

Alternatif *Nature-based Solution* untuk Daerah Rawan Bahaya Pesisir Barat Kabupaten Pangandaran

Djati Mardiatno¹, Aulia Syifa Ardiati^{1,2}, Nurul Hidayah¹, Galang Riswanda Nuswantara¹, Askiyamin Alimuddin¹, Hayu Nur Mahron¹

¹Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia,

²Pusat Studi Bencana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta Indonesia

*Email koresponden: djatimardiatno@ugm.ac.id

Submitted: 2024-11-20 Revisions: 2025-08-13 Accepted: 2024-09-11 Published: 2025-09-07

©2024 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2025 by the authors. Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons

Attribution(CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Abstrak Kabupaten Pangandaran merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Jawa Barat bagian selatan yang memiliki wilayah kepebisiran cukup luas dan beragam secara biofisik. Kawasan pesisir ini memiliki peran strategis dalam mendukung aktivitas ekonomi, sosial, dan ekologi masyarakat sekitar. Akan tetapi, kawasan pesisir juga menghadapi berbagai potensi bahaya alam seperti abrasi, banjir rob, gelombang ekstrem, dan perubahan garis pantai baik akibat dari faktor alam maupun dari faktor manusia. Setiap tipologi pesisir berperan strategis pengurangan risiko bencana yang berbeda menurut potensi dan ancamannya. Oleh karena itu, penentuan tipologi pesisir sangat penting untuk menilai tingkat bahaya dalam pengelolaan wilayah kepebisiran agar dapat memberikan solusi atas bahaya dengan tetap memperhatikan keberlanjutan sumber daya di wilayah pesisir. Penelitian ini bertujuan untuk menilai tingkat dari bahaya kepebisiran dan menyusun alternatif pengelolaan bahaya tersebut berdasarkan prinsip *Nature-based Solutions* (NbS) atau solusi berbasis alam. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Coastal Hazard Wheel* (CHW). Metode tersebut digunakan untuk menerjemahkan karakteristik biogeofisik berupa *geological layout*, paparan gelombang, rentang pasang surut, flora dan fauna, keseimbangan sedimen, serta *storm climate* menjadi bahaya kepebisiran. Metode CHW menghasilkan tingkat bahaya yang dapat menjadi landasan untuk menentukan tipe arahan pengelolaan berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Pesisir Barat Pangandaran memiliki empat tipe alternatif arahan pengelolaan, yaitu TSR (*tidal inlet/sand split/river mouth*), BA-5 (*barrier*), R-1 (*sloping hard rock coast*), dan PL-5 (*sediment plain*). Adapun rekomendasi *Nature-based Solutions* (NbS) yang diberikan untuk masing-masing dari keempat indeks pengelolaan, yaitu pada indeks BA-5 agar difokuskan pada upaya perbaikan sistem transportasi sedimen dan rehabilitasi struktur dinding batu guna mengurangi risiko pendangkalan dan banjir; pada indeks PL-5 penanganan utama dilakukan melalui pembangunan penghalang pantai serta optimalisasi pergerakan sedimen sebagai bentuk dari mitigasi; pada indeks TSR disarankan dilakukan pemulihan lahan basah untuk memperbaiki ekosistem mangrove yang mengalami degradasi akibat tekanan aktivitas alam dan manusia; sedangkan pada indeks R-1 tidak memerlukan tindakan prioritas karena kondisi kawasan dinilai stabil dan relatif aman dari ancaman signifikan.

Kata kunci: Kepesiran; *Coastal Hazard Wheel*; *Nature-based Solution*

Abstract Pangandaran Regency, located in the southern part of West Java, features diverse coastal areas that play strategic roles in supporting local economic, social, and ecological activities. However, these coastal zone face various natural hazards including coastal abrasion, tidal flooding, extreme waves, and shoreline changes caused by both natural processes and human activities. Each coastal typology requires a different disaster risk reduction strategy based on its specific potential and threats. Therefore, identifying coastal typologies is crucial for assessing hazards and for guiding coastal management in a way that ensures the sustainability of coastal resources. This study aims to assess the level of coastal hazards and to formulate alternative hazard management strategies based on the principles of *Nature-based Solutions* (NbS). The method employed in this research is the *Coastal Hazard Wheel* (CHW), which translates biogeophysical characteristics-such as geological layout, wave exposure, tidal range, flora and fauna, sediment balance, and storm climate into coastal hazard classifications. The CHW method provides hazard level outputs that serve as a foundation for determining appropriate types of sustainable management approaches. The results of the study indicate that the western coast of Pangandaran falls into four management index categories: TSR (*tidal inlet/sand split/river mouth*), BA-5 (*barrier*), R-1 (*sloping hard rock coast*), dan PL-5 (*sediment plain*). The recommended *Nature-based Solutions* (NbS) for each of these categories are as follows: for the BA-5 index, efforts should focus on improving sediment transport systems and rehabilitating rock wall structures to reduce sedimentation and flood risks; for the PL-5 index, the main strategy involves constructing coastal barriers and optimizing sediment movement as a form of mitigation; for the TSR index, wetland restoration is recommended to rehabilitate degraded mangrove ecosystems impacted by both natural and human pressures; and for the R-1 index, no priority action is required, as the area is considered stable and relatively safe from significant threats.

Keywords: Coastal Areas; *Coastal Hazard Wheel*; *Nature-based Solutions*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim telah berkembang menjadi isu global. Majunya peradaban manusia yang ditandai dengan revolusi industri menyebabkan perubahan iklim terjadi lebih cepat. Eskalasi dampak perubahan iklim terjadi secara masif sebagai akibat dari revolusi industri. Studi menunjukkan bahwa terjadi peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$ sebesar 95% yang berasal dari aktivitas antropogenik terhitung sejak tahun 1850 (era revolusi industri) berdampak pada peningkatan suhu rata-rata global serta bergesernya pola curah hujan (Yang et al., 2022). Tantangan kompleks perubahan iklim dihadapi beragam disiplin dan sektor seperti ekologi, lingkungan, sosial politik serta sosial ekonomi (Abbass et al., 2022; Centeno, 2020).

Dampak perubahan iklim juga banyak dialami wilayah kepebisiran. Kenaikan suhu global yang berimbas pada perubahan iklim yang telah mempengaruhi wilayah pesisir secara signifikan. Perubahan iklim berdampak pada munculnya berbagai faktor pendorong (*driven factor*) penyebab bahaya kepebisiran. Bahaya kepebisiran didefinisikan sebagai fenomena yang mengekspos wilayah pesisir terhadap risiko dari kerusakan properti, munculnya korban jiwa serta degradasi lingkungan (Bhable et al., 2015; Kim & Agnes, 2016). Salah satu faktor pendorong terjadinya bahaya kepebisiran adalah kenaikan muka air laut.

Kenaikan muka air laut rata-rata global tercatat mencapai $3,6 \pm 0,3$ mm/tahun selama 1993 – 2022 yang dapat memberikan dampak signifikan terhadap wilayah pesisir melalui berbagai mekanisme (Daniel et al., 2025). Perubahan ini dapat mengakibatkan gangguan pada ekosistem pesisir seperti mangrove, lamun dan terumbu karang yang merusak biodiversitas dan mengurangi simpanan *blue carbon* (Chen & Mai, 2024; Gao et al., 2024; Rilov et al., 2021). Selain itu, air laut yang menggenangi pantai dalam jangka waktu yang lama secara perlahan dapat mengakibatkan inudasi bertahap yang dapat mengurangi luas lahan pesisir (Nevermann et al., 2023; Wang et al., 2020). Tekanan akibat kenaikan muka air laut dapat mendorong intrusi air laut ke akuifer sehingga menurunkan kualitas air tanah dan tidak lagi layak untuk kebutuhan domestik atau pertanian (Chang et al., 2011; Su et al., 2025). Saat air laut meningkat, energi gelombang yang datang ke pantai akan datang lebih kuat dan mempercepat proses erosi serta mengikis garis pantai (Roy et al., 2023). Selain itu, apabila kenaikan muka air laut terjadi secara ekstrem dapat meningkatkan potensi bahaya banjir (Paulik et al., 2021). Selain dari kenaikan muka air laut, wilayah pesisir di dataran rendah yang mengalami perubahan pola curah hujan mengakibatkan banjir lebih sering dan intens (Roth et al., 2024). Peningkatan frekuensi dan intensitas badai tropis sebagai akibat dari perubahan iklim turut memperparah kerusakan infrastruktur dan ekosistem pesisir.

Ragam bahaya kepebisiran yang ada dapat mengancam komunitas yang tinggal di wilayah pesisir sebagai komunitas paling rentan terhadap kerugian dari bahaya kepebisiran (Norton et al., 2019; Wilson et al., 2017). Peningkatan populasi dan aktivitas ekonomi di sepanjang pesisir mengekspos lebih banyak manusia dan aset terhadap bahaya kepebisiran yang diduga dapat bertambah seiring dengan adanya perubahan iklim (Albert et al., 2018). Dengan demikian, perubahan iklim memperluas paparan komunitas rentan terhadap bahaya kepebisiran (Seneviratne et al., 2021).

Pangandaran merupakan salah satu kabupaten di Jawa Barat bagian selatan yang memiliki wilayah kepebisiran.

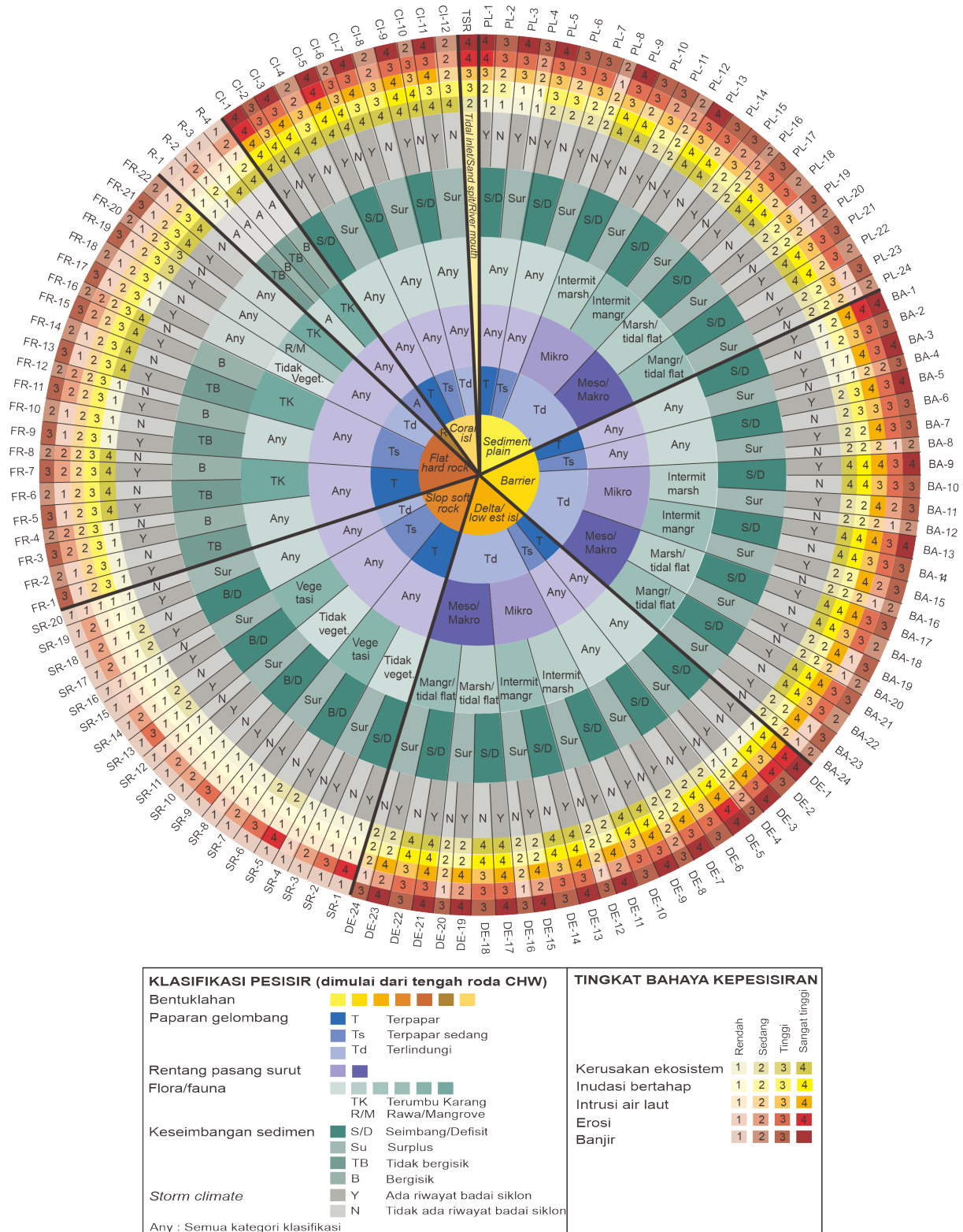
Secara umum, wilayah kepebisiran di Kabupaten Pangandaran telah dikembangkan menjadi tempat wisata yang diminati oleh wisatawan domestik hingga mancanegara. Wilayah kepebisiran Pangandaran memiliki banyak potensi, tetapi juga memiliki beberapa ancaman bencana. Wilayah kepebisiran Pangandaran merupakan bagian dari Teluk Parigi yang terbuka langsung ke arah Samudera Hindia. Kondisi ini menjadikan pantai dan pesisir di Pangandaran memiliki potensi bahaya kepebisiran. Dokumen Kajian Risiko Bencana (KRB) Provinsi Jawa Barat mencatat bahwa Kabupaten Pangandaran memiliki lahan seluas 266 Ha dengan potensi tinggi, 121 Ha lahan berpotensi sedang, dan 926 Ha lahan berpotensi rendah terhadap bahaya gelombang ekstrem dan abrasi (BNPB, 2021). Selain potensi, kejadian historis tsunami pada 17 Juli 2006 semakin memperkuat tingginya tingkat bahaya kepebisiran di wilayah pesisir Kabupaten Pangandaran.

Mitigasi ancaman kepebisiran dapat dilakukan melalui implementasi solusi berbasis alam atau *Nature-based Solutions* (NbS). NbS didefinisikan sebagai solusi yang dirancang untuk mengatasi beragam tantangan sosial dengan cara yang efisien dan adaptif (de Luca et al., 2021). Gómez Martín et al. (2020) menegaskan bahwa NbS menekankan pentingnya keanekaragaman hayati serta fungsi dan proses ekosistem dalam strategi adaptasi komprehensif untuk beradaptasi dan memitigasi dampak perubahan iklim. Pendekatan terbaru ini dianggap paling menjanjikan untuk melindungi wilayah pesisir. Tujuan penelitian ini adalah menilai tingkat bahaya kepebisiran dan menyusun alternatif pengelolaan bahaya tersebut berdasarkan prinsip solusi berbasis alam (NbS).

Sebagian besar solusi berbasis alam yang dikaji telah diimplementasikan pada skala lingkungan dan pemerintah daerah, terutama di kawasan perkotaan dan pesisir yang berorientasi pariwisata. Capaian utama yang ingin diwujudkan adalah untuk melindungi pantai. Kondisi ini sejalan dengan pengembangan Pantai Pangandaran sebagai destinasi wisata bahari. Secara teknis, NbS didesain untuk memperbaiki struktur pesisir atau memanfaatkan habitat dan fitur pesisir alami guna memberikan beragam manfaat bagi masyarakat dan lingkungan (UNEP/MAP & Bleu, 2020). Desain ini mencakup peningkatan struktur buatan dengan fitur ekologis serta peningkatan habitat atau bentangalam alami untuk mengatasi risiko iklim (Motta Zanin et al., 2024). Dalam konteks tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menilai tingkat bahaya kepebisiran serta merumuskan alternatif pengelolaan berbasis NbS yang sesuai dengan karakteristik wilayah.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Coastal Hazard Wheel* (CHW) (**Gambar 1**). CHW merupakan metode penilaian multi bahaya di kawasan pesisir (*multi-hazard assessment*) yang mencakup lima jenis bahaya (Appelquist & Halsnæs, 2015; Micallef et al., 2018; Su et al., 2021). UNEP merekomendasikan CHW untuk menentukan rekomendasi pengelolaan pesisir dari dampak perubahan iklim (Micallef et al., 2018). Metode ini efektif digunakan di lokasi dengan data terbatas karena dapat mengandalkan data penginderaan jauh (Appelquist et al., 2016). Aplikasi CHW dalam penilaian multi bahaya kepebisiran dinilai komprehensif dan runtut karena hasil penilaian multi bahaya sekaligus memuat rekomendasi pengelolaan pesisir sesuai jenis kode bahayanya.



Gambar 1. Bagan Metode *Coastal Hazard Wheel*
(Modifikasi Appelquist & Halsnaes, 2015)

Lokasi Penelitian

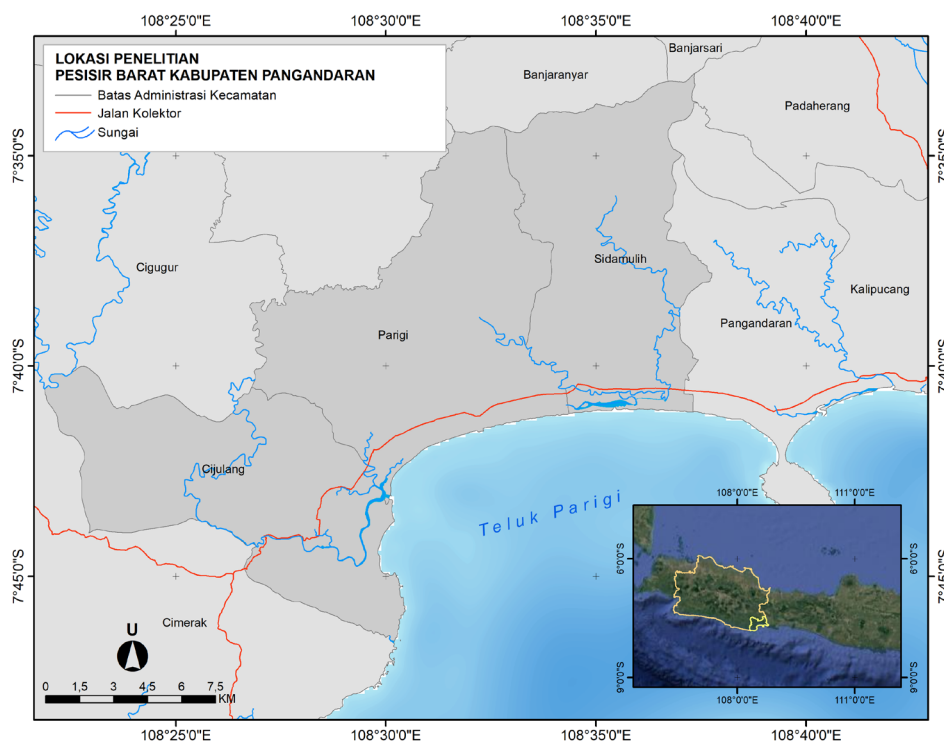
Kajian ini dilakukan di sepanjang wilayah Pantai Barat Kabupaten Pangandaran (**Gambar 2**). Sepanjang wilayah kajian memiliki karakteristik biogeofisik yang berbeda-beda. Wilayah pesisir Cikembulan merupakan estuari dengan sedikit aktivitas antropogenik, pesisir Batu Hiu merupakan *geosite* dengan aktivitas penangkaran penyu, adapun pesisir Batu Karas adalah estuari dengan aktivitas antropogenik intensif.

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi berbagai aspek geomorfologi dan ekologi di wilayah Pesisir Barat Pangandaran sesuai dengan parameter pada CHW. Data dan metode pengolahan data per parameter CHW yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 1**.

Analisis Data

Keenam konfigurasi parameter biogeofisik pesisir berfungsi sebagai instrumen penilaian bahaya sekaligus dasar



Gambar 2. Peta Lokasi Penelitian (Penulis, 2024)

Tabel 1. Data, Sumber Data dan Metode Pengumpulan dan Pengolahan Data (Penulis, 2024)

Parameter	Data	Sumber Data	Metode Pengolahan
Bentuklahan	Peta Geologi Lembar Pangandaran 1308-2 dan Karangnunggal 1308-1 skala 1:100.000	Kementrian ESDM (https://geologi.esdm.go.id/)	Validasi data sekunder di lapangan
Paparan gelombang	<i>Significant height</i> (Hs) Tahun 2018 - 2023	BMKG	Kriging (Adalya & Mutaqin, 2022)
Rentang pasang surut	<i>Water level</i> Juli - Agustus 2023	BMKG	Admiralty (Ichsari et al., 2020)
Flora/fauna	Jenis flora dan fauna	Pengamatan langsung	
Keseimbangan sedimen	Citra Landsat 8 OLI resolusi 30 meter tahun 2012 - 2023	<i>United States Geological Survey</i> (https://www.usgs.gov/)	Ekstraksi garis pantai <i>Google Earth Engine</i> dan <i>Python CoastSat v2.5</i> (Vos et al., 2019) dan analisis <i>Digital Shoreline Analysis System</i> (DSAS) (Gopinath et al., 2023).
<i>Storm climate</i>	Data kejadian <i>storm climate</i>	Validasi data (Appelquist et al., 2016)	

untuk mengimplementasikan alternatif pengelolaan pesisir berbasis tipologi (Appelquist & Halsnæs, 2015). Parameter tersebut dikategorikan menurut Tabel 2 untuk mengetahui tingkat bahaya kepebisiran dengan cara mengurutkan masing-masing konfigurasi parameter sesuai diagram penilaian tingkat bahaya (Appelquist & Halsnæs, 2015; Micallef et al., 2018; Su et al., 2021).

Klasifikasi pesisir berdasarkan kelima parameter CHW menurut bagan pada Gambar 1 menghasilkan beragam kode bahaya untuk setiap segmen pesisir. Kode bahaya tersebut memuat lima jenis bahaya kepebisiran yaitu kerusakan ekosistem, inudasi bertahap, intrusi air laut, erosi dan banjir. Selain jenis bahaya, CHW juga merepresentasikan potensi tingkat bahaya yang meliputi bahaya rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Selanjutnya, masing-masing kode bahaya digunakan untuk mengetahui rekomendasi pengelolaan pesisir berdasarkan (Appelquist & Halsnæs, 2015).

Rekomendasi tersebut tidak serta merta dapat diaplikasikan ke lokasi penelitian namun perlu diintegrasikan dengan pendekatan *Nature based Solution* (NbS). Penelitian ini mengklasifikasikan NbS berdasarkan tingkat intervensi manusia, diantaranya *low human interventions*; *medium human interventions*; dan *high human interventions*. *Low human interventions* melibatkan upaya minimal untuk memanfaatkan atau memperbaiki fitur-fitur alami pesisir, seperti restorasi ekosistem pesisir. Sementara *medium human interventions* mencakup modifikasi terbatas pada struktur buatan manusia, misalnya penambahan fitur ekologis pada bangunan pantai. Adapun *high human interventions* mengacu pada intervensi yang lebih ekstensif, seperti rekayasa besar-besaran pada bentangalam pesisir. Pemilihan pendekatan NbS yang sesuai harus mempertimbangkan karakteristik pesisir yang teridentifikasi melalui CHW.

Tabel 2. Variabel Coastal Hazard Wheel (Appelquist, 2013)

Variabel	Kategori	Keterangan
Bentuklahan	<i>Sediment plain</i>	Batuan lunak dan lereng < 20 °
	<i>Slope soft rock</i>	Batuan lunak dan lereng ≥ 20°
	<i>Flat hard rock</i>	Batuan keras dan lereng < 20°
	<i>Rock</i>	Batuan keras dan lereng ≥ 20°
	<i>Delta/low estuary island</i>	Sedimen dengan lereng < 20° atau ≥ 20°
	<i>Coral island</i>	Campuran antara batuan keras dan batuan lunak
	<i>Barrier</i>	Pesisir tersusun dari sedimen yang landai dengan lebar dan panjang kurang dari 100 m hingga beberapa kilometer
Paparan gelombang	<i>Tidal inlet/sand spit/river mouth</i>	Bentuklahan yang berasosiasi dengan lingkungan estuari
	Terlindungi	< 2 meter
	Terpapar sedang	2 – 4 meter
	Terpapar	> 4 meter
Rentang pasang surut	<i>Any</i>	Semua ketinggian gelombang
	Mikro	<2 meter
	Meso	2 – 4 meter
	Makro	>4 meter
Flora/fauna	<i>Any</i>	Semua rentang pasang surut
	Bervegetasi	Terdapat vegetasi
	Tidak bervegetasi	Tidak terdapat vegetasi
	Rawa/marsh	Terdapat rawa
	<i>Intermittent marsh</i>	Rawa dengan rentang pasang surut mikro
	<i>Mangrove</i>	Terdapat mangrove
	<i>Intermittent mangrove</i>	Mangrove dengan rentang pasang surut mikro
Keseimbangan Sedimen	<i>Tidal flat</i>	Area yang termasuk <i>sedimentary plain</i> , <i>barrier</i> , atau <i>low estuary island</i> dengan rentang pasang surut meso/mikro
	Terumbu karang	Terdapat terumbu karang
	<i>Any</i>	Semua kategori flora/fauna
	<i>Seimbang/Defisit</i>	Garis pantai tetap atau mundur ke daratan
	<i>Surflus</i>	Garis pantai maju ke arah laut
	<i>Gisik</i>	Garis pantai mempunyai gisik
Storm Climate	<i>Tidak bergisik</i>	Pesisir tanpa gisik
	<i>any</i>	semua kategori keseimbangan sedimen
	<i>Ya</i>	Ada riwayat badai
	<i>Tidak</i>	Tidak ada riwayat badai
	<i>Any</i>	Semua kategori <i>storm climate</i>

HASIL DAN PEMBAHASAN

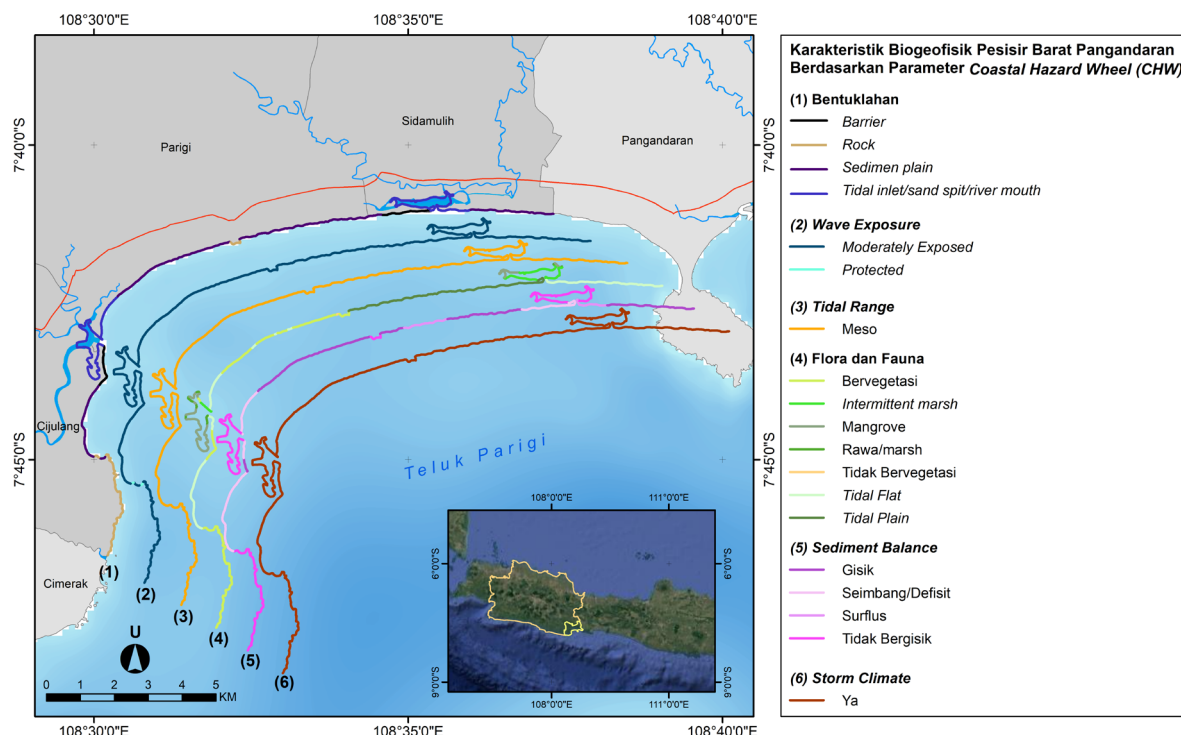
Karakteristik Lokasi Kajian Berdasarkan Parameter CHW

A. Tatanan Geologis (Geological Layout)

Berdasarkan klasifikasi bentuklahan pada **Tabel 2**, lokasi penelitian terdiri atas empat jenis bentuklahan utama. Bentuklahan ini dikelompokkan dengan kode yang spesifik. Pertama, *rock platform* atau pantai berbatu, disimbolkan dengan R, merupakan daratan batuan yang terkikis oleh ombak. Kedua, *sediment plain* atau dataran sedimen, disimbolkan dengan PL, adalah dataran rendah yang terbentuk dari endapan material. Ketiga, *barrier* atau penghalang, dengan simbol BA, merujuk pada daratan pasir yang berfungsi melindungi pantai dari energi gelombang. Terakhir, *tidal inlet/sand spit/river mouth*, disimbolkan dengan TSR, adalah area dinamis di mana air laut dan air tawar bertemu, mencakup celah pasang surut, gosong pasir, dan muara sungai. Setiap bentuklahan ini

mencerminkan proses geomorfologi pesisir yang berbeda dan saling berinteraksi di wilayah penelitian.

Sediment plain mendominasi dengan panjang 14.473 meter dengan material pasirlanauan di sepanjang Pantai Parigi hingga Pangandaran dan lempungpasiran di sekitar rawa-rawa muara Sungai Citonjong. Kemudian diikuti *tidal inlet* sepanjang 14.302 meter yang tersebar ke di muara Sungai Citonjong dan Sungai Cirumang. Dua lokasi utama *rock platform* terletak di Pantai Batu Hiu (450 meter) dan sisi barat Pantai Cijulang (565 meter). Pembentukan *platform* ini menghasilkan morfologi landai yang mencirikan interaksi dinamis antara batuan beku dan hidrodinamika pesisir. *Barrier* terlihat pada sebagian kecil di Kecamatan Sidamulih dan Cipulang. Dokumentasi visual dan spasial variasi bentuklahan ini dapat dilihat pada **Gambar 3**, yang memberikan representasi komprehensif dari kompleksitas geomorfologi area studi.



Gambar 3. Karakteristik Biogeofisik Pesisir Barat Pangandaran Berdasarkan Parameter *Coastal Hazard Wheel* (CHW) (Penulis, 2024)

Tabel 3. Ketinggian Gelombang di Pesisir Selatan Pangandaran Tahun 2018 – 2023 (BMKG, 2024)

Bulan	Tinggi (m)	Klasifikasi
Januari	1 – 1,5 m	Terlindungi / <i>Protected</i>
Februari	1 – 1,5 m	Terlindungi / <i>Protected</i>
Maret	0,75 – 1,5 m	Terlindungi / <i>Protected</i>
April	1 – 2 m	Terlindungi / <i>Protected</i>
Mei	1,25 – 2 m	Terlindungi / <i>Protected</i>
Juni	1,25 – 2,5 m	Terpapar sedang / <i>Moderately exposed</i>
Juli	1,5 – 2,5 m	Terpapar sedang / <i>Moderately exposed</i>
Agustus	1,5 – 2,5 m	Terpapar sedang / <i>Moderately exposed</i>
September	1,5 – 2,5 m	Terpapar sedang / <i>Moderately exposed</i>
Oktober	1,25 – 2 m	Terlindungi / <i>Protected</i>
November	1 – 2 m	Terlindungi / <i>Protected</i>
Desember	1 – 2 m	Terlindungi / <i>Protected</i>

B. Paparan Gelombang (*Wave Exposure*)

Parameter kedua adalah paparan gelombang. Gelombang berdampak signifikan terhadap morfologi wilayah pesisir (Israil et al., 2023). Gelombang dan arus laut mengubah karakteristik pantai melalui erosi pantai. Pesisir Kabupaten Pangandaran cenderung mengalami ketinggian gelombang signifikan yang lebih tinggi pada musim kemarau dibandingkan pada musim hujan. Ketinggian gelombang signifikan rata-rata bulanan selama periode 2018-2023 paling tinggi mencapai 2,5 meter dan terjadi pada bulan Juli-Agustus-September (JAS), sesuai dengan puncak musim kemarau. Tinggi gelombang signifikan terendah cenderung terjadi pada bulan Desember hingga Maret, sesaat setelah puncak musim hujan terjadi dengan ketinggian rata-rata mencapai dua meter. Paparan gelombang di lokasi penelitian diklasifikasikan menjadi terlindungi dan terpapar sedang. Adapun data paparan gelombang temporal (2018 – 2023)

disajikan melalui **Tabel 3**. Secara spasial, pantai dengan kategori paparan gelombang terpapar sedang umumnya terdapat pada bentuklahan gisik. Adapun kategori paparan terlindungi terdapat pada bentuklahan pantai bertebing terjal khususnya di wilayah Batukaras. Sebaran klasifikasi paparan gelombang secara visual disajikan pada **Gambar 3**.

C. Rentang Pasang Surut (*Tidal range*)

Fluktuasi ketinggian muka air laut (pasang – surut) disebabkan oleh gaya gravitasi bulan dan matahari terhadap permukaan bumi (Lolong & Masinambow, 2011). Pasang surut mampu mempengaruhi fungsi ekosistem pesisir yang dapat berdampak pada kualitas lingkungan (Anurogo et al., 2018). Dalam perspektif morfodinamika, rentang pasang surut didefinisikan sebagai perbedaan tinggi antara pasang tertinggi dan surut terendah (Schwartz, 2006). Studi ini menggunakan

Highest Astronomical Tide (HAT) sebagai pasang tertinggi dan *Lowest Astronomical Tide* (LAT) sebagai surut terendah dengan mengecualikan kondisi cuaca ekstrem.

Nilai pasang surut di Pesisir Barat Pangandaran bulan Juli – Agustus bervariasi namun masih termasuk dalam rentang *mesotidal* (**Tabel 4**). Karakteristik rentang pasang surut *mesotidal* dan *microtidal* memang umum dijumpai di perairan Indonesia dan Malaysia (Appelquist, 2013). Rentang pasang surut terbesar terdapat di sekitar wilayah Muara Cikembulan dengan nilai 227,06 cm. Aliran air serta suplai sedimen yang dibawa hingga ke Muara Cikembulan banyak mempengaruhi pasang surut di perairan laut sekitarnya. Sebaran spasial rentang pasang surut di lokasi penelitian disajikan pada **Gambar 3**.

D. Flora dan Fauna

Eksistensi flora dan fauna pesisir merupakan komponen biotik yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan mitigasi bencana. Kelompok vegetasi berupa mangrove, mangrove asosiasi maupun non-mangrove diketahui dapat mengurangi risiko bencana dengan cara menurunkan kecepatan gelombang, mencegah gelombang pasang, mengurangi abrasi, dan memperpanjang garis pantai (Gijón Mancheño et al., 2024). Selain itu, vegetasi ini secara langsung dapat meredam gelombang melalui karakter fisiknya. Secara tidak langsung, kondisi ini berkontribusi melalui stabilitas dan pembentukan sedimen untuk meminimalkan kerusakan (Sigren et al., 2014). Beberapa jenis vegetasi pantai yang dijumpai di lokasi kajian digambarkan pada **Tabel 5**.

E. Keseimbangan Sedimen (*Sediment Balance*)

Keseimbangan sedimen merupakan parameter morfodinamika utama untuk mengklasifikasikan garis pantai yang dibagi menjadi dua kategori, yaitu surplus dan

defisit (Appelquist et al., 2016). Analisis keseimbangan sedimen menjadi penting karena perubahan garis pantai yang dipengaruhi oleh pasang surut, gelombang, arus pantai, dan aktivitas manusia dapat mengancam struktur di kawasan pantai (Dey et al., 2021). Dalam studi ini, keseimbangan sedimen dihitung berdasarkan perubahan garis pantai dari tahun 2006 hingga 2023 menggunakan citra Sentinel dan Landsat, yang dianalisis dengan metode *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) (Chalov et al., 2017; Hossen & Sultana, 2023; Zoysa et al., 2023). *Net Shoreline Movement* (NSM) diterapkan untuk mengukur jarak antara garis dasar dan garis pantai terbaru dalam satuan meter (Hossen & Sultana, 2023).

Pesisir barat Pangandaran memiliki empat kategori keseimbangan sedimen: seimbang/defisit, surplus, gisik, dan non-gisik (**Gambar 3**). Kecamatan Cijulang memiliki fenomena erosi yang terjadi akibat arus susur pantai (*longshore current*) dan diperkuat oleh morfologi pantai landai dan berkelok. Sementara itu, area sekitar muara Cikembulan mengalami akresi karena pasokan sedimen dari hulu.

Fenomena erosi yang ditandai dengan terkikisnya pantai, akar pohon yang terekspos, dan pengikisan tanah terutama dijumpai di sepanjang pantai Cijulang dan Batukaras (**Gambar 5**). Sebagai upaya adaptasi, masyarakat lokal melakukan peninggian permukaan tanah dengan pasir dan mengembangkannya menjadi objek wisata. Hal ini menunjukkan kemampuan beradaptasi sekaligus memanfaatkan kondisi tersebut untuk mendukung ekonomi lokal, terutama kaitannya dengan menghadapi dampak perubahan iklim (Septiarani & Handayani, 2020).

F. Storm Climate

Wilayah studi merupakan area yang berpotensi terkena siklon tropis. Berdasarkan data historis, terdapat beberapa siklon tropis yang mempengaruhi perairan selatan Jawa diantaranya siklon Dahlia (2017), siklon

Tabel 4. Rentang Pasang Surut di Pesisir Barat Pangandaran (Olahdata, 2024)

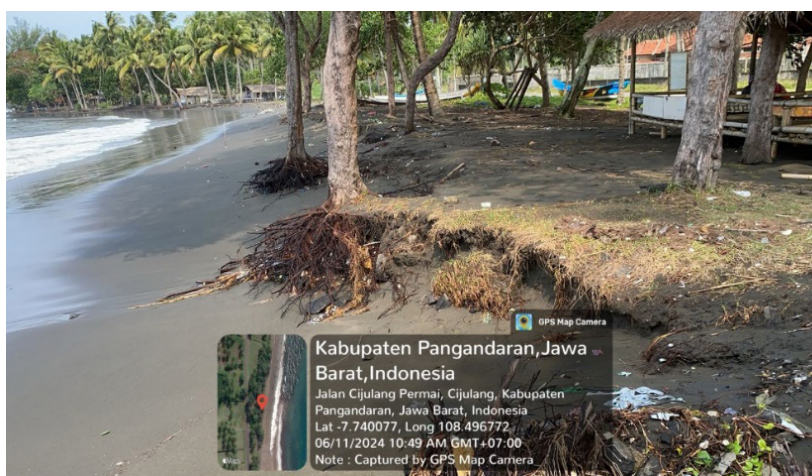
Lokasi	Koordinat		Rentang Pasang Surut (cm) 2023		Rata-rata (cm)	Klasifikasi Pasang surut
	X	Y	Juli	Agustus		
Pantai Batukaras	-7,749082	108,499457	202,07	214,6	208,34	Mesotidal
Muara Cijulang	-7,722381	108,502699	215,11	210,35	212,73	Mesotidal
Pantai Batuhui (a)	-7,699289	108,517230	202,95	213,16	208,06	Mesotidal
Pantai Batuhui (b)	-7,692866	108,537650	202,95	217,68	210,32	Mesotidal
Pantai Cibenda	-7,686923	108,567019	202,95	217,68	210,32	Mesotidal
Muara Cikembulan	-7,684775	108,593652	216,85	237,27	227,06	Mesotidal

Tabel 5. Jenis-Jenis Vegetasi Pantai di Gisik Pantai Teluk Parigi (Survei Lapangan, 2024)

No.	Species	Famili
1	<i>Ipomoea pes-caprae</i> (L.) Sweet.	<i>Convolvulaceae</i>
2	<i>Spinifex littorea</i>	<i>Poaceae</i>
3	<i>Pandanus tectorius</i> Parkinson ex. Z.	<i>Pandanaceae</i>
4	<i>Acanthus ilicifolius</i> L.	<i>Acanthaceae</i>
5	<i>Calotropis gugantea</i> L. Dryander	<i>Asclepiadaceae</i>



Gambar 4. Vegetasi di Gisik Pantai Teluk Parigi (a) *Spinifex littorea* dan *Ipomoea pes-caprae* (L.) Sweet. (b) (Penulis, 2024)



Gambar 5. Kenampakan Abrasi di Pesisir Cijulang terekam pada bulan Juni, 2024 (Penulis, 2024)

Flamboyan (2018) dan bibit siklon seperti siklon tropis 94W (2021). Oleh karena itu, kondisi angin, gelombang, dan hujan ekstrem secara signifikan mempengaruhi morfodinamika pesisir (Mangor et al., 2017; Appelquist & Halsnæs, 2015). Sistem klasifikasi *Coastal Hazard Wheel* membedakan antara lokasi dengan dan tanpa aktivitas siklon tropis, tanpa memperhatikan frekuensinya. Visualisasi parameter *storm climate* digambarkan melalui **Gambar 3**.

Identifikasi Bahaya Kepesisiran Menggunakan CHW

Masing-masing karakteristik penyusun wilayah kepesisir berinteraksi menghasilkan dinamika yang mampu mempengaruhi wilayah pesisir. Misalnya, bentuklahan bersama dengan paparan gelombang mampu mempengaruhi keseimbangan sedimen di wilayah pesisir. Keberadaan *storm climate* dalam kondisi ekstrem mampu merusak habitat flora dan fauna. Sementara itu, rusaknya vegetasi (flora) khususnya yang berfungsi sebagai *barrier* pelindung mampu memicu kerusakan ekosistem darat lain apabila rentang pasang surut berlangsung intens. Berdasarkan asumsi tersebut, analisis CHW mengidentifikasi 5 jenis bahaya kepesisir yaitu: kerusakan ekosistem, inudasi bertahap, intrusi air laut, erosi, dan banjir. Distribusi tingkat bahaya kepesisir per segmen garis pantai di lokasi penelitian ditunjukkan melalui **Gambar 6**.

A. Kerusakan Ekosistem

Berdasarkan hasil analisis data, tingkat bahaya gangguan ekosistem dikategorikan menjadi dua, yaitu rendah dan sedang. Penilaian bahaya gangguan ekosistem didasarkan pada kompleksitas, sensitivitas, dan respons ekosistem pesisir terhadap perubahan iklim (Appelquist, 2013). Tingkat bahaya rendah terdapat di Kecamatan Cijulang dan Parigi, sedangkan tingkat bahaya sedang berada di ketiga kecamatan terutama di Kecamatan Sidamulih.

Ekosistem Nipah dan Mangrove yang seringkali dijumpai di Muara Cikembulan dan Cijulang sangat penting bagi masyarakat pesisir. Ekosistem tersebut menyediakan sumber daya alam sekaligus melindungi pantai dari abrasi, badai, dan banjir. Ancaman kerusakan akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim mengancam keberlanjutan ekosistem ini yang akan berdampak pada kondisi ekonomi, sosial, dan budaya masyarakat setempat.

B. Inudasi Bertahap

Inudasi bertahap merupakan jenis yang berlangsung dalam jangka waktu lama (*slow on set*) dan seringkali didefinisikan sebagai sebuah proses dibandingkan kejadian (van der Geest & van den Berg, 2021). Perubahan iklim yang memicu kenaikan permukaan air

laut meningkatkan risiko inudasi bertahap khususnya di wilayah *low lying coastal* seperti di Pesisir Pangandaran (elevasi 0 – 7 m). Berdasarkan pengolahan data, pesisir pangandaran terbagi ke dalam dua kategori bahaya yaitu rendah dan tinggi. Bahaya rendah terdapat pada wilayah Batukaras dan Batuhiu yang memiliki karakteristik material penyusun keras dengan kemiringan lebih dari 20%. Adapun tingkat bahaya tinggi dijumpai pada seluruh segmen gisik Pesisir Barat Pangandaran.

C. Intrusi Air Laut

Intrusi air laut juga dapat dikategorikan sebagai jenis bahaya *slow on set*. Karakteristik tekstur tanah pasir lanauan dan lempung pasir menjadi air laut mudah lolos ke dalam air tanah. Intrusi air laut dapat berdampak negatif khususnya pada tanaman pangan yang sensitif terhadap salinitas, seperti padi dan sayuran sehingga dapat mengalami penurunan produktivitas akibat peningkatan kandungan garam dalam tanah.

D. Erosi

Klasifikasi bahaya erosi pantai menunjukkan bahwa daerah di sepanjang pantai Barat Pangandaran memiliki tiga kategori bahaya: rendah, tinggi, dan sangat tinggi. Kecamatan Sidamulih memiliki tingkat bahaya erosi tinggi dan sangat tinggi, sedangkan Kecamatan Parigi dan Cijulang memiliki tingkat bahaya erosi rendah, tinggi, dan sangat tinggi. Tingkat bahaya ini dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu karakteristik sedimentologi (dominasi pasir lanau dan endapan lempung pasir) dan regime gelombang dengan ketinggian 0,75 – 2 meter yang dikategorikan sebagai paparan sedang.

Manifestasi erosi paling signifikan teramati di kawasan Cikembulan dan Muara Cijulang, menghasilkan degradasi ekosistem mangrove jenis *Avicennia sp.* dan Nipah (*Nypa fruticans*). Kondisi ini berimplikasi

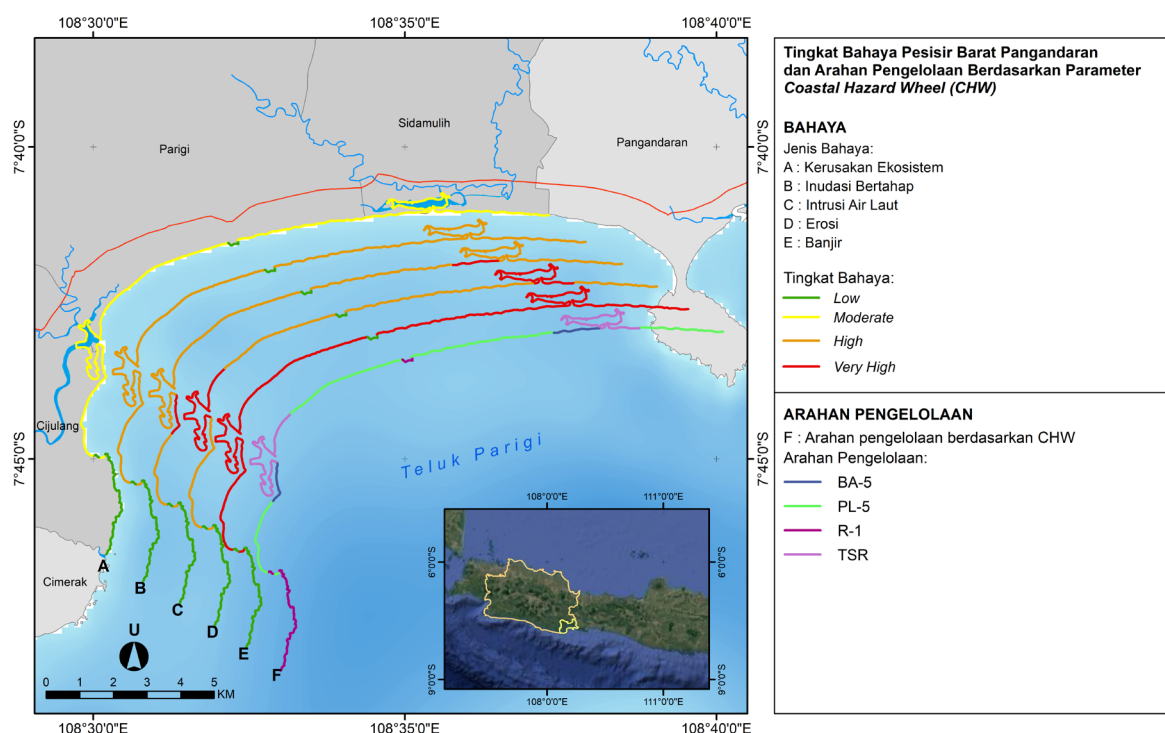
terhadap penurunan fungsi ekologis dan stabilitas pesisir. Selain itu, berpotensi menimbulkan efek domino yang meluas, mencakup aspek ekologis berupa penurunan biodiversitas dan aspek sosial-ekonomi melalui deteriorasi infrastruktur pesisir serta destabilisasi pemukiman.

E. Banjir

Analisis tingkat bahaya banjir di Pantai Barat Pangandaran meliputi dua kategori, yaitu rendah dan sangat tinggi. Wilayah dengan tingkat bahaya rendah terkonsentrasi di Kecamatan Cijulang dan Parigi, yang dicirikan oleh lereng yang curam dengan bentangalam berbatu. Sebaliknya, sebagian besar wilayah pesisir di Kecamatan Sidamulih, Parigi, dan Cijulang memiliki tingkat bahaya yang sangat tinggi, terutama pada wilayah dengan bentuklahan dataran sedimen landai dan pasang surut. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah pesisir barat Pangandaran sangat rentan terhadap banjir, terutama pada saat musim hujan dan cuaca ekstrem.

Implementasi Nature-Based Solution dalam Penilaian Tingkat Bahaya CHW

Berdasarkan penilaian CHW, kode bahaya di Pesisir Barat Pangandaran dikelompokkan ke dalam 4 (empat) jenis berbeda yaitu BA-5, PL-5, R-1 dan TSR. Kode tersebut memiliki beragam rekomendasi pengelolaan namun tidak semua dapat diterapkan secara langsung di lokasi penelitian. Oleh karena itu, penerapan rekomendasi CHW berbasis NbS di sepanjang Pantai Barat Pangandaran dianalisis berdasarkan tingkat intervensi manusia serta indeks prioritas. Berdasarkan analisis, ditemukan berbagai variasi intervensi dengan indeks CHW berada pada kategori prioritas sedang hingga tinggi. Fokus utama penelitian terletak pada indeks TSR yang menunjukkan urgensi restorasi lahan basah (*wetland*), mengingat aktivitas antropogenik yang intensif berpotensi mendegradasi ekosistem mangrove dan lahan basah eksisting.



Gambar 6. Tingkat Bahaya Pesisir Barat Pangandaran dan Arah Pengelolaan Berdasarkan Parameter *Coastal Hazard Wheel* (CHW) (Penulis, 2024)

Tabel 6. Matriks Kesesuaian NbS terhadap Indeks Arahkan Pengelolaan CHW Berdasarkan Skala Prioritas (Penulis, 2024)

Tingkat Intervensi Manusia	Nature Based Solutions	Indeks CHW			
		TSR	BA-5	R-1	PL-5
Rendah	Konservasi Mangrove	1	1	1	1
Sedang	Restorasi Gumuk	1	1	1	1
	Regenerasi Hutan	1	1	1	1
	Nutrisi Pantai	1	1	1	1
	Pemulihan Transpor Sedimen	2	3	1	3
	Restorasi Lahan Basah	3	1	1	1
	Restorasi Mangrove	3	1	1	1
Tinggi	Penghalang Pantai	1	1	1	3
	Sistem Infrastruktur Drainase	1	1	1	1
	Teras Dinding Batu	1	3	1	1

1 = *Low priority*2 = *Medium priority*3 = *High priority*TSR = *Tidal inlet/sand spit/river mouth* (area pesisir yang sangat dinamis, terbentuk dari interaksi antara air pasang-surut, aliran sungai, dan pergerakan sedimen)BA-5 = *Barrier* (penghalang)R-1 = *Sloping hard rock coast* (pantai berbatu keras miring)PL-5 = *Sediment plain* (dataran sedimen)

Kompleksitas permasalahan lingkungan semakin nyata dengan konversi lahan yang masif, di mana area eksisting dialihfungsikan menjadi permukiman dan tambak, yang secara signifikan memperlemah struktur ekosistem pesisir. Indeks BA-5 mengungkapkan kebutuhan mendesak akan pemulihan transport sedimen dan rehabilitasi teras dinding batu (*Grey infrastructure*) dalam skala tinggi. Fenomena sedimentasi dari aliran sungai yang bermuara ke laut berpotensi menyebabkan pendangkalan, yang selanjutnya meningkatkan risiko inudasi di kawasan pesisir. Indeks PL-5 menggarisbawahi pentingnya pembangunan penghalang pantai dan optimalisasi transport sedimen sebagai intervensi prioritas. Dinamika sedimen yang dibawa oleh sungai dan terakumulasi melalui arus laut, menjadi fokus perhatian dalam upaya mitigasi. Menariknya, indeks R-1 menunjukkan kondisi kawasan pesisir yang relatif stabil, tidak memerlukan intervensi prioritas mengingat tingkat keamanannya yang tinggi.

Berdasarkan **Tabel 6**, implementasi pengelolaan pesisir berbasis NbS yang telah dilakukan di sepanjang Pantai Barat Pangandaran mencerminkan sebagian masyarakat memiliki kesadaran terhadap urgensi mitigasi dampak pesisir. Pendekatan melalui *Grey infrastructure* seperti tanggul, pemecah gelombang, dan bendungan masih dominan diimplementasikan sebagai solusi proteksi pesisir dari erosi dan banjir di pesisir Barat Pangandaran. Meskipun demikian, penerapan ini hanya memberikan perlindungan jangka pendek dengan sejumlah konsekuensi ekologis dan sosio-ekonomi.

Terdapat tiga implikasi utama dari pendekatan *Grey Infrastructure* tersebut. Pertama, degradasi ekosistem yang disebabkan oleh modifikasi hidrodinamika pesisir dan pola sedimentasi yang mengganggu distribusi nutrisi. Hal ini berpengaruh secara langsung terhadap kerusakan ekosistem kritis seperti terumbu karang, padang lamun, dan formasi mangrove. Kedua, dampak sosial-ekonomi yang merugikan nelayan, ditandai dengan penurunan produktivitas perikanan akibat degradasi habitat yang berkorelasi signifikan dengan penurunan pendapatan masyarakat pesisir. Ketiga, persoalan keberlanjutan (*sustainability*) *Grey Infrastructure* dalam jangka panjang, mengingat tingkat intervensi yang tinggi

memerlukan biaya pemeliharaan substansial dan berpotensi mengakselerasi degradasi lingkungan tanpa upaya restorasi fungsi ekosistem alami.

Berdasarkan pada kompleksitas permasalahan tersebut, penerapan NbS di pantai Barat Pangandaran belum berjalan optimal. Hal ini dicirikan dengan ketergantungan pada pendekatan *Grey infrastructure* yang hanya menawarkan solusi jangka pendek. Indikator-indikator seperti TSR, BA-5, dan PL-5 menunjukkan urgensi restorasi lahan basah dan perbaikan transport sedimen. Permasalahan tersebut diperburuk oleh konversi lahan dan aktivitas antropogenik yang mengancam ekosistem serta menurunkan produktivitas perikanan. Mengingat keefektifan NbS sangat bergantung pada konteks seperti tantangan sosial yang dihadapi, tipe ekosistem, karakteristik bentang laut, sistem sosial-ekonomi-budaya, dan komposisi kelompok pemangku kepentingan (IUCN, 2020). Oleh karena itu, implementasi NbS memerlukan dukungan pengambil keputusan berbasis informasi geografis yang mengintegrasikan data fisik, sosio-ekonomi, dan ekologi untuk identifikasi komunitas pesisir yang rentan dan evaluasi komprehensif penerapan NbS (Setiawati et al., 2024).

Kesadaran masyarakat masih perlu dikembangkan agar proses implementasi NbS dapat berjalan dengan baik. Sebagai contoh berdasarkan survey dari penelitian ini, pelestarian terumbu karang dan padang lamun di Kabupaten Pangandaran telah ditangani melalui manajemen ekosistem dengan kebijakan yang diatur dalam Peraturan Bupati Pangandaran Nomor 43 Tahun 2014 Pasal 57, hanya 42,9% masyarakat yang mengetahui adanya peraturan tersebut. Oleh karena itu adanya peran dari pemerintah diperlukan untuk meningkatkan kapasitas warga setempat. Analisis dampak lingkungan yang menyeluruh menjadi langkah krusial sebelum menerapkan NbS untuk memastikan dampaknya terhadap habitat dan ekosistem. Setiap intervensi yang direncanakan harus bisa mencapai target perbaikan ekologi tanpa merugikan kondisi habitat dan masyarakat. Meskipun demikian, metode penilaian ini masih terus dikembangkan untuk mendapatkan teknik evaluasi yang baik (Boulenger et al., 2024).

KESIMPULAN

Berdasarkan identifikasi bahaya banjir, erosi, intrusi air laut, inudasi bertahap, dan kerusakan ekosistem menghasilkan arahan pengelolaan CWH berupa BA-5, PL-5, R-1, dan TSR. Adapun rekomendasi NbS yang dilakukan untuk keempat indeks tersebut, yaitu fokus pada perbaikan transport sedimen dan rehabilitasi dinding batu untuk mengurangi pendangkalan dan risiko banjir pada indeks BA-5, penanganan utama melalui pembangunan penghalang pantai dan optimalisasi pergerakan sedimen pada indeks PL-5, Pemulihan lahan basah untuk memperbaiki ekosistem mangrove yang terdegradasi akibat aktivitas manusia pada indeks TSR, dan indeks R-1 tanpa memerlukan tindakan prioritas. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut pada masing-masing parameter biogeofisik untuk menentukan prioritas penanganan *Nature based Solution* untuk melahirkan analisis yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih kepada Pemerintah Kabupaten Pangandaran atas izin yang telah diberikan untuk melakukan penelitian. Tanpa dukungan, kerjasama, dan penyediaan data dari instansi pemerintah setempat, penelitian ini tidak akan dapat dilaksanakan dengan baik. Selanjutnya, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada anggota tim yang telah berdiskusi dan membantu mengumpulkan dan analisis data. Diskusi-diskusi ini sangat berharga dalam memperkaya perspektif dan mendalami isu-isu yang dihadapi oleh masyarakat di Pangandaran. Terakhir, penulis menyatakan bahwa penelitian ini tidak didanai oleh sumber pendanaan eksternal.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis Pertama mendesain metode penelitian, analisis data, dan menulis naskah publikasi; **Penulis Kedua** menganalisis data, interpretasi hasil, menulis naskah publikasi dan visualisasi data; dan **Penulis Ketiga & Keempat** mengintegrasikan metode, interpretasi hasil, dan menulis naskah publikasi; **Penulis Kelima & Keenam** mengumpulkan dan mengolah data.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Adalya, N. M., & Mutaqin, B. W. (2022). Modeling of hydro-oceanographic parameters and its possible impact on coral reef cover in Derawan Island waters, East Kalimantan, Indonesia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 4191–4203. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01355-0>
- Albert, S., Bronen, R., Tooler, N., Leon, J., Yee, D., Ash, J., Boseto, D., & Grinham, A. (2018). Heading for the hills: climate-driven community relocations in the Solomon Islands and Alaska provide insight for a 1.5 °C future. *Regional Environmental Change*, 18(8), 2261–2272. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1256-8>
- Anurogo, W., Lubis, M. Z., Khakhim, N., Prihantarto, W. J., & Cannagia, L. R. (2018). Pengaruh pasang surut terhadap dinamika perubahan hutan mangrove di kawasan Teluk Banten. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(2), 130–139.

- Appelquist, L. R. (2013). Generic framework for meso-scale assessment of climate change hazards in coastal environments. *Journal of Coastal Conservation*, 17(1), 59–74. <https://doi.org/10.1007/s11852-012-0218-z>
- Appelquist, L. R., Balstrøm, T., & Halsnæs, K. (2016). *Managing Climate Change Hazards in Coastal Areas - Main Manual*. United Nations Environment Programme.
- Appelquist, L. R., & Halsnæs, K. (2015). The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate. *Journal of Coastal Conservation*, 19(2), 157–179. <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0379-7>
- Bhable, S., Kayte, S., Mali, S., Kayte, J. N., & Maher, R. (2015). A Review Paper on Coastal Hazard. *Journal of Engineering Research and Applications*, 5(2), 83–93.
- BNPB. (2021). *Dokumen KRB Provinsi Jawa Barat*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). [https://inarisk.bnpb.go.id/pdf/Jawa Barat/Dokumen KRB Prov. Jawa Barat_final draft.pdf](https://inarisk.bnpb.go.id/pdf/Jawa%20Barat/Dokumen%20KRB%20Prov.%20Jawa%20Barat_final%20draft.pdf)
- Boulenger, A., Lanza, P., Langedock, K., & Semeraro, A. (2024). Nature - based solutions for coastal protection in sheltered and exposed coastal waters : integrated monitoring program for baseline ecological structure and functioning assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(3), 316. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12480-x>
- Centeno, E. F. (2020). The socio-political construction of climate change: Looking for paths to sustainability and gender justice. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/SU12083382>
- Chalov, S. R., Bazilova, V. O., & Tarasov, M. K. (2017). Suspended sediment balance in Selenga delta at the late XX–early XXI century: Simulation by LANDSAT satellite images. *Water Resources*, 44(3), 463–470. <https://doi.org/10.1134/S00978078171030071>
- Chang, S. W., Clement, T. P., Simpson, M. J., & Lee, K. K. (2011). Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion? *Advances in Water Resources*, 34(10), 1283–1291. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2011.06.006>
- Chen, Y., & Mai, R. (2024). Rising Tides: Long term Impact of Sea Level Rise on Marine Ecosystems. *International Journal of Marine Science*, 14(2), 102–110. <https://doi.org/10.5376/ijms.2024.14.0013>
- Daniel, E., Harari, J., de Camargo, R., Soares, S., Mascagni, M. L., & Fetter Filho, A. F. H. (2025). Sea level variation along the Brazilian coastline from the perspective of climate change. *Regional Studies in Marine Science*, 89, 104309. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2025.104309>
- de Luca, C., Naumann, S., Davis, M., & Tondelli, S. (2021). Nature-based solutions and sustainable urban planning in the european environmental policy framework: Analysis of the state of the art and recommendations for future development. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13095021>
- Dey, M., S. Priyaa, S., & Jena, B. K. (2021). A Shoreline Change Detection (2012 - 2021) and forecasting using Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Tool. *Indonesian Journal of Geography*, 53(2), 295–309. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22146/ijg.56297>
- Gao, G. F., Song, L., Zhang, Y., & Chu, H. (2024). Expedited loss of soil biodiversity in blue carbon ecosystems caused by rising sea levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 191, 109348. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2024.109348>
- Gijón Mancheño, A., Vuik, V., van Wesenbeeck, B. K., Jonkman, S. N., van Hespén, R., Moll, J. R., Kazi, S., Urrutia, I., & van Ledden, M. (2024). Integrating mangrove growth and failure in coastal flood protection designs. *Scientific Reports*, 14(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58705-4>
- Gómez Martín, E., Mánuez Costa, M., & Schwerdtner Mánuez, K. (2020). An operationalized classification of Nature Based Solutions for water-related hazards: From theory to practice.

- Ecological Economics*, 167, 106460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106460>
- Gopinath, G., Thodi, M. F., Surendran, U. P., Prem, P., Parambil, J. N., Alataway, A., Al-Othman, A. A., Dewidar, A. Z., & Mattar, M. A. (2023). Long-Term Shoreline and Islands Change Detection with Digital Shoreline Analysis Using RS Data and GIS. In *Water* (Vol. 15, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/w15020244>
- Hossen, M. F., & Sultana, N. (2023). Shoreline change detection using DSAS technique: Case of Saint Martin Island, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 100943. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2023.100943>
- Ichsari, L. F., Handoyo, G., Setiyono, H., Ismanto, A., Marwoto, J., Yusuf, M., & Rifai, A. (2020). Studi Komparasi Hasil Pengolahan Pasang Surut Dengan 3 Metode (Admiralty, Least Square Dan Fast Fourier Transform) Di Pelabuhan Malahayati, Banda Aceh. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(2), 121–128. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i2.7985>
- Israil, Al Imran, H., Haidir, Lisdawati, Rahmat, A., & Virlayani, A. (2023). Analisis Karakteristik Gelombang Dan Proses Abrasi Di Pesisir Pantai Popo Galesong Selatan. *Jurnal Teknik Hidro*, 16(2), 71–80.
- IUCN. (2020). *Global standard for nature-based solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*. IUCN. <https://portals.iucn.org/library/node/48923>
- Kim, K. H., & Agnes, W. (2016). A review of coastal hazard management performances. *Applied Engineering, Materials and Mechanics*, 141–146. https://doi.org/10.1142/9789813146587_0022
- Lolong, M., & Masinambow, J. (2011). Penentuan Karakteristik dan Kinerja Hidro Oceanografi Pantai (Study Kasus Pantai Inobonto). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 1(2), 127–134.
- Mangor, K., Drønen, N. K., Kærgaard, K. H., & Kristensen, S. E. (2017). Shoreline management guidelines. In *DHI Water and Environment* (Issue April).
- Micallef, S., Micallef, A., & Galdies, C. (2018). Application of the Coastal Hazard Wheel to assess erosion on the Maltese coast. *Ocean & Coastal Management*, 156, 209–222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.06.005>
- Motta Zanin, G., Muwafu, S. P., & Máñez Costa, M. (2024). Nature-based solutions for coastal risk management in the Mediterranean basin: A literature review. *Journal of Environmental Management*, 356, 120667. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120667>
- Nevermann, H., Becerra Gomez, J. N., Fröhle, P., & Shokri, N. (2023). Land loss implications of sea level rise along the coastline of Colombia under different climate change scenarios. *Climate Risk Management*, 39, 100470. <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2022.100470>
- Norton, R. K., Buckman, S., Meadows, G. A., & Rable, Z. (2019). Using Simple, Decision-Centered, Scenario-Based Planning to Improve Local Coastal Management. *Journal of the American Planning Association*, 85(4), 405–423. <https://doi.org/10.1080/01944363.2019.1627237>
- Paulik, R., Stephens, S., Wild, A., Wadhwa, S., & Bell, R. G. (2021). Cumulative building exposure to extreme sea level flooding in coastal urban areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, 102612. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2021.102612>
- Rilov, G., David, N., Guy-Haim, T., Golomb, D., Arav, R., & Filin, S. (2021). Sea level rise can severely reduce biodiversity and community net production on rocky shores. *Science of The Total Environment*, 791, 148377. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148377>
- Rosendahl Appelquist, L. (2013). Generic framework for meso-scale assessment of climate change hazards in coastal environments. *Journal of Coastal Conservation*, 17(1), 59–74. <https://doi.org/10.1007/s11852-012-0218-z>
- Rosendahl Appelquist, L., & Halsnæs, K. (2015). The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate. *Journal of Coastal Conservation*, 19(2), 157–179. <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0379-7>
- Roth, S., Söderberg, L., Aspegren, H., & Haghighatafshar, S. (2024). The compound impact of rainfall, river flow and sea level on a watercourse through a coastal city: Methodology in making. *City and Environment Interactions*, 23, 100153. <https://doi.org/10.1016/J.CACINT.2024.100153>
- Roy, P., Pal, S. C., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Saha, A., & Shit, M. (2023). Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. *Journal of Environmental Management*, 330, 117187. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.117187>
- Schwartz, M. (2006). *Encyclopedia of coastal science*. Springer Science & Business Media.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Derczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskander, I., Kossin, J., & Lewis, S. (2021). *Weather and climate extreme events in a changing climate (Chapter 11)*.
- Septiarani, B., & Handayani, W. (2020). Community Group networking on the Community-based Adaptation measure in Tapak Village, Semarang coastal area. *Indonesian Journal of Geography*, 35(2), 181–189. <https://doi.org/10.22146/IJG.39053>
- Setiawati, M. D., Nandika, M. R., Hernawan, U. E., Rachman, H. A., Chatterjee, U., Adi, N. S., Alifatri, L. O., Eguchi, T., Supriyadi, I. H., Hanifa, N. R., Prayudha, B., Djamil, Y. S., Oktaviani, A., Wouthuyzen, S., Sulha, S., Renyaan, J., & Muslim, A. M. (2024). Application of coastal hazard index to advance nature based protection for coastal communities in the small islands. *Discover Applied Sciences*, 6(9), 462. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06164-x>
- Sigren, J. M., Figlus, J., & Armitage, A. R. (2014). *Coastal sand dunes and dune vegetation: Restoration, erosion, and storm protection*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134823563>
- Su, Q., Kambale, R. D., Tzeng, J. H., Amy, G. L., Ladner, D. A., & Karthikeyan, R. (2025). The growing trend of saltwater intrusion and its impact on coastal agriculture: Challenges and opportunities. *Science of The Total Environment*, 966, 178701. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2025.178701>
- Su, Q., Li, Z., Li, G., Zhu, D., & Hu, P. (2021). Application of the Coastal Hazard Wheel for Coastal Multi-Hazard Assessment and Management in the Guang-Dong-Hongkong-Macao Greater Bay Area. In *Sustainability* (Vol. 13, Issue 22). <https://doi.org/10.3390/su132212623>
- UNEP/MAP, & Bleu, P. (2020). *State of the Environment and Development in the Mediterranean*. UNEP/MAP. https://planbleu.org/wp-content/uploads/2021/04/SoED_full-report.pdf
- van der Geest, K., & van den Berg, R. (2021). Slow-onset events: a review of the evidence from the IPCC Special Reports on Land, Oceans and Cryosphere. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 50, 109–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.03.008>
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104528. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- Wang, X., Xu, L. L., Cui, S. H., & Wang, C. H. (2020). Reflections on coastal inundation, climate change impact, and adaptation in built environment: progresses and constraints. *Advances in Climate Change Research*, 11(4), 317–331. <https://doi.org/10.1016/J.ACCRE.2020.11.010>
- Wilson, G. A., Kelly, C. L., Briassoulis, H., Ferrara, A., Quaranta, G., Salvia, R., Detsis, V., Curfs, M., Cerda, A., El-Aich, A., Liu, H., Kosmas, C., Alados, C. L., Imeson, A., Landgrebe-Trinkunaite, R., Salvati, L., Naumann, S., Danwen, H., Iosifides, T., ... Zhang, P. (2017). Social Memory and the Resilience of

- Communities Affected by Land Degradation. *Land Degradation & Development*, 28(2), 383–400. <https://doi.org/10.1002/ldr.2669>
- Yang, D., Zhang, H., Wang, Z., Zhao, S., & Li, J. (2022). Changes in anthropogenic particulate matters and resulting global climate effects since the Industrial Revolution. *International Journal of Climatology*, 42(1), 315–330. <https://doi.org/10.1002/joc.7245>
- Zoysa, S., Basnayake, V., Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Kantamaneni, K., Muttill, N., Pawar, U., & Rathnayake, U. (2023). Analysis of Multi-Temporal Shoreline Changes Due to a Harbor Using Remote Sensing Data and GIS Techniques. *Sustainability (Switzerland)*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/su15097651>