

Analisis Spasial Bahaya Gelombang Ekstrem dan Abrasi di Kota Sabang Menggunakan Metode *Weighted Overlay* QGIS

Moehammad Ediyan Raza Karmel^{1*}, Zul Fadhli², Akmal Muhni³, Ali M Muslih⁴

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Departemen Teknik Kebumihan, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

²Program Studi Teknik Geofisika, Departemen Teknik Kebumihan, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

³Program Studi Teknik Geologi, Departemen Teknik Kebumihan, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

⁴Program Studi Kehutanan, Departemen Kehutanan, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

*Email : karmel@usk.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received : February 12, 2025

Revised : February 28, 2025

Accepted : March 7, 2025

Keywords:

Extreme waves

Abrasion

Weighted overlay

QGIS

Sabang city

ABSTRACT

Coastal regions worldwide, including Sabang City on Weh Island, Aceh Province, are increasingly vulnerable to climate change-driven natural hazards such as flooding, storm surges, and erosion. Extreme wave events, particularly during storms, significantly accelerate coastal erosion rates, threatening critical infrastructure, settlements, and the tourism/maritime sectors that form the backbone of the local economy. This study aims to assess coastal hazards from extreme waves and erosion in Sabang City while identifying modulating risk factors. Using historical wave data from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), we estimated the frequency and magnitude of extreme wave events. A weighted overlay analysis in QGIS was implemented to map vulnerability zones for erosion, flooding, and abrasion, incorporating factors such as elevation, geology, and proximity to the coastline. Weightings followed guidelines from the 2012 Regulation of the Head of Indonesia's National Disaster Management Authority (BNPB). Key findings reveal high-risk zones along Weh Island's northern, eastern, and northeastern coasts, with smaller vulnerable segments in the northwest. Of the total 95 km coastline, six high-exposure segments were identified, spanning 13,979 meters (14.73% of the coastal area). Crucially, coastal geomorphology and surrounding environmental conditions emerged as dominant factors modulating extreme wave and erosion hazards, outweighing the influence of sea-level rise and significant wave height.

ABSTRAK

Daerah pesisir di seluruh dunia, termasuk Kota Sabang di Pulau Weh, Provinsi Aceh semakin rentan terhadap berbagai bahaya alam akibat perubahan iklim, seperti banjir, gelombang badai, dan erosi. Gelombang ekstrim, terutama saat badai berlangsung, dapat mempercepat laju erosi pesisir secara signifikan, mengancam infrastruktur, pemukiman, serta sektor pariwisata dan maritim yang menjadi tulang punggung ekonomi lokal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat penilaian bahaya di kawasan pesisir Kota Sabang terhadap gelombang ekstrim dan abrasi, serta menganalisis faktor-faktor yang memodulasi tingkat risiko. Analisis dilakukan berdasarkan data gelombang historis dari NOAA guna memperkirakan frekuensi dan magnitudo kejadian gelombang ekstrim. Identifikasi area rentan terhadap erosi, banjir, dan abrasi dilakukan dengan *software* QGIS dengan metode pembobotan (*weighted overlay*). Faktor-faktor seperti elevasi, geologi, dan kedekatan dengan garis pantai diberikan bobot sesuai panduan dalam Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana (Perka BNPB) tahun 2012. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pantai utara, pantai timur dan timur laut Pulau Weh, serta sebagian kecil pantai barat laut berada dalam risiko tinggi terhadap gelombang ekstrim dan abrasi. Dari total area garis pantai sekitar 95 km, enam segmen paparan tinggi dapat diidentifikasi di Kota Sabang. Jumlah panjang garis pantai dari segmen-segmen tersebut adalah 13.979 m atau hampir 14,73% dari keseluruhan area pesisir. Selain itu, penelitian ini menemukan bahwa geomorfologi pesisir dan lingkungan sekitarnya merupakan faktor dengan kontribusi dominan, dibandingkan dengan kenaikan permukaan laut dan tinggi gelombang signifikan.

Kata Kunci:

Gelombang ekstrem

Abrasi

Pembobotan tumpang susun

QGIS

Kota Sabang

1. PENDAHULUAN

Telah diketahui secara luas bahwa perubahan iklim mengekspos kawasan pesisir terhadap berbagai bahaya alam, termasuk kenaikan permukaan laut, peningkatan frekuensi kejadian gelombang ekstrim, dan erosi pantai (Roukounis dan Tsihrintzis, 2022). Garis pantai Asia Tenggara mencakup sekitar 20% dari permukaan Bumi dan merupakan tempat tinggal bagi sebagian besar populasi dunia (Noor dan Abdul Maulud, 2022). Gelombang ekstrim seringkali dihasilkan selama badai besar di laut dan kemudian dapat menyebar ke daratan dengan redaman yang terbatas akibat difraksi atau refraksi. Dampak gelombang ekstrim dapat berkisar dari erosi ringan dan terlampauinya ombak ke pantai serta bukit pasir hingga penghancuran total desa-desa pesisir akibat erosi dan banjir yang meluas. Seiring dengan berkembangnya kawasan pesisir, hilangnya buffer alami seperti pantai dan bukit pasir telah mempercepat erosi, yang mengancam infrastruktur dan properti (Dasgupta dan Shaw, 2016; Field *et al.*, 2000). Penurunan pasokan sedimen, yang sering disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pembangunan bendungan dan pengisian pantai, telah berkontribusi pada meningkatnya kejadian erosi di banyak kawasan pesisir (Neumann *et al.*, 2017).

Indonesia, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, telah mengalami banyak bencana hidrometeorologi, termasuk tsunami dahsyat di Aceh pada tahun 2004. Sabang telah mengalami beberapa bencana alam dalam dua dekade terakhir. Siklon tropis (sebanyak 21 kali) merupakan bencana alam dengan frekuensi tertinggi, diikuti oleh kebakaran hutan dan lahan (7 kali) serta banjir (4 kali). Bencana-bencana ini akan menjadi lebih besar dan lebih sering terjadi akibat perubahan iklim, yang berdampak pada infrastruktur, merusak fasilitas pariwisata dan mata pencaharian, serta menimbulkan masalah di daerah pertanian pedalaman (Lin *et al.*, 2021).

Mekanisme pencegahan dan respons bencana di seluruh dunia menggunakan sistem peringatan dan penilaian risiko untuk memberikan informasi kepada pengambil keputusan dan masyarakat tentang bahaya tinggal di daerah yang terkena dampak bencana alam (Lee *et al.*, 2015). Sejauh ini, *Coastal Vulnerability Index* (CVI) yang dikembangkan oleh Gornitz (1991) merupakan instrumen yang secara luas digunakan untuk mengukur kerentanan kawasan pesisir terhadap bahaya bencana alam di Indonesia

(Irham *et al.*, 2021; Dhiauddin *et al.*, 2017; Hastuti *et al.*, 2022).

Studi-studi sebelumnya di Kota Sabang telah mengkaji kondisi iklim dan perubahan lahan (Achmad *et al.*, 2019; Arif *et al.*, 2021) serta hidrodinamika dan transportasi sedimen (Wisha & Ilham, 2020; Rasyidi *et al.*, 2019). Namun, data dan pembahasan yang secara khusus ditujukan untuk mengurangi dan mengatasi risiko bencana gelombang ekstrim dan abrasi di Sabang masih sangat minim. Selain berpotensi merusak ekosistem, perubahan tinggi gelombang laut juga memengaruhi stabilitas fasilitas dan infrastruktur pesisir serta pengendapan sedimen (Sierra dan Casas-Prat, 2014). Oleh karena itu, terdapat kebutuhan penting untuk meningkatkan pengelolaan pesisir melalui studi awal mengenai bahaya alam. Penelitian ini bertujuan untuk menilai bahaya gelombang ekstrem dan abrasi di Kota Sabang, menganalisis faktor dominan yang mempengaruhi risiko, serta memberikan rekomendasi mitigasi berbasis GIS.

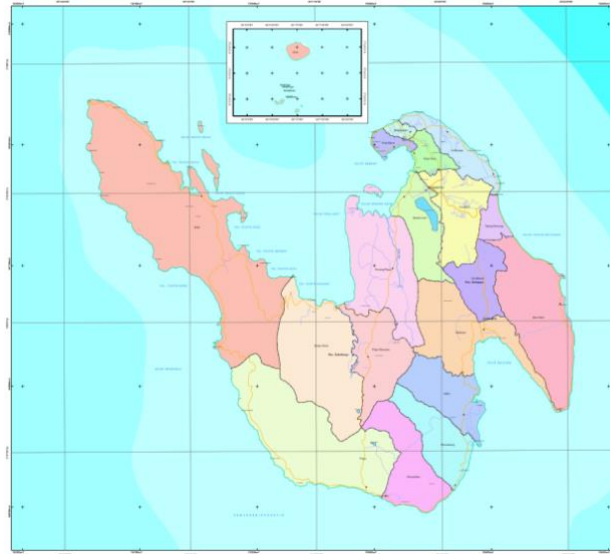
2. METODE

2.1 Waktu dan Metode Kajian

Kota Sabang, kota administratif paling utara di provinsi Aceh, terletak di Pulau Weh, yang terkenal dengan ekosistem terumbu karangnya yang baik dan pemanfaatan garis pantainya yang intensif untuk kegiatan rekreasi dan pariwisata (Kamal dan Anwar, 2021). Sektor pariwisata menjadi penggerak utama pertumbuhan dan perkembangan kota, melalui pemanfaatan sumber daya kelautan pulau, dengan kegiatan seperti diving dan snorkeling. Pengembangan pelabuhan strategis menempatkan kota ini pada jalur pertumbuhan ekonomi di masa depan, sementara alam yang masih asli menawarkan peluang bagi pariwisata berkelanjutan.

Perairan pulau ini juga terhubung dengan Samudra Hindia, Laut Andaman, dan Selat Malaka. Secara umum, wilayah Kota Sabang berada pada ketinggian sekitar 28 m di atas permukaan laut. Morfologinya sebagian besar berupa relief pegunungan yang mencakup 48,17% dari total wilayah. Secara spesifik, dataran bergelombang mencakup 31,70% dari wilayah Sabang, sementara dataran curam dan dataran datar masing-masing mencakup 14,10% dan 6,03% dari total wilayah.

Penelitian ini memanfaatkan data satelit dan penginderaan jauh yang diperlukan untuk melakukan penilaian spasial terhadap bahaya

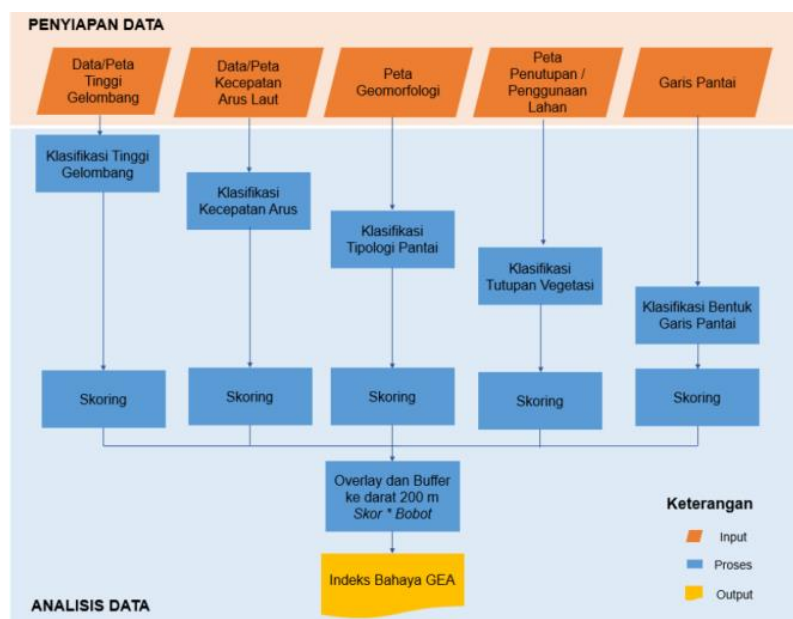


Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Pulau Weh, Kota Sabang, Provinsi Aceh

gelombang ekstrim dan abrasi. Data tersebut diperoleh dari berbagai sumber, termasuk KLHK (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan), BIG (Badan Informasi Geospasial), dan BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika). Untuk tinggi gelombang dan kecepatan arus, data diperoleh dari Ocean Forecast System (OFS). Data tersebut merupakan hasil reanalisis model InaWaves, yang merupakan *nesting* dari model global Wave Watch III. Resolusi spasial global Wave Watch III adalah 0.5° , sedangkan InaWaves menggunakan resolusi 0.125° untuk perairan regional Indonesia. Model InaWaves berjalan dalam siklus 12-jam, dimana

data tersedia mulai pukul 06:00 WIB untuk siklus model 12:00 UTC.

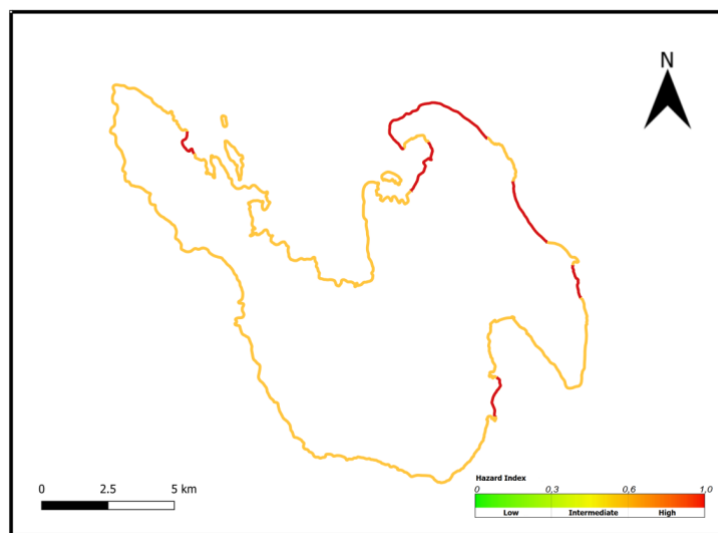
Data dan peta geomorfologi, tutupan lahan serta garis pantai diperoleh dari data DEMNAS Badan Informasi Geospasial (BIG). Data vektor (poligon) tersebut telah diproses dari hasil citra satelit, foto UAV dan pengukuran lapangan dengan resolusi horizontal mendekati 5 m. Semua data diberikan skor individual, kemudian diproses dengan perangkat lunak QGIS untuk membuat peta bahaya, berdasarkan algoritma yang tercantum dalam Perka BNPB No. 12. Langkah-langkah rinci metodologi penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir pengolahan data

Tabel 2. Parameter penyusun dan skoring bahaya gelombang ekstrem dan abrasi (GEA)

Parameter	Skor			Bobot
	0.333	0.666	1	
Tinggi Gelombang	< 1m	1 - 2,5 m	> 2,5 m	30%
Arus	< 0,2	0,2 - 0.4	> 0,4	30%
Tipologi Pantai	Berbatu karang	Berbatu pasir	Berlumpur	10%
Tutupan Vegetasi	> 80% hutan	40 - 80%	< 40%	15%
Bentuk Garis Pantai	Berteluk	Lurus-berteluk	Lurus	15%



Gambar 3. Peta bahaya GEA

2.2 Pembobotan

Setiap parameter, mulai dari tinggi gelombang hingga garis pantai, diberikan skor berdasarkan risiko dan tingkat paparan terhadap gelombang ekstrim dan abrasi. Sistem pembobotan mencerminkan kontribusi relatif setiap faktor terhadap intensitas bahaya:

- 1) Tinggi gelombang (30%): Berbanding lurus dengan energi gelombang ($E = \frac{1}{8} \rho g h^2$) di mana peningkatan dua kali lipat tinggi gelombang akan melipatgandakan energi yang ditransfer sebesar empat kali lipat
- 2) Kecepatan Arus (30%): Mengatur kapasitas transpor sedimen ($Q \propto u^3$), di mana arus yang lebih cepat meningkatkan erosi pada fondasi infrastruktur
- 3) Tutupan Vegetasi (10%): Hutan mangrove dan vegetasi pesisir mengurangi energi gelombang sebesar 50–90% melalui gaya hambat, tetapi bobot yang lebih rendah mencerminkan variabilitas efektivitas antar spesies
- 4) Geometri Garis Pantai (10%): Teluk dan tanjung memusatkan energi gelombang melalui refraksi, meningkatkan erosi lokal, sedangkan pantai lurus menyebarkan energi secara merata
- 5) Tipologi Pesisir (10%): Pantai berbatu lebih tahan abrasi dibandingkan sedimen tidak terkonsolidasi, meskipun sifat statis parameter ini mengurangi bobotnya.

Hierarki ini memastikan bahwa variabel dinamis yang terukur (gelombang, arus) mendominasi penilaian, sementara faktor statis

atau heterogen (terumbu, vegetasi) memberikan penyesuaian sekunder.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Peta Bahaya Gelombang Ekstrem dan Abrasi

Berdasarkan masing-masing parameter berbobot, peta bahaya gelombang ekstrem dan abrasi dibuat menggunakan QGIS. Parameter-parameter tersebut kemudian dianalisis untuk mengamati signifikansi peningkatan atau penurunan risiko bahaya alam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pantai utara, pantai timur, dan pantai timur laut Pulau Weh, serta sebagian kecil pantai barat laut berada pada risiko tinggi terhadap gelombang ekstrem dan abrasi.

Dari total panjang garis pantai sekitar 95 km (Kantamoni *et al.*, 2022), enam segmen dengan tingkat paparan tinggi dapat diidentifikasi di Kota Sabang. Total panjang garis pantai dari segmen-segmen tersebut mencapai 13979 m atau hampir 14,73% dari seluruh kawasan pesisir. Segmen garis pantai terpanjang adalah Segmen 3 (5921 m), diikuti oleh Segmen 4 (2441 m), Segmen 2 (2314 m), Segmen 6 (1954 m), Segmen 1 (736 m), dan Segmen 5 (610 m), secara berurutan. Sisa kawasan pesisir (81000 m) memiliki indeks bahaya alam menengah. Segmen 4 dan 5 diklasifikasikan sebagai garis pantai dengan morfologi lurus, sedangkan Segmen 2 dan 3 terdiri dari area teluk yang lurus. Selain itu, garis pantai berupa teluk juga ditemukan pada Segmen 1 dan 6.

3.2 Tinggi Gelombang

Nilai tinggi gelombang dan kecepatan arus digunakan sebagai data awal untuk menghitung potensi bahaya di daratan. Setiap parameter

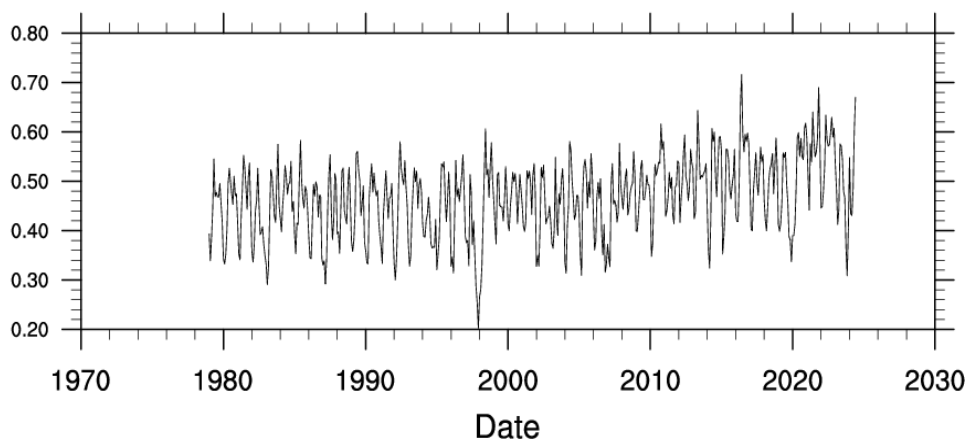
diklasifikasikan ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi. Klasifikasi tinggi gelombang dianggap rendah jika tinggi gelombang di garis pantai kurang dari 1 m, sedang jika berada di antara 1 hingga 2,5 m, dan tinggi jika lebih dari 2,5 m.

Gambar 4 memperlihatkan data tinggi gelombang signifikan bulanan rata-rata dari ECMWF ORAS5 untuk wilayah 4 LU - 6 LU dan 93 BT - 96 BT. Grafik menunjukkan pengukuran gelombang dalam kurun tahun 1980 hingga 2025, dengan nilai yang berada di antara 0,2 m dan 0,7 m. Data deret waktu menunjukkan adanya tren kenaikan tinggi gelombang signifikan selama periode lebih kurang 45 tahun. Pola ini cukup konsisten dengan pola kenaikan muka air laut global, dimana sejak 1980 terdapat kenaikan sebesar 0,3% per dekade (Meucci *et al.*, 2023).

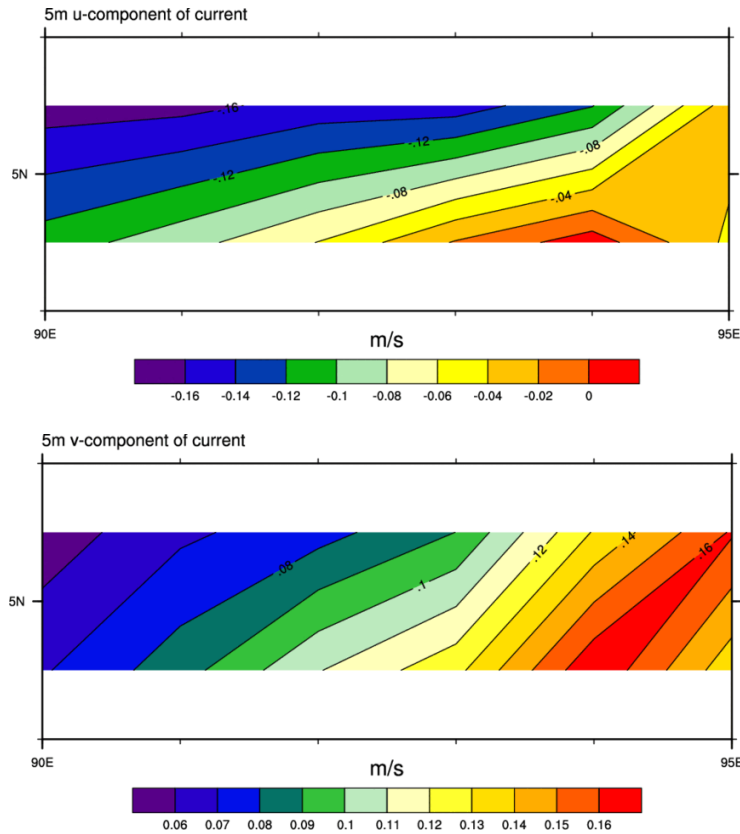
Kemudian, terdapat sinyal siklus musiman dengan osilasi teratur yang kemungkinan sesuai dengan pola musim hujan tahunan di perairan Kota Sabang (Kantamoni, 2022). Pengaruh letak geografis diasumsikan menjadi faktor dominan, dimana Pulau Weh berada di sekitar wilayah Teluk Benggala dan Laut Andaman. Variasi antartahunan gelombang mungkin sesuai dengan mode iklim seperti ENSO (El Niño-Southern Oscillation) atau IOD (Indian Ocean Dipole). Sementara itu, variabilitasnya tampak meningkat di dekade 2010-an, dengan puncak yang teramati lebih tinggi dibandingkan tahun-tahun sebelumnya.

3.3 Kecepatan Arus

Untuk melihat telekoneksi antara mode iklim dengan gelombang ekstrem dan abrasi, data reanalisis model ORAS5 akan ditinjau, baik melalui komponen kecepatan arah-*u* maupun arah-*v*. Data memperlihatkan profil kecepatan



Gambar 4. Tinggi gelombang signifikan



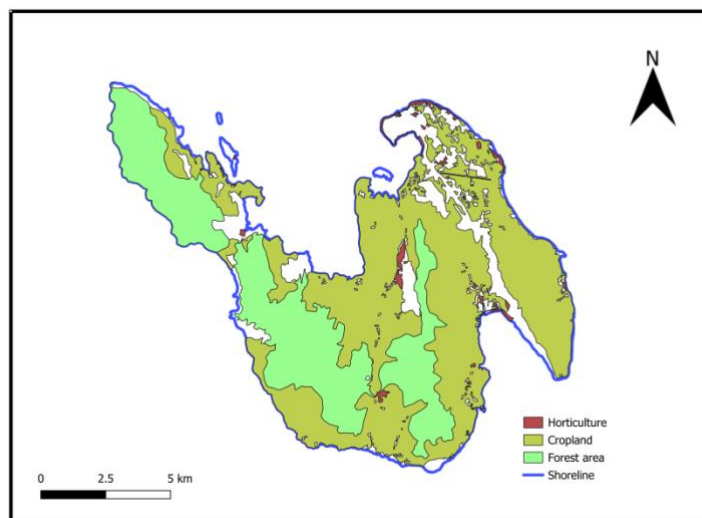
Gambar 5. Profil kecepatan a) arah-*u*; dan b) arah-*v*

rata-rata arus bulanan pada kedalaman 5 m dari bulan Januari 2004 hingga Januari 2024 pada wilayah perairan Pulau Weh, yakni antara 90 BT - 95 BT dan di sekitar 5 LU.

Gambar 5a menunjukkan komponen zonal (timur-barat) arus laut (*u-component*) pada kedalaman 5 meter dari data reanalisis ORAS5 periode Januari 2004–2024. Plot mencakup wilayah kecil antara 90°BT hingga 95°BT dan berpusat di sekitar 5°LU. Seluruh wilayah menunjukkan nilai komponen *u* negatif (sekitar -0,16 hingga 0 m/s), mengindikasikan aliran ke arah barat yang konsisten. Terdapat gradien spasial kekuatan arus, di mana aliran barat terkuat (warna biru tua/ungu sebesar -0,16 hingga -0,12 m/s) terdeteksi di bagian barat dan utara. Di sisi lain, pelemahan signifikan aliran ke arah timur (warna kuning hingga jingga sebesar 0,04 hingga -0,02 m/s) menunjukkan pengaruh potensial dari Arus Khatulistiwa Selatan (*South Equatorial Current*) atau sistem arus batas barat di wilayah Teluk Benggala/Laut Andaman. Rerata temporal (20 tahun) mengindikasikan bahwa pola ini merupakan fitur klimatologis persisten, bukan fenomena transien.

Gambar 5b memperlihatkan komponen meridional (utara-selatan) arus laut (*v-component*), dengan cakupan wilayah yang sama seperti gambar komponen *u* sebelumnya. Seluruh wilayah menunjukkan nilai komponen *v* positif (0,06–0,16 m/s), mengindikasikan aliran ke utara yang dominan. Aliran utara terlemah berada di bagian barat (warna ungu-biru dengan kecepatan 0,06–0,08 m/s), sedangkan penguatan signifikan ke arah timur ditunjukkan dengan warna jingga-merah, dimana terlihat gradien spasial hingga 0,16 m/s).

Pola gabungan *u* dan *v* ini menunjukkan keberadaan sistem arus sepanjang pantai yang mungkin mengikuti kontur batimetri timur Teluk Benggala/Laut Andaman. Sistem arus ini diduga sebagai arus batas (*boundary current*) yang dipengaruhi oleh angin muson, mengingat sensitivitas wilayah ini terhadap pola angin musiman. Konsistensi pola selama 20 tahun menunjukkan bahwa ini merupakan ciri sirkulasi regional yang kuat. Pola ini mungkin juga terkait dengan Arus Batas Barat Teluk Benggala atau bagian dari Sistem Arus Pantai Timur India (*East India Coastal Current*).



Gambar 6. Pola spasial sebaran vegetasi

Pola arus ini selaras dengan gradien SSH meridional yang teramati sebelumnya, di mana arus geostropik permukaan merupakan respons terhadap gradien tekanan permukaan laut. Aliran barat laut yang persisten berpotensi memengaruhi transport panas dan sedimen ke wilayah pesisir Myanmar-Bangladesh.

3.4 Vegetasi

Berdasarkan variasi spasial, bagian barat dan utara Kota Sabang yang direpresentasikan oleh Segmen 2, 3, 4, dan 5 sebagian besar digunakan untuk pertanian dan hortikultura. Terlihat dari Gambar 6 bahwa di Segmen 2 dan Segmen 3 secara khusus, garis pantai merupakan area dengan kepadatan penduduk yang tinggi, dan penduduk setempat memanfaatkan lahan untuk menanam tanaman sekunder, seperti kelapa, pala, dan kakao (Badan Pusat Statistik, 2021). Sementara itu, di bagian utara (Segmen 1) dan bagian selatan (Segmen 6), kepadatan kawasan hutan dan pertanian masih cukup tinggi, meskipun hanya dihuni oleh sebagian kecil penduduk. Diasumsikan bahwa morfologi teluk pada Segmen 1 dan Segmen 6 secara dominan berkontribusi terhadap tingginya paparan risiko bahaya alam. Hal ini juga didukung oleh peraturan kebijakan lokal yang menetapkan 6743,33 ha dari total wilayah kota untuk ekosistem pohon dan mangrove.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penilaian risiko bahaya alam dengan menggunakan pendekatan sistem

informasi geografis, hasil penelitian ini telah mengidentifikasi daerah-daerah yang sangat rentan, terutama yang terletak di pantai utara, pantai timur dan timur laut Pulau Weh, serta sebagian kecil di pantai barat laut. Terdapat enam segmen garis pantai yang lebih rentan terhadap gelombang ekstrim dan abrasi. Dua daerah, yaitu Segmen 1 dan Segmen 6, memiliki risiko bahaya alam yang tinggi akibat morfologi pantai, sementara segmen lainnya diklasifikasikan sebagai garis pantai dengan paparan tinggi karena daerah tersebut tidak memiliki tutupan vegetasi hutan yang luas. Selain itu, sebagian besar penduduk tinggal di bagian utara dan barat Pulau Weh. Daerah-daerah ini perlu diprioritaskan untuk penanganan secara komprehensif atau dengan pendekatan lanjutan. Selain itu, ditemukan bahwa geomorfologi pesisir dan lingkungan sekitarnya merupakan faktor yang relatif dominan dan memberikan kontribusi lebih besar terhadap bahaya gelombang ekstrim dan abrasi, dibandingkan dengan kenaikan permukaan laut dan tinggi gelombang signifikan. Diharapkan hasil temuan ini dapat dipertimbangkan dalam perancangan kebijakan dan rencana penggunaan lahan yang berkelanjutan di Kota Sabang.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, A., Irwansyah, M., Nizamuddin, N., & Ramli, I. 2019. Land use and cover changes and their implications on local climate in Sabang City, Weh Island, Indonesia. *Journal of Urban Planning and Development*. 145(4): 1-7

- Arif, A.A., Machdar, I., & Achmad, A. 2019. Changes of land use and land cover in small Islands case study: Weh-Sabang Island, Indonesia. *Jurnal Koridor*. 10(1): 48-53.
- Dasgupta, R., and Shaw, R. 2017. *Disaster risk reduction: A critical approach*. In The Routledge handbook of disaster risk reduction including climate change adaptation (pp. 12-23). Routledge.
- Dhiauddin, R., Gemilang, W.A., and Wisna, U.J. 2017. Pemetaan Kerentanan Pesisir Pulau Simeulue Dengan Metode CVI (*Coastal Vulnerability Index*). *EnviroScientiae*. 13 (2): 157-170.
- Field, J.C., Boesch, D.F., Scavia, D., Buddemeier, R., Burkett, V. R., Cayan, D., ... & Titus, J.G. 2001. *Potential consequences of climate variability and change on coastal areas and marine resources*. Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change, Report for the US Global Change Research Program. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 461-487.
- Gornitz, V. 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 89(4): 379-398.
- Hastuti, A.W., Nagai, M., and Suniada, K.I. 2022. Coastal Vulnerability Assessment of Bali Province, Indonesia Using Remote Sensing and GIS Approaches, *Remote Sensing*, 14(17):1-21
- Irham, M., Rusydi, I., Haridhi, H.A. 2021. Coastal Morphology of the West Coast of Aceh Besar: A Coastal Morphology Assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9(8): 1-15
- Kamal, M. and Anwar, D.R. 2021. The coastal design of the Sumur Tiga beach as a coastal tourism destination. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci*. 879 012020
- Kantamaneni, K., Christie, D., Lyddon, C.E. 2022. A Comprehensive Assessment of Climate Change and Coastal Inundation through Satellite-Derived Datasets: A Case Study of Sabang Island, Indonesia. *Remote Sensing*. 14(12):2857
- Lee, T.L., Chen, C.H., Pai, T.Y. and Wu, R.S. 2015. Development of a Meteorological Risk Map for Disaster Mitigation and Management in the Chishan Basin, Taiwan. *Sustainability*. 7(1): 962-987
- Lin, T.Y., Van Onselen, V.M., and Vo, L.P., 2021. Coastal erosion in Vietnam: Case studies and implication for integrated coastal zone management in the Vietnamese south-central coastline. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 652 012009
- Meucci, A., Young, I.R., Pepler, A., Rudeva, I., Ribal, A., Bidlot, J.R., & Babanin, A.V. 2023. Evaluation of Spectral Wave Models Physics as Applied to a 100-Year Southern Hemisphere Extra-Tropical Cyclone Sea State. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 128(9): 1-23
- Neumann, F., Negrete-Aranda, R., Harris, R. N., Contreras, J., Sclater, J.G., & González-Fernández, A. 2017. Systematic heat flow measurements across the Wagner Basin, northern Gulf of California. *Earth and Planetary Science Letters*. 479: 340-353.
- Noor, N.M. and Abdul Maulud, K.N. 2022. Coastal Vulnerability: A Brief Review on Integrated Assessment in Southeast Asia. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10(5): 1-17
- Rasyidi, H.T.A., Haditiar, Y., Ikhwan, M., Wafdan, R., Setiawan, I., Sugianto, S., & Rizal, S. 2019. Effect of wind-driven currents circulation in Sabang Waters. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 348(1): 012094
- Roukounis, C.N. and Tsihrintzis, V.A. 2022. Indices of Coastal Vulnerability to Climate Change: a Review. *Environmental Processes*. 9(29): 1-25
- Sierra, J.P., and M. Casas-Prat. Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions. 2014. *Climatic Change*. 124: 861-876.
- Wisna, U.J., & Ilham, I. 2020. Hydrodynamics Sabang Bay and Its Influence on Near Shore Sediment Transport, Weh Island, Indonesia. *Jurnal Segara*. 16(2): 127-138.