

Analisis Parameter Laut-Atmosfer terhadap Anomali Tinggi Muka Air di Laut Jawa

Iwan Pramesti Anwar^{1*}, Agus Setiawan², Sandy H. S. Herho³, Aulia T. Atmojo⁴ dan Faruq Khadami¹

¹Kelompok Keahlian/Keilmuan Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

²Pusat Riset Laut Dalam, Organisasi Riset Kebumihan dan Maritim, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Jl. Pasir Putih I, Ancol Timur, Jakarta 14430, Indonesia

³Department of Earth and Planetary Sciences, University of California

900 University Ave, Riverside, California 92521, United States

⁴Kelompok Keahlian/Keilmuan Geodesi Hidrografi dan Survei Pemetaan, Program Studi Teknik Geomatika, Fakultas Teknologi dan Infrastruktur Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera

Jl. Terusan Ryacudu Way Hui, Lampung Selatan 35365, Indonesia

Email: *iwanpanwar@itb.ac.id

Abstrak

Kenaikan permukaan air laut merupakan ancaman serius di kawasan pesisir, khususnya di kota-kota pelabuhan seperti Jakarta, Semarang, dan Surabaya yang terletak di Laut Jawa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis interaksi antara anomali tinggi muka air laut dari data satelit Altimetri AVISO, suhu permukaan laut, dan faktor oseanografi serta atmosfer lainnya. Peningkatan suhu permukaan laut akibat variasi iklim berkontribusi pada ekspansi termal air laut, yang pada gilirannya meningkatkan rata-rata tinggi muka air laut. Dinamika perairan yang menyebabkan anomali tinggi muka air laut secara spasial, dipengaruhi oleh pola musim dan fenomena seperti ekman transport, teramati berperan penting dalam redistribusi suhu permukaan air laut. Puncak anomali tinggi muka air laut terjadi pada bulan Mei, dengan tinggi anomali mencapai +0,2 m, yang bersamaan dengan suhu air laut sebesar 32°C dan transport ekman ke arah selatan. Sehingga, secara spasial anomali tinggi muka air lebih tinggi di pantai utara Pulau Jawa. Hasil analisis menunjukkan bahwa anomali tinggi muka air laut berkorelasi positif dengan suhu permukaan laut. Melalui analisis *Principal Component Analysis* (PCA), ditemukan bahwa dua komponen utama (F1 dan F2) menyumbang total 78,47% dari variabilitas data, dengan F1 menjelaskan 58,86% dan F2 menjelaskan 19,61%. Hubungan antara suhu permukaan laut dan anomali tinggi muka air laut tercermin pada vektor yang lebih panjang, menunjukkan pengaruh signifikan kedua variabel ini terhadap dinamika laut. Temuan penelitian ini memberikan wawasan penting untuk pengelolaan sumber daya kelautan dan strategi penanggulangan dampak variasi iklim yang lebih efektif di wilayah pesisir.

Kata kunci: Anomali muka air laut, Altimetri AVISO, Laut Jawa, Principal Component Analyse (PCA)

Abstract

Understanding the effects of Ocean-Atmosphere factors on Sea Level Anomalies in Java Sea

Sea level rise is a serious threat in coastal areas, particularly in port cities such as Jakarta, Semarang, and Surabaya located in the Java Sea. This study aims to analyze the interaction between sea level anomaly from altimetry satellite data by AVISO, sea surface temperature, and other oceanographic and atmospheric factors. Increases in sea surface temperature due to climate variability contribute to the thermal expansion of seawater, which in turn raises the average sea level. The dynamics of the waters that cause spatial sea level anomalies are influenced by seasonal patterns and phenomena such as Ekman transport, which play a crucial role in the redistribution of sea surface temperature. The peak sea level anomaly occurs in May, with an anomaly height of +0.2 m, coinciding with a sea surface temperature of 32°C and Ekman transport directed southward. Spatially, the sea level anomalies are higher along the northern coast of Java Island. The analysis shows that sea level anomalies have a positive correlation with sea surface temperature. Through *Principal Component Analysis* (PCA), it was found that the two main components (F1 and F2) account for a total of 78.47% of the data variability, with F1 explaining 58.86% and F2 explaining 19.61%. The relationship between sea surface temperature and sea level anomaly is reflected in the longer vectors, indicating the significant influence of these two variables on ocean dynamics. The findings of this study provide important insights for the management of marine resources and strategies to mitigate the impacts of climate variability more effectively in coastal areas.

Keywords: Sea Level Anomaly, Altimetry AVISO, Java Sea, Principal Component Analyse (PCA)

PENDAHULUAN

Ancaman kenaikan permukaan laut (*sea level rise*) menjadi perhatian utama di kawasan pesisir, terutama di negara-negara dengan kota pesisir yang padat penduduk, seperti Jakarta (Karlina & Johan, 2020; Surya *et al.*, 2019), Semarang (Cahyadi *et al.*, 2016), dan Surabaya (Fitriana *et al.*, 2022) di Laut Jawa. Perubahan iklim yang menyebabkan pemanasan global berkontribusi terhadap peningkatan suhu permukaan laut (Iskandar *et al.*, 2020), yang pada gilirannya memicu ekspansi termal air laut dan meningkatkan rata-rata tinggi muka air laut (Shalsabilla *et al.*, 2022). Dinamika perairan, yang dipengaruhi oleh pola musim dan fenomena seperti ekman transport, berperan dalam redistribusi suhu dan salinitas di lautan (Kok *et al.*, 2017). Perubahan ini tidak hanya berdampak pada ekosistem laut, tetapi juga memperburuk masalah banjir urban, terutama banjir rob, yang sering terjadi di kawasan pesisir (Shalsabilla *et al.*, 2020).

Fenomena banjir rob di kota-kota pelabuhan tersebut dipicu oleh pasang surut yang periodik, namun juga diperparah oleh anomali tinggi muka air laut (Shalsabilla *et al.*, 2022). Anomali tinggi muka air bervariasi terhadap waktu, sehingga risiko banjir menjadi lebih besar apabila bertepatan dengan kondisi puncak anomali tinggi muka air, terutama dengan adanya pengaruh dari curah hujan yang tinggi (Karlina & Johan, 2020). Oleh karena itu, pemahaman interaksi antara faktor-faktor tersebut dalam memprediksi dan mengelola risiko yang ditimbulkan sangat penting.

Anomali tinggi muka air Laut Jawa secara umum dipengaruhi oleh fenomena musim seperti monsun (Khasanah *et al.*, 2019), antar musim seperti *El Nino Southern Oscillation*, dan *Indian Ocean Dipole* (Fadlan *et al.*, 2017), dan intra musim seperti gelombang internal, yang salah satunya berasal dari Samudra Hindia merambat melalui Selat Sunda (Li *et al.*, 2018). Sementara itu, anomali tinggi muka air rata-rata bulanan sangat dipengaruhi oleh musim, diketahui bahwa anomali tinggi muka air bulanan tertinggi (terendah) rata-rata terjadi pada bulan Mei (September) (Khasanah *et al.*, 2019), kemudian fenomena lainnya berperan memperkuat dan memperlemah tinggi anomali muka air tersebut. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara anomali tinggi muka air laut dengan parameter oseanografi dan atmosfer di Laut Jawa rata-rata bulana selama tahun 1999 – 2019. Peran dinamika perairan, seperti ekman transport dan analisis PCA digunakan untuk menjelaskan hubungan antara variasi tinggi muka air laut dan parameter oseanografi serta atmosfer (Imani *et al.*, 2017).

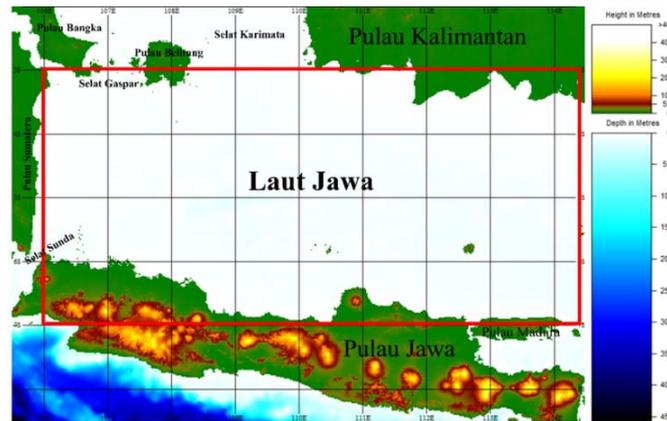
MATERI DAN METODE

Data dan Wilayah Kajian

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi beberapa parameter iklim laut yang diperoleh dari berbagai sumber. Diantaranya adalah anomali tinggi muka air laut, suhu, salinitas, dan arus permukaan laut, kecepatan angin, dan tekanan permukaan laut, serta curah hujan bulanan. Secara ringkas informasi data yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data yang digunakan pada penelitian ini

Parameter	Periode Data	Resolusi Spasial	Sumber
Anomali Tinggi Muka Air Laut	Januari 1993 - Desember 2023	1/4° (≈ 27 km)	AVISO (https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level/data-access.html) Copernicus Marine
Suhu, Salinitas, Arus Kecepatan Angin	Januari 1993 - Juni 2021	1/12° (≈ 9 km)	(https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/services) Copernicus Marine
Permukaan Laut Tekanan	Agustus 1999 - Desember 2023	1/4° derajat (≈ 27 km)	Copernicus Marine (https://data.marine.copernicus.eu/product/WIND_GLO_PHY_L4_NRT_012_004/description) IRIDL
Permukaan Air Laut	Januari 1993 - Desember 2023	1° (≈ 111 km)	(https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Atm_Circulation/Sea_Level_Pres.html) NOAA NCEP CPC
Curah Hujan Bulanan	Januari 1993 - Desember 2019	1/2° (≈ 55 km)	(https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.CPC/.PRECL/.v1p0/.deg0p5/.rain/index.html?Set-Language=en)



Gambar 1. Peta Laut Jawa dan sekitarnya (sumber: GEBCO, 2023)

Meskipun rentang waktu ketersediaan data untuk seluruh parameter tidak sama, namun analisis dalam penelitian ini menggunakan rentang yang sama, yaitu pada Agustus 1999 – Desember 2019. Sementara itu, area yang menjadi fokus penelitian adalah Laut Jawa, yang ditunjukkan oleh batas garis merah (Gambar 1).

Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan adalah 1) rata-rata klimatologi bulanan untuk seluruh parameter, itu dilakukan dengan mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Atmojo *et al.* (2021), Anwar *et al.* (2017), dan Wirasatriya *et al.* (2017).

$$\bar{x}_b(x,y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i,b}(x,y)$$

Dengan, \bar{x}_b adalah rata-rata klimatologi satu parameter pada bulan tertentu (Januari hingga Desember) dan pada posisi tertentu (longitude dan latitude), i adalah urutan data satu parameter (Januari tahun ke-1 hingga Januari tahun ke- n , begitu juga dengan bulan lainnya hingga Desember), n adalah jumlah total panjang data pada periode tertentu, $x_{i,b}(x,y)$ adalah data satu parameter pada waktu dan posisi tertentu.

Selanjutnya, 2) dilakukan pemetaan spasial dan plot temporal untuk rata-rata spasial menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan modul M_Map (Pawlowicz, 2020). 3) Analisis kesesuaian dilaksanakan dengan menggunakan PCA terhadap rata-rata spasial selama periode Agustus 1999 hingga Desember 2019, menggunakan software XLSTAT. Terakhir, perhitungan Transport Ekman dilakukan dengan mengikuti penelitian terdahulu oleh Putri *et al.* (2023), Wirasatriya *et al.* (2020), dan Kara *et al.* (2007).

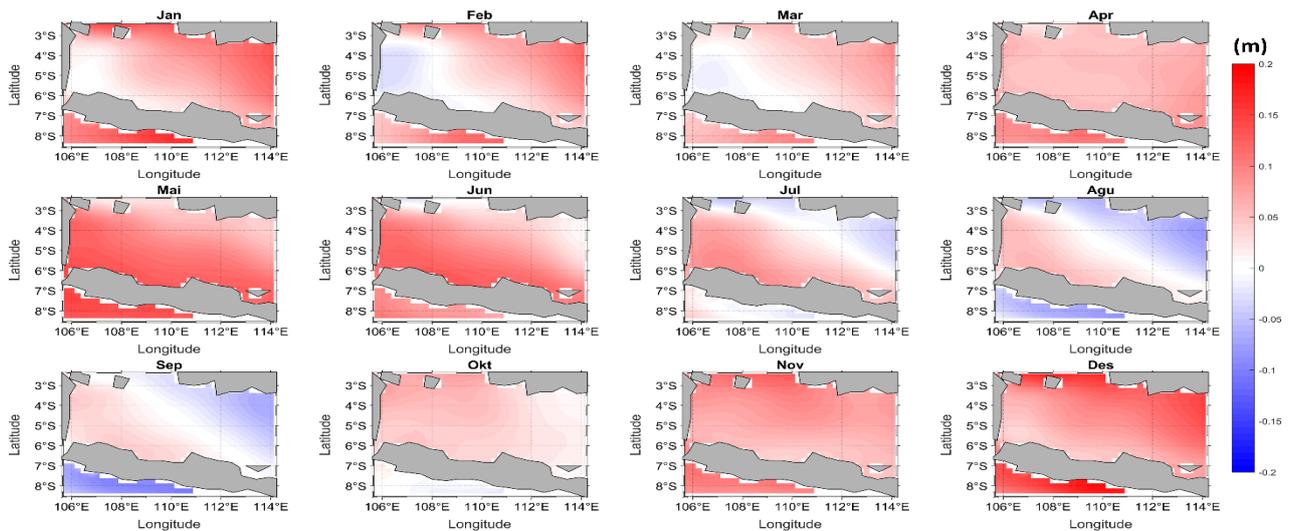
$$Transpor\ Ekman = -\frac{\tau}{\rho_w f}$$

Dengan, ρ_w adalah densitas air laut dengan nilai konstan sebesar 1025 kg/m³, f adalah parameter coriolis yang dihitung dengan $2\Omega \sin \Phi$, Ω adalah kecepatan sudut rotasi bumi (sekitar $7,2921159 \times 10^{-5}$ rad./detik), Φ adalah latitude (°), τ adalah vektor *wind stress* yang dihitung dengan $\rho_a C_d U_{10}^2$, ρ_a adalah densitas udara 1,25 kg/m³, C_d adalah *drag* koefisien dengan nilai konstan $1,25 \times 10^{-3}$ (Kara *et al.*, 2007), U_{10} adalah kecepatan angin pada ketinggian 10 m diatas permukaan laut. Perhitungan Transpor Ekman dilakukan dengan menerapkan Persamaan 1 pada program MATLAB.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebaran Spasial Anomali Tinggi, Suhu, dan Ekman Tranpor Permukaan Laut

Gambar 2 menunjukkan anomali tinggi muka air laut di Laut Jawa berdasarkan rata-rata klimatologi bulanan. Gambar tersebut menggambarkan pola yang kompleks dan berfluktuasi sepanjang tahun. Pola spasial dan temporal anomali tinggi muka air laut dari bulan Januari hingga Desember mengindikasikan adanya anomali positif di awal tahun. Nilai positif, yang berarti tinggi muka air laut lebih tinggi dari rata-rata sepanjang tahun, terlihat di wilayah utara Laut Jawa (pantai selatan Pulau Kalimantan) dan lebih rendah di wilayah selatan, terutama bagian barat (pantai utara Pulau Jawa dan timur Pulau Sumatera) selama bulan Januari hingga Maret. Selain itu, secara keseluruhan tinggi anomali muka air cenderung lebih tinggi/rendah di dekat pantai. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Lumbah-Gaol *et al.*, 2015).



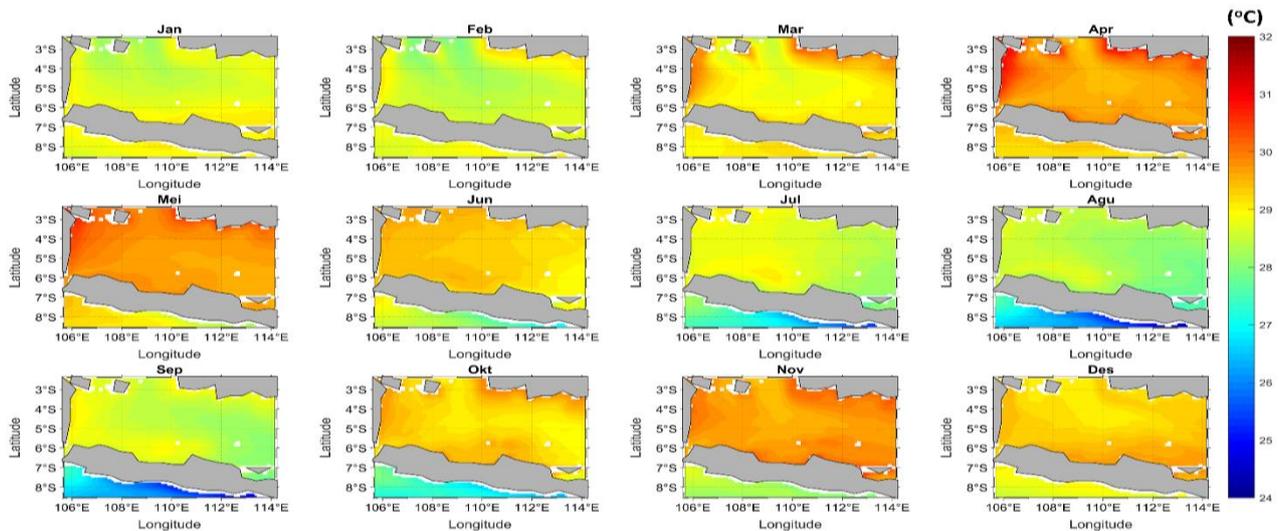
Gambar 2. Peta sebaran anomali tinggi muka air laut rata-rata klimatologi bulanan

Selanjutnya, pada bulan April, anomali tinggi muka air laut cenderung seragam di seluruh Laut Jawa. Setelah itu, pola spasial berbalik, dengan nilai positif yang teramati di pantai utara Pulau Jawa hingga pantai timur Pulau Sumatera, dengan puncak ketinggian anomali yang hampir mencakup seluruh Laut Jawa mencapai 0,2 m pada bulan Mei (Khasanah *et al.*, 2019). Pola tinggi muka air yang rendah teramati di pantai selatan Pulau Kalimantan sejak bulan Juni hingga mencapai puncaknya pada September (Khasanah *et al.*, 2019), dengan nilai anomali mencapai -0,5 m. Sementara itu, pola spasial pada bulan Oktober hingga Desember menunjukkan anomali tinggi muka air laut yang cenderung lebih tinggi di pantai utara Pulau Jawa, terutama di bagian barat. Pada saat yang sama, anomali tinggi muka air laut di pantai selatan Pulau Kalimantan memiliki nilai anomali negatif hingga nol, yang berarti tinggi relatifnya lebih rendah dibandingkan dengan pantai utara Pulau Jawa. Fenomena ini mencerminkan kondisi dinamika laut yang berkaitan dengan parameter lain, salah satunya adalah suhu air laut (Kismawardhani *et al.*, 2018), yang kemungkinan dipengaruhi oleh faktor penyinaran matahari.

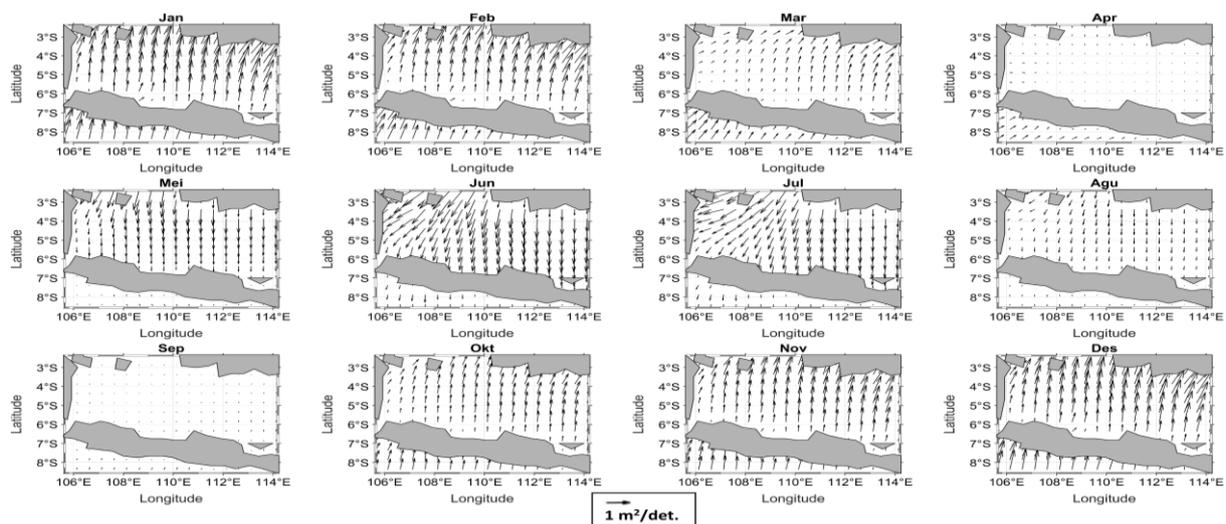
Gambar 3 menggambarkan peta sebaran suhu permukaan laut rata-rata klimatologi bulanan di Laut Jawa. Peta ini menunjukkan variasi suhu spasial sepanjang tahun, dengan pola yang dipengaruhi oleh musim. Pada bulan Januari, suhu permukaan laut cenderung lebih rendah, berkisar antara 24°C hingga 28°C, terutama di bagian utara sisi barat Laut Jawa (Selat Karimata dan Gaspar). Namun, seiring berjalannya waktu, suhu meningkat secara bertahap, dengan bulan April menunjukkan puncak suhu yang mencapai 32°C di sebagian besar wilayah Laut Jawa. Pola spasial bulanan tersebut juga berhubungan dengan anomali muka air laut, sebagaimana dijelaskan pula oleh (Kismawardhani *et al.*, 2018). Bahwa kenaikan muka air laut berkaitan erat dengan peningkatan suhu permukaan laut.

Memasuki bulan Mei hingga Juli, suhu permukaan laut menunjukkan nilai spasial yang cukup tinggi, terutama di pantai utara Pulau Jawa dan pantai timur Pulau Sumatera, dengan suhu mencapai 31,5°C. Setelah bulan Juli, terjadi sedikit penurunan suhu, terutama pada bulan Agustus hingga September, yang menyebar dari timur ke arah barat Laut Jawa. Meskipun demikian, nilai suhu tetap berada pada kisaran 28°C hingga 30°C di sebagian besar area Laut Jawa. Menjelang akhir tahun, mulai Oktober hingga Desember, suhu permukaan laut mengalami penurunan lebih lanjut, kembali ke kisaran 24°C hingga 28°C, terutama di bagian selatan Laut Jawa. Temuan ini menunjukkan bahwa suhu permukaan laut di Laut Jawa sangat dipengaruhi oleh kondisi musiman dan faktor gerak semu matahari, yang kemungkinan memiliki implikasi terhadap dinamika tinggi muka air laut di Laut Jawa.

Gambar 4 menunjukkan pola spasial ekman transpor rata-rata klimatologi bulanan di Laut Jawa. Peta ini menggambarkan arah dan intensitas aliran air laut yang dipengaruhi oleh angin, di mana pola transpor menunjukkan variasi spasial sepanjang tahun. Pada bulan Januari, aliran ekman cenderung mengarah ke utara, dengan intensitas yang lebih tinggi di daerah utara Laut Jawa (pantai selatan Pulau Kalimantan). Seiring berjalannya waktu, pola ini berlanjut hingga bulan April, di mana juga teramati penguatan aliran ke utara, terutama di wilayah barat Laut Jawa.



Gambar 3. Peta sebaran suhu permukaan air laut rata-rata klimatologi bulanan



Gambar 4. Peta sebaran ekman tranpor rata-rata klimatologi bulanan

Memasuki bulan Mei hingga Juli, arah aliran ekman mulai berubah dengan penurunan intensitas, dan pada bulan Juli, aliran cenderung menjadi lebih kompleks dengan pola berlawanan yang muncul. Dari bulan Agustus hingga September, pola tranpor kembali relatif teratur dengan aliran yang lebih dominan ke selatan, diikuti oleh penurunan intensitas yang signifikan pada bulan Oktober. Pada akhir tahun, khususnya bulan November dan Desember, arah aliran kembali mengarah ke utara Laut Jawa (pantai selatan Pulau Kalimantan), meskipun dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan dengan awal tahun. Temuan ini menunjukkan bahwa pola ekman tranpor di Laut Jawa sangat dipengaruhi oleh variasi musiman serta dinamika atmosfer, yang dapat berdampak pada anomali tinggi muka air laut di Laut Jawa. Hal itu juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Higuchi *et al.* (2020), yang menyatakan bahwa variasi bulanan anomali tinggi muka air laut di Teluk Thailand dipengaruhi oleh tranpor ekman.

Pembahasan pola spasial rata-rata klimatologi tinggi muka air laut, suhu permukaan air laut, dan ekman tranpor di Laut Jawa

Pada periode Mei hingga Juli, anomali tinggi muka air laut di Laut Jawa menunjukkan pola positif yang signifikan, dengan nilai berkisar antara +0,2 m hingga +0,5 m. Ini sering kali berkaitan dengan peningkatan suhu permukaan laut yang mencapai antara 30°C hingga 32°C (Khasanah *et al.*, 2019; Kismawardhani *et al.*, 2018). Dalam bulan-bulan tersebut (Mei – Juli), ekman transport cenderung mengarah ke selatan, yang

berkontribusi pada akumulasi air di bagian selatan Laut Jawa (pantai utara Pulau Jawa). Kemungkinan, kenaikan suhu permukaan laut meningkatkan penguapan, menghasilkan air laut yang lebih hangat dan mengakibatkan ekspansi termal yang berkontribusi pada tinggi muka air yang lebih tinggi (Kismawardhani *et al.*, 2018). Interaksi ini menggambarkan bagaimana faktor suhu dan transportasi ekman bekerja bersama untuk memengaruhi kondisi tinggi muka air di Laut Jawa.

Pada awal tahun, mulai Januari hingga April, anomali tinggi muka air laut umumnya rendah atau mendekati nol, berkisar antara 0 m hingga +0,1 m. Suhu permukaan laut pada periode ini juga relatif lebih rendah, berkisar antara 24°C hingga 28°C. Ekman transport pada fase ini seringkali mengarah ke utara tetapi dengan intensitas yang lebih rendah. Meskipun suhu permukaan yang lebih rendah dapat mengurangi tinggi muka air, pengaruh faktor-faktor lainnya, seperti tekanan atmosfer dan sirkulasi angin, menjadi lebih dominan. Ini menunjukkan bahwa selama periode awal tahun, hubungan antara suhu dan tinggi muka air tidak sekuat periode puncak yang terjadi pada pertengahan tahun.

Memasuki bulan Agustus hingga September, anomali tinggi muka air laut cenderung negatif, dengan nilai berkisar antara -0,2 m hingga -0,5 m. Suhu permukaan laut pada fase ini tetap relatif tinggi, antara 28°C hingga 30°C (Khasanah *et al.*, 2019; Kismawardhani *et al.*, 2018). Namun, meskipun suhu mendukung potensi peningkatan muka air, anomali negatif menunjukkan bahwa faktor lain, terutama dominasi angin dan tekanan atmosfer, lebih berpengaruh. Pada bulan-bulan ini, ekman transport kembali mengarah ke selatan (pantai utara Pulau Jawa), tetapi penurunan intensitasnya berkontribusi terhadap penurunan tinggi muka air di bagian selatan (pantai utara Pulau Jawa).

Akhir tahun, khususnya bulan Oktober hingga Desember, menunjukkan tren penurunan anomali tinggi muka air laut, yang bisa mendekati nol atau sedikit negatif, berkisar antara -0,2 m hingga 0 m. Suhu permukaan laut mengalami penurunan, berkisar antara 24°C hingga 28°C. Selama periode ini, arah ekman transport dapat bervariasi, tetapi sering kali mengarah ke utara (Pantai selatan Pulau Kalimantan). Penurunan suhu permukaan yang bersamaan dengan rendahnya anomali tinggi muka air mencerminkan hubungan saling menguatkan antara suhu dan ekman transport, dengan suhu yang lebih rendah secara langsung berkontribusi pada rendahnya tinggi muka air laut.

Secara keseluruhan, hubungan antara anomali tinggi muka air laut, suhu permukaan laut, dan ekman transport di Laut Jawa, secara rata-rata klimatologi bulanan bervariasi berdasarkan ruang dan waktu. Pada periode puncak suhu, ketiga faktor cenderung berkorelasi positif. Namun, pada bulan-bulan lain, variabel tambahan seperti tekanan atmosfer dan pola angin dapat mempengaruhi kondisi laut.

Rata-rata bulanan anomali tinggi, tekanan permukaan, suhu, salinitas permukaan air laut, angin zonal, angin meridional, dan curah hujan di Laut Jawa

Gambar 5 menunjukkan plot rata-rata spasial dari seluruh parameter yang dikaji di Laut Jawa. Pertama, anomali tinggi muka air laut menunjukkan variasi sepanjang tahun, dengan puncak terjadi pada bulan Mei hingga Juli, di mana nilai anomali rata-rata se-Laut Jawa mencapai +0,15 m (Khasanah *et al.*, 2019). Peningkatan ini biasanya berhubungan dengan kenaikan suhu permukaan laut yang terjadi pada periode tersebut. Ketika suhu air laut meningkat, efek ekspansi termal mendorong tinggi muka air laut naik, menciptakan kondisi di mana anomali positif lebih sering terlihat. Setelah puncak bulan Juli, terjadi penurunan anomali tinggi muka air laut, dengan nilai mendekati nol atau sedikit negatif pada bulan-bulan akhir tahun. Penurunan ini mencerminkan perubahan kondisi Laut Jawa yang mungkin disebabkan oleh penurunan suhu serta variasi pola angin dan curah hujan. Seluruh pola tersebut menunjukkan bagaimana variabel-variabel saling terkait dan mempengaruhi kondisi anomali tinggi muka air laut di Laut Jawa.

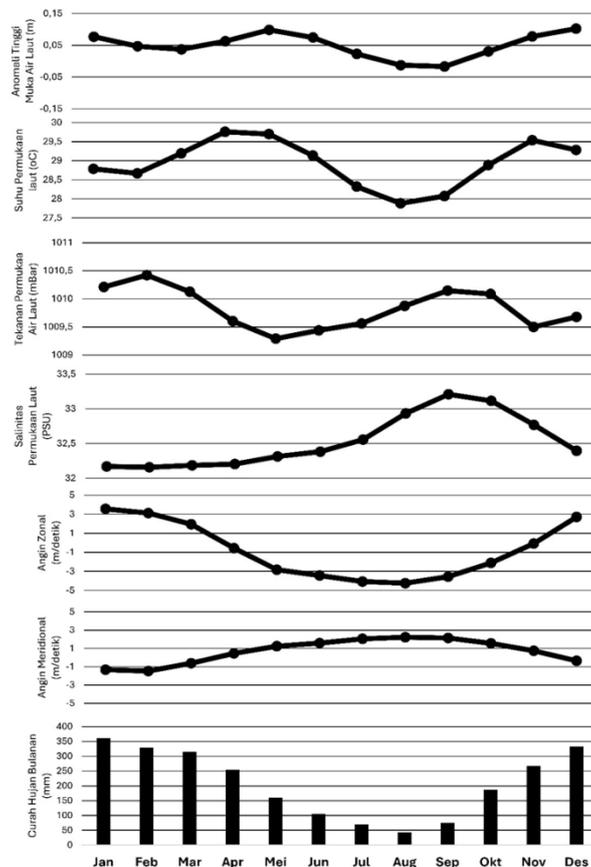
Suhu permukaan laut di Laut Jawa menunjukkan pola yang konsisten dengan anomali tinggi muka air laut, dengan nilai rata-rata spasial tertinggi mencapai sekitar 30,5°C pada bulan Mei hingga Agustus (Kismawardhani *et al.*, 2018). Pada periode ini, peningkatan suhu berkontribusi terhadap anomali tinggi muka air laut yang positif, menciptakan nilai sekitar +0,15 m. Suhu yang tinggi selama bulan-bulan tersebut juga bisa memicu peningkatan penguapan, yang berpengaruh pada salinitas dan tekanan permukaan laut. Namun, menjelang akhir tahun, khususnya pada bulan November dan Desember, suhu permukaan laut mengalami penurunan, berkisar antara 27°C hingga 29°C. Penurunan ini dapat berkontribusi pada rendahnya anomali tinggi muka air laut, yang mungkin mendekati nol atau sedikit negatif.

Sementara itu, Gambar 5 menunjukkan tekanan permukaan laut, yang menunjukkan pola sebaliknya dengan anomali tinggi muka air laut. Nilai tekanan tertinggi tercatat pada bulan Juli, mencapai sekitar 1012

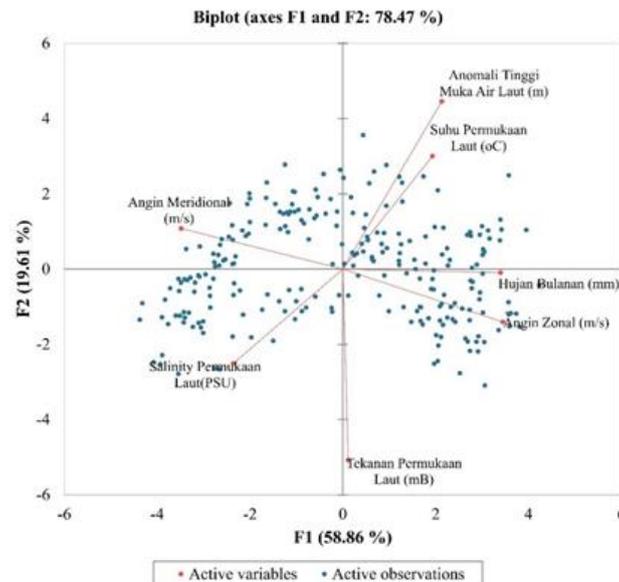
hPa, sebelum mengalami penurunan signifikan menjelang akhir tahun. Fluktuasi ini mencerminkan perubahan sirkulasi atmosfer yang berpengaruh pada dinamika laut. Ketika tekanan tinggi muncul, biasanya terkait dengan kondisi cuaca yang stabil, yang dapat memengaruhi pola angin dan transport massa air. Penurunan tekanan permukaan laut yang terjadi setelah bulan Juli menunjukkan pergeseran sistem atmosfer. Nilai tekan yang lebih rendah sering kali berhubungan dengan hujan yang lebih intens dan peningkatan aktivitas badai, yang dapat mengakibatkan variasi dalam transportasi panas dan material di laut, serta berkontribusi pada penurunan anomali tinggi muka air laut.

Kemudian, parameter yang keempat adalah salinitas permukaan laut, yang menunjukkan variasi bulanan berkisar antara 32 hingga 34 PSU. Kenaikan salinitas biasanya terjadi saat penguapan meningkat, yang sering kali berhubungan dengan suhu permukaan laut yang tinggi. Selama musim kering atau musim panas, peningkatan penguapan menyebabkan konsentrasi garam yang lebih tinggi, sehingga massa air menjadi lebih berat. Penambahan salinitas yang lebih tinggi ini dapat menyebabkan anomali tinggi muka air laut menjadi bernilai negatif, terutama selama bulan-bulan kering ketika nilai salinitas mencapai puncak.

Sebaliknya, saat curah hujan meningkat, terutama pada bulan Desember, salinitas permukaan laut dapat mengalami penurunan drastis akibat pengenalan air tawar ke dalam sistem. Gambar 5 menunjukkan bahwa curah hujan bulanan mencapai lebih dari 400 mm, yang langsung berdampak pada salinitas dan suhu permukaan laut. Curah hujan yang tinggi dapat menyebabkan pengurangan salinitas, yang pada gilirannya mempengaruhi distribusi anomali tinggi muka air laut, menyebabkan nilai anomali menjadi negatif pada bulan Desember. Angin zonal dan meridional di Laut Jawa menunjukkan arah dan kekuatan yang berfluktuasi sepanjang tahun. Angin zonal cenderung lebih kuat dari bulan Mei hingga September, dengan nilai mendekati -1 m/detik (tanda negatif menunjukkan bergerak dari timur). Pergerakan angin ini berkontribusi pada pola ekman transport yang signifikan, yang mendorong pergerakan air dan mempengaruhi suhu serta salinitas di wilayah tersebut. Dalam kasus ini, pola dan intensitas angin dapat membantu mendukung anomali tinggi muka air laut yang positif pada saat suhu permukaan laut tinggi.



Gambar 5. Plot klimatologi bulanan rata-rata spasial anomali tinggi, tekanan permukaan, suhu, salinitas permukaan air laut, angin zonal, angin meridional, dan curah hujan di Laut Jawa (Gambar 1)



Gambar 6. Plot PCA rata-rata spasial bulanan anomali tinggi, suhu, salinitas, muka air laut, angin zonal, angin meridional, dan curah hujan di Laut Jawa (Gambar 1.) pada periode Agustus 1999 – Desember 2019

Sementara itu, angin meridional juga menunjukkan fluktuasi yang serupa, dan pola anginnya dapat berdampak pada pergerakan massa udara serta kondisi cuaca. Dalam periode dengan angin yang lebih kuat, dapat terjadi redistribusi panas di lautan yang memberikan pengaruh besar terhadap dinamika Laut Jawa. Interaksi antara pola angin dan anomali tinggi muka air laut menunjukkan bahwa selama periode tertentu, perubahan arah dan kekuatan angin dapat membantu memperkuat atau mengurangi anomali tinggi muka air laut, bergantung pada kondisinya.

Analisis kesesuaian dengan PCA untuk parameter anomali tinggi, tekanan permukaan, suhu, salinitas permukaan air laut, angin zonal, angin meridional, dan curah hujan di Laut Jawa

Gambar 6 menunjukkan biplot hasil PCA dari parameter klimatologi bulanan di Laut Jawa, yang meliputi anomali tinggi muka air laut, suhu permukaan laut, salinitas, curah hujan, serta kecepatan angin zonal dan meridional, selama periode dari Agustus 1999 hingga Desember 2019. Dalam analisis PCA, nilai cosine² yang digunakan adalah 0,5, yang menunjukkan bahwa setidaknya 50% dari variabilitas total dalam masing-masing parameter dapat dijelaskan oleh dua komponen utama (F1 dan F2) yang diangkat. Biplot ini menggambarkan hubungan antar variabel dalam dua komponen utama, yang bersama-sama menjelaskan 78,47% dari total varians dalam dataset. Sumbu F1, yang menjelaskan 58,86% dari varians, menunjukkan hubungan positif yang kuat antara anomali tinggi muka air laut, suhu permukaan laut, dan curah hujan bulanan. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan salah satu parameter ini sering kali disertai dengan peningkatan pada parameter lainnya, menciptakan pola interaksi yang penting dalam konteks dinamika lingkungan laut.

Salinitas permukaan laut memiliki hubungan yang berkebalikan dengan anomali tinggi muka air laut. Secara fisis, hal tersebut menunjukkan bahwa anomali tinggi muka air laut relatif lebih rendah (tinggi) apabila massa air yang lebih berat (ringan) terdapat di Laut Jawa. Itu berhubungan dengan transpor massa air yang melewati Laut Jawa, yang dari sisi barat laut melalui Selat Karimata dan Gaspar (Anwar *et al.*, 2018; Anwar *et al.*, 2017). Analisis PCA juga menunjukkan bahwa angin zonal dan angin meridional menunjukkan arah yang berseberangan, mencerminkan arah gerak angin yang bergerak dari barat laut menuju tenggara. Hujan bulanan tercatat memiliki korelasi positif dengan suhu permukaan laut dan anomali tinggi muka air laut, yang menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan sering kali berkaitan dengan kondisi suhu yang lebih tinggi di Laut Jawa.

Vektor yang lebih panjang pada variabel seperti suhu permukaan laut dan anomali tinggi muka air laut menyatakan pentingnya kedua parameter ini dalam mempengaruhi variabilitas di Laut Jawa. Keberadaan vektor yang panjang menandakan bahwa perubahan kecil pada parameter tersebut dapat memberikan dampak

yang signifikan terhadap kondisi keseluruhan di Laut Jawa. Dengan demikian, biplot PCA ini memberikan penjelasan mengenai interaksi antar parameter laut-atmosfer di wilayah Laut Jawa.

KESIMPULAN

Analisis yang dilakukan terhadap parameter anomali tinggi muka air laut dan parameter lainnya di Laut Jawa menunjukkan bahwa anomali tinggi muka air laut mengalami variasi yang fluktuatif sepanjang tahun, dengan puncaknya terjadi antara bulan Mei hingga Juli, dengan nilai anomali tinggi muka air mencapai +0,2 m. Peningkatan anomali tinggi muka air laut berkorelasi positif dengan kenaikan suhu permukaan laut yang mencapai nilai tertinggi sekitar 32°C, dengan nilai terendah di kisaran 27°C. Hubungan yang erat antara kedua parameter ini menegaskan bahwa suhu dan penguapan memainkan peran penting dalam fluktuasi tinggi muka air di laut secara spasial. Selain itu, ekman transpor juga memegang peranan penting dalam menciptakan pola spasial dari anomali tinggi muka air laut. Selain itu, tekanan permukaan laut menunjukkan pola yang berlawanan, dengan nilai tertinggi sekitar 1012 hPa pada bulan Juli. Peningkatan curah hujan yang terjadi terutama pada bulan Desember, yang dapat mencapai lebih dari 400 mm, berkontribusi pada penurunan salinitas permukaan laut, yang berkisar antara 32 hingga 34 PSU. Penurunan salinitas ini, pada gilirannya, memengaruhi anomali tinggi muka air laut. Melalui penerapan *PCA*, ditemukan bahwa hampir seluruh parameter laut-atmosfer signifikan (nilai signifikansi 95%) dalam menggambarkan kondisi klimatologi di Laut Jawa. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai variansi antara komponen utama dan ke dua sebesar 78,48%. Sehingga anomali tinggi muka air laut, suhu permukaan, dan curah hujan saling terkait, terutama pada komponen utama yang menjelaskan sebagian besar variabilitas dalam data. Kemudian, vektor yang lebih panjang pada parameter suhu dan anomali tinggi menunjukkan bahwa perubahan pada variabel-variabel ini dapat memiliki dampak signifikan terhadap karakteristik laut-atmosfer di Laut Jawa.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmojo, A. T., Anwar, I. P., Adill, I. & Rohman, A. 2021. Seasonal and Interannual Variability of Satellite Derived Chlorophyll-a (2003-2019) in Lampung waters and surrounding area. *The 3rd International Conference on Maritime Sciences and Advanced Technology*, Pangandaran. 5-6 August 2021.
- Anwar, I. P., Putri, M. R. & Setiawan, A., 2017. Variation of Volume Transport and Variability of Current in Karimata and Gaspar Straits during 2010-2014 based on Numerical Modeling. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 9(2): 771-780. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v9i2.19309>.
- Anwar, I. P., Putri, M. R. & Setiawan, A., 2018. Ocean numerical model experiment on estimating the variation of volume and heat transport in Karimata Strait. *1st International Conference on Maritime Sciences and Advanced Technology "Ocean Science and Technology Toward a Global Maritime Axis"*, Denpasar, Bali. 3-5 August 2017.
- Cahyadi, M. N., Jaelani, L. M. & Dewantoro, A. H. 2016. Study Of Sea Level Rise Using Satellite Altimetry Data (A case study: Sea Of Semarang). *Geoid: Journal of Geodesy and Geomatics*, 11(2): 176-183. <http://dx.doi.org/10.12962/j24423998.v11i2.1263>.
- Fadlan, A., Sugianto, D. N., Kunarso & Zainuri, M. 2017. Influence of ENSO and IOD to Variability of Sea Surface Height in the North and South of Java Island. *2nd International Conference on Tropical and Coastal Region Eco Development 2016*, Bali. 25-27 October 2016.
- Fitriana, D., Patria, M. P. & Kusratmoko, E. 2022. Detection of Sea Level Rise Monitored from Surabaya Tidal Station Data from 2013 to 2021. *3rd International Symposium of Earth, Energy, Environmental Science, and Sustainable Development*, Depok. 27 - 28 Agustus 2022.
- Higuchi, M., Anongponyosakun, M., Phaksopa, J. & Onishi, H. 2020. Influence of monsoon-forced Ekman transport on sea surface height in the Gulf of Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 54(2): 205-210. <https://doi.org/10.34044/j.anres.2020.54.2.12>.
- Imani, M., Chen, Y., You, R., Lan, W., Kuo, C., Chang, J. & Rateb, A. 2017. Spatiotemporal Prediction of Satellite Altimetry Sea Level Anomalies in the Tropical Pacific Ocean. *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, 14(7): 1126-1130. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2699668>.
- Iskandar, I., Mardiansyah, W., Lestari, D. O. & Masumoto, Y. 2020. What did determine the warming trend in the Indonesian sea?. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(20): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00334-2>.

- Kara, A. B., Wallcraft, A. J., Metzger, E. J., Hurlburt, H. E. & Fairall, C. W. 2007. Wind stress drag coefficient over the global ocean. *J. of Clim.*, 20 (23): 5856-5864. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1825.1>.
- Karlina, T. & Johan, W. A. 2020. Sea Level Rise in Indonesia: The Drivers and the Combined Impacts from Land Subsidence. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 37(3): 1-8. <https://doi.org/10.29037/ajstd.627>.
- Khasanah, U. N., Suprijanto, J. & Wirasatriya, A. 2019. The Variability of Sea Surface Height Anomaly in The Seas Along The Northern And Southern Coast of Java Island. *4th International Conference on Tropical and Coastal Region Eco Development*, Semarang. 30–31 October 2018.
- Kismawardhani, R. A., Wirasatriya, A., dan Berlianty, D. 2018. Sea Level Rise in The Java Sea Based on Altimetry Satellites Data Over 1993-2015. *3rd International Conference of Indonesia Society for Remote Sensing (ICOIRS 2017)*, Semarang. 31 October to 1 November 2017.
- Kok, P.H., Akhir, M. F. M., Tangang, F. & Husain, M. L. 2017. Spatiotemporal trends in the southwest monsoon wind-driven upwelling in the southwestern part of the South China Sea. *PLOS ONE*, 12(2): 1-22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171979>.
- Li, S., Wei, Z., Susanto, R. D., Zhu, Y., Setiawan, A., Xu, T., Fan, B. & Trenggono, M. 2018. Observations of intraseasonal variability in the Sunda Strait throughflow. *Journal of Oceanography*, 74: 541-547. <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0476-y>.
- Lumban-Gaol, J., Leben, R. R., Vignudelli, S., Mahapatra, K., Okada, Y., Nabababan, B., Mei-Ling, M., Amri, K., Arhatin, R. E. & Syahdan, M., 2015. Variability of satellite-derived sea surface height anomaly, and its relationship with Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) catch in the Eastern Indian Ocean. *European Journal of Remote Sensing*, 48(1):465-477. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20154826>.
- Pawlowicz, R., 2020. M_Map: A mapping package for MATLAB, version 1.4m. Diakses pada 09 September 2024, dari <https://www-old.eoas.ubc.ca/~rich/map.html>.
- Putri, E. M. J., Wirasatriya, A. & Marwoto, J., 2023. Pengaruh Ekman Mass Transport dan Ekman Pumping Velocity Terhadap Upwelling di Perairan Selatan Pulau Bali-Sumbawa. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(3): 118-130. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i3.15244>.
- Shalsabilla, A., Setiyono, H., Sugianto, D. N., Ismunarti, D. H. & Marwoto, J. Kajian Fluktuasi Muka Air Laut Sebagai Dampak dari Perubahan Iklim di Perairan Semarang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(1): 69 - 76. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i1.13183>.
- Surya, M. Y., He, Z., Xia, Y. & Li, L. 2019. Impacts of Sea Level Rise and River Discharge on the Hydrodynamics Characteristics of Jakarta Bay (Indonesia). *Water*, 11(7): p.1384. <https://doi.org/10.3390/w11071384>.
- Wirasatriya, A., Setiawan, R.Y., & Subardjo, P., 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 Observation and Remote Sensing*, 10(2): 5513-5518. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2745207>.
- Wirasatriya, A., Setiawan, J. D., Susanto, D. N. Rosyadi, I. A., Haryadi, Gathot W., 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): 8475–849. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1797215>.