



Pemodelan Perubahan Garis Pantai Akibat Kenaikan Muka Air Laut Dan Intensitas Gelombang Menggunakan Pemodelan Perubahan Numerik

Fellicty R. Rengkuan^{#a}, Muhammad I. Jasin^{#b}, Jeffry D. Mamoto^{#c}
Arthur H. Thambas^{#d}, Ariestides K. T. Dundu^{#e}, Cindy J. Supit^{#f}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^afellictyrengkuan021@student.unsrat.ac.id, ^bsanyjasin02@yahoo.com, ^cjeffrymamoto@student.unsrat.ac.id

^darthur.thambas@unsrat.ac.id, ^etorry@unsrat.ac.id, ^fcindyjeanesupit@unsrat.ac.id

Abstrak

Garis pantai merupakan batas dinamis pertemuan daratan dan air laut yang rentan mengalami perubahan spasial akibat kenaikan muka air laut global dan fluktuasi intensitas gelombang musiman. Pantai Malalayang Kota Manado merupakan wilayah pesisir strategis yang memiliki kerentanan geomorfologis terhadap ancaman abrasi. Keterbatasan data prediktif mengenai arah dan laju abrasi menghambat efektivitas mitigasi bencana di kawasan pesisir ini. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola hidrodinamika, mengkaji pengaruh interaksi kenaikan muka air laut dan gelombang, serta memprediksi visualisasi spasial perubahan garis pantai Malalayang untuk jangka waktu 6 tahun ke depan. Pendekatan kuantitatif diterapkan melalui pemodelan numerik dua dimensi berbasis piranti lunak MIKE 21. Simulasi diintegrasikan menggunakan kopel tiga modul utama: *Hydrodynamic Module* (HD), *Spectral Wave Module* (SW), dan *Sand Transport Module* (ST) yang dijalankan pada skenario tiga musim (Musim Barat, Musim Timur, dan Musim Peralihan). Hasil pemodelan menunjukkan bahwa intensitas gelombang signifikan (\$H_s\$) dan kecepatan arus puncak terjadi pada Musim Barat yang memicu laju abrasi paling agresif di area pantai terbuka. Berdasarkan estimasi laju perubahan tahunan hasil ekstrapolasi model, diprediksi dalam jangka 6 tahun ke depan garis pantai Malalayang berpotensi mengalami kemunduran (*abrasi*) maksimum hingga mencapai 4,1 m pada wilayah kritis pesisir terbuka. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi landasan data teknis ilmiah bagi pemerintah daerah dalam merancang infrastruktur bangunan penganaman pantai (*coastal defense structures*) secara efektif.

Kata kunci: perubahan garis pantai, kenaikan muka air laut, intensitas gelombang, MIKE 21, Pantai Malalayang

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Perubahan garis pantai dipengaruhi berbagai macam faktor baik faktor dari alam maupun manusia. Faktor dari alam antara lain sedimentasi pantai, erosi pantai, gelombang pantai sedangkan faktor dari manusia penggalan, aktifitas manusia yang menyebabkan sedimentasi pantai dan laut, reklamasi (pengurungan pantai), perlindungan pantai (*shore protection*), penggundulan dan penanaman hutan pantai, pengaturan pola aliran Sungai. Kenaikan muka air laut yang dipercepat oleh perubahan iklim global menjadi salah satu ancaman serius bagi kestabilan pantai, terutama di daerah pesisir rendah. Peningkatan muka air laut menyebabkan intrusi air laut ke daratan, memperlemah struktur pantai, dan mempercepat proses abrasi yang berdampak pada berkurangnya lahan pesisir. Intensitas gelombang yang tinggi juga meningkatkan pengikisan pantai, sehingga perpaduan kedua faktor ini menyebabkan perubahan garis pantai yang cukup signifikan, termasuk di kawasan Malalayang yang merupakan bagian dari Kota Manado.

Pantai Malalayang merupakan salah satu wilayah pesisir yang memiliki kondisi geomorfologi yang rentan terhadap perubahan garis pantai akibat faktor alam tersebut. Wilayah ini tidak hanya menjadi habitat penting bagi ekosistem laut tetapi juga berperan sebagai area pemukiman dan aktivitas ekonomi masyarakat sekitar. Oleh karena itu, perubahan garis pantai di Malalayang perlu diamati dan dianalisis secara komprehensif untuk mengantisipasi dampak negatif yang mungkin timbul.

Pemodelan numerik menggunakan aplikasi MIKE 21 menjadi alat yang sangat strategis dalam memahami dinamika perubahan garis pantai. MIKE 21 adalah software simulasi berbasis komputasi yang mampu memodelkan gelombang, arus, dan interaksi keduanya dengan garis pantai secara dua dimensi. Dengan menggunakan data kondisi muka air laut dan karakteristik gelombang, aplikasi ini dapat memprediksi bagaimana garis pantai akan berubah dalam periode waktu tertentu. Hal ini penting untuk pengambilan keputusan dalam pengelolaan wilayah pesisir.

Melalui studi pemodelan ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih jelas tentang mekanisme perubahan garis pantai Malalayang akibat kenaikan muka air laut dan peningkatan intensitas gelombang. Informasi yang dihasilkan akan sangat membantu pemerintah dan pemangku kepentingan dalam merancang strategi mitigasi seperti pembangunan infrastruktur pengaman pantai (*coastal defense*), konservasi ekosistem pesisir, dan perencanaan ruang wilayah yang adaptif terhadap perubahan lingkungan pesisir.

Penelitian ini secara khusus memfokuskan pada pengaruh gabungan kenaikan muka air laut dan intensitas gelombang dalam perubahan garis pantai Malalayang. Studi komprehensif menggunakan pemodelan numerik MIKE 21 ini masih jarang dilakukan di kawasan ini. Pendekatan ini memberikan pemahaman baru yang lebih akurat tentang dinamika pesisir, sekaligus menjadi dasar strategis bagi pengelolaan adaptif dan mitigasi perubahan lingkungan pesisir yang berkelanjutan.

Urgensi penelitian ini semakin tinggi mengingat wilayah Pantai Malalayang termasuk dalam kawasan pesisir yang rentan terhadap abrasi berdasarkan kajian lingkungan di Teluk Manado, serta adanya indikasi di lapangan bahwa gelombang laut dengan intensitas tinggi berpotensi mencapai area permukiman dan mengancam infrastruktur di sekitarnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa kawasan tersebut sedang mengalami tekanan dinamika pesisir yang signifikan (Analisis Dampak Reklamasi Teluk Manado, 2020; Seputar Sulut, 2023).

Namun demikian, keterbatasan informasi prediktif mengenai arah dan laju perubahan garis pantai di wilayah ini menyebabkan upaya pengelolaan dan mitigasi berpotensi tidak tepat sasaran. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi penting untuk menyediakan dasar ilmiah yang lebih akurat dalam mendukung perencanaan pengelolaan wilayah pesisir yang adaptif, efektif, dan berkelanjutan.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pola perubahan garis pantai akibat kenaikan muka air laut dan intensitas gelombang dalam periode tertentu di pantai Malalayang ?
2. Sejauh mana pengaruh kenaikan muka air laut dan intensitas gelombang terhadap perubahan garis pantai Malalayang dalam periode tertentu?
3. Bagaimana prediksi perubahan garis pantai Malalayang dalam jangka waktu tertentu berdasarkan hasil pemodelan?

1.3. Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya memfokuskan pada perubahan garis pantai di wilayah pesisir Malalayang, Kota Manado.
2. Faktor-faktor yang dianalisis dalam perubahan garis pantai dibatasi hanya pada kenaikan muka air laut dan intensitas gelombang sebagai penyebab utama. Faktor lain seperti aktivitas

manusia tidak dimasukkan untuk menjaga fokus dan keterbatasan data.

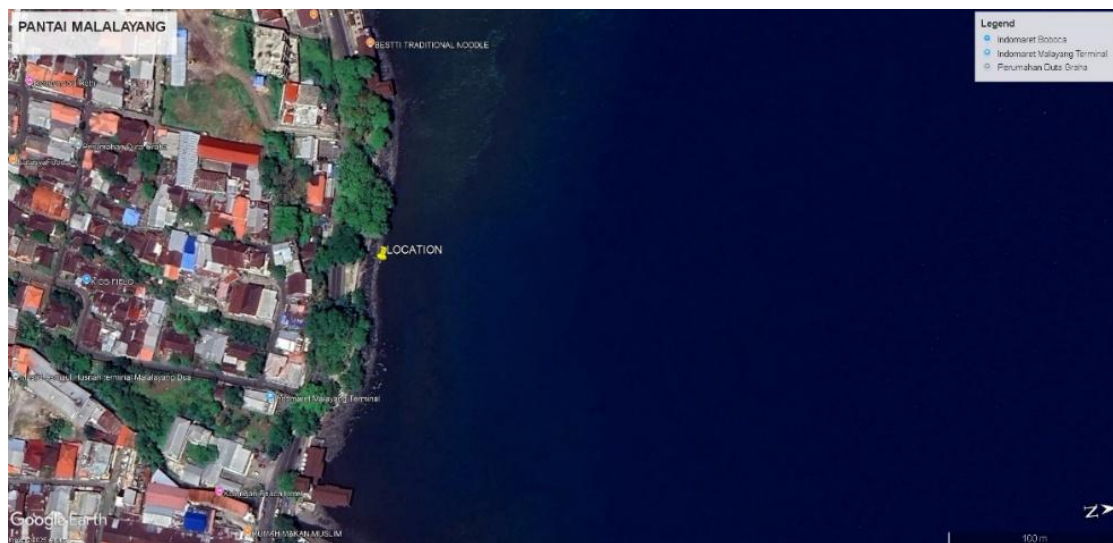
3. Data yang digunakan dalam pemodelan diperoleh dari kondisi muka air laut dan gelombang selama periode tertentu yang tersedia dan relevan dengan lokasi penelitian.
4. Aplikasi pemodelan yang digunakan adalah MIKE 21, dan hasil pemodelan ini digunakan untuk melakukan prediksi perubahan garis pantai dalam skala regional Malalayang dan periode simulasi terbatas sesuai ketersediaan data.
5. Prediksi perubahan garis pantai hanya berdasarkan hasil simulasi.

1.4. Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui bagaimana pola perubahan garis pantai di pantai Malalayang dalam periode tertentu akibat kenaikan muka air laut dan perubahan intensitas gelombang.
2. Untuk mengetahui sejauh mana pengaruh kenaikan muka air laut dan intensitas gelombang terhadap perubahan garis pantai dalam periode tertentu pada pantai Malalayang.
3. Untuk mengetahui prediksi perubahan garis pantai Malalayang dalam jangka waktu tertentu berdasarkan hasil pemodelan.

1.5. Manfaat Penelitian

Untuk mengetahui perubahan garis pantai Malalayang akibat kenaikan muka air laut dan peningkatan intensitas gelombang yang bisa membantu pemerintah dalam merancang strategi mitigasi seperti pembangunan infrastruktur pengaman pantai (*coastal defense*), konservasi ekosistem pesisir, dan perencanaan ruang wilayah yang adaptif terhadap perubahan lingkungan pesisir.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Sumber: Google Earth)

2. Metodologi Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak di Pantai Malalayang, Kecamatan Malalayang yang secara geografis berada $1^{\circ}27'37.67''N$, $124^{\circ}47'32.27''E$.

2.2. Pengumpulan Data

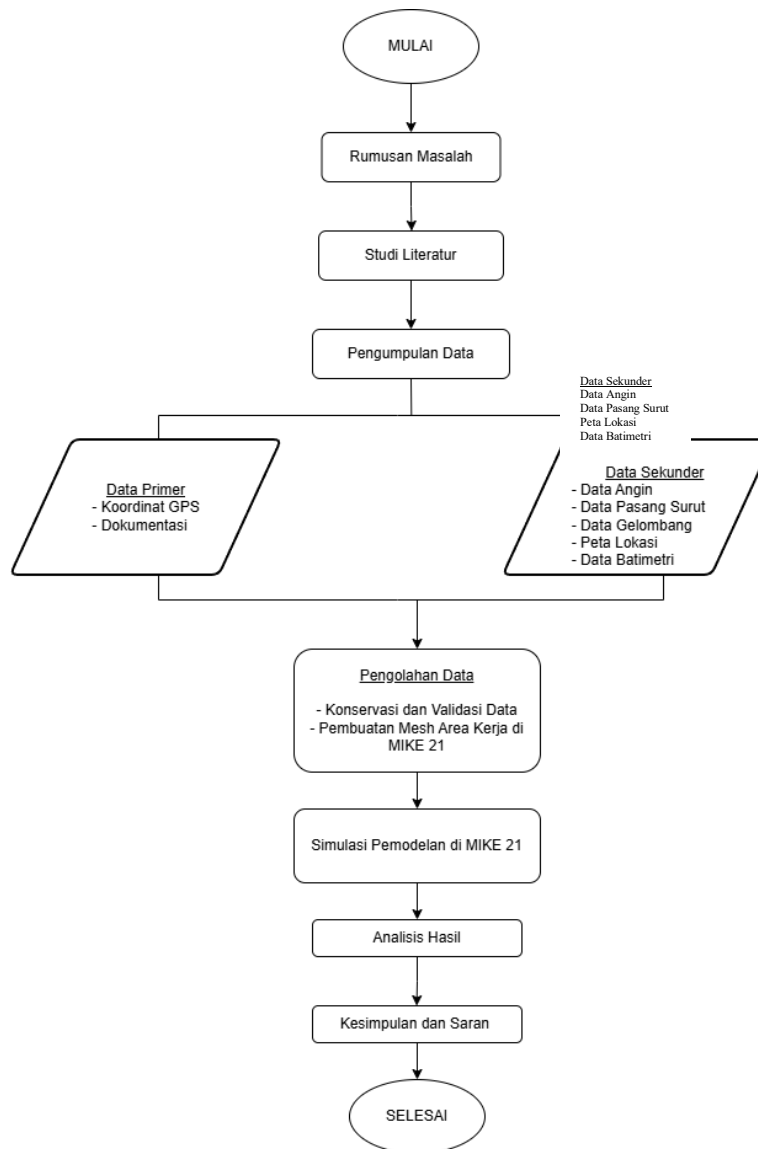
Pengumpulan data diambil dari beberapa *website*, ataupun dengan menggunakan *software*. Data-data yang dimaksud meliputi :

- Data kecepatan angin, dari *website* NASA POWER.

- Data pasang surut, dari *website* SRGI (Sistem Referensi Geospasial Indonesia) atau BROL (Balai Riset dan Observasi Laut).
- Peta Lokasi, dari aplikasi *Google Earth*
- Data batimetri dari GEBCO atau BATNAS menggunakan aplikasi bisa Global Mapper atau QGIS.

2.3. Bagan Alir Penelitian

Kegiatan penelitian dikerjakan menurut alur pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

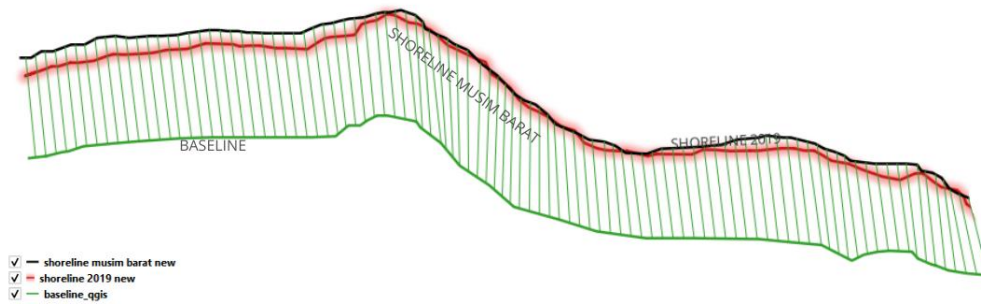
3.1 Kondisi Hidrodinamika dan Gelombang

Kondisi hidrodinamika dan gelombang merupakan faktor utama yang mempengaruhi dinamika perubahan garis pantai. Dalam penelitian ini, kondisi tersebut dianalisis berdasarkan hasil pemodelan yang meliputi parameter muka air laut (*water level*), arus (*current*), serta karakteristik gelombang seperti tinggi gelombang signifikan (*significant wave height*), arah, dan periode gelombang. Analisis dilakukan untuk tiga kondisi musim, yaitu musim barat, musim timur, dan musim peralihan, guna memahami variasi pengaruh terhadap perubahan morfologi pantai.

3.2 Perubahan Garis Pantai Antar Musim

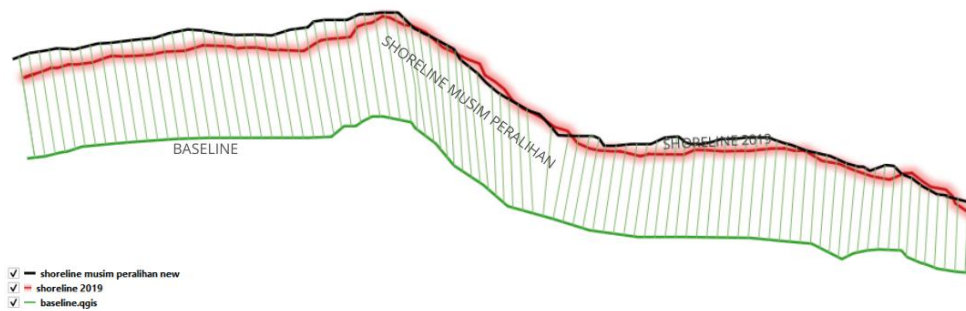
Perubahan garis pantai di setiap hasil pemodelan di ambil dari peta *bed level* lalu di analisis menggunakan QGIS, dilakukan terhadap tiga kondisi musim, yaitu musim barat, musim peralihan, dan musim timur, untuk mengetahui perbedaan pola perubahan garis pantai pada masing-masing musim.

- Musim Barat



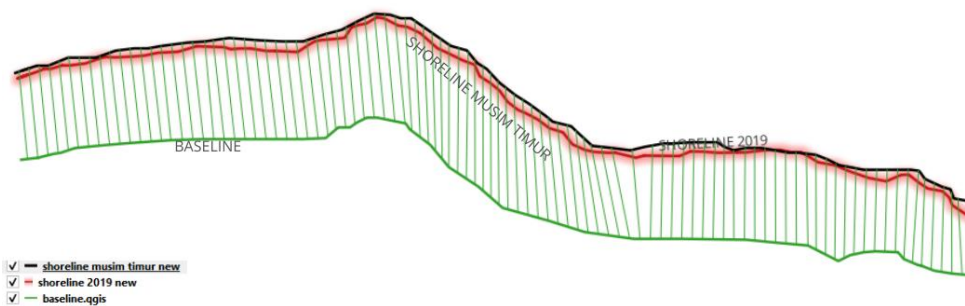
Gambar 3. Perubahan Garis Pantai Musim Barat (Sumber: Qgis)

- Musim Peralihan



Gambar 4. Perubahan Garis Pantai Musim Peralihan (Sumber: Qgis)

- Musim Timur



Gambar 5. Perubahan Garis Pantai Musim Timur (Sumber: Qgis)

Berdasarkan analisis dinamika pantai, ketiga musim sama-sama menunjukkan kecenderungan utama berupa sedimentasi, namun dengan karakteristik dampak yang berbeda secara signifikan. Musim Barat mencatatkan tingkat kemajuan paling rendah dengan penambahan luasan daratan (*land*) paling minimum akibat karakteristik spasialnya yang dinamis dan berfluktuasi di area kelokan. Sebaliknya, Musim Peralihan menjadi periode paling masif dengan kemajuan paling signifikan menonjol ke arah laut, menghasilkan penambahan luasan daratan

maksimum yang sangat konsisten di hampir seluruh transek, terutama pada segmen kiri dan tengah. Sementara itu, Musim Timur berada di fase moderat hingga tinggi yang menghasilkan penambahan daratan relatif stabil dan merata, meskipun masih terdapat fluktuasi minor di beberapa titik pada sisi kanan pantai.

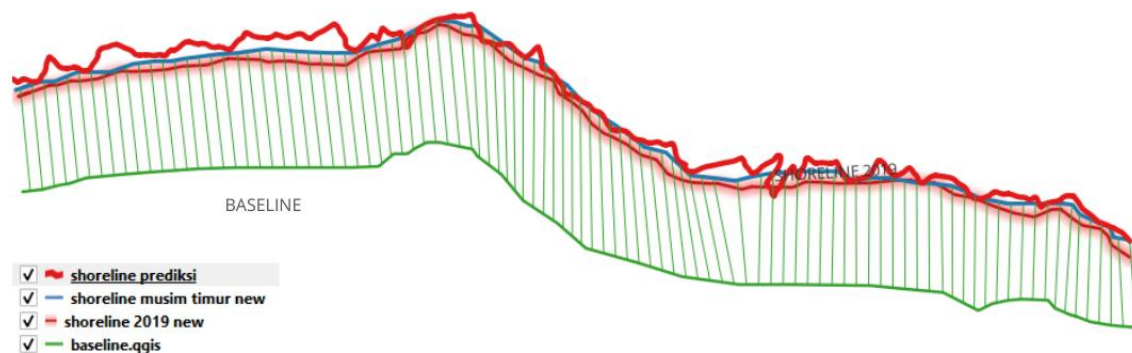
3.3 Pengaruh Gelombang, Arus, dan Kenaikan Muka Air Laut

Dinamika perubahan garis pantai di Pantai Malalayang secara signifikan dikontrol oleh parameter hidro-oseanografi hasil pemodelan MIKE 21, di mana fenomena sedimentasi lokal terbukti mampu mengompensasi (*counterbalance*) dampak penggenangan dari kenaikan muka air laut (*Sea Level Rise*). Pada Musim Barat, kombinasi tinggi gelombang signifikan ($H_s = 0,28$ m) dan kecepatan arus ($0,024$ m) yang rendah membatasi transpor sedimen sehingga menghasilkan pengendapan paling minimum dan posisi garis pantai paling dekat dengan kondisi eksisting 2019. Sebaliknya, Musim Peralihan ($H_s = 0,56$ m) memicu kemajuan garis pantai paling maksimum ke arah laut karena dominasi komponen arus vertikal V ($0,045$ m) efektif mengaduk dan mengendapkan sedimen secara masif di area pesisir. Sementara pada Musim Timur, meskipun memiliki energi gelombang tertinggi ($H_s = 0,68$ m), lonjakan kuat pada arus sejajar pantai (komponen U dan V) membawa suplai material dalam volume besar yang mengompensasi energi gerusan gelombang, sehingga membentuk pola sedimentasi yang konsisten dan merata di sebagian besar transek.

3.4 Prediksi Perubahan Garis Pantai 6 Tahun Ke Depan

Proyeksi perubahan garis pantai untuk jangka waktu 6 tahun ke depan dilakukan menggunakan metode ekstrapolasi linier berbasis pendekatan statistik *End Point Rate* (EPR), yang mengasumsikan bahwa laju perubahan tahunan bersifat konstan dan interaksi parameter hidro-oseanografi di masa depan serupa dengan kondisi saat ini. Nilai laju tahunan ini dihitung dengan membagi jarak perubahan bersih atau *Net Shoreline Movement* (NSM)—yaitu selisih horizontal antara garis pantai simulasi terakhir dengan garis pantai eksisting tahun 2019—terhadap rentang waktu simulasi. Untuk memprediksi total jarak perubahan garis pantai secara spesifik pada karakteristik Musim Timur, perhitungan dilakukan dengan mengalikan nilai laju EPR khusus Musim Timur tersebut dengan durasi proyeksi selama 6 tahun, sehingga menghasilkan proyeksi akumulasi jarak penambahan daratan yang relatif stabil dan merata di masa depan.

Berdasarkan hasil pengolahan spasial menggunakan metode *End Point Rate* (EPR) yang diintegrasikan dengan pemodelan hidrodinamika dan transpor sedimen kondisi akhir pada Musim Timur, diperoleh estimasi geometris garis pantai Pantai Malalayang untuk jangka waktu 6 tahun ke depan.



Gambar 6. Lokasi Penelitian (Sumber: Google Earth)

Secara umum, hasil proyeksi menunjukkan tren perubahan garis pantai yang didominasi oleh fenomena sedimentasi (kemajuan garis pantai menuju arah laut/*shoreline advance*) di hampir seluruh transek pengamatan. Hal ini sejalan dengan nilai rata-rata laju perubahan tahunan kawasan yang berada pada angka positif sebesar 1,025 meter/tahun.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

1. Pola Perubahan Garis Pantai Antar Musim

Secara umum, pola perubahan garis pantai di sepanjang Pantai Malalayang pada ketiga musim pengamatan didominasi oleh fenomena sedimentasi. Namun, magnitudo dan karakteristik pola spasialnya bervariasi pada setiap musim:

- **Musim Barat:** Pola akresi bersifat dinamis dengan fluktuasi minor, memiliki nilai kemajuan garis pantai paling rendah (paling dekat dengan garis pantai eksisting 2019) karena sedimentasi berlangsung minimum.
- **Musim Peralihan:** Menunjukkan pola penambahan luasan daratan (*shoreline advance*) yang paling maksimum dan ekstrem ke arah laut.
- **Musim Timur:** Pola kemajuan garis pantai bersifat moderat hingga tinggi, di mana sedimentasi terjadi secara konsisten, dominan, dan merata di sebagian besar transek pantai.

2. Pengaruh Kenaikan Muka Air Laut dan Intensitas Gelombang terhadap Perubahan Garis Pantai

Dinamika perubahan garis pantai di Pantai Malalayang sangat dipengaruhi oleh interaksi hidrodinamika gelombang, arus, dan pasang surut. Kenaikan muka air laut secara teoritis memicu kemunduran garis pantai akibat penggenangan. Namun, hasil pemodelan menunjukkan terjadinya kondisi superposisi, di mana laju sedimentasi lokal jauh lebih dominan daripada laju abrasi. Energi gelombang dan arus pada ketiga musim berhasil mengangkut dan mengendapkan material sedimen di area pesisir, sehingga mampu mengompensasi (*counterbalance*) dampak negatif kenaikan muka air laut dan menyebabkan garis pantai justru mengalami perluasan daratan (akresi).

3. Prediksi Perubahan Garis Pantai dalam Jangka Waktu Tertentu

Berdasarkan pendekatan estimasi laju perubahan tahunan hasil pemodelan, prediksi perubahan garis pantai untuk periode 6 tahun ke depan menunjukkan kecenderungan perluasan area daratan (*land*) yang berlanjut secara akumulatif. Melalui perbandingan kondisi eksisting dengan hasil prediksi simulasi jangka panjang, pola penambahan daratan akibat dominasi sedimentasi lokal tetap konsisten mengatasi dampak penggenangan muka air laut regional pada skala simulasi terbatas ini

4.2 Saran

1. Pengembangan Variabel Pemodelan

Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memasukkan faktor-faktor eksternal lain seperti aktivitas manusia (misalnya dampak reklamasi, pembangunan pelindung pantai buatan, atau penggalian) serta pola aliran sedimen dari muara sungai terdekat, mengingat batasan penelitian ini baru memfokuskan pada faktor alam murni (gelombang dan *sea level rise*).

2. Peningkatan Durasi dan Resolusi Data Prediksi

Untuk mengatasi keterbatasan prediksi, disarankan agar penelitian berikutnya menggunakan rentang data historis kondisi hidro-oseanografi (pasang surut, angin, dan gelombang) yang lebih panjang serta memperluas durasi proyeksi simulasi jangka panjang demi mendapatkan hasil akurasi prediksi spasial yang lebih detail dan reliabel.

3. Pemanfaatan Hasil untuk Mitigasi Lapangan

Meskipun model saat ini menunjukkan dominasi sedimentasi (akresi), fluktuasi garis pantai yang dinamis pada Musim Barat dan ancaman limpasan gelombang tinggi di musim puncak tetap memerlukan perhatian. Oleh karena itu, hasil peta perubahan dasar laut (*bed level change*) dan pergeseran garis pantai ini disarankan dapat digunakan oleh Pemkot Manado sebagai dasar ilmiah dalam merancang tata ruang pesisir yang adaptif serta penempatan struktur pengaman pantai (*coastal defense*) yang tepat sasaran di Pantai Malalayang

Referensi

- Amabel Zalfa Rienetza , Nadia Zahrina W, Billy Yanfeto, Rifqi Noval Agassi. (2023). Pemodelan Arus Pasang Surut dan Gelombang 2D Menggunakan Metode Numerik Dengan Flow Model dan Spectral Wave Software MIKE 21 di Perairan Tanjung Mulang Hingga teluk Meru Pada Bulan Januari 2022.
- Jonathan A. Christian, M. Ihsan Jasin, Arthur H. Thambas. (2024). Analisis Perbandingan Pengaruh Kedalaman Terhadap Transformasi Gelombang Di Pantai Parentek Dan Pantai Malalayang. TEKNO, Vol. 22, No 98, p-ISSN: 0215-9617.
- Bandi Sasmito. (2020). Analisis Perubahan Garis Pantai Akibat Kenaikan Muka Air Laut Pantai Kabupaten Demak. ELIPSOIDA, Vol 3, No 2, ISSN 2621-9883.
- Iulia Alina Anton, Liliana Rusu, Catalin Anton. (2019). Nearshore Wave Dynamics at Mangalia Beach Simulated by Spectral Models. *International Journal Of Marine Science and Engineering*.
- Kalay, D. E., Lopulissa, V. F., & Noya, Y. A. (2014). Kemiringan pantai dan distribusi sedimen pantai di pesisir utara Pulau Ambon. *Jurnal Triton*, 10(2), 91-103.
- Lukas Gerrits.,Arthur H. Thambas., M. Ihsan Jasin. (2020). Analisis Kinerja Gelombang di Pantai Malalayang II. *Jurnal Sipil Statik*, Vol.8 No.1, ISSN 2337-6732.
- Eunike H. Manalip.,Muhammad I. Jasin., Ariestides K. T. Dundu. (2024). Analisis Sedimentasi Di Muara Sungai Malalayang Kota Manado. TEKNO, Volume 22, No. 90, p-ISSN: 0215-9617.
- Elfrida Noor Fitri, Rudi Siap Bintoro.(2020). Pengaruh Gelombang Terhadap Perubahan Garis Pantai di Groin Pesisir Wedung Kecamatan Brondong Kabupaten Lamongan. *J-Tropimar*, Vol. 2, No. 1, Hal: 26-36, E-ISSN: 2656-7091.
- Triatmodjo, B. 1999. Teknik Pantai. Beta Offset. Yogyakarta.
- Triatmodjo, B. 2012. Perencanaan Bangunan Pantai. Beta Offset. Yogyakarta.
- NASA Climate.2025. Climate Change: Global Sea Level