



Pemantauan Perubahan Garis Pantai Terkait Kemunculan Struktur Pagar Laut di Pesisir Utara Tangerang dengan Citra Satelit Multitemporal

*Monitoring of Coastline Changes Due to Sea Fences on the North Coast of
Tangerang with Multitemporal Satellite Imagery*

Roni Sewiko¹

Departemen Teknik Kelautan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang, Badan Riset dan Pengembangan Sumber daya Manusia Kelautan dan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Karawang, Indonesia

Program Doktor Sains Kebumihan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Sekolah Pascasarjana Institut Teknologi Bandung

Artikel Masuk : 13 Februari 2025

Artikel Diterima : 23 April 2026

Tersedia Online : 31 Agustus 2026

Abstrak: Pesisir utara Kabupaten Tangerang mengalami dinamika garis pantai yang kompleks dan pada periode terkini beririsan secara spasial-temporal dengan kemunculan struktur pagar laut di zona pesisir. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan garis pantai jangka panjang dan jangka pendek serta menilai keterkaitannya dengan perkembangan struktur pagar laut menggunakan citra satelit multitemporal berbasis Google Earth Engine (GEE). Ekstraksi garis pantai dilakukan menggunakan *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) dan *Canny Edge Detection*, sedangkan analisis temporal memanfaatkan citra Sentinel-2 dan *Landsat*, statistik deskriptif, uji perbedaan, regresi OLS, deteksi anomali, serta model deret waktu ARIMA dan *Prophet*. Hasil menunjukkan tren abrasi dominan selama 1990–2015 dengan penyusutan eksposur pantai hingga sekitar 86,5% dari kondisi awal, namun sejak 2023 terjadi peningkatan eksposur pantai yang mencapai 95,3% pada 2024. Pada periode yang sama, panjang struktur pagar laut meningkat dari sekitar 7,1 km pada 2023 menjadi 28,1 km pada 2024. Uji statistik menunjukkan perbedaan signifikan dalam dinamika garis pantai sebelum dan sesudah Mei 2024 ($p < 0,05$), yang mengindikasikan pergeseran pola perubahan pesisir setelah kemunculan struktur tersebut. Validasi perubahan tutupan lahan juga memperlihatkan penyusutan kategori badan air dan peningkatan kelas non-perairan pada area yang berdekatan dengan perkembangan pagar laut. Temuan ini menunjukkan keterkaitan spasial-temporal yang bersifat indikatif antara perkembangan struktur pagar laut dan perubahan dinamika pesisir.

Kata Kunci: Citra Satelit, *Google Earth Engine*, MNDWI, Pagar Laut, Perubahan Garis Pantai, Sentinel-2

¹ Korespondensi Penulis: Departemen Teknik Kelautan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang, Badan Riset dan Pengembangan Sumberdaya Manusia dan Kelautan dan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Indonesia
Email: ronimartech@gmail.com

How to Cite

Sewiko, R. (2026). Pemantauan Perubahan Garis Pantai Terkait Kemunculan Struktur Pagar Laut di Pesisir Utara Tangerang dengan Citra Satelit Multitemporal. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 14(2), 119-137. <https://doi.org/10.14710/jwl.14.2.119-137>

Abstract: The northern coast of Tangerang Regency has experienced complex shoreline dynamics, and in the most recent period these changes spatially and temporally coincide with the emergence of sea-fence structures in the coastal zone. This study aims to analyze long-term and short-term shoreline changes and assess their relationship with the development of sea-fence structures using multitemporal satellite imagery processed in Google Earth Engine (GEE). Shoreline extraction was conducted using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) and Canny Edge Detection, while temporal analysis employed Sentinel-2 and Landsat imagery, descriptive statistics, difference tests, OLS regression, anomaly detection, and ARIMA and Prophet time-series models. The results indicate a dominant abrasion trend during 1990–2015, with coastal exposure decreasing to about 86.5% of its initial condition, followed by an increase since 2023, reaching 95.3% in 2024. During the same period, the identified length of sea-fence structures increased from about 7.1 km in 2023 to 28.1 km in 2024. Statistical tests show significant differences in shoreline dynamics before and after May 2024 ($p < 0.05$), indicating a shift in coastal change patterns after the emergence of the structures. Land-cover validation also shows a reduction in the water category and an increase in non-water classes in areas adjacent to the expanding sea-fence structures. These findings indicate an indicative spatial-temporal relationship between sea-fence development and changes in coastal dynamics.

Keywords: Satellite Imagery, Google Earth Engine, MNDWI, Sea Fence, Coastline Change, Sentinel-2

Pendahuluan

Pesisir utara Kabupaten Tangerang memiliki nilai ekosistem pesisir yang tinggi dan menjadi sumber penghidupan bagi masyarakat pesisir, terutama nelayan. Namun, wilayah ini menghadapi abrasi yang semakin meningkat akibat perubahan arus laut, pengurangan suplai sedimen alami, dan aktivitas antropogenik. Sejak 2023, pemasangan pagar laut sebagai struktur buatan dilakukan secara masif untuk mengurangi abrasi. Meski bertujuan melindungi garis pantai, dampaknya terhadap dinamika pesisir, terutama redistribusi sedimen dan perubahan morfologi pantai, masih belum sepenuhnya dipahami.

Berbagai penelitian telah mengkaji dampak struktur pantai seperti pemecah ombak, *groin*, dan tanggul terhadap pola akresi dan abrasi garis pantai (Leont'yev, 2007; Sundar et al., 2021). Struktur ini sering kali menyebabkan redistribusi sedimen yang tidak merata, menimbulkan dampak lingkungan yang tidak diinginkan. Studi di Pelabuhan Chennai menunjukkan bahwa *groin* menyebabkan akresi di sisi hulu, tetapi erosi di sisi hilir akibat berkurangnya pasokan sedimen (Sundar et al., 2021). Penelitian lain menunjukkan bahwa pagar laut dapat membantu menstabilkan sedimen di satu lokasi, tetapi juga berisiko mengganggu aliran sedimen alami dan merusak ekosistem pesisir (Grafals-Soto & Nordstrom, 2009).

Dampak pagar laut terhadap garis pantai dan dinamika sedimentasi merupakan bidang kajian yang penting, mengingat struktur ini dapat mengubah keseimbangan alami transportasi sedimen. Studi di Haikou Bay menunjukkan bahwa pulau buatan menyebabkan akumulasi sedimen di area terlindung dari gelombang, sementara efeknya terhadap garis pantai berkurang seiring waktu (Zhu et al., 2024). Di Damietta, pembangunan pelabuhan mengurangi transportasi sedimen sejajar pantai hingga 18% secara keseluruhan dan 42% dalam transportasi bersih, menunjukkan perubahan substansial akibat intervensi manusia (Ibrahim et al., 2024). Studi lain di Brasil menemukan bahwa *jetty* dan *groin* dapat memperburuk erosi, sementara penelitian di India menunjukkan bahwa struktur keras dapat menghasilkan laju erosi rata-rata -5,7 m/tahun dan akresi +4,92 m/tahun (Tebechrani & Pereira, 2024; Sundar et al., 2022).

Sementara itu, desain optimal pada struktur setengah lingkaran dapat mengurangi erosi dan meningkatkan akumulasi sedimen saat terjadi badai (Vieira et al., 2024).

Dalam konteks wilayah studi, kemunculan pagar laut di pesisir utara Kabupaten Tangerang perlu dipahami terlebih dahulu sebagai proses intervensi fisik pada ruang laut pesisir yang berkembang dalam waktu relatif singkat. Berdasarkan identifikasi citra satelit multitemporal dalam penelitian ini, struktur linier di zona perairan dangkal mulai terdeteksi secara terbatas pada tahun 2023 dan menunjukkan perkembangan spasial yang jauh lebih masif pada tahun 2024. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa pemagaran bukan merupakan fenomena sesaat, melainkan proses bertahap yang berpotensi memengaruhi konfigurasi ruang pesisir, pola aliran air, dan redistribusi sedimen. Dari sisi tata kelola, keberadaan struktur semacam ini juga tidak dapat dilepaskan dari aspek legalitas karena pemanfaatan ruang pada dasarnya harus memperhatikan kesesuaian kegiatan pemanfaatan ruang dan mekanisme pengendaliannya sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Penataan Ruang, sedangkan penyelenggaraan penataan ruang laut diatur lebih lanjut dalam Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 28 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Penataan Ruang Laut (Pemerintah Republik Indonesia, 2021; Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia, 2021). Dalam kasus Tangerang, Kementerian Kelautan dan Perikanan menyatakan bahwa kegiatan pemagaran laut tersebut dihentikan karena diduga tidak memiliki izin dasar Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang Laut (KKPRL), dan tindakan penyegelan serta pembongkarannya dinyatakan telah dilakukan sesuai ketentuan yang berlaku (Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia, 2025a, 2025b). Dengan demikian, pagar laut dalam penelitian ini dipahami tidak hanya sebagai struktur fisik yang berpotensi berkaitan dengan dinamika garis pantai, tetapi juga sebagai bentuk pemanfaatan ruang laut yang legalitasnya dipersoalkan secara administratif.

Meskipun berbagai studi telah membahas perubahan garis pantai akibat struktur buatan, belum ada penelitian spesifik mengenai keterkaitan antara kemunculan struktur pagar laut yang legalitasnya dipersoalkan di pesisir Tangerang dan dinamika garis pantai dengan pendekatan penginderaan jauh berbasis data satelit multitemporal. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi kekosongan tersebut dengan menggunakan citra Sentinel-2 dalam platform *Google Earth Engine* (GEE) serta pendekatan *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) untuk menganalisis perubahan garis pantai sebelum dan sesudah kemunculan struktur pagar laut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi kebijakan pengelolaan pesisir yang lebih baik dalam mengatasi dampak negatif struktur buatan yang tidak dirancang dengan mempertimbangkan dinamika lingkungan secara menyeluruh.

Metode

Metode penelitian ini disusun dalam beberapa tahapan analisis sebagaimana alur kerja utama penelitian, namun untuk memperjelas fokus kajian, tahapan tersebut dikelompokkan ke dalam dua kategori besar, yaitu analisis garis pantai dan analisis terkait struktur pagar laut.

2.1. Analisis Garis Pantai

a) *Definisi Wilayah Analisis (Region of Interest/ROI)*

Analisis garis pantai dilakukan dalam batas administratif Kabupaten Tangerang (RBI 2024), yang didefinisikan sebagai *Feature Collection* di GEE. Untuk memastikan cakupan

yang memadai terhadap dinamika garis pantai, diterapkan bufer sejauh 50 meter pada ROI. Bufer ini dipilih untuk memberikan ruang yang cukup dalam mengidentifikasi perubahan garis pantai. Wilayah ini terletak dalam kisaran koordinat sekitar 106.35°E hingga 106.85°E dan -6.05°S hingga -6.50°S.

b) *Akuisisi dan Praproses Citra Sentinel-2*

Citra reflektansi permukaan Sentinel-2 (COPERNICUS/S2_SR) digunakan karena resolusi spasial yang tinggi (10–30 m) dan kesesuaiannya untuk analisis badan air (Drusch et al., 2012). Dibandingkan dengan *Landsat*, Sentinel-2 memiliki keunggulan dalam resolusi spasial yang lebih tinggi (10 m pada pita visibel dan NIR) dibandingkan *Landsat* 8 dan 9 yang memiliki resolusi 30 m. Keunggulan ini memungkinkan deteksi perubahan garis pantai yang lebih presisi, terutama dalam lingkungan pesisir yang dinamis. Namun, *Landsat* tetap digunakan untuk analisis jangka panjang karena menyediakan data sejak 1990, yang penting untuk memahami tren perubahan garis pantai dalam skala dekadal. Data set dipilih berdasarkan tiga kriteria: (i) pemfilteran spasial untuk memilih citra dalam ROI, (ii) seleksi temporal berdasarkan tanggal mulai dan akhir yang ditentukan, dan (iii) pemfilteran awan untuk menghindari citra dengan lebih dari 30% tutupan awan. Citra kemudian diolah dengan komposit median untuk mengurangi kebisingan dan variabilitas atmosfer (Zhang et al., 2022). Dengan pendekatan ini, Sentinel-2 digunakan untuk deteksi perubahan garis pantai dalam resolusi tinggi sejak 2017, sementara *Landsat* digunakan untuk melihat tren jangka panjang sejak 1990 dengan metode yang konsisten meskipun resolusinya lebih rendah.

Tabel 1. Band Sentinel-2 yang digunakan dalam penelitian dan karakteristik spektralnya

Nama	Skala	Resolusi Spasial	Panjang Gelombang	Deskripsi
B2	0.0001	10 meter	496.6nm (S2A) / 492.1nm (S2B)	Blue
B3	0.0001	10 meter	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Green
B4	0.0001	10 meter	664.5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Red
B8	0.0001	10 meter	835.1nm (S2A) / 833nm (S2B)	NIR
B11	0.0001	20 meter	1613.7nm (S2A) / 1610.4nm (S2B)	SWIR

Sumber : Diadaptasi dari Google for Developers, *Earth Engine Data Catalog: Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (SR)*, 2025

c) *Perhitungan MNDWI untuk Ekstraksi Air*

MNDWI dihitung untuk meningkatkan perbedaan antara fitur air dan non-air. Rumus yang digunakan adalah:

$$MNDWI = \frac{Green (B3) - SWIR (B11)}{Green (B3) + SWIR (B11)} \quad (1)$$

dimana B3 mewakili pita hijau dan B11 pita inframerah gelombang pendek (SWIR) dari Sentinel-2 (Xu, 2006). Pemilihan MNDWI dibandingkan dengan NDWI didasarkan pada kemampuannya dalam meningkatkan deteksi badan air pada lingkungan pesisir yang memiliki tutupan sedimen tinggi, yang umum ditemukan di daerah penelitian ini.

Nilai ambang batas awal MNDWI > 0.1 diterapkan untuk mengklasifikasikan badan air, dengan piksel yang memiliki nilai di atas ambang ini dianggap sebagai air. Namun, untuk meningkatkan akurasi klasifikasi, nilai ambang ini dikalibrasi ulang dengan metode validasi visual menggunakan citra resolusi tinggi dari *Google Earth* serta perbandingan dengan data set garis pantai Peta RBI. Validasi klasifikasi MNDWI dilakukan menggunakan

50 titik kontrol visual yang terdiri atas 25 titik air dan 25 titik non-air. Titik kontrol dipilih pada area yang relatif homogen berdasarkan interpretasi citra resolusi tinggi untuk meminimalkan ambiguitas pada zona transisi darat-air. Evaluasi dilakukan menggunakan *confusion matrix* untuk menghitung *overall accuracy*, nilai kappa, *producer accuracy*, dan *user accuracy*. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi kesalahan klasifikasi, terutama pada daerah transisi antara air dan daratan yang mungkin dipengaruhi oleh efek atmosfer atau gangguan vegetasi pesisir.

d) Deteksi Garis Pantai Menggunakan Algoritma Edge Detection

Untuk mengekstraksi garis pantai dari masker air yang dihasilkan oleh MNDWI, digunakan algoritma *Canny Edge Detection* (Canny, 1986) dengan skrip sebagai berikut :

```
var cannyEdges = ee.Algorithms.CannyEdgeDetector({ image: mndwi,
  edge detection threshold: 0.1,
  sigma: 1.2 // Parameter untuk Gaussian smoothing });
```

Teknik ini mendeteksi transisi antara air dan daratan dengan mengidentifikasi daerah dengan gradien tinggi. Tepi yang terdeteksi kemudian dipangkas sesuai ROI dan dikonversi menjadi raster biner yang menggambarkan fitur garis pantai. Algoritma ini dipilih karena efektivitasnya dalam mendeteksi batas tepi yang jelas antara air dan daratan. Hasil deteksi tepi diproses lebih lanjut dengan teknik *smoothing* untuk mengurangi kebisingan yang dapat memengaruhi akurasi ekstraksi garis pantai.

e) Konversi Fitur Garis Pantai ke Data Vektor

Raster garis pantai biner yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi data vektor menggunakan fungsi *reduceToVectors()* di GEE. Proses ini mengubah garis pantai yang terdeteksi menjadi fitur poligon, yang kemudian disederhanakan menggunakan operasi geometri untuk meningkatkan akurasi. Vektor garis pantai ini diberi label dengan tanggal akuisisi yang sesuai untuk analisis temporal. Data referensi garis pantai dari Peta Rupa Bumi Indonesia (Peta RBI) digunakan untuk mendukung validasi ekstraksi garis pantai, meskipun ini hanya berfungsi sebagai referensi dan tidak melibatkan validasi lapangan.

f) Ekspor Data dan Transformasi Proyeksi

Untuk memfasilitasi analisis geospasial lebih lanjut, vektor garis pantai yang telah diekstraksi diekspor sebagai *file shapefile*, sementara citra komposit MNDWI disimpan sebagai *file GeoTIFF*. Agar kompatibel dengan *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), sistem referensi koordinat (CRS) diubah ke UTM Zona 48S (EPSG:32748), proyeksi berbasis meter yang cocok untuk studi garis pantai (Thieler et al., 2009).

g) Analisis Perubahan Garis Pantai Jangka Panjang

Karena data set COPERNICUS/S2_SR terbatas hingga tahun 2017, khusus untuk mengetahui tren jangka panjang, digunakan metode NDWI menggunakan LANDSAT/LT04/C02/T1_L2, LANDSAT/LT05/C02/T1_L2 dan LANDSAT/LT07/C02/T1_L2 untuk analisis di bawah tahun 2021 dan LANDSAT/LC08/C02/T1_L2 serta LANDSAT/LC09/C02/T1_L2 untuk analisis dari tahun 2021. Luas badan air diperkirakan menggunakan perhitungan area piksel dan dikonversi ke kilometer persegi (km²). Analisis temporal pergeseran badan perairan menggunakan fungsi *ui.Chart.feature.byFeature()* untuk memvisualisasikan evolusi garis pantai dari waktu ke waktu. Penurunan yang tajam dalam luas air dapat menunjukkan erosi pantai,

sementara peningkatan menunjukkan akresi sedimen atau kegiatan reklamasi lahan (Luijendijk et al., 2018). Periode waktu yang dikaji meliputi tiga kategori:

- (i) tren jangka panjang (30 tahun, 1990-2025);
- (ii) pola musiman dekadal (10 tahun), dan
- (iii) perbandingan antara satu tahun terakhir sebelum dan setelah Mei 2024 untuk mengevaluasi potensi dampak dari pemasangan struktur pagar laut yang telah dilaporkan.

2.2. Analisis Statistik dan Evaluasi Model

Tahap ini digunakan untuk mengevaluasi keterkaitan temporal antara perubahan garis pantai dan kemunculan struktur pagar laut. Analisis dilakukan berdasarkan data *Mean Distance* garis pantai dari 10 Maret 2023 hingga 25 Oktober 2024, mengikuti ketersediaan citra satelit pada wilayah studi.

Analisis dimulai dengan statistik deskriptif untuk menggambarkan sebaran data, meliputi nilai rata-rata, minimum, maksimum, standar deviasi, median, dan kuartil. Selanjutnya dilakukan uji normalitas untuk menentukan pendekatan statistik yang sesuai. Perbedaan perubahan garis pantai sebelum dan sesudah Mei 2024 diuji menggunakan uji-t apabila data terdistribusi normal, atau *Mann-Whitney U test* apabila distribusinya tidak normal.

Untuk mengidentifikasi pola perubahan yang bersifat tidak biasa, dilakukan deteksi anomali menggunakan metode *Z-score* dan *Interquartile Range* (IQR). Selain itu, tren jangka pendek dan arah perubahan dianalisis menggunakan regresi OLS serta regresi sederhana berbasis waktu. Perubahan mendadak pada pola deret waktu diidentifikasi menggunakan *Change Point Detection* (CPD) dengan algoritma PELT, sehingga periode perubahan signifikan dapat dikenali secara lebih sistematis.

Sebagai evaluasi proyektif, digunakan model deret waktu ARIMA dan *Prophet* untuk melihat kecenderungan perubahan garis pantai ke depan. Kinerja model dibandingkan menggunakan nilai RMSE. Untuk memperkuat interpretasi perubahan lingkungan pesisir, analisis ini dilengkapi dengan validasi indikatif menggunakan perubahan tutupan lahan dari data set *Google Dynamics World V1*, khususnya untuk mengamati perubahan kategori perairan, lahan kosong, dan vegetasi pesisir pada area yang berdekatan dengan struktur pagar laut.

Penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menyimpulkan hubungan kausal langsung antara pagar laut dan perubahan garis pantai, melainkan untuk menilai keterkaitan spasial-temporal yang bersifat indikatif antara kemunculan struktur pagar laut dan dinamika pesisir yang teramati selama periode pengamatan.

Hasil dan Pembahasan

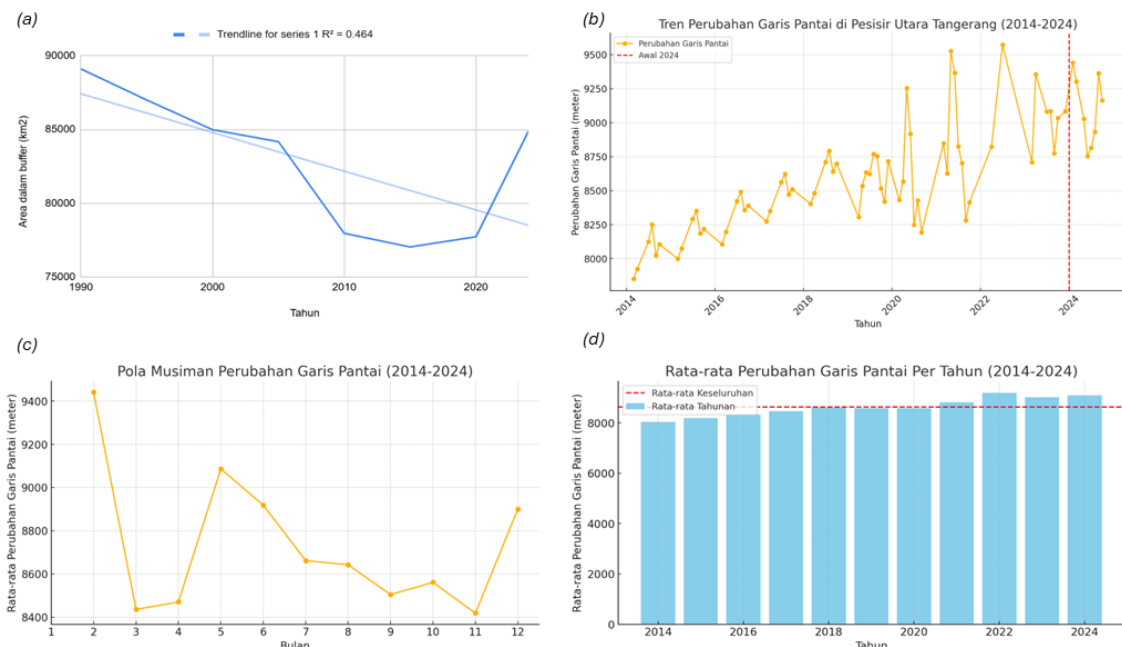
1. *Tren Perubahan Garis Pantai Jangka Panjang (tridekadal)*

Metode utama dalam analisis ini menggunakan NDWI (*Normalized Difference Water Index*) berbasis citra *Landsat* untuk mendeteksi perubahan luas eksposur pantai di dalam *buffer* 2 km dari garis pantai. Dengan menerapkan *masking* awan menggunakan *QA_PIXEL bands*, citra *Landsat* dikomposit menggunakan nilai median, memastikan estimasi perubahan pantai yang lebih akurat. Untuk setiap tahun yang dianalisis, *threshold* NDWI < 0.1 digunakan untuk memisahkan daratan dari air, kemudian luas eksposur pantai dihitung menggunakan fungsi *reduceRegion()*. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi tren perubahan garis pantai selama periode 1990-2024, mencerminkan proses abrasi dan akresi yang terjadi di wilayah pesisir Kabupaten Tangerang.

Hasil analisis (Gambar 1a) menunjukkan tren dominan penurunan luas eksposur pantai akibat abrasi selama 1990-2015, dengan luas eksposur pantai mengalami penyusutan dari 100% pada 1990 menjadi sekitar 86,5% pada 2015. Namun, setelah tahun 2015, tren mulai menunjukkan pemulihan bertahap, dengan sedikit peningkatan pada 2020 menjadi 87,2% dari kondisi 1990. Anomali utama terjadi sekitar 2023-2025, di mana luas eksposur pantai melonjak tajam menjadi 95,3% pada 2024, hampir menyamai kondisi pada tahun 2000 yang berada di angka 95,4%. Peningkatan drastis ini bertolak belakang dengan tren abrasi yang terjadi selama 25 tahun pertama, mengindikasikan kemungkinan adanya perubahan signifikan dalam dinamika pesisir.

Salah satu faktor utama yang berkontribusi terhadap anomali ini adalah pemasangan pagar laut yang mulai teridentifikasi pada 2023 dan mengalami ekspansi signifikan pada 2024. Keberadaan pagar laut dapat menghambat transportasi sedimen alami, menyebabkan redistribusi material yang tidak merata di sepanjang garis pantai. Pagar laut yang bersifat *rigid* cenderung menangkap sedimen di sisi hulu arus, menyebabkan akresi di area tersebut, sementara di sisi hilir terjadi defisit sedimen yang berpotensi mempercepat abrasi. Oleh karena itu, perubahan garis pantai yang terjadi setelah 2023 kemungkinan besar berkaitan dengan redistribusi sedimen akibat struktur buatan ini.

Faktor yang dapat berkontribusi terhadap anomali ini meliputi peningkatan suplai sedimen alami, perubahan pola arus dan gelombang, atau intervensi manusia, seperti proyek reklamasi atau pembangunan infrastruktur pesisir yang berdampak pada stabilisasi garis pantai. Jika tren ini didukung oleh data tambahan, seperti citra resolusi tinggi atau data hidrodinamika, maka dapat dipastikan bahwa sekitar 2023-2025 terjadi peristiwa yang menyebabkan pemulihan luas eksposur pantai secara signifikan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami mekanisme yang mendorong perubahan ini dan apakah fenomena tersebut bersifat sementara atau bagian dari tren jangka panjang dalam dinamika pesisir wilayah studi.



Sumber : Hasil analisis, 2025

Gambar 1. Tren perubahan luas eksposur pantai Kabupaten Tangerang: (a) tren tridekadal 1990–2024, (b) tren dekadal 2014–2024, (c) pola musiman perubahan garis pantai, dan (d) rata-rata perubahan garis pantai per tahun.

Berdasarkan grafik dekadal (1b) diketahui bahwa dalam tren perubahan garis pantai dalam satu dekade terakhir, terdapat peningkatan bertahap dalam perubahan garis pantai, terutama setelah tahun 2020, yang menunjukkan percepatan dinamika pesisir. Pada tahun 2023-2024, perubahan mencapai titik tertinggi dalam satu dekade, menandakan adanya faktor baru yang mempengaruhi dinamika garis pantai.

Grafik (1c) mengindikasikan variasi musiman dalam perubahan garis pantai. Perubahan terbesar terjadi pada bulan Januari dan April, sedangkan bulan-bulan pertengahan tahun (Juni-September) menunjukkan perubahan yang lebih rendah. Hal ini bisa dikaitkan dengan pola pasang surut, intensitas gelombang, serta perubahan pola sedimentasi sepanjang tahun.

Grafik ketiga (1d) membandingkan rata-rata perubahan garis pantai per tahun dengan rata-rata keseluruhan dekade. Secara umum, perubahan garis pantai cenderung meningkat dari tahun ke tahun, terutama setelah 2020. Tahun-tahun terakhir, khususnya 2022-2024, menunjukkan nilai yang lebih tinggi dari rata-rata dekadal, mengindikasikan adanya perubahan signifikan yang dapat dikaitkan dengan faktor eksternal seperti intervensi manusia atau perubahan lingkungan.

Secara keseluruhan, tren dekadal ini memperlihatkan peningkatan signifikan dalam dinamika garis pantai setelah 2020, yang dapat menjadi dasar untuk investigasi lebih lanjut mengenai faktor-faktor penyebabnya, termasuk keberadaan intervensi struktural di pesisir utara Tangerang. Dalam konteks penelitian ini, intervensi struktural yang dimaksud terutama merujuk pada kemunculan struktur pagar laut yang teridentifikasi pada citra tahun 2023 dan mengalami perkembangan spasial yang lebih masif pada 2024. Selain itu, istilah ini juga mencakup kemungkinan adanya modifikasi fisik pesisir lain, seperti reklamasi lokal, penimbunan, atau infrastruktur pantai lain yang berpotensi memengaruhi pola aliran air dan redistribusi sedimen. Namun demikian, fokus utama penelitian ini tetap diarahkan pada struktur pagar laut sebagai bentuk intervensi yang paling menonjol secara spasial-temporal pada periode pengamatan.

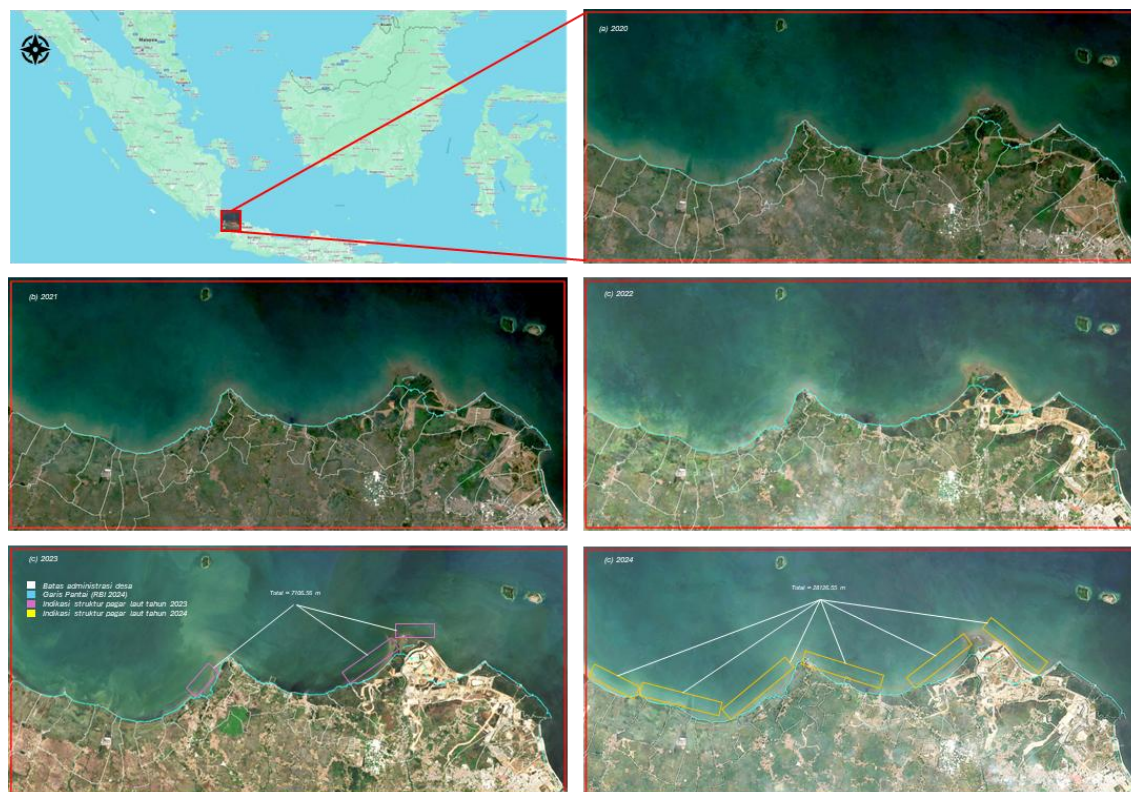
2. Identifikasi Keberadaan Struktur Pagar Laut

Hasil analisis menggunakan citra Sentinel-2 (Gambar 2a-e) menunjukkan perubahan signifikan dalam panjang struktur yang teridentifikasi di pesisir utara Kabupaten Tangerang. Dengan menggunakan kombinasi band 'B2', 'B3', 'B4', dan 'B8' yang memiliki resolusi spasial 10 meter, perubahan area dapat diamati dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Pemilihan band ini didasarkan pada kemampuannya dalam mendeteksi fitur perairan dan vegetasi pesisir. Band B2 (Blue) membantu membedakan fitur perairan dangkal, band B3 (Green) meningkatkan deteksi batas antara perairan dan daratan, band B4 (Red) efektif dalam mengidentifikasi struktur buatan, sedangkan band B8 (NIR) sangat berguna dalam analisis perubahan vegetasi dan lahan basah (Drusch et al., 2012).

Identifikasi keberadaan struktur pagar laut berdasarkan penelusuran informasi daring, mengidentifikasi tahun 2024 sebagai awal mula kemunculan struktur pagar laut. Berdasarkan hal tersebut, digunakan citra 5 tahun terakhir untuk memastikan keberadaan dan perkembangannya. Citra hasil koreksi pada tahun 2000-2022 (Gambar 2a-c) tidak menunjukkan ada objek teridentifikasi sebagai pagar yang masif. Namun, citra tahun 2023 (Gambar 2d) menunjukkan bahwa pada tahun tersebut mulai teridentifikasi keberadaan suatu struktur terduga pagar laut yang mencapai sekitar 7.106,56 meter. Sementara itu, pada tahun 2024 (Gambar 2e) panjang struktur meningkat drastis hingga sekitar 28.126,55

meter, mengindikasikan ekspansi konstruksi yang masif dalam kurun waktu kurang dari dua tahun.

Estimasi panjang struktur ini dilakukan dengan menerapkan geometri berbasis *ee.Geometry.MultiLineString* serta perhitungan panjang melalui fungsi *geometry.length()*. Metode ini telah digunakan secara luas dalam studi perubahan garis pantai untuk mengukur fitur linier secara akurat berdasarkan data penginderaan jauh (Murray et al., 2019).



Sumber : Hasil olahan, 2025

Gambar 2. Hasil koreksi serta pemfilteran spasial dan temporal citra Sentinel-2 resolusi 10 m pada wilayah studi tahun 2020–2024: (a) citra tahun 2020, (b) citra tahun 2021, (c) citra tahun 2022, (d) citra tahun 2023, dan (e) citra tahun 2024.

Peningkatan panjang struktur pagar laut ini (Gambar 3) perlu dibaca dalam kerangka administratif-regulatif yang telah dijelaskan pada bagian pendahuluan, yakni bahwa penyebutan “ilegal” mengacu pada pernyataan resmi otoritas pemerintah mengenai dugaan tidak adanya izin dasar Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang Laut (KKPRL), bukan sebagai penetapan status hukum oleh penulis. Dalam konteks fisik pesisir, perkembangan panjang struktur tersebut berpotensi berkaitan dengan perubahan pola sedimentasi serta dinamika garis pantai. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa struktur buatan di pesisir, termasuk penghalang linier di zona pantai, dapat menyebabkan redistribusi sedimen yang tidak merata dan memengaruhi pola erosi maupun akresi garis pantai (Masselink & Hughes, 2013). Oleh karena itu, perubahan luas perairan dan fluktuasi garis pantai pada area yang berdekatan dengan struktur ini perlu dianalisis lebih lanjut untuk menilai keterkaitan spasial-temporal antara perkembangan pemagaran laut dan dinamika lingkungan pesisir yang lebih luas.



Sumber : Hasil olahan, 2025

Gambar 1. Identifikasi perkembangan pembangunan struktur pagar laut tahun 2023 dan 2024.

3. Analisis Statistik dan Evaluasi Model

a. Analisis Perubahan Garis Pantai dan Anomali

Sebelum analisis perubahan garis pantai dilakukan, hasil ekstraksi badan air berbasis MNDWI terlebih dahulu dievaluasi menggunakan 50 titik kontrol visual. Evaluasi dengan *confusion matrix* menghasilkan *overall accuracy* sebesar 90% dan nilai kappa sebesar 0,80, yang menunjukkan bahwa hasil klasifikasi air dan non-air cukup andal untuk mendukung analisis garis pantai pada wilayah studi.

Analisis ini bertujuan untuk memahami perubahan garis pantai dari waktu ke waktu serta dampak yang ditimbulkan oleh pemasangan struktur pagar laut. Grafik yang dihasilkan (Gambar 4) menunjukkan dinamika perubahan garis pantai berdasarkan rata-rata jarak (*Mean Distance*). Dari hasil statistik deskriptif, diketahui bahwa nilai rata-rata perubahan garis pantai selama periode analisis adalah 0.7419, dengan nilai minimum 0.526 yang terjadi pada Juli 2023 dan nilai maksimum 0.925 yang tercatat pada Agustus 2024. Standar deviasi sebesar 0.0879 menunjukkan adanya variasi yang cukup signifikan dalam perubahan garis pantai selama periode yang diamati. Median sebesar 0.7525 serta kuartil pertama dan ketiga masing-masing sebesar 0.6893 dan 0.8035 menunjukkan bahwa sebagian besar perubahan garis pantai berada dalam rentang tersebut.

Deteksi anomali menggunakan metode *Z-score* mengidentifikasi tiga titik anomali signifikan, yaitu pada 3 Juli 2023, 26 September 2023, dan 26 Agustus 2024. Di sisi lain, metode *Interquartile Range* (IQR) tidak mendeteksi adanya anomali yang berarti. Anomali yang terjadi sebelum Mei 2024 kemungkinan besar merupakan bagian dari fluktuasi alami, sedangkan anomali pada Agustus 2024 dapat dibaca sebagai salah satu indikasi perubahan dinamika pesisir pada periode setelah kemunculan struktur pagar laut, tetapi tidak dapat distribusikan secara langsung hanya kepada keberadaan struktur tersebut. Hasil uji

statistik menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara periode sebelum dan sesudah Mei 2024, yang menandakan perubahan pola dinamika garis pantai. Namun, temuan ini lebih tepat ditafsirkan sebagai bukti adanya hubungan temporal dan kemungkinan keterkaitan tidak langsung dengan kemunculan struktur pagar laut, bukan sebagai pembuktian sebab-akibat tunggal. Hasil uji *t* menunjukkan perbedaan signifikan sebelum dan setelah pemasangan pagar laut dengan *p-value* sebesar 0.0321, sedangkan uji *Mann-Whitney U Test* juga menunjukkan hasil serupa dengan *p-value* sebesar 0.0182. Model regresi OLS yang diterapkan menunjukkan adanya tren peningkatan jarak garis pantai dari waktu ke waktu, meskipun signifikansi statistiknya berada pada tingkat 10% dengan *p-value* sebesar 0.087.



Sumber : Hasil analisis, 2025

Gambar 2. Titik perubahan signifikan garis pantai sebelum dan setelah Mei 2024

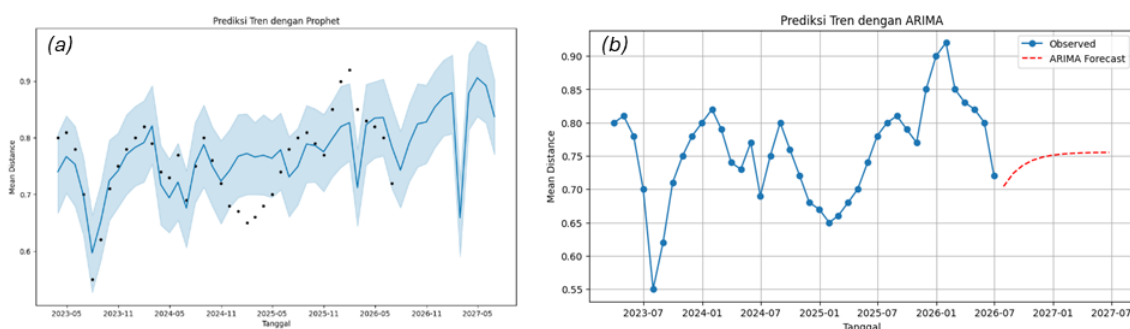
Namun, nilai *R-squared* sebesar 0.075 menunjukkan bahwa model hanya mampu menjelaskan 7.5% variasi dalam data, yang mengindikasikan bahwa faktor lain seperti pola arus, angin musiman, dan aktivitas antropogenik di sekitar pesisir juga berkontribusi dalam perubahan garis pantai. Meskipun hasil regresi menunjukkan adanya kecenderungan perubahan garis pantai pada periode pengamatan, nilai *R-squared* yang rendah mengindikasikan bahwa variasi data lebih banyak dipengaruhi oleh kombinasi faktor lain. Oleh karena itu, keberadaan pagar laut lebih tepat diposisikan sebagai salah satu faktor yang mungkin berasosiasi secara tidak langsung dengan perubahan tersebut, dan bukan sebagai penjelas utama yang berdiri sendiri.

Selain itu, analisis titik perubahan signifikan mengindikasikan adanya pergeseran pola perubahan garis pantai setelah Mei 2024. Temuan ini mendukung dugaan bahwa pemasangan pagar laut memiliki dampak terhadap dinamika garis pantai, terutama dalam meningkatkan intensitas fluktuasi setelah periode tersebut. Secara keseluruhan, hasil analisis ini menunjukkan bahwa setelah pemasangan pagar laut, perubahan garis pantai menjadi lebih ekstrem dibandingkan sebelumnya. Bukti statistik yang diperoleh mengindikasikan adanya pengaruh pagar laut terhadap perubahan lingkungan pesisir, meskipun diperlukan kajian lebih lanjut untuk memastikan dampak fisiknya secara lebih rinci. Temuan ini dapat menjadi dasar bagi perumusan kebijakan yang bertujuan untuk memitigasi dampak negatif struktur pagar laut terhadap ekosistem pesisir.

b. *Proyeksi Prophet dan ARIMA*

Jika struktur pagar laut tetap ada karena alasan politis atau alasan lainnya, model prediksi ARIMA dan *Prophet* menunjukkan bahwa perubahan garis pantai dapat terus

terjadi dengan pola yang relatif stabil dalam jangka pendek tetapi berpotensi mengalami tren penurunan atau ketidakpastian dalam jangka panjang (Gambar 5). Evaluasi model dilakukan dengan menghitung RMSE (*Root Mean Square Error*) untuk membandingkan tingkat kesalahan antara prediksi dan data aktual. Model ARIMA memiliki RMSE sebesar 0.021, sedangkan *Prophet* memiliki RMSE sebesar 0.034, menunjukkan bahwa ARIMA lebih akurat dalam jangka pendek. Hal ini disebabkan karena ARIMA lebih cocok untuk pola perubahan garis pantai yang bersifat stasioner, sementara *Prophet* lebih baik dalam menangkap pola tren jangka panjang dengan faktor musiman yang lebih kompleks. ARIMA memperlihatkan kecenderungan nilai yang lebih mendekati rata-rata tanpa fluktuasi signifikan, yang bisa diartikan bahwa perubahan garis pantai akan cenderung mengalami stagnasi atau perlahan mengalami degradasi. Sementara itu, *Prophet* menunjukkan bahwa ketidakpastian akan semakin besar, yang mencerminkan kemungkinan dampak lingkungan yang sulit diprediksi akibat keberadaan struktur pagar laut. Dalam skenario ini, pagar laut yang tetap berdiri dapat menyebabkan sedimentasi yang tidak merata, peningkatan erosi di beberapa titik, dan terganggunya dinamika alami sistem pesisir.



Sumber : Hasil analisis, 2025

Gambar 3. Proyeksi perubahan garis pantai : (a) Proyeksi Prophet (Meta), (b) Proyeksi ARIMA

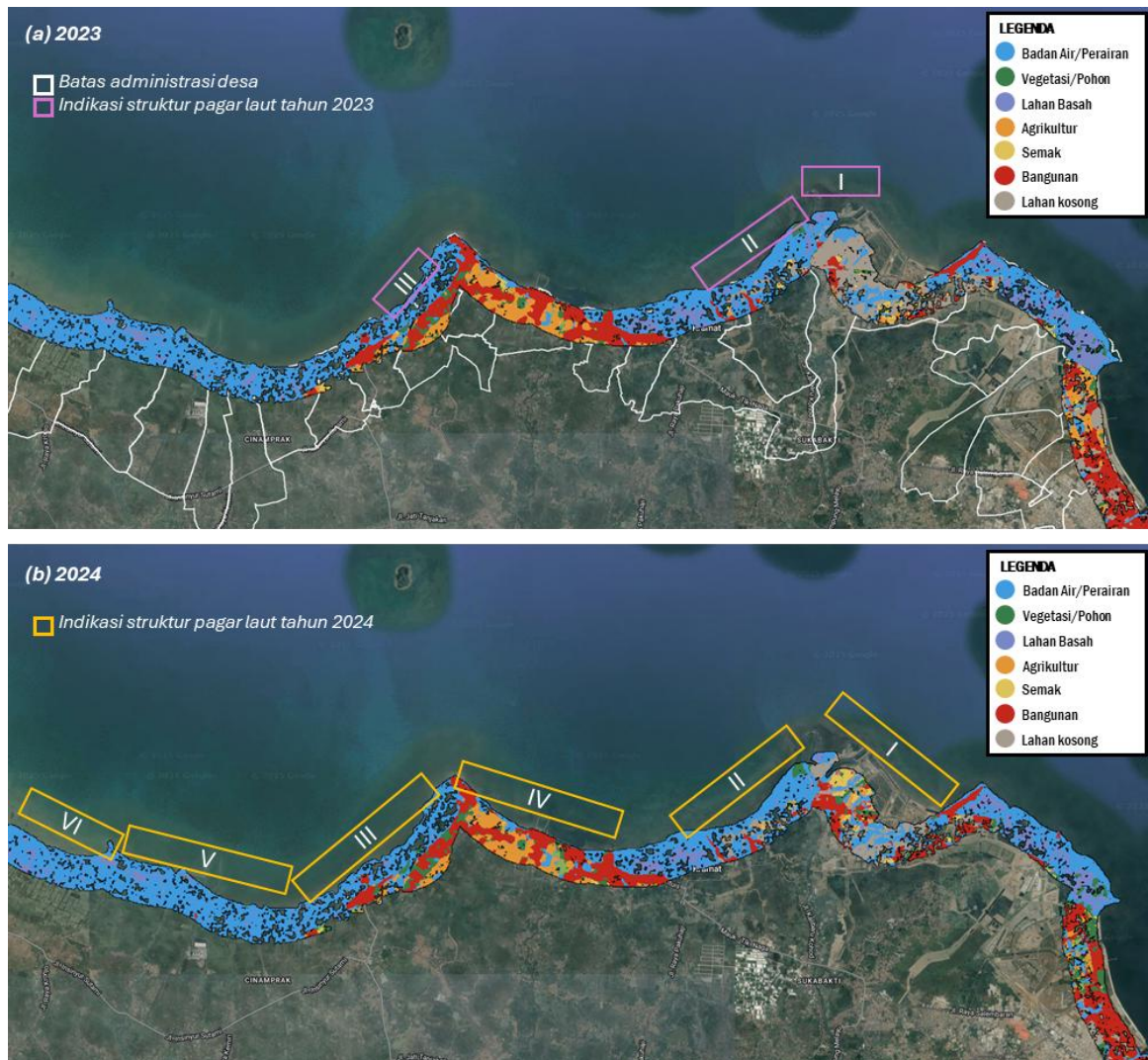
Sebaliknya, jika pagar laut berhasil ditertibkan sebagaimana tuntutan masyarakat, prediksi *Prophet* yang menunjukkan variasi tren dapat berarti bahwa garis pantai memiliki peluang untuk kembali ke pola alami dengan fluktuasi yang lebih terprediksi. Tanpa adanya hambatan buatan, arus laut dan dinamika sedimentasi bisa kembali berfungsi secara alami, yang kemungkinan besar akan memperbaiki stabilitas garis pantai dalam jangka panjang. Model *Prophet*, dengan rentang ketidakpastian yang lebih besar, juga mengindikasikan bahwa pemulihan garis pantai tidak akan langsung terjadi secara seragam, melainkan bertahap dengan faktor lingkungan lainnya yang ikut memengaruhi.

Dari kedua skenario tersebut, prediksi ARIMA lebih cocok digunakan untuk mengidentifikasi pola jangka pendek dari dampak pagar laut yang masih ada, sementara *Prophet* memberikan gambaran lebih luas tentang dampak jangka panjang, baik jika pagar laut tetap ada maupun jika ditertibkan. Oleh karena itu, dalam konteks pengambilan kebijakan, analisis ini dapat membantu dalam merancang strategi mitigasi dan intervensi yang lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan akibat pagar laut.

c. *Validasi dengan Perubahan Tutupan Lahan*

Analisis historis terhadap peta tahun 1896 hingga 1944 menunjukkan bahwa pesisir Kabupaten Tangerang telah lama mengalami perubahan garis pantai yang mencerminkan dinamika alami serta intervensi manusia. Meskipun akurasi peta-peta ini terbatas akibat perbedaan metode kartografi pada masanya, tetap dapat diidentifikasi transformasi

signifikan pada pesisir Kabupaten Tangerang (Yuna & Cahyono, 2024). Pada periode yang lebih baru, antara tahun 2004 hingga 2019, dinamika pesisir semakin nyata, dengan abrasi memengaruhi hampir 20 dari 23 desa pesisir. Desa Kohod mengalami kehilangan lahan terbesar, yaitu 71,55 hektar, sedangkan akresi paling dominan terjadi di muara Sungai Cisadane di Desa Tanjungburung (Suwandana, 2019). Sejalan dengan fenomena ini, data perubahan tutupan lahan menunjukkan bahwa kategori Badan Air mengalami penurunan luas sebesar 2,24% dalam satu tahun terakhir, yang menunjukkan adanya perubahan karakter permukaan pesisir pada periode terkini.



Sumber : Hasil olahan, 2025

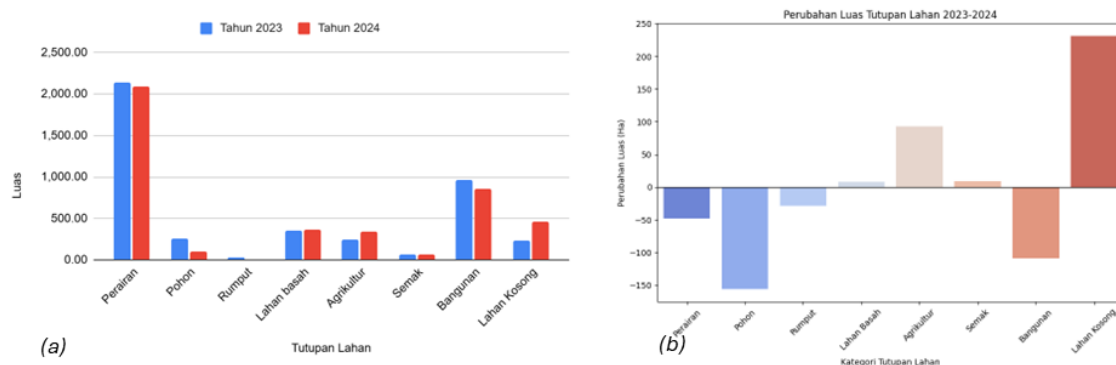
Gambar 4. Perubahan tutupan lahan pesisir Kabupaten Tangerang pada tahun 2023-2024 menggunakan dataset Google/Dynamic World/V1: (a) Tutupan lahan tahun 2023, (b) Tutupan lahan tahun 2024

Visualisasi perubahan tutupan lahan pesisir Kabupaten Tangerang tahun 2023 dan 2024 menggunakan dataset Google Dynamic World V1 disajikan pada Gambar 6, sedangkan ringkasan analisis perubahan tutupan lahan pesisir pada area yang berasosiasi dengan perkembangan struktur pagar laut ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan kedua gambar tersebut, perubahan tutupan lahan tidak berlangsung merata di seluruh pesisir, tetapi cenderung lebih jelas pada zona-zona yang berdekatan langsung dengan

segmen pagar laut yang berkembang dari tahun 2023 ke 2024. Secara umum, area yang pada tahun 2023 masih lebih dominan diklasifikasikan sebagai Badan Air pada tahun 2024 menunjukkan kecenderungan berubah menjadi mosaik kelas Bangunan, Agrikultur, Lahan kosong, serta secara lokal Semak dan Lahan Basah.

Selain faktor alami, aktivitas manusia turut berkontribusi dalam perubahan garis pantai. Reklamasi di Desa Kosambi Timur, misalnya, telah mengubah 56,54 hektare area pantai dan 936,78 hektar tambak menjadi kawasan perkotaan, menjadikannya salah satu konversi lahan terbesar di Indonesia (Suwandana, 2019). Studi serupa di wilayah lain, seperti Semarang dan Serang, juga menunjukkan pola perubahan pesisir yang dipengaruhi oleh faktor alami dan antropogenik, termasuk abrasi, akresi, serta kegiatan penambangan pasir (Aliyuddin & Damayanti, 2019). Dalam konteks Kabupaten Tangerang, keberadaan struktur pagar laut lebih tepat dipahami sebagai salah satu faktor baru yang secara spasial-temporal beririsan dengan perubahan dinamika pesisir, bukan sebagai satu-satunya penjelas perubahan yang terjadi. Struktur ini, yang membentang hingga sekitar 30,16 km pada 2024, berpotensi memengaruhi dinamika sedimentasi dan distribusi air laut di sekitar pesisir. Studi tentang struktur buatan menunjukkan bahwa penghalang semacam ini dapat menghambat transportasi sedimen alami, menyebabkan redistribusi material yang tidak merata, dan memicu erosi atau akresi di lokasi tertentu (Muin et al., 2016; Bijker et al., 1981).

Berdasarkan interpretasi visual pada Gambar 6 dan Gambar 7, perubahan paling nyata tampak pada sektor II, III, dan IV, serta sebagian sektor I, yaitu area yang berdekatan langsung dengan perkembangan struktur pagar laut. Pada sektor-sektor tersebut, area yang pada tahun 2023 masih lebih dominan diklasifikasikan sebagai Badan Air pada tahun 2024 menunjukkan kecenderungan berubah menjadi mosaik kelas Bangunan, Agrikultur, dan Lahan kosong, dengan kemunculan lokal Semak dan Lahan Basah. Perubahan ini paling jelas terlihat pada sektor III dan II yang memperlihatkan penebalan zona non-perairan di depan garis pantai. Sebaliknya, sektor V menunjukkan perubahan tingkat menengah, sedangkan sektor VI memperlihatkan perubahan visual yang relatif lebih terbatas.



Sumber : Hasil analisis, 2025

Gambar 5. Analisis perubahan tutupan lahan pesisir Kabupaten Tangerang

Secara lebih rinci, sektor I menunjukkan perubahan yang cukup signifikan, ditandai oleh berkurangnya dominasi Badan Air dan meningkatnya area yang terklasifikasi sebagai Bangunan dan Lahan kosong, dengan sebagian kecil Agrikultur dan Semak. Sektor II memperlihatkan perubahan yang lebih kuat, dengan penurunan area Badan Air di dekat garis pantai dan peningkatan kelas Bangunan, Agrikultur, serta sebagian Lahan kosong. Sektor III merupakan area dengan perubahan paling menonjol, karena pada tahun 2024 tampak peningkatan yang jelas pada kelas Bangunan dan Agrikultur, disertai kemunculan

Semak dan sebagian Lahan kosong, sementara area Badan Air tampak lebih terfragmentasi. Sektor IV juga menunjukkan perubahan yang signifikan karena pada tahun 2024 sektor ini muncul sebagai segmen baru yang diikuti penambahan kelas Agrikultur, Bangunan, dan Lahan kosong di zona pesisir dangkal. Adapun sektor V masih didominasi oleh Badan Air, tetapi mulai menunjukkan tambahan lokal berupa Agrikultur, Semak, dan Lahan kosong. Sementara itu, sektor VI memperlihatkan perubahan visual yang paling lemah karena area sekitarnya masih didominasi Badan Air dengan perubahan lokal yang terbatas.

Selain itu, vegetasi pesisir seperti pohon dan rumput mengalami penurunan signifikan, yang berpotensi meningkatkan risiko abrasi di wilayah tanpa perlindungan alami. Hilangnya vegetasi ini berkontribusi terhadap menurunnya kapasitas pesisir dalam menahan erosi dan menstabilkan sedimen, terutama di area yang dipengaruhi oleh perubahan arus dan distribusi material. Temuan ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa struktur buatan di pesisir dapat menghambat transportasi sedimen alami, mengganggu ekosistem pesisir, dan mempercepat abrasi di beberapa titik (Walker & Mossa, 1982).

Secara keseluruhan, validasi menggunakan perubahan tutupan lahan menunjukkan bahwa dinamika pesisir Kabupaten Tangerang pada periode 2023–2024 ditandai oleh penyusutan Badan Air, peningkatan Lahan kosong, dan perubahan komposisi kelas daratan pesisir lainnya pada area yang berdekatan dengan struktur pagar laut. Temuan ini tidak dimaksudkan untuk menyimpulkan hubungan kausal langsung, tetapi memberikan dukungan spasial-temporal bahwa perkembangan struktur pagar laut kemungkinan berkaitan secara tidak langsung dengan perubahan dinamika pesisir melalui mekanisme antara, seperti perubahan pola arus, redistribusi sedimen, dan modifikasi permukaan pesisir. Dengan demikian, analisis tutupan lahan dalam penelitian ini berfungsi sebagai validasi pendukung yang memperkaya pembacaan terhadap perubahan garis pantai dan memperkuat kebutuhan akan pengelolaan kawasan pesisir yang lebih berhati-hati dan berbasis bukti.

d. Implikasi Ekologis dan Sosial-Ekonomi terhadap Nelayan

Perubahan tutupan lahan pesisir yang teramati pada zona yang berdekatan dengan struktur pagar laut menunjukkan bahwa fenomena ini tidak hanya relevan dalam konteks dinamika morfologi pantai, tetapi juga dalam kaitannya dengan fungsi ekosistem pesisir dan aktivitas ekonomi masyarakat pesisir. Secara visual, perbandingan tutupan lahan tahun 2023 dan 2024 memperlihatkan kecenderungan penyempitan area yang terklasifikasi sebagai badan air, disertai meningkatnya kemunculan kelas bangunan, agrikultur, dan lahan kosong pada beberapa sektor yang berdekatan langsung dengan perkembangan struktur pagar laut. Pola ini paling jelas terlihat pada sektor-sektor yang pada tahun 2024 menunjukkan penambahan atau pemanjangan segmen pagar laut, sehingga mengindikasikan adanya perubahan karakter ruang pesisir yang sebelumnya lebih didominasi oleh perairan dangkal dan zona transisi pesisir. Temuan tersebut sejalan dengan pembahasan sebelumnya bahwa struktur buatan di wilayah pesisir dapat berasosiasi dengan perubahan distribusi sedimen, perubahan pola aliran, dan terganggunya konektivitas ekologis kawasan pesisir.

Secara ekologis, perubahan tersebut berpotensi menimbulkan konsekuensi negatif terhadap fungsi habitat pesisir, terutama pada area perairan dangkal yang berperan penting bagi sirkulasi air, distribusi sedimen, serta habitat berbagai biota akuatik. Penyempitan area badan air/perairan, disertai bertambahnya area non-perairan pada beberapa sektor, dapat dibaca sebagai indikasi awal terjadinya perubahan morfologi

pesisir dan fragmentasi ruang perairan. Dalam konteks ini, keberadaan pagar laut lebih tepat dipahami sebagai salah satu faktor yang kemungkinan berasosiasi secara tidak langsung dengan perubahan fungsi ekologis tersebut, melalui mekanisme antara berupa redistribusi sedimen, perubahan arus lokal, dan interaksinya dengan faktor lingkungan lain. Oleh karena itu, hasil penelitian ini belum dimaksudkan untuk menegaskan hubungan sebab-akibat tunggal, tetapi cukup menunjukkan bahwa perkembangan struktur pagar laut beriringan dengan meningkatnya kompleksitas perubahan lingkungan pesisir pada wilayah studi.

Implikasi perubahan tersebut juga penting dilihat dari sisi sosial-ekonomi, terutama terhadap nelayan skala kecil yang bergantung pada akses langsung ke perairan pesisir dangkal. Pada wilayah kajian yang sama, sumber resmi pemerintah dan lembaga pengawas negara telah melaporkan bahwa keberadaan pagar laut mengganggu aktivitas masyarakat nelayan. Kementerian Kelautan dan Perikanan menyatakan bahwa pembongkaran pagar laut di Tangerang dilakukan untuk merespons terganggunya aktivitas nelayan serta menilai pemagaran ruang laut tersebut melanggar ketentuan yang berlaku (Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia, 2025d). Sejalan dengan itu, Ombudsman RI menyatakan bahwa pemagaran laut di Tangerang merugikan nelayan dan ekosistem, dengan estimasi kerugian sekitar Rp24 miliar pada 3.888 nelayan terdampak selama periode Agustus 2024 hingga Januari 2025 (Ombudsman RI, 2025). Laporan ANTARA juga memperinci bahwa kerugian tersebut berkaitan dengan bertambahnya konsumsi BBM sekitar 4–6 liter per hari, menurunnya hasil tangkapan, serta kerusakan kapal nelayan (Mulya, 2025). Dengan demikian, perubahan biofisik yang teramati pada citra satelit dapat dibaca sejalan dengan bukti sosial-ekonomi mengenai terganggunya aktivitas penangkapan ikan di pesisir utara Tangerang.

Temuan ini menunjukkan bahwa isu pagar laut tidak hanya berkaitan dengan perubahan garis pantai sebagai fenomena geomorfologi, tetapi juga menyangkut keberlanjutan fungsi ekologis dan keberlangsungan mata pencaharian masyarakat pesisir. Meskipun penelitian ini tidak secara langsung mengukur produksi perikanan, pendapatan rumah tangga nelayan, maupun parameter ekologis lapangan, integrasi antara analisis citra satelit dan laporan kelembagaan memberikan dasar yang cukup kuat untuk menempatkan pagar laut sebagai intervensi pesisir yang perlu dievaluasi secara lebih komprehensif. Oleh karena itu, pengelolaan kawasan pesisir di Kabupaten Tangerang perlu mempertimbangkan tidak hanya aspek perubahan fisik garis pantai, tetapi juga dampaknya terhadap habitat pesisir, akses nelayan terhadap ruang tangkap, dan keberlanjutan sistem sosial-ekologis kawasan pesisir secara keseluruhan.

Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis keterkaitan antara kemunculan struktur pagar laut dan dinamika perubahan garis pantai di pesisir utara Kabupaten Tangerang menggunakan citra satelit multitemporal. Integrasi citra Landsat dan Sentinel-2 dalam platform *Google Earth Engine* menunjukkan bahwa wilayah studi mengalami perubahan pesisir yang nyata, baik dalam skala jangka panjang maupun pada periode setelah kemunculan struktur pagar laut yang mulai teridentifikasi pada 2023 dan berkembang lebih masif pada 2024.

Hasil analisis tridekadal menunjukkan kecenderungan abrasi jangka panjang di pesisir utara Tangerang, tetapi pada periode terkini tampak peningkatan eksposur pantai dan perubahan pola dinamika pesisir yang berbeda dari tren sebelumnya. Pada saat yang sama, panjang struktur pagar laut meningkat dari sekitar 7,1 km pada 2023 menjadi sekitar 28,1 km pada 2024. Analisis statistik menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada

dinamika garis pantai sebelum dan sesudah Mei 2024. Namun, temuan ini tidak dimaksudkan sebagai pembuktian hubungan sebab-akibat tunggal, melainkan sebagai indikasi adanya keterkaitan spasial-temporal antara perkembangan struktur pagar laut dan perubahan dinamika pesisir.

Validasi menggunakan perubahan tutupan lahan menunjukkan bahwa area yang sebelumnya lebih dominan sebagai badan air cenderung berubah menjadi mosaik kelas bangunan, agrikultur, lahan kosong, serta secara lokal semak dan lahan basah, terutama pada sektor-sektor yang berdekatan langsung dengan perkembangan struktur pagar laut. Pola ini mengindikasikan bahwa perubahan pesisir pada periode studi tidak hanya tercermin pada pergeseran garis pantai, tetapi juga pada perubahan karakter permukaan pesisir yang berkaitan dengan modifikasi aliran, redistribusi sedimen, dan fragmentasi ruang perairan dangkal. Dari sisi implikasi, temuan ini menunjukkan bahwa isu pagar laut perlu dipahami tidak hanya sebagai persoalan geomorfologi pantai, tetapi juga sebagai persoalan sosial-ekologis kawasan pesisir yang dapat memengaruhi fungsi habitat dan aktivitas nelayan.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Analisis dilakukan berbasis citra satelit multitemporal, sehingga hasilnya lebih tepat dipahami sebagai representasi spasial-temporal yang bersifat indikatif. Validasi klasifikasi MNDWI menunjukkan kinerja yang baik, dengan *overall accuracy* sebesar 90% dan nilai kappa sebesar 0,80, tetapi validasi tersebut masih berbasis titik kontrol visual dan belum sepenuhnya didukung oleh survei lapangan yang sinkron dengan waktu akuisisi citra. Selain itu, penelitian ini belum mengintegrasikan data hidrodinamika, pasang surut, gelombang, maupun data sosial-ekonomi primer secara langsung, sehingga mekanisme perubahan yang mendasari keterkaitan antara perkembangan struktur pagar laut dan dinamika pesisir masih perlu diuji lebih lanjut.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya pemanfaatan data satelit multitemporal untuk memantau dinamika pesisir secara cepat dan sistematis. Untuk memperkuat interpretasi mekanisme perubahan yang terjadi, penelitian lanjutan perlu mengintegrasikan survei lapangan, data hidrodinamika, dan data sosial-ekonomi pesisir agar hubungan antara perkembangan struktur pagar laut dan perubahan lingkungan pesisir dapat dipahami secara lebih komprehensif.

Daftar Pustaka

- Aliyuddin, G., & Damayanti, A. (2019). Coastline changes in Serang City, Banten Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 248, 012062. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/248/1/012062>
- Bijker, E. W., Van der Leijé, J. P., Pilon, J. J., Svasek, J. N., In 't Veld, J. K., & Verhagen, H. J. (1981). *Coastal changes due to the construction of artificial harbour entrances and practical solutions, including beach replenishment* [Conference paper]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A87685573-6590-4472-bbce-ea7ec18146c9/datastream/OBJ/download>
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679–698.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., & Mehl, W. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Google for Developers. (n.d.). *Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (SR)*. Earth Engine Data Catalog. Diakses 23 April 2025.
- Grafals-Soto, R., & Nordstrom, K. F. (2009). Sand fences in the coastal zone: Intended and unintended effects. *Environmental Management*, 44(3), 420–429. <https://doi.org/10.1007/S00267-009-9331-7>
- Ibrahim, A. S. A., El-Molla, A., & Ahmed, H. G. I. (2024). Impacts of coastal structures on sediment transport: A case study of Damietta, Egypt. *Naše More*, 71(2), 45–53. <https://doi.org/10.17818/nm/2024/2.1>

136 *Pemantauan Perubahan Garis Pantai Akibat Pagar Laut di Pesisir Utara Tangerang dengan Citra Satelit Multitemporal*

- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 28 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Penataan Ruang Laut*. JDIH Kementerian Kelautan dan Perikanan. <https://jdih.kkp.go.id/Homedev/DetailPeraturan/954>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. (2025a, 9 Januari). *KKP hentikan kegiatan pemagaran laut tanpa izin di Tangerang* (Siaran Pers Nomor SP.010/SJ.5/1/2025) [Siaran pers]. <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-hentikan-kegiatan-pemagaran-laut-tanpa-izin-di-tangerang-GRM7.html>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. (2025b, 25 Februari). *Praperadilan pagar laut ditolak: KKP sudah sesuai aturan* (Siaran Pers Nomor SP.078/SJ.5/II/2025) [Siaran pers]. <https://kkp.go.id/news/news-detail/praperadilan-pagar-laut-ditolak-kkp-sudah-sesuai-aturan-x6oJ.html>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. (2025c, 9 Januari). *KKP tegaskan pemagaran ruang laut langgar aturan* (Siaran Pers Nomor SP.008/SJ.5/1/2025) [Siaran pers]. <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-tegaskan-pemagaran-ruang-laut-langgar-aturan-yw97.html>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. (2025d, 22 Januari). *KKP bersama gabungan instansi maritim bongkar pagar laut Tangerang* (Siaran Pers Nomor SP.022/SJ.5/1/2025) [Siaran pers]. <https://www.kkp.go.id/news/news-detail/kkp-bersama-gabungan-instansi-maritim-bongkar-pagar-laut-tangerang-vQZr.html>
- Leont'yev, I. O. (2007). Changes in the shoreline caused by coastal structures. *Oceanology*, 47(6), 877–883. <https://doi.org/10.1134/S0001437007060124>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, 8(1), 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Masselink, G., & Hughes, M. G. (2013). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Routledge.
- Muin, M., Idris, K., & Yuanita, N. (2016). Application of large-scale 3D non-orthogonal boundary fitted sediment transport model and small-scale approach for offshore structure in Cimanuk Delta, North Java Sea. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 48(3), 301–319. <https://doi.org/10.5614/J.ENG.TECHNOL.SCI.2016.48.3.5>
- Mulya, F. P. (2025, 3 Februari). 3.888 nelayan rugi Rp24 miliar akibat pagar laut Tangerang. *ANTARA*. <https://www.antaranews.com/berita/4623465/ombudsman-3888-nelayan-rugi-rp24-miliar-akibat-pagar-laut-tangerang>
- Murray, N. J., Phinn, S. R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M. B., Clinton, N., Thau, D., & Fuller, R. A. (2019). The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738), 222–225. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8>
- Ombudsman RI. (2025, 7 Januari). *Siaran pers: Ombudsman RI: Pemagaran laut di Tangerang merugikan nelayan dan ekosistem*. <https://ombudsman.go.id/pers/r/ombudsman-ri-pemagaran-laut-di-tangerang-merugikan-nelayan-dan-ekosistem>
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Penataan Ruang*. JDIH BPK RI. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161851/pp-no-21-tahun-2021>
- Sundar, V., Sannasiraj, S. A., Babu, S. R., & Rajakan, G. M. M. (2021). Shoreline changes due to construction of groyne field in north of Chennai Port, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(12), 830. <https://doi.org/10.1007/S10661-021-09590-1>
- Sundar, V., Sannasiraj, S. A., Murali, K., & Singaravelu, V. (2022). Impact of coastal structure on shorelines along the southeast and southwest coasts of India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/09715010.2022.2115319>
- Suwandana, E. (2019). Coastal morphological dynamics of Tangerang Regency, Banten, and Indah Kapuk Beach, Jakarta through Google Earth imagery analysis. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 9(1), 55–68. <https://doi.org/10.33512/IPK.V9I1.7074>
- Tebechrani, L. de F., & Pereira, P. (2024). On the influence of coastal structures on shoreline variability and beach interconnection. *Regional Studies in Marine Science*, 77, 103628. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103628>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change* (Open-File Report 2008-1278). U.S.

- Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- Vieira, B. F. V., Pinho, J., & Barros, J. A. O. (2024). Semicircular coastal defence structures: Impact of gap spacing on shoreline dynamics during storm events. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse12060850>
- Walker, H. J., & Mossa, J. (1982). Effects of artificial structures on coastal lagoon processes and forms. *Oceanologica Acta, Special Issue*, 4. <http://www.vliz.be/en/imis?module=ref&refid=31217>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.
- Yuna, A. R., & Cahyono, A. (2024). Identifying coastlines change in Tangerang Regency, Indonesia through historical maps. <https://doi.org/10.1117/12.3009201>
- Zhang, J., Wang, X., & Zhao, Y. (2022). Monitoring surface water changes using Sentinel-2 imagery and machine learning techniques. *Remote Sensing*, 14(5), 1234.
- Zhu, Y., Zeng, W., Zhou, Y., & Zhang, J. (2024). Shoreline behavior in response to coastal structures: A case study in Haikou Bay, China. *Water*, 16(21), 3106. <https://doi.org/10.3390/w16213106>