

ANALISIS DINAMIKA GARIS PANTAI DI KOTA SIBOLGA TAHUN 1994-2024 MENGGUNAKAN CITRA LANDSAT MULTITEMPORAL

**(ANALYSIS OF COASTLINE DYNAMICS IN SIBOLGA CITY FROM 1994-2024
USING MULTITEMPORAL LANDSAT IMAGERY)**

Alpeus Manihuruk^{1*}, Okta Fajar Saputra¹, Munawaroh¹

¹ Pusat Riset Geoinformatika, Badan Riset dan Inovasi Nasional

*alpe001@brin.go.id

Diterima : 09 Oktober 2025 Disetujui : 29 November 2025

ABSTRAK

Perubahan garis pantai merupakan indikator penting dinamika geomorfologi pesisir yang dipengaruhi oleh interaksi antara proses alami dan aktivitas manusia. Kota Sibolga sebagai wilayah pesisir yang mengalami perkembangan perkotaan dan infrastruktur yang semakin pesat memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap fenomena abrasi dan akresi. Akan tetapi, kajian komprehensif terkait laju, pola, dan luasan perubahan garis pantai di wilayah ini masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika perubahan garis pantai Kota Sibolga serta mengestimasi luas abrasi dan akresi selama periode 1994–2024. Analisis dilakukan menggunakan citra Landsat multitemporal tahun 1994, 2004, 2014, dan 2024. Ekstraksi garis pantai dilakukan secara otomatis melalui integrasi *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) dan metode *Otsu Thresholding* pada platform *Google Earth Engine*. Selanjutnya, perubahan garis pantai dianalisis secara kuantitatif menggunakan *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) dengan parameter *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), dan *Shoreline Change Envelope* (SCE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa akresi mendominasi dinamika garis pantai Kota Sibolga, mencakup sekitar 85% dari total transek dengan nilai maksimum mencapai 234,72 m, terutama di Kecamatan Sibolga Sambas. Sebaliknya, abrasi hanya teridentifikasi pada sekitar 5,9% transek dengan nilai maksimum -38,79 m, yang terutama terjadi di Kecamatan Sibolga Selatan. Secara keseluruhan, wilayah pesisir Kota Sibolga mengalami penambahan daratan seluas 35,37 ha dan kehilangan daratan sebesar 1,11 ha selama tiga dekade terakhir. Dominasi akresi ini mengindikasikan kuatnya pengaruh faktor antropogenik, khususnya aktivitas reklamasi dan pengembangan kawasan pesisir. Temuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung perencanaan, pengelolaan, dan pengendalian pemanfaatan wilayah pesisir Kota Sibolga secara berkelanjutan.

ABSTRACT

Shoreline change is a key indicator of coastal geomorphological dynamics resulting from the interaction between natural processes and human activities. Sibolga City, a rapidly developing coastal urban area, is highly vulnerable to shoreline instability, particularly abrasion and accretion processes. However, comprehensive studies addressing the rate, spatial pattern, and extent of shoreline change in this region remain limited. This study aims to analyze shoreline dynamics and quantify the extent of abrasion and accretion in Sibolga City over a 30-year period from 1994 to 2024. Multitemporal Landsat imagery from 1994, 2004, 2014, and 2024 was employed for shoreline extraction. An automated approach integrating the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) and Otsu thresholding was implemented using the Google Earth Engine platform. Quantitative shoreline change analysis was subsequently conducted using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), applying Net Shoreline Movement (NSM), End Point Rate (EPR), and Shoreline Change Envelope (SCE) metrics. The results indicate that accretion dominates the shoreline dynamics of Sibolga City, accounting for approximately 85% of total transects, with a maximum accretion distance of 234.72 m, particularly in Sibolga Sambas District. In contrast, shoreline erosion was identified in only 5.9% of transects, with a maximum retreat of -38.79 m, predominantly occurring in Sibolga Selatan District. Overall, the coastal area of Sibolga City experienced a net land gain of 35.37 ha and a land loss of 1.11 ha during the study period. These findings suggest that recent shoreline dynamics in Sibolga City are largely driven by anthropogenic factors, especially coastal reclamation and urban development. The results provide essential scientific evidence to support sustainable coastal planning and management in Sibolga City.

Keyword: shoreline change; erosion; accretion; Otsu thresholding; coastal dynamics

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan kawasan strategis yang berperan sebagai pusat pertumbuhan ekonomi, sosial, dan budaya, sekaligus menjadi penghubung utama antara sistem daratan dan lautan. Posisi strategis ini menjadikan wilayah pesisir mengalami tingkat pemanfaatan ruang yang tinggi dan pertumbuhan yang relatif lebih pesat dibandingkan wilayah lainnya. Secara global, diperkirakan lebih dari 65% populasi dunia akan bermukim di wilayah pesisir pada tahun 2050 (Adger dkk., 2005; Mimura, 2008; Priyanto, 2010; Saputra dkk., 2021). Pada skala nasional, kondisi serupa juga terjadi di Indonesia, di mana wilayah pesisir menjadi pusat pembangunan perkotaan dan ekonomi. Hal ini tercermin dari fakta bahwa 24 dari total 38 ibu kota provinsi di Indonesia berlokasi di kawasan pesisir, menegaskan peran penting wilayah ini dalam pembangunan nasional.

Namun demikian, pembangunan yang pesat di wilayah pesisir tidak terlepas dari berbagai permasalahan lingkungan. Tingginya kebutuhan lahan telah mendorong perubahan penggunaan lahan secara masif untuk keperluan industri, permukiman, perdagangan, pariwisata, transportasi, perikanan, dan pertanian (Fan dkk., 2020; Mimura, 2008; Priyanto, 2010). Tekanan terhadap ruang pesisir ini

berimplikasi pada degradasi ekosistem dan meningkatnya kerentanan lingkungan. Berbagai permasalahan seperti banjir pesisir, penurunan muka tanah (*land subsidence*), erosi pantai, sedimentasi, serta kerusakan ekosistem pesisir semakin sering terjadi. Selain itu, ancaman bencana alam seperti tsunami dan gempa bumi juga menunjukkan kecenderungan peningkatan intensitas di wilayah pesisir (Chen & Tfwala, 2018; Johnston dkk., 2021; Partono dkk., 2015; Saputra dkk., 2021).

Dalam konteks tersebut, perubahan garis pantai menjadi salah satu indikator ekologis dan geomorfologis yang penting untuk memahami dinamika pesisir. Perubahan garis pantai merupakan hasil dari interaksi berkelanjutan antara faktor alami, seperti gelombang, arus, pasang surut, dan perubahan iklim, serta aktivitas manusia yang memicu proses erosi, pelapukan, dan sedimentasi (Mao dkk., 2021; Mentaschi dkk., 2018a; Santra dkk., 2024). Fenomena ini tidak hanya berdampak pada stabilitas fisik wilayah pesisir, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap mata pencaharian masyarakat yang bergantung pada sumber daya pesisir.

Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap isu perubahan garis pantai, berbagai penelitian telah dilakukan di beberapa wilayah

Indonesia dengan memanfaatkan beragam pendekatan dan metode. Studi awal banyak dilakukan menggunakan peta konvensional dan data historis, seperti di Kabupaten Minahasa Tenggara (Opa, 2011) dan Karawang (Usman, 2009). Perkembangan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan ketersediaan data penginderaan jauh dengan resolusi spasial dan temporal yang semakin baik, membuka peluang untuk pemantauan garis pantai secara lebih akurat dan komprehensif. Pemanfaatan citra satelit telah banyak diterapkan di berbagai wilayah, antara lain di Cirebon (Heriati & Husrin, 2018; Hernawan, 2016), Subang (Salim dkk., 2017), Kabupaten Gresik (Anggraini dkk., 2017), dan Kabupaten Kepulauan Meranti (Hakim dkk., 2016; Indrawan dkk., 2017).

Lebih lanjut, penggunaan metode digitasi citra satelit multitemporal yang dipadukan dengan analisis *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* semakin banyak diterapkan dalam kajian perubahan garis pantai seperti di Kabupaten Padang Pariaman dan Kota Pariaman (Syaharani & Triyatno, 2019), Kabupaten Bantul (P. S. Dewi dkk., 2020), Kabupaten Kendal (Octaviana dkk., 2020; Astuti dkk., 2021), Kabupaten Nagan Raya (Setyawan dkk., 2021), serta di Kabupaten Pati (Prahesti dkk., 2020). Kajian serupa juga dilakukan di Kabupaten Demak dengan memanfaatkan citra Landsat (Ramadhani dkk., 2021), di Teluk Banten (Solihudin dkk., 2020) dan di Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat (Adriat dkk., 2021) semakin memperkaya literatur tentang dinamika pesisir. Selain itu, pemanfaatan citra radar Sentinel-1 untuk deteksi perubahan garis pantai juga telah diterapkan di Kabupaten Lampung Selatan (Julianto & Anggara, 2021). Secara umum, studi-studi tersebut menegaskan pentingnya pemantauan perubahan garis pantai sebagai dasar pengelolaan wilayah pesisir yang berkelanjutan. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada wilayah pesisir dengan dominasi proses alami, sementara kajian pada kota pesisir dengan tekanan urbanisasi dan reklamasi yang intensif masih relatif terbatas.

Kota Sibolga merupakan kota pesisir strategis di pantai barat Sumatera yang berkembang pesat sebagai pusat perikanan, perdagangan, dan jasa. Keberadaan Pelabuhan Perikanan Nusantara (PPN) Sibolga telah mendorong pertumbuhan ekonomi dan penyerapan tenaga kerja yang signifikan (Widodo & Mahiswara, 2011; Banjarnahor dkk., 2016). Dari sisi ekologis, Teluk Sibolga memiliki ekosistem pesisir yang kompleks dan saling terhubung, termasuk terumbu karang, padang lamun, dan mangrove, yang

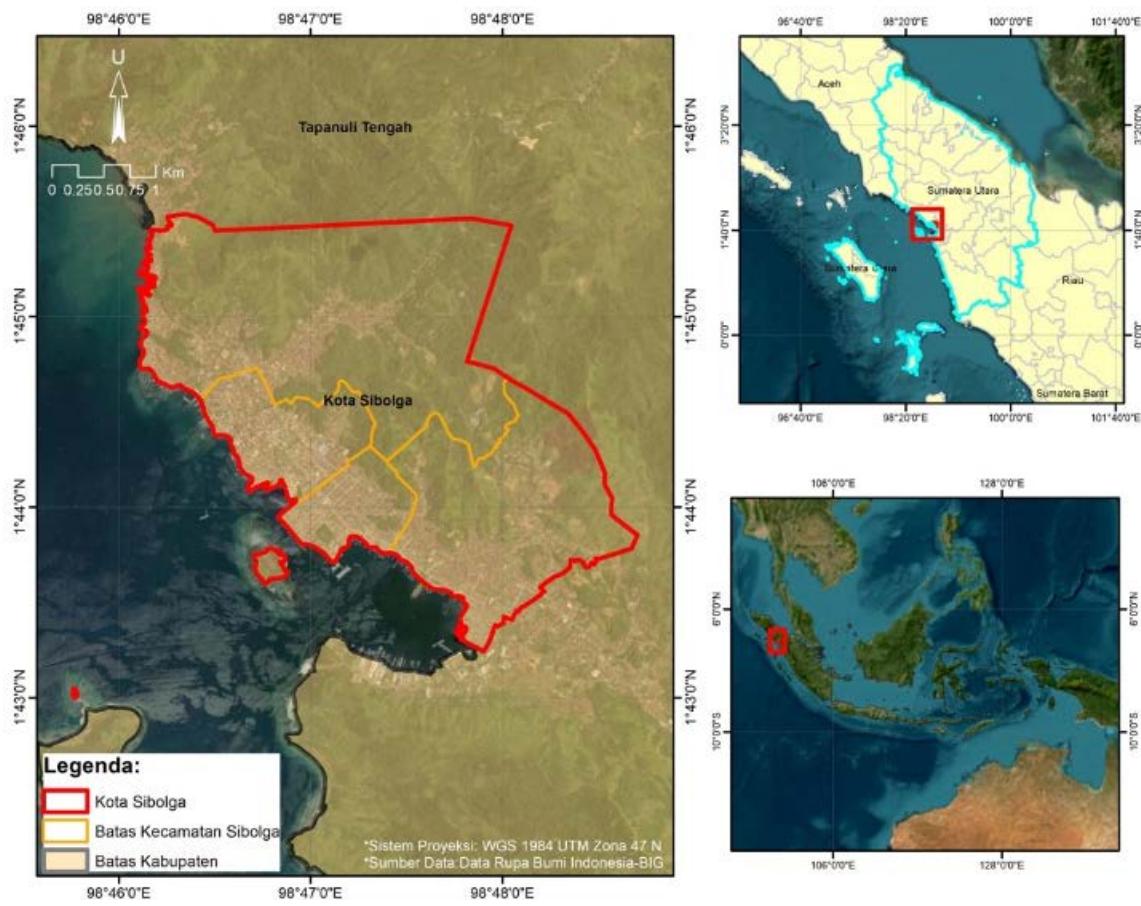
berperan penting dalam mendukung produktivitas perikanan dan jasa ekosistem (Unsworth dkk., 2008; Granek dkk., 2009; Guannel dkk., 2016). Namun, keterbatasan lahan dan pesatnya urbanisasi pesisir telah mendorong reklamasi kawasan pasang surut untuk pengembangan infrastruktur perkotaan dan industri perikanan, terutama di Kecamatan Sibolga Sambas dan Sibolga Utara (Sitorus & Harahap, 2022). Fenomena ini sejalan dengan tren global, di mana urbanisasi pesisir menjadi salah satu pendorong utama perubahan ekosistem pesisir (Lai dkk., 2015). Meskipun dalam kondisi tertentu urbanisasi pesisir dapat memberikan dampak positif tidak langsung terhadap pertumbuhan mangrove melalui perubahan kondisi iklim lokal di beberapa wilayah (Wei dkk., 2024), namun secara umum pembangunan pesisir yang tidak terkendali berpotensi menyebabkan fragmentasi habitat, degradasi kualitas air, dan penurunan sumber daya laut (Bishop dkk., 2017).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika perubahan garis pantai Kota Sibolga dengan fokus pada perhitungan besaran perubahan serta luas abrasi dan akresi selama periode 1994–2024. Penelitian ini mengintegrasikan *Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)* dan metode *Otsu Thresholding* dengan memanfaatkan citra Landsat multitemporal melalui platform *Google Earth Engine* untuk menghasilkan ekstraksi garis pantai secara otomatis. Analisis kuantitatif perubahan garis pantai selanjutnya dilakukan dengan membagi periode pengamatan ke dalam tiga interval waktu, yaitu 1994–2004, 2004–2014, dan 2014–2024. Pendekatan ini menawarkan kebaruan metodologis serta memiliki potensi untuk diaplikasikan di wilayah pesisir lainnya di Indonesia. Mengingat keterbatasan kajian terdahulu yang secara khusus memanfaatkan teknologi SIG dan penginderaan jauh untuk analisis perubahan garis pantai di Kota Sibolga dan sekitarnya, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur ilmiah dan memberikan dasar yang kuat bagi pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengelolaan wilayah pesisir yang berkelanjutan.

METODE

Metodologi Penelitian

Penelitian ini mengikuti alur kerja sistematis yang terdiri dari empat tahap utama: (1) pemilihan dan pengolahan citra satelit, (2) ekstraksi garis pantai, (3) analisis perubahan garis pantai menggunakan DSAS, dan (4) perhitungan luas

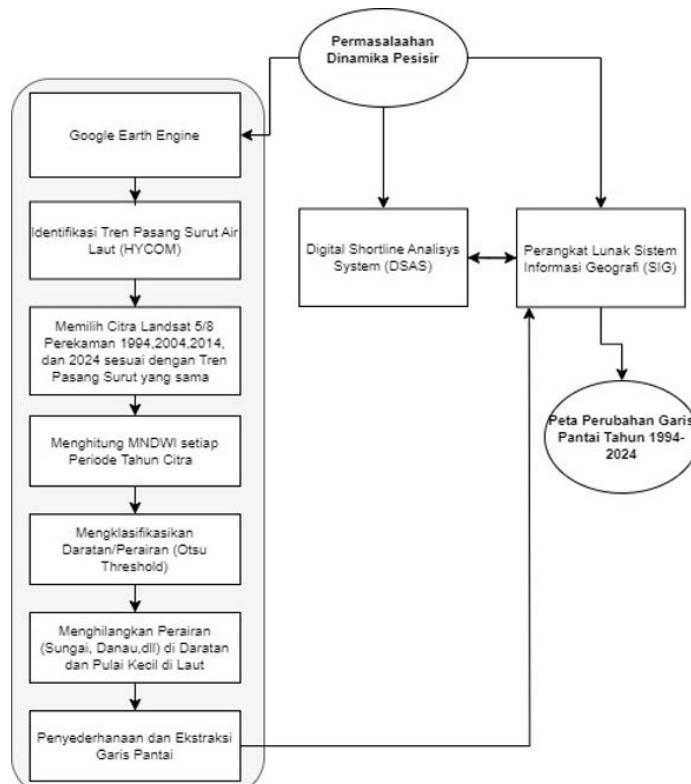


Gambar 1. Lokasi Penelitian

abiasi dan akresi. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.

Pemilihan dan Pengolahan Citra Satelit

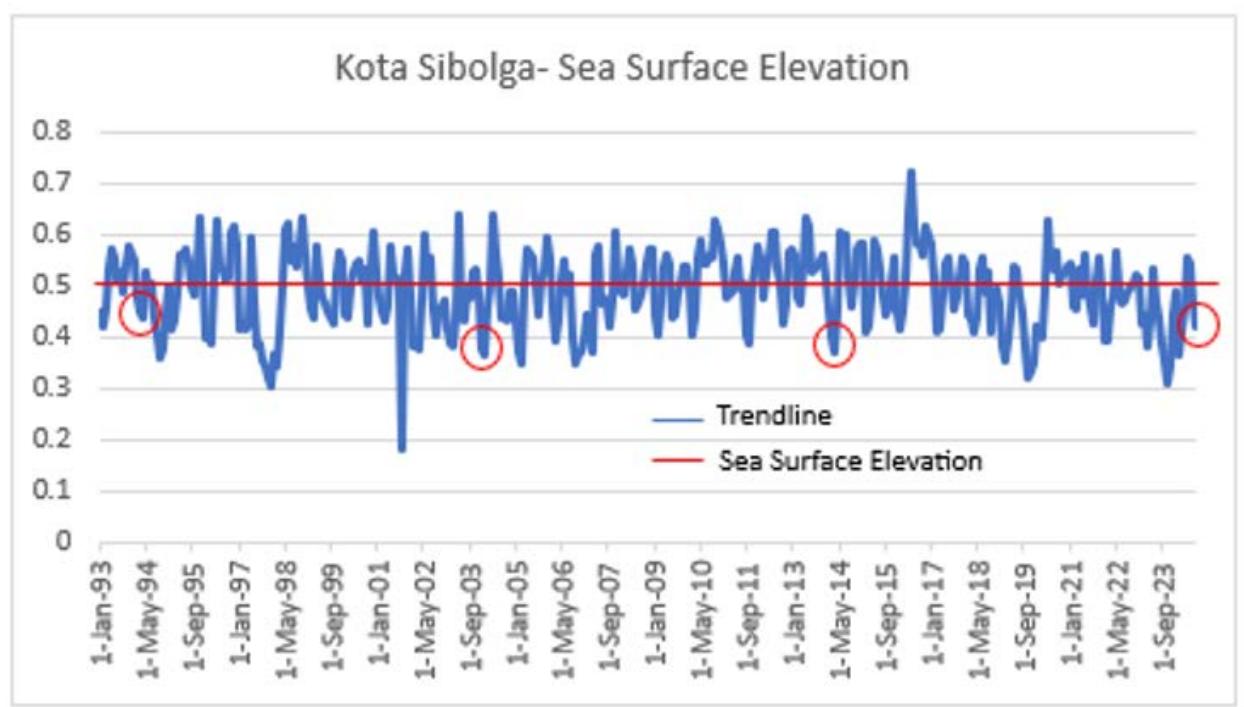
Data citra satelit yang digunakan adalah Landsat 5 dan Landsat 8 Level 2, *Collection 2, Tier 1* yang diakses melalui *Google Earth Engine* (GEE). Pemilihan waktu perekaman citra didasarkan pada data pasang surut terendah dari HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*) untuk meminimalkan kesalahan ekstraksi garis pantai. Data HYCOM dapat diakses melalui tautan: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/HYCOM_sea_surface_elevation. Data yang diperoleh disaring dan ditampilkan berdasarkan bulan, dimulai dari Januari 1993 hingga akhir Agustus 2024. Hasil identifikasi ini digunakan sebagai acuan dalam memilih waktu perekaman citra dengan ketinggian muka air yang serupa, untuk memperkecil kesalahan dalam analisis data. Adapun periode akuisisi citra yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Tabel 1. Periode Akuisisi Citra

No	Dataset Citra Satelit	Periode akuisisi
1	Landsat 5	Juli-Oktober 1994
2	Landsat 5	Desember 2003-Maret 2004
3	Landsat 8	Januari-April 2014
4	Landsat 8	Desember 2023-Maret 2024



Gambar 3. Data Pasang Surut Air Laut Kota Sibolga dan sekitarnya

Data tinggi muka air laut yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pasang terendah yang diperoleh pada empat periode waktu berbeda, yaitu tahun 1994, 2004, 2014, dan 2024. Gambar 3 menyajikan grafik di mana garis biru merepresentasikan tinggi muka air laut bulanan selama periode tiga puluh tahun, sedangkan garis merah menunjukkan rata-rata tinggi muka air laut sepanjang periode tersebut. Lingkaran merah yang terdapat dalam grafik menandakan data tinggi muka air laut terendah yang dipilih untuk penelitian ini.

Tahapan selanjutnya adalah *pre-processing* citra. Tahapan ini meliputi *cloud masking* menggunakan *bitmask* untuk menghilangkan awan

dan bayangan, *filtering* citra dengan tutupan awan <50%, komposit citra berdasarkan nilai median, kalibrasi reflektansi dengan faktor skala 0.0000275 dan *offset* -0.2, dan memotong citra sesuai batas administrasi Kota Sibolga. Hasil dari proses *masking* dan komposit citra Landsat yang terpilih untuk setiap periode ditampilkan pada Gambar 4.

Ekstraksi Garis Pantai

Ekstraksi garis pantai dilakukan melalui tahapan kalkulasi nilai *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), *otsu thresholding* dan *post-processing*. MNDWI merupakan metode hasil modifikasi yang dikembangkan oleh (Xu,



Gambar 4. Citra Landsat Hasil Masking dan Komposit. (a) Landsat 5 Tahun 1994; (b) Landsat 5 Tahun 2004; (c) Landsat 8 Tahun 2014; (d) Landsat 8 Tahun 2024

2006) untuk mendeteksi tubuh air dari citra satelit. Penerapan modifikasi MNDWI di wilayah pesisir perkotaan yang didominasi oleh permukiman dan lahan terbangun lainnya menghasilkan akurasi yang lebih tinggi (Hastuti dkk., 2024). Untuk Landsat 5, saluran yang digunakan untuk pita hijau adalah *band 2*, sedangkan pita inframerah gelombang pendek menggunakan *band 5*. Sementara itu, untuk Landsat 8, pita hijau diambil dari Band 3 dan pita inframerah gelombang pendek dari *band 6*. Algoritma perhitungan MNDWI seperti pada persamaan (1) (Xu, 2006)

$$MNDWI = \frac{GREEN-SWIR}{GREEN+SWIR}$$

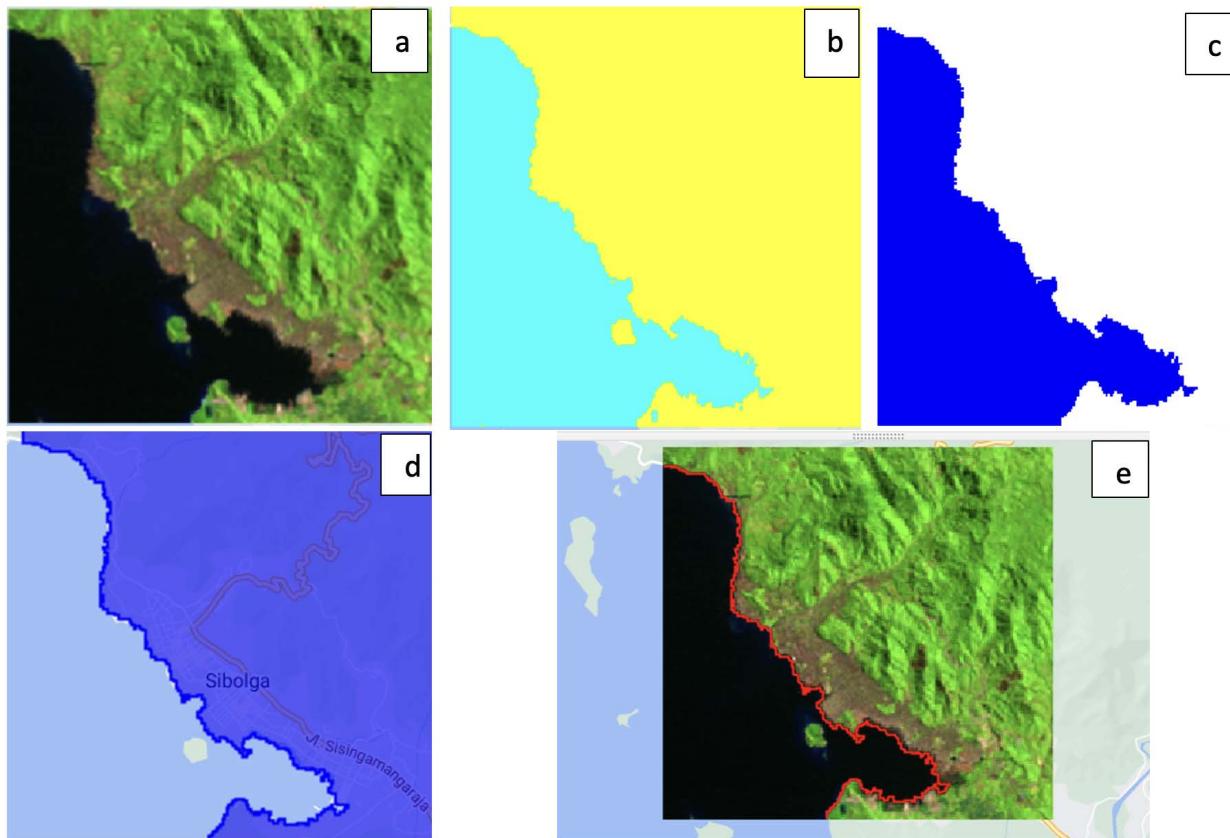
Persamaan 1

Hasil MNDWI dari citra Landsat tahun 1994, 2004, 2014, dan 2024 selanjutnya diolah dengan metode *Otsu Thresholding*, yaitu metode yang pertama kali dikembangkan oleh Nobuyuki Otsu tahun 1979 dan berfungsi untuk memisahkan data univariat menjadi dua kelompok (Otsu, 1979). Metode *Otsu* yang digunakan dalam penelitian ini adalah modifikasi dan penyesuaian dari skrip (pada platform *Google Earth Engine*) yang dapat diakses melalui:

`users/gena/packages:thresholding`. Fungsi dari metode ini adalah untuk menetapkan nilai ambang yang memisahkan piksel air dari daratan, sehingga memungkinkan segmentasi yang lebih akurat. Parameter *Otsu* yang digunakan mencakup skala (100), batas wilayah *geometry*, serta parameter untuk deteksi tepi seperti *cannyThreshold* (0.7), *cannySigma* (1), dan *minValue* (-0.2), yang membantu dalam menyesuaikan sensitivitas deteksi.

Fungsi `removeInlandWaterAndIslands` diterapkan untuk melakukan pengurangan komponen terhubung menggunakan citra integer dan parameter lingkungan yang telah ditetapkan. Piksel yang terhubung yang lebih besar dari nilai ambang yang ditentukan dihapus dari citra, menghasilkan batas yang lebih akurat antara daratan dan perairan. Dalam penelitian ini, ukuran minimum *pixel* badan air (seperti sungai) dan pulau kecil dibatasi hingga 5000 m². Objek air yang berada di daratan dan pulau kecil dengan ukuran kurang dari ketentuan tersebut akan dihapus secara otomatis, untuk menghindari kesalahan delineasi antara batas daratan dan laut.

Vektorisasi garis pantai dilakukan menggunakan fungsi `reduceToVectors`, dengan mempertimbangkan batas geometrik dan skala peta



Gambar 5. Rangkaian pengolahan citra pada *Google Earth Engine*. (a) Landsat 5 Tahun 1994; (b) Hasil NDWI-*Otsu thresholding*; (c) Menghilangkan daratan di laut dan air di daratan; (d) Ekstraksi garis pantai (*Polygon*); (e) Ekstraksi garis pantai (*Line*)

yang telah ditetapkan, dan juga melibatkan penambahan *buffer* di sekitar koordinat untuk meningkatkan akurasi batas antara daratan dan perairan. Dengan demikian, dihasilkan garis pantai yang akurat untuk setiap periode waktu dan memudahkan dalam melacak perubahan dari waktu ke waktu. Hasil proses *masking* dan komposit citra Landsat hingga ekstraksi garis pantai pada *Google Earth Engine* ditunjukkan pada Gambar 5.

Analisis Perubahan Garis Pantai

Digital Shoreline Analysis System (DSAS) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menghitung perubahan posisi garis pantai dari waktu ke waktu. Pada versi sebelumnya, DSAS merupakan program tambahan pada ArcGIS Desktop yang sudah digunakan dalam beberapa penelitian sebelumnya, seperti di Teluk Banten oleh Solihudin, dkk. (2020); di Kabupaten Pati oleh Prahesti (2020); dan di Kabupaten Bantul oleh Dewi dkk. (2020). Namun, pada penelitian ini digunakan aplikasi DSAS terbaru, yaitu versi 6 (aplikasi sudah berdiri sendiri sejak April 2024) yang dikembangkan oleh Himmelstoss dkk. dan dapat diunduh melalui <https://code.usgs.gov/cch/dsas/-/tree/v6.0.168>. Dalam melakukan analisis menggunakan DSAS, hasil ekstraksi garis pantai dari tahun 1994, 2004, 2014, dan 2024 digabungkan (*merge*) menjadi satu file dan dikonversi ke dalam format GeoJSON. Setiap garis pantai dilengkapi dengan atribut dalam format tanggal (*date*) yang mencakup bulan, tanggal, dan tahun, sehingga memungkinkan untuk membedakan antara garis pantai yang satu dengan lainnya. Selain itu, diperlukan garis dasar (*baseline*) yang berfungsi sebagai referensi dalam mengukur besaran perubahan secara vertikal. Dalam penelitian ini, garis dasar dibuat berdasarkan garis pantai tahun 1994, yang ditarik ke arah darat (*onshore*) sejauh 500 meter. Seluruh data tersebut disimpan dalam satu folder dan selanjutnya diunggah ke dalam aplikasi DSAS. Saat melakukan analisis, interval antar perpotongan (*transek*) diatur pada jarak 30 meter untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, dengan mempertimbangkan resolusi spasial citra Landsat yang digunakan. Perhitungan perubahan garis pantai dalam penelitian ini difokuskan pada tiga metrik utama, yaitu *Net Shoreline Movement* (NSM), yang menunjukkan jarak antara garis pantai tahun awal dan tahun akhir serta merepresentasikan perubahan bersih dari waktu ke waktu; *Shoreline Change Envelope* (SCE), yang mengukur jarak total antara garis pantai yang berada di darat (*landward*) dan di laut (*seaward*) pada transek di sepanjang pantai; serta *End Point Rate* (EPR), yang dihitung

dengan membagi jarak perubahan garis pantai antara periode pengukuran awal dan akhir. Nilai NSM bernilai positif menunjukkan garis pantai yang maju (akresi), sedangkan nilai negatif menandakan garis pantai yang mundur (abrasi). Sementara itu, untuk nilai EPR yang bernilai positif mengindikasikan terjadi akresi, dan nilai negatif terjadi abrasi.

Perhitungan Luas dan Analisis Akresi dan Abrasi

Perhitungan luas akresi dan abrasi yang terjadi selama kurun waktu 1994 hingga 2024 dilakukan dengan menggunakan fungsi *calculate geometry* pada perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Proses ini dimulai dengan pembuatan poligon yang menghubungkan titik transek hasil DSAS, yakni titik terluar yang mengarah ke laut dan darat, yang merepresentasikan transek yang mengalami abrasi dan akresi. Analisis dan visualisasi jarak perubahan garis pantai tidak hanya dilakukan pada tingkat unit kota, melainkan juga pada tingkat kecamatan, sehingga memberikan deskripsi yang lebih mendetail tentang perubahan garis pantai di berbagai wilayah di Kota Sibolga. Interpretasi analisis juga diturunkan ke dalam tiga periode waktu berbeda, yaitu 1994-2004, 2004-2014, dan 2014-2024, untuk menganalisis tren jangka pendek dan jangka panjang serta mengidentifikasi pola-pola spesifik yang muncul pada setiap periode tersebut.

HASIL

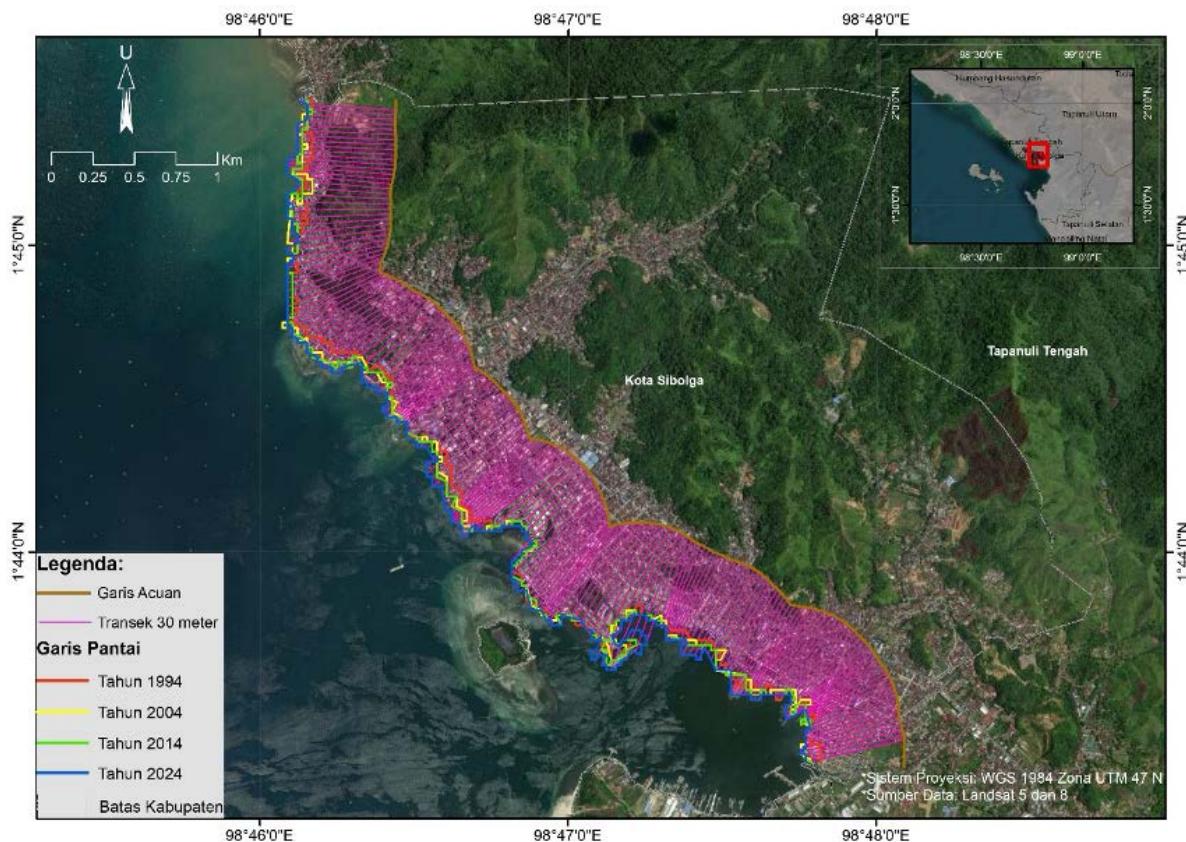
Perubahan Garis Pantai Tahun 1994-2024

Hasil ekstraksi garis pantai menunjukkan pergeseran yang signifikan di sepanjang pesisir Kota Sibolga selama periode 1994-2024 (Gambar 6). Garis biru yang mewakili garis pantai tahun 2024 terletak paling dekat dengan laut, sementara garis merah untuk tahun 1994 lebih dekat dengan daratan, menunjukkan pergerakan ekstensif garis pantai ke arah laut (akresi).

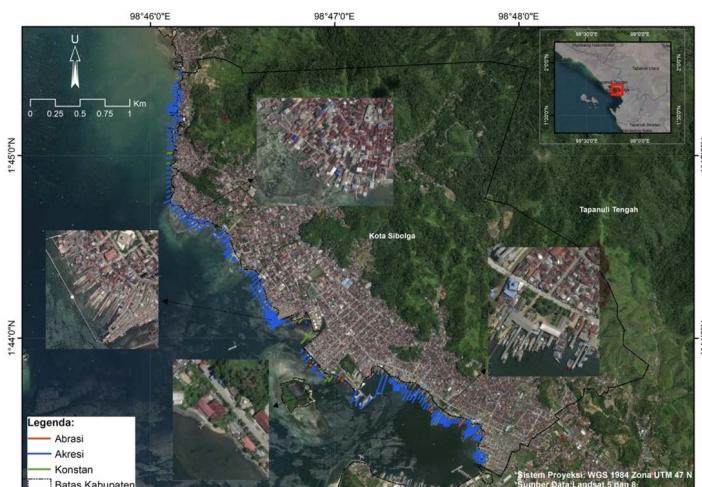
Jarak Pergeseran Garis Pantai

Jarak pergeseran garis pantai, baik ke arah darat maupun ke arah laut, divisualisasikan dengan garis yang menghubungkan titik-titik perpotongan garis pantai pada setiap periode waktu analisis, dengan interval transek 30 meter (Gambar 7). Hasil analisis dengan DSAS menunjukkan bahwa selama periode

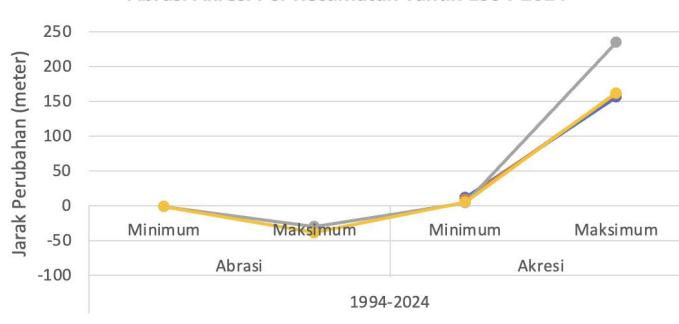
1994 hingga 2024, terdapat perubahan garis pantai di Kota Sibolga yang didominasi oleh nilai positif dari parameter *Shoreline Change Envelope* (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), dan *End Point Rate* (EPR). Temuan ini mengindikasikan bahwa proses



Gambar 6. Peta Garis Pantai Kota Sibolga Tahun 1994,2004,2014, dan 2024

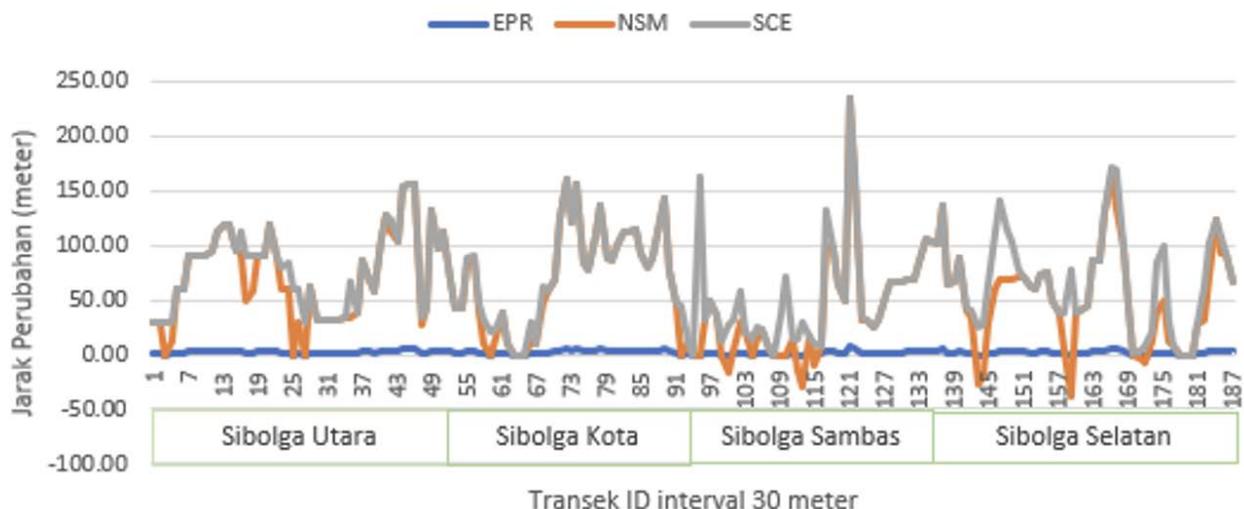


Abrasi Akresi Per Kecamatan Tahun 1994-2024



Gambar 7. Jarak atau Pergeseran Pantai dari Tahun 1994-2024

Posisi Garis Pantai tiap Transek ID tahun 1994-2024



Gambar 7. Jarak atau Pergeseran Pantai dari Tahun 1994-2024 per Kecamatan

akresi sangat mendominasi dalam dinamika pesisir yang terjadi. Dari total 187 transek yang mewakili garis pantai sepanjang 5,6 km (Gambar 8), sebanyak 159 transek (85% dari total) mengalami akresi yang ditunjukkan oleh nilai EPR dan NSM bernilai positif. Sebaliknya, 11 transek (5,9%) mengalami abrasi dengan nilai NSM dan EPR yang negatif, sementara sisanya, sebanyak 17 transek (9,1%) tidak mengalami perubahan atau tetap konstan (nilai NSM dan EPR adalah 0). Temuan ini mencerminkan adanya dominasi perkembangan lahan yang mengarah ke laut dalam kurun waktu 30 tahun ke belakang.

Nilai maksimum akresi (NSM) tercatat sebesar 234,72 meter pada transek ID 123, sedangkan abrasi maksimum tercatat -38,79 meter pada transek ID 161. Parameter SCE menunjukkan nilai maksimum 234,72 meter dan minimum 0 meter. Rata-rata abrasi tahunan adalah -0,52 meter (rentang -0,44 hingga -5,77 meter), sementara rata-rata akresi mencapai 2,4 meter per tahun (rentang 0,15 hingga 7,98 meter). Pada tingkat kecamatan, Kecamatan Sibolga Sambas mengalami akresi terbesar dengan jarak maksimum 234,72 meter, diikuti Kecamatan Sibolga Selatan (162,22 meter). Abrasi terbesar terjadi di Kecamatan Sibolga Selatan (-38,79 meter).

Perubahan Garis Pantai Per-Periode

Periode 1994-2004

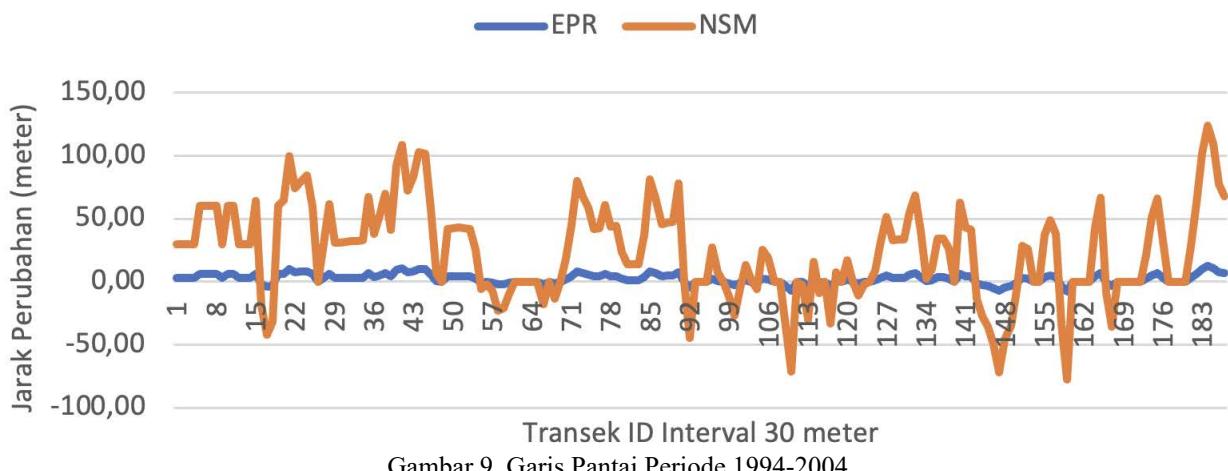
Hasil analisis perubahan garis pantai di Kota Sibolga selama periode 1994 hingga 2004 (Gambar 9) menunjukkan bahwa dari total 187 transek, sebanyak 150 transek (80,21%) mengalami perubahan garis pantai dengan rata-rata NSM

sebesar 29,52 meter. Sebanyak 36 transek (19,25%) mengalami abrasi, dengan kejadian terbanyak di Kecamatan Sibolga Sambas dan Sibolga Selatan, masing-masing mencatat 12 transek yang terpengaruh. Sebaliknya, Kecamatan Sibolga Utara mengalami abrasi paling sedikit, dengan hanya 3 transek yang tercatat. Besaran abrasi berkisar antara -1,77 hingga -77,57 meter, dengan nilai maksimum tercatat pada transek ID 161 di Kecamatan Sibolga Selatan. Rata-rata abrasi selama periode ini tercatat sebesar -25,63 meter, menunjukkan adanya tren penurunan garis pantai yang signifikan di wilayah-wilayah tertentu. Di sisi lain, transek yang mengalami akresi berjumlah 114, atau setara dengan 60,96% dari total transek yang dianalisis. Kecamatan Sibolga Utara mendominasi dengan jumlah transek akresi terbanyak, mencapai 46, sementara Kecamatan Sibolga Sambas mencatat jumlah paling sedikit, yaitu 18 transek. Nilai akresi bervariasi antara 1,22 hingga 124,17 meter, dengan akresi terbesar terjadi pada transek ID 186 di Kecamatan Sibolga Selatan, mencapai 124,17 meter. Dengan demikian, rata-rata akresi di seluruh wilayah selama periode ini mencapai 46,93 meter, menegaskan adanya kecenderungan peningkatan garis pantai di sebagian besar transek.

Periode 2004-2014

Pada periode 2004 hingga 2014, analisis menunjukkan bahwa sebanyak 127 transek (67,91% dari total) mengalami perubahan signifikan, dengan rata-rata *Net Shoreline Movement* (NSM) mencapai 9,52 meter. Namun, periode ini dicirikan oleh kondisi abrasi yang cukup parah, dengan nilai

Garis Pantai Periode 1994-2004



Gambar 9. Garis Pantai Periode 1994-2004

maksimum erosi yang mencapai -161,91 meter pada transek ID 97 di Kecamatan Sibolga Kota. Temuan ini mencerminkan tantangan serius terkait erosi di wilayah tersebut. Persentase abrasi yang signifikan, sebesar 24,60 % atau 46 transek, mencatat rata-rata erosi tahunan sebesar -2,62 meter, angka ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kedua periode sebelumnya, yakni 1994-2004 dan 2014-2024.

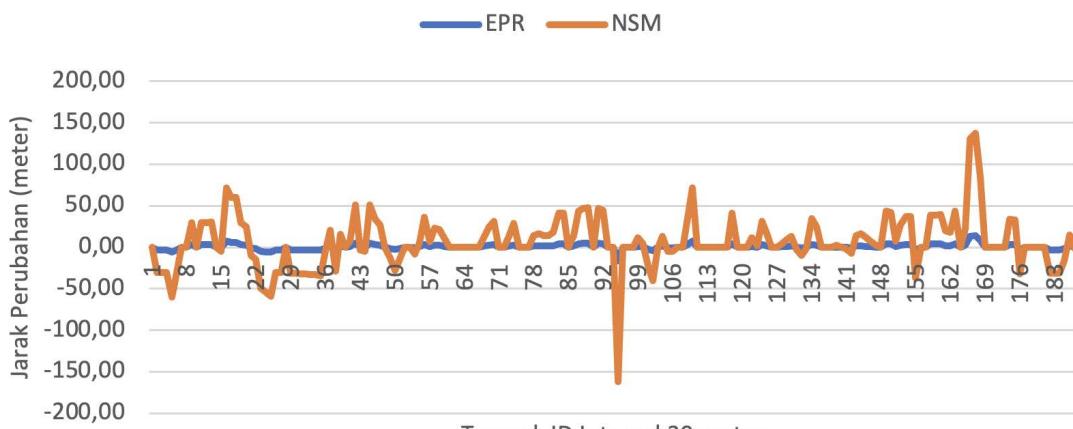
Di sisi lain, akresi selama periode ini tercatat lebih rendah, dengan sebanyak 81 transek (43,32%) mengalami peningkatan daratan. Nilai maksimum akresi mencapai 137,80 meter pada transek ID 169 di Kecamatan Sibolga Selatan, sementara rata-rata akresi hanya mencapai 2,98 meter. Rata-rata *End Point Rate* (EPR) untuk periode ini sebesar 0,95 meter per tahun menunjukkan adanya keseimbangan dinamis antara proses erosi dan akresi, meskipun dengan penekanan pada dominasi abrasi. Dalam konteks ini, Kecamatan Sibolga Utara mengalami kejadian abrasi paling banyak, terpantau pada 27

transek, sedangkan jumlah terkecil terdapat di Sibolga Kota dengan hanya 2 transek. Nilai abrasi selama periode ini menunjukkan variasi yang signifikan, berkisar antara -0,55 hingga -161,91 meter, dengan nilai maksimum tercatat berasal dari Kecamatan Sibolga Kota. Sementara itu, di sisi akresi, kejadian di seluruh kecamatan terlihat hampir merata, di mana Kecamatan Sibolga Selatan mencatat akresi terbanyak dengan 27 transek, sedangkan Kecamatan Sibolga Sambas mencatat jumlah terkecil sebanyak 14 transek.

Periode 2004-2014

Pada periode 2014 hingga 2024 (Gambar 11), analisis terhadap 143 transek (76,47%) yang mengalami perubahan garis pantai mengungkapkan bahwa rata-rata *Net Shoreline Movement* (NSM) mencapai 37,53 meter, yang setara dengan rata-rata *End Point Rate* (EPR) sebesar 3,75 meter per tahun. Hal ini menandakan pertumbuhan daratan yang

Garis Pantai Periode 2004-2014



Gambar 10. Garis Pantai Periode 2004-2014

signifikan di kawasan tersebut. Hanya 14 transek, atau 7,49% dari total, yang mengalami abrasi, dengan nilai maksimum abrasi mencapai -49,03 meter yang terdeteksi pada transek ID 177 di Kecamatan Sibolga Selatan. Jumlah ini menunjukkan penurunan yang drastis dibandingkan dua periode sebelumnya, sehingga mencerminkan perbaikan kondisi di area tersebut. Kecamatan Sibolga Selatan mencatat jumlah tertinggi abrasi dengan 8 transek, sementara di Kecamatan Sibolga Kota tidak ditemukan kasus abrasi sama sekali.

Sebaliknya, kejadian akresi selama periode ini meningkat secara signifikan dibandingkan dengan dua periode sebelumnya, tercatat pada 129 transek, atau 68,98% dari total yang dianalisis. Akresi maksimum ditemukan sebesar 234,72 meter pada transek ID 123 di Kecamatan Sibolga Sambas, yang menunjukkan adanya pengembangan area pantai yang substansial. Kejadian akresi hampir merata di seluruh kecamatan, dengan Kecamatan Sibolga Utara mencatat akresi terbanyak pada 41 transek, diikuti oleh Kecamatan Sibolga Kota dengan 33 transek. Kecamatan Sibolga Sambas dan Sibolga Selatan masing-masing mencatat 25 dan 30 transek yang mengalami akresi. Analisis ini menunjukkan tren yang positif dalam perubahan garis pantai. Penurunan jumlah transek yang mengalami abrasi, terutama di Sibolga Kota, menggambarkan keberhasilan dalam upaya konservasi dan pengelolaan lingkungan di kawasan ini. Meskipun demikian, penting untuk terus memantau proses ini guna memastikan bahwa tren positif ini dapat dipertahankan di masa depan.

Dinamika Perubahan Garis Pantai

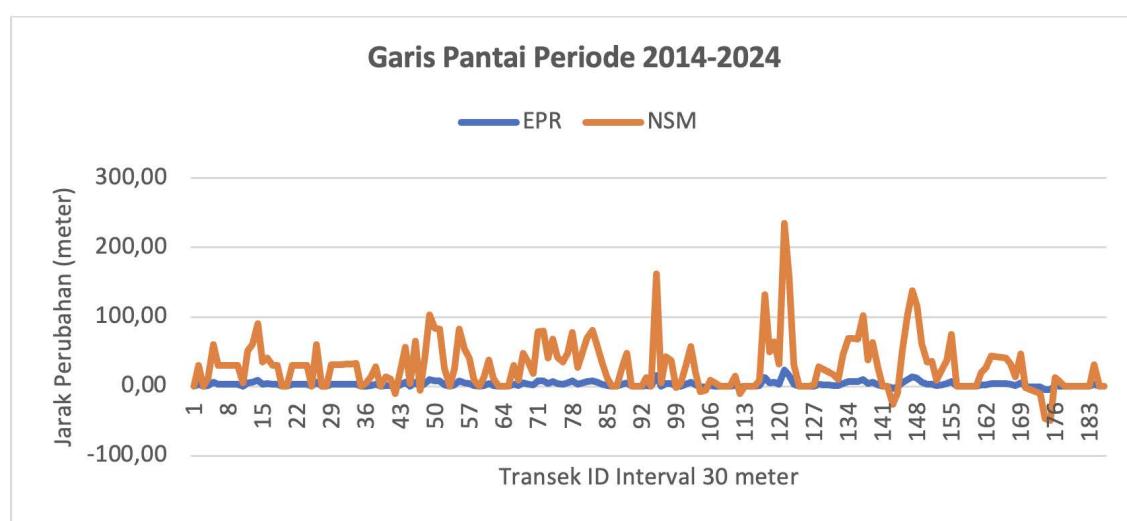
Dinamika garis pantai di Kota Sibolga menunjukkan variasi yang signifikan, baik antar

kecamatan maupun dalam setiap periode waktu yang dianalisis (Gambar 12). Hasil analisis menunjukkan bahwa akresi dengan jarak terjauh terjadi pada periode 2014-2024 yang berlokasi di Kecamatan Sibolga Sambas. Sementara itu, Kecamatan Sibolga Selatan mencatat abrasi dengan jarak paling besar, terjadi pada periode 1994-2004 (Gambar 12). Data dari ketiga periode ini mengungkapkan tren penurunan jarak abrasi di Kecamatan Sambas, di mana abrasi maksimum awalnya mencapai -71,59 meter pada periode 1994-2004, kemudian menurun menjadi -40 meter pada 2004-2014, dan mencapai -10,77 meter pada 2014-2024. Penurunan yang signifikan ini menunjukkan perbaikan kondisi pantai di kecamatan tersebut dari waktu ke waktu. Sementara itu, akresi di Kecamatan Sambas dan Sibolga Selatan mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. Jarak akresi maksimum di kedua kecamatan ini tercatat sebesar 68,85 meter dan 124,17 meter pada periode 1994-2004, 71,59 meter dan 137,80 meter pada 2004-2014, serta 234,72 meter dan 138,12 meter pada periode 2014-2024.

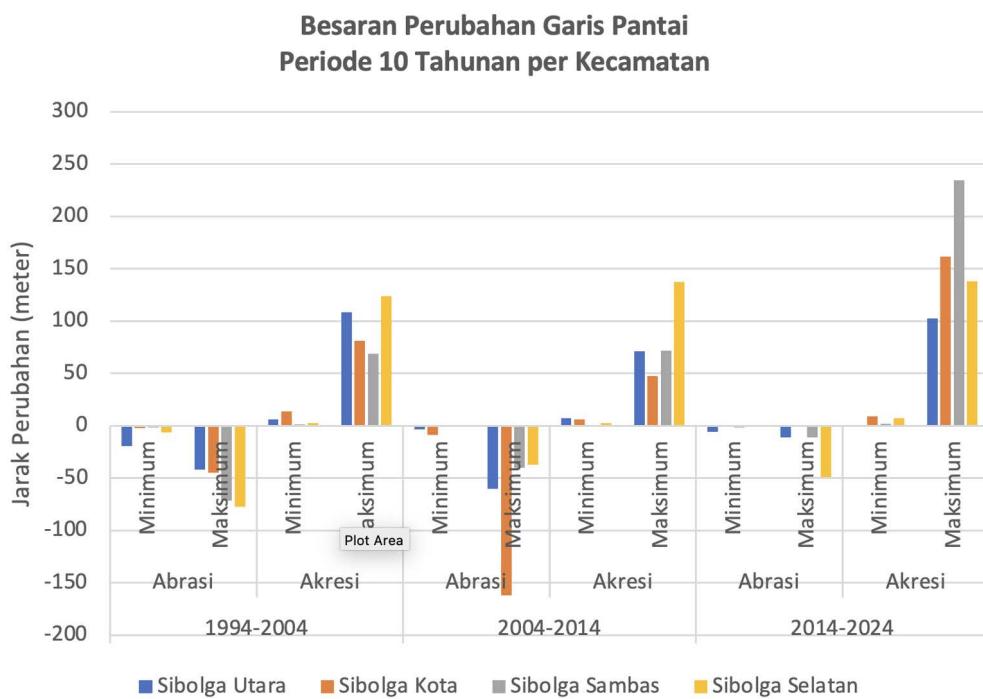
Pada periode 1994-2004, Kecamatan Sibolga Utara mencatat jumlah kejadian akresi tertinggi dengan 46 transek (40,35% dari total akresi), menandakan terjadinya peningkatan daratan yang substansial di wilayah tersebut. Sementara itu, periode 2014-2024 menandakan puncak aktivitas akresi dengan 129 transek mengalami perubahan positif. Sebaliknya, kejadian abrasi tertinggi terjadi pada periode 2004-2014 di Kecamatan Sibolga Utara (Gambar 13).

Luas Akresi dan Abrasi

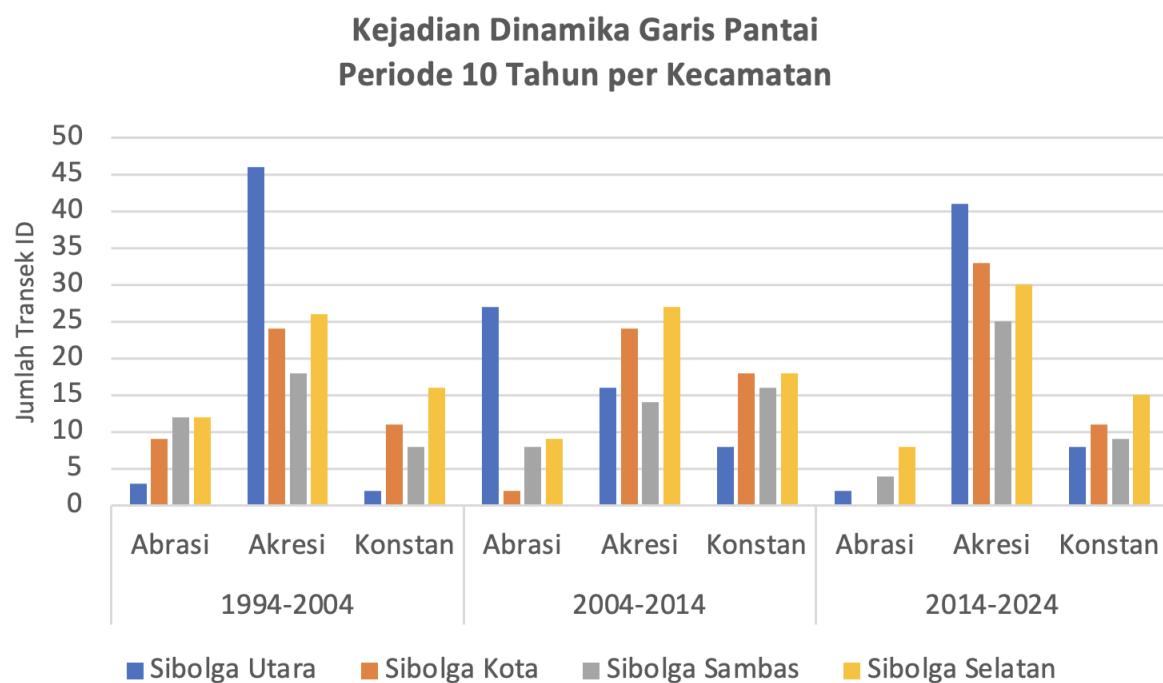
Pemantauan dinamika pesisir Kota Sibolga tahun 1994 hingga 2024 juga mencakup analisis estimasi luas akresi dan abrasi yang terjadi selama



Gambar 11. Garis Pantai Periode 2014-2024



Gambar 12. Grafik Besaran Nilai Abrasi, dan Akresi



Gambar 13. Sebaran jumlah abrasi, akresi, dan konstan Garis Pantai Per-kecamatan dalam 3 periode waktu

periode tersebut. Estimasi ini dimaksudkan untuk melihat dampak perubahan garis pantai, yaitu luas lahan yang bertambah maupun berkurang di setiap kecamatan selama kurun waktu 30 tahun. Berdasarkan hasil analisis (Tabel 2), menunjukkan bahwa intensitas kejadian akresi lebih besar dibandingkan dengan abrasi. Luas total lahan yang bertambah diakibatkan akresi pada periode ini adalah 35,37 hektar, sementara luas total abrasi adalah 1,11 hektar.

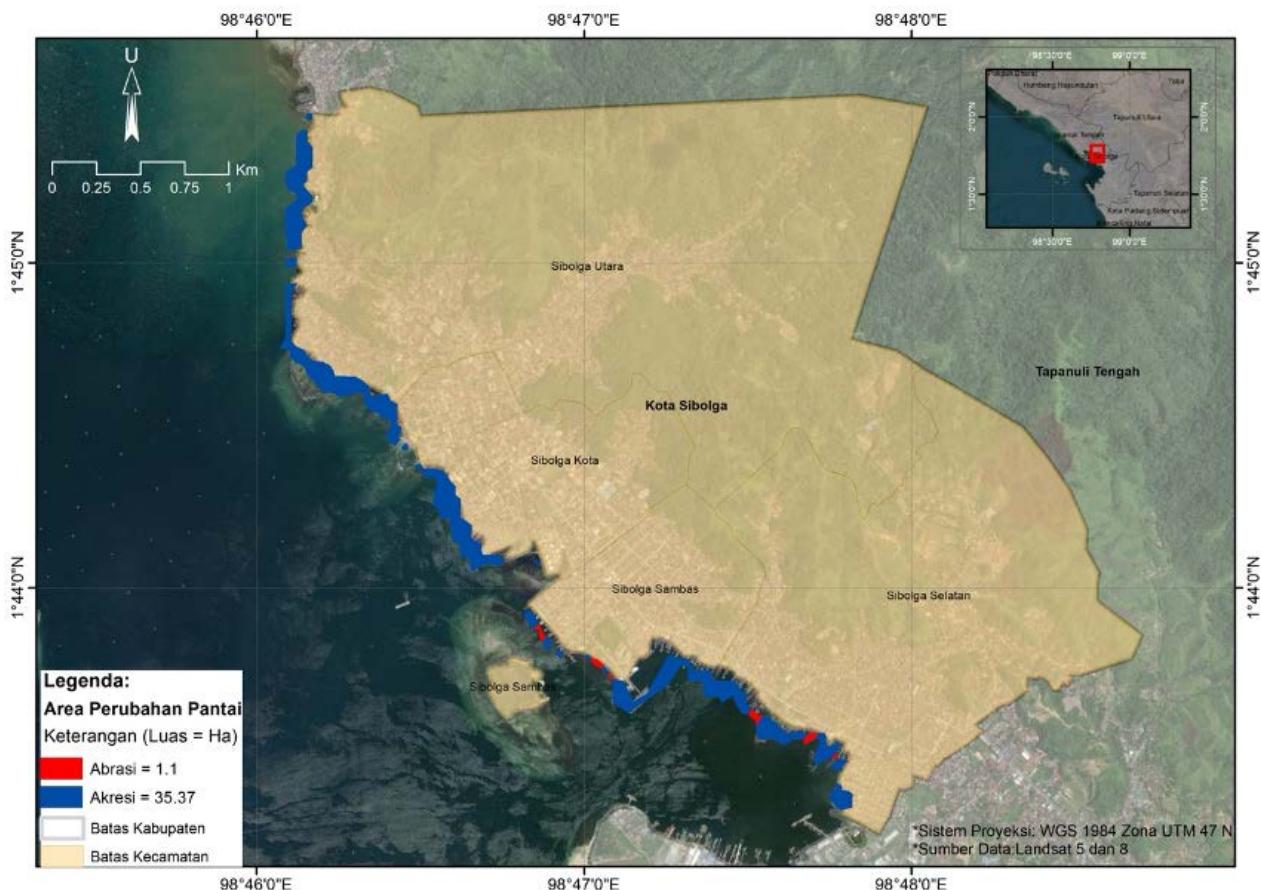
PEMBAHASAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa pesisir Kota Sibolga didominasi oleh proses akresi yang mencapai 85% dari total transek selama periode 1994-2024. Fenomena dominasi akresi ini konsisten dengan temuan penelitian di berbagai teluk terlindung di Indonesia. Penelitian di Teluk Banten menemukan pola serupa di mana bagian tengah teluk cenderung mengalami akresi (Solihuddin dkk.,

Tabel 2. Luas Perubahan Garis Pantai Kota Sibolga Tahun 1994-2024

Kecamatan	Keterangan	Luas (Hektar)
Sibolga Sambas	Abrasi	0,48
Sibolga Selatan		0,63
Total		1,11
Sibolga Kota		8,06
Sibolga Sambas	Akresi	5,66
Sibolga Selatan		7,43
Sibolga Utara		14,21
Total		35,37

Sumber : Hasil Pengolahan Data



Gambar 14. Luas Perubahan Garis Pantai Kota Sibolga dari Tahun 1994-2024

2021), sementara penelitian Hasanudin & Kusmanto, 2018 di pesisir Bengkulu menunjukkan bahwa teluk yang terlindung dari gelombang besar cenderung mengalami sedimentasi intensif. Karakteristik Teluk Tapian Nauli yang relatif terlindung dari gelombang besar Samudera Hindia menciptakan kondisi ideal untuk akumulasi sedimen, berbeda dengan pantai terbuka yang umumnya mengalami abrasi dominan seperti yang dilaporkan di pesisir selatan Bali (Hariyanto dkk., 2018b).

Secara geologi, dominasi akresi di pesisir Kota Sibolga dipengaruhi oleh beberapa faktor

fundamental yang berkaitan dengan *setting* tektonik regional Sumatera. Kota Sibolga terletak di zona *back-arc basin* yang terbentuk akibat subduksi Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia (Barber dkk., 2005). Posisi ini menempatkan Sibolga pada cekungan sedimentasi aktif yang menerima pasokan material dari Pegunungan Bukit Barisan. Pengangkatan Bukit Barisan sejak Plio-Pleistosen telah mengintensifkan erosi di daerah hulu, menghasilkan suplai sedimen yang melimpah ke pesisir barat Sumatera (Putra & Raguwanti, 2021). Material sedimen ini terutama terdiri dari produk

pelapukan batuan vulkanik dan metamorf berumur Pra-Tersier yang mendominasi Bukit Barisan, menghasilkan sedimen berukuran halus hingga sedang yang mudah terangkat oleh aliran sungai menuju pesisir.

Sistem Sesar Sumatera yang membentang sepanjang Pegunungan Bukit Barisan juga berperan penting dalam dinamika sedimentasi. Aktivitas tektonik ini tidak hanya mengontrol morfologi dan gradien sungai, tetapi juga memengaruhi pola drainase yang mengarah ke pesisir barat Sumatera. Beberapa sungai yang bermuara di Teluk Tapian Nauli membawa sedimen hasil erosi dari zona sesar aktif, berkontribusi terhadap tingginya laju sedimentasi di pesisir Sibolga. Kondisi tektonik regional ini berbeda dengan wilayah pesisir di Jawa yang umumnya memiliki suplai sedimen lebih terbatas, seperti yang dilaporkan dalam penelitian di pesisir Gianyar (Hariyanto dkk., 2018b) yang menunjukkan dominasi abrasi akibat minimnya pasokan sedimen dari daratan.

Faktor antropogenik memainkan peran signifikan dalam mempercepat proses akresi di Kota Sibolga. Keterbatasan lahan akibat topografi yang didominasi kontur curam di bagian timur kota telah mendorong ekspansi pembangunan ke arah laut, khususnya di Kecamatan Sibolga Sambas yang mencatat akresi maksimum 234,72 meter. Pola ini sejalan dengan temuan di Singapura yang menunjukkan bahwa urbanisasi pesisir dapat mengubah pola sedimentasi alami melalui modifikasi garis pantai dan pembangunan struktur pantai (Lai dkk., 2015). Aktivitas reklamasi untuk perluasan lahan, pembangunan infrastruktur pelabuhan, dan fasilitas perikanan telah mengubah hidrodinamika lokal, menciptakan zona-zona tenang yang mempercepat deposisi sedimen. Fenomena serupa dilaporkan oleh Arifin dan Fadhlina, 2010 di Teluk Jakarta, di mana pembangunan pesisir intensif mengubah pola arus dan meningkatkan laju sedimentasi di area tertentu.

Variasi temporal dalam laju perubahan garis pantai mengindikasikan pengaruh faktor lingkungan yang dinamis. Periode 2004-2014 yang menunjukkan intensitas abrasi tertinggi (24,60% transek) kemungkinan berkaitan dengan kejadian ekstrem seperti gempa Nias 2005 dan tsunami Samudera Hindia 2004 yang dapat mengubah batimetri dan pola arus regional. Penelitian Meltzner dkk., 2012 menunjukkan bahwa kejadian seismik besar di zona subduksi Sumatera dapat memicu perubahan morfologi pesisir melalui *co-seismic subsidence* atau *uplift*. Periode pemulihan pasca-2014 dengan penurunan drastis abrasi (dari 24,60%

menjadi 7,49%) mengindikasikan resiliensi sistem pesisir Sibolga dan kemungkinan *re-equilibrium* setelah gangguan eksternal. Pola temporal ini berbeda dengan pesisir di Jawa yang umumnya menunjukkan tren abrasi konsisten seperti yang dilaporkan R. S. Dewi & Bijkar, 2020 di Sayung, Demak.

Perbedaan karakteristik perubahan antar kecamatan mencerminkan variasi kondisi lokal yang kompleks. Kecamatan Sibolga Utara yang mengalami akresi terbesar (14,21 hektar) kemungkinan dipengaruhi oleh orientasi garis pantai yang optimal terhadap arah transport sedimen dominan dan keberadaan muara sungai yang memasok sedimen. Sebaliknya, Kecamatan Sibolga Selatan yang mengalami abrasi terbesar (0,63 hektar) mungkin terekspos pada energi gelombang refleksi dari tanjung atau variasi batimetri lokal yang mengonsentrasi energi gelombang. Pola spasial ini konsisten dengan model konseptual tentang variabilitas transport sedimen sepanjang pantai berteluk (*embayed beach*), di mana zona konvergensi dan divergensi transport sedimen menciptakan pola abrasi-akresi yang kompleks (Komar & Inman, 1970).

Implikasi temuan ini untuk pengelolaan pesisir Kota Sibolga sangat signifikan. Dominasi akresi memberikan peluang pengembangan wilayah, namun memerlukan pendekatan hati-hati mengingat potensi ketidakstabilan sedimen baru. Area dengan akresi signifikan seperti di Kecamatan Sibolga Sambas perlu melalui periode konsolidasi sebelum dimanfaatkan untuk pembangunan permanen. Strategi adaptif yang mempertimbangkan variabilitas temporal dan spasial perubahan garis pantai menjadi krusial. Pengalaman dari Teluk Jakarta (Arifin & Fadhlina, 2010) dan Singapura (Lai dkk., 2015) menunjukkan pentingnya integrasi antara pembangunan pesisir dengan konservasi ekosistem untuk menjaga keberlanjutan jangka panjang.

Dalam konteks perubahan iklim global, proyeksi kenaikan muka air laut dan intensifikasi cuaca ekstrem menambah kompleksitas pengelolaan pesisir Sibolga. Meskipun saat ini didominasi akresi, perubahan pola cuaca regional dapat mengubah keseimbangan erosi-deposisi. Penelitian Mentaschi dkk., 2018 menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat mengintensifikasi energi gelombang hingga 30% di beberapa wilayah, berpotensi mengubah tren akresi menjadi abrasi. Oleh karena itu, strategi adaptasi harus mencakup skenario perubahan jangka panjang, termasuk kemungkinan reversal dari tren akresi saat ini. Pendekatan *nature-based solutions*

seperti restorasi mangrove dan pengelolaan DAS terpadu dapat meningkatkan resiliensi pesisir sambil mempertahankan fungsi ekosistem, seperti yang berhasil diterapkan di berbagai lokasi di Asia Tenggara (Guannel dkk., 2016).

Keterbatasan penelitian ini terletak pada resolusi temporal dan spasial yang mungkin tidak menangkap variasi musiman atau *event-based changes*. Penelitian lanjutan dengan integrasi data lapangan beresolusi tinggi, pemodelan hidrodinamika, dan analisis sedimen *budget* diperlukan untuk pemahaman komprehensif tentang sistem pesisir Sibolga. Monitoring jangka panjang dengan teknologi mutakhir seperti UAV dan *satellite-derived bathymetry* dapat memberikan *insight* yang lebih detail tentang dinamika perubahan garis pantai, mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti untuk pengelolaan pesisir berkelanjutan di era perubahan global.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi dinamika perubahan garis pantai di Kota Sibolga selama periode 1994–2024 menggunakan pendekatan berbasis MNDWI dan *Otsu Thresholding* di *Google Earth Engine*, yang kemudian dianalisis dengan *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Hasil menunjukkan dominasi proses akresi pada 85% dari 187 transek, menghasilkan penambahan daratan seluas 35,37 hektar, jauh melebihi kehilangan akibat abrasi sebesar 1,11 hektar. Akresi terbesar tercatat di Kecamatan Sibolga Sambas, dengan laju hingga 2,4 m/tahun, sedangkan abrasi terkonsentrasi di Sibolga Selatan. Periode 2004–2014 menandai puncak abrasi, kemungkinan dipengaruhi oleh gempa Nias 2005, sementara 2014–2024 menunjukkan tren pemulihan pesisir.

Keberhasilan metode otomatis ini menunjukkan efektivitasnya untuk pemantauan garis pantai di wilayah pesisir berteluk terlindung dan dapat direplikasi di wilayah lain. Dominasi akresi di Sibolga mencerminkan interaksi kompleks antara pasokan sedimen dari Bukit Barisan, karakteristik oseanografi Teluk Tapian Nauli, dan pengaruh antropogenik seperti pembangunan dan reklamasi. Temuan ini penting bagi perencanaan tata ruang pesisir: wilayah akresi berpotensi dikembangkan dengan pertimbangan kestabilan sedimen, sementara zona abrasi memerlukan strategi mitigasi berbasis ekosistem. Dalam konteks perubahan iklim global, pendekatan adaptif berbasis data diperlukan untuk menjaga keseimbangan pesisir. Penelitian ini berkontribusi pada penguatan basis data ilmiah untuk sistem pemantauan garis pantai nasional dan

mendorong kebijakan pengelolaan pesisir yang berkelanjutan dan responsif terhadap perubahan lingkungan.

DAFTAR ACUAN

- Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R., & Rockström, J. (2005). Social-ecological resilience to coastal disasters. Dalam *Science* (Vol. 309, Nomor 5737). <https://doi.org/10.1126/science.1112122>
- Adriat, R., Risko, Apriansyah, Muhardi, Susanti, H., Zibar, Z., & Fitriani. (2021). Analisis Perubahan Garis Pantai Kijing Kabupaten Mempawah Kalimantan Barat. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 11(1).
- Anggraini, N., Marpaung, S., Hartuti, M., Kalisari, J., No, L., Rebo, P., & Timur, J. (2017). Analisis perubahan garis pantai ujung pangkah dengan menggunakan metode edge detection dan normalized difference water index. *Jurnal Penginderaan Jauh*, 14(2).
- Arifin, Z. A., & Fadhlina, D. (2010). Fraksinasi Logam Berat Pb, Cd, Cu dan Zn dalam Sedimen dan Bioavailabilitasnya bagi Biota di Perairan Teluk Jakarta. *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 14(1), 27–32.
- Astuti, B. I. D., Laksono, A., Muhammad, D. T. N., Nurbaiti, I. F., Hanifah, N. N., Wildiyanti, O. S., Junaidi, R. N., & Marfai, M. A. (2021). Dinamika perubahan garis pantai Kabupaten Kendal tahun 2000-2020. *Majalah Geografi Indonesia*, 35(1). <https://doi.org/10.22146/mgi.62301>
- Banjarnahor, Y. A., Yulinda, E., & Amrifo, V. (2016). The Role of Pelabuhan Perikanan Nusantara Sibolga toward the Rural Labor Absorption in Pondok Batu Village, Sarudik District, Center Tapanuli Regency, North Sumatera Province. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Perikanan dan Ilmu Kelautan*, 3(2).
- Barber, A., Crow, M., & Milsom, J. (2005). *Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution* (Vol. 31). Geological Society Memoirs .
- Bishop, M. J., Mayer-Pinto, M., Airoldi, L., Firth, L. B., Morris, R. L., Loke, L. H. L., Hawkins, S. J., Naylor, L. A., Coleman, R. A., Chee, S. Y., & Dafforn, K. A. (2017). Effects of ocean sprawl on ecological connectivity: impacts

- and solutions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 492, 7–30. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.021>
- Chen, C. N., & Tfwala, S. S. (2018). Impacts of climate change and land subsidence on inundation risk. *Water (Switzerland)*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/w10020157>
- Dewi, P. S., Setiyono, H., Handoyo, G., Widada, S., & Suryoputro, A. A. D. (2020). Studi Perubahan Garis Pantai Tahun 2014-2019 di Pesisir Kabupaten Bantul, D.I. Yogyakarta. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(3). <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i3.8492>
- Dewi, R. S., & Bijker, W. (2020). Dynamics of shoreline changes in the coastal region of Sayung, Indonesia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(2), 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.09.001>
- Fan, X., Zhao, L., & He, D. (2020). Land use changes and its driving factors in a coastal zone. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(2). <https://doi.org/10.15244/pjoes/108516>
- Granek, E. F., Compton, J. E., & Phillips, D. L. (2009). Mangrove-Exported Nutrient Incorporation by Sessile Coral Reef Invertebrates. *Ecosystems*, 12(3), 462–472. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9235-7>
- Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P., & Verutes, G. (2016). The Power of Three: Coral Reefs, Seagrasses and Mangroves Protect Coastal Regions and Increase Their Resilience. *PLOS ONE*, 11(7), e0158094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158094>
- Hakim, A. R., Sutikno, S., & Fauzi, M. (2016). Analisis Laju Abrasi Pantai Pulau Rangsang Di Kabupaten Kepulauan Meranti Dengan Menggunakan Data Satelit. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 13(2).
- Hariyanto, T., Mukhtar, M. K., & Pribadi, C. B. (2018a). Evaluasi Perubahan Garis Pantai Akibat Abrasi Dengan Citra Satelit Multitemporal (Studi Kasus: Pesisir Kabupaten Gianyar, Bali). *Geoid*, 14(1), 66. <https://doi.org/10.12962/j24423998.v14i1.3822>
- Hariyanto, T., Mukhtar, M. K., & Pribadi, C. B. (2018b). Evaluasi Perubahan Garis Pantai Akibat Abrasi Dengan Citra Satelit Multitemporal (Studi Kasus: Pesisir Kabupaten Gianyar, Bali). *Geoid Jurnal of Geodesy and Geomatics*, 14(1), 66–74.
- Hasanudin, M., & Kusmanto, E. (2018). Abrasi dan Sedimentasi Pantai di Kawasan Pesisir Kota Bengkulu. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 3(3), 245. <https://doi.org/10.14203/oldi.2018.v3i3.197>
- Hastuti, A. W., Ismail, N. P., & Nagai, M. (2024). Analysis of coastline extraction indices using Sentinel-2 and Google Earth Engine, case study in Bali, Indonesia. *BIO Web of Conferences*, 106, 04004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410604004>
- Heriaty, A., & Husrin, S. (2018). Perubahan Garis Pantai di Pesisir Cirebon Berdasarkan Analisis Spasial. *REKA GEOMATIKA*, 2017(2). <https://doi.org/10.26760/v2017i2.1764>
- Hernawan, U. (2016). Study of the Sedimentation Trend In The Prospective Area of Port of Marine Center, Cirebon Based On Remote Sensing Data. *BULLETIN OF THE MARINE GEOLOGY*, 24(1). <https://doi.org/10.32693/bomg.24.1.2009.13>
- Indrawan, I. N. P., Damayanti, A., & Rustanto, A. (2017). Penggunaan Citra Landsat Untuk Analisis Perubahan Garis Pantai Akibat Perubahan Penggunaan Tanah (Studi Kasus: Kecamatan Gerokgak, Kabupaten Buleleng, Bali). *Seminar Nasional Geomatika*.
- Johnston, J., Cassalho, F., Miesse, T., & Ferreira, C. M. (2021). Projecting the effects of land subsidence and sea level rise on storm surge flooding in Coastal North Carolina. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01096-7>
- Julianto, R., & Anggara, O. (2021). Deteksi Perubahan Garis Pantai Menggunakan Citra Satelit Sentinel-1 (Studi Kasus: Pesisir Kabupaten Lampung Selatan). *Seminar Nasional Geomatika*. <https://doi.org/10.24895/sng.2020.0-0.1175>
- Komar, P. D., & Inman, D. L. (1970). Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 75(30), 5914–5927. <https://doi.org/10.1029/JC075i030p05914>
- Lai, S., Loke, L. H. L., Hilton, M. J., Bouma, T. J., & Todd, P. A. (2015). The effects of urbanisation on coastal habitats and the potential for ecological engineering: A Singapore case study. *Ocean & Coastal Management*, 103,

- 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.11.006>
- Mao, Y., Harris, D. L., Xie, Z., & Phinn, S. (2021). Efficient measurement of large-scale decadal shoreline change with increased accuracy in tide-dominated coastal environments with Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.09.021>
- Meltzner, A. J., Sieh, K., Chiang, H., Shen, C., Suwargadi, B. W., Natawidjaja, D. H., Philibosian, B., & Briggs, R. W. (2012). Persistent termini of 2004- and 2005-like ruptures of the Sunda megathrust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4). <https://doi.org/10.1029/2011JB008888>
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Pekel, J. F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018a). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Pekel, J. F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018b). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
- Mimura, N. (2008). *Conclusions: The Rapidly Changing Environment of the Asia and Pacific Region and its Implications for Sustainability of the Coastal Zones*. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3625-5_6
- Octaviana, D. A., Rochaddi, B., Atmodjo, W., Subardjo, P., Zainuri, M., Yusuf, M., & Rifai, A. (2020). Analisis Abrasi dan Akresi di Muara Sungai Kali Bodri, Kabupaten Kendal. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(2). <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i2.7426>
- Opa, E. T. (2011). Perubahan Garis Pantai Desa Bentenan Kecamatan Pusomaen, Minahasa Tenggara. *JURNAL PERIKANAN DAN KELAUTAN TROPIS*, 7(3). <https://doi.org/10.35800/jpkt.7.3.2011.187>
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Partono, W., Irsyam, M., Wardani, S. P. R., & Maarif, S. (2015). Persepsi Pengembangan Peta Rawan Gempa Kota Semarang Melalui Penelitian Hazard Gempa Deterministik. *Teknik*, 36(1), 24–31.
- Prahesti, T., Bashit, N., & Wahyuddin, Y. (2020). Analisis Perubahan Kerapatan Tanaman Mangrove Terhadap Perubahan Garis Pantai di Kabupaten Pati dengan Metode Penginderaan Jauh dan Aplikasi Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Tahun 2017-2020. *Elipsoida : Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 3(02). <https://doi.org/10.14710/elipsoida.2020.9156>
- Priyanto, A. T. (2010). *The Impact of Human Activities on Coastal Zones and Strategies towards Sustainable Development: A Case Study in Pekalongan, Indonesia*. Institut Teknologi Bandung.
- Putra, P. R., & Raguhanti, R. (2021). Hydrocarbon Prospectivity and Petroleum System in West Sumatra Forearc Basin. *Berita Sedimentologi*, 46(1), 44–50. <https://doi.org/10.51835/bsed.2020.46.1.59>
- Ramadhani, Y. P., Praktikto, I., & Suryono, C. A. (2021). Perubahan Garis Pantai Menggunakan Citra Satelit Landsat di Pesisir Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak. *Journal of Marine Research*, 10(2). <https://doi.org/10.14710/jmr.v10i2.30468>
- Riasasi, W. (2019). *Identifikasi Garis Pantai Kawasan Pesisir Kabupaten Brebes Berbasis Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis* (Vol. 17, Nomor 1). <https://journal.uny.ac.id/index.php/geomedia/index>
- Salim, A. G., Siringoringo, H. H., & Narendra, B. H. (2017). Pengaruh Penutupan Mangrove Terhadap Perubahan Garis Pantai dan Intrusi Air Laut di Hilir DAS Ciasem Dan DAS Cipunegara, Kabupaten Subang. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 23(3). <https://doi.org/10.22146/jml.18805>
- Santra, M., Dwivedi, C. S., & Pandey, A. C. (2024). Quantifying shoreline dynamics in the Indian Sundarban delta with Google Earth Engine (GEE)-based automatic extraction approach. *Tropical Ecology*, 65(3). <https://doi.org/10.1007/s42965-023-00321-w>
- Saputra, E., Ariyanto, I. S., Ghiffari, R. A., & Fahmi, M. S. I. (2021). Land value in a disaster-prone urbanized coastal area: A case study from semarang city, indonesia. *Land*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/land10111187>

- Sasmito, B., & Suprayogi, A. (2017). *Kajian Kerentanan Ekosistem Pesisir Kabupaten Demak berdasar Perubahan Garis Pantai dengan Teknologi Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis*. 13–20. <https://doi.org/10.14710/teknik.v38n1.12181>
- Setyawan, F. O., Sari, W. K., & Aliviyanti, D. (2021). Analisis Perubahan Garis Pantai Menggunakan Digital Shoreline Analysis System Di Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten Nagan Raya, Aceh. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(2). <https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2021.005.02.22>
- Sinabariba, R., Zaidar, & Kaban, M. (2022). *Nommensen Journal of Legal Opinion (NJLO) ANALISIS YURIDIS TERHADAP PENDIRIAN PERMUKIMAN DI PESISIR PANTAI KOTA SIBOLGA (Studi di Kelurahan Pancuran Bambu Kecamatan Sibolga Sambas Kota Sibolga)*. Volume 03, 139–144. <http://ejournal.uhn.ac.id/index.php/opinion>
- Sitorus, H., & Harahap, H. (2022). Social Capital Development Model in the Coastal Ecosystem Conservation Strategy of Sibolga City and Central Tapanuli Regency, North Sumatra Province. *Journal of Social Interactions and Humanities*, 1(3), 167–186. <https://doi.org/10.55927/jsih.v1i3.1943>
- Solihuddin, T., Husrin, S., Salim, H. L., Kepel, T. L., Mustikasari, E., Heriati, A., Ati, R. N. A., Purbani, D., Mbay, L. O. N., Indriasari, V. Y., & Berliana, B. (2021). Coastal erosion on the north coast of Java: adaptation strategies and coastal management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 777(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/777/1/012035>
- Solihuddin, T., Prihantono, J., Mustikasari, E., & Husrin, S. (2020). DINAMIKA PERUBAHAN GARIS PANTAI DI PERAIRAN TELUK BANTEN DAN SEKITARNYA. *JURNAL GEOLOGI KELAUTAN*, 18(2). <https://doi.org/10.32693/jgk.18.2.2020.596>
- Sugito, N. T., & Sugandi, D. (2016). URGensi PENENTUAN DAN PENEGAKAN HUKUM KAWASAN SEMPADAN PANTAI. *Jurnal Geografi Gea*, 8(2). <https://doi.org/10.17509/gea.v8i2.1703>
- Sutrisno, P., Suryanti, A., & Anwar, I. S. (2019). *Pengelolaan Pesisir dan Laut Berbasis Ekosistem*. Badan Penerbit Universitas Diponegoro Semarang.
- Syaharani, L., & Triyatno, T. (2019). Analisis Perubahan Garis Pantai Kabupaten Padang Pariaman dan Kota Pariaman Tahun 1988–2018 Menggunakan Digital Shoreline Analysis System (DSAS). *JURNAL BUANA*, 3(5). <https://doi.org/10.24036/student.v3i5.597>
- Unsworth, R., De León, P., Garrard, S., Jompa, J., Smith, D., & Bell, J. (2008). High connectivity of Indo-Pacific seagrass fish assemblages with mangrove and coral reef habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 353, 213–224. <https://doi.org/10.3354/meps07199>
- Usman, E. (2009). THE INCLINATION OF COASTLINE CHANGES AND ITS IMPLICATION FOR LANDUSE MANAGEMENT OF KARAWANG DISTRICT, WEST JAVA PROVINCE. Dalam *BULLETIN OF THE MARINE GEOLOGY* (Vol. 24, Nomor 1).
- Wei, S., Zhang, H., Xu, Z., Lin, G., Lin, Y., Liang, X., Ling, J., Wee, A. K. S., Lin, H., Zhou, Y., & Gong, P. (2024). Coastal urbanization may indirectly positively impact growth of mangrove forests. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 608. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01776-y>
- Widodo, A. A., & Mahiswara, M. (2011). CATCH RATE AND CATCH COMPOSITION OF FISH TRAWL BASED IN SIBOLGA, NORTH SUMATERA. *Indonesian Fisheries Research Journal*, 17(2), 63. <https://doi.org/10.15578/ifrj.17.2.2011.63-73>
- 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). <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.