



Laju Perubahan Garis Pantai di Pesisir Desa Siumbatu Berbasis Analisis Spasial Multi-Temporal

Aspar Erik¹, Fathan Mubin²

¹Bidang Pengelolaan Perikanan Tangkap, Dinas Perikanan, Morowali 94973, Indonesia

²Bidang Cipta Karya, Dinas Pekerjaan Umum Dan Penataan Ruang, Morowali 94973, Indonesia

asparerik2104@gmail.com

Abstrak

Siumbatu merupakan kawasan pesisir yang terletak di zona operasional industri nikel Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah, Indonesia. Kawasan ini menghadapi tekanan lingkungan dan perubahan garis pantai yang signifikan akibat aktivitas antropogenik yang intensif serta dinamika alamiah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan garis pantai di pesisir Siumbatu selama periode 5 dekade terakhir dari tahun 1972 hingga 2025. Data garis pantai diperoleh melalui ekstraksi citra satelit multi-temporal Landsat 1-9. Data garis pantai untuk sebelas tahun pengamatan dianalisis menggunakan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Analisis statistik dilakukan menggunakan Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versi 6.0 untuk menghitung laju abrasi dan akresi melalui metode End Point Rate (EPR), Net Shoreline Movement (NSM), dan Linear Regression Rate (LRR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk periode total 1972-2025, rata-rata EPR adalah 1,91 m/thn, rata-rata NSM tercatat sejauh 100,5 m, dan rata-rata LRR adalah 0,94 m/thn. Untuk periode terbaru (2020-2025), nilai EPR rata-rata adalah -7,636 m/thn dan nilai NSM rata-rata adalah -36,626 m. Laju abrasi tertinggi mencapai -64,42 m/thn dengan kemunduran garis pantai terjauh sejauh -331,24 m. Abrasi parah ditemukan di zona utara dan zona tengah, sementara akresi masif terjadi akibat aktivitas reklamasi industri. Perubahan ini dipicu oleh kombinasi karakteristik gelombang di Teluk Tolo dan intervensi antropogenik, khususnya pembangunan dermaga industri serta aktivitas reklamasi, sementara zona selatan tetap stabil berkat tutupan mangrove yang rapat.

Kata kunci: Perubahan Garis Pantai; Landsat Multi-Temporal; DSAS; Abrasi-Akresi; Pesisir Siumbatu.

1. Latar Belakang

Kawasan pesisir merupakan zona dinamis yang memiliki peran strategis, namun kini kian rentan terhadap berbagai tekanan, baik akibat fenomena alam maupun aktivitas antropogenik. Masalah degradasi seperti kenaikan permukaan laut, pengikisan garis pantai (abrasi), hingga sedimentasi telah menjadi ancaman nyata yang melanda mayoritas wilayah pesisir di dunia. Secara global, tingkat penyusutan garis pantai akibat erosi telah mencapai angka yang mengkhawatirkan, di mana dampaknya dirasakan oleh hampir 70% dari keseluruhan ekosistem pantai (Ghosh *et al.*, 2015). Fenomena ini memicu urgensi global dalam memperkuat penilaian ekosistem secara berkala dan menuntut pengintegrasian aspek spasial sebagai kunci utama untuk memitigasi tekanan lingkungan demi mewujudkan pengelolaan wilayah laut yang berkelanjutan.

Batas demarkasi antara daratan dan perairan, yang secara terminologis diidentifikasi sebagai garis pantai, merepresentasikan salah satu fitur ekosistem yang paling dinamis di permukaan bumi. Definisi garis pantai merujuk pada garis batas yang menjadi titik temu antara area darat dan massa air (Kumaravel *et al.*, 2013). Karakteristiknya yang sangat fluktuatif menjadikannya parameter krusial dalam mendeteksi fenomena abrasi dan akresi. Fenomena banjir dan erosi pantai yang ekstrem telah menjadi permasalahan lingkungan yang melanda berbagai wilayah pesisir di dunia (Muskanafole *et al.*, 2020). Mengingat signifikansi dampaknya terhadap ruang hidup manusia, pengelolaan perikanan, serta stabilitas sumber daya alam, pergeseran garis pantai yang ekstrem berpotensi memicu eskalasi kerugian sosial ekonomi yang masif. Secara konseptual, reduksi area pesisir akibat mundurnya garis pantai ke arah daratan diklasifikasikan sebagai abrasi, sementara ekspansi daratan menuju laut yang didorong oleh deposisi sedimen didefinisikan sebagai akresi.

Observasi terestrial dan fotogrametri udara merupakan pendekatan standar dalam inventarisasi garis pantai. Kendati demikian, determinan seperti inefisiensi finansial, durasi pelaksanaan, serta tingginya kebutuhan akan tenaga ahli spesialis menjadi limitasi utama metode konvensional tersebut. Merespons tantangan ini, integrasi

teknologi penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) kini mendominasi riset pesisir sebagai instrumen analitis yang komprehensif dan efisien. Dari segi efisiensi biaya, teknologi penginderaan jauh menawarkan solusi yang sangat vital dalam proses pengumpulan data spasial (Alesheikh *et al.*, 2003). Pemanfaatan data citra satelit multispektral memungkinkan peneliti untuk merekonstruksi lintasan historis perubahan batas darat dan air secara akurat. Untuk mengoptimalkan presisi deteksi spasial, tahapan pra-pemrosesan citra mutlak diperlukan, khususnya melalui penerapan algoritma indeks air. Perbedaan kontras antara penyerapan infra merah oleh badan air dan pantulan tinggi oleh unsur daratan memudahkan proses identifikasi serta pemetaan distribusi spasial antara lahan dan air (Niya *et al.*, 2013). Model matematis ini dirancang secara spesifik untuk mengamplifikasi respons spektral pada objek perairan, sehingga menghasilkan kontras visual yang tajam untuk memisahkan fitur akuatik dari daratan.

Desa Siumbatu, yang terletak di Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, merupakan salah satu wilayah pesisir yang mengalami perubahan morfologi secara drastis dalam beberapa dekade terakhir. Kawasan ini menghadapi tekanan antropogenik yang sangat masif akibat aktivitas pertambangan dan industrialisasi. Tingginya mobilitas kendaraan berat industri serta pembangunan infrastruktur pesisir seperti dermaga khusus (*jetty*) telah mengubah lanskap wilayah ini secara signifikan. Dinamika pesisir di kawasan Siumbatu saat ini sangat didominasi oleh proses penambahan daratan yang timbul akibat aktivitas timbunan atau reklamasi lahan pesisir untuk kepentingan operasional industri. Minimnya informasi spasial serta peta digital historis mengenai laju perubahan pesisir menjadi kendala utama dalam mewujudkan manajemen wilayah yang berkelanjutan dan mencegah potensi kegagalan tata ruang di area industri ini.

Penelitian ini bertujuan untuk memetakan garis pantai di Desa Siumbatu dan mengidentifikasi laju perubahan yang disebabkan oleh dinamika pesisir menggunakan data citra satelit seri waktu dari satelit Landsat 1 hingga Landsat 9. Pengambilan data dilakukan dengan interval waktu lima tahunan, terhitung sejak tahun 1972 hingga 2025. Pendekatan yang digunakan dalam mengekstraksi batas garis pantai memanfaatkan algoritma *Normalized Difference Water Index* (NDWI) untuk memisahkan antarmuka daratan dan perairan secara otomatis dan presisi pada setiap era perekaman. Memisahkan batas darat-air, yang kemudian diikuti dengan teknik *on-screen digitization* guna mengekstraksi garis batas wilayah (Ghosh *et al.*, 2015). Perhitungan jarak dan laju perubahan garis pantai dianalisis menggunakan perangkat lunak *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) versi 6. Metode ini mampu menghasilkan statistik laju perubahan garis pantai yang dihitung dari berbagai posisi garis pantai historis secara akurat (Muskananfolo *et al.*, 2020). Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menentukan tren dan laju perubahan kawasan pesisir secara akurat sebagai landasan saintifik bagi perencanaan lingkungan yang berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

a) Area Penelitian

Penelitian ini berfokus di Desa Siumbatu, Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali (2°44'0"-2°45'0" LS dan 122°2'0"-122°4'0" BT), yang berbatasan dengan Desa Dampala di utara, Desa Lalampu di selatan, serta perbukitan Sulawesi Tenggara di barat dan Teluk Tolo di timur. Secara geomorfologi, kawasan ini bertransformasi dari dataran pantai berpasir menjadi wilayah yang didominasi sedimen berlumpur, terutama di sekitar muara sungai dan fasilitas dermaga industri (*jetty*). Akumulasi material halus ini mengindikasikan tingginya pengaruh aktivitas antropogenik dan perubahan pola arus lokal akibat infrastruktur maritim (Hasriyanti *et al.*, 2021).

Sebagai wilayah yang mengalami konflik kepentingan antara ekologi dan ekspansi industri, sektor perikanan tradisional di Siumbatu berada dalam kondisi kritis. Data statistik 2025 menunjukkan Kecamatan Bahodopi mencatat produksi terendah di Morowali (427,8 ton) dengan jumlah nelayan aktif yang menyusut hingga tersisa sekitar 20 orang. Degradasi sosio-ekonomi ini berkorelasi dengan gangguan biofisik berupa intrusi sedimen tersuspensi akibat limpasan (*run-off*) bukaan lahan tambang dan intervensi pelabuhan. Kondisi degradasi morfologi pantai yang masif inilah yang mendasari urgensi evaluasi laju perubahan garis pantai di Desa Siumbatu secara saintifik dan multi-temporal.



Gambar 1 Lokasi Area Penelitian

b) Data

Citra digital yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra satelit optik multi-temporal dari seri Landsat 1 hingga Landsat 9. Citra optik merupakan sumber data yang ideal karena sifatnya yang mudah diperoleh dan diinterpretasikan secara teknis (Niya *et al.*, 2013). Data ini merekam dinamika pesisir Siumbatu selama kurun waktu 53 tahun, yang mencakup tahun perekaman 1972, 1978, 1982, 1991, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, dan 2025. Seluruh citra diunduh melalui portal resmi *United States Geological Survey* (USGS) dengan memilih *scene* yang memiliki tutupan awan (*cloud cover*) seminimal mungkin pada area penelitian.

Untuk mendeteksi batas garis pantai menggunakan algoritma *Normalized Difference Water Index* (NDWI), ekstraksi difokuskan pada dua saluran spektral utama, yaitu gelombang hijau (*green*) dan *Near-Infrared* (NIR). Kanal *mid-infrared* (Band 5) pada sensor TM terbukti memiliki performa terbaik dalam memisahkan batas antara daratan dan perairan dibandingkan kanal reflektif lainnya (Kelley *et al.*, 1998). Mengingat adanya evolusi teknologi sensor dari generasi *Multispectral Scanner* (MSS) hingga *Operational Land Imager* (OLI), karakteristik spektral dan penomoran saluran (*band*) yang digunakan bervariasi mengikuti spesifikasi masing-masing satelit.

Tabel 1 Karakteristik spasial dan spektral dari citra Landsat

Satelit	Waktu Akuasisi	Sensor	Spektral (μm)	Band	Cakupan	Resolusi Piksel
Landsat 1 & 2	04/11/1972	MSS multi spectral	0.50 - 0.80	4 dan 6	185 x 185 Km	60 Meter
	13/02/1978					
	05/01/1982					
Landsat 4 & 5	10/01/1991	TM multi spectral	0.52 - 0.90	2 dan 4	185 x 185 Km	30 Meter
	14/02/1995					
Landsat 7	03/08/2000	ETM+ multi spectral	0.52 - 0.90	2 dan 4	185 x 185 Km	30 Meter
	12/08/2005					
	26/08/2010					
Landsat 8 & 9	20/10/2015	OLI / OLI-2	0.53 - 0.88	3 dan 5	185 x 185 Km	30 Meter
	29/08/2020					
	16/06/2025					

c) Pra-pemrosesan Citra

Tahapan pra-pemrosesan citra dilakukan untuk memastikan akurasi spasial dan spektral sebelum ekstraksi garis pantai. Mayoritas citra satelit yang diunduh dari USGS merupakan produk standar (*Level-1TP* atau *Level-2*) yang telah terkoreksi geometrik dan radiometrik secara presisi. Namun, khusus untuk citra sensor MSS pada Landsat 1 dan 2 yang direkam pada dekade 1970-an, dilakukan koreksi geometrik tambahan berupa *image-to-image registration* menggunakan citra Landsat 8 sebagai referensi guna mengatasi pergeseran spasial. Koreksi geometrik berfungsi untuk memperbaiki distorsi spasial pada citra satelit agar sesuai dengan posisi koordinat objek yang

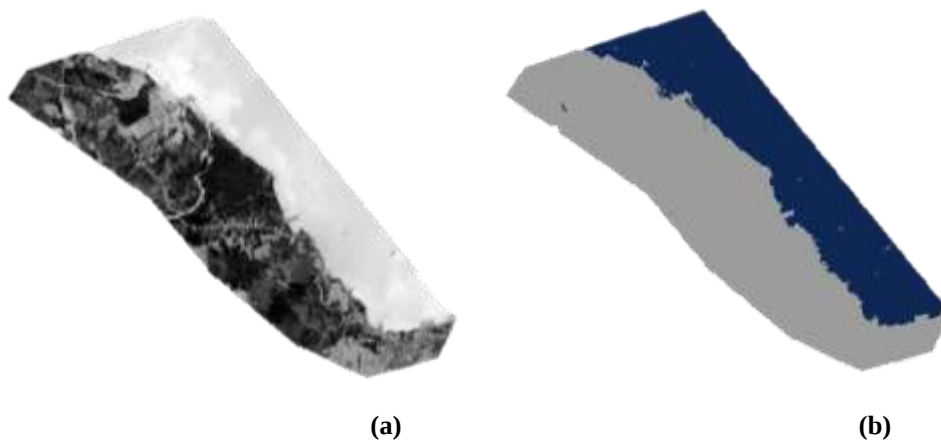
sebenarnya (Yuliana & Razi, 2022). Setelah posisi keruangan akurat, saluran spektral hijau (*green*) dan *near infrared* (*NIR*) digabungkan melalui teknik komposit *band*. Untuk menyeragamkan matriks data, citra Landsat 1 dan 2 dilakukan *resampling* dari resolusi 60 Meter menjadi 30 Meter menggunakan metode *nearest neighbor*. Terakhir, seluruh citra dipotong secara presisi mengikuti batas *Area of Interest* (AOI) pesisir Desa Siumbatu menggunakan fitur *extract by mask* berbasis *polygon* untuk memfokuskan area analisis.

d) Ekstraksi Shoreline

Pendekatan utama yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mendelineasi antarmuka daratan dan badan air dalam penelitian ini adalah algoritma *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Algoritma ini dioperasikan dengan mengkombinasikan saluran spektral hijau (*green*) dan *near infrared* (*NIR*) Gambar 2(a). Gelombang Hijau sangat sensitif terhadap perbedaan kekeruhan air dan sebaran sedimen tersuspensi. Pemilihan gelombang ini sangat relevan untuk mendeteksi batas perairan pesisir yang memiliki tingkat kekeruhan tinggi akibat limpasan material tambang dari daratan. Gelombang NIR memiliki karakteristik penyerapan yang sangat kuat oleh badan air, namun memberikan pantulan sinyal yang tinggi pada objek daratan dan vegetasi. Kombinasi kontras dari kedua saluran spektral ini menjadikan algoritma NDWI sangat ideal untuk memisahkan fitur daratan dan perairan secara presisi (Gambar 2a).

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Persamaan tersebut diaplikasikan pada seluruh citra menggunakan fitur *raster calculator* untuk memisahkan nilai piksel perairan (positif) dan daratan (negatif). Citra NDWI ini kemudian direklasifikasi menjadi citra biner untuk mempertegas batas darat dan air, yang selanjutnya diekstraksi menjadi data vector *polygon* (Gambar 2b). Sebanyak 11 lapisan garis pantai historis tersebut kemudian dioverlay ke dalam satu sistem koordinat untuk memvisualisasikan dinamika abrasi dan akresi. Dalam studi ini, fluktuasi pasang surut harian laut tidak dikoreksi. Pendekatan ini diasumsikan valid mengingat bias elevasi pasang surut tergolong sangat kecil dan tidak signifikan jika dibandingkan dengan skala pergeseran garis pantai ekstrem akibat intervensi antropogenik masif selama 53 tahun terakhir.



Gambar 2 (a) *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (b) *Raster Calculator*

e) Analisis Data

Analisis kuantitatif untuk menghitung laju perubahan garis pantai secara multi-temporal dilakukan menggunakan perangkat *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Mekanisme kerja DSAS dalam menganalisis variasi garis pantai didasarkan pada titik-titik perpotongan antara garis transek dengan posisi garis pantai seri waktu yang berfungsi sebagai referensi pengukuran (Yuliana & Razi, 2022). Eksekusi modul ini diawali dengan pendelineasian garis *baseline* artifisial yang ditempatkan di area daratan utama dan ditarik sejajar dengan orientasi umum pesisir Siumbatu. Untuk mengoptimalkan presisi arah proyeksi diaplikasikan parameter *smoothing distance* sebesar 500 Meter guna meminimalkan sudut *sharp vertices* pada pembentukan *baseline*.

Berdasarkan garis dasar tersebut, sistem DSAS menghasilkan garis-garis transek yang diproyeksikan ke arah laut (*offshore*) dan memotong seluruh lapisan garis pantai historis secara ortogonal. Interval jarak antar transek ditetapkan sebesar 50 Meter secara berurutan di sepanjang area penelitian, dengan panjang setiap garis proyeksi dikonfigurasi sejauh 2000 meter (Gambar 3). Dimensi panjang ini diaplikasikan untuk memastikan bahwa anomali

pergeseran garis pantai yang ekstrem, seperti fasilitas pelabuhan industri dan area reklamasi tambang yang menjorok jauh ke perairan, tetap terpotong secara komprehensif. Upaya mengakomodasi potensi bias spasial yang bersumber dari keterbatasan resolusi piksel citra satelit dan proses ekstraksi biner ditetapkan nilai ketidakpastian posisi garis pantai sebesar 10 Meter pada sistem kalkulasi. USGS merekomendasikan nilai acuan sebesar 10 Meter sebagai representasi rata-rata ketidakpastian dari berbagai tipe data garis pantai yang digunakan dalam proyek asesmen nasional (Himmelstoss *et al.*, 2021).

Penelitian ini menggunakan tiga parameter statistik untuk mengevaluasi dinamika pesisir, yaitu *End Point Rate* (EPR), *Net Shoreline Movement* (NSM), dan *Linear Regression Rate* (LRR). Nilai NSM merepresentasikan nilai jarak total perpindahan garis pantai secara fisik. Nilai NSM dikalkulasi berdasarkan jarak aktual (dalam satuan meter) antara posisi garis pantai yang paling awal (1972) dan yang paling akhir (2025) pada masing-masing garis transek. Secara matematis, kalkulasi NSM dirumuskan pada persamaan berikut:

$$NSM = D_{t2} - D_{t1}$$

Di mana D_{t2} merepresentasikan jarak garis pantai tahun terluar (2025) terhadap *baseline*, dan D_{t1} merepresentasikan jarak garis pantai tahun terawal (1972) terhadap *baseline*.

Laju kecepatan pergeseran garis pantai per tahun dihitung menggunakan metode EPR dan LRR. Model statistik EPR didapatkan dengan membagi jarak total (NSM) dengan jumlah rentang waktu antara tahun terbaru dan terlama. Laju perubahan garis pantai melalui metode EPR dihitung berdasarkan rasio jarak perpindahan garis pantai terhadap rentang tahun pengamatan yang memisahkan kedua data historis tersebut (Dolan *et al.*, 1991; Genz *et al.*, 2007; Thieler *et al.*, 2009). Persamaan matematis untuk EPR ditunjukkan pada persamaan berikut:

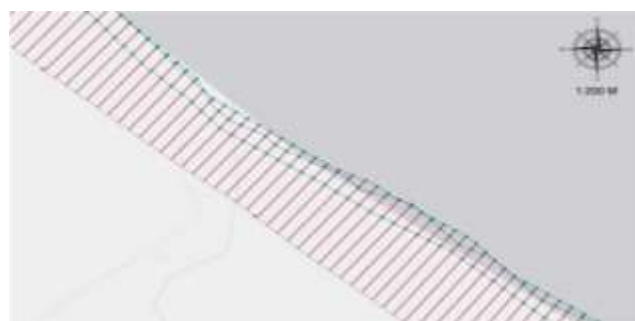
$$EPR = \frac{D_{t2} - D_{t1}}{t_2 - t_1}$$

Untuk melengkapi EPR yang hanya berpatokan pada dua data ujung, laju perubahan juga dievaluasi menggunakan *Linear Regression Rate* (LRR). Metode LRR mengkalkulasi tren perubahan garis pantai dengan menerapkan pendekatan kuadrat terkecil (*least-squares*) terhadap jarak antara garis dasar dan garis pantai di sepanjang transek, di mana nilai kemiringan garis tersebut merepresentasikan laju perubahannya (Jeong *et al.*, 2016). LRR mengkalkulasi tingkat perubahan secara lebih komprehensif dengan menarik garis regresi kuadrat terkecil (*least-squares regression line*) yang mencakup seluruh 11 data historis garis pantai. Pendekatan ini membuat nilai kecepatan perubahan tahunan (m/thn) menjadi lebih akurat dalam menangkap tren dinamika pesisir secara keseluruhan, terutama pada area yang mengalami anomali intervensi antropogenik yang masif. Dalam interpretasinya, output EPR dan LRR yang bernilai negatif mengindikasikan bahwa perairan bergerak maju ke arah daratan (abrasi), sedangkan nilai positif mengindikasikan massa daratan bertambah maju ke arah perairan (akresi atau reklamasi). Persamaan matematis untuk LRR ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$y = a + bx \quad b = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2}$$

Di mana:

- y : Jarak garis pantai dari *baseline* (meter).
- x : Waktu atau tahun perekaman citra.
- a : Konstanta *intercept* (titik potong sumbu y).
- b : Nilai kemiringan garis (*slope*), yang merupakan nilai LRR (laju perubahan dalam m/tahun)



Gambar 3 Cast Transects

3. Hasil dan Diskusi

a) Dinamika Garis Pantai: 1972-2025

Evaluasi kuantitatif terhadap dinamika garis pantai di pesisir Siumbatu selama kurun waktu 1972–2025 dianalisis memanfaatkan modul *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Kalkulasi laju perubahan keruangan tersebut diekstraksi berdasarkan proyeksi transek ortogonal dengan interval 50 meter di sepanjang area studi, sebagaimana direpresentasikan pada Gambar 4. Sintesis hasil analisis statistik spasial yang mencakup nilai rata-rata *End Point Rate* (EPR) dan *Net Shoreline Movement* (NSM) dijabarkan secara komprehensif pada Tabel 2.

Hasil observasi mengindikasikan bahwa morfologi pesisir Siumbatu didominasi oleh proses progradasi (akresi) secara persisten selama periode 1972-2025. Temuan ini dikonfirmasi oleh perolehan laju rata-rata perubahan garis pantai sebesar 1,91 m/tahun, serta total akumulasi pergeseran batas daratan ke arah laut sejauh 100,5 meter. Meskipun akumulasi temporal jangka panjang menunjukkan tren akresi yang bertambah, analisis berbasis interval waktu historis mendeteksi adanya instabilitas pesisir yang signifikan. Karakteristik pesisir memperlihatkan transisi fluktuatif antara proses abrasi dan akresi secara kontinu pada setiap fase observasi. Eskalasi dinamika yang paling ekstrem terkait lonjakan laju pergeseran garis pantai teridentifikasi secara spesifik pada interval tahun 2020 hingga 2025. Temuan dalam penelitian ini konsisten dengan berbagai studi terdahulu yang menegaskan bahwa kawasan pesisir merupakan wilayah yang sangat rentan terhadap dinamika erosi, akresi, serta genangan pasang surut Marfai (2011), Saranathan *et al.*, (2011), Mahapatra *et al.* (2014), Poormima *et al.* (2015), Jayakumar and Malarvannan (2016), Boye *et al.*, (2018) dan Muskananfolo *et al.*, (2020).

Tabel 2 Rata-rata *end point rate* dan *net shoreline movement*

Periode	End Point Rate (m/th)	Net Shoreline Movement (m)	Standar Deviasi (m/th)
1972-2025	1,91	100,5	2,229
1972-1982	-8,589	-78,521	2,933
1982-1991	2,751	24,798	2,522
1991-2000	-1,618	-15,236	2,589
2000-2010	-1,092	-10,983	3,034
2010-2020	3,16	31,627	4,544
2020-2025	-7,636	-36,626	18,98

Tabel 3 Nilai akresi dan erosi berdasarkan *end point rate*

Periode	<i>End Point Rate</i> (m/th)		<i>End Point Rate</i> (m/th)	
	Abrasi		Akresi	
	Nilai Tertinggi	Nilai Terendah	Nilai Tertinggi	Nilai Terendah
1972-2025	-4,56	-0,01	8,53	0
1972-1982	-20,56	-0,52	0	0
1982-1991	-3,91	-0,07	10,81	0,02
1991-2000	-13,89	-0,02	5,59	0,01
2000-2010	-12,65	0,02	7,06	0
2010-2020	-33,09	-0,25	19,21	0
2020-2025	-64,42	-0,07	65,31	0,1

Tabel 4 Nilai akresi dan erosi berdasarkan *net shoreline movement*

Periode	<i>Net Shoreline Movement</i> (m)		<i>Net Shoreline Movement</i> (m)	
	Abrasi		Akresi	
	Nilai Tertinggi	Nilai Terendah	Nilai Tertinggi	Nilai Terendah
1972-2025	-239,96	-0,65	448,31	0,13
1972-1982	-187,98	-4,79	0	0
1982-1991	-35,24	0,62	97,46	0,21
1991-2000	-132,85	-0,17	53,43	0,05
2000-2010	-127,3	-0,04	71,07	0,13
2010-2020	-331,24	-2,51	192,31	0
2020-2025	-308,96	-0,33	313,27	0,49

b) Laju Perubahan Garis Pantai

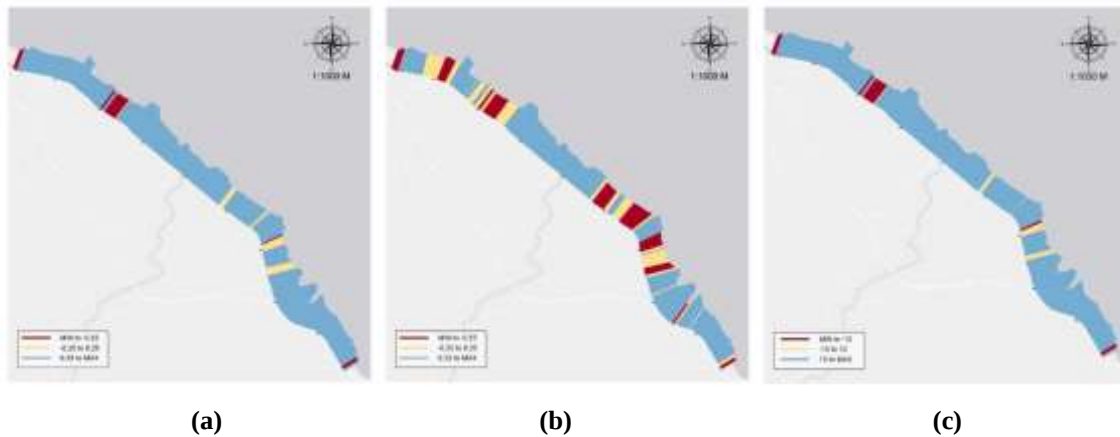
Pergerakan garis pantai yang mundur ke arah daratan direpresentasikan dengan nilai negatif yang bermakna abrasi, sementara nilai positif mengindikasikan majunya massa daratan ke arah perairan atau akresi. Dinamika kecepatan pergeseran di pesisir Desa Siumbatu selama lebih dari lima dekade (1972-2025) direkapitulasi secara komprehensif dalam Tabel 2 dan Tabel 3. Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan metode *End Point Rate* (EPR) pada (Gambar 4a), laju perubahan rata-rata selama 53 tahun terakhir tercatat sebesar 1,91 m/thn dengan laju abrasi tertinggi -4,56 m/thn dan akresi tertinggi 8,53 m/thn. Evaluasi tren jangka panjang yang lebih moderat melalui metode *Linear Regression Rate* (LRR) (Gambar 4b) memperlihatkan rata-rata laju perubahan sebesar 0,94 m/thn, dengan laju akresi maksimum mencapai 8,17 m/thn dan abrasi maksimum berada pada -2,21 m/thn.

Telaah spasial dan temporal secara periodik mengungkap fluktuasi laju perubahan yang sangat kontras di setiap zona. Pada dekade awal pengamatan yaitu periode 1972-1982 (Gambar 5a), pesisir Siumbatu didominasi oleh proses abrasi masif dengan rata-rata laju mencapai -8,589 m/thn. Pada rentang ini, laju abrasi tertinggi menyentuh angka -20,56 m/thn dan terendah -0,52 m/thn tanpa adanya rekaman akresi yang signifikan. Pola ini berbalik pada periode 1982-1991 (Gambar 5b) yang didominasi oleh akresi dengan rata-rata laju 2,751 m/thn, di mana zona tengah (estuaria) mulai berekspansi dengan nilai akresi tertinggi 10,81 m/thn. Namun, ketidakstabilan kembali terjadi pada periode 1991-2000 (Gambar 5c) dan 2000-2010 (Gambar 5d), dengan rata-rata laju kembali negatif berturut-turut pada angka -1,618 m/thn dan -1,092 m/thn. Pada masa ini, laju abrasi tertinggi meroket hingga -13,89 m/thn yang terpusat di sisi utara muara.

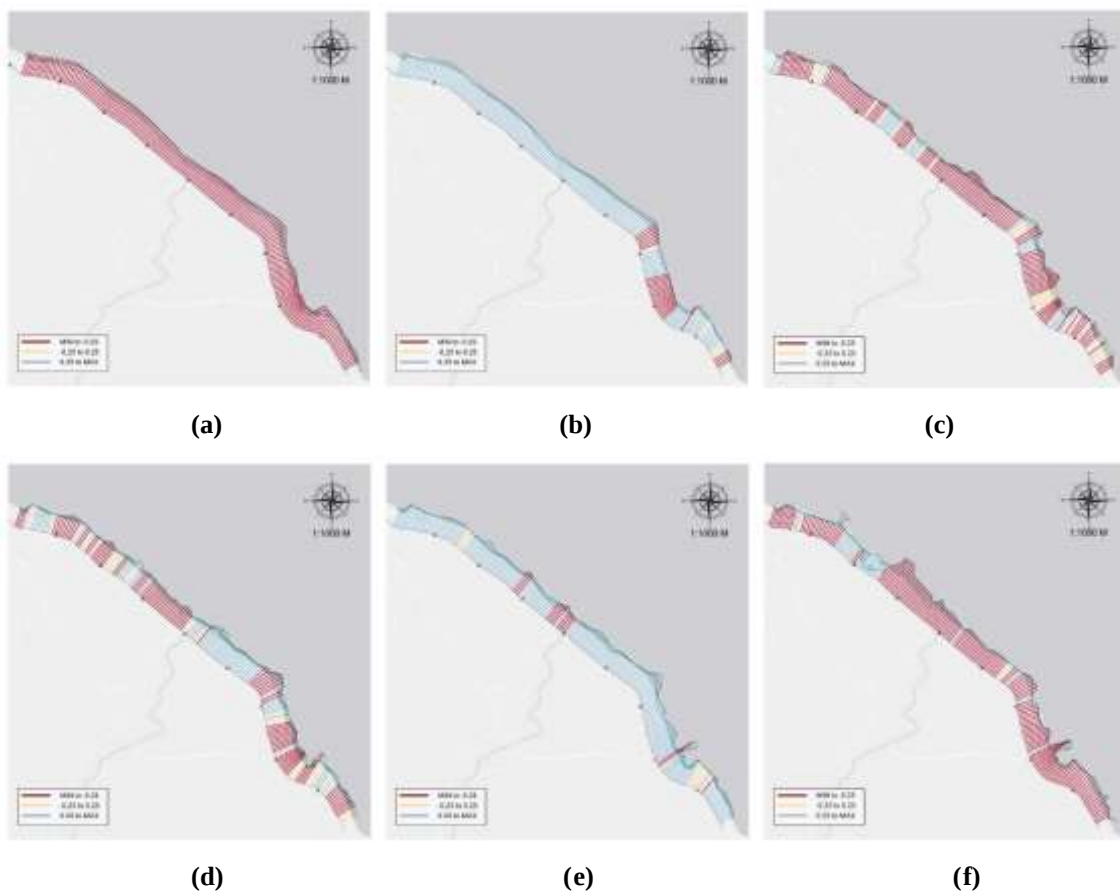
Dinamika laju pesisir menunjukkan anomali yang semakin ekstrem seiring meningkatnya aktivitas industrialisasi. Pada rentang 2010-2020 (Gambar 5e), laju rata-rata kembali positif sebesar 3,16 m/thn dengan akresi tertinggi mencapai 19,21 m/thn. Menariknya, pada periode ini mulai terlihat pola pemisahan zona yang jelas. Zona selatan tetap stabil berkat perlindungan ekosistem mangrove, sementara zona utara justru mengalami abrasi yang semakin parah dengan nilai tertinggi -33,09 m/thn dan terendah -0,25 m/thn. Gejala paling destruktif terekam pada periode observasi terbaru (2020-2025) (Gambar 5f), di mana rata-rata laju anjlok ke angka -7,636 m/thn dengan standar deviasi yang sangat tinggi (18,98 m/thn).

Pada periode 2020-2025 tersebut, zona utara mencatat rekor kecepatan abrasi tertinggi sepanjang sejarah pengamatan yang menyentuh angka ekstrem -64,42 m/thn dengan terendah -0,07 m/thn. Fenomena ini berkorelasi langsung dengan masifnya intervensi antropogenik berupa pembangunan struktur dermaga laut khusus yang membelokkan arus dan memusatkan energi gelombang ke daratan yang tidak terlindungi. Sebaliknya, laju akresi tercepat juga terekam di zona tengah pada periode yang sama (Gambar 5f) dengan kecepatan mencapai 65,31 m/thn dan terendah 0,1 m/thn. Meroketnya angka akresi ini merupakan manifestasi dari aktivitas reklamasi lahan industri dan intrusi sedimen tersuspensi berskala besar dari limpasan hulu menuju Teluk Tolo. Kondisi ini sejalan dengan temuan Hasriyanti *et al.*, (2021) yang menyatakan bahwa aktivitas pembangunan infrastruktur maritim di Morowali mempercepat laju sedimentasi material halus. Selain itu, Yalindua *et al.*, (2017) juga menegaskan bahwa aliran sedimen dari daratan akibat aktivitas industri di hulu telah mengubah komposisi dasar perairan di kawasan Bahodopi secara signifikan. Kontrasnya perubahan antara abrasi terekstrem di utara dan akresi masif di zona

tengah membuktikan bahwa pesisir Siumbatu sedang mengalami disrupsi morfologi yang hebat akibat tekanan industrialisasi.



Gambar 4. Hasil Perhitungan DSAS Periode 1972-2025 (a) *End Point Rate* (b) *Linear Regression Rate* (c) *Net Shoreline Movement*



Gambar 5 Hasil Perhitungan *End Point Rate* (EPR) (a) 1972-1982 (b) 1982-1991 (c) 1991-2000 (d) 2000-2010 (e) 2010-2020 (f) 2020-2025

c) Jarak Perpindahan Garis Pantai

Evaluasi jarak fisik perpindahan garis pantai menggunakan parameter *Net Shoreline Movement* (NSM). Berbeda dengan parameter laju perubahan, nilai NSM merepresentasikan total perpindahan spasial dalam satuan meter yang ditarik secara tegak lurus dari garis pantai terawal hingga garis pantai terakhir pada masing-masing transek. Berdasarkan visualisasi NSM (Gambar 4c) periode 1972-2025, pesisir Desa Siumbatu selama 53 tahun terakhir

mencatat pergerakan bersih rata-rata sejauh 100,5 m ke arah laut. Namun, angka akumulatif tersebut menyimpan disparitas spasial yang sangat tajam di mana kemunduran daratan akibat abrasi mencapai jarak terjauh hingga -239,96 m, sementara ekspansi daratan akibat sedimentasi dan reklamasi mencatat jarak maksimal hingga 448,31 m (Tabel 4).

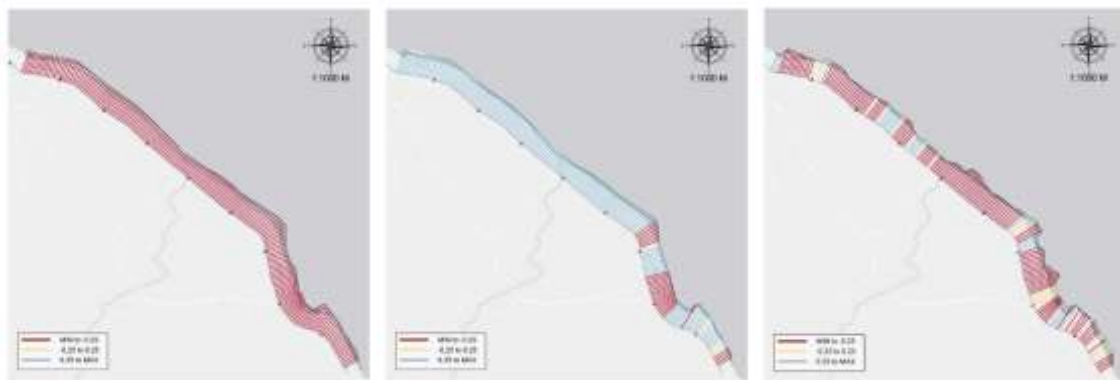
Visualisasi perpindahan garis pantai menunjukkan dinamika yang fluktuatif di setiap zona. Pada periode awal 1972-1982 (Gambar 6a), pesisir Siumbatu mengalami kemunduran fisik yang sangat masif dengan rata-rata jarak -78,521 m. Secara spasial, abrasi ini mendominasi hampir seluruh garis pantai dengan jarak kemunduran tertinggi mencapai -187,98 m. Kondisi ini mencerminkan karakter pesisir Siumbatu yang terbuka terhadap energi gelombang Teluk Tolo sebelum adanya intervensi struktur pelindung atau vegetasi yang masif. Memasuki periode 1982-1991 (Gambar 6b), terjadi pemulihan daratan dengan jarak akresi rata-rata 24,798 m, di mana jarak ekspansi tertinggi mencapai 97,31 m yang mulai terkonsentrasi di zona tengah atau area estuari sungai.

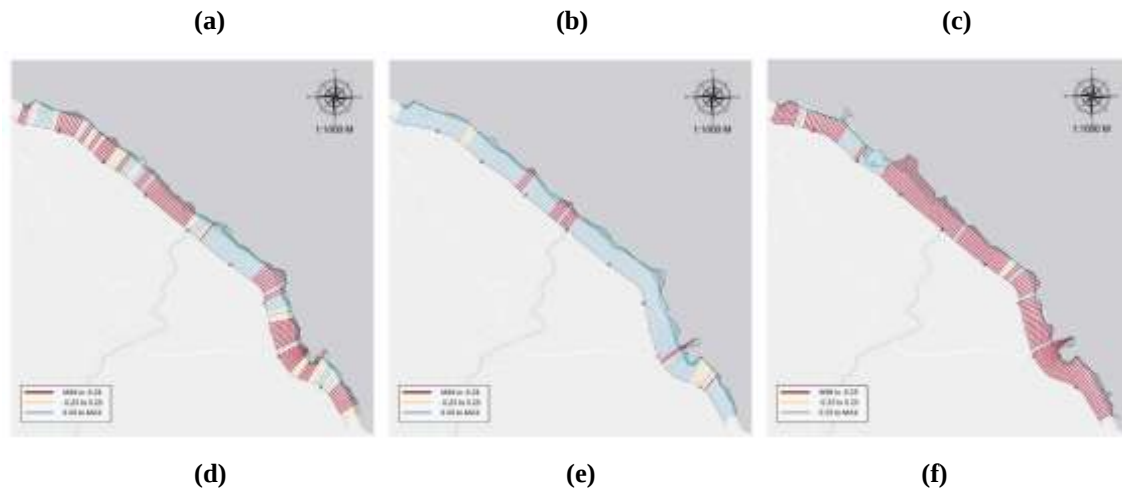
Ketidakstabilan kembali terekam pada periode 1991-2000 (Gambar 6c) dan 2000-2010 (Gambar 6d), di mana pergerakan garis pantai kembali mundur dengan jarak abrasi tertinggi berkisar antara -125 m hingga -132 m. Tekanan fisik terhadap daratan ini semakin tereskalasi seiring dengan dimulainya perubahan penggunaan lahan di sekitar pesisir. Memasuki fase industrialisasi yang intensif pada periode 2010-2020 (Gambar 6e), terjadi lompatan jarak perpindahan yang sangat kontras. Meskipun rata-rata pergerakan menunjukkan angka positif 31,627 m, namun jarak abrasi terekstrem merosot tajam hingga -331,24 m. Hal ini mengindikasikan bahwa di saat sebagian besar area mengalami penambahan daratan, titik-titik krusial di sisi utara justru kehilangan lahan secara katastrofik.

Puncak disrupsi spasial yang paling nyata terlihat pada periode terbaru 2020-2025 (Gambar 6f). Dalam kurun waktu hanya lima tahun, jarak abrasi tertinggi menyentuh -308,96 m yang secara visual mendominasi zona utara. Fenomena kemunduran daratan ratusan meter dalam waktu singkat ini merupakan dampak langsung dari pembangunan infrastruktur industri berat, khususnya dermaga khusus atau *jetty*. Keberadaan *jetty* yang menjorok jauh ke laut berfungsi sebagai penghalang transpor sedimen sejajar pantai. Akibatnya, area di hilir arus mengalami defisit sedimen kronis sementara energi gelombang yang terrefleksi dari dinding dermaga justru menghantam pantai dengan kekuatan lebih besar, memicu pengikisan daratan yang sangat cepat dan dalam di wilayah utara Siumbatu.

Sebaliknya, perluasan daratan terekstrem tercatat sejauh 313,27 m di zona tengah pada periode yang sama (Gambar 6f). Analisis lapangan menunjukkan bahwa angka ini tidak lagi sekadar hasil sedimentasi alami estuari. Meskipun muara sungai Siumbatu membawa suplai sedimen tersuspensi yang tinggi akibat limpasan dari aktivitas industri maupun pembukaan lahan di hulu, penambahan jarak daratan yang mencapai ratusan meter dalam lima tahun ini merupakan manifestasi dari aktivitas reklamasi lahan pesisir untuk perluasan kawasan industri dan pelabuhan. Timbunan material buatan ini secara artifisial membuat garis pantai menjorok ke arah laut, yang secara otomatis mengubah profil batimetri dan sirkulasi arus lokal di Teluk Tolo.

Secara menyeluruh, analisis NSM ini menegaskan bahwa zona selatan desa siumbatu merupakan satu-satunya wilayah yang relatif stabil secara fisik karena terlindungi oleh kerapatan ekosistem mangrove yang bertindak sebagai peredam alami. Sebaliknya, zona utara dan zona tengah telah berubah menjadi kawasan yang sangat dinamis dan rentan akibat benturan antara proses alamiah dan tekanan antropogenik. Lebarinya rentang antara abrasi ratusan meter akibat *jetty* dan akresi ratusan meter akibat reklamasi membuktikan bahwa pesisir Siumbatu telah kehilangan keseimbangan morfologi alaminya. Disrupsi ini tidak hanya mengubah lanskap fisik, tetapi secara langsung menghancurkan ekosistem pesisir dan mempersempit ruang gerak serta area tangkap produktif bagi nelayan tradisional di Desa Siumbatu.





Gambar 6 Hasil Perhitungan *Net Shortline Movement* (NSM) (a) 1972-1982 (b) 1982-1991 (c) 1991-2000 (d) 2000-2010 (e) 2010-2020 (f) 2020-2025

4. Kesimpulan

Studi ini menunjukkan bahwa pesisir Desa Siumbatu telah mengalami tekanan abrasi yang serius selama periode 1972–2025. Laju abrasi periode terbaru (2020-2025) tercatat sangat ekstrem hingga mencapai -64,42 m/thn dengan jarak kemunduran daratan terjauh sejauh -331,24 m pada dekade industrialisasi. Tren kemunduran garis pantai yang masif di sebagian besar wilayah studi, yang dibarengi dengan akresi akibat reklamasi, mengindikasikan bahwa perairan pesisir Siumbatu sedang mengalami gangguan keseimbangan sedimen yang signifikan akibat faktor alamiah dan intervensi manusia. Secara spasial, zona utara dan zona tengah mengalami perubahan yang jauh lebih destruktif dibandingkan zona selatan. Variabilitas ini disebabkan oleh perbedaan fitur morfologi, di mana zona selatan masih terlindungi oleh ekosistem mangrove yang rapat. Sebaliknya, zona utara dan tengah sangat rentan akibat adanya pembangunan struktur dermaga industri dan aktivitas reklamasi yang mendistorsi sirkulasi sedimen alami Teluk Tolo serta memicu abrasi di sisi hilir arus. Perlu segera diambil tindakan mitigasi teknis serta edukasi bagi masyarakat pesisir mengenai dampak aktivitas industri terhadap perubahan garis pantai. Penelitian lanjutan mengenai pola penggunaan lahan industri dan fenomena penurunan muka tanah sangat disarankan sebagai dasar pengelolaan wilayah pesisir Siumbatu yang lebih komprehensif di masa depan.

Referensi

1. Alesheikh, A. A., Mansourian, A., Pirasteh, S., & Talebzadeh, M. A. (2007). Generation of coastline change map for Urmia Lake by TM and ETM+ imagery. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 4(2), 187–194.
2. Boye, C. B., Appeaning Addo, K., Wiafe, G., & Dzibodi-Adjimah, K. (2018). Spatio-temporal analyses of shoreline change in the Western Region of Ghana. *Journal of Coastal Conservation*, 22(4), 769–776. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0607>
3. Ghosh, M. K., Kumar, L., & Roy, C. (2015). Monitoring the coastline change of Hatiya Island in Bangladesh using remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 137–144.
4. Hasriyanti, H., Nurdin, N., & Suwarno, R. (2021). Analisis laju sedimentasi di wilayah pesisir Kabupaten Morowali. *Jurnal Ilmu Kelautan SPERMONDE*, 7(1), 15–22.
5. Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091*. <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>
6. Jayakumar, J., & Malarvannan, S. (2016). Assessment of shoreline changes over the Northern Tamil Nadu Coast, South India using WebGIS techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 20(6), 477–487. <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0461-9>
7. Jeong, S. H., Khim, B. K., Jo, Y. H., Kim, B. O., Lee, S. H., & Park, K. S. (2016). Shoreline change rate of the barrier islands in Nakdong River Estuary over the southern part of Korea. *Journal of Coastal Research*, 75, 248–252. <https://doi.org/10.2112/SI75-050.1>
8. Kelley, K. A., Crawford, J. P., Gibeaut, J. G., & Solomon, S. D. (1998). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) user's guide (Version 1.0)*. U.S. Geological Survey.
9. Kumaravel, S., Ramkumar, T., Gurunanam, B., Suresh, M., & Dharanirajan, K. (2013). An application of remote sensing and GIS-based shoreline change studies: A case study in the Guddalore District, East Coast of Tamil Nadu, South India. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2(4), 2278–3075.
10. Mahapatra, M., Ratheesh, R., & Rajawat, A. S. (2014). Shoreline change analysis along the coast of South Gujarat, India, using digital shoreline analysis system. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42(4), 869–876. <https://doi.org/10.1007/s12524-013-0334-8>
11. Marfai, M. A. (2011). Impact of coastal flooding on ecology and agricultural land use: Case study in Central Java, Indonesia. *Quaestiones Geographicae*, 30, 19–32.
12. Muskananfolo, M. R., Supriharyono, & Febrianto, S. (2020). Spatio-temporal analysis of shoreline changes along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. *Regional Studies in Marine Science*, 34, 101060.
13. Niya, A. K., Alesheikh, A. A., Soltanpor, M., & Kheirkhahzarkesh, M. M. (2013). Shoreline change mapping using remote sensing and GIS: Case study Bushehr Province. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 3(3), 102–107.

14. Poormima, K. V., Sriganesh, J., & Annadurai, R. (2015). Coastal structures' influence on the North Chennai shore using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Advanced Research in Geoscience and Remote Sensing*, 2(3), 52–60.
15. Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change (Open-File Report 2008–1278)*. U.S. Geological Survey.
16. Yalindua, A., Boneka, F. B., & Mamangkey, N. G. (2017). Dampak aktivitas pertambangan nikel terhadap ekosistem terumbu karang di perairan Desa Bahodopi Kabupaten Morowali. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 5(2), 176–186.
17. Yuliana, P., & Razi, P. (2022). Mapping coastline changes in the Mentawai Islands using remote sensing. *Georest: Geoscience and Remote Sensing Technology*, 3(2), 52–57.