



Analisis Perubahan Garis Pantai Menggunakan *Digital Shoreline Analysis System* untuk Mendukung Mitigasi Pesisir Kota Pekalongan, Jawa Tengah

Shoreline Changes Analysis Using Digital Shoreline Analysis System to Support Coastal Mitigation in Pekalongan City, Central Java

ALFYAH EDINA ENDARSIH¹, ANIS KURNIASIH^{*}, DAN M. ROKHIS KHOMARUDIN²

¹Teknik Geologi Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedharto Tembalang Semarang, Jawa Tengah, Indonesia, 50275

²Pusat Riset Penginderaan Jauh, Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Raya Jakarta Bogor No. Km 47 Nanggewer Mekar, Cibinong, Bogor, Jawa Barat, Indonesia, 16911

*anis.kurniasih@live.undip.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 March 2024

Accepted 25 November 2024

Published 31 January 2025

Keywords:

Abrasion

Digital Shoreline Analysis System

Shoreline

Pekalongan City Coast

ABSTRACT

Shoreline changes in the form of abrasion or accretion often occur in coastal area due to dynamic natural processes. The northern coastal area of Pekalongan City is one of the areas that has been facing significant abrasion, resulting in land loss along the coast. This abrasion process gradually damages the coastal embankments, allowing seawater to inundate inland areas so that tidal flood area expands and begins to encroach on residential areas. Therefore, research about shoreline changes is necessary as one of the mitigation approaches. This study aims to map shoreline changes in Pekalongan City from 2016 to 2022, analyze the values of these changes, and identify the causes in order to determine appropriate mitigation. Monitoring of these changes is conducted through remote sensing methods using Sentinel-2 images by applying threshold values to extract coastlines. The rate of shoreline change is subsequently calculated using Digital Shoreline Analysis System (DSAS) and validated with field conditions through direct observation surveys. The results showed that Pekalongan City experienced significant shoreline changes from 2016 to 2022. Maximum abrasion occurred in Bandengan with an average erosion of 79.5 m, while maximum accretion occurred in Panjang Wetan with an average addition of 3.88 m. Abrasion is the dominant process with a rate of change of 3.95 to 4.02 m/year. The main factor causing abrasion is the interaction between sedimentation with waves, ocean currents and wind. The construction of appropriate types of coastal protection can reduce wave energy and control ocean currents, protecting the coast from abrasion caused by sedimentation.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 13 Maret 2024

Disetujui 25 November 2024

Diterbitkan 31 Januari 2025

Kata kunci:

Abrasi

Digital Shoreline Analysis System

Garis Pantai

Pesisir Kota Pekalongan

ABSTRAK

Perubahan garis pantai dalam bentuk abrasi maupun akresi sering terjadi di lingkungan pesisir yang disebabkan oleh adanya proses alam yang dinamis. Daerah pesisir utara Kota Pekalongan merupakan salah satu daerah yang mengalami abrasi signifikan yang berdampak pada hilangnya lahan di sekitar pantai. Proses abrasi tersebut perlahan menyebabkan kerusakan tanggul pantai yang membuat air laut masuk ke daratan sehingga area genangan banjir rob semakin meluas dan mulai merambah ke permukiman. Oleh sebab itu, penelitian tentang perubahan garis pantai penting dilakukan sebagai salah satu upaya mitigasi bencana abrasi. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan perubahan garis pantai di Kota Pekalongan tahun 2016–2022, menganalisis nilai perubahan garis pantai, dan mengidentifikasi penyebab perubahan garis pantai sehingga dapat diketahui langkah mitigasi yang tepat. Pemantauan perubahan ini dilakukan dengan metode penginderaan jauh menggunakan citra Sentinel-2 yang dilakukan *thresholding* untuk mengekstrasi garis pantai. Laju perubahan garis pantai tersebut selanjutnya dihitung menggunakan *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) dan divalidasi dengan kondisi lapangan melalui survei pengamatan langsung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kota Pekalongan mengalami perubahan garis pantai cukup signifikan pada tahun 2016–2022. Abrasi maksimum terjadi di Kelurahan Bandengan dengan pengikisan rata-rata 79,5 m, sementara akresi maksimum terjadi di Kelurahan Panjang Wetan dengan penambahan daratan rata-rata 3,88 m. Abrasi menjadi proses dominan dengan laju perubahan 3,95 hingga 4,02 m/tahun. Faktor utama penyebab terjadinya abrasi adalah interaksi antara sedimentasi dengan gelombang, arus laut, dan angin. Pembangunan jenis pelindung pantai yang sesuai dapat mengurangi energi gelombang dan mengendalikan arus laut sehingga dapat melindungi pantai dari abrasi yang disebabkan oleh sedimentasi.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pantai Utara Jawa adalah wilayah pesisir di Pulau Jawa yang berhadapan langsung dengan Laut Jawa, membentang dari Kabupaten Serang hingga Kabupaten Gresik. Berdasarkan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2020–2024, pengembangan kawasan Pantai Utara Jawa menjadi salah satu prioritas dalam memajukan ekonomi nasional. Namun, upaya ini masih dihadapkan pada sejumlah tantangan serius terkait permasalahan di daerah pesisir, yang salah satunya adalah abrasi atau mundurnya garis pantai ke arah daratan karena adanya pengikisan pantai.

Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Jawa Tengah (2021) menyebutkan bahwa mundurnya garis pantai di pantai utara Kota Pekalongan terus bertambah setiap tahun, baik jarak kemundurannya maupun cakupan wilayahnya. Berdasarkan pemantauan citra satelit sejak tahun 2016–2022, daerah pesisir Kota Pekalongan bagian utara mengalami abrasi yang signifikan yang berdampak pada hilangnya lahan di sekitar pantai. Proses abrasi tersebut perlahan juga menyebabkan kerusakan tanggul pantai yang membuat air laut masuk ke daratan melalui Sungai Banger dan Sungai Loji sehingga area genangan banjir rob akibat abrasi di Kota Pekalongan semakin meluas dan mulai merambah ke permukiman (Widada et al., 2022). Jika tidak ada langkah yang dilakukan untuk mengatasi hal tersebut, lahan di pesisir Kota Pekalongan dapat berkurang bahkan hilang karena tergenang air laut.

Informasi perubahan garis pantai merupakan salah satu parameter penting dalam studi dinamika pesisir untuk perlindungan lingkungan pantai (Chand & Acharya, 2010). Secara konvensional, pemantauan perubahan garis pantai dilakukan dengan menggunakan metode survei lapangan serta foto udara. Belakangan ini data penginderaan jauh melalui citra satelit telah banyak digunakan dalam studi perubahan garis pantai karena cakupannya yang lebih luas, memiliki resolusi tinggi, serta lebih menghemat biaya dibandingkan dengan metode konvensional. Salah satu metode penginderaan jauh yang dapat digunakan untuk pemantauan perubahan garis pantai di Kota Pekalongan adalah metode *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* pada citra satelit Sentinel-2. DSAS adalah metode yang digunakan untuk menghitung laju perubahan garis pantai secara temporal pada rentang waktu tertentu (Baig et al., 2020). Sentinel-2 merupakan citra satelit ESA *Copernicus* yang memiliki resolusi spasial dan temporal tinggi dengan ketersediaan data perekaman di Kota Pekalongan sejak tahun 2016. Penggunaan citra Sentinel-2 pada metode DSAS dinilai lebih baik dibandingkan dengan citra Landsat karena citra Sentinel-2 memiliki resolusi spasial antara 10 m – 60 m dengan luas pandang hingga 290 km, lebih lebar dibandingkan

Landsat yang hanya mencakup 185 km dengan resolusi 15 m – 30 m (Phiri, et al., 2020).

Penelitian mengenai perubahan garis pantai di kawasan pesisir Kota Pekalongan dan sekitarnya sudah dilakukan oleh beberapa peneliti lain sebelumnya. Salah satunya oleh Widada et al. (2022) yang melakukan simulasi perubahan garis pantai di Kota Pekalongan dengan melakukan permodelan matematis untuk mengetahui dampak perubahan garis pantai terhadap luas area genangan banjir rob. Nugroho & Indra (2022); Damanik et al., (2019); dan Chulafak et al. (2022) telah meneliti perubahan garis pantai di Kota Pekalongan pada berbagai interval waktu dengan menggunakan citra Landsat, sedangkan Diatama (2020) menggunakan citra IKONOS Google Earth untuk meneliti hal yang sama. Dibandingkan dengan penelitian tersebut, penelitian ini memiliki aspek kebaruan karena menggunakan citra satelit Sentinel-2 yang memiliki resolusi yang lebih baik. Selain itu, dalam penelitian ini juga dilakukan validasi dengan data lapangan sehingga tidak hanya berdasar pada permodelan digital saja. Dengan melakukan studi ini diharapkan pengelolaan kawasan pesisir termasuk di dalamnya manajemen dan mitigasi bencana abrasi di pantai utara Kota Pekalongan dapat dilakukan dengan tepat.

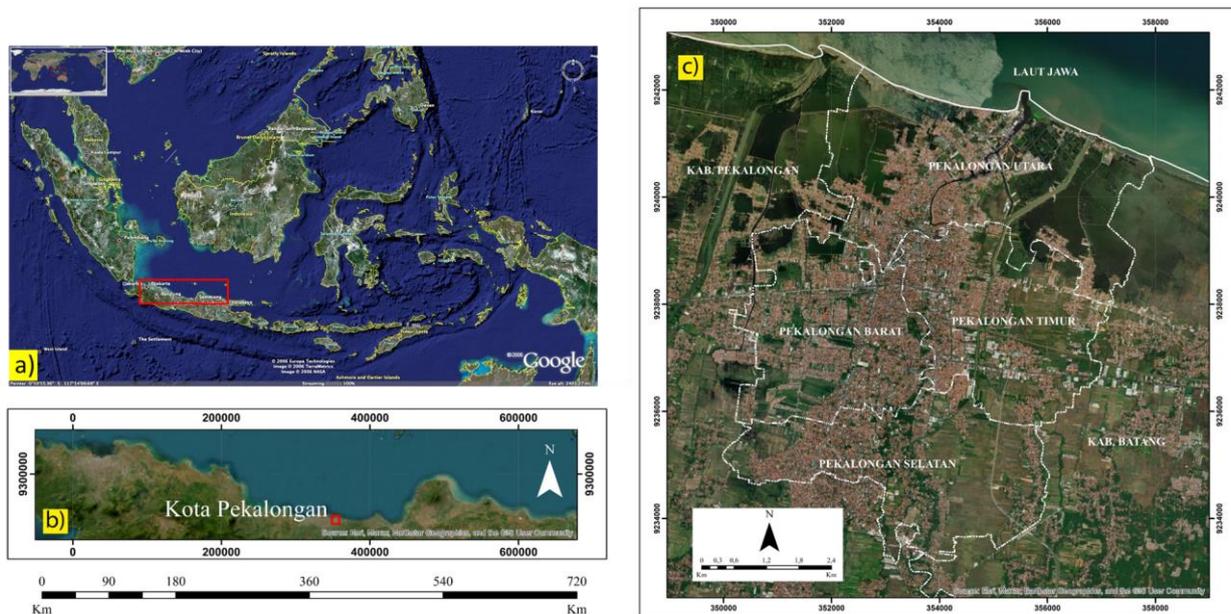
1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menyajikan informasi perubahan garis pantai di Kota Pekalongan pada tahun 2016–2022 dalam bentuk peta, menganalisis nilai perubahan garis pantai tersebut, dan mengetahui penyebab perubahan garis pantai yang terjadi sehingga dapat diketahui langkah mitigasi yang tepat.

2. METODE

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Kota Pekalongan, Provinsi Jawa Tengah, yang merupakan kota seluas 45,2 km² dan terletak di dataran rendah Pantai Utara Jawa (Gambar 1). Berdasarkan proyeksi koordinat *Universal Transverse Mercator (UTM)*, Kota Pekalongan berada pada Zona 49S, yaitu 34996–357976 mT dan 9233213–9242458 mS. Secara administratif Kota Pekalongan terbagi menjadi 4 kecamatan yaitu Kecamatan Pekalongan Barat, Pekalongan Timur, Pekalongan Utara, dan Pekalongan Selatan. Kecamatan Pekalongan Utara merupakan satu-satunya kecamatan di Kota Pekalongan yang memiliki pesisir pantai karena berbatasan langsung dengan Laut Jawa. Kecamatan Pekalongan Utara terdiri dari tujuh kelurahan yaitu Kelurahan Bandengan, Kandang Panjang, Panjang Baru, Panjang Wetan, Krapyak, Degayu, dan Padukuhan Kraton.



Gambar 1. Lokasi penelitian berdasarkan kenampakan citra satelit a) Peta Indonesia, kotak merah menunjukkan Pantai Utara Jawa; b) Citra satelit Pantai Utara Jawa, kotak merah menunjukkan Kota Pekalongan (lokasi penelitian); c) Citra satelit Kota Pekalongan.

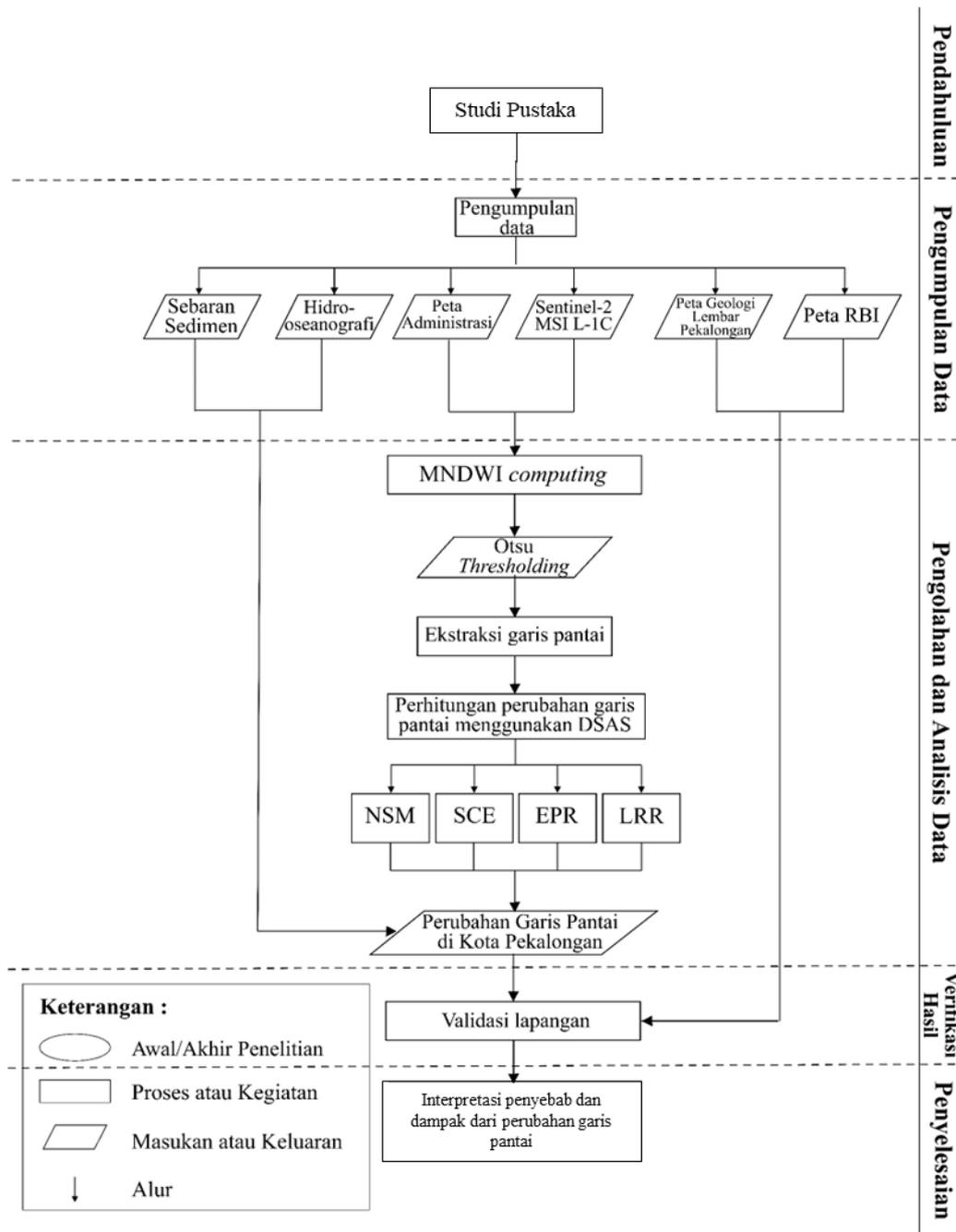
2.2 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang diperoleh langsung dari sumbernya untuk dilakukan pengolahan spasial sebagai analisis utama, yaitu citra Sentinel-2 MSI (*Multi Spectral Instrument*) Level 1-C Kota Pekalongan akuisisi bulan Agustus 2016–2022 dengan resolusi spasial menggunakan satuan meter yakni 20 m yang didapatkan dari *dataset* Google Earth Engine yang dilakukan pemrosesan dengan algoritma tertentu. Sementara itu, data sekunder pada penelitian ini digunakan sebagai referensi pendukung dalam analisis data primer yang telah dilakukan

yang meliputi data hidro-oseanografi, data distribusi sedimen dasar perairan, dan data validasi lapangan.

2.3 Metode Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi lima tahapan yang meliputi tahap pengumpulan data, pengolahan dan analisis data, verifikasi hasil analisis data, dan interpretasi penyebab serta dampak perubahan garis pantai di daerah penelitian. Gambar 2 menunjukkan diagram alir dari tahapan yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

a. *Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)*

Perubahan garis pantai dapat ditentukan dengan membandingkan dua atau lebih ekstraksi garis pantai dari data MNDWI pada waktu yang berbeda. MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) adalah algoritma untuk deteksi badan air pada citra dengan mengandalkan kemampuan air dalam menyerap cahaya pada panjang gelombang sinar tampak dan inframerah (El-Asmar & Hereher, 2011). Algoritma tersebut dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:

$$MNDWI = \frac{Band\ 3 - Band\ 11}{Band\ 3 + Band\ 11} \dots\dots\dots(1)$$

MNDWI pada penelitian ini diolah di *platform* Google Earth Engine menggunakan citra Sentinel-2 MSI Level 1-C akuisisi bulan Agustus tahun 2016–2022.

b. *Thresholding*

Thresholding adalah proses penentuan batas nilai piksel pada citra digital, yang merupakan teknik utama dalam klasifikasi citra digital. Salah satu metode *thresholding* yang paling mudah diterapkan adalah *Otsu Thresholding*. Tujuan dari metode *Otsu Thresholding* adalah membagi histogram citra ke dalam dua kelas berbeda secara otomatis yang dalam penelitian ini adalah kelas daratan dan perairan. Algoritma *Otsu Thresholding* dapat dijelaskan melalui persamaan-persamaan berikut (Otsu, 1979):

$$\begin{cases} s^2 = P_{nw} \cdot (M_{nw} - M)^2 + P_w \cdot (M_w - M)^2 \\ M = \frac{P_{nw} \cdot M_{nw} + P_w \cdot M_w}{P_{nw} + P_w} \\ P_{nw} + P_w = 1 \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

$$t^* = \underset{a \leq t \leq b}{\text{ArgMax}} \{P_{nw} \cdot (M_{nw} - M)^2 + P_w \cdot (M_w - M)^2\} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

- σ² = varian di dalam kelas badan air maupun non-badan air
- P_{nw} = probabilitas nilai piksel untuk masuk kelas non-badan air
- P_w = probabilitas nilai piksel untuk masuk kelas badan air
- M_{nw} = rata-rata nilai piksel kelas non-badan air
- M_w = rata-rata nilai piksel kelas badan air
- M = rata-rata nilai piksel citra MNDWI
- t* = nilai *threshold*

Perhitungan nilai *threshold* (t*) pada persamaan 2 dan 3 merupakan proses iteratif yang melibatkan uji coba sejumlah nilai *threshold* hingga ditemukan nilai variasi maksimum untuk masing-masing kelas badan air dan non-badan air pada citra. Proses ini sangat memakan waktu yang lama karena nilai piksel yang dimiliki oleh suatu citra jumlahnya jutaan dan diperlukan pengambilan beberapa nilai *threshold* dari seluruh nilai piksel citra yang ada. Saat ini telah tersedia berbagai *software* yang dapat melakukan pengolahan Otsu *Thresholding* yang salah satunya adalah Fiji/ImageJ yang sifatnya *free* dan *open source* (Schindelin et al., 2015).

c. Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

Digital Shoreline Analysis System (DSAS) adalah metode untuk menghitung perubahan posisi garis pantai berdasarkan waktu secara statistik dan berbasis geospasial (Istiqomah et al., 2016). Prinsip kerja DSAS melibatkan pembuatan garis transek di sepanjang garis pantai untuk memetakan perubahan garis pantai dari waktu ke waktu. Setelah itu, titik perpotongan antara garis transek dan garis pantai diidentifikasi dan diukur. DSAS kemudian menghitung pergeseran horizontal dari titik-titik tersebut dan memberikan informasi mengenai jarak, laju, dan jenis perubahan garis pantai seperti abrasi maupun akresi yang terjadi dalam rentang waktu tertentu. Metode DSAS yang digunakan untuk menganalisis perubahan tersebut adalah *Shoreline Change*

Envelope (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), dan *Linear Regression Rate* (LRR)

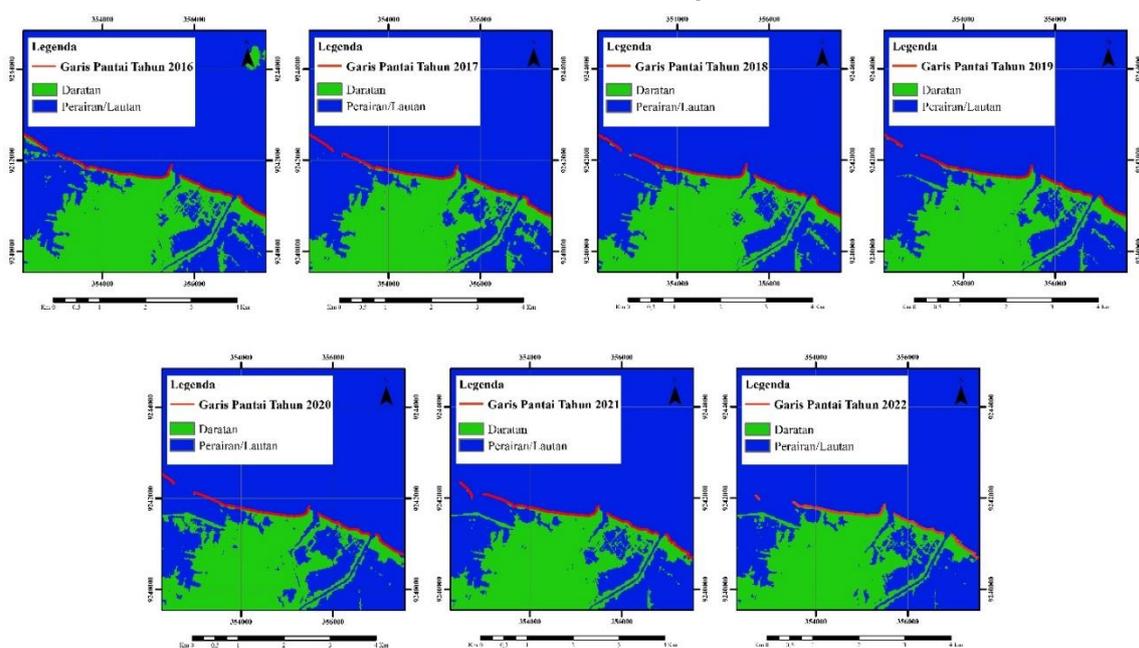
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Abrasi dan Akresi di Pesisir Kota Pekalongan Tahun 2016–2022

Data yang dijadikan acuan dalam penelitian ini adalah data citra Sentinel-2 MSI Level 1-C dengan resolusi spasial 20 m akuisisi bulan Agustus dari tahun 2016–2022. Data yang digunakan harus bebas dari awan setiap tahunnya karena keberadaan awan pada citra dapat mengganggu proses penentuan garis batas pantai, terutama di daerah perbatasan antara daratan dan lautan. Hal ini dikarenakan tutupan awan yang minim akan menghasilkan ketampakan citra yang lebih jernih sehingga data yang digunakan adalah data yang berasal dari musim kering, di mana keberadaan awan sangat terbatas.

Citra Sentinel-2 tersebut kemudian digunakan untuk melakukan perhitungan MNDWI yang bertujuan untuk memisahkan daerah laut dan daratan pada citra dengan memanfaatkan perbedaan tingkat reflektansi antara daerah air dan darat. Setelah proses perhitungan MNDWI, dilakukan penentuan nilai *threshold* atau ambang batas yang akan digunakan untuk mengekstraksi garis pantai. Setiap citra memiliki karakteristik yang berbeda-beda, sehingga nilai ambang batas yang optimal akan bervariasi tergantung pada kondisi masing-masing citra.

Metode *thresholding* yang digunakan untuk menentukan nilai ambang batas pada penelitian ini adalah metode Otsu dengan perangkat lunak ImageJ. Dalam pengolahannya, ImageJ membagi histogram citra menjadi dua kelompok, yaitu piksel dengan intensitas di atas nilai *threshold* dan piksel dengan intensitas di bawah nilai *threshold*. Metode Otsu melakukan iterasi melalui seluruh histogram dan menghitung variasi antarkelas untuk setiap nilai *threshold* yang memungkinkan.



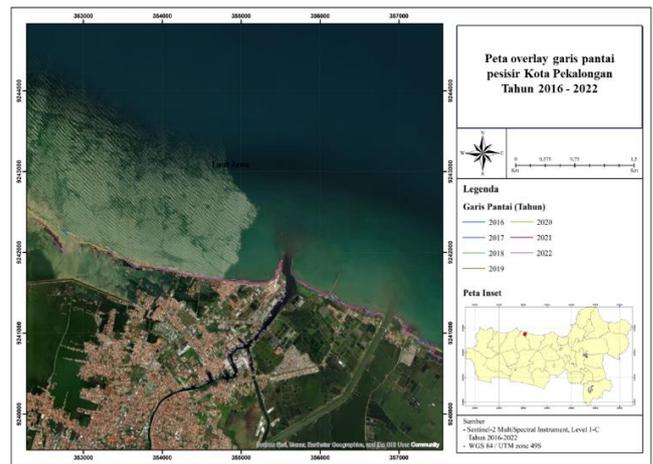
Gambar 3. Hasil ekstraksi garis pantai pesisir Kota Pekalongan tahun 2016–2022 yang memperlihatkan perubahan garis pantai sepanjang waktu tersebut.

Metode *thresholding* Otsu diterapkan pada citra MNDWI untuk memisahkan piksel-piksel yang mewakili daerah air dari piksel-piksel yang mewakili daratan berdasarkan perbedaan intensitas citra. Piksel dengan nilai MNDWI yang lebih besar dari nilai *threshold* MNDWI akan diklasifikasikan sebagai piksel air. Gambar 3 merupakan citra hasil pengolahan MNDWI tahun 2016–2022 yang telah diekstraksi dengan nilai *threshold* tertentu untuk mendapatkan data garis pantai yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah. Pada citra ini, area berwarna hijau mewakili daratan, sedangkan area berwarna biru menggambarkan perairan. Tiap citra MNDWI memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga nilai *threshold* yang optimal juga akan berbeda. Tabel 1 berisi daftar nilai *threshold* yang digunakan pada tiap citra dalam penelitian ini.

Tabel 1. Nilai *threshold* MNDWI pesisir Kota Pekalongan tahun 2016–2022

Tahun Akuisisi Citra	MNDWI Threshold
2016	0,31
2017	0,22
2018	0,26
2019	0,23
2020	0,20
2021	0,27
2022	0,28

Hasil ekstraksi garis pantai tersebut selanjutnya diolah menggunakan DSAS untuk mengidentifikasi dan menganalisis pola perubahan yang terjadi selama periode waktu yang diteliti. Jarak antartransek pada hasil pengolahan DSAS adalah 20 m yang dipilih berdasarkan resolusi spasial citra yang digunakan. Citra Sentinel-2 memiliki resolusi spasial 20 m untuk *band* 11 SWIR (*Short Infrared*) yang digunakan dalam MNDWI untuk mengukur penyerapan air. *Band* SWIR digunakan dalam model MNDWI karena air lebih banyak menyerap cahaya SWIR dari pada cahaya NIR (*Near Infrared*) sehingga *band* ini lebih baik dalam menggambarkan kondisi perairan. Jarak transek yang sesuai dengan resolusi tersebut memungkinkan untuk mendapatkan informasi detail dari citra. Pemilihan jarak transek 20 m pada pengolahan ini memberikan keseimbangan antara jumlah transek yang diperoleh dan efisiensi pemrosesan data.



Gambar 4. Hasil overlay garis pantai pesisir Kota Pekalongan tahun 2016 – 2022 yang menunjukkan abrasi. Tingkat abrasi tertinggi terjadi di bagian barat daerah penelitian meliputi wilayah Kelurahan Bandengan.



Gambar 5. Peta perubahan garis pantai Kota Pekalongan tahun 2016–2022 yang dioverlay dengan sebaran sedimen pesisir (Azizi dkk., 2017) dan titik lokasi pembangunan struktur pelindung pantai.

Hasil analisis menggunakan DSAS menunjukkan adanya perubahan pada garis pantai di Kota Pekalongan selama tahun 2016–2022 baik dalam bentuk abrasi maupun akresi seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5. Rincian informasi mengenai perubahan tersebut, termasuk lokasi-lokasi yang mengalami abrasi dan akresi disajikan pada Tabel 2. Hasil perhitungan jarak perubahan garis pantai pada Tabel 2 memberikan gambaran detail mengenai perubahan garis pantai di pesisir Kota Pekalongan

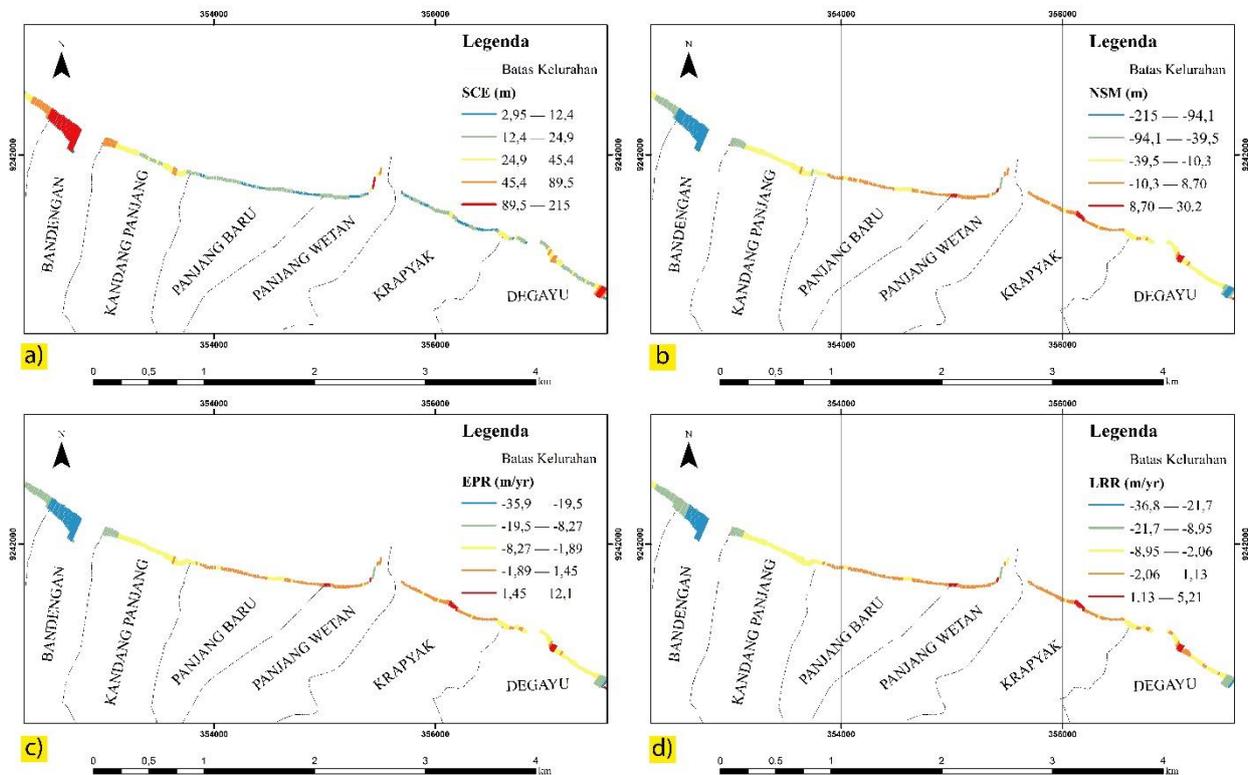
Tabel 2. Jarak abrasi dan akresi pesisir Kota Pekalongan tahun 2016–2022.

Kelurahan	Transek	Abrasi Total (m)	Rata-Rata Abrasi (m)	Akresi Total (m)	Rata-Rata Akresi (m)	Perubahan Garis Pantai (m)	Rata-Rata Perubahan Garis Pantai (m)
Degayu	1–54	-1.183	-21,9	78,2	1,45	-1.105	-20,5
Krapyak	55–109	-228	-4,15	138	2,52	-89,6	-1,63
Panjang Wetan	110–140	-131	-4,24	120	3,88	-11,2	-0,36
Panjang Baru	141–200	-347	-5,80	29,0	0,48	-318	-5,31
Kandang Panjang	201–241	-1.158	-28,3	2,19	0,05	-1.156	-28,2
Bandengan	242 – 279	-3.019	-79,5	0,00	0,00	-3.019	-79,5

Nilai negatif menunjukkan jenis perubahan abrasi, yang mengindikasikan penarikan atau pengikisan garis pantai ke arah daratan. Sementara itu, nilai positif menunjukkan jenis perubahan akresi, yang menandakan perluasan atau penambahan daratan di sekitar pantai. Pada interval tahun 2016–2022, pantai Kota Pekalongan memiliki rata-rata abrasi sebesar 24 m, sedangkan rata-rata nilai akresi sebesar 1,40 m. Hasil ini memberikan pemahaman yang lebih mendetail mengenai dinamika perubahan garis pantai di Kota Pekalongan, dan menunjukkan tren umum perubahan yang terjadi selama periode penelitian. Dapat terlihat bahwa pola perubahan secara keseluruhan didominasi oleh proses abrasi, terutama terjadi di Kelurahan Bandengan.

3.2 Nilai Perubahan Garis Pantai Kota Pekalongan Tahun 2016–2022

Hasil analisis yang telah dilakukan memberikan informasi mengenai total, rata-rata, nilai maksimum, dan nilai minimum dari variabel SCE, NSM, EPR, dan LRR terkait perubahan garis pantai di pesisir Kota Pekalongan. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 3, yang menunjukkan nilai untuk setiap variabel yang diamati. Dengan menganalisis tabel ini, dapat diidentifikasi nilai ekstrem, seperti perubahan terbesar dan terkecil yang terjadi, serta memahami distribusi nilai perubahan garis pantai secara keseluruhan. Visualisasi nilai SCE, NSM, EPR, dan LR di pesisir Kota Pekalongan dari tahun 2016– 2022 dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Visualisasi nilai SCE, NSM, EPR, dan LR di pesisir Kota Pekalongan dari tahun 2016– 2022

Tabel 3. Hasil perhitungan perubahan garis pantai Kota Pekalongan tahun 2016–2022.

Nilai	SCE (m)	NSM (m)	EPR (m/tahun)	LRR (m/tahun)
Total	8.230	-5.701	-1.102	-1.067
Rata-Rata	30,0	-20,8	-4,02	-3,96
Maksimum	215	30,2	12,1	5,21
Minimum	2,95	-215	-35,9	-36,8

SCE merupakan jarak terbesar antara semua garis pantai pada suatu transek yang selalu diukur dari *baseline* sebagai nilai positif. Nilai SCE dapat digunakan untuk membandingkan tingkat perubahan garis pantai di berbagai lokasi pada pesisir Kota Pekalongan. Area dengan nilai SCE yang lebih tinggi menunjukkan bahwa area tersebut lebih rentan terhadap perubahan garis pantai yang signifikan. Nilai tinggi ini dapat menjadi indikator potensi kerusakan akibat abrasi atau perubahan lingkungan pesisir, sedangkan area dengan nilai SCE lebih rendah menunjukkan stabilitas garis pantai yang lebih baik.

Berdasarkan hasil analisis SCE, perubahan garis pantai terbesar mencapai 215,38 m, sementara perubahan terkecil 2,95 meter. Nilai positif yang dihasilkan oleh SCE tidak selalu menunjukkan adanya akresi sehingga kedua nilai ini dapat mengindikasikan baik akresi maupun abrasi. Pada daerah penelitian, Kelurahan Bandengan mencatat perubahan garis pantai dengan jarak terjauh, sedangkan Kelurahan Krapyak menunjukkan perubahan garis pantai dengan jarak terdekat. Rata-rata jarak pergeseran garis pantai terjauh dan terdekat dari garis dasar adalah sekitar 30,04 meter.

NSM dihitung dengan mengurangkan jarak garis pantai tertua dengan garis pantai termuda untuk setiap transek dalam satuan meter. Hasil perhitungan NSM menunjukkan adanya pergerakan neto garis pantai, baik positif maupun negatif. Pergerakan neto garis pantai mengacu pada perubahan keseluruhan yang terjadi pada posisi garis pantai dari waktu ke waktu yang mencerminkan perbedaan antara garis pantai awal dan garis pantai akhir dalam suatu periode tertentu. Nilai NSM positif menandakan bahwa garis pantai mengalami akresi atau pergeseran ke arah laut, sedangkan nilai NSM negatif menunjukkan bahwa garis pantai mengalami abrasi atau pergeseran ke arah daratan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai NSM yang diukur di pesisir Kota Pekalongan selama tahun 2016–

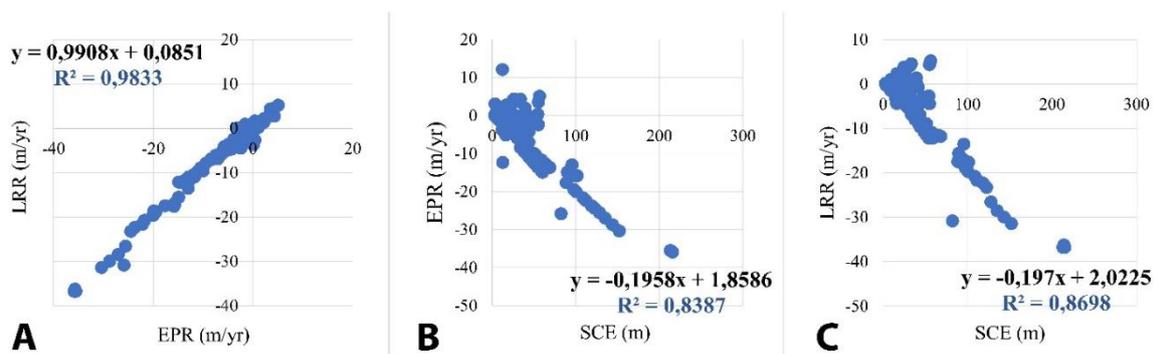
2022 memiliki rentang nilai -215,38 hingga 30,20 meter. Nilai NSM terendah terdapat di pesisir Kelurahan Bandengan, sedangkan nilai NSM tertinggi terdapat di pesisir Kelurahan Degayu. Pada Kelurahan Bandengan, nilai NSM bervariasi antara -215,38 hingga -12,36 meter, menandakan adanya proses abrasi yang signifikan dibandingkan dengan daerah lain. Sementara itu, di daerah Krapyak dan Degayu (bagian timur daerah penelitian) yang memiliki NSM tinggi disimpulkan mengalami proses akresi. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Nugroho & Indra (2022) yang menyebutkan bahwa di daerah barat pesisir Kota Pekalongan abrasi sangat dominan terjadi sedangkan pada bagian timur cenderung mengalami akresi.

EPR merupakan metode yang digunakan untuk mengukur laju perubahan garis pantai dalam satuan meter per tahun. Perhitungan EPR didasarkan pada pembagian NSM dengan selisih waktu antara garis pantai tertua dan garis pantai termuda. Semakin tinggi nilai EPR, semakin cepat garis pantai mengalami perubahan. Nilai EPR positif menandakan bahwa garis pantai mengalami perpanjangan atau pergeseran ke arah laut dengan kecepatan tertentu per tahunnya. Sementara itu, jika nilai EPR negatif menunjukkan bahwa garis pantai mengalami pergeseran ke arah daratan.

Hasil perhitungan EPR menunjukkan bahwa terjadi perubahan pada garis pantai di Kota Pekalongan dengan tingkat kecepatan tertentu selama periode tahun 2016–2022. Daerah yang mengalami tingkat abrasi pantai tertinggi terdapat di Kelurahan Bandengan dengan nilai -35,89 m/tahun. Rata-rata laju pergeseran garis pantai terjauh dan terdekat dari garis dasar sekitar -4,02 m/tahun.

Sejalan dengan EPR, LRR juga merupakan metode untuk mengetahui laju perubahan garis pantai. LRR dihitung dengan menggunakan garis regresi kuadrat terkecil dari seluruh posisi garis pantai pada setiap transek. Metode ini berguna untuk mengamati tren evolusi garis pantai dan menentukan laju regresi linier yang diukur dalam satuan meter per tahun (m/tahun), yang menggambarkan tingkat perubahan pesisir dalam jangka panjang (Zoyso et al., 2023).

Hasil analisis menunjukkan bahwa selama tahun 2016–2022 di Kota Pekalongan, nilai terbesar laju abrasi berdasarkan metode LRR adalah -36,75 m/tahun yang terjadi di Kelurahan Bandengan. Rata-rata laju pergeseran garis pantai terjauh dan terdekat dari garis dasar sekitar -3,95 m/tahun, tidak berbeda secara signifikan dengan hasil perhitungan laju perubahan garis pantai berdasarkan perhitungan EPR.



Gambar 7. Korelasi metode perhitungan laju perubahan garis pantai a) EPR dan LRR; b) SCE dan EPR; c) SCE dan LRR.

Grafik regresi linear pada Gambar 7 menunjukkan bahwa laju perubahan garis pantai di Kota Pekalongan yang dihitung dengan metode EPR maupun LRR memiliki korelasi yang sangat baik dengan nilai R^2 tinggi. LRR pada penelitian ini memiliki tingkat korelasi yang sedikit lebih baik dalam memperkirakan laju perubahan garis pantai karena LRR menggunakan semua data garis pantai yang tersedia untuk menghitung tingkat perubahan garis pantai (Islam & Crawford, 2022), sedangkan EPR hanya mempertimbangkan posisi garis pantai paling awal dan terbaru (Nguyen & Takewaka, 2020).

3.3 Penyebab Perubahan Garis Pantai Kota Pekalongan

Berdasarkan analisis faktor penyebab perubahan garis pantai Kota Pekalongan yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa faktor utama yang menyebabkan perubahan berupa abrasi adalah interaksi antara proses sedimentasi dengan energi penggerak seperti gelombang, arus laut, dan angin. Berdasarkan Tabel 4, dapat diketahui bahwa musim timur memiliki kecepatan angin yang lebih tinggi dibandingkan dengan musim lainnya. Semakin besar nilai kecepatan angin maka gelombang yang dihasilkan juga akan semakin besar (Triatmodjo, 1999). Hal ini menyebabkan tinggi dan periode gelombang di perairan Kota Pekalongan terutama pada musim timur cenderung tinggi.

Tabel 4. Tinggi gelombang dan periode signifikan perairan Kota Pekalongan 5 Oktober 2021 (Putra dkk., 2022).

Musim	Hs (m)	Ts (detik)
Musim Barat	0,33	2,88
Musim Peralihan 1	0,40	3,29
Musim Timur	0,45	3,51
Musim Peralihan 2	0,26	2,2

Sedimen di sepanjang pantai utara Kota Pekalongan merupakan masukan sedimen yang terangkut dari Sungai Banger dan Sungai Loji. Sedimen tersebut akan dibawa oleh *longshore current* atau arus sejajar pantai (Triatmodjo, 1999). Nilai angkutan sedimen yang diakibatkan oleh arus sejajar pantai berbeda pada setiap musimnya karena dipengaruhi oleh kekuatan energi penggerak seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Nilai angkutan sedimen tersebut menggambarkan jumlah sedimen yang terbawa di lokasi penelitian, dengan jarak sejauh 100 m dari garis pantai dan kedalaman 0–2 m. Volume angkutan sedimen di sepanjang pantai Kota Pekalongan mencapai puncaknya pada musim timur, sejalan dengan tingginya gelombang pada musim tersebut.

Tabel 5. Angkutan sedimen di pantai Kota Pekalongan tahun 2021 (Putra dkk., 2022).

Musim	Qs (m ³ /tahun)	Qs (m ³ /hari)
Musim Barat	560.000	1.534
Musim Peralihan 1	499.186	1.367
Musim Timur	1.014.595	2.779
Musim Peralihan 2	386.837	1.059

Sedimentasi dari sungai ke pantai pada dasarnya berperan sebagai tanggul alami dalam perubahan garis pantai dengan mengakumulasi material sedimen di daerah pesisir, di mana interaksi antara proses sedimentasi dan energi penggerak seperti gelombang, arus laut, dan angin menciptakan keseimbangan dinamis di lingkungan pesisir. Namun, perubahan garis pantai berupa abrasi tetap terjadi, karena energi penggerak tersebut memiliki kekuatan yang lebih besar daripada deposit sedimen yang disuplai oleh sungai. Hal ini dapat dilihat dari lebih dominannya abrasi yang terjadi di bagian barat pantai Kota Pekalongan, sebab pada musim timur angin utama yang menghasilkan gelombang bertiup ke arah barat sehingga pengaruh energi penggerak pada daerah tersebut lebih besar dibandingkan deposit sedimennya. Menurut Azizi et al. (2017), gelombang kuat yang mencapai pantai akan mengikis dan mempengaruhi perubahan garis pantai serta angkutan sedimen. Pecahnya gelombang dapat menyebabkan terbentuknya arus sejajar pantai yang dapat memindahkan sedimen di sepanjang pantai yang menyebabkan perubahan garis pantai. Widada et al. (2022) juga menyebutkan bahwa perubahan garis pantai dapat dipengaruhi oleh besar kecilnya influks material sedimen yang masuk ke laut. Jika suplai sedimen yang tersapu gelombang lebih banyak daripada yang mengendap maka garis pantai akan mengalami abrasi, sedangkan jika suplai sedimen banyak yang mengendap maka cenderung terjadi akresi.

Faktor litologi juga mempengaruhi abrasi yang terjadi. Pantai Kota Pekalongan tersusun atas satuan litologi Endapan Aluvial yang terdiri dari material pasir yang dominan, pasir lanauan, serta lanau hingga lempung. Material pasir di daerah ini merupakan endapan pantai dengan warna kuning muda dalam keadaan kering (Gambar 8). Ukuran butir pasir bervariasi dari halus hingga kasar dan butirannya terpisah satu sama lain. Selain itu, juga terdapat pasir lanauan yang merupakan endapan sungai dengan warna coklat muda (Gambar 9). Teksturnya sangat urai dengan ukuran butir pasir sedang hingga halus dan memiliki sifat sedikit lengket yang berasal dari material dengan ukuran butir lebih halus dari pada pasir (lanau dan lempung). Pada peta *overlay* data sebaran sedimen dengan data perubahan garis pantai, terlihat bahwa abrasi lebih dominan terjadi di daerah dengan sebaran sedimen berukuran lempung lanauan dibandingkan dengan daerah yang memiliki sebaran sedimen berukuran pasir.



Gambar 8. Litologi endapan aluvial berupa pasir (X,Y= 356651, 9241235).



Gambar 9. Litologi endapan aluvial berupa pasir lanauan (X,Y= 353738 , 9241842).

Litologi endapan aluvial lebih rentan terhadap terjadinya perubahan garis pantai dibandingkan dengan litologi yang resisten seperti batuan beku. Hal ini dikarenakan endapan aluvial umumnya tersusun oleh material lepas dan belum tekompaksi serta memiliki resistensi rendah sehingga ketika terkena erosi atau tekanan hidrodinamik yang tinggi akan mudah terkikis atau terdeposisi. Selain itu, litologi ini juga memiliki kemampuan transportasi yang tinggi sehingga dapat dengan mudah dibawa oleh arus sungai atau gelombang laut dan berpindah ke lokasi lain. Hal ini menyebabkan potensi perubahan garis pantai yang lebih tinggi karena aluvial dapat terakumulasi atau tererosi lebih cepat.

Sementara itu, perubahan garis pantai berupa akresi dominan disebabkan oleh aktivitas manusia dalam bentuk pembangunan struktur pelindung pantai. Pelindung pantai akan menstabilkan garis pantai dengan cara mengurangi erosi pantai dan meningkatkan sedimentasi di daerah pantai. Pelindung pantai bertujuan untuk meredam gelombang laut dan mendorong pembentukan sedimen pantai. Bentuk perlindungan pantai melibatkan penggunaan struktur keras seperti *revetment*, pemecah gelombang, *jetty*, dan *groin* (Gambar 10). Pemilihan jenis perlindungan pantai dilakukan berdasarkan kondisi dan kebutuhan di lapangan.



Gambar 10. Jenis perlindungan pantai di Kota Pekalongan a) *Revetment* (X,Y= 356490, 9241321); b) Pemecah gelombang (X,Y= 356151, 9241440); c) *Jetty* (X,Y= 355505, 9241883); d) *Groyne* (X,Y= 354378, 9241703).

Revetment atau dinding pantai merupakan struktur pelindung pantai yang umumnya terbuat dari batu, beton, atau bahan lain yang tahan terhadap abrasi. Fungsinya adalah

memisahkan daratan dan perairan pantai, dengan tujuan melindungi pantai dari erosi dan limpasan gelombang yang menuju ke darat (Triatmodjo, 1999). *Revetment* cocok digunakan di pantai yang mengalami abrasi gelombang dan membutuhkan perlindungan tambahan dari erosi.

Jetty merupakan struktur yang memanjang dari pantai atau muara sungai ke laut. Biasanya terdiri dari rangkaian tumpukan beton atau batu yang dirancang untuk memperpanjang garis pantai atau memperdalam jalur air. *Jetty* dibangun tegak lurus terhadap pantai dan ditempatkan di kedua sisi muara sungai, dengan tujuan untuk mengurangi pendangkalan alur akibat sedimen pantai (Triatmodjo, 1999). *Jetty* cocok digunakan di muara sungai atau pelabuhan yang mengalami masalah sedimentasi dan aliran sungai yang kuat.

Groyne merupakan struktur perlindungan pantai yang terdiri dari tumpukan batu atau beton, dan umumnya dibangun tegak lurus terhadap garis pantai. Fungsinya adalah untuk mengendalikan transportasi sedimen sepanjang pantai sehingga dapat mengurangi atau menghentikan erosi yang terjadi (Triatmodjo, 1999). Dengan menghambat atau memperlambat aliran sedimen, *groyne* membantu dalam mempertahankan atau memperluas pantai di satu sisi *groyne*, sementara di sisi lainnya dapat terjadi erosi. *Groyne* umumnya dibangun secara berurutan dengan jarak yang teratur. *Groyne* cocok digunakan di pantai yang mengalami erosi akibat pergerakan sedimen paralel pantai dan membutuhkan pengendalian aliran air yang melalui area tertentu.

Pemecah gelombang (*breakwater*) merupakan struktur yang digunakan untuk melindungi daerah perairan dari dampak gelombang. Pemecah gelombang dapat berupa susunan tumpukan batu, blok beton, atau tetrapod yang ditempatkan secara strategis. Tujuan dari pemecah gelombang adalah untuk meredam energi gelombang, sehingga dapat mengurangi erosi pantai dan memberikan perlindungan bagi daerah pesisir. Pemecah gelombang cocok digunakan di pantai yang mengalami erosi akibat tumbukan gelombang yang kuat dan untuk melindungi infrastruktur dan properti dari dampak ombak.

Perlindungan pantai merupakan langkah penting dalam menjaga stabilitas garis pantai, yang dapat dilihat dalam daerah penelitian di mana pelindung pantai dapat mencegah abrasi. Titik lokasi struktur pelindung pantai yang sudah dibangun saat ini dapat dilihat pada Gambar 5. Beberapa titik struktur pelindung pantai terlihat mampu mempertahankan garis pantai sehingga dapat meminimalkan terjadinya abrasi, seperti pada daerah Krapyak dan Degayu (bagian timur daerah penelitian). Namun, di daerah Bandengan, yang merupakan daerah dengan tingkat abrasi paling tinggi, struktur pelindung pantai yang sudah dibangun tidak terlalu berdampak. Oleh karena itu, perlu diperluas lebih lanjut berdasarkan peta perubahan garis pantai yang menunjukkan lokasi-lokasi yang mengalami abrasi yang memerlukan perlindungan pantai. Dengan demikian, upaya perlindungan pantai dapat menjadi lebih efektif dalam menjaga keberlangsungan pesisir dan mengurangi dampak abrasi yang berpotensi merusak daerah pantai.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a) Pesisir utara Kota Pekalongan mengalami perubahan garis pantai selama tahun 2016–2022. Wilayah pesisir yang mengalami abrasi dominan dengan tingkat pengikisan rata-rata mencapai 79,5 m adalah Kelurahan Bandengan, sedangkan Kelurahan Panjang Wetan merupakan wilayah yang mengalami akresi dominan sebesar 3,88 m.
- b) Garis pantai Kota Pekalongan mengalami perubahan yang signifikan selama tahun 2016–2022, dengan perubahan terbesar mencapai 215 m dan perubahan terkecil 2,95 m. Abrasi menjadi proses dominan yang terjadi di pesisir Kota Pekalongan dengan rata-rata perubahan secara keseluruhan sebesar 20,8 m. Laju perubahan garis pantai berdasarkan perhitungan EPR menunjukkan rata-rata -4,02 m/tahun, sedangkan berdasarkan nilai LRR sebesar -3,95 m/tahun. Wilayah yang memiliki nilai SCE, NSM, EPR, dan LRR yang tinggi menunjukkan tingkat perubahan garis pantai yang signifikan setiap tahunnya dan memerlukan perhatian khusus dalam pengelolaan pesisir.
- c) Faktor utama penyebab perubahan berupa abrasi adalah interaksi antara proses sedimentasi dengan energi penggerak seperti gelombang, arus laut, dan angin. Sedangkan daerah yang mengalami akresi dominan disebabkan oleh adanya tindakan perlindungan pantai berupa pembangunan *revetment*, pemecah gelombang, *jetty*, dan *groin*. Pembangunan struktur pelindung pantai tersebut dapat menstabilkan bahkan memperluas daerah pantai, menjadikannya lebih tahan terhadap abrasi. Oleh karena itu, pembangunan struktur pelindung pantai dapat ditingkatkan di daerah-daerah yang mengalami abrasi.

PERSANTUNAN

Penulis berterima kasih kepada pihak Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Badan Geologi Provinsi Jawa Tengah yang telah menyediakan data dan memberikan bimbingan terkait penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Azizi, M. I., Hariyadi, & Atmodjo, W. (2017). Pengaruh Gelombang Terhadap Sebaran Sedimen Dasar di Perairan Tanjung Kalian Kabupaten Bangka Barat. *Jurnal Oseanografi*, 6(1), 165–175.
- Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., & Rahman, A. (2020). Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). *Annals of GIS*, 26(4), 361–376. <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1815839>
- Chand, P., & Acharya, P. (2010). Shoreline change and sea level rise along coast of Bhitarkanika wildlife sanctuary, Orissa: An analytical approach of remote sensing and statistical techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(3), 436–455.
- Chulafak, G. A., Khomarudin, M. R., Ardha, M., Pranowo, W. S., Prayudha, B., & Mujiyo. (2022). Thirty years of change of Pekalongan coastline based on Landsat imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109 (2022) 012056. doi:10.1088/1755-1315/1109/1/012056.
- Damanik, O. S, Sudarsono, B., & Amarrohman, F. J. (2019). Analisis Pengaruh Perubahan Garis Pantai Terhadap Pengelolaan Wilayah Laut Daerah Kabupaten Pekalongan Dan Kota Pekalongan. *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1), 28 – 37.
- Diatama, N. (2020). Analisis Dampak Perubahan Garis Pantai Terhadap Perubahan Penggunaan Lahan dan Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat di Kecamatan Pekalongan Utara Tahun 2003 – 2018. *Skripsi Universitas Sebelas Maret*, Surakarta.
- El-Asmar, H. M., & Hereher, M. E. (2011). Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing. *Environmental Earth Sciences*, 62(4), 769–777. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0564-9>
- Islam, M. S., & Crawford, T. W. (2022). Assessment of Spatio-Temporal Empirical Forecasting Performance of Future Shoreline Positions. *Remote Sensing*, 14(24), 6364. <https://doi.org/10.3390/rs14246364>
- Istiqomah, F., Sasmito, B., & Amarrohman, F. J. (2016). Pemantauan Perubahan Garis Pantai Menggunakan Aplikasi Digital Shoreline Anaysis System (Dsas) Studi Kasus : Pesisir Kabupaten Demak. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(1), 78–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jgundip.2016.10559>
- Nguyen, Q. H., & Takewaka, S. (2020). Land subsidence and its effects on coastal erosion in the Nam Dinh Coast (Vietnam). *Continental Shelf Research*, 207, 104227. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104227>
- Nugroho, K & Indra, T. (2022). Identifikasi Perubahan Garis Pantai Menggunakan Citra Satelit Landsat Dengan Metode Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Studi Kasus: Kota Pekalongan, Jawa Tengah). *Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir 2022*. Institut Teknologi Bandung.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method From Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–69.
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 Data for Land Cover / Use Mapping : A Review. *Remote Sensing*, 42(14), 1–35. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
- Schindelin, J., Rueden, C. T., Hiner, M. C., & Eliceiri, K. W. (2015). The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Molecular Reproduction and Development*, 82(7–8), 518–529. <https://doi.org/10.1002/mrd.22489>
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai*. Beta Offset.

- Widada, S., Ismanto, A., Priambodo, I. B., Siagian, H., Perikanan, F., & Diponegoro, U. (2022). *Perubahan Garis Pantai dan Dampaknya Terhadap Banjir Rob*. 25(1), 121–130. <https://doi.org/10.14710/jkt.v25i1.13843>
- Zoysa, S., Basnayake, V., Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Kantamaneni, K., Muttill, N., Pawar, U., & Rathnayake, U. (2023). Analysis of Multi-Temporal Shoreline Changes Due to a Harbor Using Remote Sensing Data and GIS Techniques. *Sustainability*, 15(9), 7651. <https://doi.org/10.3390/su15097651>