

Analisa Spasial dan Temporal Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a selama 2 Dekade di Perairan Indonesia

Tri Wulandari Santoso*, Kunarso dan Jarot Marwoto

*Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Sudarto, SH, Tembalang Semarang. 50275 Telp/fax (024)7474698*

Email: *santoswulandari@gmail.com

Abstrak

Pemahaman pola variabilitas secara spasial dan temporal atas perubahan yang terjadi di lautan sangat penting dilakukan untuk pengelolaan laut. Lautan Indonesia merupakan satu-satunya jalur yang menghubungkan cekungan samudera yang berbeda di daerah tropis, sehingga memainkan peranan penting dalam samudera dan sistem iklim. Suhu permukaan laut (SST) dan Klorofil-a (Chl-a) seringkali digunakan untuk memantau kondisi Lautan terlebih dibawah pengaruh perubahan iklim. Perubahan kedua parameter yang signifikan sangat mempengaruhi produktivitas sumber daya lautan. Tujuan penelitian ini yaitu mengkaji variabilitas spasio temporal SST dan Chl-a di Laut Indonesia selama 2 dekade (2000-2020) dengan menggunakan data citra MODIS TERRA harian. Penelitian dilakukan dengan menganalisis sebaran spasial dan temporal SST dan Chl-a Laut Indonesia dan analisis temporal tiga daerah bagian, yaitu Laut Cina Selatan, Utara Papua, dan Selatan Jawa. Analisa ini didasarkan pada nilai anomali yang didapat dari pengurangan nilai parameter dengan nilai historis (rerata nilai seluruh data). Penelitian ini menunjukkan bahwa terjadi kenaikan slope SST 0,024°C/tahun dan Chl-a 0,0012 mg⁻³/tahun di Indonesia. Slope positif juga ditemui pada ketiga daerah studi. Perairan Selatan Jawa memiliki slope yang paling tinggi dari Laut Cina Selatan dan Utara Papua. Variabilitas SST dan Chl-a Indonesia mengalami perubahan yang sangat variatif sejak 10 tahun terakhir.

Kata Kunci: *Spatio temporal, Suhu Permukaan Laut, Klorofil-a, Perubahan Iklim, Indonesia*

Abstract

Understanding the spatial and temporal variability patterns of changes that occur in the ocean is very important for ocean management. Indonesian water is the only pathway connecting the different ocean basins in the tropics, thus playing an important role in the ocean and climate system. Sea surface temperature (SST) and Chlorophyll-a (Chl-a) are often used to monitor ocean conditions moreover below impact of climate change. Changes in these two parameters significantly affect the productivity of ocean resources. The purpose of this study was to examine the spatio-temporal variability of SST and Chl-a in the Indonesian Sea for 2 decades (2000-2020) using daily MODIS TERRA image data. The study was conducted by analyzing the spatial and temporal distribution of SST and Chl-a in the Indonesian Sea and temporal analysis of three parts, namely the South China Sea, North Papua, and South Java. This analysis is based on the anomaly value obtained by subtracting the parameter value from the historical value (the average value of all data). The results of this study indicate that there is an increase in the SST slope of 0.024°C/year and Chl-a 0,0012 mg⁻³/year in Indonesia. Positive slopes were also found in the three study areas. The southern waters of Java have the highest slope of the South China Sea and North Papua. The variability of SST and Chl-a in Indonesia has undergone very varied changes since the last 10 years.

Keywords: *Spatio temporal, Sea Surface Temperature, Chlorophyll-a, Perubahan Iklim, Indonesia*

PENDAHULUAN

Sea Surface Temperature (SST) atau suhu permukaan laut adalah salah satu parameter dalam bidang oseanografi (Akhbar *et al.*, 2018). SST dunia bervariasi jika dilihat dari variasi garis lintang, daerah dekat dengan khatulistiwa umumnya perairannya terhangat dan sebaliknya untuk daerah kutub utara dan antartika (EPA, 2016). SST merupakan parameter fundamental di bidang meteorologi dan klimatologi. Nilai SST pada titik tertentu bergantung pada sejumlah faktor seperti radiasi, transpor vertikal panas sensibel dan laten udara, serta arus laut horizontal dan vertikal. Kecepatan angin juga mempengaruhi SST, karena mempengaruhi arus laut dan merupakan faktor pengendali transpor panas (Bartzokas *et al.*, 1993). SST merupakan parameter yang bisa digunakan sebagai data untuk informasi adanya *front*, upwelling, arus, cuaca atau iklim dan daerah tangkapan ikan / potensi ikan (Yuniarti *et al.*, 2013; Gaol *et al.*, 2014). Karena suhu berkaitan dengan proses metabolisme maupun perkembangbiakan dari organisme di laut (Yuniarti *et al.*, 2013). Pada lautan, klorofil atau pigmen fotosintesis ini ditemukan di fitoplankton. Fotosintesis ini menyumbang sebagian besar produksi primer di ekosistem laut dan membantu aliran energi dan bahan organik yang menopang produksi di laut. Konsentrasinya dapat diukur dengan berbagai teknik, baik in situ maupun penginderaan jauh warna laut melalui satelit (Liu *et al.*, 2019)

Laut disebut *reservoir* atau tempat penyimpanan utama dari sistem iklim (Hu *et al.*, 2020). Sehingga jika terjadi ketidakseimbangan energi total di atmosfer, paling baik dinilai dengan melakukan menganalisis perubahan dalam penyimpanan energi (Abraham *et al.*, 2013). Lautan global telah menyerap 93% dari panas ekstra yang terperangkap oleh Bumi sejak 1970 (Wijffels *et al.*, 2016). Hal ini yang menjadikan parameter oseanografi, SST dan Chl-a menjadi salah satu proksi terjadinya perubahan iklim (Feng and Zhu, 2012; Dunstan *et al.*, 2018; Antoni *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020). Salah satu caranya yaitu melalui gambaran tren atau pola variasi perubahan dalam jangka waktu satu dekade atau lebih (Foster *et al.*, 2014; Dunstan *et al.*, 2018).

Kondisi perairan Indonesia dipengaruhi oleh posisi geografis yang terletak diantara dua samudera, yaitu Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Secara spasial dan temporal variasi SST ini terjadi karena adanya angin muson, ENSO, dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). Sebagai perairan tropis yang terletak di daerah khatulistiwa, perairan Indonesia sangat berperan sama lain terhadap dinamika iklim yang ada di kedua Samudra tersebut. Telah ada beberapa studi global dan regional yang menemukan adanya peningkatan SST dan atau Chl-a (Deser *et al.*, 2010; Habibie and Nuraini, 2014; Syaifullah, 2015; Dunstan *et al.*, 2018; Antoni *et al.*, 2019; Legionosuko, 2019; Putra *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020). Studi ini melakukan kajian kedua parameter (SST dan Chl-a) dalam skala Indonesia dengan waktu terkini.

MATERI DAN METODE PENELITIAN

Materi Penelitian

Materi yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data sekunder karena penulis tidak mengambil data langsung dari lapangan (Hox and Boeije, 2005; Sarwono, 2006). Data yang digunakan pada penelitian yaitu data suhu permukaan laut dan klorofil-a yang diunduh dari <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> NASA dengan resolusi sel 4 km².

Metode Penelitian

Metode yang digunakan adalah analisis spasial dan analisis temporal. Analisis spasial digunakan karena metode ini dapat menampilkan data yang berhubungan dengan ruang dengan nilai yang sebenarnya. Analisis spasial diaplikasikan pada data SST dan data Chl-a. Nilai yang digunakan yaitu nilai anomali sehingga secara spasial bisa melihat wilayah mana saja memiliki nilai perubahan nilai anomali positif atau negatif. Sedangkan analisis temporal untuk melihat tren parameter pada beberapa wilayah tertentu.

Analisa spasial diawali dengan pemotongan daerah studi kemudian data harian tersebut digabungkan dengan melakukan rerata menjadi data bulanan. Data bulanan ini untuk selanjutnya dilakukan analisis spasial dan temporal. Nilai anomali didapat dari data bulanan yang dikurangi dengan nilai historis. Nilai historis adalah nilai rerata selama 21 tahun. Setelah diperoleh nilai anomali bulanan, selanjutnya dihitung nilai *slope* / tren / kemiringannya (Deser *et al.*, 2010; Syaifullah, 2015). Nilai X merupakan waktu sedangkan nilai Y merupakan nilai anomali.

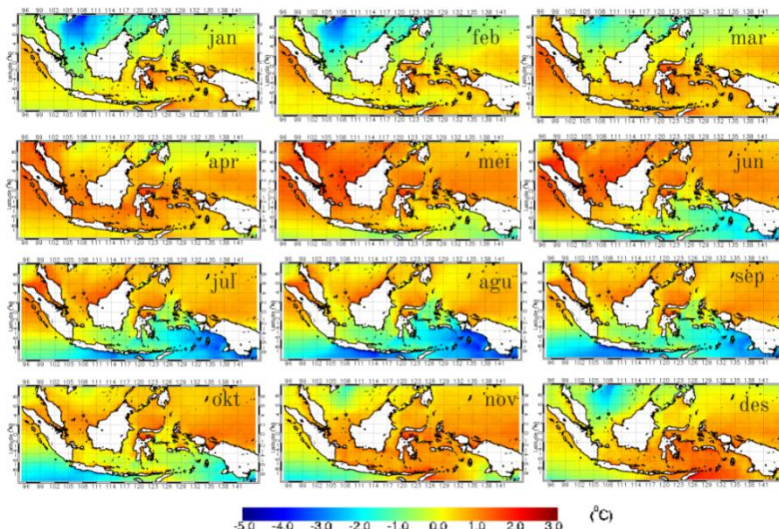
$$\begin{aligned} \text{Nilai Anomali} & : \text{Data bulanan} - \text{Nilai Historis} \\ \text{Nilai Historis} & : \text{rerata Data bulanan} \\ \text{Slope} & : \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} \end{aligned}$$

Analisis temporal diproses berdasarkan empat rerata triwulan (empat musim) yaitu, September-Oktober-November (SON), Desember- Januari-Februari (DJF), Maret-April-Mei (MAM), dan Juni-Juli-Agustus (JJA). Pada analisis temporal dilakukan perhitungan tren/*slope* atau regresi linier. Apabila nilai koefisien regresi tersebut adalah positif maka mengindikasikan adanya tren kenaikan nilai parameter. Sebaliknya jika nilai koefisien regresi tersebut negatif maka mengindikasikan adanya tren penurunan nilai parameter. Semakin besar nilai koefisien regresi semakin kuat peningkatannya (Douglass *et al.*, 2008; Syaifullah, 2015; Hu *et al.*, 2020).

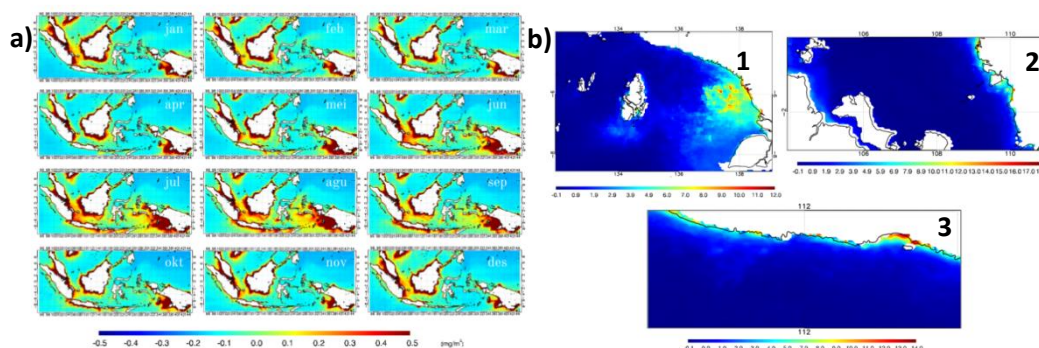
HASIL

Variabilitas spasial anomali SST dan Chl-a Indonesia

Sebaran nilai anomali SST klimatologi bulanan perairan Indonesia digambarkan pada Gambar 1. Hasil nilai historis perairan Indonesia didapatkan sebesar 28,7755⁰C. Nilai anomali SST positif (semakin merah) menunjukkan bahwa suhu permukaan laut saat itu lebih tinggi (panas) dibandingkan dengan suhu reratanya (historis), sedangkan jika semakin berwarna biru menunjukkan keadaan yang sebaliknya (anomali negatif). Berdasarkan gambar sajian tersebut, perairan Indonesia memiliki sebaran nilai SST anomali yang tinggi secara merata pada bulan MAM (0 - 2⁰C). Namun saat memasuki bulan JJA nilai SST terbagi atas Belahan Bumi Utara (BBU) dan Belahan Bumi Selatan (BBS). Perairan Selatan Jawa pada BBS memiliki sebaran anomali rendah (-4 - 2⁰C), sebaliknya di perairan LCS dan Utara Papua pada BBU dengan kisaran nilai anomali yang lebih tinggi, sebesar 0 - 1,5⁰C. Sebaliknya pada bulan DJF, nilai anomali SST perairan Selatan Jawa meningkat sedangkan LCS dan perairan Utara Papua menurun. Secara spasial keseluruhan nilai anomali SST Indonesia memiliki rentang -4 - 2⁰C.



Gambar 1. Variabilitas anomali SST klimatologi Indonesia (2000-2020).



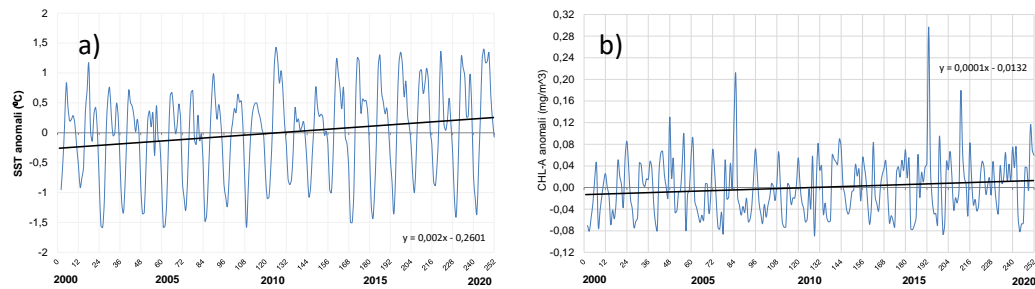
Gambar 2. Variabilitas anomali Chl-a klimatologi Indonesia (2000-2020) dan Nilai anomali Chl-a perairan pesisir Indonesia bulan September yang memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan laut lepas. 1) Selatan Papua, 2) Selat Karimata, 3) Selatan Jawa.

Sebaran nilai anomali Chl-a klimatologis bulanan perairan Indonesia disajikan pada Gambar 2a. Nilai historis yang didapatkan sebesar $0,23698 \text{ mg/m}^3$. Sebaran ini memiliki nilai yang tinggi pada bulan JJA dan berpuncak pada bulan September. Sebaliknya, pada bulan DJF nilai anomali Chl-a rendah. Nilai anomali perairan pesisir terlihat lebih tinggi dibandingkan Laut lepas. Perairan laut lepas Utara Papua (Samudera Pasifik Barat) dan perairan Barat Daya Sumatera (Samudra Hindia Timur) memiliki nilai anomali Chl-a yang hampir stabil atau terjadi sedikit perubahan. Kisaran nilai anomali Pesisir dan Laut lepas berturut-turut ($0,1 - >5 \text{ mg/m}^3$) dan ($-0,2 - 0,1 \text{ mg/m}^3$). Gambar 2b merupakan representasi nilai anomali Chl-a di perairan pesisir pada bulan September. Pesisir Utara Sumatera dan Pesisir Barat Kalimantan / laut Natuna (Gambar 2b2) memiliki rentang nilai anomali $-0,1 - 18 \text{ mg/m}^3$, yaitu paling tinggi dibandingkan dua wilayah yang lain. Pada pesisir Selatan Papua hingga Laut Arafura (Gambar 2b1) terlihat persebaran nilai anomali rata-rata yang

terlihat berkisar 4 - >10 mg/m³. Sedangkan pada pesisir Selatan Jawa (Gambar 2b) nilai rata-rata yang terlihat berkisar 5 - >12 mg/m³.

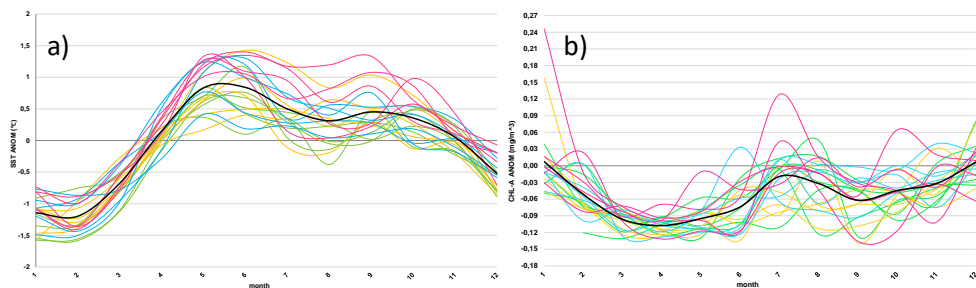
Variabilitas temporal anomali SST dan Chl-a Indonesia

Peningkatan *slope* SST yang terjadi di laut Indonesia (Gambar 3a) yaitu sebesar +0,002 atau 0,024°C/tahun. Nilai anomali SST maksimum sebesar 1,43 yang terjadi pada bulan Juni 2010, minimum sebesar -1,58 terjadi pada bulan Februari 2002. Terjadi perubahan yang signifikan pada tahun 2009-2012. Nilai anomali pada tahun 2010 paling tinggi dibanding tahun lainnya, diikuti 2017 dan 2020. Setelah tahun 2011 *slope* terlihat terus naik. Nilai anomali Chl-a (Gambar 3b) ditemukan kenaikan *slope* positif sebesar +0,0001 atau (0,0012 mg/m³)/tahun. Terjadi puncak yang mengalami kenaikan yang signifikan yaitu pada tahun 2004, 2006, 2016, 2017. Dan setelah tahun 2019 grafik terlihat dominan mengalami kenaikan hingga 2020.



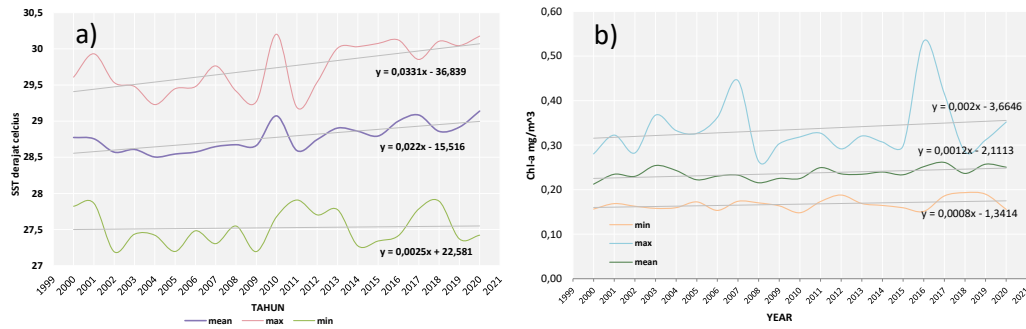
Gambar 3. Time Series nilai anomali a) SST, b) Chl-a Indonesia tahun 2000- 2020

Siklus tahunan dari tahun 2000 hingga 2020 dapat diamati pada Gambar 4. Pada siklus SST, tahun-tahun yang berada diatas garis rata-rata klimatologis (garis hitam dalam Gambar 4a) tercatat setelah tahun 2010 (warna biru ke pink). Selain itu pada tahun 2007, 2008, dan 2010 juga yang memiliki nilai diatas rata-rata. Siklus Chl-a laut Indonesia bervariasi terhadap nilai rata-ratanya (garis hitam pada Gambar 4b). Lima tahun terakhir (garis berwarna pink Gambar 4b) mengalami perubahan yang variatif dan signifikan.



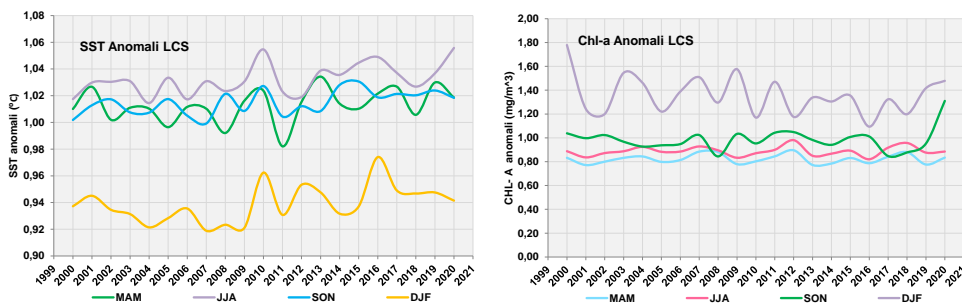
Gambar 4. Siklus tahunan rata-rata a) SST b) Chl-a Indonesia dari tahun 2000 hingga 2020. Setiap garis mewakili setiap tahun, dan garis tebal hitam merupakan rata-rata klimatologis.

Untuk menambah data analisa, didapat nilai *slope* minimum, maksimum, dan rata-rata dari kedua parameter. Berdasarkan grafik (Gambar 5) dibawah ini, terjadi kenaikan *slope* terhadap nilai ketiganya sejak dua dekade terakhir. Nilai *slope* SST maksimum setiap tahunnya sebesar +0,0331, *slope* SST minimum sebesar +0,0025, dan nilai *slope* rata-rata sebesar +0,022. Sedangkan pada Chl-a *Slope* nilai maksimum yaitu +0,002, minimum sebesar +0,0008, dan rata-ratanya sebesar +0,0012.



Gambar 5. Nilai maksimum dan minimum a) SST b) Chl-a laut Indonesia.

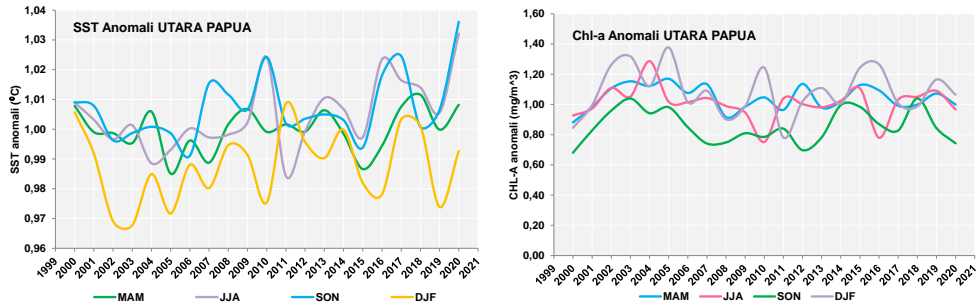
Perairan Laut China Selatan memiliki nilai *slope* anomali SST positif sejak dua dekade terakhir sebesar 0,0009°C/tahun (Gambar 6), dengan JJA (+0,001), SON (+0,0008), DJF (+0,001), MAM (+0,0006) dengan rentang nilai anomali 0,97 - 1,055. Puncak *slope* peningkatan SST terutama terjadi pada musim kering dan musim basah, sedangkan pada musim peralihan *slope* perubahan SST cenderung lebih rendah. Nilai anomali Chl-a Laut China Selatan memiliki *slope* negatif sebesar (-0,0132 mgm⁻³/tahun) dengan nilai MAM (+0,0008) diatas JJA (+0,0003). Perubahan pada bulan DJF tampak signifikan dan terjadi penurunan *slope* di bulan sebesar (-0,0075). Penurunan *slope* ini terlihat mulai menurun signifikan sejak tahun 2010. Sedangkan pada bulan-bulan SON *slopenya* yaitu sebesar +0,0019. Pada SON terjadi kenaikan yang signifikan pada tahun 2020



Gambar 6. Grafik slope SST dan Chl-a pada bulan-bulan MAM, JJA, SON, DJF di Laut China Selatan.

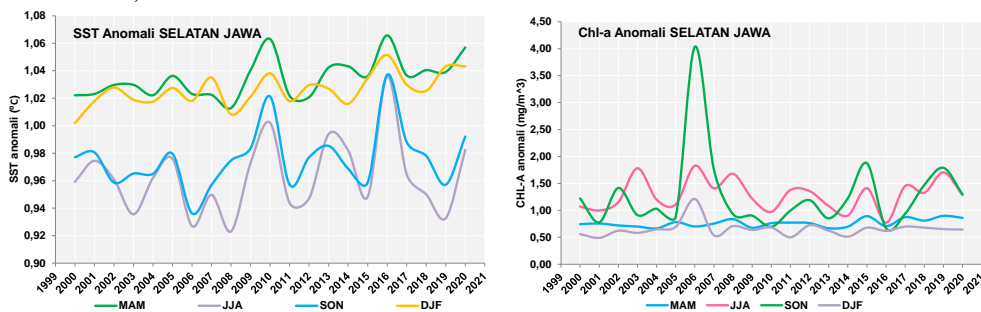
Daerah studi perairan Utara Papua terletak di wilayah Samudera Pasifik Barat dengan koordinat 1⁰LU-9⁰LS dan 104⁰-114⁰BT. Perairan ini memiliki nilai *slope* positif sebesar 0,0006°C/tahun dengan nilai *slope* bulan JJA = +0,001, SON =+0,0007, DJF =+0,0004, dan MAM

=+0,0002 (Gambar 7). Pada musim Timur (JJA) pola perubahan pada perairan Utara Papua sangat signifikan. Kenaikan yang signifikan terjadi pada tahun 2010 dan 2020 di musim JJA dan SON. Namun pada JJA tahun 2011 terjadi penurunan yang cukup signifikan dan pada DJF terjadi kenaikan. Sedangkan nilai *slope* anomali Chl-a Perairan Utara Papua mengalami penurunan sejak dua dekade terakhir sebesar (-0,0132 mgm⁻³/tahun). Bulan SON memiliki *slope* positif namun sangat kecil sekali nilainya yaitu sebesar +0,0002. Nilai *slope* MAM = -0,0009, SON = -0,0006, JJA = -0,0023.



Gambar 7. Grafik slope SST dan Chl-a pada bulan-bulan MAM, JJA, SON, DJF di Utara Papua.

Perairan selatan Jawa dengan koordinat -10°LS - -6° LU dan 108°-114°BT. Didapat nilai *slope* SST positif sebesar 0,0011°C/tahun, dengan bulan JJA=+0,0008, MAM =+0,0013, SON =+0,001, DJF =+0,00152. Slope terbesar di perairan Selatan Jawa terjadi pada musim Barat (DJF) dan terkecil pada musim Timur (JJA). Sedangkan pada Chl-a, kenaikan nilai *slope* diperairan Selatan Jawa memiliki nilai *slope* yang paling tinggi dibanding kedua Perairan lainnya, dan terjadi penurunan pada musim peralihan 1 (SON). Nilai *slope* selama dua dekade terakhir yaitu, MAM = +0,0063, JJA = +0,0018, SON = -1E-04, DJF =+0,0009. Nilai anomali Chl-a maksimum yaitu 4,03 dan minimum sebesar 0,49.



Gambar 8. Grafik slope SST dan Chl-a pada bulan-bulan MAM, JJA, SON, DJF di Selatan Jawa.

PEMBAHASAN

Variabilitas SST dan Chl-a dipengaruhi oleh musim. (Putra *et al.*, 2019). Angin muson yang berhembus secara periodik menyebabkan variabilitas SST di Indonesia (Daruwedho *et al.*, 2016). Hal ini tampak pada sebaran suhu secara klimatologi bulanan yang disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Sebaran anomali SST yang tinggi pada bulan MAM diduga disebabkan angin muson

pada musim Peralihan I di bulan ini. Arah angin muson pada musim Peralihan tidak menentu dan kecepatannya melemah, sehingga menyebabkan turunnya proses konveksi dan proses pengadukan yang mengakibatkan meningkatnya SST (Harliyanti *et al.*, 2010; Alfajri *et al.*, 2017). Meningkatnya SST di bulan MAM seiring dengan menurunnya nilai anomali Chl-a, sedangkan pada bulan JJA di Perairan Selatan Jawa (BBS) memiliki SST yang lebih rendah dibanding LCS dan Perairan Utara Papua (BBU) diduga disebabkan karena angin muson Timur yang bergerak dari Australia ke Asia sejajar dengan pantai Selatan Jawa, sehingga meningkatkan proses *upwelling* di perairan Selatan Jawa dan meningkatkan konsentrasi Chl-a. Hal ini sesuai dengan yang dijelaskan (Kunarjo *et al.*, 2011; Ratnawati *et al.*, 2016; Mashita and Lumban-Gaol, 2019). Proses ini berkebalikan pada bulan DJF karena arah angin muson Barat bergerak berlawanan dengan angin muson Timur, yaitu dari Asia ke Australia sehingga menyebabkan perairan LCS dan Utara Papua di BBU lebih dingin dari pada BBS.

Selama dua dekade terakhir Indonesia mengalami *slope* SST dan Chl-a positif. *Slope* SST sebesar +0,002 atau 0,024°C/tahun dan Chl-a sebesar +0,0001 atau (0,0012 mg/m³)/tahun. Tahun 2010, 2017, 2020 terjadi kenaikan nilai SST yang signifikan dan sebaliknya terjadi penurunan pada tahun 2011, 2015/2016, dan 2019. Hal ini diduga karena kondisi inter-atmosfer yang terjadi di area tropis Indo-Pasifik yaitu fenomena ENSO (El Niño / La Niña) dan area Samudera Hindia yaitu IOD positif/negatif (Wijaya *et al.*, 2020; Suhermat *et al.*, 2021).

Tabel 1. Klasifikasi El Niño/La Niña dan IOD tahun 2000-2019 berdasarkan data NINO 3.4 Index and Dipole Mode Index (Wijaya *et al.*, 2020)

El Nino	La Nina	IOD positive	IOD negative
2002/2003, 2004/2005, 2006/2007, 2009/2010, 2015/2016, 2018/2019	2000/2001, 2005/2006, 2007/2008, 2008/2009, 2010/2011, 2011/2012, 2016/2017	2003, 2006, 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2015, 2017, 2018, 2019	2005, 2010

Peningkatan nilai anomali SST pada tahun 2010 (Gambar 3) bersamaan dengan terjadinya La Nina dan IOD(-) secara bersamaan (Tabel 1). Tahun 2010 merupakan tahun transisi masa transisi dari El Niño ke fase of La Niña (Garcia-Soto *et al.*, 2012). El Niño bermula di Samudera Pasifik pada bulan Mei 2009 dan berakhir pada bulan Desember, dan memasuki fase netral pada akhir April 2010 dan selanjutnya diikuti oleh La Niña hingga Mei 2012 bulan MAM (Australian Government Bureau of Meteorology, 2011; United States Climate Prediction Center, 2020). Tingginya nilai 2010 ini berhubungan dengan pernyataan NASA bahwa El Niño 1998 berkontribusi atas peningkatan suhu 0,2°C secara global (NASA, 2010). Selama masa El Niño dan atau IOD(+) perairan Indonesia menjadi lebih dingin, sebaliknya pada La Niña dan atau IOD(-). Hal ini sesuai yang ditemukan pada studi (Wijaya *et al.*, 2020). Meningkatnya SST ini diiringi dengan menurunnya nilai anomali Chl-a. Peningkatan anomali SST lain yaitu terjadi pada tahun 2016/2017 serta menurunnya nilai anomali Chl-a. Tahun ini diketahui terjadi La Niña dan IOD(+). Kenaikan ini juga terlihat pada ketiga sub daerah studi (Gambar 6, Gambar 7, Gambar 8). Fenomena ENSO dan IOD berstatus netral pada tahun 2020, seperti yang dinyatakan oleh BMKG (2020), namun terjadi kenaikan anomali SST di Indonesia pada tahun ini. Berbagai faktor dapat mempengaruhi atas kenaikan ini baik alam ataupun manusia. Belum diketahui secara pasti atas peningkatan suhu ini.

Naiknya suhu global diduga mempengaruhi pemanasan ini, serta adanya adveksi horisontal. Namun, sejauh mana adveksi panas ini dapat perubahan pemanasan SST masih belum diketahui secara pasti. Hal ini sesuai yang dijelaskan oleh (Iskandar et al., 2020). Turunnya nilai anomali SST pada tahun 2011 bersamaan dengan terjadinya La Nina dan IOD(+) hingga tahun 2012, sehingga tampak bahwa nilai pada tahun ini menurun signifikan setelah mengalami puncak kenaikan pada tahun 2010. Penurunan SST signifikan yang lain terjadi pada tahun 2015/2016 dan 2019, dimana tahun ini bersamaan dengan terjadinya fenomena El Nino dan IOD(+), sedangkan kenaikan nilai anomali Chl-a saat El Nino dan IOD(+) terjadi pada tahun 2003/2004, 2006/2007 dan 2015/2016. Nilai anomali SST pada tahun ini cenderung menurun.

Peningkatan nilai anomali SST sepuluh tahun terakhir menunjukkan nilai semua bulannya diatas rata-rata perbulan (Gambar 4) dan lima tahun terakhir terjadi perubahan yang signifikan atau tidak stabil, khususnya di musim kering. Selain itu adanya slope positif pada nilai maksimum, minimum, serta nilai rata-rata pertahunnya di Laut Indonesia, memperkuat bukti akan adanya peningkatan nilai SST di Indonesia. Perubahan SST ini mungkin sebagai bagian dari variasi natural, ataupun merupakan akibat pemanasan global yang disebabkan oleh gas rumah kaca dan aerosol akibat aktivitas manusia (Habibie and Nuraini, 2014), begitu pula dengan Chl-a. Jika dalam konteks gas-gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global, hal ini bisa memicu terjadinya evolusi dan intensitas ENSO yang bertambah kuat atau “super” dan akan lebih sering terjadi, dikatakan bahwa telah terjadi sebanyak 33 fenomena El Niño dari tahun 1901 - 2017, dan ditemukan bahwa sejak 1970-an telah terjadi perubahan/ pergeseran ke arah barat hingga ribuan mil dimana di Samudera Pasifik El Niño berasal dan memuncak dalam intensitasnya, serta meningkatkan peluang terjadinya El Niño yang sangat kuat dan ketidakpastian atas fenomena tersebut (Trenberth and Hoar, 1997; Collins et al., 2010; Cai et al., 2014; Wang et al., 2019; Cai et al., 2021). Kenaikan nilai slope Chl-a dan SST sejak 2 dekade terakhir berkebalikan dengan fakta pada umumnya. Naiknya nilai Chl-a bersamaan dengan naiknya slope SST juga ditemukan oleh (Gregg et al., 2005). Hal ini diduga karena SST yang lebih hangat dapat menghasilkan lapisan campuran (mixed layer) yang lebih dangkal, sehingga memungkinkan ketersediaan lebih banyak cahaya di lapisan campuran dan merangsang pertumbuhan fitoplankton (Gregg *et al.*, 2005). Faktor lain yang mempengaruhi kenaikan Chl-a ini sangat kompleks, seperti biogeokimia di suatu Perairan yang juga dapat mempengaruhi nilai Chl-a di Perairan tersebut.

KESIMPULAN

Dari hasil studi mengenai variabilitas spatiotemporal Indonesia dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai SST dan Chl-a di Indonesia selama dua dekade terakhir mengalami peningkatan slope sebesar $+0,024^{\circ}\text{C}/\text{tahun}$ dan $+0,0012 \text{ mgm}^{-3}/\text{tahun}$.
2. Peningkatan anomali SST musim kering lebih tinggi dibandingkan musim basah. Sebaliknya pada Chl-a.
3. Selatan Jawa memiliki nilai *slope* SST dan Chl-a lebih tinggi dari LCS dan Utara Papua.

4. Perubahan SST dan Chl-a Laut Indonesia mengalami perubahan yang sangat variatif pada 10 tahun terakhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham, J. P., M. Baringer, N. L. Bindoff, T. Boyer, L. J. Cheng, J. A. Church, J. L. Conroy, C. M. Domingues, J. T. Fasullo, J. Gilson, G. Goni, S. A. Good, J. M. Gorman, V. Gouretski, M. Ishii, G. C. Johnson, S. Kizu, J. M. Lyman, A. M. Macdonald, W. J. Minkowycz, S. E. Moffitt, M. D. Palmer, A. R. Piola, F. Reseghetti, K. Schuckmann, K. E. Trenberth, I. Velicogna, and J. K. Willis. 2013. A Review of Global Ocean Temperature Observations: Implications for Ocean Heat Content Estimates and Climate Change. *Rev. Geophys.*, 51(3):450–483.
- Akhbar, A. I., Y. V. Jaya, and T. Febrianto. 2018. Dinamika Maritim Kajian Suhu Permukaan Laut Berdasarkan Data Citra Satelit NOAA-AVHRR Dan Data Argo Float Di Perairan Selatan Jawa, 7(1):27–32.
- Alfajri, A., M. Mubarak, and A. Mulyadi. 2017. Analisis Spasial Dan Temporal Sebaran Suhu Permukaan Laut Di Perairan Sumatera Barat. *Din. Lingkung. Indones.*, 4(1):65.
- Antoni, S., R. A. Bantan, T. A. Al-Dubai, M. Z. Lubis, W. Anurogo, and R. D. Silaban. 2019. Chlorophyll-a, and Sea Surface Temperature (SST) as Proxies for Climate Changes: Case Study in Batu Ampar Waters, Riau Islands. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 273(1).
- Australian Government Bureau of Meteorology. 2011. Record-Breaking La Niña Events.
- Bartzokas, A., D. A. Metaxas, and I. S. Ganas. 1993. SPATIAL AND TEMPORAL SEA-SURFACE TEMPERATURE COVARIANCES IN THE MEDITERRANEAN. *Int. J. Climatol.*, 41:201–213.
- BMKG. 2020. Prakiraan Musim Kemarau 2020 Di Indonesia, 145 p.
- Cai, W., S. Borlace, M. Lengaigne, P. van Rensch, M. Collins, G. Vecchi, A. Timmermann, A. Santoso, M. J. McPhaden, L. Wu, M. H. England, G. Wang, E. Guilyardi, and F.-F. Jin. 2014. Increasing Frequency of Extreme El Niño Events Due to Greenhouse Warming. *Nat. Clim Chang.*, 4(0):111–116.
- Cai, W., A. Santoso, M. Collins, B. Dewitte, C. Karamperidou, J.-S. Kug, M. Lengaigne, M. J. McPhaden, M. F. Stuecker, A. S. Taschetto, A. Timmermann, L. Wu, S.-W. Yeh, G. Wang, B. Ng, F. Jia, Y. Yang, J. Ying, X.-T. Zheng, T. Bayr, J. R. Brown, A. Capotondi, K. M. Cobb, B. Gan, T. Geng, Y.-G. Ham, F.-F. Jin, H.-S. Jo, X. Li, X. Lin, S. McGregor, J.-H. Park, K. Stein, K. Yang, L. Zhang, and W. Zhong. 2021. Changing El Niño–Southern Oscillation in a Warming Climate. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 0123456789.
- Collins, M., S. Il An, W. Cai, A. Ganachaud, E. Guilyardi, F. F. Jin, M. Jochum, M. Lengaigne, S. Power, A. Timmermann, G. Vecchi, and A. Wittenberg. 2010. The Impact of Global Warming on the Tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nat. Geosci.*, 3(6):391–397.
- Daruwedho, H., B. Sasmito, and F. Amarrohman. 2016. Analisis Pola Arus Laut Permukaan Perairan Indonesia Dengan Menggunakan Satelit Altimetri Jason-2 Tahun 2010-2014. *J. Geod. Undip*, 5(2):147–158.
- Deser, C., A. S. Phillips, and M. A. Alexander. 2010. Twentieth Century Tropical Sea Surface Temperature Trends Revisited. *Geophys. Res. Lett.*, 37:1–6.
- Douglass, D. H., J. R. Christy, B. D. Pearsona, and S. FredSinger. 2008. A Comparison of Tropical Temperature Trends with Model Predictions. *Int. J. Climatol.*, 28:1693–1701.
- Dunstan, P. K., S. D. Foster, E. King, J. Risbey, T. J. O’Kane, D. Monselesan, A. J. Hobday, J. R. Hartog, and P. A. Thompson. 2018. Global Patterns of Change and Variation in Sea Surface Temperature and Chlorophyll A. *Sci. Rep.*, 8(1):14624.

- EPA. 2016. Sea Surface Temperature : This Indicator Describes Global Trends in Sea Surface Temperature. *Clim. Chang. Indic. United States Sea Surf. Temp.*, 13(2):199–220.
- Feng, J. F. and L. Zhu. 2012. Changing Trends and Relationship between Global Ocean Chlorophyll and Sea Surface Temperature. *Procedia Environ. Sci.*, 13(2011):626–631.
- Foster, S. D., D. A. Griffin, and P. K. Dunstan. 2014. Twenty Years of High-Resolution Sea Surface Temperature Imagery around Australia: Inter-Annual and Annual Variability. *PLoS One*, 9(7).
- Gaol, J. L., R. E. Arhatin, and M. M. Ling. 2014. Pemetaan Suhu Permukaan Laut Dari Satelit Di Perairan Indonesia Untuk Mendukung “ One Map Policy .” *Proceeding Semin. Nas. Penginderaan Jauh 2014*:433–442.
- Garcia-Soto, C., J. Vazquez-Cuervo, P. Clemente-Colón, and F. Hernandez. 2012. Satellite Oceanography and Climate Change. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 77–80:1–9.
- Gregg, W. W., N. W. Casey, and C. R. McClain. 2005. Recent Trends in Global Ocean Chlorophyll. *Geophys. Res. Lett.*, 32(3):1–5.
- Habibie, M. N. and T. A. Nuraini. 2014. Karakteristik Dan Tren Perubahan Suhu Permukaan Laut Di Indonesia Periode 1982-2009. *J. Meteorol. dan Geofis.*, 15(1):37–49.
- Harliyanti, N. I., B. M. Sukojo, and L. M. Jaelani. 2010. STUDI PERUBAHAN SUHU PERMUKAAN LAUT MENGGUNAKAN CITRA SATELIT TERRA MODIS(1999).
- Hox, J. J. and H. R. Boeije. 2005. Data Collection, Primary vs. Secondary. *In: Encycl. Soc. Meas.*, p. 539–599.
- Hu, S., J. Sprintall, C. Guan, M. J. McPhaden, F. Wang, D. Hu, and W. Cai. 2020. Deep-Reaching Acceleration of Global Mean Ocean Circulation over the Past Two Decades. *Sci. Adv.*, 6(6):1–9.
- Iskandar, I., W. Mardiansyah, D. O. Lestari, and Y. Masumoto. 2020. What Did Determine the Warming Trend in the Indonesian Sea? *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7(1).
- Kunarso, K., S. Hadi, N. S. Ningsih, and M. S. Baskoro. 2011. Variabilitas Suhu Dan Klorofil-a Di Daerah Upwelling Pada Variasi Kejadian ENSO Dan IOD Di Perairan Selatan Jawa Sampai Timor. *ILMU Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.*, 16(3):171–180.
- Legionosuko, T. 2019. Posisi Dan Strategi Indonesia Dalam Menghadapi Perubahan Iklim Guna Mendukung Ketahanan Nasional. *J. Ketahanan Nas.*, 25(3):295–312.
- Liu, X., E. A. Laws, Y. Xie, L. Wang, L. Lin, and B. Huang. 2019. Uncoupling of Seasonal Variations between Phytoplankton Chlorophyll a and Production in the East China Sea. *Biogeosciences*, 124(2400–2415):0–2.
- Mashita, M. and J. Lumban-Gaol. 2019. Variability of Sea Surface Temperature (Sst) and Chlorophyll-a (Chl-a) Concentrations in the Eastern Indian Ocean During the Period 2002–2017. *Int. J. Remote Sens. Earth Sci.*, 16(1):55.
- NASA. 2010. NASA News & Feature Releases. 2009: Second Warmest Year on Record; End of Warmest Decade. [https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/\(August 20, 2020\)](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/(August%20,2020)).
- Putra, I. N. J. T., I. W. G. A. Karang, and I. D. N. N. Putra. 2019. Analisis Temporal Suhu Permukaan Laut Di Perairan Indonesia Selama 32 Tahun (Era AVHRR). *J. Mar. Aquat. Sci.*, 5:234–236.
- Ratnawati, H. I., R. Hidayat, A. Bey, and T. June. 2016. Upwelling Di Laut Banda Dan Pesisir Selatan Jawa Serta Hubungannya Dengan ENSO Dan IOD. *Omni-Akuatika*, 12(3):119–130.
- Sarwono, J. 2006. Metode Penelitian Kuantitatif Dan Kualitatif. Ed. 1. Graha Ilmu, Yogyakarta, 308 p.
- Suhermat, M., M. Dimiyati, S. Supriatna, and M. Martono. 2021. Impact of Climate Change on Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a Concentration in South Sukabumi Waters. *J. Ilmu*

- Lingkung., 19(2):393–398.
- Syaifullah, M. D. 2015. Suhu Permukaan Laut Perairan Indonesia Dan Hubungannya Dengan Pemanasan Global. *J. Segara*, 11(1):37–47.
- Trenberth, K. E. and T. J. Hoar. 1997. El Nino and Climate Change. *Geophys. Res. Lett.*, 24(23):3057–3060.
- United States Climate Prediction Center. 2020. Historical El Niño/La Niña Episodes (1950–Present).
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.
- Wang, B., X. Luo, Y. M. Yang, W. Sun, M. A. Cane, W. Cai, S. W. Yeh, and J. Liu. 2019. Historical Change of El Niño Properties Sheds Light on Future Changes of Extreme El Niño. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 116(45):22512–22517.
- Wijaya, A., U. Zakiyah, A. B. Sambah, and D. Setyohadi. 2020. Spatio-Temporal Variability of Temperature and Chlorophyll-a Concentration of Sea Surface in Bali Strait, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(11):5283–5290.
- Wijffels, S., D. Roemmich, D. Monselesan, J. Church, and J. Gilson. 2016. Ocean Temperatures Chronicle the Ongoing Warming of Earth. *Nat. Clim. Chang.*, 6(2):116–118.
- Yuniarti, A., L. Maslukah, and M. Helmi. 2013. Studi Variabilitas Suhu Permukaan Laut Berdasarkan Citra Satelit Aqua MODIS Tahun 2007-2011 Di Perairan Selat Bali. *J. Oceanogr.*, 2(4):416–421.