung turun saat terjadi El-Niño karena curah hujan juga turun, dan sebaliknya saat terjadinya La-Niña.

Kata kunci: SPL, Klorofil-a, Angin, Curah Hujan, Selat Makassar

Abstract

Spatial Temporal Study of Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a in the Makassar Strait: Seasonal and Interannual Variations

The Makassar Strait is a body of water that connects the Sulawesi Sea in the north with the Java Sea in the south. This study examines the variability of chlorophyll-a in the Makassar Strait, especially in the waters of Pulau Laut and south of Makassar seen from seasonal and inter-annual variations by looking at the influence of ENSO. The research data used satellite image-based data which was analyzed through monthly climatological alignment, time series graph creation and correlation analysis. In general, the spatial distribution of chlorophyll-a in the Makassar Strait shows that coastal areas have a higher chlorophyll-a content compared to offshore areas in the middle of the Makassar Strait. The east coast of Kalimantan has chlorophyll-a which tends to be higher than the west coast of Sulawesi. Seasonally, the highest chlorophyll-a occurred in December which was 0.57 mg/m³ for the average across the study area, while the low chlorophyll-a was in September is worth 0.47 mg/m³. These chlorophyll fluctuations are influenced by wind and rainfall. In the waters of Pulau Laut, the variation of chlorophyll-a is significantly influenced by rainfall which will increase the run-off of rivers that carry nutrients from land to sea, while in the waters south of Makassar, wind affects the fluctuations of chlorophyll-a through the upwelling mechanism. Correlation analysis showed that in the waters south of Makassar and Pulau Laut, the ENSO factor had more effect on rainfall than the wind. Therefore, the variability of chlorophyll-a in the waters of Pulau Laut tends to decrease during El-Niño due to decreasing rainfall and vice versa during La-Niña.

Keywords : SST, Chlorophyll-a, Wind, Rainfall, Makassar Strait

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan lokasi geografis yang unik karena terletak di antara 2 benua dan 2 samudra, sehingga mempunyai peran penting dalam sirkulasi global atmosfer dan lautan. Dalam hal sirkulasi atmosfer, laut Indonesia menjadi jalur penting bagi sistem monsun Asia-Australia (Wyrski, 1961; Mohtadi *et al.*, 2011; Pramuwadani *et al.*, 2018; Susanto *et al.*, 2006; Alifdini *et al.* 2021). Topografi pulau-pulau yang kompleks di perairan Indonesia menciptakan jalur bagi angin monsun. Sistem angin monsun inilah yang menjadi faktor utama penggerak iklim Indonesia. Musim barat ditandai dengan angin muson barat laut yang bertiup dari Asia hingga Australia, membawa udara lembab, dan menyebabkan musim hujan di sebagian besar wilayah di Indonesia (Griffiths *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2006). Sebaliknya, angin muson tenggara bertiup dari Australia ke Asia dengan membawa udara kering yang menyebabkan musim kemarau di wilayah Indonesia. Angin muson barat laut terjadi pada bulan Desember hingga Februari, dan monsun tenggara puncaknya terjadi pada bulan Juni hingga Agustus. Akibat interaksi udara-laut, variasi angin monsoon ini mempengaruhi kondisi oseanografi di perairan Indonesia.

Selain pengaruh angin muson yang menyebabkan variasi musiman, perairan Indonesia juga mengalami variasi antar tahunan yang utamanya dipengaruhi oleh *El Niño Southern Oscillation (ENSO)*. *ENSO* merupakan suatu fenomena interaksi atmosfer-laut skala besar yang mengacu pada sirkulasi atmosfer secara zonal di ekuatorial Pasifik yang bersifat tidak stabil dan berosilasi antara kondisi hangat (yang dikenal sebagai *El Niño*) dan dingin (dikenal sebagai *La Niña*) dengan periode 3-7 tahun (McPadhen *et al.* 2006; Wang and Fiedler., 2006). Dalam kondisi netral, Samudra Pasifik memiliki kolam air hangat yang terletak di ekuatorial Pasifik bagian barat akibat dari dorongan angin pasat yang bertiup secara terus menerus. Kolam air hangat ini merupakan pusat konveksi yang menghasilkan panas dan uap air yang akan ditransfer ke berbagai belahan dunia melalui sirkulasi *Walker* sehingga keberadaan kolam air hangat ini sangat mempengaruhi kondisi iklim global. Pada saat terjadi *El Niño*, kolam air hangat ini bergeser ke arah timur akibat melemahnya angin pasat sehingga wilayah Indonesia cenderung kering. Sebaliknya, pada kondisi *La Niña* angin pasat

menguat sehingga kolam air hangat semakin terdorong ke barat sehingga wilayah Indonesia cenderung basah. Selain berpengaruh terhadap kondisi atmosfer, *ENSO* juga mempengaruhi perairan Indonesia. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *El Niño* cenderung menguatkan intensitas *upwelling* yang ditandai dengan meningkatnya klorofil-a dan menurunnya suhu permukaan laut (SPL) di Laut Maluku (Wirasatriya *et al.* 2017), Laut Halmahera (Setiawan *et al.* 2019), dan Laut Sawu (Setiawan *et al.* 2019).

Selat Makassar adalah perairan yang relatif subur dibandingkan perairan di Indonesia lainnya. Perairan Selat Makassar merupakan perairan yang terletak di antara pulau Kalimantan dan Sulawesi, yang menghubungkan Laut Sulawesi di sebelah utara dan Laut Jawa di sebelah selatan. Perairan selat makassar memiliki kondisi alam yang unik dan topografi yang bervariasi. Perairan Selat Makassar juga dipengaruhi oleh sistem angin muson. Angin muson tenggara yang berhembus selama musim timur menjadi faktor utama pembangkit *upwelling* sehingga berpengaruh terhadap variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a di perairan Selat Makassar (Kunarso *et al.*, 2022). Kondisi oseanografi perairan Selat Makassar dipengaruhi oleh dinamika laut di dalam dan di luar selat. Sistem iklim yang mengikuti sistem monsun dan sistem *ENSO* juga mempengaruhi dinamika laut di perairan Selat Makassar. Selat Makassar memegang peranan penting karena merupakan gerbang utama yang dilalui Arlindo. Secara umum, Selat Makassar merupakan jalur lintang rendah yang membawa panas dan salinitas rendah dari Pasifik ke Samudera Hindia. Arlindo berperan penting dalam siklus termohalin dan fenomena iklim global (Mahie dan Megawati, 2015). Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Kunarso *et al.* (2022), menjelaskan variabilitas SPL dan Klorofil-a yang berfokus pada Intensitas *Upwelling* di Selat Makassar sedangkan Wirasatriya *et al.*(2021) membahas mengenai daerah klorofil-a tinggi di sepanjang pantai Barat Selatan Sulawesi-Indonesia saat musim hujan yang diungkap menggunakan data satelit. Penelitian ini mengkaji variabilitas spasial dan temporal suhu permukaan laut dan klorofil-a di Selat Makassar baik secara spasial dan temporal yang meliputi variasi musiman dan antar tahunan beserta faktor yang mempengaruhinya yang belum dibahas di penelitian sebelumnya.

MATERI DAN METODE

Daerah penelitian meliputi perairan Selat Makassar (Gambar 1). Perairan Selat Makassar merupakan perairan yang terletak di antara pulau Kalimantan dan Sulawesi, yang menghubungkan Laut Sulawesi di sebelah utara dan Laut Jawa di sebelah selatan. Perairan selat makassar memiliki kondisi alam yang unik dan topografi yang bervariasi. Perairan Selat Makassar juga dipengaruhi oleh sistem angin muson. Angin muson tenggara yang berhembus selama musim timur menjadi faktor utama pembangkit *upwelling* sehingga berpengaruh terhadap variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a di perairan Selat Makassar (Kunarso *et al.*, 2022).

Data penelitian berupa citra satelit. Data klorofil-a dari *The Ocean Color CCI (OC CCI) L3S* yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari website Marine Copernicus (Sathyendranath *et al.*, 2019). Data klorofil-a yang diunduh merupakan data harian level 3 dengan resolusi spasial 4 km dengan rentang dari Januari 2007 hingga Desember 2022 atau selama 16 tahun. Data unduhan akan berbentuk format *Network Command Data Form (NetCDF)*. Data klorofil-a menggunakan data tersebut karena menggunakan gabungan dari beberapa sensor seperti SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS-SNPP & JPSS1, OLCI-S3A & S3B untuk produk multi.

Data suhu didapatkan dari *Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA)* yang disediakan oleh *Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST)* (Donlon *et al.* 2012). Data tersebut dapat diunduh melalui website Marine Copernicus atau diunduh menggunakan *File Transfer Protocol (FTP)* dengan alamat my.cmems-du.eu. Data yang di-download merupakan data SPL harian mulai dari Januari 2007 sampai dengan Desember 2022, atau selama 16 tahun dengan resolusi $0.05 \times 0.05^\circ$. Unduhan data tersebut dalam bentuk *Network Common Data Form (NetCDF)*.

Data angin yang digunakan adalah data *Advanced Scatterometer (ASCAT)* dengan format *Net Common Data File (NetCDF)* dengan resolusi spasial 12.5×12.5 km dengan bias 0.2 m/s (Figa-Saldana *et al.*, 2002). Data tersebut merupakan citra dari satelit Meteorological Operation (MetOp) A yang dapat diunduh melalui situs <https://marine.copernicus.eu>. Data ASCAT yang digunakan merupakan data komponen v angin setiap hari dari Januari 2007 hingga Desember

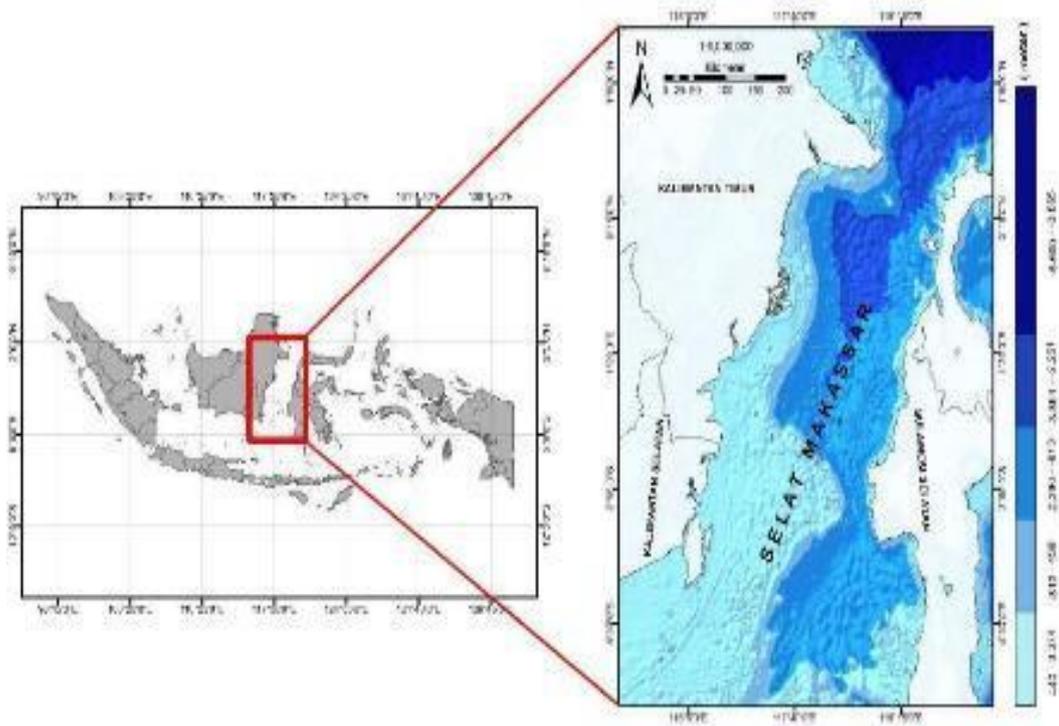
2022 atau selama 16 tahun dan terdapat dua jenis data yang diunduh, yaitu data ASC (ascending) dan DES (descending) yang menunjukkan arah pergerakan satelit dalam mengitari bumi. Data angin ASCAT digunakan untuk mengetahui pola sebaran, kecepatan, dan arah angin.

Data curah hujan diperoleh dari *Global Satellite Measurement of Precipitation (GSMAP)* diunduh melalui situs JAXA *Global Rainfall Watch (GSMaP)* (Otsuka *et al.*, 2016). Data tersebut dapat diunduh melalui website Marine Copernicus atau diunduh menggunakan *File Transfer Protocol (FTP)* dengan alamat RaiMap. Data yang di-download merupakan data curah hujan harian mulai dari Januari 2007 sampai dengan Desember 2022, atau selama 16 tahun dengan resolusi spasial 0.10° dan temporal jam yang tinggi.

Untuk mengkaji variabilitas antar tahunan, penelitian berfokus kepada variabilitas iklim *El-Niño Southern Oscillation (ENSO)* dengan menggunakan *Oceanic Nino Index (ONI)* yang berupa nilai anomali SPL di Nino 3.4 yang dapat ditampilkan dalam format tab delimited. Data ini diperoleh berdasarkan perbedaan anomali SPL di Samudera Pasifik Barat dan di Samudera Pasifik Timur. Data anomali SPL di Nino3.4 dapat diperoleh dari situs www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring. Untuk mengetahui terjadinya variabilitas *ENSO* yang dapat terjadi pada kisaran waktu minimal 2 tahun. Pada penelitian ini data yang diolah adalah 16 tahun yaitu dari tahun 2007 hingga tahun 2022.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode kuantitatif. Sugiyono (2011), metode kuantitatif digunakan untuk penelitian yang menggunakan data dalam bentuk numerik, analisis dapat berupa grafik, tabel dan peta yang dianalisis secara statistik dan sistematis untuk mendapatkan pembahasan yang sesuai.

Data Suhu Permukaan Laut, klorofil-a, curah hujan dan angin yang digunakan yaitu data rata-rata harian (*daily*) selama 16 tahun (2007-2022). Data yang diunduh dalam data (*.nc), dari data nc tersebut dilakukan extract untuk mendapatkan nilai SPL, klorofil-a, curah hujan dan angin serta koordinat longitude-latitude secara spasial. Hasil extract kemudian disimpan dalam bentuk file binary (*.bin) agar mudah diolah pada tahapan selanjutnya. Data harian kemudian diolah menjadi data bulanan dan kemudian diolah menjadi data klimatologi bulanan menggunakan rumus berikut (Wirasatriya *et al.*, 2017).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

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

Keterangan: X(x,y) =nilai rata-rata bulanan dan nilai klimatologi bulanan; xi(x,y,t) =nilai data harian atau bulanan ke-i; n =jumlah jam atau bulan dalam hari, bulan atau tahun; i=1= Hari atau bulan ke i

Jika xi adalah NaN, maka data tersebut tidak mempunyai nilai (data kosong) dan tidak dimasukkan dalam perhitungan rata-rata.

Metode Pengolahan Data ONI (Ocean Nino Index)

Variabilitas iklim ENSO berdasarkan Nino 3.4 diklasifikasikan menjadi *El-Niño* dan *La-Niña*. Nilai anomali SPL > 0,5°C dianggap sebagai *El-Niño* dan Anomali SPL < -0,5°C dianggap sebagai *La-Niña*.

Analisis Korelasi

Analisis korelasi digunakan untuk mengetahui keterkaitan antara angin terhadap SPL dan angin terhadap klorofil-a. Korelasi dapat

dihitung dengan rumus persamaan *Pearson Correlation* (Sugiyono, 2011):

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\{n \sum x^2 - (n \sum x)^2\} \{n \sum y^2 - (n \sum y)^2\}}}$$

Pada r yaitu nilai koefisien korelasi, X yaitu variabel bebas, Y yaitu variabel terikat dan nilai n yaitu jumlah data. Nilai korelasi Pearson (r) berada pada interval -1 ≤ r ≤ 1. Jika korelasinya positif, maka hubungan kedua variabel adalah searah, antara 0 sampai +1. Sebaliknya, jika korelasinya negatif, maka hubungan kedua variabel tersebut berlawanan arah yaitu antara -1 sampai 0.

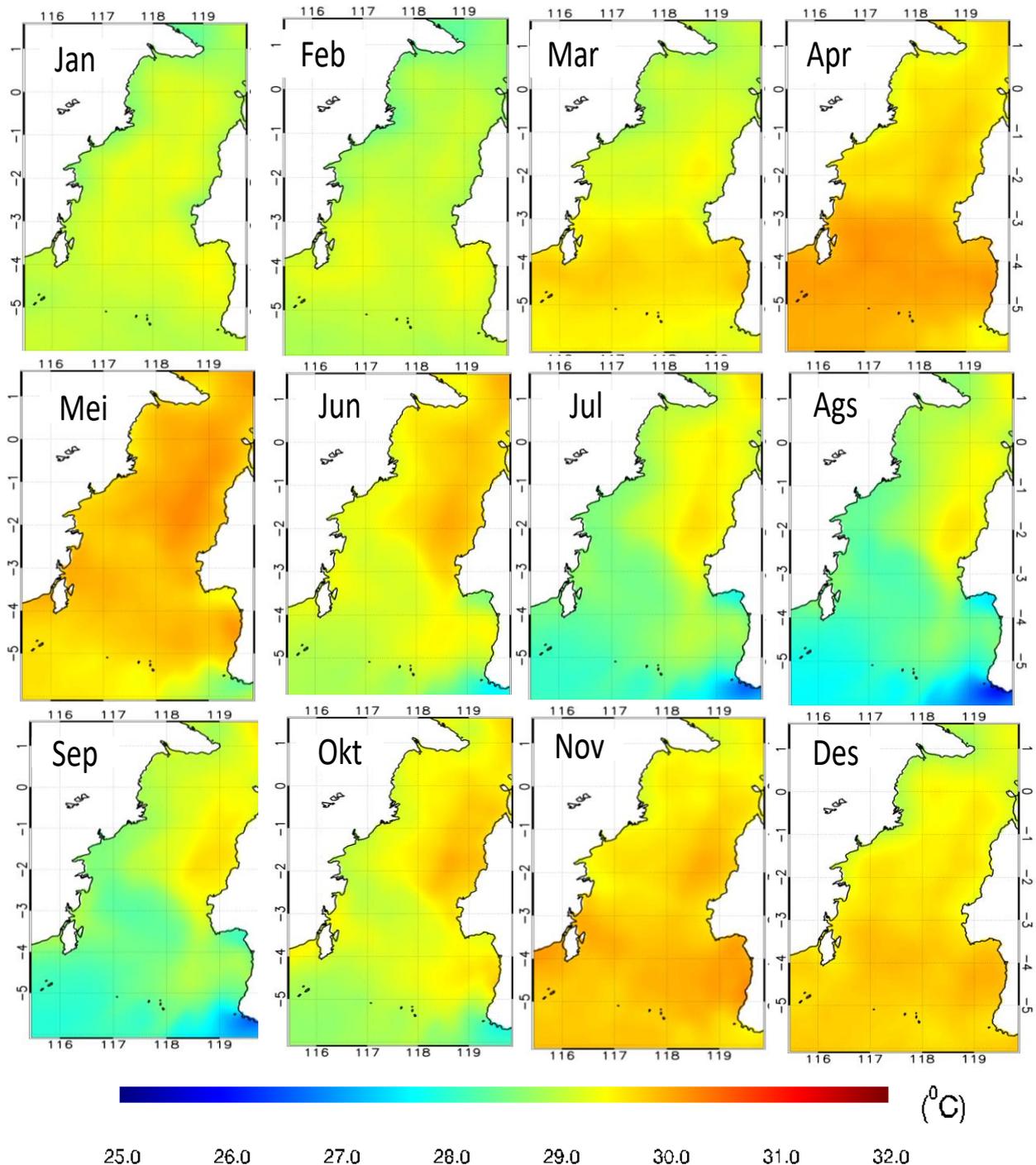
HASIL DAN PEMBAHASAN

Peta klimatologi ini didapat dari data hasil ekstrak bulanan pada bulan yang sama dikompilasikan menjadi data rata-rata dari keseluruhan tahun yang diamati, data tersebut kemudian divisualisasikan di Gambar 2.

Variasi musiman merujuk pada perubahan atau fluktuasi yang terjadi secara periodik dalam suatu siklus tahunan. SPL meningkat pada bulan Maret dan mencapai suhu tertinggi pada bulan April yang menyebabkan kondisi perairan lebih

panas. SPL yang tinggi pada musim peralihan di Selat Makassar dipengaruhi oleh pola pergerakan angin yang lemah dan SPL rendah pada musim barat dan musim timur di Selat Makassar dipengaruhi oleh pola pergerakan angin yang kuat (Gambar 2 dan 3). Arah angin dominan berasal dari arah Utara menuju kearah Selatan pada musim barat dan berbalik arah pada musim timur. Suhu

permukaan laut pada bulan Juni-Oktober semakin terlihat mengalami penurunan dan menjadi lebih dingin memperlihatkan adanya proses *upwelling* yang diduga dipengaruhi oleh hembusan angin sejajar pantai (Nababan *et.al.*, 2016). Pada wilayah Selat Makassar pada bulan Juli-Agustus menunjukkan suhu mencapai nilai minimum terutama di sebelah selatan Selat Makassar.

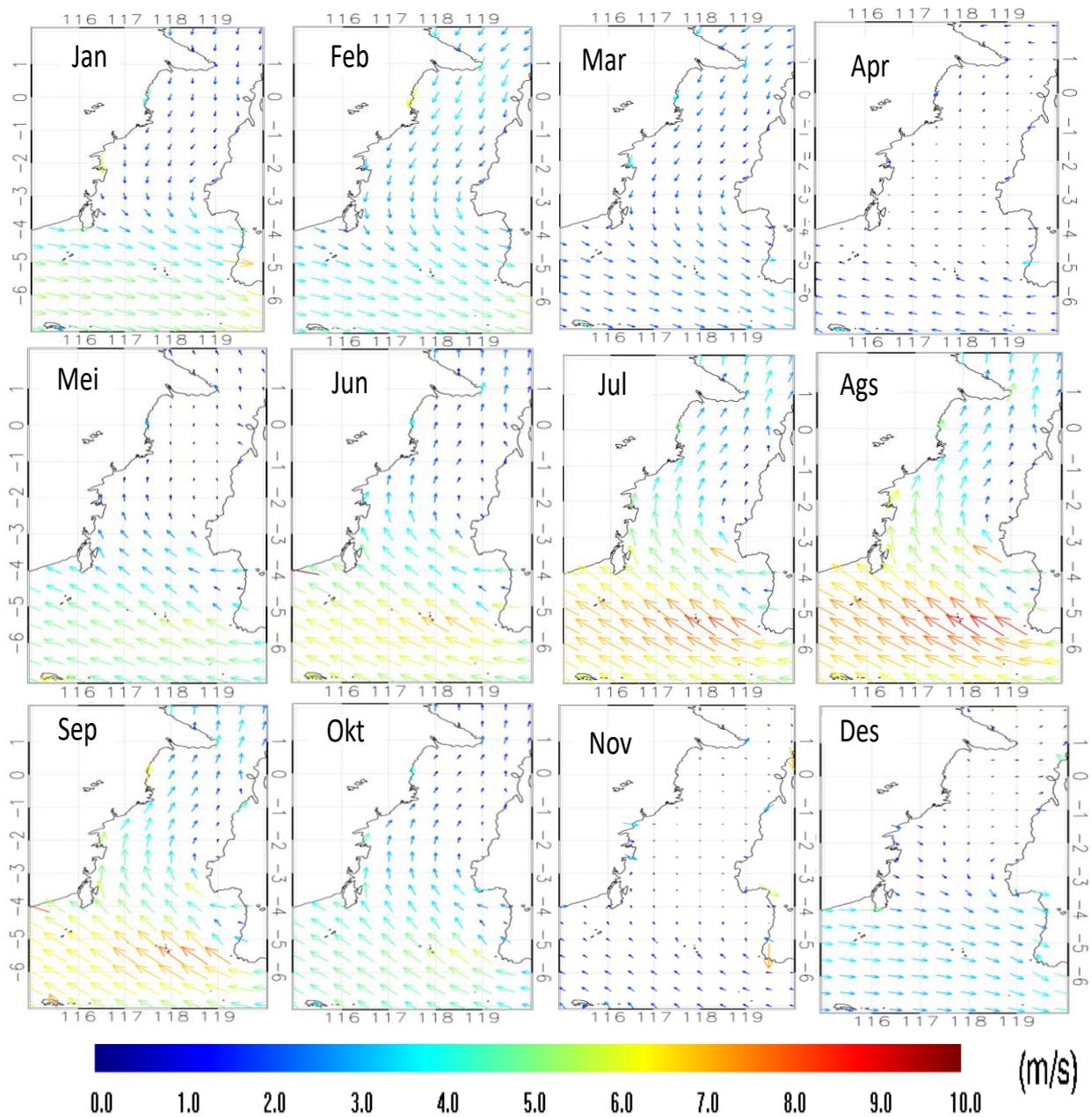


Gambar 2. Peta klimatologi SPL tahun 2007-2022 di Selat Makassar

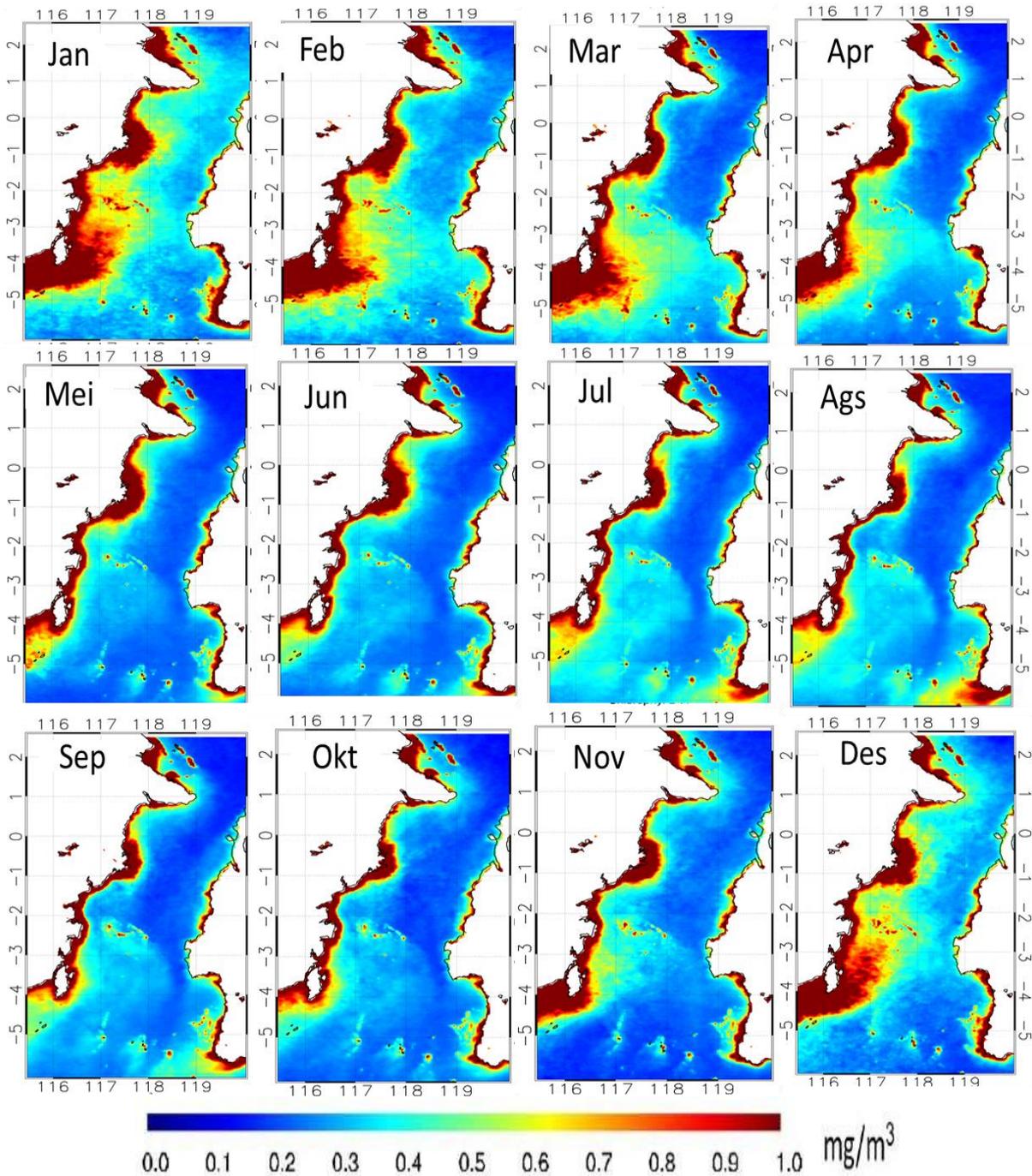
Hal ini disebabkan oleh angin muson Tenggara yang berkecepatan tinggi 10 m/s. Angin muson tenggara yang berhembus selama musim timur menjadi faktor utama pembangkit *upwelling* sehingga berpengaruh terhadap variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a di perairan Selat Makassar (Kunarjo *et al.*, 2022).

Hasil pengolahan data SPL menunjukkan bahwa SPL di wilayah ini memiliki persebaran SPL bersuhu hangat bertepatan dengan lemahnya angin dan SPL bersuhu dingin bertepatan dengan kuatnya angin. Persebaran SPL ini akan mencapai

nilai maksimum pada bulan April suhu 29,50°C dengan angin bernilai 3,67 m/s. Setelah itu, SPL akan kembali menurun hingga pada musim timur ketika SPL wilayah ini 28°C. Pada peta persebaran musim timur suhu relatif lebih rendah, hal itu diduga akibat dari pergerakan massa air di perairan. Pergerakan massa air tersebut disebabkan oleh angin pada musim timur yang bergerak dari benua Australia menuju benua Asia. Bahwa faktor pembangkit arus permukaan disebabkan oleh adanya angin yang bertiup di atasnya (Pasha, *et al.*, 2022).



Gambar 3. Peta klimatologi angin tahun 2007-2022 di Selat Makassar



Gambar 4. Peta klimatologi Klorofil-a tahun 2007-2022 di Selat Makassar

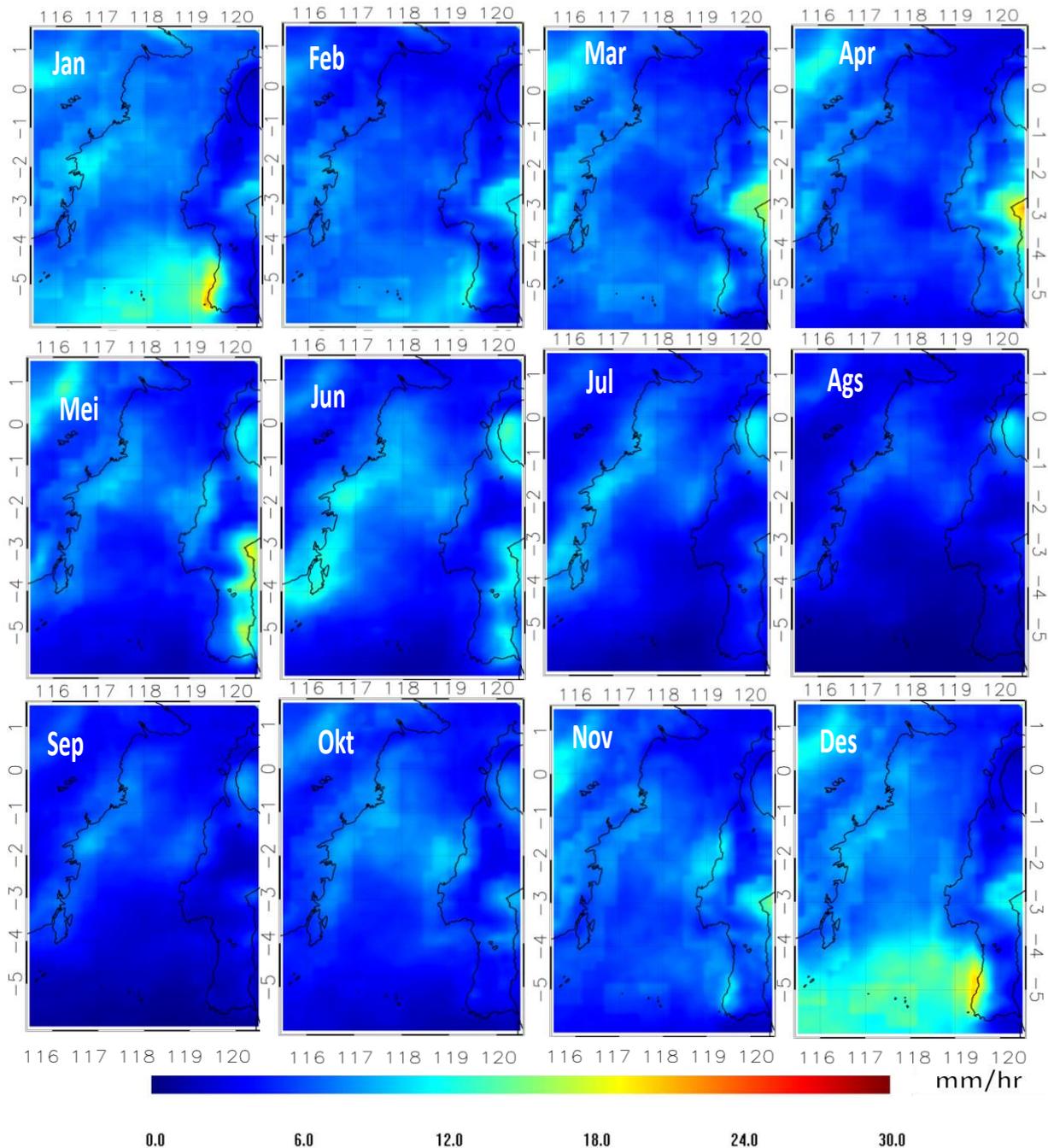
Dapat dilihat pada Gambar 4 yang menunjukkan kondisi umum klorofil-a di Selat Makassar berdasarkan peta klimatologi. Daerah pesisir memiliki kandungan klorofil-a lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lepas pantai yang berada di tengah Selat Makassar. Pesisir timur Kalimantan memiliki klorofil-a yang cenderung lebih tinggi dibandingkan pesisir barat Sulawesi.

Klorofil-a tertinggi terjadi pada bulan Desember yang bernilai 0.57 mg/m^3 untuk rata-rata di seluruh area penelitian, sedangkan yang memiliki klorofil-a rendah yaitu pada bulan September bernilai 0.47 mg/m^3 . Pada Musim Barat yaitu Desember Januari, dan Februari bernilai 0.47 mg/m^3 , 0.5 mg/m^3 dan 0.49 mg/m^3 . Pada Musim Timur yaitu Juni, Juli dan Agustus bernilai dan 0.49 mg/m^3 , dan

0.57 mg/m³ dan 0.54 mg/m³. Pada Musim Peralihan I yaitu Maret, April, dan Mei bernilai 0.54 mg/m³, 0.52 mg/m³ dan 0.54 mg/m³. Pada Musim Peralihan II yaitu September, Oktober, dan November bernilai 0.57 mg/m³, 0.50 mg/m³ dan 0.50 mg/m³.

Gambar 5 menunjukkan kondisi umum curah hujan di Selat Makassar berdasarkan peta rata-rata bulanan klimatologi 2007-2022. Curah hujan tertinggi terjadi di bulan Desember dan

Januari terutama pada bagian selatan Selat Makassar, sedangkan curah hujan terendah terjadi di bulan Agustus. Di sepanjang pesisir timur Kalimantan curah hujan cenderung lebih tinggi dibandingkan pesisir barat Sulawesi. Hal ini diduga menyebabkan klorofil-a di pesisir timur Kalimantan lebih tinggi dibandingkan dengan pesisir barat Sulawesi. Konsentrasi klorofil-a cenderung meningkat mendekati pesisir perairan, hal ini karena keberadaan nutrisi yang tinggi yang

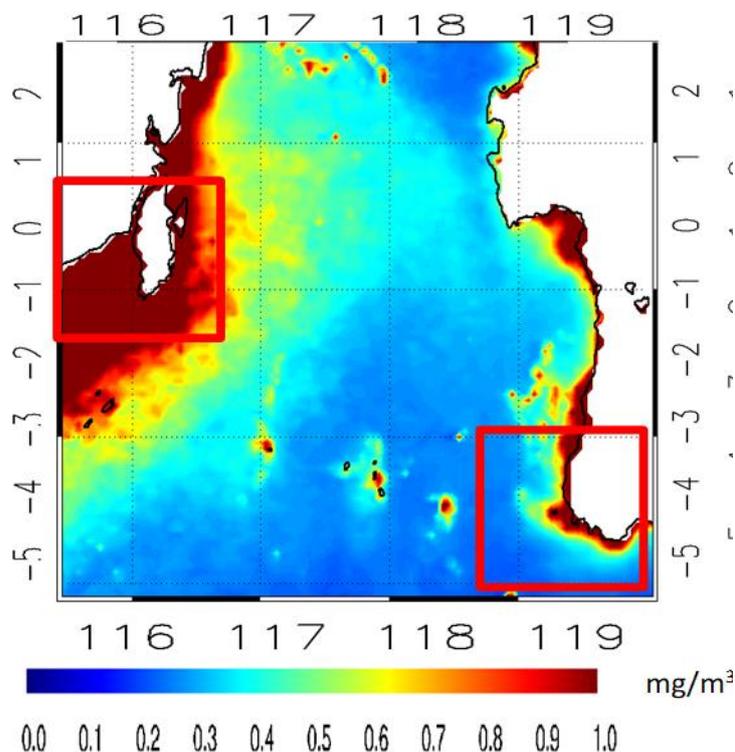


Gambar 5. Peta klimatologi Curah hujan tahun 2007-2022 di Selat Makassar

berasal perairan daratan yang terbawa ke laut melalui limpasan air sungai saat curah hujan tinggi (Wirasatriya, *et al.*, 2021). Selanjutnya, Prianto *et al* (2013) menyatakan bahwa tinggi-rendahnya kandungan klorofil-a fitoplankton sangat dipengaruhi oleh lingkungan daratan, yakni masuknya zat-zat hara melalui aliran sungai yang bermuara di sepanjang pantai (Prianto, *et al.*, 2013). Hal yang menarik untuk dibahas lebih lanjut dalam analisis temporal yaitu mengenai klorofil-a tinggi yang berada di perairan Pulau Laut dan di perairan Selatan Makassar (Gambar 6). Pulau Laut adalah sebuah pulau terbesar di sekitar pulau Kalimantan, terletak di pesisir timur atau tepatnya di bagian tenggara pulau Kalimantan. Makassar ini terletak di pesisir barat daya pulau Sulawesi, menghadap Selat Makassar. Fokus pada kedua wilayah ini dikarenakan pada wilayah perairan Pulau Laut klorofil-a tinggi dikarenakan curah hujan tinggi tetapi di wilayah perairan selatan Makassar klorofil-a tinggi disebabkan karena dua faktor yaitu curah hujan dan angin.

Korelasi curah hujan dan klorofil-a di perairan selatan Makassar dapat dilihat Tabel 1. yaitu nilai r -0,544 yang berarti memiliki hubungan yang negatif yang berarti saat curah hujan tinggi

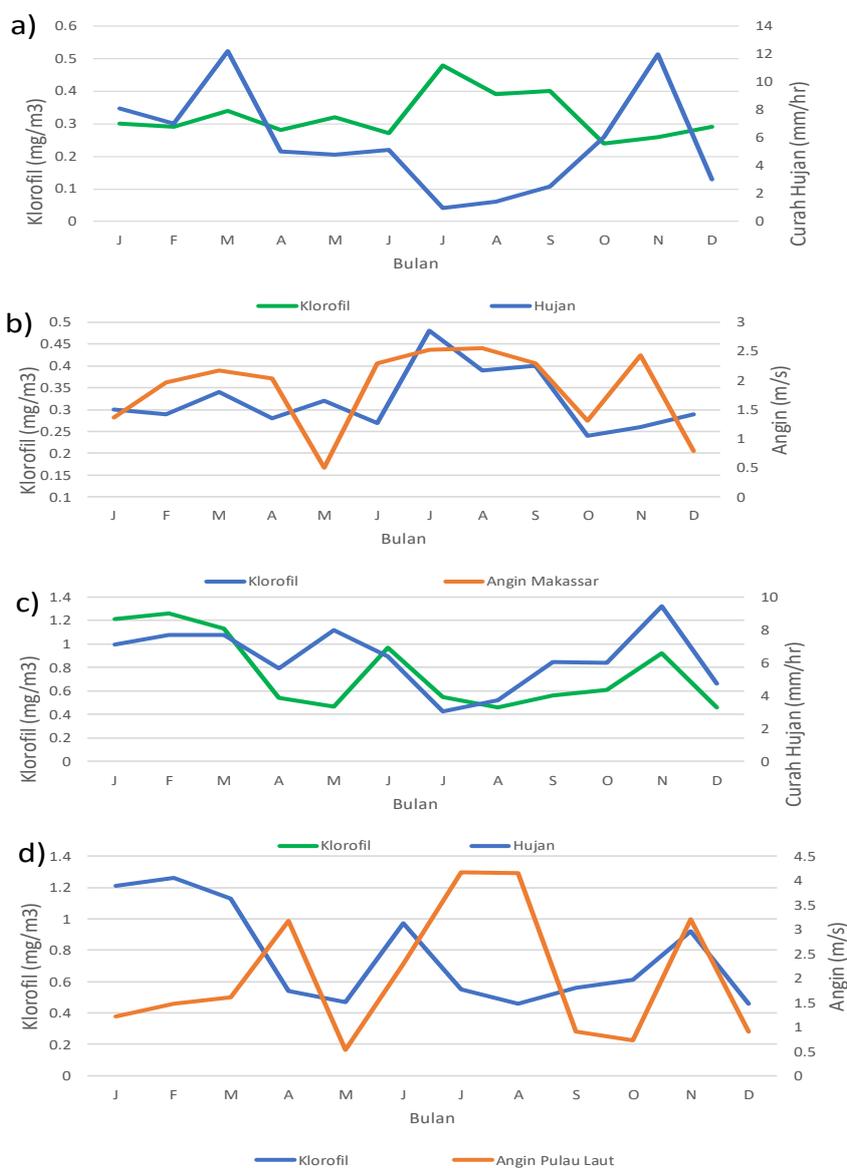
maka klorofil-a rendah dan nilai sig 0,067 (diatas 0,05) maka dapat disimpulkan bahwa curah hujan dan klorofil-a tidak memiliki hubungan yang signifikan. Korelasi angin dan klorofil-a di perairan selatan Makassar ditunjukkan dengan nilai r 0,639 yang berarti memiliki hubungan yang positif yang berarti saat angin tinggi maka klorofil-a tinggi dan nilai sig 0,025 (dibawah 0,05) maka dapat disimpulkan bahwa angin dan klorofil-a memiliki hubungan yang signifikan. Angin dan klorofil-a di perairan Pulau Laut memiliki korelasi sangat lemah dan dengan nilai sig 0,637 (diatas 0,05) maka dapat disimpulkan bahwa angin dan klorofil-a tidak memiliki hubungan yang signifikan. Korelasi curah hujan dan klorofil-a di perairan Pulau Laut memiliki nilai r 0,594 yang berarti memiliki hubungan yang positif yang berarti saat curah hujan tinggi maka klorofil-a tinggi. Wilayah perairan Pulau Laut memiliki nilai p value lebih kecil dari 0,05 yaitu 0,042 artinya memiliki hubungan signifikan antara curah hujan dan klorofil-a di perairan Pulau Laut. Dengan melihat nilai signifikansinya dapat disimpulkan bahwa variabilitas klorofil-a di Perairan selatan Makassar dipengaruhi oleh angin, sedangkan di perairan Pulau Laut dipengaruhi oleh curah hujan.



Gambar 6. Area uji di Perairan Pulau Laut (kotak merah kiri atas) dan Perairan Selatan Makassar (kotak merah kanan bawah) dengan background rata-rata klorofil-a bulan November (2007-2022)

Tabel 1. Korelasi Curah Hujan, angin dan Klorofil-a di Perairan selatan Makassar dan Perairan Pulau Laut

Correlations	Curah hujan vs Klorofil-a	Angin vs Klorofil-a	Lokasi
Pearson Correlation	-0,544	0,639*	Perairan selatan Makassar
Sig. (2-tailed)	0,067	0,025	
N	12	12	
Pearson Correlation	0,594*	-0,152	Perairan Pulau Laut
Sig. (2-tailed)	0,042	0,637	
N	12	12	



Gambar 7. Grafik *time series* a) Curah hujan dan Klorofil-a di Perairan selatan Makassar, b) Angin dan Klorofil-a di Perairan selatan Makassar, c) Curah hujan dan Klorofil-a di Perairan Pulau Laut, dan d) Angin dan Klorofil-a di Perairan Pulau Laut

Hubungan antara klorofil-a, curah hujan dan angin juga ditunjukkan dalam grafik *time series* (Gambar 7). Pada grafik *time series* curah hujan dan klorofil-a di perairan selatan Makassar berbanding terbalik. Ini berarti bahwa bahwa saat curah hujan tinggi maka klorofil-a rendah, tetapi angin dan klorofil-a berbanding lurus yaitu saat angin tinggi maka klorofil-a tinggi hal ini dapat disimpulkan bahwa pada daerah perairan selatan Makassar terdapat *upwelling* dimana saat kecepatan angin tinggi suhu mengalami penurunan dan klorofil-a pun juga akan meningkat. Analisis lapisan termoklin di lokasi terjadinya *upwelling* menunjukkan bahwa terjadi perubahan lapisan termoklin akibat adanya pengangkatan massa air dari lapisan dalam ke lapisan atas yang membuktikan bahwa bagian selatan Selat Makassar benar terjadi fenomena *upwelling*. Analisis arah dan kecepatan pergerakan angin menunjukkan bahwa *upwelling* yang terjadi di bagian selatan Selat Makassar menyebar ke arah barat daya Selat Makassar dengan estimasi daerah luasan *upwelling* mencapai $\pm 46000\text{km}^2$ (Inaku, 2015). Curah hujan dan klorofil-a di Perairan Pulau Laut berbanding lurus bahwa saat curah hujan tinggi maka klorofil-a tinggi sedangkan fluktuasi angin terlihat tidak berhubungan dengan klorofil-a. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pada daerah Perairan Pulau Laut yang menyebabkan klorofil-a tinggi yaitu curah hujan.

Keterkaitan ENSO dengan Variabilitas Klorofil-a di Perairan selatan Makassar dan Perairan Pulau Laut

Keterkaitan *ENSO* dengan klorofil-a diuji dengan analisis korelasi antara *ENSO* dengan angin dan curah hujan sebagai faktor penyebab dinamika klorofil-a di perairan selatan Makassar dan perairan Pulau Laut. Korelasi *ENSO* dan angin Musim Barat di perairan selatan Makassar yaitu sebesar 0,111 yang artinya memiliki hubungan yang positif dan memiliki korelasi lemah. Korelasi *ENSO* dan angin di Musim Timur di perairan selatan Makassar juga sangat lemah dengan nilai korelasi sebesar 0,047. Pada wilayah perairan selatan Makassar di Musim Barat dan Musim timur memiliki nilai p value lebih besar dari 0,05 yaitu 0,452 dan 0,750 artinya tidak memiliki hubungan signifikan antara *ENSO* dan angin di kedua musim.

Korelasi *ENSO* dan curah hujan Musim Barat di perairan Makassar yaitu sebesar -0,144 yang artinya memiliki hubungan yang negatif dan memiliki korelasi sangat lemah yaitu saat *El-Niño*

maka curah hujan rendah dan sebaliknya. Korelasi *ENSO* dan curah hujan Musim Timur di Perairan Makassar yaitu sebesar -0,386 yang artinya memiliki hubungan yang negatif dan memiliki korelasi lemah yang artinya saat *El-Niño* maka curah hujan rendah. Pada wilayah perairan selatan Makassar di Musim Barat memiliki nilai p value lebih besar dari 0,05 yaitu 0,327 artinya tidak memiliki hubungan signifikan antara *ENSO* dan curah hujan Musim Barat di perairan Makassar. Pada perairan selatan Makassar di Musim Timur memiliki nilai p value lebih kecil dari 0,05 yaitu 0,007 artinya memiliki hubungan signifikan antara *ENSO* dan curah hujan Musim Timur. Dengan nilai korelasi sebesar -0,378, kejadian *El Niño* menyebabkan curah hujan lebih rendah, sedangkan *La Niña* meningkatkan curah hujan di Musim Timur.

Korelasi *ENSO* dan angin Musim Barat di perairan Pulau Laut yaitu sebesar 0,210 yang artinya memiliki hubungan yang positif dan memiliki korelasi lemah yaitu saat *El-Niño* maka angin akan semakin kencang. Korelasi *ENSO* dan angin di Musim Timur di perairan Pulau Laut yaitu sebesar -0,125 yang artinya memiliki hubungan yang negatif dan memiliki korelasi sangat lemah yang artinya saat *El-Niño* tinggi maka angin rendah. Pada wilayah perairan Pulau Laut di Musim Barat memiliki nilai p value lebih besar dari 0,05 yaitu 0,152, artinya tidak memiliki hubungan signifikan antara *ENSO* dan angin Musim Barat di perairan Pulau Laut. Pada wilayah perairan Pulau Laut di Musim Timur memiliki nilai p value lebih besar dari 0,05 yaitu 0,399 artinya tidak memiliki hubungan signifikan antara *ENSO* dan angin Musim Timur di Perairan Pulau Laut.

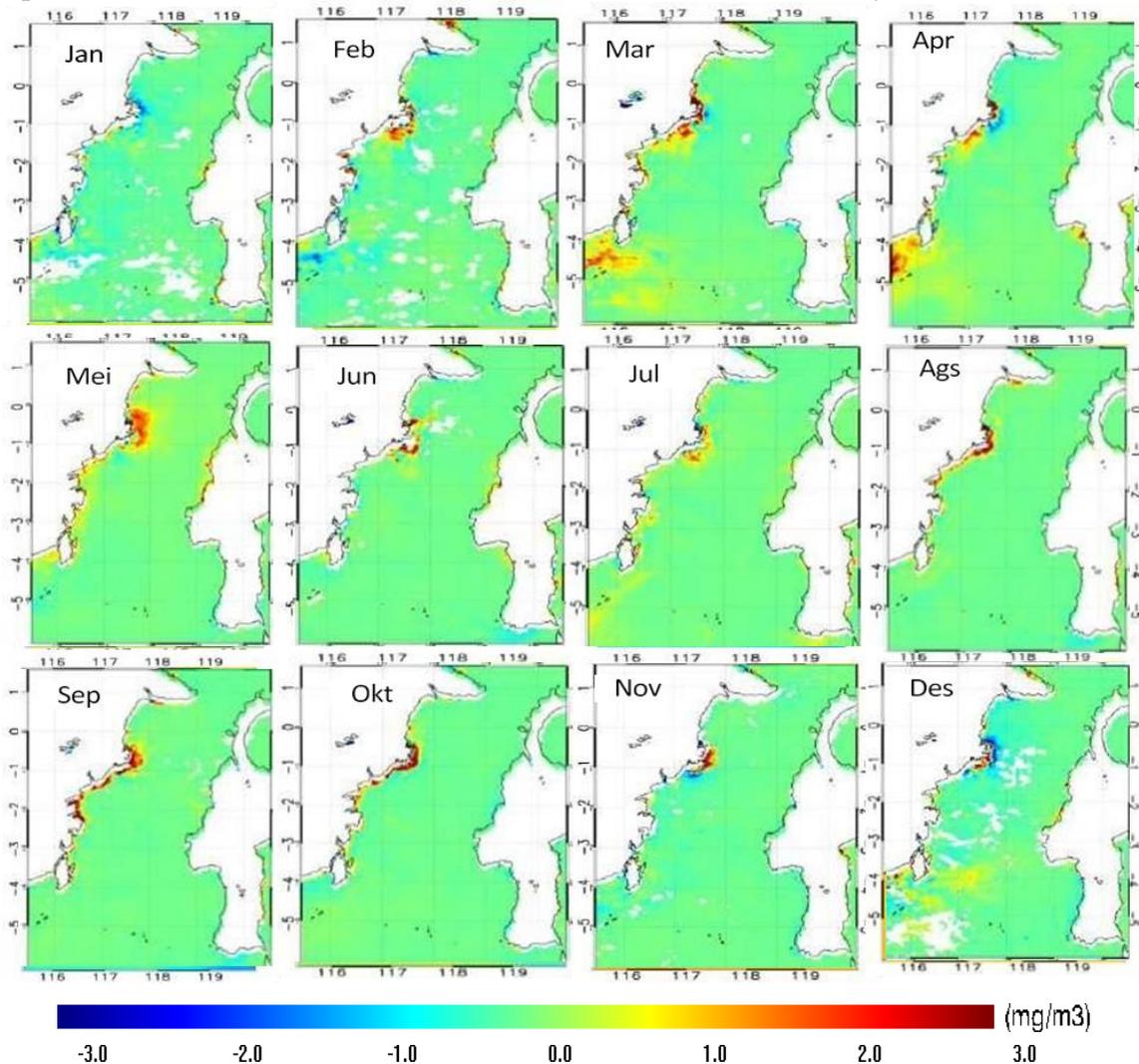
Korelasi *ENSO* dan curah hujan Musim Barat di perairan Pulau Laut yaitu sebesar -0,079 yang artinya memiliki hubungan yang negatif dan memiliki korelasi sangat lemah. Korelasi *ENSO* dan curah hujan Musim Timur di perairan Pulau Laut yaitu sebesar -0,378 yang artinya memiliki hubungan yang negatif yang artinya saat *El-Niño* tinggi maka curah hujan rendah dan sebaliknya. Pada wilayah perairan Pulau Laut di Musim Barat memiliki nilai p value lebih besar dari 0,05 yaitu 0,595 artinya tidak memiliki hubungan signifikan antara *ENSO* dan curah hujan Musim Barat di perairan Pulau Laut. Pada wilayah perairan Pulau Laut di Musim Timur memiliki nilai p value lebih kecil dari 0,05 yaitu 0,008 artinya memiliki hubungan signifikan antara *ENSO* dan curah hujan Musim Timur di perairan Pulau Laut.

Dari analisis korelasi di atas dapat disimpulkan bahwa di perairan selatan Makassar dan Pulau Laut, faktor *ENSO* lebih berpengaruh terhadap curah hujan dibandingkan dengan angin. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh *ENSO* terhadap klorofil-a sangat ditentukan oleh kondisi curah hujan di kedua perairan tersebut. Karena variabilitas klorofil-a di perairan Selatan Makassar dipengaruhi oleh angin, *ENSO* cenderung kurang berpengaruh terhadap variabilitas klorofil-a di perairan Selatan Makassar. Sebaliknya, variabilitas klorofil-a di perairan Pulau laut dipengaruhi oleh curah hujan, sehingga *ENSO* mempengaruhi variabilitas klorofil-a di perairan ini. Indikasi ini diperkuat dengan peta anomali klorofil-a di tahun 2007 dan 2015 yang mewakili kejadian *La Niña* dan *El Niño*. (Gambar 8 dan 9).

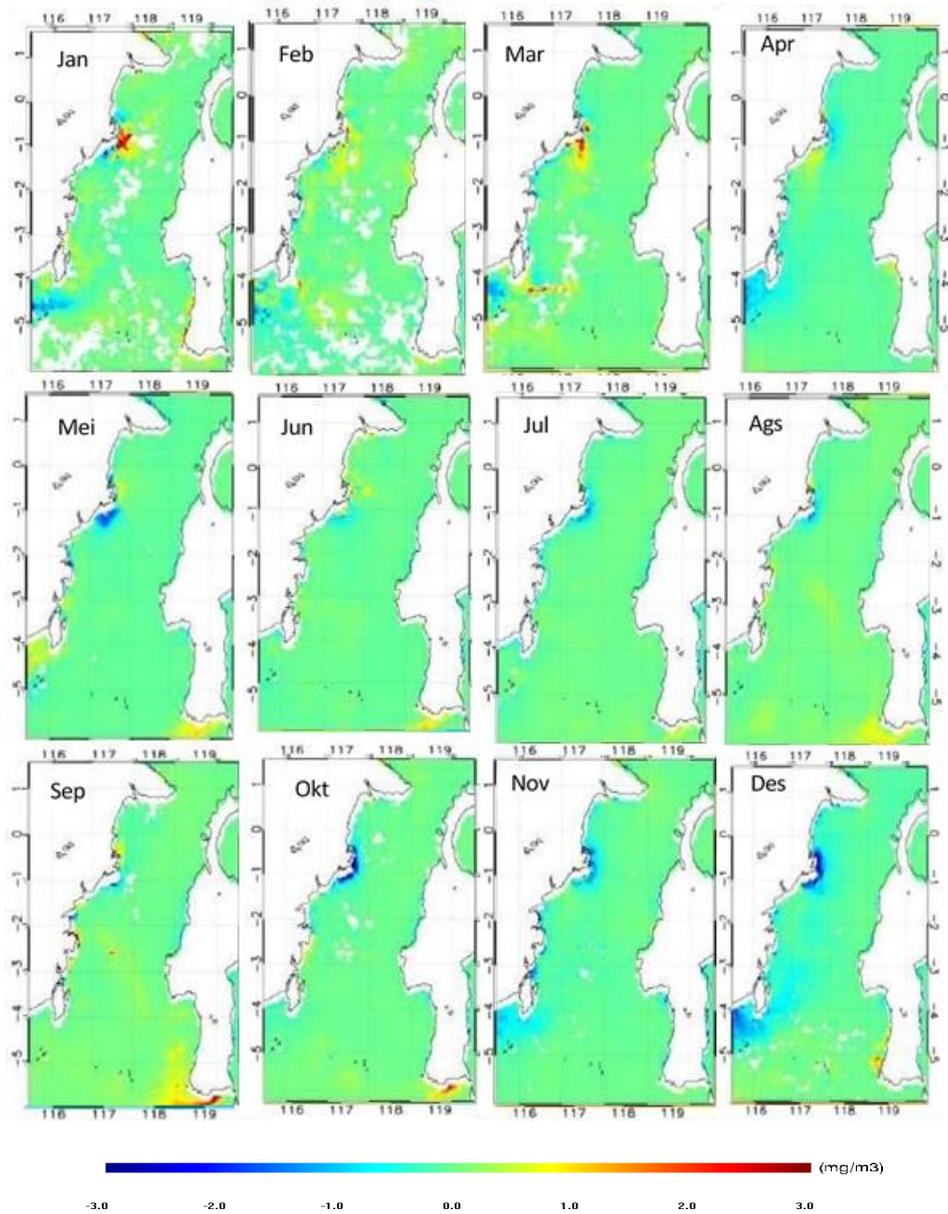
Hasil analisis visualisasi distribusi anomali klorofil perairan Selat Makassar pada tahun 2007

(*La-Niña*) memperlihatkan bahwa secara umum terjadi anomali positif dari klorofil-a di sepanjang pesisir timur Kalimantan dan pesisir barat Sulawesi di terutama di musim peralihan 1 dan musim timur termasuk di perairan Pulau Laut. Sedangkan di perairan selatan Makassar cenderung normal. Sebaliknya di tahun 2015 yang mewakili kondisi *El Niño*, anomali negatif dari klorofil-a ditemukan di terutama sepanjang pesisir timur Kalimantan.

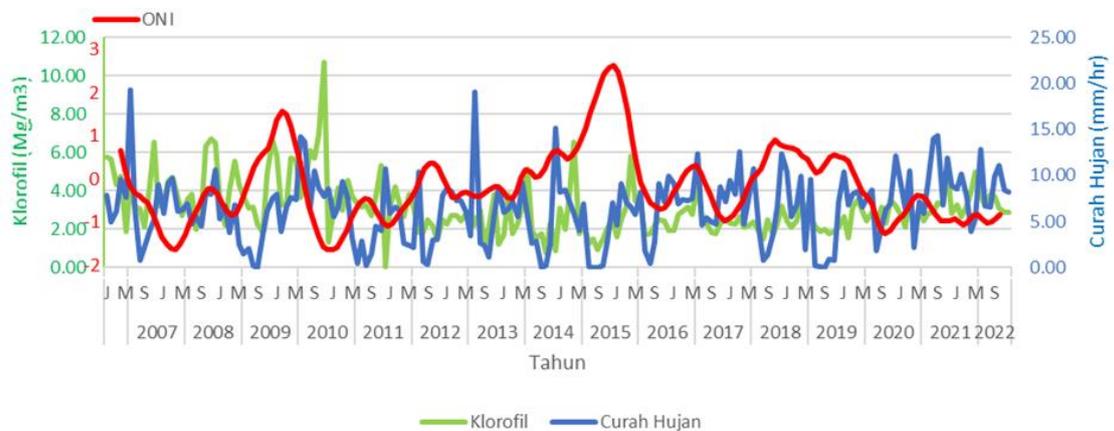
Gambar 10 menunjukkan analisis temporal dari klorofil-a, curah hujan dan *ENSO* di perairan Pulau Laut. Saat terjadinya *El-Niño* klorofil-a akan turun karena curah hujan juga turun, dan saat terjadinya *La-Niña* klorofil-a akan meningkat karena curah hujan juga meningkat. Hasil dari analisis temporal ini menguatkan analisis statistik dan spasial yang menunjukkan bahwa *ENSO* mempengaruhi fluktuasi klorofil di perairan Pulau Laut melalui curah hujan.



Gambar 8. Peta Anomali klorofil tahun 2007 (*La Niña*)



Gambar 9. Peta Anomali klorofil tahun 2015 (*El Niño*)



Gambar 10. Grafik Curah Hujan, Klorofil-a dan ONI di Perairan Pulau Laut Tahun 2007-2022

Tabel 2. Korelasi *ENSO*, Curah Hujan, dan angin di Perairan selatan Makassar dan Perairan Pulau Laut

Correlations	Curah hujan vs ENSO	Angin vs ENSO	Lokasi dan musim
Pearson Correlation	-0,144	0,111	Perairan selatan
Sig. (2-tailed)	0,327	0,452	Makassar di musim barat (DJF)
N	48	48	
Pearson Correlation	-0,386*	0,047	Perairan selatan
Sig. (2-tailed)	0,007	0,750	Makassar di musim timur (JJA)
N	48	48	
Pearson Correlation	-0,079	0,210	Perairan Pulau Laut di musim barat (DJF)
Sig. (2-tailed)	0,595	0,152	
N	48	48	
Pearson Correlation	-0,378*	-0,125	Perairan Pulau Laut di musim timur (JJA)
Sig. (2-tailed)	0,008	0,399	
N	48	48	

KESIMPULAN

Secara umum sebaran spasial dari klorofil-a di Selat Makassar menunjukkan bahwa daerah pesisir memiliki kandungan klorofil-a lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lepas pantai yang berada di tengah Selat Makassar. Pesisir timur Kalimantan memiliki klorofil-a yang cenderung lebih tinggi dibandingkan pesisir barat Sulawesi. Secara musiman, klorofil-a tertinggi terjadi pada bulan Desember yang bernilai 0.57 mg/m^3 untuk rata-rata di seluruh area penelitian, sedangkan yang memiliki klorofil-a rendah yaitu pada bulan September bernilai 0.47 mg/m^3 . Fluktuasi klorofil ini dipengaruhi angin dan curah hujan. Di perairan Pulau Laut, variasi klorofil-a secara signifikan dipengaruhi curah hujan yang akan meningkatkan *runoff* sungai yang membawa nutrient dari daratan ke laut, sedangkan di perairan selatan Makassar, angin mempengaruhi fluktuasi klorofil-a melalui mekanisme *upwelling*. Analisis korelasi menunjukkan bahwa di perairan selatan Makassar dan Pulau Laut, faktor *ENSO* lebih berpengaruh terhadap curah hujan dibandingkan dengan angin. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh *ENSO* terhadap klorofil-a sangat ditentukan oleh kondisi curah hujan di kedua perairan tersebut. Karena variabilitas klorofil-a di perairan Selatan Makassar dipengaruhi oleh angin, *ENSO* cenderung kurang berpengaruh terhadap variabilitas klorofil-a di perairan Selatan Makassar. Sebaliknya, variabilitas klorofil-a di perairan Pulau Laut dipengaruhi oleh curah hujan, sehingga *ENSO* mempengaruhi variabilitas klorofil-a di perairan ini perairan Pulau Laut. Saat terjadinya *El-Niño* klorofil-a akan turun

karena curah hujan juga turun, dan saat terjadinya *La-Niña* klorofil-a akan meningkat karena curah hujan juga meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alifdini, I., Shimada, T., & Wirasatriya, A. 2021. Seasonal distribution and variability of surface winds in the Indonesian seas using scatterometer and reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 41(10): 4825-4843. doi: 10.1002/joc.7101
- Chang, P.H., & Isobe A. 2005. Interannual variation of fresh water in the Yellow and East China Seas: roles of the Changjiang discharge and wind forcing. *Journal of oceanography*, 61: 817-834. doi: 10.1007/s10872-006-0002-5
- Chang, P., Fang, Y., Saravanan, R., Ji, Link & Seidel H. 2006. The cause of the fragile relationship between the Pasific El Niño and the Atlantuc Niño. *Journal Nature*, 443: 324-327. doi: 10.1038/nature05053
- Donlon, C.J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., Wimmer, W. 2012. The operational sea surface temperature and sea Ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*, 116: 140–158.
- Fiedler, P.C., & Talley, L.D., 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4): 143–180.
- Figa-Saldaña, J., Wilson, J.J. W., Attema, E., Gelsthorpe, R.V., Drinkwater, M.R. & Stoffelen, A. 2002. The Advanced Scatterometer (ASCAT) on the

- Meteorological Operational (MetOp) Platform: A Follow on for European Wind Scatterometers. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(3): 404-412. doi: 10.5589/m02-035
- Griffiths, P.G., Web, R.H. & Muth, A. 2009. Plants And Ventifacts Delineate Late Holocene Wind Vector In The Coachella Valley, USA. *Journal Scient Direct*, 1(2): 63-73. doi: 10.1016/j.aeolia.2009.07.001
- Inaku, D.F. 2015. Analisis Pola Sebaran Dan Perkembangan Area *Upwelling* Di Bagian Selatan Selat Makassar. *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan*, 25(2): 67-7.
- Kunarro., Graharto, S.R., & Wulandari, S.W. 2022. Identifikasi Variabilitas Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a serta Intensitas *Upwelling* di Selat Makassar. *Jurnal Buletin Oseanografi*, 11(2): 206–214. doi: 10.14710/buloma.v11i2.42170
- Mahie, A.G., & Megawati. 2015. Pemodelan Numerik Princeton Ocean Model(Pom) Transport Volume Arus Lintas Indonesia (Arlindo) Hubungannya Dengan Enso Dan Monsun. *Jurnal Matematika, Statistika dan Komputasi*, 11(2):159-168.
- McPhaden, M.J., Zebiak, S.E. & Glantz, M.H. 2006. ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 314(5806):1740-1755. doi: 10.1126/science.1132588
- Mohtadi, M., Oppo, D., Steinke, S., Stut, J.B.W., De Pol, H., Ricardo., Hebbeln, D., & Luckge A. 2011. Glacial to Holocene swings of the Australian Indonesian monsoon. *Nature Geoscience*, 4(8): 540-544. doi: 10.1038/ngeo1209
- Nababan, B., Novilia, R., Djisman, M., Metta, N. N., & Romdonul, H. 2016. The Seasonal Variability of Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a concentration in the South of Makassar Strait. *Procedia Environmental Sciences*, 33:583-589. doi: 10.1016/j.proenv.2016.03.112
- Otsuka, S., Kotsuki, S. & Miyoshi, T. 2016. Nowcasting with data assimilation: a case of Global Satellite Mapping of Precipitation. *Weather Forecasting*, 31: 1409-141. doi: 10.1175/WAF-D-16-0039.1
- Pasha, W.A., Amron & Pranowo W.S. 2022. Pengaruh ENSO (*el nino southern oscillation*) terhadap suhu dan salinitas di perairan utara Aceh. *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*, 5(2): 7–10. doi: 10.37875/hidro.pilar.v8i2.247
- Pramuwardani, I., Hartono, Sunarto & Sopaheluwakan, A., 2018. Indonesian rainfall variability during Western North Pacific and Australian monsoon phase related to convectively coupled equatorial waves. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21): p.673. doi: 10.1007/s12517-018-4003-7
- Prianto, T., Ulqodry, Z. & Aryawati, R. 2013. Pola Sebaran Konsentrasi Klorofil-a di Selat Bangka dengan Menggunakan Citra Aqua-Modis. *Maspari Journal*, 5(1):22-33.
- Sathyendranath, S., Brewin, R.J., Brockmann, C., Brotas, V., Calton, B., Chuprin, A., Cipollini, P., Couto, A.B., Dingle, J., Doerffer, R. & Donlon, C. 2019 An ocean-colour time series for use in climate studies: the experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI). *Sensors*, 19: p.4285. doi: 10.3390/s19194285
- Setiawan, R.Y., Setyobudi, E., Wirasatriya, A., Muttaqin, A.S. & Maslukah, L. 2019. The Influence of Seasonal and Interannual Variability on Surface Chlorophyll-a off the Western Lesser Sunda Islands. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 12(11): 4191–4197
- Sugiyono. 2011. Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&d. Alfabeta
- Susanto, R.D., Moore II, T. & Marra, J. 2006. Oceanol. Color Variability in the Indonesian Seas during the SeaWiFS Era. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7(5): 1–16. doi: 10.1029/2005GC001009
- Wang, C., & Fiedler. P.C. 2006. ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69 (2–4): 239-266. doi: 10.1016/j.pocean.2006.03.004.
- Wirasatriya, A., R. Y. Setiawan, and P. Subardjo 2017. “The Effect of ENSO on the Variability of Chlorophyll-a and Sea Surface Temperature in the Maluku Sea. “*IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12): 5513-5518. doi: 10.1109/JSTARS.2017.2745207
- Wirasatriya, A., Susanto, R.D., Setiawan, J.D., Ramdani, F., Iskandar I., Jalil, A.R., Purjayanti, A.D., Kunarro & Maslukah, L. 2021. High Chlorophyll-a Areas along the Western Coast of South Sulawesi-Indonesia during the Rainy Season Revealed by Satellite Data. *Jurnal Remote Sensing*, 13(1): 1-12. doi: 10.3390/rs13234833

Wirasatriya, A., Susanto, R.D., Kunarso., Jalil, A.R., Ramdani, F & Purjayanti, A.D. 2021. Northwest monsoon upwelling within the Indonesian seas. *International Journal of Remote Sensing*, 42(14): 5437–5458. doi: 10.1080/01431161.2021.1918790

Wirasatriya, A., Setiawan, J.G., Sugianto, D.N., Rosyadi, I.A., Haryadi H., Winarso, G., Setiawan, R.Y. & Susanto, R.D. 2020. Ekman

dynamics variability along the southern coast of Java revealed by satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 41(21): 8475–8496. doi: 10.1080/01431161.2020.1797215.

Wyrтки, K. 1961. Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report Vol.2 Scripps, Institute Oceanography, California.