

IDENTIFIKASI VARIABILITAS *UPWELLING* BERDASARKAN INDIKATOR KLOOROFIL-A DI PERAIRAN SELATAN DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA

**Adedo Igai
Azka Abdussalam
Yosafat Donni Haryanto**

Program Studi Geofisika, STMKG
Program Studi Geofisika, STMKG
Program Studi Meteorologi, STMKG

adedo.ai.rs@stmkg.ac.id
azkaabdussalam2002@gmail.com
yosafatdonni@gmail.com

Abstrak

Upwelling merupakan fenomena penting dimana air yang dingin dan kaya nutrisi naik ke permukaan dan membawa dampak signifikan terhadap ekosistem laut. Penelitian ini mengidentifikasi dinamika *upwelling* di perairan selatan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) yang dipengaruhi oleh berbagai faktor oseanografis seperti arus laut, sistem monsun, dan fenomena global seperti *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). Dengan menggunakan data citra satelit Aqua MODIS dari tahun 2003 hingga 2023, penelitian ini berfokus pada analisis klorofil-a sebagai indikator utama kesuburan perairan. Klorofil-a digunakan untuk mengidentifikasi dan menganalisis variabilitas *upwelling* serta hubungannya dengan perubahan musiman. Data diolah melalui perangkat lunak SeaDas dan QGIS menghasilkan visualisasi sebaran klorofil-a dan evaluasi temporal fenomena *upwelling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *upwelling* mencapai puncaknya pada musim timur (Juni-Agustus) dengan konsentrasi klorofil-a tertinggi di dekat pantai barat hingga tengah perairan DIY. Fenomena ini dipengaruhi oleh angin muson tenggara yang memicu transpor Ekman. Analisis temporal juga mengungkapkan hubungan antara kekuatan *upwelling* dengan fenomena iklim global seperti El Niño dan IOD.

Kata kunci: *Upwelling*, Klorofil-a, Yogyakarta

Abstract

Upwelling is an important phenomenon where cold, nutrient-rich water rises to the surface and has a significant impact on marine ecosystems. This study identifies the dynamics of upwelling in the southern waters of the Special Region of Yogyakarta (DIY) which is influenced by various oceanographic factors such as ocean currents, monsoon systems, and global phenomena such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Indian Ocean Dipole (IOD). Using Aqua MODIS satellite image data from 2003 to 2023, this research focuses on analyzing chlorophyll-a as a key indicator of aquatic fertility. Chlorophyll-a is used to identify and analyze upwelling variability and its relationship with seasonal changes. Data were processed through SeaDas and QGIS software to produce visualization of chlorophyll-a distribution and temporal evaluation of the upwelling phenomenon. The results showed that upwelling reached its peak in the eastern season (June-August) with the highest chlorophyll-a concentration near the west coast to the middle of DIY waters. This phenomenon is influenced by southeast monsoon winds that trigger Ekman transport. The temporal analysis also revealed the relationship between the strength of upwelling and global climate phenomena such as El Niño and IOD.

Keywords: *Upwelling*, Chlorophyll-a, Yogyakarta

PENDAHULUAN

Fenomena upwelling merupakan salah satu proses oseanografi yang memiliki peran penting dalam meningkatkan produktivitas perairan laut. Upwelling terjadi ketika massa air laut dari lapisan dalam yang bersuhu lebih rendah dan kaya akan nutrisi naik ke permukaan akibat adanya mekanisme dinamika laut tertentu, seperti pengaruh angin, arus laut, serta gaya Coriolis (Bakun, 1990). Proses ini berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan perairan karena membawa unsur hara yang diperlukan oleh fitoplankton untuk melakukan fotosintesis. Akibatnya, daerah upwelling umumnya memiliki konsentrasi klorofil-a yang tinggi serta menjadi wilayah dengan produktivitas biologis yang signifikan (Mann & Lazier, 2006; Kudela et al., 2005).

Perairan Indonesia, khususnya di wilayah selatan Pulau Jawa, termasuk Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), merupakan salah satu kawasan yang dipengaruhi oleh dinamika oseanografi yang kompleks. Wilayah ini berada di bagian timur Samudra Hindia yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti sistem angin muson, Arus Lintas Indonesia (ARLINDO), Arus Khatulistiwa Selatan (AKS), serta fenomena iklim global seperti El Niño Southern Oscillation (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD) (Purba, 2007). Variabilitas faktor-faktor tersebut menyebabkan perubahan kondisi fisik laut, termasuk suhu permukaan laut (SPL), arus, dan distribusi nutrisi yang berperan dalam pembentukan fenomena upwelling dan downwelling.

Sistem angin muson menjadi salah satu faktor dominan dalam memicu terjadinya upwelling di perairan selatan Jawa. Pada periode muson tenggara (Juni–Oktober), angin bertiup sejajar garis pantai dari arah tenggara menuju barat laut, yang menyebabkan terjadinya transpor Ekman ke arah laut lepas. Kondisi ini memicu naiknya massa air dari lapisan bawah ke permukaan (upwelling). Sebaliknya, pada periode muson barat laut (Desember–Maret), terjadi fenomena downwelling akibat pergerakan massa air menuju pantai (Bima et al., 2014; Yuhendasmiko et al., 2016). Pola musiman ini menunjukkan bahwa variabilitas upwelling di wilayah selatan Jawa sangat dipengaruhi oleh dinamika atmosfer regional.

Salah satu indikator yang umum digunakan untuk mengidentifikasi fenomena upwelling adalah konsentrasi klorofil-a. Klorofil-a merupakan pigmen utama dalam proses fotosintesis fitoplankton dan dapat digunakan sebagai parameter untuk mengukur tingkat kesuburan perairan (Munthe et al., 2018). Peningkatan konsentrasi klorofil-a biasanya berkaitan erat dengan adanya suplai nutrisi dari lapisan bawah laut akibat proses upwelling. Oleh karena itu, analisis distribusi klorofil-a menjadi pendekatan yang efektif dalam mengkaji variabilitas upwelling, baik secara spasial maupun temporal.

Seiring dengan perkembangan teknologi penginderaan jauh, pemantauan klorofil-a dapat dilakukan secara lebih efisien menggunakan data citra satelit, seperti sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) pada satelit Aqua. Data satelit ini memungkinkan pengamatan dalam cakupan wilayah yang luas dengan resolusi temporal yang tinggi, sehingga sangat mendukung analisis dinamika oseanografi dalam jangka panjang (Girsang, 2008). Pemanfaatan data satelit juga memungkinkan identifikasi pola musiman serta hubungan antara fenomena lokal dan global secara lebih komprehensif.

Selain faktor musiman, variabilitas upwelling juga dipengaruhi oleh fenomena iklim global seperti ENSO dan IOD. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kejadian El Niño cenderung memperkuat aktivitas upwelling di wilayah selatan Jawa akibat peningkatan intensitas angin muson tenggara, sedangkan La Niña cenderung melemahkannya (Susanto et al., 2001; Ningsih et al., 2013). Interaksi antara fenomena global dan regional ini menyebabkan dinamika upwelling menjadi lebih kompleks dan bervariasi dari tahun ke tahun.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji fenomena upwelling di perairan Indonesia, kajian yang secara khusus menyoroti variabilitas upwelling di wilayah selatan Daerah Istimewa Yogyakarta dengan pendekatan jangka panjang masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan

penelitian yang mampu mengidentifikasi pola variabilitas upwelling secara lebih detail dengan memanfaatkan data satelit dalam rentang waktu yang panjang.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variabilitas upwelling di perairan selatan DIY berdasarkan indikator klorofil-a menggunakan data citra satelit Aqua MODIS selama periode 2003–2023. Analisis ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pola spasial dan temporal upwelling, serta keterkaitannya dengan faktor musiman dan fenomena iklim global. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan ilmu oseanografi, serta mendukung pengelolaan sumber daya kelautan secara berkelanjutan.

Selain itu, dalam kajian curah hujan, terdapat beberapa konsep teoritis yang menjadi dasar dalam memahami karakteristik dan dinamika hujan, khususnya hujan ekstrem. Salah satu konsep utama adalah proses konveksi atmosfer, yaitu mekanisme naiknya massa udara hangat dan lembap ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi, yang kemudian mengalami pendinginan dan kondensasi hingga membentuk awan hujan. Proses ini sangat berperan dalam pembentukan hujan dengan intensitas tinggi dalam waktu singkat, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia (Fabry, 2015; Sekaranom, 2021b). Selain konveksi, faktor lain yang memengaruhi distribusi curah hujan adalah interaksi antara parameter atmosfer seperti kelembapan udara, suhu, tekanan, dan dinamika angin. Kondisi atmosfer yang labil akan meningkatkan potensi terbentuknya awan konvektif yang identik dengan hujan lebat dan cuaca ekstrem (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2010a). Dalam hal ini, intensitas hujan sangat dipengaruhi oleh kandungan uap air di atmosfer yang berperan dalam proses kondensasi dan pembentukan presipitasi.

Dalam konteks pengamatan menggunakan radar cuaca, terdapat hubungan empiris antara reflektivitas radar (Z) dan intensitas curah hujan (R) yang dikenal sebagai hubungan Z - R . Hubungan ini digunakan untuk mengonversi nilai reflektivitas (dBZ) menjadi estimasi curah hujan di permukaan, yang secara umum dinyatakan sebagai berikut:

$$Z = aR^b$$

Hubungan tersebut banyak digunakan dalam analisis radar meteorologi untuk memperkirakan intensitas hujan secara spasial, meskipun memiliki keterbatasan akibat variasi ukuran butir hujan dan kondisi atmosfer (Doviak & Zrníc, 1993; Fabry, 2015). Oleh karena itu, diperlukan validasi dengan data observasi permukaan guna meningkatkan akurasi estimasi curah hujan.

Berdasarkan kerangka teoritis tersebut, analisis curah hujan tidak hanya bergantung pada data hasil pengamatan, tetapi juga memerlukan pemahaman terhadap proses fisik atmosfer yang mendasarinya. Dengan mengintegrasikan konsep konveksi, dinamika atmosfer, serta interpretasi data radar, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai karakteristik hujan ekstrem serta keandalan metode pengamatan yang digunakan.

METODE

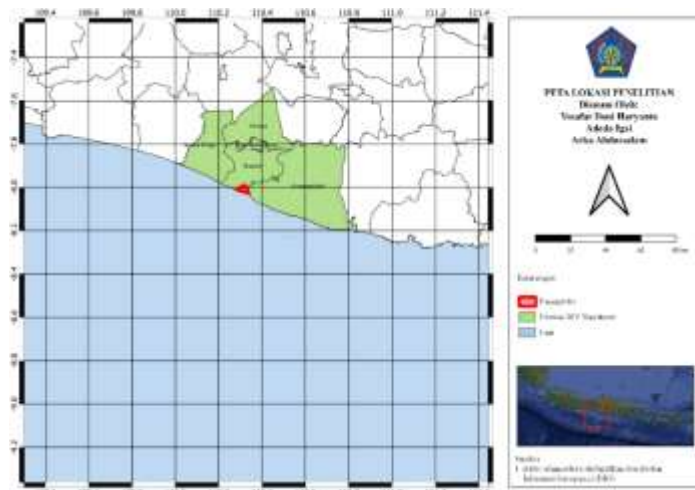
Penelitian ini dilakukan di perairan selatan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) yang secara geografis terletak pada kisaran koordinat wilayah pesisir selatan Pulau Jawa dan berbatasan langsung dengan Samudra Hindia. Wilayah ini dipilih karena memiliki dinamika oseanografi yang kompleks dan dikenal sebagai salah satu area potensial terjadinya fenomena upwelling. Periode penelitian mencakup rentang waktu yang panjang, yaitu dari tahun 2003 hingga 2023, guna mengidentifikasi variabilitas upwelling secara temporal dalam skala

musiman hingga tahunan. Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah data citra satelit klorofil-a yang diperoleh dari sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) pada satelit Aqua. Data tersebut memiliki format NetCDF (Network Common Data Form) dan diunduh melalui portal resmi OceanColor NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Data klorofil-a dipilih sebagai indikator utama karena mampu merepresentasikan tingkat kesuburan perairan yang berkaitan erat dengan fenomena upwelling.

Tahapan pengolahan data dilakukan secara bertahap menggunakan perangkat lunak SeaDas dan QGIS. Pada tahap awal, data citra yang telah diunduh dilakukan proses pre-processing berupa seleksi data dan penghilangan nilai tidak valid (Not a Number atau NaN) untuk memastikan kualitas data yang digunakan dalam analisis. Selanjutnya, data yang telah bersih diolah menggunakan SeaDas untuk memperoleh parameter klorofil-a dalam format yang siap dianalisis. Tahap berikutnya adalah proses visualisasi dan analisis spasial menggunakan perangkat lunak QGIS. Data klorofil-a ditampilkan dalam bentuk peta distribusi untuk mengidentifikasi pola sebaran secara geografis. Selain itu, dilakukan proses interpolasi spasial untuk memperjelas distribusi konsentrasi klorofil-a di wilayah penelitian. Visualisasi ini bertujuan untuk memudahkan interpretasi fenomena upwelling berdasarkan perubahan nilai klorofil-a di perairan selatan DIY.

Analisis data dilakukan dengan pendekatan deskriptif kuantitatif yang menekankan pada identifikasi pola spasial dan temporal. Secara temporal, data dianalisis berdasarkan pembagian musim, yaitu musim barat (Desember–Februari), musim peralihan I (Maret–Mei), musim timur (Juni–Agustus), dan musim peralihan II (September–November). Pendekatan ini digunakan untuk mengetahui hubungan antara variabilitas upwelling dengan dinamika musiman, khususnya pengaruh angin muson. Selain analisis musiman, dilakukan pula analisis tren jangka panjang untuk mengidentifikasi fluktuasi variabilitas upwelling selama periode 2003–2023. Analisis ini bertujuan untuk melihat kecenderungan peningkatan atau penurunan intensitas upwelling serta hubungannya dengan fenomena iklim global seperti El Niño Southern Oscillation (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD). Interpretasi dilakukan dengan membandingkan pola perubahan konsentrasi klorofil-a terhadap kondisi iklim global yang terjadi pada periode tertentu.

Dengan menggunakan kombinasi analisis spasial dan temporal, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai variabilitas upwelling di perairan selatan DIY. Metode yang digunakan juga memungkinkan identifikasi hubungan antara faktor lokal dan global yang memengaruhi dinamika oseanografi di wilayah tersebut. Lokasi penelitian adalah perairan selatan DIY. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data citra konsentrasi klorofil-a yang diperoleh dari sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) pada satelit Aqua. Data tersebut tersedia dalam format Network Common Data Form (NetCDF), yang merupakan format standar untuk penyimpanan data multidimensi dalam kajian oseanografi dan meteorologi. Data klorofil-a diunduh melalui portal resmi OceanColor NASA pada alamat <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/> yang menyediakan berbagai produk data penginderaan jauh dengan cakupan spasial luas dan resolusi temporal yang tinggi.

Tahap awal pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak SeaDas (SeaWiFS Data Analysis System), yang dirancang khusus untuk analisis data satelit oseanografi. Pada tahap ini, dilakukan proses pre-processing yang meliputi seleksi data sesuai wilayah penelitian serta penyaringan (*filtering*) untuk menghilangkan nilai yang tidak valid, seperti Not a Number (NaN) atau data kosong. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas data sehingga hasil analisis yang diperoleh menjadi lebih akurat dan representatif.

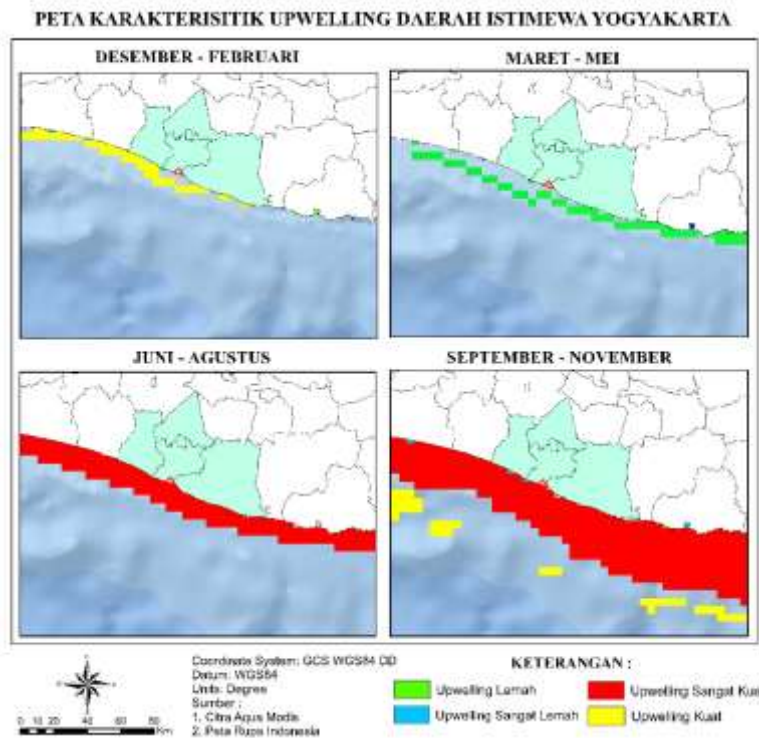
Selanjutnya, data yang telah melalui tahap pembersihan diolah lebih lanjut dan divisualisasikan menggunakan perangkat lunak QGIS. Dalam tahap ini, data klorofil-a ditampilkan dalam bentuk peta tematik untuk menggambarkan distribusi spasial konsentrasi klorofil-a di wilayah penelitian. Untuk memperjelas pola sebaran dan mengisi kekosongan data pada area tertentu, dilakukan proses interpolasi spasial. Metode interpolasi ini memungkinkan estimasi nilai klorofil-a pada lokasi yang tidak terukur secara langsung, sehingga menghasilkan representasi distribusi yang lebih kontinu dan mudah diinterpretasikan.

Melalui rangkaian tahapan pengolahan tersebut, diharapkan data yang dihasilkan mampu memberikan gambaran yang akurat mengenai variasi dan distribusi konsentrasi klorofil-a, yang selanjutnya digunakan sebagai indikator dalam mengidentifikasi fenomena *upwelling* di wilayah penelitian..

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis distribusi spasial dan temporal konsentrasi klorofil-a di perairan selatan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) selama tahun 2003-2023, ditemukan adanya pola yang konsisten terkait dengan fenomena *upwelling*. Pada musim timur (Juni-Agustus), terjadi peningkatan signifikan konsentrasi klorofil-a yang mencapai nilai tertinggi di zona perairan dekat pantai, terutama pada wilayah barat hingga tengah perairan selatan DIY. Pola ini mengindikasikan bahwa *upwelling* sangat kuat pada periode ini, sebagaimana didukung oleh penurunan suhu permukaan laut (SPL) yang khas di area tersebut. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan hubungan kuat antara angin muson tenggara dengan peningkatan aktivitas *upwelling* di perairan selatan Jawa (Bima *et al.*, 2014; Yuhendrasmi *et al.*, 2016).

Pada musim peralihan (September-November dan Maret-Mei), konsentrasi klorofil-a cenderung menurun dengan pola distribusi yang lebih homogen. Hal ini mengindikasikan melemahnya aktivitas *upwelling* akibat berkurangnya pengaruh angin muson tenggara. Sebaliknya, pada musim barat (Desember-Februari), konsentrasi klorofil-a berada pada level terendah yang konsisten dengan kondisi *downwelling*, di mana SPL meningkat dan pencampuran vertikal air laut melemah. Pola musiman ini menunjukkan bahwa *upwelling* di perairan selatan DIY memiliki siklus yang kuat dan sangat dipengaruhi oleh variabilitas angin muson serta dinamika suhu permukaan laut.



Gambar 2. Peta Karakteristik *Upwelling* Daerah Istimewa Yogyakarta

Secara temporal, analisis tren jangka panjang (2003-2023) menunjukkan adanya fluktuasi signifikan pada kekuatan *upwelling* yang berkorelasi dengan fenomena iklim global seperti El Niño dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). Pada tahun-tahun dengan kondisi El Niño kuat, ditemukan peningkatan konsentrasi klorofil-a yang lebih tinggi dibandingkan tahun normal, khususnya selama musim timur. Hal ini dapat dikaitkan dengan penguatan angin muson tenggara yang memicu peningkatan suplai nutrisi dari lapisan bawah ke permukaan. Sebaliknya, pada tahun La Niña, aktivitas *upwelling* cenderung melemah yang tercermin dari rendahnya konsentrasi klorofil-a (Susanto *et al.*, 2001; Ningsih *et al.*, 2013).

Selain itu, distribusi spasial klorofil-a menunjukkan bahwa wilayah barat perairan selatan DIY memiliki intensitas *upwelling* yang lebih tinggi dibandingkan wilayah timur. Hal ini dapat disebabkan oleh variasi batimetri dasar laut yang memengaruhi dinamika arus laut dan pola distribusi nutrisi. Temuan ini relevan dengan hasil studi Aldrian dan Susanto (2003) serta Yuhendasmiko *et al.* (2016) yang menyatakan bahwa pengaruh lokal seperti topografi dasar laut turut menentukan intensitas *upwelling* di wilayah pesisir Indonesia.

Penelitian di Selat Lombok juga menunjukkan bahwa fenomena *upwelling* memiliki kaitan erat dengan pola angin muson tenggara. Kecepatan angin yang tinggi menghasilkan transpor Ekman yang menyebabkan massa air dingin dan kaya nutrisi dari lapisan dalam naik ke permukaan, meningkatkan produktivitas perairan (Yuhendasmiko *et al.*, 2016). Hal ini memberikan gambaran serupa dengan dinamika di perairan selatan DIY, menunjukkan bahwa fenomena *upwelling* di Indonesia dipengaruhi oleh faktor atmosfer dan oseanografi yang kompleks.

Selain temuan yang telah diuraikan, hasil penelitian ini juga menunjukkan pentingnya integrasi antara data observasi permukaan dan data radar dalam memahami karakteristik curah hujan secara lebih komprehensif. Data observasi yang bersifat titik memberikan informasi yang akurat pada lokasi tertentu, namun kurang mampu merepresentasikan distribusi spasial hujan. Sebaliknya, data radar mampu menggambarkan sebaran hujan secara luas, tetapi memiliki keterbatasan dalam hal akurasi kuantitatif akibat faktor-faktor seperti atenuasi sinyal, variasi

ukuran butir hujan, serta gangguan topografi. Oleh karena itu, kombinasi kedua jenis data ini menjadi pendekatan yang ideal dalam meningkatkan kualitas analisis curah hujan, khususnya pada kejadian hujan ekstrem.

Selain itu, perbedaan antara hasil observasi dan radar yang ditemukan dalam penelitian ini juga mengindikasikan adanya ketidakteraturan distribusi hujan dalam skala spasial yang relatif kecil. Fenomena ini umum terjadi pada hujan konvektif di wilayah tropis, di mana intensitas hujan dapat sangat bervariasi dalam jarak yang tidak terlalu jauh. Hal ini memperkuat asumsi bahwa kejadian hujan ekstrem yang dilaporkan tidak selalu dapat direpresentasikan secara akurat hanya dengan satu titik pengamatan, sehingga diperlukan pendekatan multi-sumber data untuk memperoleh gambaran yang lebih representatif. Dari sisi mitigasi bencana, hasil penelitian ini memberikan implikasi penting bahwa sistem peringatan dini tidak hanya perlu mempertimbangkan intensitas hujan sesaat, tetapi juga akumulasi curah hujan dalam periode waktu tertentu. Akumulasi hujan yang tinggi dalam beberapa hari sebelumnya dapat meningkatkan tingkat kejenuhan tanah dan memperbesar potensi terjadinya banjir maupun tanah longsor. Oleh karena itu, pemantauan curah hujan secara berkelanjutan dengan memanfaatkan data radar dan observasi menjadi langkah strategis dalam mengurangi risiko bencana hidrometeorologi. Lebih lanjut, penelitian ini juga menunjukkan bahwa analisis berbasis waktu (temporal) memiliki peranan penting dalam mengidentifikasi fase perkembangan hujan, mulai dari tahap pembentukan, puncak intensitas, hingga tahap pelemahan. Informasi ini dapat digunakan untuk memahami karakteristik sistem awan konvektif yang berkembang, serta sebagai dasar dalam meningkatkan akurasi prediksi cuaca jangka pendek (nowcasting).

Dengan demikian, pembahasan ini menegaskan bahwa pendekatan analisis yang menggabungkan aspek temporal dan spasial, serta integrasi berbagai sumber data, sangat diperlukan dalam kajian curah hujan ekstrem. Hal ini tidak hanya meningkatkan pemahaman ilmiah terhadap fenomena yang terjadi, tetapi juga memberikan kontribusi nyata dalam mendukung sistem pemantauan cuaca dan mitigasi bencana yang lebih efektif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengidentifikasi variabilitas fenomena upwelling di perairan selatan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) dengan menggunakan indikator konsentrasi klorofil-a dari data citra satelit Aqua MODIS selama periode 2003–2023. Hasil penelitian menunjukkan bahwa upwelling memiliki pola musiman yang jelas, dengan intensitas tertinggi terjadi pada musim timur (Juni–Agustus). Kondisi ini dipengaruhi oleh angin muson tenggara yang memicu terjadinya transpor Ekman, sehingga menyebabkan naiknya massa air dingin dan kaya nutrisi dari lapisan bawah ke permukaan.

Secara spasial, distribusi konsentrasi klorofil-a menunjukkan bahwa wilayah pesisir bagian barat hingga tengah perairan selatan DIY memiliki intensitas upwelling yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh faktor lokal, seperti kondisi batimetri dan dinamika arus laut, yang turut menentukan variasi intensitas upwelling di wilayah tersebut. Sementara itu, pada musim barat, konsentrasi klorofil-a cenderung menurun yang mencerminkan dominasi fenomena downwelling. Analisis temporal jangka panjang juga menunjukkan bahwa variabilitas upwelling tidak hanya dipengaruhi oleh faktor musiman, tetapi juga oleh fenomena iklim global seperti El Niño Southern Oscillation (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD). Kondisi El Niño cenderung memperkuat aktivitas upwelling yang ditandai dengan peningkatan konsentrasi klorofil-a, sedangkan La Niña menunjukkan kecenderungan sebaliknya. Hal ini menunjukkan adanya interaksi kompleks antara dinamika atmosfer global dan proses oseanografi regional.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan gambaran yang komprehensif mengenai pola spasial dan temporal upwelling di perairan selatan DIY. Temuan ini tidak hanya memperkaya kajian ilmiah di bidang oseanografi, tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam pengelolaan sumber daya kelautan, khususnya dalam mendukung aktivitas perikanan dan pemantauan lingkungan laut. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan parameter oseanografi lainnya, seperti suhu permukaan laut dan arus laut, guna memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap dinamika upwelling di wilayah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajr, M., & Dwirani, F. (2019). *Pengantar meteorologi dasar*.
- Aldrian, E., & Susanto, R. D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2010a). *Pedoman operasional peringatan dini cuaca ekstrem*. BMKG.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2010b). *Peraturan KBMKG Nomor: Kep. 009 Tahun 2010 tentang prosedur standar operasional pelaksanaan peringatan dini, pelaporan, dan diseminasi informasi cuaca ekstrem*. BMKG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2020). *Risiko bencana Indonesia*. BNPB.
- Bakun, A. (1990). Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247(4939), 198–201.
- Bima, R. Y., Setyono, H., & Harsono, G. (2014). Dinamika upwelling dan downwelling berdasarkan variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a di perairan selatan Jawa. *Jurnal Oseanografi*, 3(1), 57–66.
- Doviak, R. J., & Zrnić, D. S. (1993). *Doppler radar and weather observations* (2nd ed.). Academic Press.
- Dwirani, F. (2019). Menentukan stasiun hujan dan curah hujan dengan metode polygon Thiessen daerah Kabupaten Lebak. *Jurnal Lingkungan dan Sumberdaya Alam (JURNALIS)*, 2(2), 139–146.
- Fabry, F. (2015). *Radar meteorology: Principles and practice*. Cambridge University Press.
- Girsang, H. (2008). *Studi penentuan daerah penangkapan ikan tongkol melalui pemetaan penyebaran klorofil-a dan hasil tangkapan di Palabuhanratu, Jawa Barat* [Skripsi]. Institut Pertanian Bogor.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Kudela, R. G., Pitcher, G. C., Byn, F., Figueras, T., Moita, T., & Trainer, V. (2005). Harmful algal blooms in coastal upwelling systems. *Journal of Oceanography*, 18(2), 185–196.
- Mann, K. H., & Lazier, J. R. N. (2006). *Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans*. Wiley-Blackwell.
- Muhammad, R., & Nasucha, Y. (2015). *Dasar-dasar penelitian*. Pustaka Brilliant.

- Munthe, M. G., Jaya, Y. V., & Putra, R. D. (2018). Pemetaan zona potensial penangkapan ikan berdasarkan citra satelit Aqua/Terra MODIS di perairan selatan Pulau Jawa. *Dinamika Maritim*, 7(1), 39–42.
- Ningsih, N. S., Rakhmaputeri, N., & Harto, A. B. (2013). Upwelling variability along the southern coast of Bali and in Nusa Tenggara waters. *Ocean Science Journal*, 48(1), 49–57.
- Octaviani, R., & Sutriani, E. (2019). Analisis data dan pengecekan keabsahan data.
- Purba, M. (2007). Dinamika perairan selatan Pulau Jawa–Pulau Sumbawa saat muson tenggara. *Torani*, 17(2), 140–150.
- Sekaranom, A. B. (2021a). Analisis data curah hujan observasi di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 22(2), 85–96.
- Sekaranom, A. B. (2021b). *Kejadian hujan ekstrem wilayah tropis: Kombinasi observasi permukaan dan satelit meteorologis serta karakteristik lingkungan pembentukannya*. UGM Press.
- Setiawan Putra, D., & Fauziah, A. (2018). Perancangan aplikasi presensi dosen realtime dengan metode rapid application development (RAD) menggunakan fingerprint berbasis web. *Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT*, 3(2), 167–171. <https://doi.org/10.30591/jpit.v3i2.836>
- Susanto, R. D., Gordon, A. L., & Zheng, Q. (2001). Upwelling along the coast of Java and Sumatra and its relation to ENSO. *Geophysical Research Letters*, 28(8), 1599–1602.
- Yuhendrasmiko, R., Kunarso, & Wirasatriya, A. (2016). Identifikasi variabilitas upwelling berdasarkan indikator suhu dan klorofil-a di Selat Lombok. *Jurnal Oseanografi*, 5(4), 530–537.