

Variasi Musiman Sea Level Anomaly di Wilayah Perairan Indonesia

Julis Dani Haryo¹, Lizalidiawati^{1*}, Irkhos¹ & Suhendra²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Bengkulu, 38371, Indonesia.

²Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Bengkulu, 38371, Indonesia.

*Corresponding author: lizalidiawati@unib.ac.id

Received: 2024-05-29. Revised: 2024-07-10. Accepted: 2024-09-29

ABSTRAK

Wilayah Indonesia terletak diantara dua Samudra luas yaitu Pasifik dan Hindia serta dua benua Australia dan benua Asia. Akibatnya iklim wilayah Indonesia dipengaruhi secara langsung oleh kondisi geografis tersebut. Seperti diketahui wilayah Indonesia mengalami Monsun Barat laut dan Monsun Tenggara. Variasi Musim yang terjadi mencakup bagian dari tujuan penelitian ini yaitu untuk mengidentifikasi variasi musiman *Sea level anomaly* (SLA) di tiga wilayah Indonesia yang mewakili perairan bagian barat, tengah, dan timur dengan menggunakan data citra satelit altimetri. Koordinat dari tiga area tersebut yaitu, mewakili beberapa Laut barat Sumatera (1°LS – 3°LS, 95°BT – 100°BT), Selat Makassar (5°LS- 8°LS, 119°BT- 25°BT), dan Laut Banda (5°LS – 8°LS, 125°BT – 109°BT). Data yang digunakan selama 30 tahun (1993-2022) berupa data SLA rata-rata bulanan dan diolah menggunakan software panoply untuk menampilkan distribusi SLA di masing-masing area serta SLA Time Series di tiga wilayah tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan permukaan Laut tertinggi terjadi pada area A (Perairan barat Sumatera) dengan SLA sebesar 1,4 m dengan laju kenaikan mulai dari 0,5-1,4 m/tahun. Pada area B (Laut Banda), SLA diperoleh sebesar 1,2 m dengan laju kenaikan mulai dari 0,7-1,2 m/tahun. Sedangkan pada Area C (Selat Makassar) sebesar 1,3 m dengan laju kenaikan mulai dari 0,7-1,3 m/tahun.

Kata kunci: Tinggi muka Laut, variasi musim, wilayah barat, timur, tengah

ABSTRACT

Indonesia's territory is located between two vast oceans, namely the Pacific and Indian Oceans as well as the two continents of Australia and the continent of Asia. As a result, Indonesia's regional climate is directly influenced by these geographical conditions. As is known, Indonesia experiences the Northwest Monsoon and Southeast Monsoon. The seasonal variations that occur include part of the aim of this research, namely to identify seasonal variations in sea surface anomalies (SLA) in three regions of Indonesia representing western, central and eastern waters using altimetry satellite image data. The coordinates of these three areas, namely, represent parts of the West Sumatra Sea (1°S – 3°S, 95°E – 100°E), Makassar Strait (5°S- 8°S, 119°E- 25°E), and the Banda Sea (5°S – 8°S, 125°E – 109°E). The data used for 30 years (1993-2022) is in the form of monthly average SLA data and processed using Panoply software to display the SLA distribution in each area as well as the SLA Time Series in the three regions. The research results show that the highest sea level rise occurred in area A (Western waters of Sumatra) with an SLA of 1.4 m with a rate of increase ranging from 0.5-1.4 m/year. In area B (Banda Sea), the SLA obtained is 1.2 m with an increase rate ranging from 0.7-1.2 m/year. Meanwhile in Area C (Makassar Strait) it is 1.3 m with an increase rate ranging from 0.7-1.3 m/year.

Keywords: Sea Surface Height, Season variation, west, east, and middle region.

PENDAHULUAN

Parameter kelautan yang dikenal sebagai *Sea level anomaly* (SLA) sangat penting untuk memahami dinamika laut dan dampak kenaikan permukaan laut. Studi kenaikan permukaan laut, sirkulasi arus laut, komputasi geoid, dan bidang terkait lainnya adalah empat bidang utama yang memerlukan informasi anomali permukaan laut. Berdasarkan data pengukuran altimetri satelit, diketahui kenaikan permukaan laut global mencapai 3,4 mm/tahun (Ablain *dkk.*, 2017).

Volume arus laut global meningkat karena terus mencairnya es di kutub yang disebabkan oleh kenaikan suhu bumi. Selain itu, proses pemulihan volume akibat ekspansi termal juga berkontribusi secara tidak langsung terhadap kenaikan permukaan air laut yang merupakan fenomena yang sangat rumit yang dipengaruhi oleh berbagai macam penyebab, baik lokal maupun global pada suatu perairan tertentu (Tamba & Sasmito, 2016).

Pada tahun 1973, satelit altimetri pertama diluncurkan. Satelit Geos-3 adalah yang pertama diluncurkan. Salah satu inovasi satelit dalam industri kelautan, khususnya bidang dinamika kelautan global, adalah altimetri. Sea Surface Height (SSH), SLA, dan dinamika laut lainnya merupakan contoh dinamika laut. Sensor digunakan oleh sistem operasional satelit altimetri. Frekuensi pulsa gelombang mikro tertentu ditransmisikan ke permukaan bumi oleh sensor satelit. Permukaan bumi kemudian menafsirkan sinyal yang dikirimkan pada frekuensi tertentu. Kenaikan permukaan air laut tidak terjadi pada tingkat yang sama di setiap lautan, menurut data satelit altimetri.

Salah satu parameter oseanografi yang sangat penting untuk memantau dampak fenomena kenaikan muka air laut adalah anomali muka air laut. Ekspansi termal melalui suhu permukaan laut dan aliran massa ekstra dari arus serta pencairan es merupakan faktor yang mempengaruhi anomali permukaan laut. (Hartanto P *dkk.*, 2014). Besarnya penyimpangan dari situasi permukaan laut rata-rata dikenal dengan istilah anomali permukaan laut (Marpaung *dkk.*, 2014). Perbedaan dalam SLA antara Mean Sea Surface Height (MSSH) dan SSH, sedangkan dua SSH menggunakan bidang geoid sebagai titik acuan. Data (SLA) dan Suhu Permukaan Laut (SST) dengan resolusi temporal harian selama 30 tahun (1993–2022) dengan resolusi spasial $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ digunakan dalam penelitian ini. Dengan menggunakan data citra satelit altimetri selama 30 tahun terakhir (1993–2022), penelitian ini bertujuan menelaah peningkatan *Sea level anomaly* (SLA) yang disebabkan oleh variasi musiman di perairan Indonesia, yang terbagi dalam tiga posisi yaitu mewakili wilayah barat, tengah, dan timur. Perubahan fenomena global dalam jangka panjang yang mempengaruhi aliran laut dapat mengakibatkan kenaikan permukaan air laut, yang selanjutnya dapat menyebabkan perubahan garis pantai, identifikasi wilayah perairan, dan peningkatan frekuensi dan intensitas banjir rob.

MATERI DAN METODE

Lokasi penelitian yang mencakup bagian barat, tengah, dan timur Indonesia digunakan untuk penelitian ini, yang dilakukan di perairannya (Gambar 1). Perairan sebelah barat Sumatera diwakili oleh wilayah pertama, yaitu Area A ($1^\circ\text{S} - 3^\circ\text{S}$, $95^\circ\text{E} - 100^\circ\text{E}$). Selat Makassar diwakili oleh Area B, wilayah kedua ($5^\circ\text{S}-8^\circ\text{S}$, $119^\circ\text{E}-125^\circ\text{E}$). Terakhir, Laut Banda diwakili oleh Area C ($5^\circ\text{S} - 8^\circ\text{S}$, $125^\circ\text{E} - 109^\circ\text{E}$). Data rata-rata bulanan digunakan selama 30 tahun, dimulai pada tanggal 1 Januari 1993 dan berakhir pada tanggal 4 Agustus 2022.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian yang mewakili Perairan Indonesia: Pantai Barat Sumatera (kotak A), Selat Makassar (kotak B), dan Laut Banda (Kotak C).

Data ketinggian permukaan laut dapat digunakan untuk memahami tipe anomali permukaan laut melalui metode kuantitatif (Sangkap Novian dkk., 2015). Data SLA digunakan pada penelitian ini yang diunduh melalui portal Global Ocean Gridded L4 Sea Surface Heights and Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing yang disediakan oleh Copernicus Marine Service. Data tersebut mencakup data global SLA pada resolusi temporal harian serta resolusi spasial $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan deskriptif dan kuantitatif, dimana hasil penelitian disajikan dalam bentuk grafik, time series, serta angka variasi musiman SLA. Pengumpulan data secara kuantitatif melibatkan data SLA dan SST.

Proses dalam mengolah data dilakukan menggunakan Aplikasi *Software* GrADS dan Panoply untuk menampilkan variasi spasial SLA pada bulan yang mewakili musim. Selanjutnya, data SLA dianalisis distribusi spasialnya di tiga area yang mewakili perairan barat, tengah, dan timur. Data SLA adalah hasil selisih antara data SSH dan data MSSH seperti yang dijelaskan oleh Sarsito dkk., (2018). Perbedaan ketinggian satelit dari bidang ellipsoid dan ketinggiannya dari permukaan laut, setelah koreksi kesalahan dan bias, menghasilkan data SLA, SSH, dan MSSH. Informasi mengenai koreksi altimetri satelit dan nilai bias terdapat pada penelitian Pujol dkk., (2016), dimana model yang disarankan untuk altimetri satelit dan data observasi digunakan untuk mendapatkan nilai ini (Sarsito dkk., 2018).

Memahami tren SLA, dilakukan analisis statistik berupa korelasi linear di tiga area penelitian. Trend direkt adalah kecenderungan data dalam perubahan seiring waktu yang tetap (konstan) menurut (Wedangga dkk., 2023). Untuk memahami korelasi antara *Sea Surface Temperature* (SST) dan *Sea level anomaly* (SLA), dilakukan analisis korelasi linear di tiga area penelitian Menurut Fadholi, (2013), hubungan variabel SLA dan SPL di laut dapat dipahami melalui penggunaan analisis korelasi linier.

HASIL DAN PEMBAHASAN

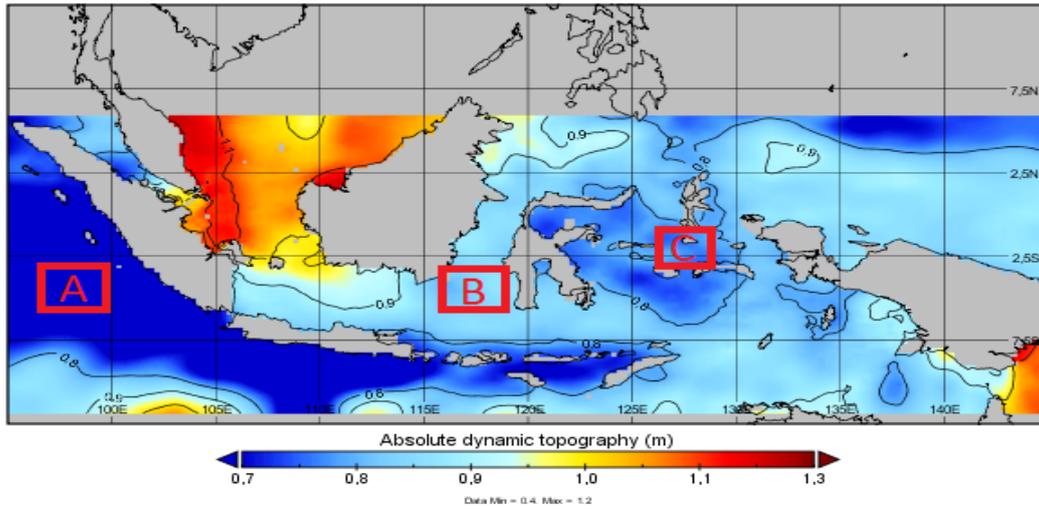
Pengolahan Data

Data yang akan digunakan adalah data *Sea level anomaly* (SLA) yang diperoleh dari posisi 4 dan telah diolah menggunakan perangkat lunak OpenGrADS dan Panoply Menurut Pujol dkk., (2016), proses pengolahan data meliputi beberapa langkah, yaitu homogenisasi, kontrol kualitas data masukan, pembentukan produk, penggabungan, dan kontrol kualitas akhir (a). Homogenisasi: Tujuannya adalah mendapatkan data yang seragam dari berbagai sumber altimetri dengan menggunakan model, referensi dan koreksi yang seragam untuk semua misi, sesuai pada standar disarankannya produk altimetri, (b). Kontrol Kualitas Data Masukan: Langkah-langkah ini dimaksudkan untuk menjamin bahwa tidak terdapat kesalahan dalam langkah-langkah sebelumnya agar data yang akan digunakan memiliki tingkat akurasi yang tinggi, (c). Pembentukan Produk: Proses ini mencakup perhitungan nilai SLA yang diperoleh dari selisih antara nilai SSH, yang datanya diperoleh dari satelit altimetri selama periode pengamatan tahun 1993-2022, (d). Penggabungan: Melibatkan penggabungan data dari beberapa satelit altimetri dengan menggunakan interpolasi optimal (OI) untuk menghasilkan data grid posisi 4 SLA, dan €. Kontrol Kualitas Akhir: Proses ini dilakukan sebelum data didistribusikan untuk memastikan data yang dihasilkan sesuai dengan format instruksi untuk mesin CNC (Computer Numerical Control).

TREN SEA LEVEL ANOMALY

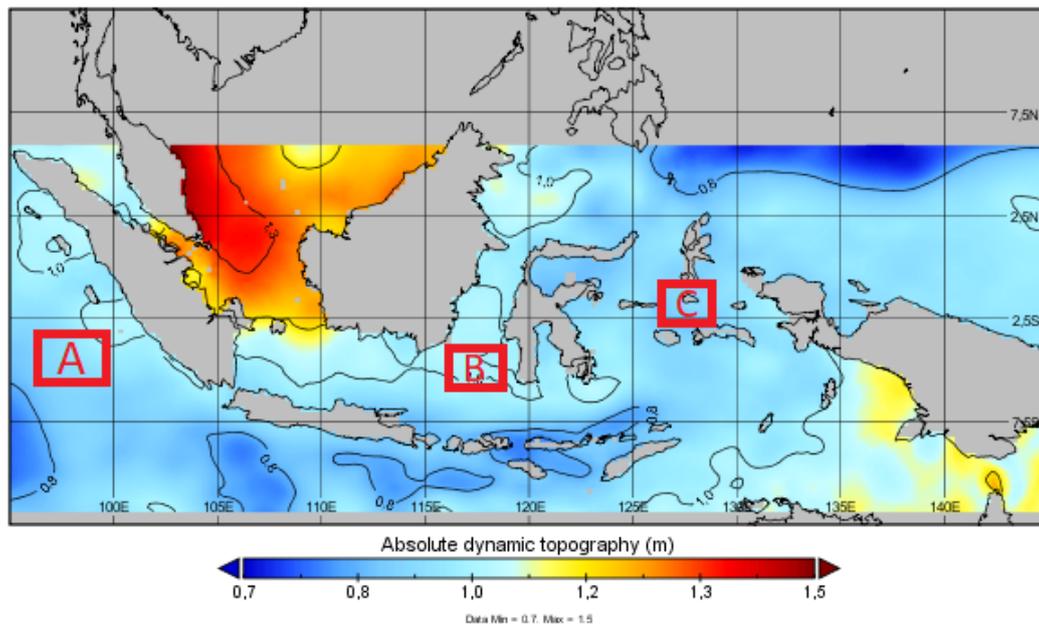
Ruang lingkup penelitian mengenai tren *Sea level anomaly* (SLA), area penelitian dibagi menjadi tiga bagian: Laut Sumatera, Laut Banda, dan Selat Makassar (diidentifikasi sebagai area A, B, dan C). Selain itu, dalam penelitian ini, perhitungan juga dilakukan untuk menentukan nilai kesalahan dari data yang diperoleh dari satelit. Proses tersebut mencakup pengolahan data SLA menggunakan satelit altimetri yang kemudian disesuaikan dengan koreksi error serta potensi bias (Sarsito dkk., 2018). Peningkatan tinggi permukaan air laut dianalisis dengan membandingkan tren nilai antara titik awal dan titik akhir. Selain itu, laju kenaikan permukaan air laut diperkirakan dengan melakukan pembagian antara nilai peningkatan permukaan air laut dengan total jumlah tahun pengamatan (dari tahun 1993 hingga 2022). Grafik yang menunjukkan tren SLA disajikan dalam bentuk visualisasi untuk masing-masing area penelitian (disebut Gambar 2A-2C).

Absolute dynamic topography 26 November 1997



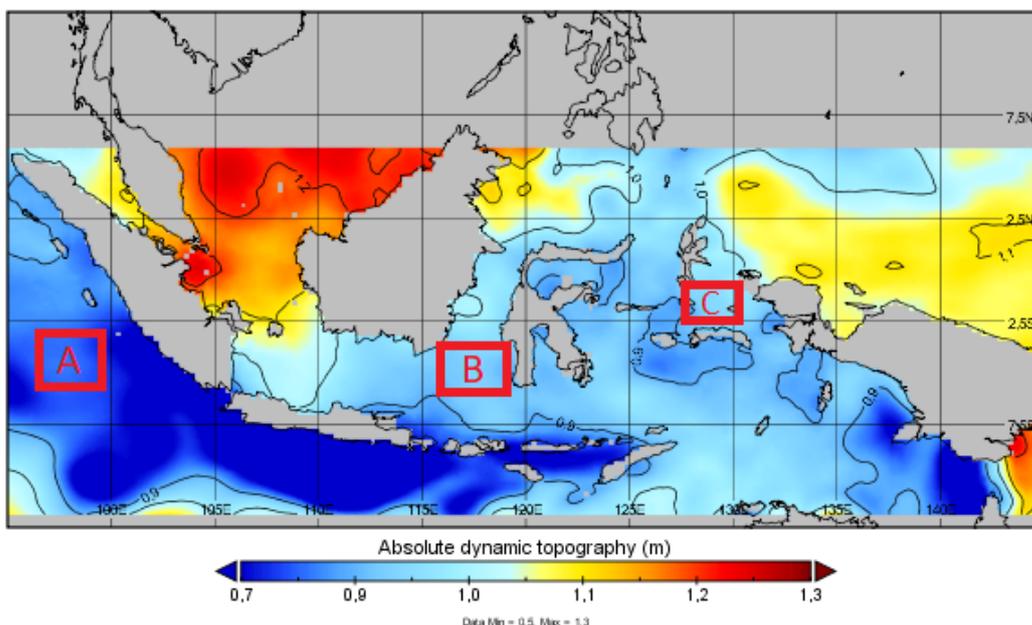
Gambar 2A. Peta Absolute dynamic topography 26 November 1997 Di Perairan Indonesia di pantai barat Sumatera, tengah Selat Makassar dan timur Laut Banda

Absolute dynamic topography 01 Januari 2003



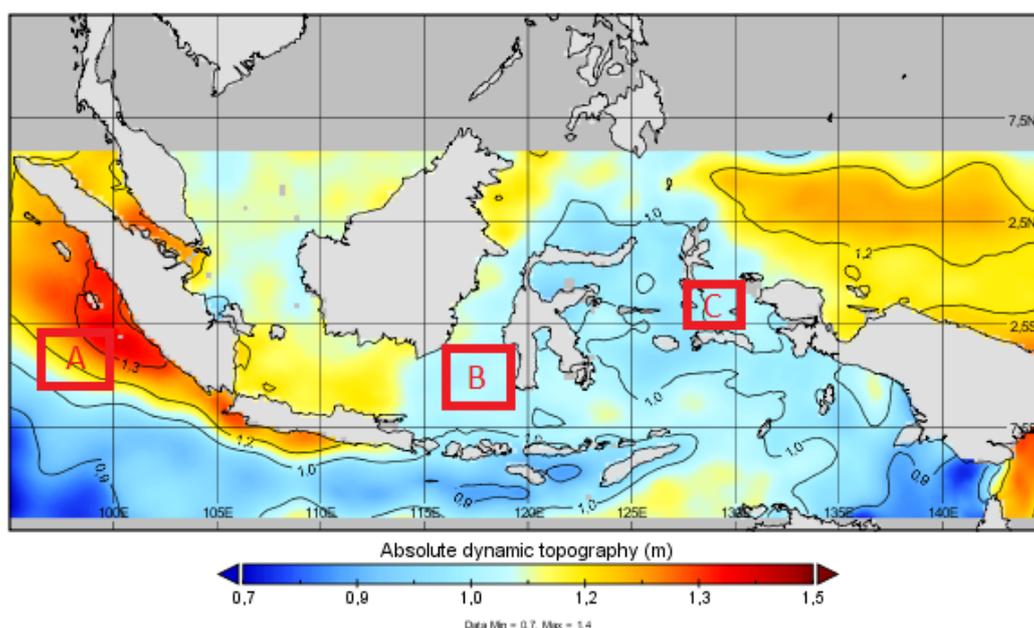
Gambar 2B. Peta Absolute dynamic topography 01 Januari 2003 Di Perairan Indonesia di pantai barat Sumatera, tengah Selat Makassar dan timur Laut Banda

Absolute dynamic topography pada 10 September 2006



Gambar 2C. Peta Absolute dynamic topography 10 September 2006 Di Perairan Indonesia di pantai barat Sumatera, tengah Selat Makassar dan timur Laut Banda

Absolute dynamic topography 23 Mei 2020



Gambar 2D. Peta Absolute dynamic topography 23 Mei 2020 Di Perairan Indonesia di pantai barat Sumatera, tengah Selat Makassar, dan timur Laut Banda

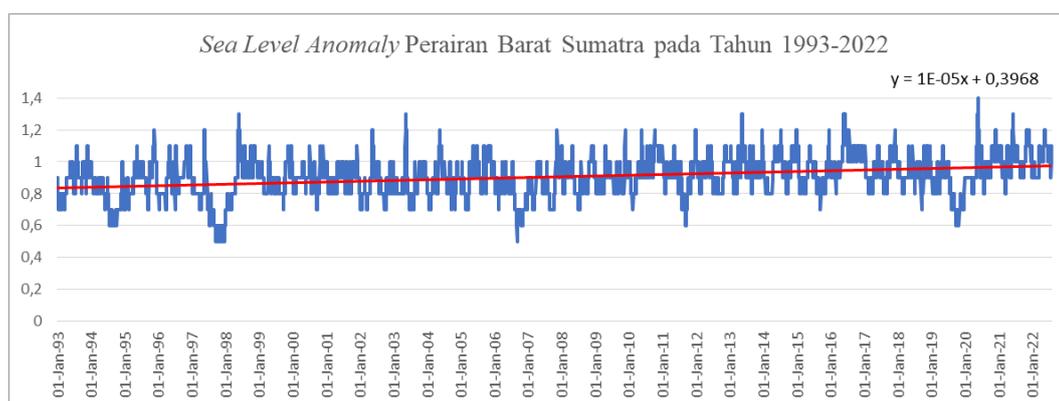
Berdasarkan Peta Absolute Dynamic Topography (ADT), terdapat tren positif pada kenaikan tinggi permukaan laut (SLA) di perairan Indonesia, seperti yang tercermin dalam variasi warna biru, kuning, dan merah. Warna biru menandakan ketinggian permukaan laut mendekati 0,7 meter dan sering terkait dengan arus dingin, sementara kuning menunjukkan tinggi sekitar 1,05 meter, yang merupakan rata-rata. Warna merah menunjukkan daerah dengan tinggi mendekati 1,4 meter, biasanya terkait dengan arus hangat. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan permukaan air laut dalam periode 30 tahun. Data kenaikan permukaan air laut di tiga stasiun tercatat dalam Tabel 1. Kenaikan tertinggi terjadi di stasiun Laut Sumatera dengan nilai 1,4 m, sementara yang terendah mencapai 0,5 m. Di stasiun Laut Banda, kenaikan adalah 1,2 m, dan yang terkecil 0,7 m. Sedangkan di stasiun Selat Makassar, kenaikan adalah 1,3 m dan yang terendah 0,7 m. Total kenaikan muka air

laut dari ketiga stasiun adalah 2,2 m. Selama periode 1993-2022, terjadi peningkatan tren positif pada *Sea level anomaly* di ketiga stasiun pada perairan Indonesia seperti yang tercantum dalam Tabel 1. Kenaikan permukaan air laut tertinggi terjadi di area A (Laut Sumatera) sebesar 1,4 m pada 23 Mei 2020. Peningkatan permukaan air laut ini sangat memengaruhi kondisi daratan bahkan dapat menyebabkan banjir laut, hal ini juga sangat dipengaruhi pergerakan angin monsoon Barat yang berpengaruh besar terhadap peningkatan permukaan air laut.

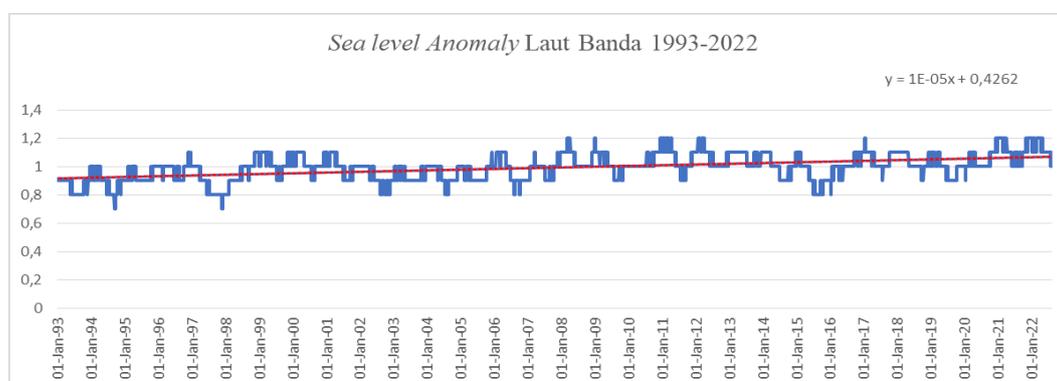
Tabel 1. Absolute dynamic topograph (m)

Klasifikasi	Barat	Tengah	Timur
Tinggi Maksimum	1,4 (m)	1,2 (m)	1,3 (m)
Tinggi Minimum	0,5 (m)	0,7 (m)	0,7 (m)

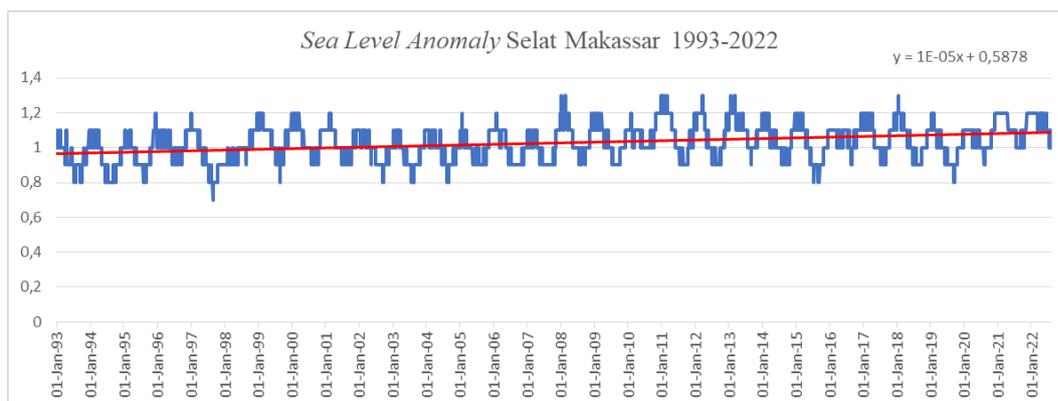
Pada kejadian beberapa fenomena El Niño terjadi dalam 6 kali di bagian perairan Barat Sumatera pada 14 Oktober 1997, dan terjadi kembali pada 10 September 2006 yang mengakibatkan penurunan permukaan laut sebesar 0,5 di area A (Laut Sumatera). Secara geografis, nilai *Sea level anomaly* di wilayah perairan Indonesia cenderung memiliki nilai yang tinggi di sebagian besar Samudra Pasifik dan beberapa daerah yang dilintasi oleh ALRLINDO. Hubungan antara data *Sea level anomaly* dan *Sea Surface Temperature* menunjukkan konsistensi nilai positif di wilayah (A, B, dan C). Untuk memudahkan identifikasi jenis *Sea level anomaly* berdasarkan data yang telah dikumpulkan, salah satu pendekatan yang digunakan adalah pembuatan grafik. Data mengenai kenaikan tinggi permukaan laut dapat diplotkan dalam sebuah grafik menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Hasilnya terdapat pada Gambar 3A-3C.



Gambar 3A. *Sea level anomaly* perairan Barat Sumatera 1993-2022. Garis merah menunjukkan tren *Sea level anomaly* selama 30 tahun.



Gambar 3B. *Sea level anomaly* Laut Banda 1993-2022. Garis merah menunjukkan tren *Sea level anomaly* selama 30 tahun.



Gambar 3C. Sea level anomaly Selat Makassar 1993-2022. Garis merah menunjukkan tren Sea level anomaly selama 30 tahun.

Berdasarkan data kenaikan tinggi permukaan laut yang terdapat dalam grafik, tren kenaikan *Sea level anomaly* (SLA) di perairan Barat Sumatera, Laut Banda, dan Selat Makassar selama 30 tahun terakhir (1993-2022) menunjukkan peningkatan nilai SLA setiap tahunnya yang tergambar pada garis merah pada grafik. Hal ini mengindikasikan adanya peningkatan tingkat permukaan laut di wilayah tersebut dari waktu ke waktu. Nilai SLA yang cenderung tinggi di perairan Indonesia, terutama di beberapa perairan yang terletak di sepanjang lintasan atau jalur perjalanan dari Barat Sumatera, melalui Laut Banda, hingga Selat Makassar, menunjukkan bahwa perairan Indonesia berada di bawah pengaruh perubahan iklim global. Korelasi yang signifikan antara SLA dan *Sea Surface Temperature* menunjukkan bahwa perubahan suhu permukaan laut juga memengaruhi kenaikan tinggi permukaan laut. Selain itu, grafik juga menunjukkan adanya variasi harian dan musiman dalam kenaikan dan penurunan tinggi permukaan laut, mengindikasikan kompleksitas variabilitas dinamika laut di wilayah tersebut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai variasi musiman *Sea level anomaly* selama periode 1993-2022, terdapat tren peningkatan pada *Sea level anomaly* di tiga stasiun pada perairan Indonesia. Kenaikan permukaan air laut tertinggi tercatat di area A (Laut Sumatera) sebesar 1,4 m dengan laju kenaikan antara 0,5 hingga 1,4 m per tahun. Di area B (Laut Banda), kenaikan mencapai 1,2 m dengan laju antara 0,7 hingga 1,2 m per tahun. Sedangkan di area C (Selat Makassar), kenaikan sebesar 1,3 m dengan laju kenaikan sekitar 0,7 m per tahun. Secara keseluruhan, kenaikan rata-rata permukaan laut di perairan Indonesia berkisar antara 1,2 hingga 1,4 m. Variabilitas musiman terjadi pada semua area, sedangkan variabilitas pada area berbeda dalam grafik menunjukkan adanya kenaikan dan penurunan variabilitas tahunan maupun musiman. Perubahan tinggi muka laut ini dipengaruhi saat fenomena ENSO terjadi, El Niño dan La Niña di muka Laut selatan. Berdasarkan data tinggi kenaikan permukaan laut yang diperoleh yang ditunjukkan pada grafik bahwa *Sea level anomaly* perairan Barat Sumatera, Laut Banda, dan Selat Makassar menunjukkan tren *sea level anomaly* selama 30 tahun menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tren nilai *sea level anomaly* pada setiap tahunnya. Hubungan antara *Sea level anomaly* dan *Sea Surface Temperature* menunjukkan pola yang konsisten. Penelitian ini penting untuk memahami dampak dari peningkatan permukaan laut terhadap wilayah perairan Indonesia dan dapat menjadi acuan dalam merancang strategi mitigasi dan adaptasi di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada semua pihak peneliti yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada Anisa Fitriani atas semangat yang diberikan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ablain, M., Legeais, J. F., Prandi, P., Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Dieng, H. B., Benveniste, J., & Cazenave, A. 2017. Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales. Dalam *Surveys in Geophysics*. 38(1):7–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9389-8>
- Fadholi, A. (2013). Persamaan Regresi Prediksi Curah Hujan Bulanan Menggunakan Data Suhu dan Kelembapan Udara di Ternate. *Statistika*, 13(1), 7–16.
- Hartanto P, Prijatna K, & Nurmaulita S.L. 2014. Perubahan Muka Air Laut Berdasarkan Data Satelit Altimetri Dan Data Argo Pada Rentang 1992-2012 Di Wilayah Samudera Pasifik Bagian Barat. *Majalah Ilmiah Globë*, 16(1), 17–24.
- Marpaung, S., Prayogo, T., Pemanfaatan, P., & Jauh -Lapan, P. 2014. Deteksi Parameter Geobiofisik dan Diseminasi Penginderaan Jauh Seminar Nasional Penginderaan Jauh. *Jurnal Tekno*, 13(63), 561–567.
- Pujol, M. I., Faugère, Y., Taburet, G., Dupuy, S., Pelloquin, C., Ablain, M., & Picot, N. 2016. DUACS DT2014: The new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years. *Ocean Science*, 12(5), 1067–1090. <https://doi.org/10.5194/os-12-1067-2016>
- Sangkop Novian, Mamoto J. D., & Jasin M. I. 2015. Analisis Pasang Surut Di Pantai Bulu Desa Rerer Kecamatan Kombi Kabupaten Minahasa Dengan Metode Admiralty. *TEKNO*, 13(63), 60–69.
- Sarsito, D. A., Prijatna, K., Wijaya, D. D., Nur Fajar, T., Radjawane, I. M., Windupranata, W., & Bramanto, B. 2018. Long term variation of sea level anomaly (September 1992-January 2017) in the Indonesian sea from multi-mission satellite altimetry data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 162(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/162/1/012043>
- Tamba, A. Y. P., & Sasmito, B. 2016. Analisis Sea Level Rise Dan Penentuan Komponen Pasut Dengan Menggunakan Data Satelit Altimetri Jason-2 Tahun 2011-2014 (Studi Kasus : Perairan Sumatera Bagian Timur). *Jurnal Geodesi Undip*, 5(2), 76–86.
- Wedangga, I. G. P. A., Dharma, I. G. B. S., & Putra, I. D. N. N. 2023. Analisis Sea Level Anomaly Dengan Menggunakan Data Multi Satelit Altimetri Di Perairan Indonesia. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(1), 118. <https://doi.org/10.24843/jmas.2022.v08.i01.p14>