

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ekosistem Pesisir

Ekosistem pesisir dapat dikarakterisasi dan diklasifikasikan dalam beberapa cara, tetapi beberapa yang paling penting meliputi: hutan bakau; *mudflats*; padang lamun; hutan ganggang; *shellfish beds*; pantai berbatu dan berbatu kerikil; dan pantai berpasir. Garis pantai mencakup komponen pasang-surut/intertidal (antara batas pasang dan surut) dan subtidal (di bawah batas surut rendah) hingga kedalaman sekitar 100 m. Ekosistem yang terbentuk dari habitat-habitat ini mendukung spesies yang memiliki kepentingan ekologi dan sosio-ekonomi. Struktur dan fungsi ekosistem pesisir saat ini terancam oleh beberapa tekanan yang dapat memiliki dampak penting (Gustavon, 2010).

Vegetasi mangrove merupakan bagian dari ekosistem pesisir yang secara ideal terletak pada kondisi pantai dengan elevasi yang rendah dan gelombang air lautnya cenderung tenang dan terdapat pengaruh pasang surut air laut (zona Intertidal) dengan substrat tanah yang berlumpur dan sedikit berpasir pada wilayah pesisir tersebut (Charrua et al., 2020). Ekosistem mangrove di wilayah pesisir mampu berperan sekali pada keseimbangan siklus biologi di perairan tersebut (Numbere & Camilo, 2018).

Kondisi wilayah pesisir sekarang ini rawan mengalami terjadinya abrasi, banjir pasang, banjir dari sungai yang meluap dan angin yang berkecepatan kencang, namun gejala alam tersebut dapat teratasi oleh adanya peran dan manfaat ekosistem mangrove pada wilayah pesisir (Cinco-Castro & Herrera-Silveira, 2020). Lingkungan pesisir, sebagai antarmuka daratan dan laut yang dinamis, mendukung beragam habitat dan sektor ekonomi. Keberadaan ekosistem pesisir tergantung pada koneksi daratan-laut, seperti delta dan estuari. Kondisi lingkungan pesisir bervariasi dalam jarak pendek, termasuk salinitas dan energi yang berbeda. Lingkungan pesisir, pemukiman, dan infrastruktur rentan terhadap bahaya daratan dan laut, seperti badai, gelombang, tsunami, banjir, erosi pantai, dan masuknya biohazard. Semua faktor ini penting dalam mengevaluasi dampak perubahan iklim di zona pesisir (IPCC, 2003).

2.2. Kerentanan Wilayah Pesisir

Kerentanan didefinisikan sebagai sejauh mana ekosistem alam atau sosial dapat terpengaruh oleh, atau tidak mampu mengatasi, dampak negatif perubahan iklim, termasuk variabilitas iklim alami dan peristiwa ekstrem (Contestabile & Vicinanza, 2020). Kerentanan ini terkait dengan sensitivitas sistem dan eksposurnya terhadap gangguan, serta

kemampuannya untuk beradaptasi dengan gangguan tersebut. Mengingat pentingnya ekosistem pesisir, ada kebutuhan khusus untuk mengevaluasi kerentanan ekosistem ini terhadap dampak perubahan iklim, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat mengurangi atau meningkatkan tingkat kerentanan (Insusanty et al., 2020). Informasi ini akan bermanfaat bagi manajemen ekosistem dalam upaya memitigasi dampak perubahan iklim dalam jangka pendek.

Kerentanan pesisir secara umum dipicu oleh karakteristik fisik, ekologi dan kegiatan manusia sehingga mendorong upaya untuk mengklasifikasikan pantai menggunakan informasi multidisiplin. Kerentanan pesisir mengacu pada kerentanan yang mempertimbangkan tanggapan negatif dan positif terhadap kondisi yang disebabkan oleh perubahan iklim (yaitu, ketahanan dan kerentanan) (Tragaki et al., 2018). Studi penilaian kerentanan wilayah pesisir mengklasifikasikan garis pantai dengan metode yang berbeda dari kuantitatif hingga semi-kuantitatif, non-adaptif hingga adaptif sempurna, dan didorong oleh sains hingga terbentuk kebijakan berdasarkan hasil pengukuran atau penilaian tersebut (Kulp & Strauss, 2019). Data yang digunakan dalam penilaian untuk menilai kerentanan pesisir termasuk dalam indikator yang sesuai seperti geomorfologi dan geologi, kemiringan wilayah pesisir, perubahan muka air laut, perubahan garis pantai, tinggi gelombang signifikan, dan kisaran pasang surut (De Serio et al., 2018). Kerentanan juga dapat dinilai dari aspek sosial-ekonomi masyarakat, dimana dapat dilakukan dengan meninjau dari indikator-indikator sosial-ekonomi seperti keterpaparan, sensitivitas dan kapasitas adaptasi. Beberapa penelitian dengan bahasan sosial-ekonomi sudah dilakukan di sejumlah wilayah Indonesia, salah satunya di wilayah Kabupaten Grobogan dimana objeknya dilakukan dalam beberapa wilayah Dusun. Hasil menunjukkan Kerentanan sosial ekonomi masyarakat Dusun Pamor terhadap kekeringan dianggap tinggi karena penilaian terhadap indikator tingkat terpapar, sensitivitas, dan kapasitas adaptasi menunjukkan angka yang mendukung hal ini. Tingkat terpapar memiliki nilai 2,49 (tinggi), sensitivitas memiliki nilai 2,76 (tinggi), dan kapasitas adaptasi memiliki nilai 1,21 (rendah) (Wilhan Hastanti & Purwanto, 2020).

Kerentanan masyarakat mencerminkan situasi di mana komunitas tidak mampu menyesuaikan diri dengan perubahan ekosistem yang disebabkan oleh ancaman tertentu (Insusanty et al., 2020). Sebaliknya, keterpaparan merujuk pada kondisi di mana masyarakat, ekosistem, dan fungsi lingkungan terpapar secara negatif oleh bencana atau kerusakan dalam suatu wilayah tertentu. Sensitivitas menggambarkan sejauh mana suatu sistem rentan terhadap tekanan atau gangguan, baik yang berdampak positif maupun negatif, yang dipengaruhi oleh

kondisi lingkungan dan sosial-ekonomi sebelum gangguan tersebut terjadi. Kemampuan adaptasi, pada umumnya, mencakup kemampuan untuk menghadapi keterpaparan dan menyesuaikan diri dengan perubahan iklim dengan mengurangi potensi kerusakan, dengan memanfaatkan sumber daya sosial dan ekonomi, teknologi, akses informasi terkait perubahan iklim, serta kemampuan institusi dalam beradaptasi. Semua elemen ini berperan dalam pemahaman kompleksitas respons masyarakat terhadap perubahan lingkungan dan bencana yang mungkin terjadi (Wilhan Hastanti & Purwanto, 2020). Konsep kerentanan pesisir adalah suatu ide yang digunakan untuk mengenali individu dan lokasi yang mudah terpengaruh oleh ancaman yang berasal dari pesisir, seperti erosi, badai, dan banjir pasang (Handiani & Heriati, 2022).

2.3.Sistem Informasi Geografis dalam Kerentanan Wilayah Pesisir

Sistem Informasi Georafis atau *Georaphic Information Sistem* (GIS) merupakan suatu sistem informasi yang berbasis komputer, dirancang untuk bekerja dengan menggunakan data yang memiliki informasi spasial (bereferensi keruangan). Sistem ini meng*capture*, mengecek, mengintegrasikan, memanipulasi, menganalisa dan menampilkan data yang secara spasial mereferensikan kepada kondisi bumi. Teknologi SIG mengintegrasikan operasi-operasi umum *database*, seperti *query* dan analisa statistik, dengan kemampuan visualisasi dan analisa yang unik yang dimiliki oleh pemetaan. Kemampuan inilah yang membedakan SIG dengan Sistem Informasi lainnya yang membuatnya menjadi berguna berbagai kalangan untuk menjelaskan kejadian, merencanakan strategi, dan memprediksi apa yang terjadi (Wibowo *et al.*, 2015).

Secara harafiah, SIG dapat diartikan sebagai suatu komponen yang terdiri dari perangkat keras, perangkat lunak, data geografis dan sumberdaya manusia yang bekerja bersama secara efektif untuk menangkap, menyimpan, memperbaiki, memperbaharui, mengelola, memanipulasi, mengintegrasikan, menganalisa dan menampilkan data dalam suatu informasi berbasis geografis. Informasi spasial memakai lokasi, dalam suatu sistem koordinat tertentu, sebagai dasar referensinya. SIG mempunyai kemampuan untuk menghubungkan berbagai data pada suatu titik tertentu di bumi, menggabungkannya, menganalisa dan akhirnya memetakan hasilnya. Aplikasi SIG menjawab beberapa pertanyaan seperti: lokasi, kondisi, trend, pola, dan pemodelan. Kemampuan inilah yang membedakan SIG dari sistem informasi lainnya (Udin dan Ilyas, 2017).

Metode penilaian kerentanan pesisir terhadap perubahan iklim dapat dikelompokkan menjadi empat pendekatan utama dengan kelebihan dan keterbatasan yang saling melengkapi. Metode berbasis indeks, seperti *Coastal Vulnerability Index* (CVI), menawarkan kemudahan

penerapan dan hasil yang mudah dikomunikasikan, cocok untuk identifikasi awal area rentan secara luas, meski kurang mampu menangkap aspek sosial-ekonomi secara mendalam dan berpotensi bias akibat penggabungan banyak variabel (Noor & Abdul Maulud, 2022). Pendekatan berbasis indikator memberikan analisis lebih komprehensif dengan menguraikan berbagai parameter kerentanan secara terpisah, memungkinkan integrasi data multidisiplin, namun membutuhkan data lengkap dan menghadapi tantangan dalam penyatuan indikator yang kompleks. Sistem pendukung keputusan berbasis GIS unggul dalam mengintegrasikan dan memvisualisasikan data spasial untuk analisis multi-kriteria, tetapi memerlukan keahlian teknis dan investasi sumber daya yang signifikan. Sementara itu, metode berbasis model dinamis komputer mampu menyajikan simulasi kuantitatif yang rinci untuk perencanaan adaptasi jangka panjang, meskipun membutuhkan data input yang sangat detail dan kapasitas komputasi tinggi. Pemilihan metode ideal harus mempertimbangkan tujuan penilaian, cakupan wilayah, ketersediaan data, dan kapasitas teknis, di mana pendekatan sederhana cocok untuk tahap awal sementara metode kompleks lebih tepat untuk analisis mendalam dan perencanaan adaptasi spesifik (Ramieri et al., 2011a).

2.4. Coastal Vulnerability Index

Salah satu metode yang umum digunakan untuk menilai kerentanan garis pantai adalah melalui penggunaan Indeks Kerentanan Pantai (CVI) beserta variasi-variasinya. CVI bisa diartikan sebagai suatu proses atau metodologi yang memungkinkan penggabungan berbagai variabel dari berbagai kategori untuk menciptakan indikator tunggal yang memberikan informasi penting mengenai kerentanan garis pantai. Penggunaan CVI pertama kali diusulkan dan diperkenalkan oleh (Gornitz et al., 1997), dan hal ini erat kaitannya dengan potensi kenaikan permukaan laut, karena CVI merupakan indeks relatif terkait dengan kerentanan pantai. Metode CVI (*Coastal Vulnerable Index*) adalah salah satu metode penilaian kerentanan pesisir yang dikembangkan untuk menilai kerentanan pada suatu wilayah pesisir yang disebabkan oleh perubahan iklim (Noor & Abdul Maulud, 2022). Penilaian CVI ini mengadopsi pendekatan serupa yang digunakan di sepanjang garis pantai laut, di mana diasumsikan bahwa semua parameter pantai memiliki kontribusi yang sama terhadap kerentanan pantai (De Serio et al., 2018).

CVI memberikan dasar numerik yang memudahkan pengurutan bagian-bagian garis pantai berdasarkan potensi perubahan, membantu pengelola dalam mengidentifikasi wilayah dengan risiko relatif tinggi. Hasil dari CVI dapat dipetakan untuk menyoroti daerah di mana faktor-faktor yang berkontribusi terhadap perubahan garis pantai berpotensi menyebabkan penarikan

garis pantai yang signifikan (Pendleton et al., 2004). Langkah pertama dalam metode ini adalah mengidentifikasi variabel kunci yang mewakili proses signifikan yang mempengaruhi kerentanan dan evolusi pesisir secara umum, dengan CVI umumnya melibatkan 6 atau 7 variabel yang dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan spesifik. Langkah kedua adalah kuantifikasi variabel-variabel tersebut, biasanya menggunakan skala semi-kuantitatif 1-5 (Jocson & Magallon, 2018).

McLaughlin dan Cooper (2010) dalam (De Serio et al., 2018), mengembangkan CVI multi-skala yang mengintegrasikan dampak erosi dan dapat diterapkan pada dampak perubahan iklim lainnya. Indeks ini terdiri dari tiga sub-indeks: (i) sub-indeks karakteristik pesisir yang menggambarkan ketahanan dan kerentanan terhadap erosi, (ii) sub-indeks pemicu pesisir yang mencakup variabel pemicu erosi akibat gelombang, dan (iii) sub-indeks sosial-ekonomi yang menggambarkan target yang berpotensi berisiko. Perhitungan setiap sub-indeks disesuaikan dengan skala aplikasi yang dipertimbangkan, memberikan gambaran yang lebih detail tentang kerentanan pesisir terhadap berbagai faktor.

Beberapa penelitian metode CVI ini sudah dilakukan oleh beberapa penelitian dalam wilayah Indonesia guna menilai kerentanan wilayah pesisir, dimana sebagai contoh di wilayah Kendal memiliki Indeks kerentanan pesisir di Kabupaten Kendal menunjukkan bahwa beberapa daerah memiliki tingkat kerentanan yang berbeda. Kecamatan Rowosari dan Kecamatan Patebon memiliki tingkat kerentanan sebesar 18,52, Kecamatan Kendal sebesar 17,93, dan Kecamatan Kaliwungu mencapai 21,38. Semua daerah ini diklasifikasikan sebagai daerah dengan tingkat kerentanan sedang. Hal ini disebabkan oleh karakteristik geografis mereka, seperti pantai yang landai, elevasi rendah, serta penggunaan lahan yang didominasi oleh tambak dan pemukiman. Di sisi lain, Indeks kerentanan pesisir di Kecamatan Kangkung hanya sebesar 7,17, Kecamatan Cepiring sebesar 13,89, dan Kecamatan Brangsong sebesar 8,02. Wilayah-wilayah ini dianggap kurang rentan. Ini mungkin karena karakteristik geografis yang berbeda, seperti kemiringan pantai yang lebih curam atau elevasi yang lebih tinggi (Yuliastini et al., 2020).

Beberapa penelitian lain telah menerapkan metode CVI untuk melakukan penilaian terhadap kerentanan pesisir di Indonesia. Menurut (Yulianto et al., 2023), hasil perhitungan di sepanjang wilayah pesisir utara Pulau Jawa menunjukkan dominasi tingkat kerentanan tinggi sebanyak 39% dan sangat tinggi sebanyak 51%. Daerah pantai tertentu dengan tingkat kerentanan tinggi meliputi Tangerang, Bekasi, Brebes, Demak, Jepara, Pati, dan Rembang,

sementara daerah dengan tingkat kerentanan sangat tinggi meliputi Serang, Karawang, Subang, Indramayu, Cirebon, Tegal, Kendal, Semarang, dan Gresik. (Ahmad & Fuad, 2018), melaporkan hasil penilaian kerentanan habitat mangrove di area Mangrove Trimulyo, dengan nilai 1,3 (Zona 1) dan 1,22 (Zona 2) di sisi barat Sungai Babon dan di sebelah timur kolam mangrove, yang masuk dalam kategori rendah dalam penilaian kerentanan. Sedangkan untuk Zona 2 di sebelah utara habitat mangrove, nilai mencapai 3,79 dan masuk dalam kategori sedang.

2.4.1. Parameter Fisik

A. Geomorfologi

Geomorfologi menjadi faktor penentu dalam mengukur sejauh mana suatu bentuk lahan dapat tererosi, hal ini memiliki implikasi signifikan terhadap kerentanan pantai. Dampak erosi yang tinggi akibat gelombang dan badai menyebabkan perubahan distribusi bentuk lahan pantai seperti dataran pasang surut, rawa, dan bukit pasir akibat kenaikan permukaan laut. Evolusi karakteristik geomorfologi pantai juga berpengaruh pada perubahan habitat pantai dan tingkat kerentanan populasi serta infrastruktur. Sebagai contoh, pantai dengan garis pantai berbatu cenderung memiliki kerentanan yang lebih rendah, sementara pantai dengan struktur berpasir atau berlumpur, seperti pantai atau rawa, menjadi lebih rentan terhadap erosi dan kenaikan permukaan laut (Kantamaneni et al., 2019). Variabel "geomorfologi pantai" bersifat non-numerik dan mengungkapkan respons relatif dari berbagai jenis bentuk lahan pantai terhadap kenaikan permukaan laut. Geomorfologi diklasifikasikan secara kualitatif berdasarkan kekuatan relatif bentuk lahan pantai dan batuan yang terbentang di sepanjang pantai. Tebing curam yang terdiri dari formasi geologi keras (batu kapur dan batuan metamorfik) menawarkan resistensi maksimum dan diklasifikasikan dengan peringkat 1, sementara tebing pantai batu sedang dan pantai yang berlekuk atau tebing dengan kemiringan sedang yang terbentuk dari formasi yang lebih lemah diberikan peringkat sensitivitas 2 dan 3, masing-masing. Pantai kantong kerikil rentan terhadap efek proses alami laut dan kenaikan relatif permukaan laut dan diberi peringkat 4 (vulnerabilitas tinggi). Pantai berpasir, delta sungai, dan delta kipas diberi peringkat sensitivitas 5, sementara formasi dune yang terstabilisasi dianggap memberikan jenis perlindungan kepada lahan di belakangnya dan diberi peringkat kerentanan 4 (Tabel 3) (Tragaki et al., 2018).

Tabel 1. Rentang Peringkat Kerentanan untuk Variabel Geomorfologi

Variabel	Kategori Kerentanan				
	1	2	3	4	5

Geomorfologi	Bertebing tinggi.	Bertebing sedang, pantai berlekuk.	Bertebung rendah, dataran aluvial	Bangunan pantai, pantai, estuari, laguna.	Penghalang pantai, pantai berpasir, berlumpur, mangrove, delta.
--------------	-------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---	---

B. Perubahan Garis Pantai

Variabel erosi atau akresi garis pantai bertujuan untuk memahami pergerakan historis garis pantai dengan menetapkan pola umum erosi atau akresi yang terjadi. Konsep perubahan garis pantai merupakan parameter yang cukup kompleks karena cenderung bervariasi sepanjang waktu dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk dinamika oseanografi, geologi, dan intervensi manusia. Pentingnya pemahaman tentang perubahan garis pantai terletak pada kemampuannya untuk memberikan wawasan tentang dinamika lautan dan dampaknya terhadap lingkungan pesisir. Dengan menganalisis pola erosi atau akresi, kita dapat mengidentifikasi daerah yang rentan terhadap penurunan lahan akibat erosi pantai atau bahkan potensi banjir akibat intrusi air laut. Penentuan peringkat laju perubahan garis pantai didasarkan pada variasi nilai lebar pantai dalam rentang waktu tertentu. Semakin besar perbedaan lebar pantai antara dua periode waktu, semakin signifikan perubahan garis pantai tersebut dianggap. Hal ini penting karena perubahan garis pantai yang berkepanjangan dapat memiliki dampak besar terhadap ekosistem pesisir, termasuk hilangnya habitat, penurunan kualitas air, dan bahkan ancaman terhadap infrastruktur manusia (Marrin et al., 2024).

Tabel 2. Rentang Peringkat Kerentanan untuk Variabel Erosi / Akresi Garis Pantai.

Variabel	Kategori Kerentanan				
	1	2	3	4	5
Erosi /	3.00 – 4.57	4.58 – 6.15	6.16 – 7.72	7.73 – 9.29	9.30 –
Akresi					10.86
Garis					
Pantai					
(m/tahun).					

C. Elevasi

Elevasi pesisir adalah ketinggian rata-rata di atas permukaan laut dari suatu area pesisir dan penting untuk menilai kerentanan wilayah tersebut (Hastuti et al., 2022). Elevasi yang lebih tinggi cenderung kurang rentan terhadap genangan dan erosi dari kenaikan permukaan laut atau badai, sementara elevasi yang lebih rendah lebih rentan (Sidiq et al., 2021). Evaluasi pada parameter elevasi pesisir membantu mengidentifikasi luas lahan yang terancam genangan (Ramadhani Maharlika et al., 2020), memperkirakan lahan yang bisa digunakan untuk migrasi lahan basah (Costa et al., 2021), dan menilai dampak kenaikan permukaan laut pada populasi dan infrastruktur. Elevasi ini juga menunjukkan risiko relatif genangan dan potensi percepatan mundurnya garis pantai (Zainuri et al., 2022).

Tabel 3. Rentang Peringkat Kerentanan untuk Variabel Elevasi.

Variabel	Kategori Kerentanan				
	1	2	3	4	5
Elevasi (m)	>30	20,1 - 30	10,1 - 20	5,1- 10	0 – 0,5

D. Kenaikan Permukaan Air Laut

Faktor fisik lain yang juga harus diperhitungkan dalam menilai kerentanan pantai, salah satunya adalah kenaikan permukaan laut. Dengan adanya potensi untuk lahan pantai terendam, pantai yang terpapar kenaikan permukaan laut dianggap sebagai lokasi yang sangat rentan terhadap dampak lingkungan. Pantai-pantai yang mengalami kenaikan permukaan laut dengan tingkat yang rendah cenderung memiliki risiko yang lebih rendah terhadap banjir dibandingkan dengan yang mengalami kenaikan yang lebih signifikan. Kenaikan permukaan laut memiliki dampak yang luas, tidak hanya terbatas pada risiko banjir. Hal ini juga mempengaruhi proses erosi pantai, pola geomorfologi, penggunaan lahan pesisir, dan bahkan pasokan air tanah. Dengan demikian, pemahaman yang baik tentang perubahan ketinggian permukaan laut menjadi kunci dalam perencanaan pengelolaan pantai yang berkelanjutan serta dalam memitigasi risiko bencana alam di wilayah pesisir (Jocson & Magallon, 2018).

Tabel 4. Rentang Peringkat Kerentanan untuk Variabel laju kenaikan permukaan laut.

Variabel	Kategori Kerentanan				
	1	2	3	4	5
Laju kenaikan permukaan laut (mm/tahun).	< 1,8	1,81 – 2,5	2,51 – 3,0	3,0 – 3,4	> 3,4

E. Tinggi Gelombang Signifikan

Parameter ketinggian gelombang mengacu pada perbedaan antara tinggi gelombang rata-rata dan tinggi gelombang signifikan. Tinggi gelombang dipengaruhi oleh aktivitas angin yang membentuk gelombang tersebut. Energi gelombang, yang dapat diindikasikan oleh tinggi gelombang signifikan, merupakan faktor penting dalam proses transportasi sedimen di pantai. Seiring dengan peningkatan energi gelombang, mobilisasi dan transportasi material pantai seperti puing-puing meningkat. Oleh karena itu, garis pantai yang terkena dampak gelombang signifikan yang tinggi cenderung lebih rentan terhadap perubahan dan kerusakan dibandingkan dengan garis pantai yang memiliki gelombang signifikan yang lebih kecil. Ini menunjukkan pentingnya pemahaman tentang parameter ketinggian gelombang dalam mengevaluasi kerentanan pesisir terhadap erosi dan perubahan lingkungan. Dengan memperhitungkan tinggi gelombang, kita dapat mengidentifikasi daerah pantai yang rentan dan mengambil langkah-langkah perlindungan yang sesuai untuk menjaga keberlanjutan lingkungan pesisir dan melindungi infrastruktur manusia yang berdekatan (Prasetyo et al., 2020).

Tabel 5. Rentang Peringkat Kerentanan untuk Variabel Tinggi gelombang signifikan.

Variabel	Kategori Kerentanan				
	1	2	3	4	5
Tinggi gelombang	< 0.55	0.55 - 0.85	0.85 - 1.05	1.05 - 1.25	> 1.25

signifikan

(m).

F. Rentang Pasang Surut

Pasang surut merupakan fenomena yang dapat diprediksi dengan baik dan dipengaruhi oleh tarikan gravitasi bulan dan matahari. Rentang pasang surut mengacu pada perbedaan vertikal antara pasang surut tertinggi dan pasang surut terendah di sepanjang garis pantai. Pantai yang memiliki rentang pasang surut yang besar sering kali dianggap sangat rentan terhadap perubahan lingkungan pesisir, karena cenderung mengalami fluktuasi air laut yang lebih ekstrem (Irham et al., 2021a). Konsep bahwa rentang pasang surut berkorelasi secara invers dengan tingkat kerentanan menunjukkan bahwa pantai dengan rentang pasang surut yang tinggi cenderung memiliki kerentanan yang lebih rendah terhadap dampak lingkungan. Hal ini karena rentang pasang surut yang besar dapat membantu mengurangi intensitas gelombang dan erosi pantai. Sebaliknya, pantai dengan rentang pasang surut yang lebih kecil mungkin lebih rentan terhadap kenaikan air laut dan banjir pantai. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang karakteristik rentang pasang surut menjadi penting dalam mengevaluasi kerentanan pesisir dan merencanakan tindakan mitigasi yang tepat untuk menjaga keberlanjutan lingkungan pesisir serta melindungi infrastruktur dan komunitas yang berada di sekitarnya (Marrin et al., 2024).

Tabel 6. Rentang Peringkat Kerentanan untuk Variabel Pasang Surut.

Variabel	Kategori Kerentanan				
	1	2	3	4	5
Rentang pasang-surut rata-rata (m).	< 1,0	1,0 – 2,0	2,0 – 4,0	4,0 – 6,0	>6,0

G. Penurunan Muka Tanah

Penurunan tanah pesisir adalah penurunan bertahap permukaan tanah di daerah pesisir akibat proses alami atau aktivitas manusia (Sidiq et al., 2021). Tingginya tingkat penurunan

tanah menunjukkan kerentanan tinggi di daerah pesisir (Ramadhani Maharlika et al., 2020). Variabel ini penting untuk menilai kerentanan kota-kota pesisir (Andreas et al., 2019). Gabungan antara kenaikan permukaan laut dan penurunan tanah menimbulkan risiko besar bagi masyarakat, ekosistem, dan ekonomi (Handiani et al., 2022). Penurunan tanah meningkatkan risiko bencana seperti banjir rob yang sering terjadi di pesisir utara Jawa, Indonesia (Handiani & Heriati, 2022).

Tabel 7. Rentang Peringkat Kerentanan untuk Variabel Penurunan Muka Tanah

Variabel	Kategori Kerentanan				
	1	2	3	4	5
Laju	2,77 - 3,78	3,79 - 4,79	4,80 - 5,80	5,81 - 6,77	6,78 - 7,82
Penurunan					
Muka					
Tanah					
(mm/tahun).					

2.4.2. Parameter Sosial-Ekonomi.

Parameter sosial ekonomi salah satunya parameter populasi di garis pantai tergantung pada faktor sosio-kultural. variabel populasi kadang-kadang dianggap sebagai indikator ekonomi juga. Selain itu, pertumbuhan populasi dapat menyebabkan peningkatan erosi sepanjang garis pantai (Mohd et al., 2019). Wilayah pantai dengan populasi yang lebih kecil, di sisi lain, kurang rentan terhadap degradasi lingkungan dan memiliki lebih sedikit infrastruktur yang perlu dilindungi (Ariffin et al., 2020). Selanjutnya, infrastruktur adalah elemen lain dalam faktor sosio-kultural. Ini adalah istilah yang luas yang mencakup struktur residensial dan komersial. Di antaranya adalah fasilitas pengolahan air limbah, pembangkit listrik, sekolah, dan rumah sakit, yang semuanya dipertimbangkan dalam analisis ekonomi. Garis pantai dengan infrastruktur lebih rentan daripada garis pantai tanpa infrastruktur (Horlings & Marschke, 2020). Lokasi pantai dengan kepadatan jalan yang tinggi, seperti jalan raya atau jalan tol, sangat rentan, sedangkan garis pantai tanpa jalan raya jauh lebih tidak rentan.

Variabel penggunaan lahan dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria, termasuk ekonomi, budaya, dan lingkungan (Prasetyo et al., 2020). Sebagian besar waktu, penggunaan lahan diklasifikasikan dan dinilai berdasarkan nilai moneter bagi manusia. Misalnya, infrastruktur industri dengan lahan pertanian dianggap sangat rentan. Keuntungan dan layanan

yang diberikan oleh garis pantai dan nilai potensial untuk lahan di masa depan tidak dipertimbangkan dalam pendekatan peringkat penggunaan lahan ini. Namun, meskipun dijanjikan, data tersebut tidak pernah diberikan. Oleh karena itu, dasar pemikiran yang digunakan untuk peringkat ekonomi didasarkan pada penilaian subjektif terhadap jenis penggunaan lahan yang lebih atau kurang berharga bagi manusia. Secara umum, penggunaan lahan untuk nilai manusia dianggap lebih rentan daripada penggunaan lahan yang kurang berharga, yang kurang bernilai manusia (Jha et al., 2020).

2.5.Fenomena & Bencana di Wilayah Pesisir Pekalongan

2.5.1. Banjir Pasang.

Banjir pasang merujuk pada banjir yang terjadi di wilayah pesisir karena kenaikan air laut. Fenomena ini dapat menyebabkan dampak merugikan pada aspek sosial dan ekonomi penduduk di berbagai negara. Secara umum, banjir pasang terjadi ketika terjadi purnama, di mana air laut meluap ke daratan pada saat pasang air laut tinggi. Keadaan semakin parah ketika mencapai tingkat air tertinggi yang disebut sebagai *Highest High Water Level* (HHWL) (Hastuti et al., 2022). Ancaman banjir pasang di daerah pesisir melibatkan tiga aspek utama: Pertama arus pasang, yang dapat menyebabkan sedimentasi di sepanjang garis pantai, dengan kecepatan dan arah arus menjadi faktor penting untuk pergerakan sedimen, erosi, deposisi, dan penyebaran polutan. Aspek kedua campuran air tawar dan air asin ketika air laut pasang masuk ke sungai dan saluran air lainnya. Aspek ketiga genangan pasang air laut melibatkan tinggi permukaan air, rentang pasang air laut, dan durasi genangan (Febriani et al., 2017). Sama seperti banjir pesisir, banjir pasang terkait dengan wilayah rendah yang luas. Risiko banjir pasang diperkirakan akan meningkat seiring dengan naiknya permukaan laut. Kenaikan permukaan laut yang cepat dapat meningkatkan tekanan pada daerah pesisir, menyebabkan banjir di wilayah rendah pesisir, erosi pantai berpasir, dan merusak pengelolaan pesisir (Tragaki et al., 2018). Banjir pesisir merupakan hasil dari tingkat laut ekstrem yang jarang terjadi akibat badai atau aliran air dari daratan. Selain itu, zona risiko banjir pesisir dapat terus berkembang seiring berjalannya waktu, dengan meningkatnya risiko banjir baik di dalam dataran banjir yang sudah ada maupun meluasnya dataran banjir ke daratan (Sauda et al., 2019).

Pasang surut adalah fenomena di mana tinggi dan rendahnya permukaan laut berubah-ubah, dipengaruhi oleh tarikan bulan dan matahari. Perubahan ini terjadi karena posisi relatif matahari, bulan, dan bumi yang selalu berubah (Febriani et al., 2017). Saat permukaan laut mencapai tingkat tertinggi, kita menyebutnya sebagai pasang tinggi, sementara ketika mencapai tingkat terendah, kita menyebutnya sebagai pasang rendah. Ada empat jenis pasang

surut, yakni: Jenis pertama pasang surut semi-diurnal terjadi dua kali sehari dengan tinggi yang serupa, seperti yang terjadi di Selat Malaka. Jenis kedua pasang surut harian terjadi sekali dalam sehari, seperti yang dapat ditemui di Selat Karimata. Jenis ketiga Pasang surut campuran yang didominasi semi-diurnal terjadi dua kali sehari, tetapi dengan tinggi dan periode yang berbeda, seperti yang terjadi di pantai Timur Indonesia. Jenis keempat pasang surut campuran yang didominasi harian terjadi sekali sehari, namun kadang-kadang dua kali sehari dengan tinggi dan periode yang berbeda, biasanya terjadi di pantai utara Pulau Jawa, Indonesia (Harwitasari, 2009).

Banjir pasang telah mempengaruhi wilayah perkotaan dalam banyak hal. Dampak banjir rob dapat dikaitkan dengan dampak banjir di perkotaan dan dampak banjir pesisir. Dampak yang ditimbulkan tergantung pada beberapa faktor, yaitu tinggi genangan, lama genangan, kecepatan aliran air, endapan lumpur, kejadian banjir, dan perubahan cuaca. Kerugian fisik dan non fisik akibat banjir, yaitu hilangnya nyawa dan harta benda, rusaknya rumah dan perabot, terhambatnya penghidupan penduduk, erosi tanah, rusaknya infrastruktur perkotaan seperti jalan, sekolah, rumah sakit dan stasiun pusat, mengancam pasokan air dan mencemari sumber air, Menyebabkan penyakit epidemi seperti diare dan penyakit kulit (Adani et al., 2023). Banjir pesisir akibat kenaikan permukaan air laut berdampak pada sosial ekonomi sistem alam, yaitu: Meningkatnya kerugian harta benda dan penghuni pesisir, Peningkatan potensi korban jiwa, Kerusakan pada pekerjaan perlindungan pantai dan infrastruktur lainnya, Hilangnya sumber daya terbarukan dan subsisten, Hilangnya pariwisata , fungsi rekreasi dan transportasi, Hilangnya sumber daya dan nilai budaya non-moneter, & Dampak terhadap pertanian dan budidaya perairan melalui penurunan kualitas tanah dan air (Marfai et al., 2014).

Banjir tidak hanya berdampak pada sosial ekonomi, namun juga berdampak pada kualitas kesehatan. Banyak penyakit yang meningkat akibat banjir, seperti *leptospirosis* dan penyakit yang ditularkan melalui vektor. Banjir berdampak pada kualitas air minum yang dapat tercemar. Sebagaimana disebutkan dalam Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 907/Menkes/Sk/VII/2002, 2002), air yang tercemar diidentifikasi berdasarkan tiga kriteria yaitu kriteria fisik, kimia, dan mikrobiologi (Harwitasari, 2009). Bersih, bening, tidak berwarna, tidak berasa, tidak berbau, suhu sekitar 10° C – 25° C dan tidak ada residu merupakan syarat fisik air minum. Sedangkan kriteria bahan kimianya adalah tidak mengandung bahan berbahaya, tidak mengandung bahan kimia, dan mengandung unsur iodium cukup. Tidak ada unsur mikrobiologi seperti kolera dan *colii* yang menjadi bagian kriteria mikrobiologi. Banjir juga menyusup ke sistem pembuangan limbah, dan akibatnya katup

dipasang. Air limbah mengandung unsur-unsur berbahaya dari rumah tangga dan industri yang membahayakan kesehatan masyarakat. Jika meluap karena banjir dapat menimbulkan penyakit (Nurdiantoro & Arsandrie, 2020).

2.5.2. Penurunan Tanah (*Land Subsidence*)

Penurunan tanah, yang terjadi di beberapa pantai di Pulau Jawa, semakin memperluas banjir pasang surut di beberapa kota di pantai utara Jawa Tengah seperti Semarang, Demak, Jakarta, dan Pekalongan (Kartika et al., 2019). Subsiden tanah adalah penurunan atau penyelesaian bertahap permukaan tanah, yang bisa disebabkan oleh berbagai faktor, baik alami maupun buatan manusia. Faktor alami yang berkontribusi terhadap subsiden tanah meliputi beban sedimen, aktivitas tektonik, vulkanisme, dan pelarutan mineral yang larut seperti batuan karbonat dan evaporit (Galloway et al., 2016). Di sisi lain, aktivitas manusia seperti pengembangan sumber daya air untuk pertanian dan urbanisasi bisa memperparah proses subsiden tanah dengan mengubah sistem hidrologi alami (Kantamaneni et al., 2019). Dampak dari subsiden tanah bisa sangat berbahaya, termasuk banjir di wilayah pesisir dan sungai, kerusakan pada infrastruktur seperti bangunan dan jalan, serta degradasi ekosistem. Selain itu, proses subsiden tanah juga bisa menyebabkan retakan pada tanah, pencemaran sistem air tanah, dan bahaya lainnya (Chulafak et al., 2022). Perubahan iklim dapat mengakibatkan baik penurunan (kekeringan) maupun peningkatan (musim hujan) presipitasi, aliran permukaan, dan *recharge* air tanah. Penurunan ini dapat menyebabkan subsiden karena penurunan tingkat air tanah yang menyebabkan kompaksi sistem akuifer dan oksidasi serta konsolidasi tanah organik; sedangkan peningkatan bisa menyebabkan subsiden karena peningkatan pelarutan mineral karst dan penurunan dukungan mekanik untuk fitur karst yang sudah ada sebelumnya (Galloway et al., 2016). Salah satu kota di pantai utara Pulau Jawa yang juga terkena dampak naiknya permukaan laut akibat subsiden tanah adalah Pekalongan. Penelitian yang dilakukan oleh (Andreas et al., 2018) mengenai subsiden tanah di Kota Pekalongan menunjukkan nilai yang sangat tinggi, yaitu sekitar 10-14 cm/tahun. Nilai ini setara dengan tingkat subsiden tanah tertinggi di Jakarta dan Semarang.

2.5.3. Erosi Pantai

Erosi pantai adalah proses alami di mana garis pantai mundur atau maju tergantung pada pasokan sedimen, iklim, dan kondisi laut. Erosi pantai terjadi ketika garis pantai mundur, baik secara sementara maupun permanen. Erosi menjadi ancaman ketika mengancam aktivitas atau pemukiman manusia atau hal lain yang mereka hargai (Hastuti et al., 2022). Erosi pantai

menjadi masalah utama di pantai utara Jawa selain dari banjir rob, banjir, dan subsiden tanah. Ketidakseimbangan sedimen yang terkait dengan deforestasi besar-besaran hutan mangrove, pembangunan infrastruktur dan perlindungan pantai, penambangan pasir ilegal, dan pembangunan bendungan adalah faktor utama yang menyebabkan tingginya tingkat erosi di pantai utara Jawa (Yulianto et al., 2023). Karena metode yang digunakan selama ini cenderung lebih merusak daripada melindungi, saat ini diperlukan penggunaan alternatif pencegahan lunak dan penyediaan pedoman baru untuk pengelolaan pantai. Pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan infrastruktur dari hulu-ke-hilir dan hilir-ke-hilir diusulkan untuk pembangunan berkelanjutan zona pantai. Ini akan mencakup pengelolaan zona pantai berbasis daerah aliran sungai dan sel sedimentasi. Penting untuk memperkenalkan strategi pengelolaan pantai baru yang memperhitungkan kondisi saat ini dari pemukiman manusia utama dan proses erosi pantai (Solihuddin et al., 2021)

2.5.4. Krisis Pengelolaan Sampah di Pesisir Pekalongan

Berdasarkan data SIPSN (Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional) Kementerian LHK tahun 2018, komposisi sumber sampah perkotaan di Indonesia didominasi oleh rumah tangga (42,51%) dan pasar tradisional (23,17%), dengan kontribusi sampah plastik sebesar 10,58% dari total timbulan sampah (United Nations Environment Programme & Indonesia Ministry of Environment and Forestry, 2020). Secara sistemik, alur pengelolaan sampah melibatkan beberapa aktor utama dimana setelah dibuang oleh konsumen, sampah terutama dikumpulkan oleh pemerintah daerah kemudian diangkut ke tempat pemrosesan akhir (TPA) melalui berbagai saluran seperti pusat 3R, bank sampah, sektor informal, dan pelaku daur ulang. Selain itu, terdapat pula mekanisme pengumpulan alternatif melalui skema informal dan inisiatif sukarela dari industri barang konsumen cepat saji (FMCG). Meskipun ekosistem daur ulang untuk beberapa jenis kemasan seperti PET dan PP telah terbentuk dengan baik khususnya di Pulau Jawa, secara nasional tingkat daur ulang masih relatif rendah karena mayoritas sampah bernilai ekonomis rendah tetap berakhir di TPA (Anasstasia et al., 2020).

Pada tahun 2014, Kota Pekalongan menghasilkan sampah sebanyak 855 m³ per hari. Dari total produksi tersebut, 63,6% sampah berhasil diangkut ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), sementara 7,5% dikelola melalui Tempat Pengolahan Sampah *Reduce, Reuse, Recycle* (3R). Cakupan layanan pengelolaan sampah mencapai 16,5%, dengan sisa 12,4% belum tercakup dalam sistem pengelolaan. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 01/PRT/M/2014 tentang Standar Pelayanan Minimal (SPM) Bidang Penataan Ruang dan

Penyelenggaraan Pekerjaan Umum, target pengangkutan sampah seharusnya mencapai minimal 70% dan cakupan layanan pengelolaan sampah minimal 20%. Namun, realisasi di Kota Pekalongan masih di bawah standar, dengan tingkat pengangkutan sampah sebesar 63,6% dan cakupan layanan 16,5% (Berdasarkan asumsi Kepala Dinas Kebersihan, Pengelolaan Sampah, dan Lingkungan Hidup Kota Pekalongan) (Vashra et al., 2018).

2.6. Wilayah Pesisir Pekalongan

Wilayah pesisir Pekalongan memiliki ciri khas dengan banyak muara dan saluran irigasi, yang menjadi salah satu faktor masuknya air laut ke daratan di daerah tersebut. Pada musim hujan, risiko banjir menjadi lebih tinggi karena aliran sungai di muara dapat meningkat akibat curah hujan yang tinggi di wilayah tersebut (Nurdiantoro & Arsandrie, 2020). Air dari sungai akan meluap ke berbagai arah karena gabungan air pasang dan air hujan di wilayah ini. Dampak kerugian dan kerusakan terus meningkat terutama terhadap ekosistem pesisir, mencakup aspek fisik, ekonomi, dan sosial, seperti ekosistem mangrove, pertanian, dan budidaya perikanan tambak di wilayah pesisir ini (De Serio et al., 2018).

Kawasan hutan mangrove di Pekalongan Utara yang semula merupakan tambak udang yang rusak akibat abrasi, kini telah dikembangkan menjadi area konservasi sekaligus destinasi ekowisata sejak tahun 2018. Dengan luas total 150 hektar, pemerintah berencana memperluas area mangrove sebanyak 90 hektar untuk meningkatkan fungsi ekologis sekaligus memperkuat potensi wisata alam di wilayah tersebut (Turisno et al., 2020). Perencanaan yang bagus namun untuk eksekusi program tidak berjalan dengan baik, mengingat untuk saat ini ternyata kondisi kawasan tersebut mengalami degradasi pada area vegetasi mangrove oleh air laut. Kegiatan pariwisata pesisir di Pekalongan juga akan terkena dampak, dimana perubahan iklim mampu mempengaruhi perilaku dan keputusan wisatawan pantai untuk berkunjung (Lin & Wang, 2023). Rencana dari pemangku kepentingan akan dibangun infrastruktur *breakwater* dengan tujuan melindungi kawasan mangrove terdegradasi dengan mengurangi energi gelombang dan mencegah erosi, sekaligus menstabilkan sedimen untuk pertumbuhan bibit.

Bidang perikanan khususnya perikanan tangkap juga terpengaruhi oleh adanya fenomena perubahan iklim saat ini, dimana perlu adaptasi terhadap perubahan iklim dari para nelayan guna dari adaptasi tersebut dapat meningkatkan kesejahteraan subjektif nelayan. Adaptasi terhadap perubahan iklim meningkatkan kebahagiaan dan kepuasan hidup nelayan secara signifikan, dimana nelayan yang lebih puas dengan kondisi hidup mereka cenderung lebih mampu beradaptasi terhadap perubahan iklim (Rahman et al., 2023).

Meninjau fasilitas perikanan tangkap di Pekalongan seperti fasilitas pelabuhan perikanan Pekalongan saat ini dalam kondisi baik dengan skor 165.2. Fasilitas yang ada di pelabuhan Pekalongan sudah lengkap dengan skor 3, termasuk fasilitas dasar, fasilitas fungsional, dan fasilitas pendukung yang sesuai dengan standar untuk pelabuhan perikanan tipe B. Penggunaan fasilitas di pelabuhan perikanan Pekalongan melebihi kondisi optimal pada fasilitas kolam sebesar 132.15%, saluran kapal 112.8%, dan dermaga kapal dengan kapasitas kurang dari 30 GT mencapai 144%. Pada fasilitas dermaga kapal dengan kapasitas lebih dari 30 GT, hampir mencapai kondisi optimal sebesar 84.24%, namun pada fasilitas tempat pelelangan ikan masih belum mencapai kondisi optimal, hanya sebesar 53.82% (Putri et al., 2020).



SEKOLAH PASCASARJANA