Volume 19, No. 1, 2026

ISSN: 1907-9931 (print), 2476-9991 (online)

Pemetaan Indeks Bahaya Gelombang Ekstrem dan Abrasi Pantai Berbasis *Fuzzy Overlay* di Wilayah Pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah

Mapping the Hazard Index of Extreme Waves and Coastal Abrasion Using Fuzzy Overlay in the Coastal Area of Central Bengkulu Regency

Eko Nofridiansyah[1,4], Akbar Abdurrahman Mahfudz [1,4], Ana Ariasari[2,4], Yasser Wahyuddin[3]

[1]Program Studi Ilmu Kelautan Jurusan Peternakan Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu
[2]Program Studi Sains Perikanan Jurusan Peternakan Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu
Jalan WR. Supratman Raya Kandang Limun Bengkulu. Kec. Muara Bangka Hulu. Kota Bengkulu, 38371. Indonesia
[3]Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang, 50275. Indonesia
[4]Pusat Studi Geospasial Tropis Universitas Bengkulu
Gedung LPPM Jalan WR. Supratman Raya Kandang Limun Bengkulu. Kec. Muara Bangka Hulu. Kota Bengkulu, 38371. Indonesia

*Corresponding author email: ekonofridiansyah@unib.ac.id

Submitted: 18 March 2026 / Revised: 17 April 2026 / Accepted: 24 April 2026

http://doi.org/10.21107/jk.v19i1.33882

ABSTRAK

Wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah rentan terhadap bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai karena berhadapan langsung dengan Samudra Hindia. Penelitian ini bertujuan memetakan distribusi spasial indeks bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai serta mengidentifikasi area prioritas mitigasi di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan fuzzy overlay dalam Sistem Informasi Geografis (SIG) dengan mengintegrasikan lima parameter, yaitu tinggi gelombang, arus laut, tipologi pantai, bentuk garis pantai, dan tutupan vegetasi. Setiap parameter dinormalisasi ke dalam fungsi keanggotaan fuzzy, kemudian dioverlay untuk menghasilkan indeks bahaya yang diklasifikasikan menjadi kelas rendah, sedang, dan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa area bahaya terkonsentrasi pada wilayah pesisir Kecamatan Pondok Kelapa yang meliputi Desa Harapan, Padang Betuah, Pasar Pedati, Pekik Nyaring, dan Pondok Kelapa. Tidak terdapat kelas bahaya rendah pada seluruh area analisis, sehingga seluruh desa pesisir berada minimal pada kelas bahaya sedang. Kelas bahaya tinggi paling dominan teridentifikasi di Desa Pondok Kelapa dengan luas 75.2 ha. Berdasarkan hasil tersebut, Desa Pondok Kelapa ditetapkan sebagai prioritas utama mitigasi, diikuti oleh Padang Betuah dan Pekik Nyaring. Pendekatan fuzzy overlay efektif menggambarkan gradasi bahaya pesisir dan mendukung penetapan prioritas mitigasi berbasis spasial.

***Kata Kunci**: abrasi pantai; fuzzy overlay; gelombang ekstrem; indeks bahaya; pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah*

ABSTRACT

The coastal area of Central Bengkulu Regency is highly exposed to extreme waves and coastal abrasion due to its direct interaction with the Indian Ocean. This study aimed to map the spatial distribution of the extreme wave and coastal abrasion hazard index and to identify mitigation priority areas along the coast of Central Bengkulu. A fuzzy overlay approach within a Geographic Information System (GIS) was applied by integrating five key parameters: wave height, sea current, coastal typology, shoreline shape, and vegetation cover. Each parameter was normalized using fuzzy membership functions and combined to generate a hazard index classified into low, moderate, and high categories. The results show that hazard areas are concentrated along the coastal zone of Pondok Kelapa District, covering Harapan, Padang Betuah, Pasar Pedati, Pekik Nyaring, and Pondok Kelapa villages. No low-hazard areas were identified, indicating that all analyzed coastal villages fall at least within the moderate hazard category. The highest hazard was concentrated in Pondok Kelapa Village,

covering 75.2 ha. Based on these findings, Pondok Kelapa was identified as the top mitigation priority, followed by Padang Betuah and Pekik Nyaring. The study demonstrates that fuzzy overlay effectively captures the spatial gradation of coastal hazards and provides a practical basis for setting mitigation priorities.

Keywords: *coastal abrasion; coastal area Central Bengkulu Regency; extreme waves; fuzzy overlay; hazard index*

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan zona transisi yang dinamis karena menjadi ruang interaksi antara proses oseanografi, geomorfologi, atmosfer, dan aktivitas manusia. Dinamika tersebut menjadikan kawasan pesisir memiliki nilai ekologis dan ekonomi yang tinggi, tetapi sekaligus rentan terhadap berbagai bahaya, seperti erosi pantai, banjir pesisir, genangan gelombang, dan perubahan garis pantai (Handiani *et al.,* 2022; Tanim *et al.,* 2022). Dalam konteks pengelolaan wilayah pesisir, identifikasi bahaya secara spasial menjadi penting karena dampak gangguan pesisir tidak hanya terjadi pada ekosistem, tetapi juga pada infrastruktur, permukiman, aktivitas ekonomi, dan pemanfaatan ruang di kawasan sempadan pantai (Baučić, 2020; Contestabile & Vicinanza, 2020). Perkembangan teknologi geospasial juga telah mendorong penggunaan pendekatan berbasis GIS, penginderaan jauh, dan indeks kerentanan/bahaya untuk mendukung penilaian pesisir yang lebih operasional (Apostolopoulos & Nikolakopoulos, 2021; Hastuti *et al.,* 2022).

Salah satu ancaman utama pada pantai terbuka adalah gelombang ekstrem, yaitu kondisi ketika tinggi dan energi gelombang meningkat sehingga memperbesar tekanan hidrodinamika terhadap garis pantai. Gelombang berenergi tinggi berperan penting dalam pelepasan, pengangkutan, dan redistribusi sedimen, sehingga dapat mempercepat abrasi dan kemunduran garis pantai, terutama pada segmen pesisir yang berhadapan langsung dengan laut terbuka dan memiliki perlindungan alami terbatas (Irmawan *et al.,* 2024; Hastuti *et al.,* 2022). Abrasi pantai sendiri tidak ditentukan oleh satu faktor tunggal, tetapi oleh kombinasi gelombang, arus, bentuk garis pantai, tipologi pantai, konfigurasi geomorfologi, serta kondisi penutup lahan atau vegetasi pelindung (Baučić, 2020; Tanim *et al.,* 2022; Durap, 2024). Karena itu, penilaian bahaya pesisir berbasis satu parameter cenderung tidak memadai untuk menjelaskan variasi ancaman di sepanjang garis pantai.

Kabupaten Bengkulu Tengah merupakan salah satu wilayah pesisir yang mendesak untuk dikaji dalam konteks bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai. Wilayah ini memiliki garis pantai sekitar 21.8 km dan berhadapan langsung dengan Samudra Hindia, sehingga terpapar dinamika gelombang dan arus laut yang tinggi (Farid *et al.,* 2024). Pada kawasan pesisir yang terbuka seperti ini, tekanan gelombang dapat mempercepat transport sedimen dan meningkatkan kehilangan material pantai ketika laju pelepasan sedimen melebihi deposisinya (Irmawan *et al.,* 2024). Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa Bengkulu Tengah termasuk wilayah yang rentan terhadap gelombang ekstrem dan abrasi pantai, dengan abrasi yang telah berlangsung selama lebih dari dua dekade dan pada beberapa lokasi mencapai tingkat kerusakan yang berat (Suhendra *et al.,* 2023). Abrasi tersebut tidak hanya memengaruhi morfologi pesisir, tetapi juga telah menimbulkan kerusakan pada jalan, rumah penduduk, dan lahan produktif, bahkan menyebabkan hilangnya daratan pantai hingga puluhan meter (Suhendra *et al.,* 2023). Temuan ini menunjukkan bahwa abrasi di Bengkulu Tengah telah berkembang menjadi persoalan lingkungan dan tata ruang yang membutuhkan dasar analisis spasial yang lebih kuat.

Sejumlah penelitian terdahulu di Bengkulu Tengah umumnya masih berfokus pada perubahan garis pantai, evaluasi kerentanan abrasi, atau karakteristik fisik pantai pada lokasi tertentu (Farid *et al.,* 2024; Suhendra *et al.,* 2023). Kajian-kajian tersebut penting, tetapi belum sepenuhnya menghasilkan produk spasial yang dapat langsung digunakan untuk membedakan tingkat bahaya antarsegmen pesisir dan menetapkan prioritas mitigasi. Padahal, dalam pengurangan risiko bencana, informasi yang dibutuhkan bukan hanya keberadaan abrasi, tetapi juga distribusi tingkat bahayanya, segmen mana yang paling terpapar, dan lokasi mana yang perlu diprioritaskan untuk intervensi. Dalam kajian bahaya pesisir, pendekatan indeks telah banyak digunakan karena mampu mengintegrasikan berbagai parameter fisik ke dalam representasi spasial yang lebih operasional (Apostolopoulos & Nikolakopoulos, 2021; Handiani *et al.,* 2022). Namun, indeks konvensional umumnya masih menggunakan klasifikasi diskrit dengan batas kelas yang tegas, seperti rendah, sedang, dan tinggi.

Keterbatasan pendekatan diskrit adalah ketidakmampuannya merepresentasikan kondisi pesisir yang sesungguhnya bersifat gradual dan dipengaruhi oleh banyak faktor sekaligus. Variabel seperti gelombang, arus, bentuk garis pantai, dan vegetasi pelindung tidak selalu berubah secara tegas dari satu kelas ke kelas lainnya. Baučić (2020) menegaskan bahwa analisis kerentanan sering menghadapi variabel yang kontinu dan mengandung ketidakpastian, sehingga klasifikasi dengan batas yang kaku dapat menyederhanakan kondisi lapangan secara berlebihan. Tanim *et al.* (2022) juga menunjukkan bahwa normalisasi berbasis *fuzzy* lebih mampu mempertahankan variasi alami data dibandingkan teknik klasifikasi konvensional. Oleh sebab itu, pendekatan fuzzy overlay menjadi relevan untuk pemetaan bahaya gelombang ekstrem dan abrasi, karena memungkinkan integrasi beberapa parameter ke dalam satu indeks komposit yang lebih fleksibel dan representatif.

Dalam penelitian ini, tinggi gelombang dan arus laut digunakan untuk merepresentasikan energi hidrodinamika, sedangkan tipologi pantai, bentuk garis pantai, dan tutupan vegetasi digunakan untuk merepresentasikan keterpaparan geomorfologi dan kapasitas perlindungan alami pesisir. Penggunaan parameter-parameter tersebut sejalan dengan berbagai studi kerentanan pesisir yang menempatkan gelombang, perubahan garis pantai, geomorfologi, dan penutup lahan sebagai komponen penting dalam penilaian ancaman pesisir (Baučić, 2020; Hastuti *et al.,* 2022; Tanim *et al.,* 2022). Dengan mengintegrasikan parameter tersebut melalui *fuzzy overlay*, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan peta bahaya yang lebih realistis untuk mendukung penetapan prioritas mitigasi di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah.

Meskipun penelitian di Bengkulu Tengah telah menunjukkan adanya perubahan garis pantai, tekanan abrasi, dan pengaruh gelombang serta arus laut (Farid *et al.,* 2024; Suhendra *et al.,* 2023), kajian-kajian tersebut masih cenderung berdiri sendiri pada aspek perubahan garis pantai atau kerentanan abrasi, sehingga belum menghasilkan model spasial bahaya yang mengintegrasikan faktor hidrodinamika, geomorfologi pantai, dan perlindungan alami dalam satu indeks operasional. Dengan demikian, celah ilmiah penelitian ini terletak pada belum tersedianya pemetaan indeks bahaya gelombang ekstrim dan abrasi pantai berbasis *fuzzy overlay* pada skala lokal di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memetakan distribusi spasial indeks bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai serta mengidentifikasi area prioritas mitigasi di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah. Hasil penelitian diharapkan dapat menyediakan dasar analitis yang lebih terukur bagi pengelolaan wilayah pesisir dan mendukung penetapan strategi mitigasi yang lebih spesifik lokasi.

MATERI DAN METODE

Lokasi penelitian

Penelitian dilaksanakan di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah, Provinsi Bengkulu, yang secara langsung berhadapan dengan Samudra Hindia (**Gambar 1**). Wilayah ini dipilih karena memiliki dinamika gelombang dan arus laut yang tinggi serta menunjukkan kecenderungan abrasi dan perubahan garis pantai yang berkelanjutan (Farid *et al.,* 2024; Suhendra *et al.,* 2023).

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan data spasial vektor dan raster yang meliputi batas administrasi, FABDEM, kecepatan arus laut maksimum 5 tahunan, ketinggian gelombang maksimum 5 tahunan, peta geologi, dan peta penutup lahan **Tabel 1.** Pemilihan parameter tersebut sejalan dengan studi kerentanan pesisir yang menempatkan gelombang, arus, geomorfologi, perubahan garis pantai, dan penutup lahan sebagai komponen penting dalam penilaian bahaya pesisir (Baučić, 2020; Hastuti *et al.,* 2022; Tanim *et al.,* 2022).

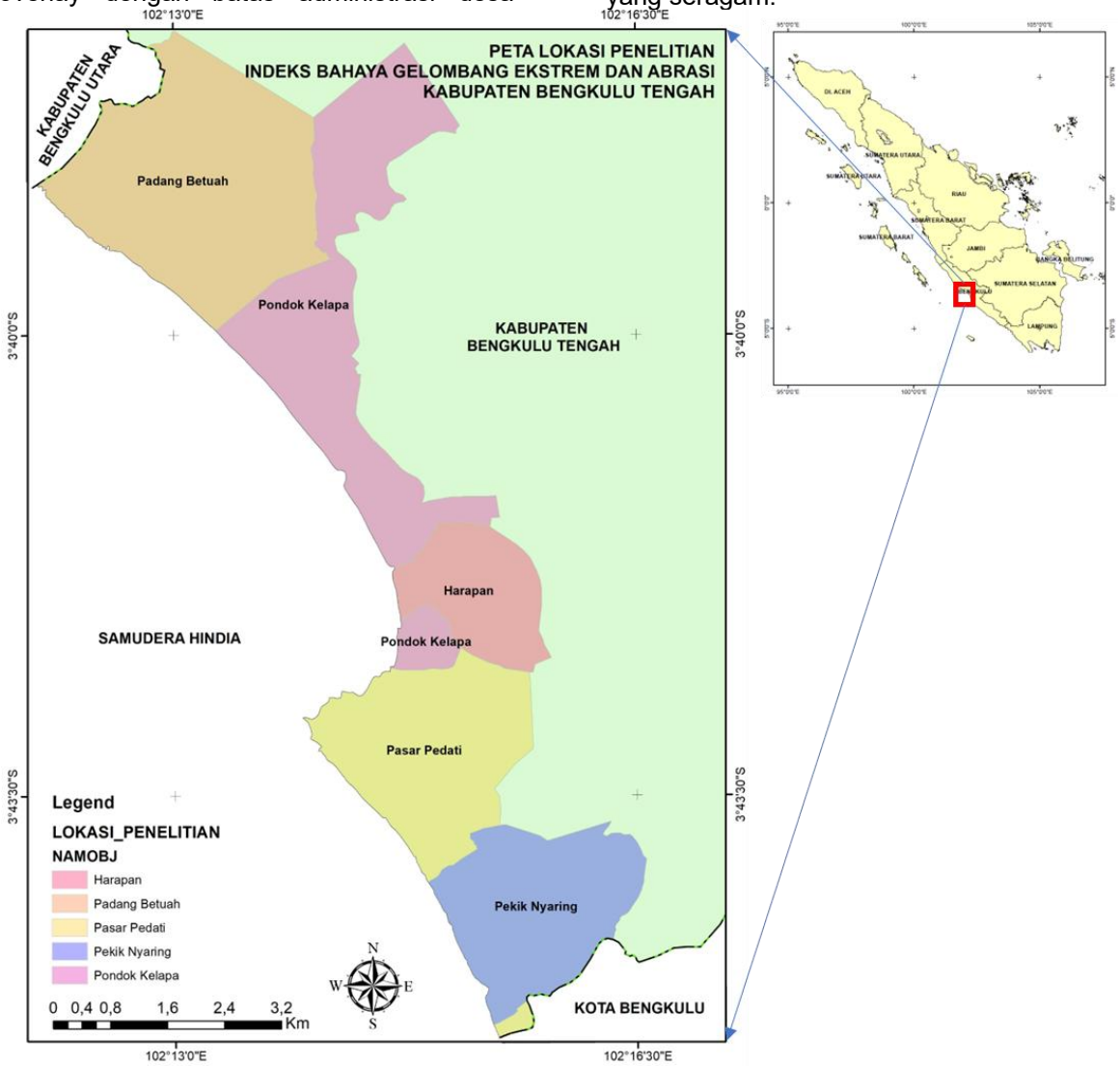
Tabel 1. Jenis, bentuk, sumber, tahun, dan tujuan penggunaan data dalam penelitian

No.	Jenis Data	Bentuk Data	Sumber Data	Tahun Data	Keterangan
1	Batas Administrasi	Vektor	BIG	2023	Batas wilayah
2	FABDEM	Raster	University of Bristol	2023	Analisis lereng dan tipologi pantai
3	Kecepatan Arus	Raster	Copernicus	2017-2022	Analisis Kecepatan Arus
4	Ketinggian Gelombang	Raster	Copernicus	2017-2022	Analisis Ketinggian Gelombang
5	Peta Geologi	Vektor	ESDM	2018	Analisis Tipologi Pantai

No.	Jenis Data	Bentuk Data	Sumber Data	Tahun Data	Keterangan
6	Peta Penutup Lahan	Vektor	BIG	2018 (diupdate 2023)	Analisis Tipologi Pantai

Pengolahan data

Seluruh data spasial diproyeksikan ke sistem koordinat metrik *Universal Transverse Mercator* (UTM) agar analisis dilakukan secara konsisten dalam satuan meter. Garis pantai kemudian dibuffer sejauh 200 m ke arah darat untuk membentuk area bahaya potensial, lalu dioverlay dengan batas administrasi desa untuk menghasilkan unit analisis. Mengacu pada BNPB (2020), parameter yang digunakan terdiri atas tinggi gelombang, arus laut, tipologi pantai, tutupan vegetasi, dan bentuk garis pantai, dengan bobot masing-masing 30%, 30%, 10%, 15%, dan 15%. Seluruh layer kemudian dikonversi ke raster berukuran 30 × 30 m dengan extent, cell size, dan snap raster yang seragam.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Analisis bahaya

Analisis bahaya dilakukan menggunakan pendekatan *fuzzy overlay* dalam lingkungan GIS. Setiap parameter dinormalisasi ke dalam rentang 0–1 menggunakan fungsi keanggotaan *fuzzy* untuk merepresentasikan variasi bahaya secara gradual. Pendekatan ini dipilih karena variabel bahaya pesisir bersifat kontinu dan tidak selalu memiliki batas kelas yang tegas. Metode *fuzzy* dinilai lebih mampu mempertahankan variasi alami data dibandingkan klasifikasi diskrit konvensional (Baučić, 2020; Tanim *et al.,* 2022). Hasil integrasi seluruh parameter menghasilkan indeks bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai, yang kemudian diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu rendah ($H \leq 0.333$), sedang ($0.333 < H \leq 0.666$), dan tinggi ($H > 0.666$). Luas masing-masing kelas bahaya dihitung

pada setiap unit analisis desa menggunakan kalkulasi geometri dalam GIS dan dinyatakan dalam hektare (ha).

Penentuan prioritas mitigasi

Prioritas mitigasi ditetapkan berdasarkan hasil klasifikasi indeks bahaya pada tingkat desa pesisir. Pemeringkatan dilakukan menggunakan tiga indikator, yaitu dominasi kelas bahaya, luas bahaya tinggi, dan luas total area bahaya. Desa yang didominasi oleh kelas bahaya tinggi dan memiliki luas bahaya tinggi terbesar ditetapkan sebagai prioritas utama, sedangkan desa yang hanya didominasi bahaya sedang dengan luasan kecil ditempatkan pada prioritas lebih rendah. Hasil pemeringkatan kemudian dikelompokkan ke dalam lima tingkat prioritas, yaitu sangat prioritas, prioritas tinggi, prioritas menengah, prioritas pengendalian dan pemantauan, serta prioritas rendah (Baučić, 2020; Contestabile & Vicinanza, 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

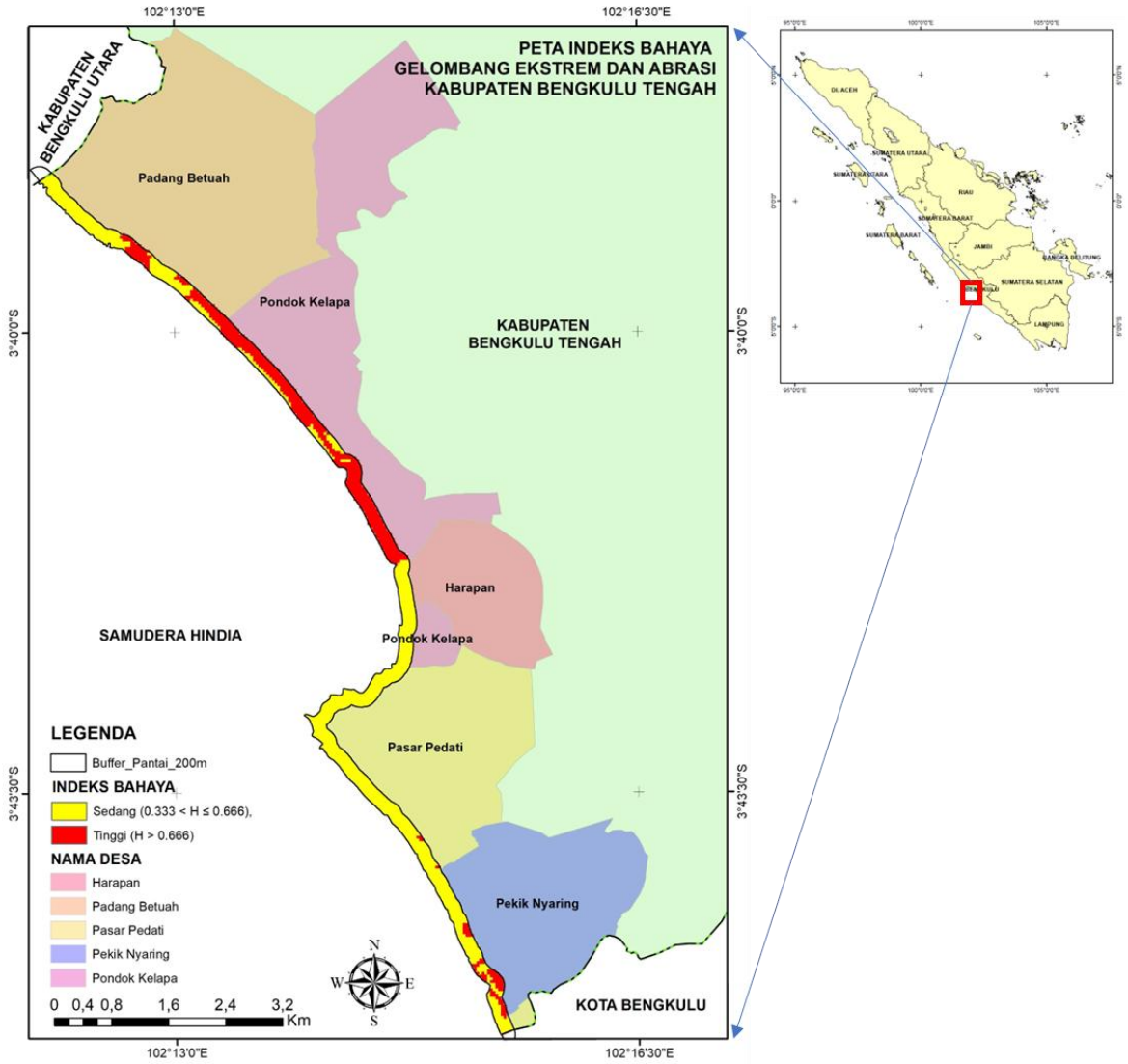
Distribusi spasial indeks bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai

Sebaran spasial indeks bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah disajikan pada **Gambar 2.** Berdasarkan peta tersebut, area bahaya terkonsentrasi pada kawasan pesisir Kecamatan Pondok Kelapa yang meliputi Desa Harapan, Padang Betuah, Pasar Pedati, Pekik Nyaring, dan Pondok Kelapa. Pola ini menunjukkan bahwa ancaman gelombang ekstrem dan abrasi di Bengkulu Tengah tidak tersebar merata di seluruh wilayah kabupaten, tetapi terfokus pada segmen pantai yang berhadapan langsung dengan laut terbuka. Karakter ini penting karena pesisir yang langsung menghadap Samudra Hindia cenderung menerima tekanan hidrodinamika yang lebih besar, baik dalam bentuk gelombang, arus, maupun energi gelombang yang berpengaruh terhadap mobilisasi dan transport sedimen (Irmawan *et al.,* 2024; Hastuti *et al.,* 2022).

Hasil pemetaan juga menunjukkan bahwa tidak terdapat kelas bahaya rendah pada seluruh area analisis. Dengan demikian, seluruh desa pesisir yang dianalisis minimal berada pada kelas bahaya sedang. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kawasan pesisir Kecamatan Pondok Kelapa secara umum telah berada dalam tekanan bahaya yang nyata, meskipun intensitasnya berbeda pada masing-masing desa. Contestabile dan Vicinanza (2020) menjelaskan bahwa bahaya pesisir seperti erosi, badai pantai, dan genangan merupakan ancaman yang signifikan terhadap sistem fisik, ekonomi, dan sosial wilayah pesisir. Dalam konteks Bengkulu Tengah, ketiadaan kelas bahaya rendah memperkuat indikasi bahwa segmen pantai yang dianalisis tidak lagi berada pada kondisi aman, tetapi telah masuk ke kategori rentan yang memerlukan perhatian pengelolaan secara sistematis.

Secara spasial, kelas bahaya sedang mendominasi sebagian besar wilayah pesisir, sedangkan kelas bahaya tinggi muncul secara lebih terbatas namun terkonsentrasi pada segmen tertentu. Pola ini menunjukkan bahwa tingkat ancaman di sepanjang garis pantai Bengkulu Tengah tidak berubah secara seragam, tetapi membentuk gradasi spasial dari sedang hingga tinggi. Menurut Baučić (2020), fenomena bahaya dan kerentanan pesisir pada dasarnya bersifat kontinu, sehingga variasi tingkat ancaman antar lokasi lebih tepat dipahami sebagai spektrum daripada batas kelas yang tegas. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana sebaran bahaya memperlihatkan adanya perbedaan intensitas antarlokasi yang tidak dapat dijelaskan hanya melalui satu parameter tunggal.

Konsentrasi area bahaya pada Kecamatan Pondok Kelapa juga sejalan dengan hasil studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa Bengkulu Tengah memiliki garis pantai yang terpapar langsung oleh dinamika gelombang dan arus laut dari Samudra Hindia (Farid *et al.,* 2024). Studi Suhendra *et al.* (2023) bahkan menegaskan bahwa Bengkulu Tengah termasuk wilayah yang rentan terhadap gelombang ekstrem dan abrasi pantai, dengan kerusakan pesisir yang pada beberapa lokasi telah mencapai kategori berat. Oleh karena itu, pola spasial pada **Gambar 2.** tidak hanya menggambarkan distribusi kelas bahaya, tetapi juga memperkuat bukti bahwa bahaya pesisir di Bengkulu Tengah memiliki karakter lokal yang kuat dan terkonsentrasi pada segmen pantai tertentu.



Gambar 2. Peta Indeks Bahaya Gelombang Ekstrem dan Abrasi Kabupaten Bengkulu Tengah

Temuan ini menunjukkan bahwa pemetaan berbasis indeks mampu memberikan gambaran awal mengenai lokasi-lokasi yang paling rentan di sepanjang pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah. Dalam skala lokal, informasi spasial seperti ini penting karena dapat menjadi dasar untuk mengidentifikasi segmen pantai yang membutuhkan perhatian lebih lanjut, baik untuk pemantauan, pencegahan, maupun intervensi mitigasi. Dengan demikian, **Gambar 2.** berfungsi tidak hanya sebagai representasi visual hasil pemetaan, tetapi juga sebagai dasar analitis untuk menilai perbedaan tingkat ancaman antar desa pesisir yang akan dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya.

Variasi Tingkat Bahaya Antar Desa Pesisir

Variasi tingkat bahaya antar desa pesisir di Kecamatan Pondok Kelapa ditunjukkan pada **Tabel 2**, yang memperlihatkan bahwa distribusi bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai tidak bersifat homogen meskipun seluruh desa berada dalam satu sistem pesisir yang sama. Berdasarkan data tersebut, hampir seluruh desa pesisir didominasi oleh kelas bahaya sedang, sedangkan dominasi kelas bahaya tinggi hanya tampak menonjol pada Desa Pondok Kelapa. Pola ini menunjukkan bahwa intensitas ancaman di sepanjang pesisir Bengkulu Tengah dikontrol oleh variasi kondisi lokal masing-masing segmen pantai, bukan hanya oleh kedekatan terhadap laut. Literatur menegaskan bahwa bahaya pesisir pada skala lokal sangat dipengaruhi oleh heterogenitas spasial faktor-faktor fisik, sehingga perbedaan tingkat ancaman antarsegmen pantai merupakan kondisi yang umum dijumpai dalam kajian kerentanan pesisir (Tanim *et al.,* 2022; Baučić, 2020).

Tabel 2. Potensi bahaya gelombang ekstrem dan abrasi di Kabupaten Bengkulu Tengah

No.	Kecamatan	Desa	Luas Bahaya Rendah (ha)	Luas Bahaya Sedang (ha)	Luas Bahaya Tinggi (ha)	Luas Total (ha)	Kelas Dominan
1	Pondok Kelapa	Harapan	-	14.3	-	14.3	Sedang
2	Pondok Kelapa	Padang Betuah	-	47.8	19.3	67.1	Sedang
3	Pondok Kelapa	Pasar Pedati	-	91.4	0.9	92.3	Sedang
4	Pondok Kelapa	Pekik Nyaring	-	34.0	11.7	45.7	Sedang
5	Pondok Kelapa	Pondok Kelapa	-	28.2	75.2	103.4	Tinggi

Berdasarkan **Tabel 2**, Desa Pondok Kelapa merupakan wilayah dengan tingkat bahaya paling tinggi, dengan luas bahaya tinggi mencapai 75.2 ha dari total area bahaya 103.4 ha. Luasan ini menunjukkan bahwa sebagian besar area bahaya di desa tersebut telah berkembang ke kelas tinggi, sehingga menjadikannya segmen pesisir yang paling kritis di wilayah penelitian. Dominasi kelas bahaya tinggi ini mengindikasikan adanya kombinasi kondisi fisik yang lebih tidak menguntungkan, seperti paparan gelombang yang lebih besar, kontribusi arus terhadap transport sedimen, bentuk garis pantai yang lebih terbuka, atau perlindungan alami yang relatif terbatas. Hastuti *et al.* (2022) menjelaskan bahwa tinggi gelombang merupakan proksi energi gelombang yang berperan penting dalam mengontrol mobilisasi dan transport sedimen pesisir, sehingga peningkatan energi gelombang secara langsung meningkatkan kerentanan abrasi. Dalam konteks Bengkulu Tengah, temuan ini juga konsisten dengan penelitian Suhendra *et al.* (2023), yang menunjukkan bahwa abrasi di wilayah ini telah berlangsung lama dan pada beberapa lokasi telah mencapai tingkat kerusakan yang berat.

Desa Padang Betuah dan Pekik Nyaring menempati posisi menengah dalam spektrum bahaya, dengan luas bahaya tinggi masing-masing sebesar 19.3 ha dan 11.7 ha. Meskipun kedua desa ini masih didominasi oleh kelas bahaya sedang, keberadaan area bahaya tinggi menunjukkan bahwa sebagian segmen pesisirnya telah berkembang ke tingkat ancaman yang lebih serius. Kondisi tersebut penting karena menunjukkan bahwa dominasi kelas sedang tidak selalu berarti tingkat ancaman rendah, melainkan dapat mencerminkan keberadaan area transisi menuju bahaya tinggi. Hal ini sesuai dengan karakter bahaya pesisir yang bersifat gradual dan dipengaruhi oleh kombinasi gelombang, arus, transport sedimen, dan konfigurasi pantai yang berubah secara spasial dan temporal (Hastuti *et al.,* 2022). Dengan demikian, Padang Betuah dan Pekik Nyaring dapat dipandang sebagai wilayah yang berada pada fase tekanan fisik yang nyata dan memerlukan perhatian mitigasi yang lebih besar dibandingkan desa yang sepenuhnya hanya didominasi kelas sedang.

Desa Pasar Pedati menunjukkan karakter yang berbeda. Desa ini memiliki luas total area bahaya yang cukup besar, yaitu 92.3 ha, tetapi hampir seluruhnya masih didominasi oleh kelas bahaya sedang, dengan luas bahaya tinggi hanya 0.9 ha. Temuan ini menegaskan bahwa luas area terdampak dan intensitas bahaya tidak selalu berbanding lurus. Suatu desa dapat memiliki cakupan area bahaya yang luas, tetapi intensitas ancamannya belum tentu dominan tinggi. Dalam penilaian bahaya berbasis indeks, kondisi seperti ini penting untuk diperhatikan karena menunjukkan bahwa interpretasi hasil tidak dapat hanya bertumpu pada satu indikator, melainkan harus melihat kombinasi dominasi kelas dan luas area terdampak secara bersamaan (Baučić, 2020). Dengan demikian, Pasar Pedati dapat dikategorikan sebagai wilayah dengan paparan bahaya yang luas, namun dengan intensitas relatif lebih moderat dibandingkan Desa Pondok Kelapa.

Sementara itu, Desa Harapan merupakan desa dengan tingkat bahaya relatif paling rendah, karena hanya memiliki kelas bahaya sedang seluas 14.3 ha dan tidak menunjukkan keberadaan kelas bahaya tinggi. Meskipun demikian, ketiadaan kelas bahaya rendah tetap menunjukkan bahwa wilayah pesisir desa ini masih berada dalam kondisi rentan. Contestabile dan Vicinanza (2020) menekankan bahwa bahaya pesisir tidak hanya relevan pada lokasi dengan intensitas ekstrem, tetapi juga pada area yang secara terus-menerus berada dalam kondisi rentan karena dapat mengalami akumulasi dampak dalam jangka panjang. Oleh karena itu, posisi Harapan sebagai desa dengan tingkat bahaya relatif lebih rendah tidak berarti bebas ancaman, melainkan menunjukkan bahwa tingkat tekanannya masih lebih kecil dibandingkan desa pesisir lain di Kecamatan Pondok Kelapa.

Secara keseluruhan, variasi tingkat bahaya antar desa pesisir ini memperlihatkan bahwa ancaman gelombang ekstrem dan abrasi di Bengkulu Tengah memiliki pola spasial yang kuat. Perbedaan antar desa menunjukkan bahwa setiap segmen pantai memiliki kombinasi karakter fisik yang berbeda, sehingga menghasilkan tingkat ancaman yang juga berbeda. Temuan ini penting karena menegaskan bahwa pendekatan pengelolaan dan mitigasi di wilayah pesisir tidak dapat dilakukan secara seragam, tetapi harus mempertimbangkan karakter ancaman spesifik pada setiap desa. Dengan demikian, **Tabel 2** tidak hanya berfungsi sebagai penyajian data luasan bahaya, tetapi juga sebagai dasar untuk mengidentifikasi desa-desa dengan tekanan bahaya paling besar, yang selanjutnya menjadi landasan dalam penetapan area prioritas mitigasi.

Implikasi Pendekatan *Fuzzy Overlay* terhadap Hasil Pemetaan

Pola hasil pemetaan pada **Gambar 2** menunjukkan bahwa tingkat bahaya gelombang ekstrem dan abrasi pantai di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah membentuk gradasi spasial dari sedang hingga tinggi, bukan batas kelas yang berubah secara tegas antar lokasi. Pola seperti ini menegaskan bahwa bahaya pesisir di tingkat lokal bersifat gradual dan dipengaruhi oleh kombinasi berbagai parameter fisik yang bekerja secara bersamaan. Dalam konteks tersebut, penggunaan pendekatan *fuzzy overlay* menjadi penting karena mampu mengakomodasi variasi kontinu antarparameter dan menghasilkan indeks komposit yang lebih representatif dibandingkan klasifikasi diskrit konvensional. Baučić (2020) menegaskan bahwa salah satu persoalan utama dalam penilaian kerentanan berbasis indeks adalah penggunaan klasifikasi *crisp* pada fenomena yang sesungguhnya kontinu, sehingga fuzzy logic diperlukan untuk mengurangi ketidakpastian dan menghindari penyederhanaan yang berlebihan.

Keunggulan utama *fuzzy overlay* dalam penelitian ini terletak pada kemampuannya mengubah berbagai parameter bahaya yang memiliki skala dan satuan berbeda menjadi skala yang sebanding. Tanim *et al.* (2022) menunjukkan bahwa normalisasi berbasis fungsi keanggotaan fuzzy mengonversi seluruh faktor kerentanan ke dalam rentang 0–1, sehingga memungkinkan proses penggabungan parameter dilakukan secara lebih konsisten. Pendekatan ini juga dinilai lebih baik dibandingkan teknik normalisasi tradisional karena mempertahankan variasi alami data dan merepresentasikan tingkat bahaya sebagai fungsi kontinu, bukan sekadar hasil reklasifikasi histogram data yang kaku (Tanim *et al.,* 2022). Dengan demikian, hasil gradasi bahaya yang muncul pada **Gambar 2** dapat dipahami sebagai keluaran yang lebih sesuai dengan karakter dinamis wilayah pesisir.

Dalam studi ini, pendekatan *fuzzy overlay* juga berkontribusi pada kemampuan model untuk membedakan segmen pesisir yang sama-sama rentan, tetapi memiliki tingkat ancaman yang berbeda. Hal tersebut tampak dari perbedaan kelas bahaya antar desa pesisir di Kecamatan Pondok Kelapa, di mana seluruh desa minimal berada pada kelas sedang, tetapi hanya Desa Pondok Kelapa yang menunjukkan dominasi kelas tinggi. Jika pendekatan klasifikasi diskrit digunakan secara sederhana, maka variasi antar lokasi seperti ini berpotensi tidak tergambarkan secara memadai. Baučić (2020) menjelaskan bahwa penggunaan logika fuzzy membantu menyelesaikan persoalan ketidakpastian dan kelemahan klasifikasi tegas pada penilaian kerentanan lokal, sehingga hasil yang diperoleh lebih mudah diterima sebagai dasar pengambilan keputusan spasial. Secara metodologis, hasil penelitian menunjukkan bahwa *fuzzy overlay* tidak hanya berfungsi sebagai teknik pengolahan data, tetapi juga sebagai kerangka analitis yang memungkinkan interpretasi bahaya pesisir secara lebih realistis. Pendekatan ini sangat relevan untuk wilayah seperti Bengkulu Tengah, yang karakter bahayanya dikendalikan oleh interaksi gelombang, arus, bentuk garis pantai, tipologi pantai, dan tutupan vegetasi. Oleh karena itu, penggunaan *fuzzy overlay* dalam penelitian ini dapat dipandang sebagai pendekatan yang tepat untuk menghasilkan peta bahaya pada skala lokal, sekaligus memperkuat dasar ilmiah dalam penetapan area prioritas mitigasi.

Area prioritas mitigasi di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah

Berdasarkan distribusi kelas bahaya dan luas area terdampak pada masing-masing desa pesisir, prioritas mitigasi bahaya gelombang ekstrem dan abrasi di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah dapat ditetapkan secara bertingkat. Penetapan prioritas ini didasarkan pada dominasi kelas bahaya, besarnya luasan bahaya tinggi, dan luas total area terdampak, sebagaimana disajikan pada **Tabel 3.** Hasil tersebut menunjukkan bahwa Desa Pondok Kelapa menempati urutan pertama sebagai wilayah yang paling

mendesak untuk ditangani, diikuti oleh Padang Betuah dan Pekik Nyaring, sedangkan Pasar Pedati dan Harapan berada pada tingkat prioritas yang lebih rendah.

Tabel 3. Prioritas mitigasi bahaya gelombang ekstrem dan abrasi di wilayah pesisir Kabupaten Bengkulu Tengah

No.	Kecamatan	Desa	Luas Bahaya Sedang (ha)	Luas Bahaya Tinggi (ha)	Luas Total (ha)	Dasar Penetapan Prioritas	Prioritas Mitigasi
1	Pondok Kelapa	Pondok Kelapa	28.2	75.2	103.4	Bahaya tinggi dominan dan luasan tertinggi	**I (sangat prioritas)**
2	Pondok Kelapa	Padang Betuah	47.8	19.3	67.1	Luas bahaya tinggi cukup besar	**II (prioritas tinggi)**
3	Pondok Kelapa	Pekik Nyaring	34.0	11.7	45.7	Terdapat bahaya tinggi dengan luas menengah	**III (prioritas menengah)**
4	Pondok Kelapa	Pasar Pedati	91.4	0.9	92.3	Bahaya didominasi kelas sedang, namun area terdampak luas	**IV (prioritas pengendalian dan pemantauan)**
5	Pondok Kelapa	Harapan	14.3	-	14.3	Hanya didominasi bahaya sedang dengan luasan kecil	**V (prioritas rendah)**

Desa Pondok Kelapa ditetapkan sebagai wilayah prioritas I karena memiliki dominasi bahaya tinggi yang paling menonjol. Besarnya luas bahaya tinggi menunjukkan bahwa desa ini merupakan segmen pesisir yang menerima kombinasi tekanan fisik paling besar, baik dari sisi gelombang, arus, maupun karakter lokal pantainya. Dalam sistem pesisir yang terbuka, peningkatan tinggi gelombang identik dengan peningkatan energi gelombang, yang secara langsung meningkatkan kemampuan mobilisasi dan transport material pantai (Hastuti *et al.,* 2022). Karena itu, dominasi bahaya tinggi di Pondok Kelapa mengindikasikan perlunya penanganan segera melalui kombinasi intervensi struktural dan nonstruktural.

Desa Padang Betuah ditempatkan sebagai prioritas II karena memiliki luas bahaya tinggi terbesar kedua, yaitu 19.3 ha. Desa ini juga penting secara kontekstual karena hasil penelitian Suhendra *et al.* (2023) menunjukkan bahwa kawasan Padang Betuah termasuk lokasi abrasi yang nyata di Bengkulu Tengah. Sementara itu, Pekik Nyaring ditetapkan sebagai prioritas III karena masih memiliki area bahaya tinggi yang cukup berarti, meskipun tidak sebesar dua desa sebelumnya. Pada kedua desa ini, strategi mitigasi dapat diarahkan pada perlindungan segmen kritis, pemulihan vegetasi pelindung, dan pembatasan aktivitas pemanfaatan ruang di sempadan pantai.

Pasar Pedati ditetapkan sebagai prioritas IV. Meskipun luas total area bahayanya cukup besar, intensitas ancamannya masih didominasi kelas sedang. Dengan demikian, desa ini lebih sesuai diarahkan pada strategi pengendalian dan pemantauan, agar kondisi bahaya sedang tidak berkembang menjadi bahaya tinggi. Harapan berada pada prioritas V karena hanya memiliki area bahaya sedang seluas 14.3 ha tanpa kelas bahaya tinggi. Walaupun demikian, desa ini tetap memerlukan pemantauan karena seluruh area analisisnya tetap berada pada tingkat ancaman minimal sedang.

Pola prioritas ini menegaskan bahwa penanganan bahaya pesisir di Bengkulu Tengah harus dilakukan secara spasial dan bertingkat. Baučić (2020) menekankan bahwa pendekatan indikator dan indeks penting untuk mendukung pengambilan keputusan, karena memungkinkan pembedaaan area yang memerlukan perlindungan segera dari area yang lebih tepat diarahkan pada pencegahan dan pemantauan. Tanim et al. (2022) juga menunjukkan bahwa pengelolaan pesisir masa depan perlu difokuskan pada kawasan dengan kerentanan tinggi dan didukung oleh tindakan perlindungan alami, seperti vegetasi pesisir, yang dapat berperan sebagai penyangga terhadap erosi, redaman gelombang, dan genangan pantai. Contestabile dan Vicinanza (2020) menambahkan bahwa strategi mitigasi pesisir yang efektif perlu bergerak dari sekadar monitoring menuju tindakan terapan yang

berkelanjutan. Dalam konteks Bengkulu Tengah, hal ini berarti bahwa Pondok Kelapa, Padang Betuah, dan Pekik Nyaring perlu diposisikan sebagai fokus utama mitigasi, sedangkan Pasar Pedati dan Harapan lebih tepat diarahkan pada strategi pencegahan, rehabilitasi ringan, dan pengawasan berkala.

Implikasi metodologis dan pengelolaan pesisir

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemetaan bahaya gelombang ekstrem dan abrasi di Kabupaten Bengkulu Tengah menjadi lebih informatif ketika dilakukan melalui integrasi multi-parameter. Literatur menegaskan bahwa variabel seperti tinggi gelombang, geomorfologi, laju perubahan garis pantai, kemiringan pantai, dan penggunaan lahan merupakan komponen penting dalam penilaian kerentanan pesisir, karena masing-masing berkontribusi secara berbeda terhadap tingkat paparan dan sensitivitas (Baučić, 2020; Tanim et al., 2022). Dalam penelitian ini, perbedaan kelas bahaya antar desa menunjukkan bahwa tingkat ancaman tidak ditentukan hanya oleh kedekatan terhadap laut, tetapi oleh kombinasi gelombang, arus, bentuk garis pantai, tipologi pantai, dan vegetasi pelindung. Temuan ini memperkuat bahwa pendekatan berbasis indeks komposit lebih tepat untuk merepresentasikan kompleksitas bahaya pesisir pada skala lokal.

Dari sisi metode, penggunaan *fuzzy overlay* memberikan keuntungan penting karena mampu menggambarkan sifat gradual dari bahaya pesisir. Baučić (2020) menyatakan bahwa ketidakpastian data dan model membuat klasifikasi yang terlalu kaku berpotensi menyederhanakan kondisi lapangan. Tanim et al. (2022) juga menunjukkan bahwa normalisasi berbasis fuzzy memungkinkan variabel bahaya yang berbeda skala diubah menjadi ukuran yang sebanding, sehingga lebih representatif terhadap variasi nyata di lapangan. Dalam penelitian ini, gradasi bahaya dari sedang ke tinggi pada lima desa pesisir menjadi bukti bahwa ancaman pesisir tidak berubah secara diskrit, melainkan berlangsung bertahap sesuai variasi karakter fisik masing-masing lokasi.

Dari perspektif pengelolaan, tidak ditemukannya kelas bahaya rendah menunjukkan bahwa kawasan pesisir Kecamatan Pondok Kelapa secara keseluruhan telah berada dalam kondisi rentan. Kondisi ini menandakan bahwa pengelolaan wilayah pesisir tidak dapat hanya bersifat reaktif setelah kerusakan terjadi. Suhendra et al. (2023) menunjukkan bahwa abrasi di Bengkulu Tengah telah menimbulkan kerusakan jalan, rumah, dan lahan produktif, bahkan menyebabkan hilangnya daratan pantai hingga puluhan meter. Karena itu, peta indeks bahaya dalam penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar untuk pengendalian ruang di sempadan pantai, rehabilitasi vegetasi pelindung, dan penyusunan prioritas intervensi pesisir.

Secara praktis, desa dengan prioritas I sampai III perlu diarahkan pada kombinasi perlindungan struktural dan nonstruktural, sedangkan desa prioritas IV dan V lebih tepat difokuskan pada penguatan vegetasi pelindung, pemantauan perubahan garis pantai, dan pengendalian aktivitas yang dapat mempercepat degradasi pantai. Contestabile dan Vicinanza (2020) menekankan bahwa strategi mitigasi pesisir yang efektif harus menggabungkan monitoring, penelitian terapan, dan intervensi berkelanjutan. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini tidak hanya terletak pada penyusunan peta bahaya, tetapi juga pada penyediaan dasar spasial untuk mendukung perencanaan mitigasi dan adaptasi pesisir yang lebih spesifik lokasi di Kabupaten Bengkulu Tengah.

Keterbatasan penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam menafsirkan hasil. Pertama, akurasi indeks bahaya dipengaruhi oleh resolusi spasial dan ketelitian data input, terutama data gelombang, arus, garis pantai, tipologi pantai, dan tutupan vegetasi. Oleh karena itu, hasil pemetaan lebih tepat dipahami sebagai representasi bahaya pada skala analisis yang digunakan, bukan sebagai detail mikro pada setiap lokasi (Baučić, 2020; Hastuti et al., 2022). Kedua, analisis ini masih berfokus pada komponen biogeofisik, sehingga belum memasukkan faktor sosial-ekonomi, nilai aset terpapar, maupun kapasitas adaptif masyarakat, padahal integrasi faktor-faktor tersebut dapat menghasilkan penilaian risiko pesisir yang lebih komprehensif (Tanim et al., 2022). Ketiga, hasil indeks merepresentasikan kondisi berdasarkan data yang tersedia pada saat analisis dilakukan, sehingga belum sepenuhnya menangkap variabilitas temporal gelombang, arus, dan perubahan garis pantai dalam periode yang lebih panjang (Hastuti et al., 2022). Meskipun demikian, pendekatan yang digunakan tetap memadai untuk mengidentifikasi pola spasial bahaya dan menyusun prioritas mitigasi awal pada skala lokal di wilayah pesisir Kabupaten

Bengkulu Tengah. Ke depan, hasil penelitian ini dapat diperkuat melalui penggunaan data multitemporal beresolusi lebih tinggi, integrasi variabel sosial-ekonomi, serta uji sensitivitas terhadap bobot parameter dan fungsi *fuzzy.*

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa potensi bahaya gelombang ekstrem dan abrasi terkonsentrasi pada kawasan pesisir Kecamatan Pondok Kelapa, meliputi Desa Harapan, Padang Betuah, Pasar Pedati, Pekik Nyaring, dan Pondok Kelapa. Seluruh desa pesisir yang dianalisis berada minimal pada kelas bahaya sedang, sedangkan kelas bahaya tinggi paling dominan teridentifikasi di Desa Pondok Kelapa dengan luas 75.2 ha. Hasil ini menegaskan bahwa tingkat bahaya pesisir di Bengkulu Tengah tidak bersifat homogen, tetapi dipengaruhi oleh kombinasi faktor fisik seperti gelombang, arus, tipologi pantai, bentuk garis pantai, dan tutupan vegetasi. Pendekatan *fuzzy overlay* terbukti mampu menggambarkan gradasi bahaya secara lebih fleksibel dan memberikan dasar spasial yang memadai untuk penetapan prioritas mitigasi. Prioritas mitigasi difokuskan pada Desa Pondok Kelapa, diikuti Padang Betuah dan Pekik Nyaring, melalui perlindungan pantai, rehabilitasi vegetasi pesisir, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Ke depan, analisis perlu diperkuat dengan data oseanografi multitemporal, perubahan garis pantai jangka panjang, serta variabel sosial-ekonomi untuk pengembangan menuju analisis risiko pesisir yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

Apostolopoulos, D., & Nikolakopoulos, K. G. (2021). A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing, 54*(1), 240–265. https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1904293

Baučić, M. (2020). Household level vulnerability analysis—Index and fuzzy based methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 9*(4), Article 263. https://doi.org/10.3390/ijgi9040263

Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2020). Modul teknis penyusunan kajian risiko bencana gelombang ekstrim dan abrasi. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.

Contestabile, P., & Vicinanza, D. (2020). Coastal vulnerability and mitigation strategies: From monitoring to applied research. *Water, 12*(9), 2594. https://doi.org/10.3390/w12092594

Durap, A. (2024). Mapping coastal resilience: A GIS-based Bayesian network approach to coastal hazard identification for Queensland's dynamic shorelines. *Anthropocene Coasts, 7*(1). https://doi.org/10.1007/s44218-024-00060-y

Farid, M., Hadi, A. I., & Refrizon. (2024). The combination of HVSR and MASW methods with Landsat 8 imagery to assess the changing shoreline along the coastal area of Central Bengkulu. *Trends in Sciences, 21*(5), 7544. https://doi.org/10.48048/tis.2024.7544

Handiani, D. N., Heriati, A., & Suciaty, F. (2022). Coastal vulnerability assessment along the North Java coastlines-Indonesia. *Jurnal Segara, 18*(1), 1–14. https://doi.org/10.15578/segara.v18i1.10664

Hastuti, A. W., Nagai, M., & Suniada, K. I. (2022). Coastal vulnerability assessment of Bali Province, Indonesia using remote sensing and GIS approaches. *Remote Sensing, 14*(17), 4409. https://doi.org/10.3390/rs14174409

Irmawan, M., Imaaduddiin, M. H., & Alam, R. R. (2024). Hydrodynamic analysis-based modeling of coastal abrasion prevention (Case study: Pulau Baai Port, Bengkulu). *Applied Sciences, 14*(2), 940. https://doi.org/10.3390/app14020940

Ramadhan, C., Ruslanjari, D., & Puspitasari, D. (2022). Coastal vulnerability assessment for community resilience on abrasion: Case of Bugel Coast, Kulon Progo Regency, Indonesia. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development, 39*(1). https://doi.org/10.29037/ajstd.715

Suhendra, Halauddin, & Lizalidiawati. (2023). Coastal vulnerability assessment using electrical resistivity tomography in Padang Betuah, Central Bengkulu. *International Journal of Advances in Applied Sciences, 12*(4), 301–308. https://doi.org/10.11591/ijaas.v12.i4.pp301-308

Tanim, A. H., Goharian, E., & Moradkhani, H. (2022). Integrated socio-environmental vulnerability assessment of coastal hazards using data-driven and multi-criteria analysis approaches. *Scientific Reports, 12*(1), Article 11579. https://doi.org/10.1038/s41598-022-15237-z