

Studi Kenaikan Muka Air Laut di Pesisir Lampung dan Banten menggunakan Satelit Altimetri

Zulfikar Adlan Nadzir¹, Haikhal Nuri Agung¹, Fikri Fahrurrozi¹

¹Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

Korespondensi: zulfikar.nadzir@gt.itera.ac.id

Diterima: 21 Juni 2025; Direvisi: 12 November 2025; Disetujui: 30 November 2025

Abstrak

Perubahan iklim mendorong kenaikan muka air laut secara global yang berdampak signifikan terhadap wilayah pesisir, termasuk di Indonesia. Perubahan ini mengancam ekosistem, infrastruktur, serta kehidupan masyarakat di wilayah tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengkuantifikasi, menganalisis dan membandingkan tren kenaikan muka laut di wilayah pesisir Lampung dan Banten dengan menggunakan data satelit altimetri Jason-1, Jason-2, dan Jason-3 selama periode 2002–2019. Dalam penelitian ini, data altimetri berupa ketinggian permukaan laut (*Sea Surface Height/SSH*) diproses menjadi *Sea Level Anomaly* (SLA) dan *Total Water Level Envelope* (TWLE) dengan menerapkan koreksi umum seperti troposfer basah dan kering, ionosfer, bias gelombang laut (*sea-state bias*), dan pasang surut, yang kemudian divalidasi dengan data dari tiga stasiun pasang surut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata tren kenaikan muka air laut di pesisir barat Lampung sebesar 5,46 mm/tahun, di Banten bagian selatan sebesar 2,84 mm/tahun, dan di Banten bagian utara sebesar 6,20 mm/tahun. Deret waktu TWLE menunjukkan korelasi yang kuat terhadap data pengukuran dari stasiun pasang surut, dengan nilai $R = 0,93$, yang menunjukkan konsistensi tinggi antara data satelit dan data lapangan. Temuan ini mengindikasikan bahwa pesisir dengan kemiringan batimetri yang landai cenderung mengalami laju kenaikan lebih tinggi dibandingkan dengan pesisir berlereng curam. Hal ini menegaskan bahwa satelit altimetri merupakan metode andal untuk pemantauan muka laut, bahkan di zona pesisir yang kompleks dan memiliki keterbatasan pengamatan. Hasil penelitian ini memiliki implikasi bagi perencanaan adaptasi perubahan iklim dan mitigasi bencana di wilayah pesisir Indonesia, terutama dalam pengembangan sistem pemantauan jangka panjang yang mengintegrasikan altimetri, pasang surut, dan GNSS.

Kata kunci: kenaikan muka air laut, altimetri, pesisir Indonesia, perubahan iklim

Abstract

Climate change is driving global sea-level rise that significantly affects coastal regions, including Indonesia. These changes threaten ecosystems, infrastructure, and the livelihoods of coastal communities. This study aims to quantify, analyze, and compare sea-level rise trends along the coasts of Lampung and Banten using Jason-1, Jason-2, and Jason-3 satellite altimetry data for the period 2002–2019. In this study, Sea Surface Height (SSH) measurements were processed into Sea Level Anomaly (SLA) and Total Water Level Envelope (TWLE) by applying standard corrections—wet/dry troposphere, ionosphere, sea-state bias, and tides—and then validated against data from three tide-gauge stations. The results show that the mean sea-level rise trend is 5.46 mm/yr along the west coast of Lampung, 2.84 mm/yr in southern Banten, and 6.20 mm/yr in northern Banten. The TWLE time series display strong correlation with tide-gauge measurements ($R = 0.93$), indicating high consistency between satellite and in-situ observations. These findings suggest that coasts with gently sloping bathymetry tend to experience higher rates of sea-level rise than steeper coasts. This confirms that satellite altimetry is a reliable method for sea-level monitoring, even in complex coastal zones with observational constraints. The results have implications for climate-change adaptation planning and disaster-risk mitigation in

Indonesia's coastal areas, particularly for developing long-term monitoring systems that integrate altimetry, tide gauges, and GNSS.

Key words: *sea level rise, altimetry, Indonesian coastal zone, climate change*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim adalah salah satu isu global yang sedang ramai diperbincangkan. Salah satu bentuk dari perubahan iklim adalah kenaikan suhu sebesar 1,1°C dalam seratus tahun terakhir (Calvin dkk., 2023) dan berkontribusi pada kenaikan muka air laut yang lebih tinggi dari prediksi sebelumnya. Fenomena ini disebabkan oleh kombinasi dari ekspansi termal air laut, pencairan es di kutub dan pergerakan dari tanah baik secara tektonik maupun non-tektonik seperti *Glacial Isostasy Adjustment* (GIA) (Nicholls dkk., 2021). Dampaknya sangat terasa di wilayah pesisir, tempat tinggal lebih dari 60% populasi dunia dan lebih dari 2/3 aktivitas ekonomi global (Nicholls & Cazenave, 2010). Indonesia, negara kepulauan terbesar di dunia dengan garis pantai lebih dari 96 ribu kilometer, rentan terhadap risiko kenaikan muka air laut ini (Cao dkk., 2021), yang dapat mengancam ekosistem, infrastruktur, dan kehidupan sosial-ekonomi masyarakat pesisir.

Muka air laut adalah bidang dinamis di lautan seluruh dunia yang dipengaruhi oleh beberapa efek seperti pasang surut dari matahari dan bulan, bentuk Bumi (*solid earth*), lokasi kutub (*pole tide*), dan tekanan dari atmosfer serta kenaikan muka air laut secara sekular yang utamanya disebabkan oleh perubahan iklim (Passaro dkk., 2018). Pengamatan dari muka air laut sudah dimulai sejak abad ke-19 dan berevolusi dari mistar ukur menjadi sensor elektronik berbasis radar, tekanan, dan akustik (Nadzir & Adil, 2024). Proses pemantauan ini sudah dilakukan sejak tahun 1990-an untuk stasiun pasang surut di seluruh dunia dalam sistem *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL, (Woodworth, 1991)). Di sisi lain, satelit altimetri sejak 1992 memungkinkan pemantauan muka laut secara konsisten di lautan terbuka dan semakin mendekati pesisir (Stammer & Cazenave, 2017). Misi Jason-1, Jason-2/OSTM, dan Jason-3 menyediakan pengukuran tinggi permukaan laut berpresisi tinggi yang krusial untuk analisis tren spasial-temporal (Sinurat dkk., 2021).

Berbagai penelitian sebelumnya telah dilakukan dengan memanfaatkan data satelit altimetri untuk menganalisis kenaikan muka air laut di Indonesia. Evaluasi akan ketelitian altimetri di Indonesia ditemukan bahwa nilainya konsisten dengan data stasiun pasang surut, juga tentang variasi spasial dan faktor yang mempengaruhinya dari kenaikan muka air laut di Indonesia (Lumban-Gaol dkk., 2018). Penelitian di beberapa

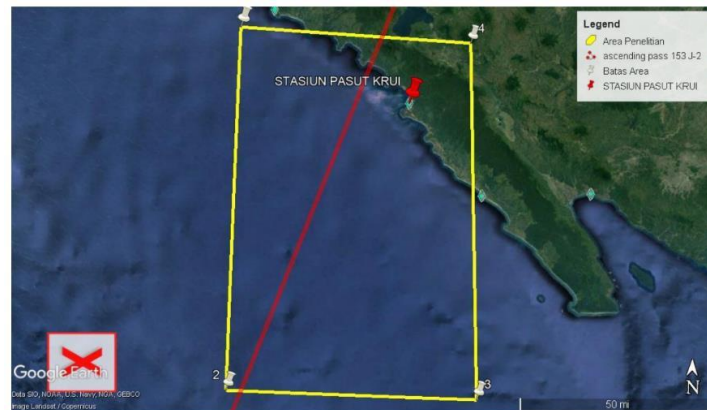
lokasi di Indonesia menggunakan kombinasi dari berbagai misi satelit altimetri dan data pasang surut menemukan bahwa muka air laut naik berkisar 4 mm/tahun (Fenoglio-Marc, Schöne, dkk., 2012) maupun di Laut Jawa (Kismawardhani dkk., 2018). Penelitian serupa di Sumatera bagian timur (Tamba dkk., 2016) dan bagian barat (Sidabutar dkk., 2016) serta di Riau (Ariana dkk., 2017) sama-sama menunjukkan tren positif, walaupun di pesisir tingkat ketelitian altimetri lebih buruk dari lautan terbuka (Handoko dkk., 2017). Namun, hingga kini belum ada studi komparatif yang secara simultan menganalisis dan memvalidasi tren kenaikan muka laut di pesisir Lampung dan Banten terhadap stasiun pasang surut, serta belum banyak penelitian yang secara sistematis mengkaji hubungan antara tren, jarak ke pantai, dan kondisi batimetri menggunakan deret waktu multi-misi.

Provinsi Lampung dan Banten, yang terletak di pesisir selatan Pulau Sumatra dan pesisir barat Pulau Jawa, merupakan dua wilayah yang rentan terhadap dampak kenaikan muka air laut. Kondisi oseanografi di kedua wilayah ini memiliki karakteristik yang berbeda. Di Teluk Lampung, misalnya, tingkat *Total Suspended Solids* (TSS) rata-rata berkisar antara 11 hingga 13,5 mg/l, sedikit lebih tinggi dari ambang batas yang direkomendasikan untuk perairan pesisir, yaitu 10 mg/l (Hartanto dkk., 2024). Selain itu, ditemukan bahwa di Teluk Lampung memiliki kecepatan arus sebesar 0,07 m/detik dengan nilai *Mean Residual Error* sebesar 4,7% (Sianturi dkk., 2013). Sedangkan di Teluk Banten, perubahan kondisi oseanografi akibat proses alami dan aktivitas manusia telah mempengaruhi distribusi lamun, yang berkorelasi dengan salinitas, suhu permukaan laut, dan material tersuspensi (Wisha dkk., 2015). Variasi kondisi oseanografi ini dapat memengaruhi ekosistem pesisir dan memperparah dampak kenaikan muka air laut di kedua wilayah tersebut.

Meskipun telah ada beberapa penelitian terkait sebelumnya, seperti yang sudah dijelaskan dalam penyampaian kondisi akan penelitian terdahulu, analisis komparatif mengenai tren kenaikan muka air laut antara dua wilayah tersebut masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan tren kenaikan muka air laut di pesisir Lampung dan Banten menggunakan data altimetri Jason-1, Jason-2, dan Jason-3 periode 2002–2019 yang divalidasi dengan tiga stasiun pasang surut. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai pola kenaikan muka laut di kedua wilayah serta menjadi dasar bagi perencanaan mitigasi dan adaptasi perubahan iklim di pesisir Indonesia.

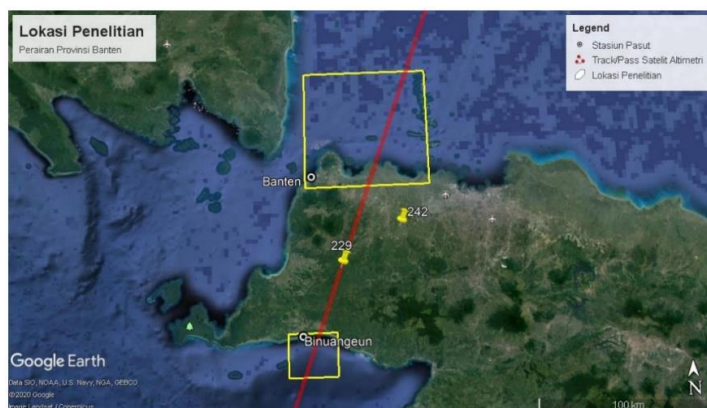
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di dua wilayah pesisir di bagian barat Indonesia yang mewakili kondisi oseanografis dan batimetri yang berbeda. Lokasi pertama adalah pesisir barat Lampung pada cakupan area $4^{\circ}54' - 6^{\circ}15'$ Lintang Selatan dan $103^{\circ}17' - 104^{\circ}11'$ Bujur Timur yang dipengaruhi oleh dinamika arus lintas Selat Sunda, gelombang besar dan ekstrim dari Samudera Hindia dan aktivitas tektonik dari lempeng Eurasia dan Indo-Australia, ditampilkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Pesisir Barat Lampung

Selain itu, pesisir barat Lampung juga dipengaruhi oleh adanya sirkulasi *Indian Ocean Dipole* (IOD) yang menyebabkan fenomena *upwelling* dan *downwelling* sesuai dengan fase dari IOD tersebut (Achiari dkk., 2021). Lokasi selanjutnya adalah pesisir utara ($106^{\circ}6' - 106^{\circ}29'$ Bujur Timur dan $5^{\circ}36' - 6^{\circ}1'$ Lintang Selatan) dan selatan ($105^{\circ}49' - 106^{\circ}4'$ Bujur Timur, dan $6^{\circ}49' - 7^{\circ}2'$ Lintang Selatan) Banten yang memiliki pengaruh dari aktivitas antropogenik seperti pariwisata dan transportasi kritis dan arus besar dari selatan Jawa serta Laut Jawa, tergambar pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Lokasi Penelitian di bagian utara dan selatan Banten

Perairan di sekitar Selat Sunda sendiri memiliki sifat yang dinamis sebagai ‘jembatan’ antara Laut Jawa dan Samudera Hindia yang membawa arus laut dengan kecepatan yang cukup tinggi (Sprintall dkk., 2004), ditambah dengan fenomena lokal seperti angin muson dan aktivitas vulkanologi. Pemilihan kedua lokasi ini disesuaikan dengan kedekatan dengan lintasan satelit altimetri yang ditandai dengan garis warna merah dan keberadaan stasiun pasang surut dengan titik merah dan hitam (Krui untuk Lampung, Banten dan Binuangeun untuk Banten).

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah dari 3 satelit altimetri (Jason-1, Jason-2 dan Jason-3) di tahun 2002—2019 yang didapatkan dari AVISO (www.aviso.altimetry.fr/en) dan PO-DAAC NASA (<https://podaactools.jpl.nasa.gov/>) di Tabel 1.

Tabel 1. Data Altimetri yang digunakan dalam penelitian

<i>Pesisir barat Lampung</i>			<i>Pesisir Banten</i>		
Satelit	Cycle	Periode	Satelit	Cycle	Periode
Jason-2	000 - 303	2008 – 2016	Jason-1	001 – 259	2002 – 2009
			Jason-2	000 – 302	2008 – 2016
			Jason-3	000 – 143	2016 - 2019

Data altimetri yang digunakan menggunakan konsep *pass* (jalur satelit di permukaan Bumi yang berulang setiap ~10 hari) dan *cycle* (jumlah pengulangan satelit altimetri di jalur yang sama) sebagai *identifier* (Nadzir, 2017), dengan *pass* 153 untuk pesisir barat Lampung dan *pass* 229 di pesisir Banten. Versi data yang digunakan adalah *Geophysical Data Record* (GDR). Sebagai validasi, data dari 3 stasiun pasang surut (Krui untuk Lampung; Banten dan Binuangeun untuk Banten) digunakan dengan jangka waktu dari tahun 2011 sampai 2019. Data pasang surut tersebut didapatkan dari Badan Informasi Geospasial (BIG, <https://srgi.big.go.id/tides>). Data altimetri yang berbentuk titik-titik dan tersebar di sepanjang lajur satelit (*pass*) dilakukan penyeleksian dan pengelompokan di beberapa titik referensi serta dibentuk sebagai *time series* lalu dibandingkan dengan data dari stasiun pasang surut (Chen dkk., 2023).

Proses pengolahan data dalam penelitian ini dibagi menjadi 3 bagian: 1) *pre-processing* + filter dari data altimetri dan data pasang surut; 2) perhitungan dan analisis tren kenaikan muka air laut (*sea level rise*, SLR) dan 3) validasi dan evaluasi antara data altimetri dan data pasang surut, sebagaimana tergambar pada diagram alir di Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Pengolahan data dimulai dengan pengolahan awal untuk data altimetri, dalam rangka memastikan bahwa data yang digunakan merupakan data dengan kualitas terbaik. Data versi GDR tersebut berisikan informasi tinggi satelit dari bidang referensi pantulan pulsa radar dari sensor altimetri yang dipantulkan oleh permukaan air laut dan koreksi dari perjalanan pulsa radar tersebut di atmosfer serta di permukaan air, sehingga menjadi tinggi muka air yang diwakili secara matematis oleh Persamaan (1) (Cazenave dkk., 2024). Data hasil perhitungan tersebut masih memiliki variabilitas yang cukup tinggi dan perlu diproses lebih lanjut untuk menghilangkan seluruh faktor perubahan yang sudah diketahui dan efek tekanan atmosfer yang digambarkan di Persamaan (2) (Benveniste dkk., 2019) sebagai anomali muka air laut, sehingga parameter yang tersisa dapat dihitung menjadi tren kenaikan muka air laut. Selain itu, sebagai validasi dengan data stasiun pasang surut, pengaruh dari energi pasang surut perlu dikembalikan ke data *SLA* sesuai dengan Persamaan (3), disebut *Total Water Level Envelope (TWLE)* (Passaro dkk., 2016). Parameter *TWLE* ini mewakili muka air laut yang di dalamnya terdiri dari energi pasang surut yang mana koreksi lainnya sudah diaplikasikan dan sebanding secara geometri dengan tinggi muka air laut dari stasiun pasang surut.

$$SSH = altitude - (range + wet tropo + dry tropo + iono + ssb) \quad (1)$$

$$SLA = SSH - MSS - tides - inv_bar \quad (2)$$

$$TWLE = SLA + tides \quad (3)$$

dengan:

<i>SSH</i>	= Tinggi muka air laut dari elipsoid (<i>Sea Surface Height</i>),
<i>Altitude</i>	= ketinggian dari elipsoid,
<i>Range</i>	= jarak yang dibentuk dari satelit ke permukaan yang memantulkan gelombang mikro,
<i>wet tropo</i>	= Koreksi troposfer basah,
<i>dry tropo</i>	= Koreksi troposfer kering,
<i>iono</i>	= Koreksi ionosfer,
<i>ssb</i>	= Koreksi kondisi muka air laut (<i>sea state bias</i>),
<i>SLA</i>	= Tinggi muka air laut dari muka air laut rata-rata (<i>Sea Level</i>)

Anomaly),

MSS	= Tinggi muka air laut rata-rata (<i>Mean Sea Surface</i>),
Tides	= Koreksi pasang surut,
Inv_bar	= Koreksi karena tekanan udara (<i>inverse barometric correction</i>),
TWLE	= Tinggi muka air laut dari muka air laut rata-rata yang masih terdapat efek pasang surut (<i>Total Water Level Envelope</i>).

Sebagai data yang berbentuk titik-titik sepanjang jalur pengamatan, data dari satelit altimetri cenderung akan menyebar tanpa adanya kesamaan antara satu *cycle* ke *cycle* lain. Perlu dilakukan proses pencarian titik referensi pada *pass* yang digunakan dan dicari titik-titik di sekitarnya dengan radius tertentu untuk membentuk *time series*. Perlakuan ini dimulai dengan pencarian data yang dekat dengan pesisir menggunakan kriteria jarak sebesar < 40 km dari pesisir dan dari stasiun pasang surut (Fenoglio-Marc, Braitenberg, dkk., 2012). Setelah itu, digunakan titik dari *cycle* pertama (001) sebagai titik referensi, dengan jumlah 22 titik untuk pesisir barat Lampung dan 8 titik di pesisir Banten (5 di utara dan 3 di selatan). Jarak rata-rata titik referensi di Lampung adalah 500 meter dengan jumlah data dalam waktu yaitu 300 (9 tahun), sedangkan di Banten adalah 10 km dengan data dalam waktu berjumlah 900 (17 tahun). Perbedaan ini ditujukan untuk melihat pengaruh jauh dan dekatnya data altimetri dengan stasiun pasang surut terhadap kesamaan pola yang ditemukan. Data hasil pengolahan parameter dan pengelompokan berdasarkan lokasi perlu diproses secara statistik untuk memastikan kualitasnya. Hal ini dipenuhi menggunakan seleksi *outlier* menggunakan indikator kualitas yang tersedia dalam setiap data (disebut *flag*), selang kepercayaan sebesar 95% (Birol dkk., 2021) dan menghilangkan pula data dengan nilai 'NaN' (*not-a-number*). Proses ini juga dilakukan pada data stasiun pasang surut untuk memastikan kualitas data yang digunakan.

Data dari parameter SLA dari setiap titik referensi pada satelit altimetri melalui proses perhitungan regresi linier di Persamaan 4 dengan y sebagai muka air laut, a yaitu nilai *offset* serta b sebagai kemiringan dari persamaan yang dihasilkan, dan Persamaan 5 (Pahlevi dkk., 2024) yang menggunakan b dan dikalikan jumlah hari dalam satu tahun (365 hari) sehingga didapatkan tren nilai kenaikan muka air laut setiap tahunnya dalam satuan milimeter (Nerem dkk., 2018). Kemudian, parameter TWLE dari satelit altimetri berbentuk *time series* yang sudah melalui *pre-processing* dan filter secara spasial, statistik, dan numerik diteruskan dengan perhitungan koefisien korelasi Pearson yang tertulis pada Persamaan 6 (Nadzir, 2024), dengan titik altimetri terdekat (x) dari setiap

stasiun pasang surut (y) sebagai titik yang digunakan yang mana sudah mengalami sinkronisasi dalam satuan waktu.

$$y = a + bt \quad (4)$$

$$SLR = b * 365 \quad (5)$$

$$r_{xy} = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2 (n \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (6)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

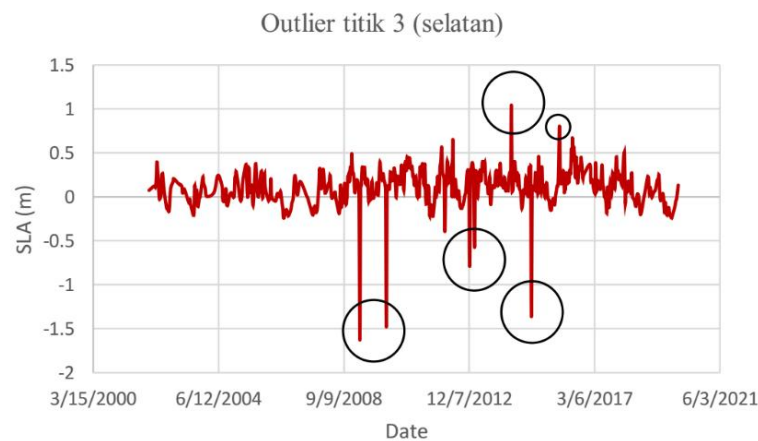
Hasil *pre-processing* sebagai bagian awal dari pengolahan data satelit altimetri yang dimulai dengan proses eksklusi *outlier* dengan ambang batas 2σ (Nadzir & Rahmadhani, 2024) menunjukkan rerata data yang tersisa sebesar 96,2% untuk area selatan Banten dan 92,5% di area utara Banten yang ditampilkan di Tabel 2. Perbedaan ini kecil terhadap asumsi distribusi normal (Grafarend, 2006) dan menegaskan bahwa altimetri memiliki tingkat presisi yang baik selama waktu pengamatan (Passaro dkk., 2018). Perbandingan antara lokasi utara dan selatan Banten memperlihatkan bahwa kondisi oseanografis tidak menjadi faktor penentu utama dari tingkat presisi dari data satelit altimetri. Banten utara, walaupun cenderung lebih tenang kondisi lautannya, memiliki jumlah *outlier* yang lebih besar dari selatan Banten dengan kondisi lautan yang lebih bergelombang. Hal ini mengindikasikan bahwa kedekatan ke daratan, batimetri dangkal, dan gangguan darat (mis. sedimen/rekla-masi) berpengaruh lebih kuat daripada kondisi gelombang terhadap kualitas titik pantai (Birol dkk., 2025). Salah satu hasil yang ditampilkan pada Gambar 4 menunjukkan keberadaan *outlier* yang dihilangkan melalui proses eksklusi *outlier* tersebut.

Selanjutnya, tren kenaikan muka air laut dihitung dari parameter SLA pada 8 titik referensi di perairan utara dan selatan Banten dan 22 di perairan barat Lampung terhadap elipsoid referensi menggunakan Persamaan 5. Tren yang dihasilkan mewakili kondisi muka air laut terhadap bidang referensi yang sama sepanjang waktu pengamatan, yaitu elipsoid referensi. Hasil di pesisir Lampung menunjukkan nilai tren rata-rata sebesar 5,46 mm per tahun dengan pembobotan yang seragam dan 5,33 mm per tahun dengan bobot yang selaras dengan jarak ke pesisir yang terlihat di Tabel 3. Selain itu, tren kenaikan muka air laut di pesisir selatan Banten adalah sebesar 2,84 mm per tahun dengan bobot seragam dan 2,93 mm per tahun dengan bobot yang berbanding terbalik dengan jarak ke pesisir, terdaftar secara detail pada Tabel 4. Kemudian, data di pesisir utara Banten menghasilkan tren sebesar 6,20 mm per tahun dengan bobot

seragam dan 6,04 mm per tahun dengan bobot yang selaras dengan jarak dari pantai, tampak pada Tabel 5 dan Gambar 5 sebagai salah satu contoh dari titik-titik tersebut. Skema pembobotan (seragam vs. berbasis jarak ke pantai) hanya mengubah hasil ~2,5%, menandakan bobot seragam cukup baik performanya (Gregory dkk., 2019).

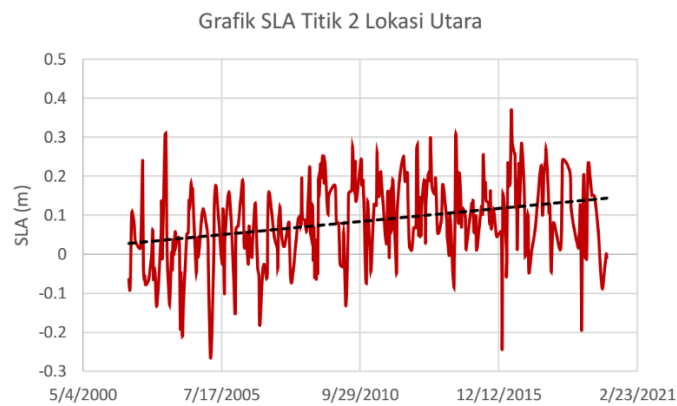
Tabel 2. Hasil eksklusi *outlier*

<i>Pesisir selatan Banten</i>				<i>Pesisir utara Banten</i>			
No	Data awal	Data setelah eksklusi	<i>Outlier</i> (%)	No	Data awal	Data setelah eksklusi	<i>Outlier</i> (%)
1	536	516	3,7	1	343	311	9,3
2	536	516	3,7	2	343	318	7,2
3	536	516	3,7	3	343	332	3,2
				4	344	314	8,4
				5	344	311	9,3

Gambar 4. Grafik *outlier* pada titik 3 di selatan Banten

Temuan dari ketiga lokasi menunjukkan bahwa daerah selatan Banten memiliki nilai yang sama dengan nilai rerata secara global, yaitu 2 mm per tahun, sedangkan daerah utara Banten dan barat Lampung memiliki tren sebesar 2-3x dari rerata global (5 mm dan 6 mm). Perbedaan tren yang signifikan antara pesisir utara dan selatan Banten ini konsisten dengan dinamika oseanografi dan karakteristik morfologi pantai di kedua lokasi tersebut. Pesisir selatan Banten yang berhadapan langsung dengan Samudera Hindia memiliki karakter gelombang tinggi dan sistem arus lintas pantai yang kuat, sehingga memungkinkan terjadinya pengadukan massa air dan redistribusi muka laut yang lebih aktif. Sebaliknya, perairan utara Banten berada di kawasan semi-tertutup yang terhubung dengan Laut Jawa dan memiliki banyak muara sungai besar seperti Ciujung dan Citarum. Keberadaan reklamasi, sedimentasi, serta pengaruh limpasan dari daratan dapat menyebabkan penumpukan massa air lokal yang dapat berkontribusi pada tren muka air laut yang tinggi seperti terlihat dalam hasil analisis (6,2 mm/tahun).

Studi sebelumnya oleh Bayhaqi dkk., (2022) juga menyebutkan bahwa kenaikan muka air laut di pesisir utara Jawa sebagian besar dikendalikan oleh gabungan antara proses oseanografi dan antropogenik. Secara detail, beberapa titik pengamatan di pesisir barat Lampung menunjukkan nilai tren yang relatif tinggi dibandingkan dengan reratanya, seperti pada titik 11 (9,2 mm/tahun) dan titik 12 serta 14 (8,6 mm/tahun). Nilai ini secara signifikan lebih besar dari rerata global dan patut dicermati lebih lanjut. Salah satu kemungkinan penyebab adalah keberadaan *eddy* (pusaran arus secara horizontal yang terjadi karena perbedaan tekanan atau suhu) lokal atau dinamika berskala menengah yang dapat mempengaruhi SLA dalam jangka pendek hingga menengah. Selain itu, proses lokal lainnya seperti *upwelling* (aliran massa laut yang naik secara vertikal karena perbedaan suhu atau tekanan) secara musiman, struktur batimetri yang landai, dan efek refleksi gelombang di sekitar teluk atau tanjung juga berpotensi meningkatkan ketidakstabilan muka laut, atau dalam kata lain membuat permukaan air laut menjadi lebih kasar.



Gambar 5. Regresi linier pada titik 2 di utara Banten

Tabel 3. Titik pengamatan di pesisir barat Lampung

Titik	Lintang [°]	Bujur [°]	Tren [mm/tahun]	Titik	Lintang [°]	Bujur [°]	Tren [mm/tahun]
1	-5,169	103,748	4,7	12	-5,719	103,550	8,6
2	-5,219	103,730	4,3	13	-5,761	103,532	5
3	-5,269	103,712	3,5	14	-5,819	103,513	8,6
4	-5,319	103,694	4,3	15	-5,869	103,495	4,2
5	-5,369	103,676	2	16	-5,919	103,477	3,9
6	-5,419	103,658	5,7	17	-5,969	103,459	3,4
7	-5,469	103,640	8,4	18	-6,019	103,441	6,3
8	-5,519	103,622	8,3	19	-6,069	103,423	5,1
9	-5,569	103,610	3,6	20	-6,119	103,405	4,2
10	-5,619	103,586	5,2	21	-6,169	103,387	4,6
11	-5,669	103,568	9,2	22	-6,219	103,369	7,1

Tabel 4. Titik pengamatan di pesisir selatan Banten

Titik	Tren [mm/tahun]	Interval [hari]	Bobot #1	Bobot #2
1	3,082			0,450
2	3,002	12,7	0,333	0,300
3	2,442			0,250

Tabel 5. Titik pengamatan di pesisir utara Banten

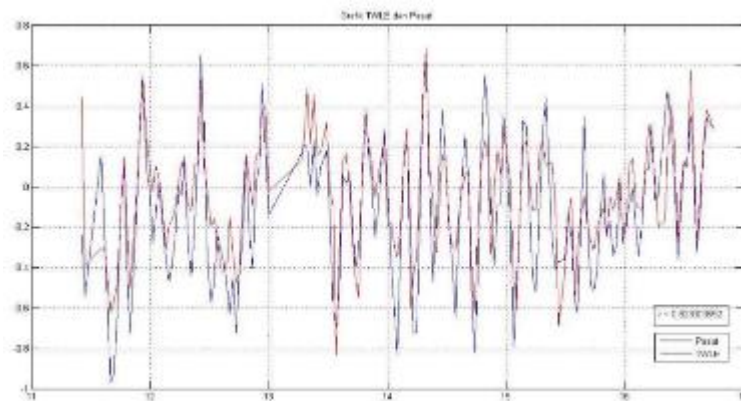
Titik	Tren [mm/tahun]	Interval [hari]	Bobot #1	Bobot #2
1	4,621	21,2		0,3
2	6,320	20,7		0,2
3	6,574	19,8	0,2	0,2
4	7,212	20,9		0,2
5	6,300	21,1		0,1

Data altimetri, sesuai dengan Persamaan 1 dan 2, memiliki referensi di atas bidang elipsoid dan sudah menghilangkan efek pasang surut (Ablain dkk., 2017). Persamaan 3 (perhitungan TWLE) digunakan dengan tujuan utama untuk membuat komponen yang terekam pada data altimetri sama dengan yang terekam pada data stasiun pasang surut. Tingkat korelasi dari perbandingan antara TWLE dengan data stasiun pasang surut digunakan sebagai parameter yang menunjukkan tingkat akurasi dari data altimetri. Nilai korelasi pada pesisir barat Lampung adalah 0,82 dengan titik yang berjarak 11 km dari pesisir yang tergambar pada Gambar 6, sedangkan data di pesisir selatan Banten dengan jarak 8,85 km dari pesisir memiliki nilai korelasi sebesar 0,93 yang terlihat di Gambar 7. Temuan serupa didapatkan di pesisir utara Banten dengan nilai korelasi sebesar 0,60 pada titik yang berjarak 16 km dari pesisir, digambarkan pada Gambar 8.

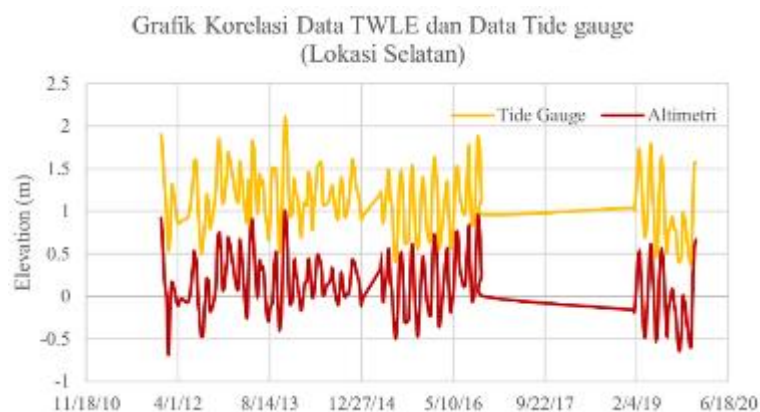
Ketiga lokasi memiliki nilai korelasi kuat (Nadzir & Irfansyah, 2024) yang menandakan bahwa data altimetri dengan parameter TWLE dapat digunakan sebagai komplemen dari data stasiun pasang surut untuk menghitung tren kenaikan muka air laut. Perbedaan nilai korelasi dari 3 lokasi ini berkaitan dengan jarak dari pesisir yang memiliki relasi proporsional (Passaro dkk., 2014). Meskipun nilai korelasi antara TWLE dan data stasiun pasang surut menunjukkan hubungan yang kuat, penting untuk dicatat bahwa data altimetri yang digunakan dalam estimasi TWLE hanya merepresentasikan perubahan muka laut relatif terhadap bidang elipsoid, tanpa mempertimbangkan pergerakan vertikal daratan seperti penurunan muka tanah (*land subsidence*) atau *uplift*. Hal ini menjadi relevan khususnya di wilayah pesisir utara Banten yang merupakan kawasan perkotaan yang padat dan industri besar, di mana studi sebelumnya menunjukkan adanya penurunan muka tanah signifikan akibat ekstraksi air tanah

(Chaussard dkk., 2013). Oleh karena itu, meskipun SLA dan TWLE menunjukkan tren kenaikan yang tinggi, informasi tersebut belum dapat sepenuhnya mencerminkan dampak relatif terhadap daratan kecuali jika dikombinasikan dengan data geodetik seperti GNSS. Dengan demikian, integrasi TWLE dan data pasang surut perlu dilengkapi dengan pengamatan vertikal daratan agar dapat memberikan gambaran yang komprehensif terhadap risiko banjir pesisir dan perencanaan adaptasi di wilayah tersebut.

Hasil tren kenaikan muka air laut yang lebih tinggi di wilayah pesisir barat Lampung dan utara Banten dibandingkan dengan selatan Banten memiliki beberapa implikasi penting dalam konteks dinamika lokal dan perencanaan adaptasi pesisir. Di pesisir barat Lampung, kemiringan batimetri yang landai memungkinkan akumulasi massa air laut lebih besar secara horizontal, meningkatkan sensitivitas daerah ini terhadap perubahan volume laut.



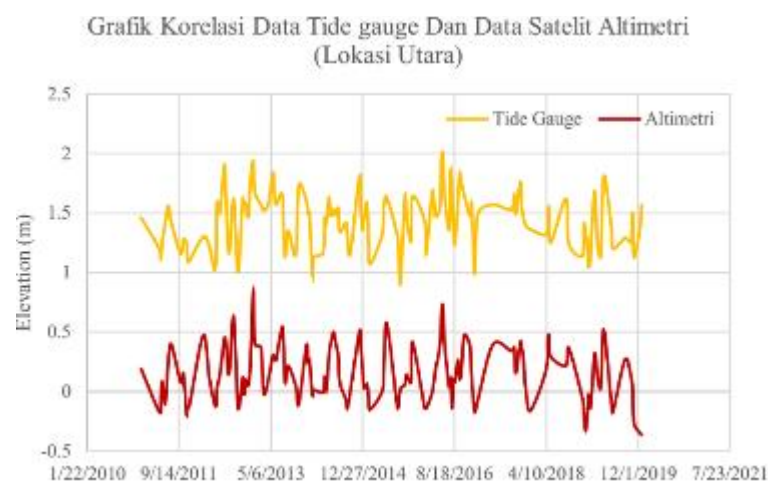
Gambar 6. Perbandingan TWLE di pesisir barat Lampung



Gambar 7. Perbandingan TWLE di pesisir selatan Banten

Sementara itu, di utara Banten, selain kondisi batimetri yang relatif datar, tekanan urbanisasi dan aktivitas industri juga memperparah dampak kenaikan muka laut, terutama bila dikombinasikan dengan penurunan muka tanah. Sebaliknya, pesisir

selatan Banten yang memiliki karakteristik oseanografis dengan gelombang tinggi dan batimetri curam menunjukkan tren kenaikan yang mendekati rerata global, menunjukkan kemungkinan efek redaman alami terhadap akumulasi massa air di dekat pantai. Perbedaan spasial ini menekankan pentingnya pendekatan berbasis lokasi dalam interpretasi data altimetri dan dalam merumuskan kebijakan mitigasi, seperti prioritas perlindungan wilayah dataran rendah, penguatan infrastruktur pesisir, dan integrasi data oseanografi-batimetri dalam analisis kerentanan. Selain itu, tren yang menunjukkan nilai dua kali lipat dari rerata global dapat menjadi sinyal awal terhadap potensi percepatan dampak iklim di wilayah pesisir Indonesia bagian barat.



Gambar 8. Perbandingan TWLE di pesisir utara Banten

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa data satelit altimetri Jason-1, Jason-2, dan Jason-3 mampu mendeteksi tren kenaikan muka air laut yang signifikan di wilayah pesisir Lampung dan Banten, dengan tren sebesar 5,46 mm/tahun di Lampung, di pesisir selatan Banten sebesar 2,84 mm/tahun, dan di pesisir utara Banten sebesar 6,20 mm/tahun. Validasi menggunakan parameter TWLE menunjukkan korelasi yang sangat baik dengan data stasiun pasang surut Krui dan Binuangeun, sebesar 0,82 dan 0,93, menunjukkan bahwa data altimetri dapat diandalkan sebagai alat pemantauan jangka panjang, terutama di lokasi yang kekurangan stasiun pasang surut. Secara komparatif, Banten selatan mendekati kisaran rerata global modern (~ 3 mm/tahun), sedangkan Lampung barat dan Banten utara berada $\sim 2\times$ lebih tinggi, konsisten dengan pengaruh batimetri landai dan kondisi oseanografinya yang berupa teluk semi-tertutup dan muara besar. Hal ini menunjukkan bahwa Banten utara dan Lampung barat berisiko lebih tinggi terhadap banjir rob, sementara Banten selatan lebih relevan pada isu gelombang.

SARAN

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pemanfaatan data satelit untuk pengamatan jangka panjang. Studi lanjutan di wilayah pesisir lainnya dengan karakteristik oseanografi dan batimetri yang berbeda disarankan sebagai langkah selanjutnya. Ke depan, integrasi dengan data satelit gravimetri (seperti GRACE) atau metode GNSS-IR dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perubahan muka air laut dan komponen-komponen penyebabnya di wilayah tropis seperti Indonesia.

REFERENSI

- 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 A. Cazenave, N. Champollion, F. Paul, & J. Benveniste (Ed.), *Integrative Study of the Mean Sea Level and Its Components* (Vol. 58, hlm. 9–33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56490-6_2
- Achiari, H., Nurisman, N., Ahmad, A. L., & Setiawati, E. (2021). The Coastal Hydrodynamics Analysis in The Lampung Bay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 830(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/830/1/012037>
- Ariana, D., Kusmana, C., & Setiawan, Y. (2017). STUDY OF SEA LEVEL RISE USING SATELLITE ALTIMETRY DATA IN THE SEA OF DUMAI, RIAU, INDONESIA. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 4(1), 75. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.4.1.75-82>
- Bayhaqi, A., Wisha, U. J., & Iswari, M. Y. (2022). The Evidence of Coastline Changes in Banten Bay, Indonesia. *Trends in Sciences*, 19(4), Article 4. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.2198>
- Benveniste, J., Cazenave, A., Vignudelli, S., Fenoglio-Marc, L., Shah, R., Almar, R., Andersen, O., Birol, F., Bonnefond, P., Bouffard, J., Calafat, F., Cardellach, E., Cipollini, P., Le Cozannet, G., Dufau, C., Fernandes, M. J., Frappart, F., Garrison, J., Gommenginger, C., ... Wöppelmann, G. (2019). Requirements for a Coastal Hazards Observing System. *Frontiers in Marine Science*, 6, 348. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00348>
- Birol, F., Bignalet-Cazalet, F., Cancet, M., Daguzé, J.-A., Fkaier, W., Fouchet, E., Léger, F., Maraldi, C., Niño, F., Pujol, M.-I., & Tran, N. (2025). Understanding uncertainties in the satellite altimeter measurement of coastal sea level: Insights from a round-robin analysis. *Ocean Science*, 21(1), 133–150. <https://doi.org/10.5194/os-21-133-2025>
- Birol, F., Léger, F., Passaro, M., Cazenave, A., Niño, F., Calafat, F. M., Shaw, A., Legeais, J.-F., Gouzenes, Y., Schwatke, C., & Benveniste, J. (2021). The X-TRACK/ALES multi-mission processing system: New advances in altimetry towards the coast. *Advances in Space Research*, 67(8), 2398–2415. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.049>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).* <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Cao, A., Esteban, M., Valenzuela, V. P. B., Onuki, M., Takagi, H., Thao, N. D., & Tsuchiya, N. (2021). Future of Asian Deltaic Megacities under sea level rise and land subsidence: Current adaptation pathways for Tokyo, Jakarta, Manila, and Ho Chi Minh City. *Current*

- Opinion in Environmental Sustainability*, 50, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.02.010>
- Cazenave, A., Gouzenes, Y., Lancelot, L., Birol, F., Legér, F., Passaro, M., Calafat, F. M., Shaw, A., Niño, F., Legeais, J. F., Oelmann, J., & Benveniste, J. (2024). *New network of virtual altimetry stations for measuring sea level along the world coastlines* [Dataset]. [object Object]. <https://doi.org/10.17882/74354>
- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H., & Hong, S.-H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>
- Chen, J., Fenoglio, L., Kusche, J., Liao, J., Uyanik, H., Nadzir, Z. A., & Lou, Y. (2023). Evaluation of Sentinel-3A altimetry over Songhua river Basin. *Journal of Hydrology*, 618, 129197. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129197>
- Fenoglio-Marc, L., Braitenberg, C., & Tunini, L. (2012). Sea level variability and trends in the Adriatic Sea in 1993–2008 from tide gauges and satellite altimetry. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 40–41, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.05.014>
- Fenoglio-Marc, L., Schöne, T., Illigner, J., Becker, M., Manurung, P., & Khafid. (2012). Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region. *Marine Geodesy*, 35(sup1), 137–150. <https://doi.org/10.1080/01490419.2012.718682>
- Grafarend, E. W. (2006). *Linear and nonlinear models: Fixed effects, random effects, and mixed models*. de Gruyter.
- Gregory, J. M., Griffies, S. M., Hughes, C. W., Lowe, J. A., Church, J. A., Fukimori, I., Gomez, N., Kopp, R. E., Landerer, F., Cozannet, G. L., Ponte, R. M., Stammer, D., Tamisiea, M. E., & Van De Wal, R. S. W. (2019). Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1251–1289. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09525-z>
- Handoko, E. Y., Fernandes, M., & Lázaro, C. (2017). Assessment of Altimetric Range and Geophysical Corrections and Mean Sea Surface Models—Impacts on Sea Level Variability around the Indonesian Seas. *Remote Sensing*, 9(2), 102. <https://doi.org/10.3390/rs9020102>
- Hartanto, M. T., Effendi, I., Prartono, T., Puradiredja, S. P., Lestari, D. F., Susanti, S., & Salsabila, A. (2024). KONDISI OSEANOGRAFI DAN KESESUAIAN LOKASI BUDIDAYA LOBSTER DI PERAIRAN TELUK PIDADA, LAMPUNG. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.24319/jtpk.15.285-297>
- Kismawardhani, R. A., Wirastraya, A., & Berlianty, D. (2018). Sea Level Rise in The Java Sea Based on Altimetry Satellites Data Over 1993-2015. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 165(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/165/1/012006>
- Lumban-Gaol, J., Adrian, D., Vignudelli, S., Leben, Robert. R., Wayan Nurjaya, I., Osawa, T., Manurung, P., & Arhatin, R. E. (2018). An assessment of a coastal altimetry data product in the Indonesian Waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 176(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/176/1/012034>
- Nadzir, Z. A. (2017). *Coastal Sea State Bias: Correcting Coastal Sea Level by Studying the Relation between Wind, Waves, and the Radar Signals*. [Master Thesis]. Technische Universität München.
- Nadzir, Z. A. (2024). STUDI KOMPARASI UNTUK AS-BUILT SURVEY DAN PENGAWASAN DEFORMASI DARI GEDUNG: METODE TERESTRIS VS METODE SATELIT DI GEDUNG KULIAH UMUM (GKU) INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA. *Journal of Science and Applicative Technology*, 8(1), 65. <https://doi.org/10.35472/jsat.v8i1.1635>
- Nadzir, Z. A., & Adil, I. (2024). Assessment of Low-Cost Tide Gauges to Meet GLOSS 1-cm Precision and Accuracy Standards: A Case Study on Pramuka Island, Indonesia. *Forum Geografi*, 38(2), 222–230. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v38i2.5182>
- Nadzir, Z. A., & Irfansyah, M. (2024). Using Geodetic Methods in Road Construction Planning: To What Extent Will It Be Effective? *Journal of Infrastructure Policy and Management*, 7(2), 167–180. <https://doi.org/10.35166/jipm.v7i2.58>

- Nadzir, Z. A., & Rahmadhani, N. (2024). EVALUASI DAN KOMPARASI DARI MODEL ANOMALI GAYA BERAT di LAUTAN INDONESIA. *Jurnal Sains Informasi Geografi*, 7(2), 99. <https://doi.org/10.31314/jsig.v7i2.3073>
- Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., & Mitchum, G. T. (2018). Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(9), 2022–2025. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328(5985), 1517–1520. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>
- Nicholls, R. J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A. T., Meyssignac, B., Hanson, S. E., Merkens, J.-L., & Fang, J. (2021). A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, 11(4), 338–342. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>
- Pahlevi, A., Syafarianty, A., Susilo, S., Lumban-Gaol, Y., Putra, W., Triarahmadhana, B., Bramanto, B., Muntaha, R., El Fadhila, K., Ladivanov, F., Amrossalma, H., Islam, L., Novianto, D., Huda, S., Wismadi, T., Efendi, J., Ramadhan, A., Wijaya, D., Prijatna, K., & Pramono, G. (2024). Geoid Undulation Model as Vertical Reference in Indonesia. *Scientific Data*, 11(1), 822. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03646-w>
- Passaro, M., Cipollini, P., Vignudelli, S., Quartly, G. D., & Snaith, H. M. (2014). ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 145, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.008>
- Passaro, M., Dinardo, S., Quartly, G. D., Snaith, H. M., Benveniste, J., Cipollini, P., & Lucas, B. (2016). Cross-calibrating ALES Envisat and CryoSat-2 Delay-Doppler: A coastal altimetry study in the Indonesian Seas. *Advances in Space Research*, 58(3), 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.04.011>
- Passaro, M., Nadzir, Z. A., & Quartly, G. D. (2018). Improving the precision of sea level data from satellite altimetry with high-frequency and regional sea state bias corrections. *Remote Sensing of Environment*, 218, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.007>
- Sianturi, O. R., Widada, S., Prasetyawan, I. B., & Novico, F. (2013). Pemodelan Hidrodinamika Sederhana Berdasarkan Data Hidro-Oseanografi Lapangan di Teluk Lampung. *Journal of Oceanography*, 2(3), Article 3.
- Sidabutar, Y. L., Sasmito, B., & Amarrohman, F. J. (2016). ANALISIS SEA LEVEL RISE DAN KOMPONEN PASANG SURUT DENGAN MENGGUNAKAN DATA SATELIT ALTIMETRI JASON-2. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2016.10596>
- Sinurat, M. E., Nababan, B., Gaol, J. L., Manik, H. M., & Idris, N. H. (2021). WAVEFORM CLASSIFICATION AND RETRACKING OF JASON-2 AND JASON-3 IN HALMAHERA SEA. *Jurnal Teknologi*, 83(3), 107–117. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v83.15125>
- Sprintall, J., Wijffels, S., Gordon, A. L., Ffield, A., Molcard, R., Susanto, R. D., Soesilo, I., Sopaheluwakan, J., Surachman, Y., & van Aken, H. M. (2004). INSTANT: A new international array to measure the Indonesian Throughflow. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(39), 369–376. <https://doi.org/10.1029/2004EO390002>
- Stammer, D., & Cazenave, A. (2017). *Satellite Altimetry over Oceans and Land Surfaces* (D. Stammer & A. Cazenave, Ed.; 1 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315151779>
- Tamba, A. Y. P., Sasmito, B., & Haniah, H. (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), Article 2. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2016.11524>
- Wisha, U. J., Husrin, S., & Prihantono, J. (2015). Hydrodynamics Banten Bay During Transitional Seasons (August-September) (Hidrodinamika Perairan Teluk Banten Pada Musim Peralihan (Agustus–September)). *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 20(2), 101. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.20.2.101-112>
- Woodworth, P. L. (1991). The Permanent Service for Mean Sea Level and the Global Sea Level Observing System. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 699–710. JSTOR.