

Pemodelan Numerik Dampak Perubahan Iklim terhadap Pergerakan dan Dinamika Garis Pantai di Susoh, Aceh

Teuku Mudi Hafli¹⁾, Fasdarsyah²⁾, Syibril Malasyi³⁾, David Sarana⁴⁾, Mukhlis⁵⁾,
Muhammad Fauzan⁶⁾

^{1, 2, 3, 4, 5, 6)} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh,
Lhokseumawe

Email: teukumudi@unimal.ac.id¹⁾, fasdarsyah@unimal.ac.id²⁾,
syibrilmalasyi91@gmail.com³⁾, davidsarana@unimal.ac.id⁴⁾,
mukhlis.st.mt@unimal.ac.id⁵⁾, fauzanunimal@gmail.com⁶⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v16i1.1357>

(Received: 05 February 2026 / Revised: 08 February 2025 / Accepted: 12 March 2026)

Abstrak

Wilayah pesisir memiliki potensi besar bagi pembangunan ekonomi, sosial, dan ekologi, namun pemanfaatannya masih terbatas dan menghadapi tekanan lingkungan yang meningkat. Di Provinsi Aceh, kawasan pesisir semakin rentan akibat perubahan iklim dan aktivitas manusia yang memicu kenaikan muka air laut, peningkatan frekuensi badai, abrasi, serta banjir rob. Salah satu wilayah yang terdampak adalah Pantai Susoh di Kabupaten Aceh Barat Daya yang memiliki fungsi penting sebagai kawasan wisata dan religius. Namun, abrasi terjadi hampir setiap tahun dan pada Oktober 2023 gelombang pasang akibat anomali iklim merusak lebih dari selusin rumah penduduk. Kondisi ini diperparah oleh banjir rob yang dipengaruhi penurunan muka tanah pasca gempa 2004. Penelitian ini menggunakan pemodelan numerik dengan metode morphological scale factor (morfac) untuk menganalisis kondisi eksisting dan memprediksi dinamika morfologi pantai jangka panjang. Hasil simulasi menunjukkan tren erosi berkelanjutan hingga 50 tahun mendatang dengan kemunduran garis pantai rata-rata $\pm 200,19$ m. Oleh karena itu, strategi mitigasi berbasis struktur pantai dan rehabilitasi ekosistem diperlukan untuk mengurangi risiko abrasi dan mendukung pengelolaan pesisir yang berkelanjutan.

Kata kunci: *erosi pantai, mitigasi pesisir, morfac, pemodelan numerik, perubahan iklim*

Abstrack

Coastal areas have significant potential for economic, social, and ecological development; however, their utilization remains limited and increasingly pressured by environmental changes. In Aceh Province, coastal regions are becoming more vulnerable due to climate change and human activities that contribute to sea level rise, increased storm frequency, coastal erosion, and tidal flooding. One of the affected areas is Susoh Beach in Southwest Aceh Regency, which plays an important role as a tourism and religious area. However, coastal erosion occurs almost every year, and in October 2023 storm surges triggered by climate anomalies damaged more than a dozen houses. This condition is further exacerbated by tidal flooding influenced by land subsidence following the 2004 earthquake. This study employs numerical modeling using the morphological scale factor (morfac) method to analyze existing conditions and predict long-term coastal morphological dynamics.

The simulation results indicate a continuous erosion trend over the next 50 years, with an average shoreline retreat of approximately ± 200.19 m. Therefore, mitigation strategies based on coastal protection structures and ecosystem rehabilitation are necessary to reduce erosion risk and support sustainable coastal management.

Keywords: *Coastal erosion, coastal mitigation, morfac, numerical modeling, climate change*

1. Latar Belakang

Wilayah pesisir memiliki peran penting dalam mendukung pembangunan ekonomi, sosial, dan ekologi, namun juga menjadi kawasan yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim. Berdasarkan laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021), kenaikan muka air laut global mencapai 3,7 mm/tahun dan terus meningkat akibat pemanasan global. Kondisi ini menyebabkan perubahan dinamika gelombang, arus, serta memperparah kejadian abrasi dan banjir rob di wilayah pesisir tropis, termasuk Indonesia. Menurut Cahayrini et al. 2021, peningkatan frekuensi badai dan perubahan pola gelombang di pesisir barat Sumatera telah mempercepat degradasi garis pantai serta menurunkan kapasitas ekosistem pesisir dalam melindungi daratan dari energi gelombang laut. Fenomena serupa juga terjadi di Provinsi Aceh, di mana kombinasi faktor alami dan antropogenik memperparah laju abrasi dan genangan rob. Mahendra, 2023 menjelaskan bahwa eksploitasi sumber daya pesisir, alih fungsi lahan, serta penurunan muka tanah pascagempa 2004 mempercepat degradasi morfologi pantai. Pantai Susoh di Kabupaten Aceh Barat Daya menjadi salah satu contoh kawasan paling rentan terhadap fenomena ini. Wilayah tersebut memiliki nilai strategis sebagai destinasi wisata dan kawasan religius, namun hampir setiap tahun mengalami abrasi parah yang merusak permukiman dan fasilitas publik. Peristiwa gelombang pasang ekstrem pada Oktober 2023 yang merusak lebih dari selusin rumah menunjukkan peningkatan intensitas kejadian ekstrem yang berkaitan dengan anomali iklim (Yulianto et al., 2022).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji abrasi di wilayah pesisir Aceh, seperti yang dilakukan oleh Fadli et al., 2022 yang menganalisis laju abrasi berbasis citra satelit, serta Nur et al., 2023 yang mengevaluasi efektivitas struktur pelindung pantai terhadap erosi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih bersifat deskriptif dan spasial, belum mengintegrasikan pendekatan dinamis berbasis pemodelan numerik jangka panjang untuk memahami perubahan morfologi pantai secara kuantitatif. Selain itu, penelitian sebelumnya belum mempertimbangkan pengaruh kenaikan muka air laut dan perubahan pola arus akibat perubahan iklim dalam simulasi perubahan garis pantai.

Terdapat gap penelitian (*research gap*) yang jelas, yaitu belum adanya kajian yang secara simultan menganalisis interaksi antara faktor oseanografi, iklim, dan aktivitas manusia terhadap perubahan morfologi pantai di kawasan pesisir barat Aceh menggunakan model numerik berbasis *morphological scale factor* (morfac). Pendekatan ini memungkinkan simulasi jangka panjang untuk memprediksi dinamika erosi-sedimentasi dengan efisiensi waktu yang tinggi serta tingkat akurasi yang lebih baik dibanding metode empiris konvensional. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penerapan pemodelan morfologi jangka panjang menggunakan Delft3D dengan skema morfac pada kawasan Pantai

Susoh, yang sebelumnya belum pernah dikaji secara komprehensif. Selain itu, penelitian ini juga mengintegrasikan parameter perubahan iklim (kenaikan muka air laut) dan perubahan aktivitas manusia (alih fungsi lahan dan pembangunan infrastruktur pesisir) ke dalam simulasi numerik, sehingga menghasilkan prediksi yang lebih representatif terhadap kondisi masa depan. Berdasarkan uraian latar belakang yang telah disampaikan, dapat diidentifikasi bahwa kawasan pesisir Pantai Susoh, Kabupaten Aceh Barat Daya, menghadapi permasalahan kompleks akibat kombinasi faktor oseanografi dan perubahan iklim. Kondisi ini menyebabkan terjadinya perubahan morfologi pantai. Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah dilakukan di wilayah pesisir Aceh, sebagian besar masih bersifat deskriptif dan belum mengintegrasikan pendekatan dinamis berbasis pemodelan numerik jangka panjang. Dengan mempertimbangkan keterbatasan penelitian terdahulu dan adanya *research gap* tersebut, maka permasalahan utama yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah bagaimana memahami secara kuantitatif perubahan morfologi Pantai Susoh akibat pengaruh gelombang, arus serta kenaikan muka air laut. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh interaksi faktor oseanografi terhadap dinamika erosi dan sedimentasi di kawasan Pantai Susoh, Kabupaten Aceh Barat Daya. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan dan memprediksi perubahan morfologi pantai serta pergeseran garis pantai dalam jangka panjang menggunakan model numerik Delft3D dengan skema morphological scale factor (morfac). Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menggambarkan proyeksi perubahan garis pantai hingga 50 tahun ke depan sebagai dampak dari perubahan iklim serta memberikan dasar ilmiah dalam perumusan strategi mitigasi dan pengelolaan pesisir yang berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Lokasi penelitian terletak di Kabupaten Aceh Barat Daya, Provinsi Aceh, yang berada di kawasan barat selatan Pulau Sumatra dan berhadapan langsung dengan Samudera Hindia. Secara geografis, wilayah ini berada pada koordinat $3^{\circ}34'24''$ – $4^{\circ}05'37''$ Lintang Utara dan $96^{\circ}34'57''$ – $97^{\circ}09'19''$ Bujur Timur, dengan pusat pemerintahan berlokasi di Blangpidie. Kabupaten Blangpidie memiliki garis pantai yang panjang dan morfologi pesisir yang bervariasi, sehingga sangat dipengaruhi oleh dinamika gelombang, pasang surut, serta arus laut dari Samudera Hindia.



Gambar 1 Area Simulasi

Kondisi tersebut menjadikan kawasan pesisir Aceh Barat Daya, khususnya Kecamatan Susoh, rentan terhadap abrasi, banjir rob, dan dampak perubahan iklim lainnya. Dengan posisi strategis sebagai pusat aktivitas sosial, ekonomi, dan pariwisata, daerah ini dipilih sebagai lokasi penelitian untuk menganalisis dinamika morfologi pantai serta kerentanannya terhadap perubahan lingkungan pesisir jangka panjang. Area simulasi yang diperlihatkan pada Gambar 1.

2.1 Data

Penelitian ini menggunakan model Delft3D dengan memasukkan data bathimetri, topografi, angin, sedimen, dan pasang surut sebagai parameter input.

Tabel 1 Kebutuhan Data

No	Data	Kebutuhan Data	Sumber Data
1.	Bathimetri	Elevasi Perairan	PT. Global Rekayasa
2.	Topografi	Elevasi Daratan	PT. Global Rekayasa
3.	Angin	Pembangkitan Gelombang	PT. Global Rekayasa
4.	Sedimen	Uk. D ₅₀	PT. Global Rekayasa
5.	Pasang Surut	Komponen Harmonik	PT. Global Rekayasa

2.2 Gelombang

Gelombang laut dibangkitkan oleh angin dan berperan penting dalam membentuk morfologi pantai, menggerakkan arus, mengangkut sedimen, serta memberi beban pada struktur pantai (Triatmodjo, 2009). Estimasi tinggi dan periode gelombang signifikan ditentukan oleh kecepatan angin di atas permukaan laut, yang berkaitan dengan konsep fetch efektif—jarak angin berhembus dengan arah dan kecepatan relatif konstan dalam mentransfer energi ke laut (Triatmodjo, 2009). Dalam konteks perubahan iklim, peningkatan intensitas dan variabilitas angin diprediksi mengubah dinamika gelombang, mempercepat erosi, memengaruhi pola transportasi sedimen, serta meningkatkan risiko terhadap infrastruktur dan ekosistem pesisir.

$$UW = RL \times UL \quad (1)$$

$$UA = 0,71 \times UW^{1,23} \quad (2)$$

$$RL = 2,7605 \times UL^{-0,305} \quad (3)$$

Keterangan:

UW = kecepatan angin yang diprediksikan di laut (m/dt);

UL = kecepatan angin yang di ukur di darat (m/dt);

RL = nilai perbandingan kecepatan;

UA = kecepatan seret angin (m/dt).

$$F_{eff} = \frac{\sum X_i \cos \alpha^\circ}{\sum \cos \alpha^\circ} \quad (4)$$

Keterangan:

F_{eff} = fetch rerata efektif (km);

X_i = panjang segmen fetch yang diukur dari titik observasi gelombang ke ujung akhir fetch (km);

α = deviasi pada kedua sisi dari arah angin, dengan menggunakan pertambahan 6° sampai sebesar 42° pada kedua sisi dari arah angin.

Setelah nilai koefisien hambatan angin (wind drag) dan fetch ditetapkan dengan tepat, perhitungan tinggi gelombang signifikan dan periode ulang dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{g \cdot H_s}{U_A^2} = 0,30 \left[1 - \frac{1}{\left\{ 1 + 0,004 \left(\frac{g \cdot F}{U_A^2} \right)^{1/2} \right\}^2} \right] \quad (5)$$

$$\frac{g \cdot T_s}{2\pi U_A} = 1,37 \left[1 - \frac{1}{\left\{ 1 + 0,008 \left(\frac{g \cdot F}{U_A^2} \right)^{1/3} \right\}^5} \right] \quad (6)$$

Keterangan:

- Hs = tinggi gelombang signifikan (m);
- Ts = periode gelombang signifikan (m);
- UA = kecepatan seret angin (m/dt);
- g = percepatan gravitasi (m/dt²);
- F = panjang fetch (m).

2.3 Pemodelan Numerik

Model numerik adalah pemodelan yang dilakukan dengan fenomena oseanografi ke dalam persamaan – persamaan numerik. Simulasi numerik gabungan dapat membantu dalam memberikan pemahaman bagaimana proses gelombang, arus dan sedimen yang menyebabkan perubahan batimetri dan topografi. Delft3D merupakan model numerik yang digunakan untuk mensimulasikan kawasan pantai, sungai dan pada muara pantai. Selain pantai, sungai dan muara, Delft3D juga dapat mensimulasikan gelombang, sedimen, ekologi dan kualitas air pada pantai. Pemodelan perubahan morfologi pantai pada penelitian ini menggunakan kombinasi Delft3D-Flow dan Delft3-Wave. Dalam proses transpor sedimen, Delft3D mengadopsi persamaan yang telah dikembangkan oleh Van Rijn (Li et al, 2013) yaitu:

$$q_s = 0,012 \bar{u} \frac{(\bar{u} - \bar{u}_{cr})^{2,4} d_{50} D_*^{-0,6}}{((s-1)g d_{50})^{1,2}} \quad (7)$$

Dengan,

$$D_* = \left[\frac{g}{v^2} \right]^{1/3} D_{50} \quad (8)$$

$$\bar{u}_{cr} = 0,19(D_{50})^{0,1} \log \left(\frac{12h}{3D_{90}} \right) \text{ untuk } 0,0001 \text{ m} \leq D_{50} < 0,0005 \text{ m} \quad (9)$$

$$\bar{u}_{cr} = 8,50(D_{50})^{0,6} \log \left(\frac{12h}{3D_{90}} \right) \text{ untuk } 0,0005 \text{ m} \leq D_{50} < 0,002 \text{ m} \quad (10)$$

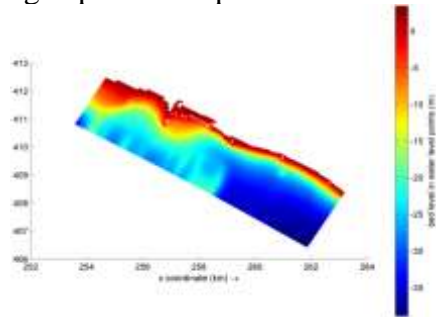
Keterangan:

- D₅₀ = diameter median sedimen (m);
- D₉₀ = 1.5 D₅₀
- D* = diameter partikel non-dimensional
- \bar{u} = kecepatan aliran (m/det);
- \bar{u}_{cr} = kecepatan kritis (m/det);

- h = kedalaman air (m/det);
- v = kecepatan aliran arah y (m/det)
- qb = transpor sedimen dasar (bed load)
- qs = transpor sedimen melayang (suspended load)

2.4 Persiapan Simulasi

Dalam mempersiapkan model, ada langkah penting yang harus dilakukan adalah menyusun domain simulasi yang mencakup grid, batas daratan, dan nilai kedalaman. Selain itu, perlu dikumpulkan berbagai jenis data untuk dimasukkan ke dalam pemodelan. Data tersebut meliputi batimetri, topografi, angin, sedimen, dan pasang surut. Data yang telah dipersiapkan ini selanjutnya digunakan sebagai input dalam Delft3D yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Domain Simulasi

Gambar 2 menunjukkan batas wilayah pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini. Domain simulasi merupakan area perairan yang dimasukkan ke dalam model numerik untuk merepresentasikan kondisi hidrodinamika dan proses transformasi gelombang di sekitar lokasi penelitian. Penentuan domain dilakukan dengan mempertimbangkan cakupan area yang cukup luas agar proses perambatan gelombang dari laut lepas menuju wilayah pesisir dapat dimodelkan secara optimal. Pada domain tersebut ditampilkan grid pemodelan yang berfungsi sebagai pembagi ruang perhitungan numerik. Setiap grid merepresentasikan sel komputasi tempat model menghitung parameter oseanografi seperti arus, gelombang, dan perubahan morfologi dasar laut. Resolusi grid umumnya dibuat lebih rapat pada area yang dekat dengan garis pantai dan lokasi penelitian agar hasil simulasi memiliki ketelitian yang lebih baik.

2.5 Proses Simulasi

2.5.1 Delft3D - Flow

Delft3D-FLOW merupakan model numerik berbasis *Shallow Water Equations* (SWE) yang digunakan untuk memodelkan variasi kecepatan arus dan muka air dalam domain dua maupun tiga dimensi (Fahmi et al., 2019). Domain komputasi dibangun menggunakan Delft3D-RGFGRID untuk pembuatan grid dan Delft3D-QUICKIN untuk input batimetri. Parameter utama meliputi pasang surut, karakteristik sedimen, serta pengaturan morfologi. Pada penelitian ini, gaya pembangkit pasang surut direpresentasikan oleh data observasi 15 hari dengan empat komponen utama (M2, K1, O1, N2). Skenario kenaikan muka air laut diadopsi dari proyeksi IPCC untuk periode 50 tahun. Faktor Morfac diterapkan untuk mempercepat perhitungan morfologi, sehingga prediksi perubahan garis

pantai dapat diperoleh dengan mempertimbangkan dinamika pasang surut, gelombang signifikan, dan proyeksi kenaikan muka air laut (Hafli et al., 2022).

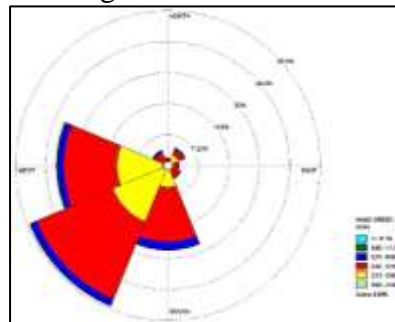
2.5.2 Delft3D - Wave

Simulasi perubahan morfologi pantai dikombinasikan dengan Delft3D-WAVE, yaitu modul gelombang dalam sistem Delft3D yang digunakan untuk memodelkan dinamika gelombang di perairan pantai. Delft3D-WAVE mampu mensimulasikan proses transformasi gelombang pada kondisi perairan dalam, menengah, hingga dangkal. Parameter utama yang digunakan sebagai input pada Delft3D-WAVE meliputi tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang (Hafli et al., 2022).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Angin

Analisis angin menggunakan data BMKG Stasiun Cut Nyak Dhien periode 2013–2024 menunjukkan bahwa angin dominan berasal dari arah barat daya, barat, dan selatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Dominasi arah angin ini menunjukkan bahwa sistem angin di wilayah penelitian lebih sering bertiup dari sektor Samudera Hindia menuju kawasan pesisir. Arah tersebut memiliki panjang fetch yang relatif besar karena tidak terhalang daratan, sehingga energi angin dapat bekerja pada permukaan laut dalam jarak yang lebih panjang. Kondisi ini memungkinkan terbentuknya gelombang dengan tinggi dan energi yang lebih besar dibandingkan arah angin yang memiliki fetch lebih pendek. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang yang mempengaruhi wilayah pesisir penelitian sebagian besar dibangkitkan oleh angin dari sektor barat daya hingga selatan. Oleh karena itu, arah-angin dominan tersebut menjadi faktor utama dalam pembentukan karakteristik gelombang di perairan lepas pantai. Distribusi arah angin ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan panjang fetch efektif dan peramalan gelombang.



Gambar 3 Wind Rose

Nilai tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang signifikan (T_s) yang dihasilkan dari arah dominan tersebut selanjutnya digunakan sebagai kondisi batas (*boundary condition*) pada pemodelan gelombang menggunakan Delft3D-WAVE.

3.2 Analisis Gelombang

Analisis *wind rose* dilakukan untuk mengidentifikasi arah dominan angin yang berperan sebagai pembangkit utama gelombang di wilayah studi.

Berdasarkan hasil pengolahan data angin jangka panjang, diperoleh lima sektor arah dominan, yaitu Timur Laut (NE), Utara (N), Timur (E), Barat Laut (NW), dan Barat (W). Kelima arah ini menunjukkan frekuensi kejadian angin yang signifikan dalam mempengaruhi pembangkitan gelombang laut di perairan pesisir Aceh Barat Daya. Proses peramalan gelombang (*wave forecasting*) kemudian dilakukan menggunakan data kecepatan angin yang melebihi ambang batas 10 knot, yang dalam berbagai studi dinyatakan sebagai kecepatan minimum untuk menghasilkan gelombang signifikan di perairan dangkal (*shallow water conditions*). Parameter angin tersebut diolah menggunakan rumus empirik *fetch-limited wave growth* untuk mendapatkan nilai tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang signifikan (T_s) pada masing-masing sektor arah.

Hasil peramalan menunjukkan variasi nilai H_s dan T_s yang merepresentasikan kondisi oseanografi lokal terhadap pengaruh arah angin musiman. Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai kondisi batas dinamis (*boundary condition*) dalam modul Delft3D-WAVE, yang terintegrasi dengan model hidrodinamika Delft3D-FLOW. Modul ini mensimulasikan proses propagasi gelombang, transformasi energi gelombang, refraksi, shoaling, dan interaksi nonlinier dengan morfologi pantai. Melalui integrasi kedua modul tersebut, diperoleh gambaran yang komprehensif mengenai distribusi energi gelombang dan respons morfologi pantai terhadap dinamika gelombang di wilayah studi. Tinggi dan periode gelombang signifikan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Tinggi dan Periode Gelombang Signifikan

Periode Ulang (Tahun)	Tenggara/Southeast (SE)		Selatan/South (S)		Barat Daya/Southwest (SE)		Barat /West (W)	
	H (m)	T (dtk)	H (m)	T (dtk)	H (m)	T (dtk)	H (m)	T (dtk)
2	0.683	3.234	0.884	3.925	0.748	3.624	0.686	3.384
5	1.007	3.824	1.228	4.531	1.039	4.149	1.005	3.944
10	1.227	4.225	1.459	4.937	1.234	4.500	1.219	4.319
25	1.507	4.736	1.751	5.452	1.480	4.945	1.489	4.793
50	1.716	5.117	1.968	5.835	1.664	5.275	1.690	5.145
100	1.923	5.495	2.184	6.215	1.846	5.603	1.890	5.496

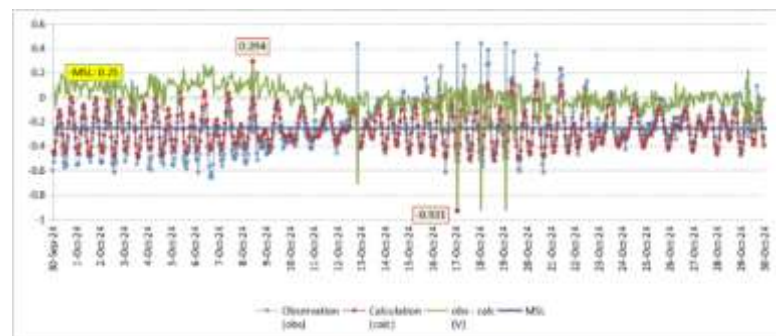
Tabel Tinggi dan Periode Gelombang Signifikan menggambarkan karakteristik utama gelombang laut yang digunakan untuk menganalisis kondisi oseanografi di suatu wilayah perairan. Dua parameter utama yang disajikan dalam tabel tersebut adalah tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang signifikan (T_s). Tinggi gelombang signifikan (H_s) merupakan rata-rata dari sepertiga gelombang tertinggi yang terjadi dalam suatu periode pengamatan. Parameter ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi gelombang yang paling dominan dan paling berpengaruh terhadap dinamika perairan, seperti proses transport sedimen, erosi pantai, maupun sedimentasi. Sementara itu, periode gelombang signifikan (T_s) menunjukkan selang waktu antara dua puncak gelombang berturut-turut. Nilai periode ini berkaitan dengan energi gelombang yang merambat menuju pantai. Semakin besar periode gelombang, maka energi yang dibawa gelombang umumnya semakin besar dan berpotensi memberikan pengaruh lebih kuat terhadap perubahan morfologi pantai. Nilai pada tabel ini

memberikan informasi mengenai karakteristik gelombang dominan yang menjadi input utama dalam pemodelan gelombang dan dinamika pantai pada Delft3D, untuk menganalisis proses erosi, sedimentasi, serta perubahan garis pantai.

3.3 Pasang Surut

Pada Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara data pasang surut hasil pengamatan (*observation*) dengan hasil perhitungan menggunakan metode *Least Square Method* (LSM) selama periode pengamatan. Kurva berwarna biru merepresentasikan elevasi muka air laut hasil observasi di lapangan, sedangkan kurva merah menunjukkan hasil perhitungan atau prediksi pasang surut berdasarkan konstanta harmonik yang diperoleh dari analisis LSM. Garis ungu menunjukkan posisi *Mean Sea Level* (MSL) yang pada lokasi penelitian berada pada elevasi sekitar 0,25 m.

Secara umum terlihat bahwa pola fluktuasi antara data observasi dan hasil perhitungan memiliki bentuk yang hampir serupa. Hal ini menunjukkan bahwa metode *Least Square* mampu merepresentasikan karakteristik pasang surut di lokasi penelitian dengan baik. Perbedaan antara data observasi dan hasil perhitungan ditunjukkan oleh kurva hijau (*obs-calc*) yang menggambarkan nilai residual atau selisih antara keduanya. Nilai residual yang relatif kecil menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik antara model harmonik dan kondisi pasang surut yang terukur di lapangan.



Gambar 4 Grafik Pasang Surut

Dari grafik juga dapat diamati bahwa elevasi muka air laut maksimum selama periode pengamatan mencapai sekitar 0,294 m, sedangkan elevasi minimum mencapai sekitar -0,931 m terhadap datum yang digunakan. Variasi muka air laut ini menunjukkan dinamika pasang surut yang dipengaruhi oleh komponen harmonik utama seperti M2, S2, K1, dan O1, yang merupakan komponen dominan dalam pembentukan pasang surut di wilayah penelitian.

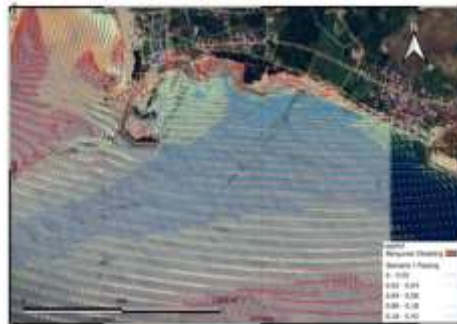
Tabel 3 Komponen Harmonik Pasang Surut

No	Constituents	Symbol	Description	g° phase	H=Amplitude (m)
1.	Main lunar constituent	M2	semi diurnal	179.4012°	0.1427
2.	Main solar constituent	S2		77.8337°	0.0951
3.	Soli-lunar constituent	K1	diurnal	129.1620°	0.0907
4.	Main lunar constituent	O1		47.0606°	0.0682

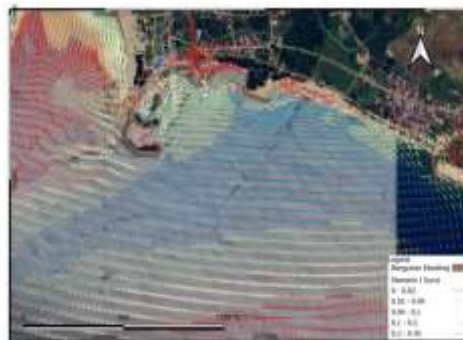
3.4 Pemodelan Arus

Pemodelan arus merupakan proses simulasi numerik yang digunakan untuk menggambarkan pola pergerakan massa air di suatu perairan akibat pengaruh gaya-gaya hidrodinamika seperti pasang surut, gelombang, angin, serta perbedaan kedalaman. Dalam penelitian pesisir, pemodelan arus sangat penting karena arus berperan dalam proses transport sedimen yang mempengaruhi erosi dan sedimentasi pantai. Secara umum, pemodelan arus dilakukan menggunakan model hidrodinamika dua dimensi atau tiga dimensi, misalnya dengan perangkat lunak Delft3D-Flow. Proses pemodelan diawali dengan pembuatan domain model yang mencakup wilayah perairan yang akan dianalisis, kemudian dilakukan pembuatan grid atau mesh yang membagi area penelitian menjadi sel-sel perhitungan.

Hasil pemodelan menunjukkan sebaran vektor kecepatan arus di perairan Susoh selama satu siklus pasang surut (Gambar 5). Dinamika arus dipengaruhi oleh kombinasi arus pasang surut dan arus akibat gelombang. Pada kondisi pasang tertinggi, arus bergerak dari selatan ke utara dengan kecepatan sekitar 0,2 m/s. Ketika mendekati perairan dangkal, terjadi fenomena shoaling yang meningkatkan kecepatan arus hingga $\pm 0,4$ m/s.



a



b

Gambar 5 Vektor arus kondisi pasang (a) surut (b)

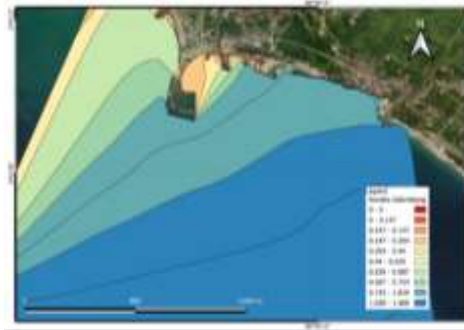
Fenomena percepatan arus ini berdampak pada transport sedimen dan stabilitas garis pantai. Keberadaan jetty di wilayah Susoh berperan memodifikasi pola arus, dengan mereduksi kecepatan, menyebabkan difraksi, serta menciptakan area perlindungan di sisi pantai. Jetty juga membantu menstabilkan aliran sehingga mampu mengurangi dampak erosi akibat pengaruh dari percepatan arus.

Pada kondisi surut menunjukkan kecepatan arus relatif kecil pada area lepas pantai dengan nilai rata-rata sekitar 0,02 m/s, akibat terbatasnya volume air yang

bergerak menuju pantai. Namun, ketika arus mendekati pesisir, keberadaan jetty dan revetment memengaruhi pola aliran. Struktur pantai tersebut selain berfungsi meredam energi gelombang, juga menimbulkan penyempitan aliran yang menyebabkan percepatan arus hingga mencapai $\pm 0,4$ m/s. kejadian ini menunjukkan bahwa infrastruktur pantai memiliki peran penting dalam mereduksi kecepatan serta mengubah pola arah arus. Peningkatan kecepatan arus akibat interaksi dengan jetty dan revetment berpotensi memengaruhi distribusi sedimen, sehingga berdampak terhadap proses erosi maupun sedimentasi di kawasan tersebut. Kondisi vektor arus kondisi pasang surut dapat dilihat pada Gambar 5.

3.5 Pemodelan Gelombang

Distribusi statistik tinggi gelombang yang diperlihatkan pada Gambar 6 menunjukkan pada musim Barat Laut menunjukkan variabilitas yang signifikan, dengan rentang teramati antara 0,1 hingga 1,9 m. Nilai rata-rata tinggi gelombang efektif untuk periode ini berada dalam kisaran 0,16–1,7 m. Hasil simulasi numerik perambatan gelombang (*wave propagation*) mengindikasikan bahwa interaksi gelombang dengan struktur perlindungan pantai, khususnya breakwater dan jetty, menghasilkan reduksi energi yang substansial. Struktur-struktur ini berfungsi sebagai penghalang hidrodinamika utama yang efektif memutus dan mendisipasi intensitas gelombang sebelum mencapai zona pesisir. Pemodelan menunjukkan bahwa gelombang dengan tinggi awal maksimum hingga 1,7 m mengalami penurunan elevasi muka air yang signifikan, tereduksi hingga mencapai nilai rata-rata sekitar 0,3 m di perairan dekat garis pantai (*nearshore zone*).



Gambar 6 Kondisi Gelombang

3.6 Perubahan Morfologi Pantai

Arah angin pada Tabel 3 menunjukkan arah asal angin yang bertiup menuju wilayah penelitian. Dalam meteorologi kelautan, penamaan arah angin didasarkan pada arah datangnya angin. Sebagai contoh, angin selatan berarti angin yang bertiup dari arah selatan menuju wilayah pesisir penelitian, sedangkan angin tenggara berasal dari arah tenggara menuju lokasi penelitian. Perbedaan arah angin ini penting karena setiap arah memiliki panjang penjarangan gelombang (*fetch*) yang berbeda di atas permukaan laut, sehingga menghasilkan energi gelombang yang tidak sama.

Nilai *Morphological Scale Factor* (MORFAC) terbesar diperoleh pada arah angin barat daya yaitu sebesar 475,56, yang sejalan dengan persentase kemunculan angin terbesar pada arah tersebut yaitu 33%. Hal ini menunjukkan bahwa angin dari sektor barat daya memberikan kontribusi paling dominan terhadap proses hidrodinamika di wilayah penelitian. Angin yang bertiup dari arah

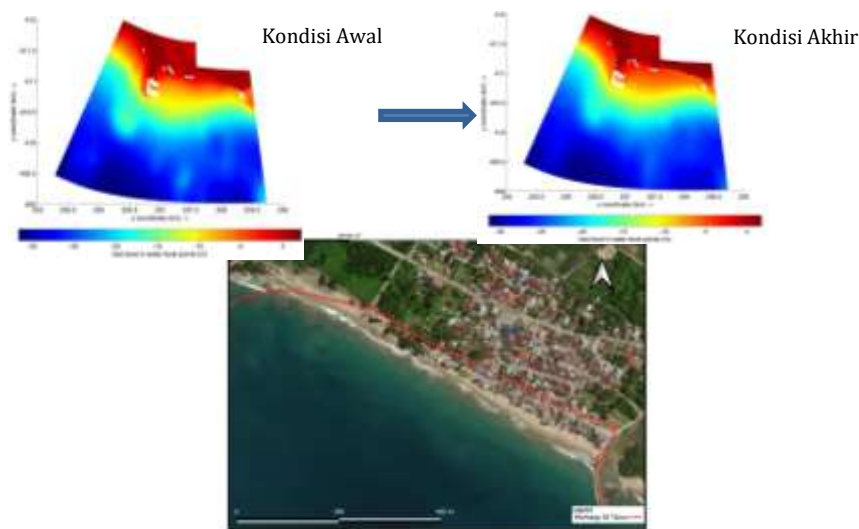
barat daya umumnya memiliki lintasan yang panjang di atas perairan terbuka sehingga mampu mentransfer energi yang lebih besar ke permukaan laut dan menghasilkan gelombang dengan energi yang relatif tinggi. Gelombang yang dihasilkan dari arah dominan ini kemudian memengaruhi proses transport sedimen sepanjang pantai (longshore sediment transport), yang berperan penting dalam membentuk pola erosi dan sedimentasi di kawasan pesisir.

Dengan nilai MORFAC yang lebih besar pada arah barat daya, proses perubahan morfologi pantai yang disebabkan oleh gelombang dari arah tersebut akan mengalami percepatan dalam simulasi model numerik. Hal ini berarti bahwa kontribusi proses hidrodinamika dari arah barat daya dianggap paling berpengaruh terhadap dinamika perubahan garis pantai dalam jangka panjang. Oleh karena itu, arah ini menjadi faktor utama yang perlu diperhatikan dalam analisis perubahan morfologi pantai, terutama dalam kaitannya dengan potensi erosi maupun akumulasi sedimen pada wilayah pesisir penelitian.

Tabel 4 Nilai Morphological Scale Factor

No	Arah Angin	Perentase Kemunculan Angin (%)	Nilai Morphological Scale Factor
1.	Selatan	20	289.84
2.	Tenggara	4	50.53
3.	Barat Daya	33	475.56
4.	Barat	27	384.07

Pada Gambar 7 menunjukkan garis pantai kondisi awal (sebelum simulasi) dan kondisi akhir perubahan garis pantai (setelah simulasi) dengan proyeksi 50 tahun serta hasil simulasi dianalisis secara spasial untuk mendapatkan tren kemunduran garis pantai pada lokasi tersebut. Pada wilayah penelitian menunjukkan tren erosi yang berkelanjutan hingga periode proyeksi 50 tahun ke depan. Proses erosi yang terjadi bersifat signifikan, dengan rata-rata kemunduran garis pantai mencapai $\pm 200,19$ m dalam proyeksi rentang 50 tahun.



Gambar 7 Perubahan Morfologi Pantai Proyeksi 50 Tahun

Faktor utama yang memicu erosi ini adalah kombinasi energi gelombang laut, arus pasang surut, serta keterbatasan elemen perlindungan alami seperti vegetasi pantai dan terumbu karang. Tidak adanya struktur pengaman pantai yang memadai semakin memperparah laju kemunduran garis pantai, sehingga menjadikan kawasan ini tergolong sangat rentan terhadap dampak erosi.

Dampak yang ditimbulkan tidak hanya terbatas pada perubahan fisik lingkungan pesisir, melainkan juga menyentuh aspek sosial dan ekonomi masyarakat sekitar. Pemukiman yang berada dekat dengan garis pantai menghadapi ancaman nyata berupa berkurangnya lahan akibat abrasi. Beberapa rumah penduduk bahkan telah kehilangan sebagian tapaknya, yang pada gilirannya dapat mengganggu keberlanjutan tempat tinggal dan aktivitas ekonomi masyarakat pesisir.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa model numerik mampu merepresentasikan kondisi hidrodinamika dan morfologi Pantai Susoh dengan baik. Pola pasang surut hasil simulasi selaras dengan observasi lapangan dengan perbedaan amplitudo maksimum $\pm 0,05$ m. Secara statistik, nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk elevasi muka air dan kecepatan arus berada pada kisaran 0,07–0,12 m, masih dalam batas toleransi model numerik (Deltares, 2014). Hasil verifikasi morfologi menunjukkan bahwa posisi garis pantai hasil simulasi 10 tahun memiliki deviasi kurang dari 10 m dibandingkan citra satelit aktual. Dengan hasil tersebut, model dinyatakan terkalibrasi dengan baik dan representatif terhadap kondisi lapangan, sehingga layak digunakan untuk simulasi morfologi jangka panjang menggunakan skema *morphological scale factor* (morfac). Pemodelan dengan morfac menunjukkan bahwa garis pantai di lokasi penelitian terus mengalami kemunduran hingga proyeksi 50 tahun ke depan, dengan rata-rata sejauh $\pm 200,19$ m dari garis pantai saat ini. Erosi ini dipengaruhi oleh energi gelombang, arus pasang surut, serta tidak adanya perlindungan alami maupun bangunan pengaman pantai. Dampaknya tidak hanya mengubah bentuk fisik pantai, tetapi juga mengancam pemukiman dan aktivitas masyarakat pesisir yang kehilangan sebagian lahannya akibat abrasi.

4.2 Saran

Upaya mitigasi perlu segera dilakukan melalui pembangunan struktur pelindung pantai dan rehabilitasi ekosistem pesisir, seperti penanaman mangrove atau terumbu buatan. Pemantauan garis pantai secara berkala penting untuk mengevaluasi efektivitas langkah perlindungan yang diterapkan. Selain itu, kebijakan tata ruang pesisir harus diarahkan untuk mengurangi risiko abrasi, termasuk kemungkinan relokasi permukiman di zona rawan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Rektor Universitas Malikussaleh atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama proses penelitian ini berlangsung. Terima kasih juga disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Malikussaleh atas bimbingan

serta kesempatan yang telah diberikan dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini. Penghargaan yang setinggi-tingginya juga penulis sampaikan kepada seluruh penulis dan rekan yang terlibat dalam penyusunan tulisan ini atas kerja sama, dedikasi, dan kontribusi yang sangat berharga sehingga karya ini dapat terselesaikan dengan baik.

Daftar Kepustakaan

- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T. and Kortenhaus, A., 2021. Numerical modelling of coastal morphodynamics under wave forcing. *Coastal Engineering Journal*, 63(3), pp.273–289.
- Cahyarini, D.R., Susanto, A.D. and Purba, M.H., 2021. Climate change impacts on coastal erosion and flooding in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 936(1), p.012021. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/936/1/012021>
- CNN Indonesia, 2023. Gelombang laut tinggi menyebabkan 15 rumah di pesisir Susoh, Aceh Barat Daya, rusak. [online] CNN Indonesia, 7 Oktober. Available at: <https://www.cnnindonesia.com/nasional/20231007160657-20-1008353/15-rumah-di-pesisir-aceh-rusak-diterjang-gelombang-tinggi>
- Deltares, 2014. *Delft3D-FLOW User Manual: Simulation of Multi-dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments*. Version 3.15. Delft: Deltares.
- Fadli, R. and Hamzah, N.A., 2022. Analisis laju abrasi pesisir menggunakan data penginderaan jauh di Kabupaten Aceh Barat Daya. *Jurnal Lingkungan dan Sumber Daya Alam*, 9(3), pp.101–109.
- Fahmi, M. and Hafli, T.M., 2019. Simulasi numerik perubahan morfologi pantai akibat konstruksi jetty pada Muara Lambada Lhok Aceh Besar menggunakan software Delft3D. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 8(2), pp.50–59.
- Hafli, T.M., Fauzan, M., Bustami, B., Malasyi, S., Sarana, D. and Cahya, F., 2024. The effect of climate change on coastal morphology changes in Lhokseumawe City area. *Journal of Physics: Conference Series*, 2916(1), p.012005. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2916/1/012005>
- Hafli, T.M., Fasdarsyah, F., Nidya, N., Sarana, D. and Syibral, S., 2022. Analysis the impact of the coastal protection construction development plan on shoreline and estuary changes. In: *Proceedings of Malikussaleh International Conference on Multidisciplinary Studies (MICoMS)*. Vol. 3, pp.00009–00009.
- Huff, T.P., Feagin, R.A. and Figlus, J., 2022. Delft3D as a tool for living shoreline design selection by coastal managers. *Frontiers in Built Environment*, 8, 926662.
- Ibrahim and Irwansyah, A., 2014. Pengaruh pembangunan jetty Muara Kr. Meuredu terhadap perubahan garis pantai di sekitarnya. *Jurnal Portal*, 6(1), pp.1–11.
- Ilyas, I., Marfai, M.A. and Fatchurohman, H., 2023. Modelling tidal flooding in coastal areas using Delft3D: a case study of Mataram coastal waters. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(2), pp.95–106.

- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kasury, A.R., 2016. Simulasi perubahan garis pantai terhadap rencana jetty Muara Labuhan Haji. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 5(3), pp.231–240.
- Mahendra, B., 2023. Pemetaan risiko banjir rob di kawasan pesisir Provinsi Aceh. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Tropis*, 15(2), pp.87–96.
- Mardika, M.G.I., Mashuri and Safaraz, M.D., 2024. Study of modelling and mapping of tsunami inundation using Delft3D. *Jurnal Infrastruktur*, 10(1), pp.45–56.
- Najah, S., Mirza, D. and Ahmad, N.G., 2022. Analisis perubahan garis pantai Ujung Blang Kecamatan Banda Sakti Kota Lhokseumawe pada tahun 2016–2020. *Jurnal Samudra Geografi*, 5(2), pp.167–173.
- Nidyah, N.N., 2022. Pengaruh rencana jetty terhadap perubahan morfologi pantai dengan menggunakan pemodelan numerik [Skripsi]. Universitas Malikussaleh.
- Nienhuis, J.H., Ashton, A.D. and Giosan, L., 2020. Predicting coastal shoreline change using morphodynamic numerical modelling. *Coastal Engineering*, 159, 103698.
- Nur, M.R. and Jannah, S., 2023. Evaluasi efektivitas struktur pelindung pantai terhadap erosi di wilayah barat Aceh. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 10(2), pp.55–64.
- Pratama, M., Chosyi, M., Jamila, F. and Liana, R., 2025. Initial assessment of tidal current energy resources using Delft3D numerical modelling in Aceh waters. *Jurnal Teknik Sipil*, 32(1), pp.15–27.
- Putra, R.F.P., Nasution, T.I., Humaidi, S. and Darmawan, Y., 2023. Analysis of interaction between atmosphere and sea using Delft3D hydrodynamics model for mapping coastal flood zone. *Prisma Sains*, 11(2), pp.248–258.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., McCall, R. and Lescinski, J., 2020. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands with Delft3D. *Coastal Engineering*, 156, 103669.
- Triatmodjo, B., 1999. *Teknik pantai. Edisi pertama*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Triatmodjo, B., 2009. *Perencanaan pelabuhan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Wang, J., Chu, A., Dai, Z. and Nienhuis, J., 2024. Delft3D model-based estuarine suspended sediment budget with morphodynamic changes of the channel-shoal complex. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 18(1), pp.1–16.
- Yulianto, A., Putri, T.W. and Abdullah, Z.Z., 2022. Pengaruh perubahan iklim terhadap dinamika garis pantai di wilayah barat Sumatera. *Jurnal Geomatika Indonesia*, 8(1), pp.25–34..
- Zhang, Y., Liu, J., Wang, X. and Li, M., 2021. Morphodynamic modelling of shoreline evolution using Delft3D under combined wave and current forcing. *Ocean & Coastal Management*, 210, 105689.