Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856 DOI : 10.14710/jmr.v15i4.58170
EISSN: 2407-7690
https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jmr

Evaluasi Geospasial Skenario Solusi Berbasis Alam (*Nature-Based Solutions*) terhadap Indeks Kerentanan Tsunami di Bantul

Muharnanta Fahreza, Muhammad Helmi, Ummu Salma*
Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia
Corresponding author: ummusalma@lecturer.undip.ac.id

ABSTRAK: Penelitian ini mengevaluasi perubahan indeks kerentanan tsunami di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, melalui analisis geospasial berbasis *weighted overlay*. Lima parameter digunakan, yaitu elevasi, kemiringan lereng, jarak dari garis pantai, penggunaan lahan, dan jarak dari sungai. Penilaian dilakukan pada skala kabupaten dan wilayah pesisir Srandakan, Sanden, serta Kretek seluas sekitar 6.924 ha. Kondisi eksisting dibandingkan dengan skenario nature-based solutions (NbS) berupa konversi penggunaan lahan menjadi sabuk hijau pantai. Pada wilayah pesisir, kelas kerentanan sangat tinggi menempati 528,77 ha dan kelas tinggi 4.260,79 ha. Setelah penerapan skenario, luas kedua kelas tersebut menjadi 490,75 ha dan 4.237,07 ha. Kelas sedang meningkat dari 2.005,09 ha menjadi 2.033,69 ha. Hasil ini menunjukkan perubahan distribusi kelas indeks akibat modifikasi penggunaan lahan. Karena proses hidrodinamika tidak dimodelkan, perubahan indeks tidak menunjukkan besarnya reduksi energi tsunami maupun genangan aktual.

Kata kunci: tsunami; kerentanan spasial; solusi berbasis alam; sistem informasi geografis

Geospatial Evaluation of Nature-Based Solutions Scenarios for Tsunami Vulnerability Index in Bantul

ABSTRACT: *This study assesses changes in a spatial tsunami vulnerability index in Bantul Regency, Yogyakarta, Indonesia, using a GIS-based weighted overlay. The index combines elevation, slope, distance from the shoreline, land use, and distance from rivers. The analysis covers the regency and a coastal area of approximately 6,924 ha in Srandakan, Sanden, and Kretek. The existing land-use condition was compared with a nature-based solutions (NbS) scenario involving the conversion of selected coastal areas into a vegetated greenbelt. Before the scenario, the very-high and high vulnerability classes covered 528.77 and 4,260.79 ha, respectively. Under the NbS scenario, these areas decreased to 490.75 and 4,237.07 ha. The moderate class increased from 2,005.09 to 2,033.69 ha. The results indicate a shift in index classes associated with land-use modification. Because hydrodynamic processes were not simulated, the observed changes cannot be interpreted as measured reductions in tsunami energy or inundation.*

Keywords: *tsunami; spatial vulnerability; nature-based solutions; geographic information system*

PENDAHULUAN

Indonesia berada di kawasan tektonik aktif dengan potensi gempa bumi bawah laut dan tsunami. Tsunami dapat dipicu oleh deformasi dasar laut akibat gempa, longsor bawah laut, atau aktivitas vulkanik. Dampaknya dipengaruhi oleh karakteristik sumber, batimetri, serta bentuk dan penggunaan lahan pesisir (Horspool *et al*., 2014; Chatenoux dan Peduzzi, 2007). Catatan kejadian tsunami di Indonesia memperlihatkan besarnya ancaman bagi permukiman dan infrastruktur pantai (Reid dan Mooney, 2023). Oleh karena itu, informasi spasial mengenai kondisi fisik wilayah pesisir diperlukan sebagai dasar penilaian kerentanan dan penentuan prioritas mitigasi.

Diterima : 23-06-2026 ; Diterbitkan : 20-11-2026

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Potensi tsunami di selatan Pulau Jawa berkaitan dengan subduksi Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Sunda (Widiyantoro *et al*., 2020). Pergerakan pada zona subduksi tersebut dapat menghasilkan gempa bawah laut yang mengganggu kolom air. Ketika mencapai perairan dangkal, gelombang tsunami mengalami perubahan tinggi dan kecepatan yang dipengaruhi oleh kondisi perairan dan topografi pantai. Variasi karakteristik pesisir menyebabkan tingkat paparan terhadap bahaya tsunami tidak seragam antarwilayah (Sambah *et al*., 2024).

Kabupaten Bantul memiliki garis pantai yang menghadap langsung ke Samudra Hindia. Kecamatan Srandakan, Sanden, dan Kretek mencakup dataran rendah pesisir dengan kemiringan relatif landai. Kondisi ini penting diperhitungkan dalam penilaian kerentanan spasial. Ancaman tsunami di wilayah selatan Yogyakarta berbeda dari gempa darat Yogyakarta pada 27 Mei 2006 yang tidak memicu tsunami. Sebaliknya, tsunami 17 Juli 2006 di pesisir selatan Jawa dipicu oleh gempa bawah laut di sekitar Pangandaran (Reid dan Mooney, 2023; Fritz *et al*., 2007; Lavigne *et al*., 2007). Pembedaan kedua peristiwa tersebut diperlukan agar konteks sumber bahaya tidak keliru.

Nature-based solutions (NbS) merupakan pendekatan pengurangan risiko melalui perlindungan, pengelolaan, dan pemulihan ekosistem (Seddon *et al*., 2020; Temmerman *et al*., 2013). Di wilayah pesisir, pendekatan ini dapat diwujudkan melalui pengembangan sabuk hijau vegetasi pantai (Narayan *et al*., 2016; Spalding *et al*., 2014). Pemilihan jenis vegetasi perlu mempertimbangkan substrat, keterbukaan terhadap gelombang, dan kondisi habitat setempat. Mangrove, misalnya, lebih sesuai pada lingkungan muara atau laguna tertentu daripada pantai berpasir yang terbuka (Alongi, 2008). Untuk kawasan pantai berpasir, cemara udang dan pandan laut dapat dipertimbangkan sebagai komponen vegetasi pantai sesuai kesesuaian ekologis lokasi (Tanaka *et al*., 2007). Bukti pasca tsunami Samudra Hindia menunjukkan bahwa vegetasi pantai di beberapa lokasi berkaitan dengan kerusakan yang lebih rendah, tetapi tingkat perlindungannya dipengaruhi kondisi setempat (Danielsen *et al*., 2005; Kathiresan dan Rajendran, 2005).

Penelitian terdahulu telah menerapkan indeks spasial untuk mengidentifikasi variasi kerentanan tsunami pada kawasan pesisir (Fuad *et al*., 2025; Effendi *et al*., 2025). Namun, perubahan nilai indeks akibat penataan penggunaan lahan berbasis NbS masih perlu dievaluasi dalam konteks pesisir Bantul. Penelitian ini bertujuan memetakan indeks kerentanan tsunami berdasarkan lima parameter fisik-spasial dan membandingkan kondisi eksisting dengan skenario sabuk hijau pantai. Analisis dilakukan pada tingkat kabupaten serta wilayah pesisir Srandakan, Sanden, dan Kretek. Perbandingan tersebut dibatasi pada perubahan skor komposit dan tidak mencakup simulasi penjalaran atau genangan tsunami.

MATERI DAN METODE

Wilayah penelitian mencakup Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, pada koordinat sekitar 07°44′04″–08°00′27″ LS dan 110°12′34″–110°31′08″ BT. Analisis pesisir difokuskan pada Kecamatan Srandakan, Sanden, dan Kretek (Gambar 1). Data yang dianalisis terutama mewakili kondisi tahun 2025, sedangkan pengolahan dilakukan pada Januari–Maret 2026.

Analisis menggunakan Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) dengan resolusi sekitar 8 m, peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1:25.000, citra Landsat 8 OLI/TIRS, dan data kependudukan BPS Kabupaten Bantul. DEMNAS digunakan untuk menentukan elevasi dan kemiringan lereng. Data RBI menyediakan batas administrasi, garis pantai, dan jaringan sungai. Klasifikasi penggunaan lahan menggunakan Landsat 8 Collection 2 Level-1 tahun 2025 dengan tutupan awan kurang dari 10%; produk Esri Land Cover digunakan sebagai pembanding visual. Pengolahan spasial dilakukan dengan ArcGIS 10.8 pada sistem koordinat WGS 1984 UTM Zona 49S. Raster kontinu diresampling menggunakan *bilinear*, sedangkan raster kategorikal menggunakan *nearest neighbour* pada grid analisis 8 m.

Penggunaan lahan diklasifikasikan dari citra Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 Level-1 yang diperoleh pada Juli 2025. Citra dengan tutupan awan di bawah 10% diproses melalui koreksi radiometrik dan atmosfer, kemudian diklasifikasikan secara terbimbing menggunakan algoritma maximum likelihood di ArcGIS. Kelas daratan terdiri atas permukiman, perkebunan, sawah, area terbuka atau semak, dan hutan; badan air dipisahkan dari analisis daratan. Evaluasi klasifikasi

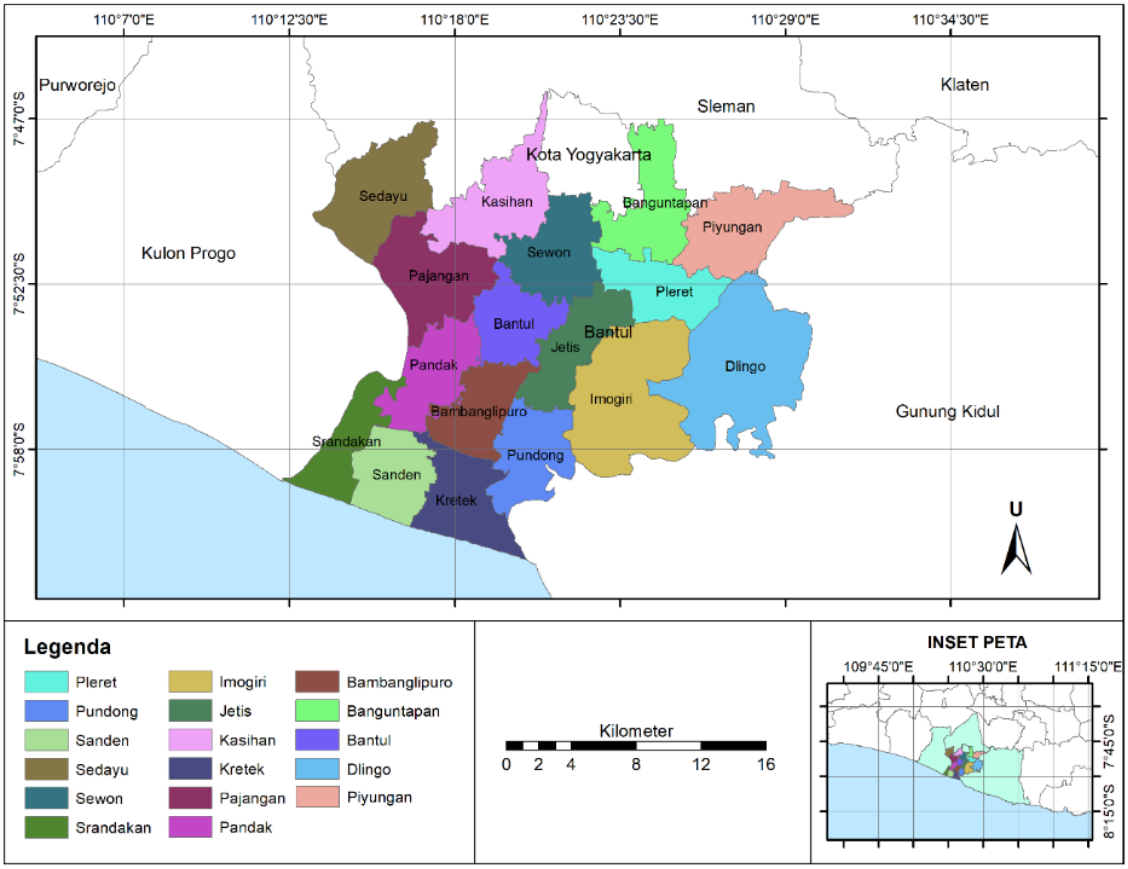
Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

menggunakan 120 titik referensi yang diperoleh dari citra resolusi tinggi dan survei lapangan. Penggunaan matriks konfusi mengacu pada pendekatan penilaian akurasi klasifikasi citra (Congalton, 1991; Foody, 2002). Matriks konfusi menghasilkan *overall accuracy* sebesar 86% dan koefisien kappa 0,82.

Peta penggunaan lahan hasil klasifikasi digunakan sebagai kondisi awal. Skenario NbS kemudian dibangun melalui digitasi poligon sabuk hijau sejajar garis pantai di Kecamatan Sanden dan Kretek. Poligon selebar sekitar 100 m tersebut mencakup area seluas kurang lebih 178 ha. Pada poligon intervensi, kelas permukiman serta area terbuka atau semak disimulasikan berubah menjadi hutan atau vegetasi pantai dengan skor penggunaan lahan 1. Nilai indeks dihitung kembali menggunakan parameter spasial lainnya yang tidak diubah. Rincian intervensi dijelaskan pada subbagian skenario NbS.

Penilaian indeks dilakukan pada seluruh Kabupaten Bantul dan area pesisir terpilih. Area pesisir dibatasi oleh irisan wilayah administratif Srandakan, Sanden, dan Kretek dengan daratan hingga 3.000 m dari garis pantai. Batas tersebut mengikuti rentang jarak pantai yang masih memiliki skor lebih dari 1. Luas hasil analisis adalah 6.924,00 ha untuk kondisi eksisting dan 6.924,10 ha untuk skenario NbS. Selisih 0,10 ha menunjukkan adanya perbedaan kecil pada cakupan spasial kedua keluaran.

Jarak dari sungai dihitung menggunakan *buffer* terhadap jaringan sungai pada peta RBI. Untuk analisis terkait perambatan tsunami melalui koridor sungai, jaringan dibatasi pada Sungai Progo dan Sungai Opak hingga 5 km dari muara. Kedua sungai bermuara langsung ke Samudra Hindia. Hasil seleksi menunjukkan area berjarak 0–100 m seluas 2.438,90 ha dan 100–200 m seluas 2.272,54 ha pada cakupan perhitungan yang dilaporkan. Posisi jaringan terpilih diperiksa secara visual menggunakan citra resolusi tinggi.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Tabel 1. Data yang digunakan dalam penelitian

Jenis data	Kegunaan	Sumber dan keterangan
DEMNAS 1407-53, 1407-54, 1407-63, 1408-21, 1408-22, 1408-23, 1408-24, 1408-31	Elevasi dan kemiringan lereng	BIG / https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/; resolusi DEMNAS 8 m
RBI Kabupaten Bantul	Batas administrasi, garis pantai, dan jaringan sungai	BIG / https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/; RBI 1:25.000
Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 Level-1	Klasifikasi penggunaan lahan	USGS EarthExplorer / https://earthexplorer.usgs.gov/; akuisisi tahun 2025 dengan tutupan awan <10%, digunakan untuk klasifikasi penggunaan lahan
Esri Land Cover (berbasis Sentinel-2A)	Alternatif sumber tutupan lahan	Esri; hanya dipakai sebagai pembanding visual hasil klasifikasi, resolusi 10 m
Data kependudukan per kecamatan	Analisis paparan penduduk secara deskriptif	BPS Kabupaten Bantul / https://bantulkab.bps.go.id/; data tahun 2024

Indeks kerentanan spasial (N) dihitung dengan metode *weighted overlay*, sebagai salah satu pendekatan analisis multikriteria dalam SIG (Malczewski, 2006). Lima parameternya meliputi elevasi (E), jarak dari garis pantai (P), kemiringan lereng (S), penggunaan lahan (L), dan jarak dari sungai (R). Setiap parameter diberi skor 1–5, dengan skor lebih tinggi menunjukkan kerentanan relatif lebih besar. Persamaan pembobotan yang digunakan dalam uraian metode adalah:

$$N = (0{,}25 \times E) + (0{,}20 \times P) + (0{,}20 \times S) + (0{,}15 \times L) + (0{,}20\times R) \quad (1)$$

Pembobotan mengacu pada pertimbangan ahli dan pendekatan dari penelitian terdahulu (Oktaviana *et al*., 2020; Fuad *et al*., 2025). Elevasi memperoleh bobot terbesar, yaitu 0,25, diikuti oleh jarak pantai dan kemiringan lereng sebesar 0,20. Bobot penggunaan lahan (0,15) dan jarak sungai (0,20) sama pada Persamaan (1) dan Tabel 2.

Jumlah bobot sebesar 1,00 menghasilkan nilai indeks teoretis antara 1,00 dan 5,00. Indeks dibagi menjadi lima kelas dengan interval sama lebar, masing-masing 0,95, pada rentang nilai 0,25–5,00 sebagaimana legenda seluruh peta dan tabel hasil. Kelas yang digunakan adalah sangat rendah (0,25–<1,20), rendah (1,20–<2,15), sedang (2,15–<3,10), tinggi (3,10–<4,05), dan sangat tinggi (4,05–5,00). Karena nilai minimum teoretis indeks adalah 1,00, kelas sangat rendah secara efektif mencakup nilai 1,00–<1,20.

Kepadatan penduduk dihitung dengan membagi jumlah penduduk tahun 2024 dengan luas wilayah setiap kecamatan. Hasil dinyatakan dalam jiwa per hektare dan dikelompokkan menjadi rendah (<5 jiwa/ha), sedang (5–10 jiwa/ha), serta tinggi (>10 jiwa/ha) menurut Nabillah *et al*. (2020). Informasi ini digunakan untuk menggambarkan persebaran penduduk secara deskriptif. Kepadatan penduduk tidak dimasukkan ke dalam penghitungan indeks kerentanan fisik-spasial.

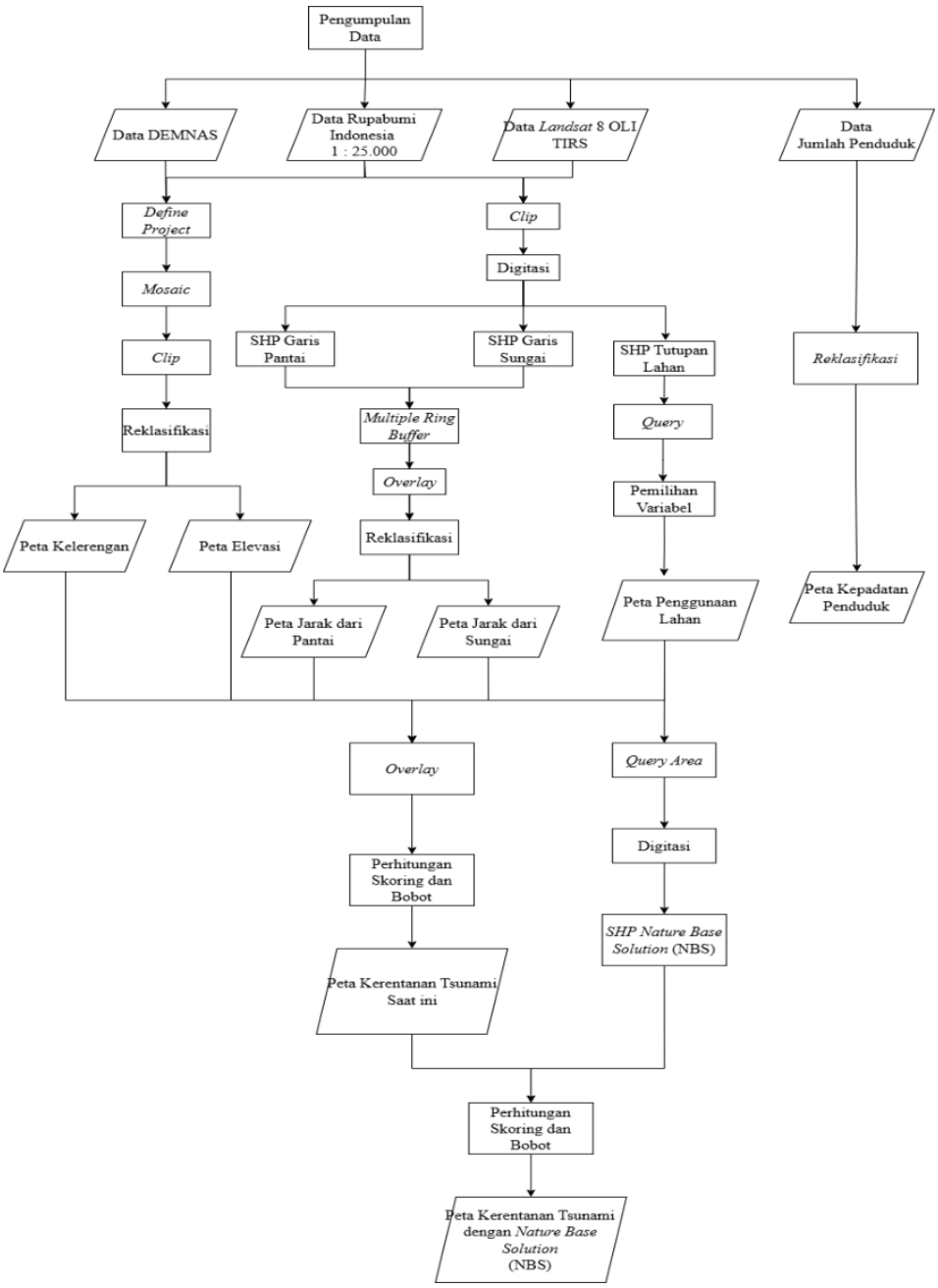
Skenario NbS dirancang sebagai perubahan hipotetis penggunaan lahan pada kawasan pesisir. Area intervensi berupa sabuk hijau sepanjang sekitar 17,8 km dan lebar 100 m, dari pesisir Gadingsari, Kecamatan Sanden, hingga Parangtritis, Kecamatan Kretek. Poligon mencakup sekitar 178 ha pada kisaran 110°15′–110°20′ BT dan 08°00′–08°01′ LS. Jenis vegetasi yang dipertimbangkan meliputi cemara udang (*Casuarina equisetifolia*) dan pandan laut (*Pandanus tectorius*). Kedua jenis tersebut relevan untuk pantai berpasir, sedangkan mangrove memerlukan habitat yang sesuai, terutama pada muara atau laguna (Tanaka *et al*., 2007; Alongi, 2008).

Simulasi hanya mengubah parameter penggunaan lahan. Elevasi, kemiringan lereng, jarak pantai, dan jarak sungai dipertahankan seperti pada kondisi eksisting. Seluruh poligon sabuk hijau

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

diberi kelas hutan dengan skor 1. Dalam data skenario, luas permukiman berkurang dari 19.060,95 menjadi 18.988,80 ha atau 72,15 ha. Luas hutan bertambah dari 8.759,04 menjadi 8.937,21 ha atau 178,17 ha. Sisa perubahan sekitar 106,02 ha berkaitan dengan konversi area terbuka atau semak. Nilai tersebut menunjukkan komposisi perubahan kelas penggunaan lahan pada simulasi.

Model *weighted overlay* menilai perubahan skor spasial akibat skenario penggunaan lahan. Model ini tidak menghitung interaksi gelombang dengan batang, akar, maupun kerapatan vegetasi. Kinerja vegetasi sebagai pelindung pantai bergantung pada karakteristik tegakan dan kondisi aliran (Osti *et al*., 2009; Tanaka *et al*., 2007). Hasilnya karena itu tidak dapat digunakan untuk mengestimasi penurunan tinggi tsunami, kedalaman genangan, atau korban secara langsung.



Gambar 2. Diagram alir penyusunan indeks kerentanan dan skenario penggunaan lahan berbasis NbS.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Tabel 2. Klasifikasi skor dan bobot parameter pada tabel perhitungan

Parameter	Kelas interval / jenis lahan	Skor	Bobot
Elevasi (m)	<12; 12–<30; 30–<45; 45–64; >64	5; 4; 3; 2; 1	0,25
Jarak pantai (m)	0–<500; 500–<1.000; 1.000–<1.500; 1.500–3.000; >3.000	5; 4; 3; 2; 1	0,20
Kemiringan lereng (%)	0–<2; 2–<5; 5–<13; 13–20; >20	5; 4; 3; 2; 1	0,20
Penggunaan lahan	Permukiman; perkebunan; sawah/semak; lahan terbuka; hutan	5; 4; 3; 2; 1	0,15
Jarak sungai (m)	0–<100; 100–<200; 200–<300; 300–500; >500	5; 4; 3; 2; 1	0,20

Sumber klasifikasi: adaptasi dari Fuad *et al*. (2025) dan Oktaviana *et al*. (2020). Batas elevasi disesuaikan dengan karakteristik DEMNAS Kabupaten Bantul.

Tabel 3. Kriteria klasifikasi kepadatan penduduk

Kelas	Jiwa/km²	Jiwa/ha
Rendah	<500	<5
Sedang	500–1.000	5–10
Tinggi	>1.000	>10

Tahapan analisis meliputi penyusunan lima parameter, klasifikasi skor, pembobotan, serta pemetaan indeks komposit (Gambar 2). Evaluasi skenario dilakukan dengan mengubah kelas penggunaan lahan pada poligon sabuk hijau, kemudian menghitung kembali indeks. Perbandingan hasil berfokus pada pergeseran luas setiap kelas kerentanan. Perbedaan cakupan piksel valid dan interval kelas menjadi keterbatasan dalam menafsirkan perubahan yang relatif kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kawasan rendah di dekat pantai lebih terbuka terhadap penjalaran air tsunami dibandingkan perbukitan pada jarak yang sama, sehingga elevasi ikut menentukan jangkauan genangan di daratan. Besarnya genangan tetap dipengaruhi oleh sumber tsunami dan topografi setempat, maka elevasi di sini dipakai sebagai indikator kerentanan relatif (Sambah *et al*., 2024). Peta elevasi memperlihatkan perbedaan topografi antara bagian utara dan selatan Kabupaten Bantul (Gambar 3). Wilayah utara, termasuk sebagian Sedayu, Kasihan, dan Banguntapan, memiliki elevasi lebih tinggi. Sebaliknya, kawasan pesisir Sanden, Srandakan, dan Kretek didominasi oleh dataran rendah. Dalam sistem skoring penelitian, area dengan elevasi rendah menerima skor kerentanan lebih besar.

Kelas elevasi di atas 64 m mencakup 25.607,77 ha atau 49,6% dari peta awal (Tabel 4). Sebaran kelas ini terutama terdapat pada bagian yang lebih tinggi secara topografis. Pada area pesisir seluas sekitar 6.924 ha, elevasi di bawah 12 m mencakup sekitar 5.390 ha atau 77,8%. Proporsi tersebut menunjukkan dominasi dataran rendah dalam wilayah pesisir yang dianalisis.

Pada lereng landai, air tsunami dapat bergerak ke arah darat pada area yang luas, sedangkan perubahan topografi yang lebih terjal dapat membatasi jangkauan genangan pada kondisi tertentu. Pengaruh ini juga bergantung pada karakteristik gelombang, bentuk pantai, dan konfigurasi lahan. Karena itu, kelas lereng 0–<2% diberi skor kerentanan tertinggi (Sambah *et al*., 2024). Kemiringan lereng Kabupaten Bantul dibagi menjadi lima kelas, yaitu 0–<2%, 2–<5%, 5–<13%, 13–20%, dan >20% (Gambar 4). Dataran pesisir di Srandakan, Sanden, serta Kretek terutama menempati kelas datar hingga landai. Area dengan lereng lebih curam terdapat di bagian timur dan utara, termasuk

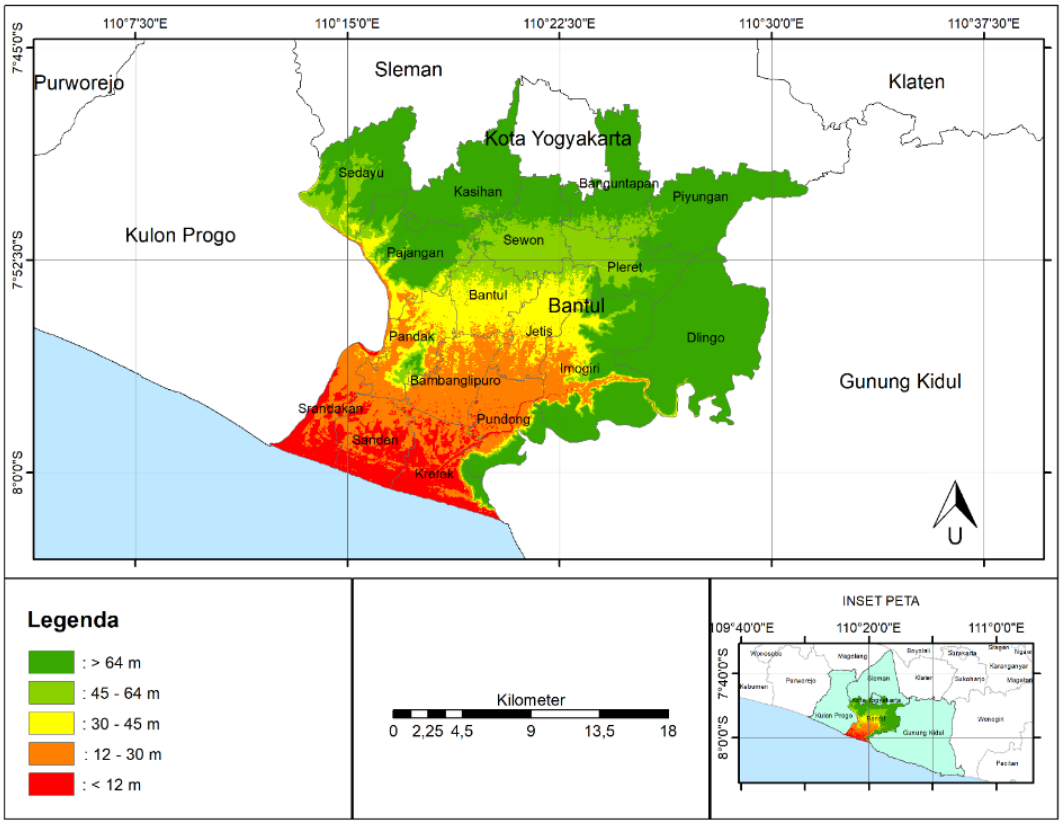
Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Dlingo, Imogiri, serta sebagian Piyungan. Perbedaan ini menghasilkan variasi skor lereng dalam perhitungan indeks.

Kelas kemiringan 2–<5% mempunyai luas terbesar, yaitu 20.087,49 ha atau sekitar 39,1% (Tabel 5). Jumlah luas seluruh kelas lereng sebesar 51.370,31 ha, sedangkan jumlah pada peta elevasi tercatat 51.526,54 ha. Perbedaan cakupan tersebut perlu diperhitungkan ketika membandingkan luas hasil antarparameter.

Tabel 4. Luas dan persentase kelas elevasi pada peta awal Kabupaten Bantul

Kelas elevasi	Luas (ha)	Persentase (%)	Skor	Kelas indeks
<12 m	4.032,61	7,8	5	Sangat tinggi
12–30 m	8.946,18	17,3	4	Tinggi
30–45 m	5.995,41	11,6	3	Sedang
45–64 m	6.944,57	13,4	2	Rendah
>64 m	25.607,77	49,6	1	Sangat rendah
Total (peta awal)	51.526,54	100		

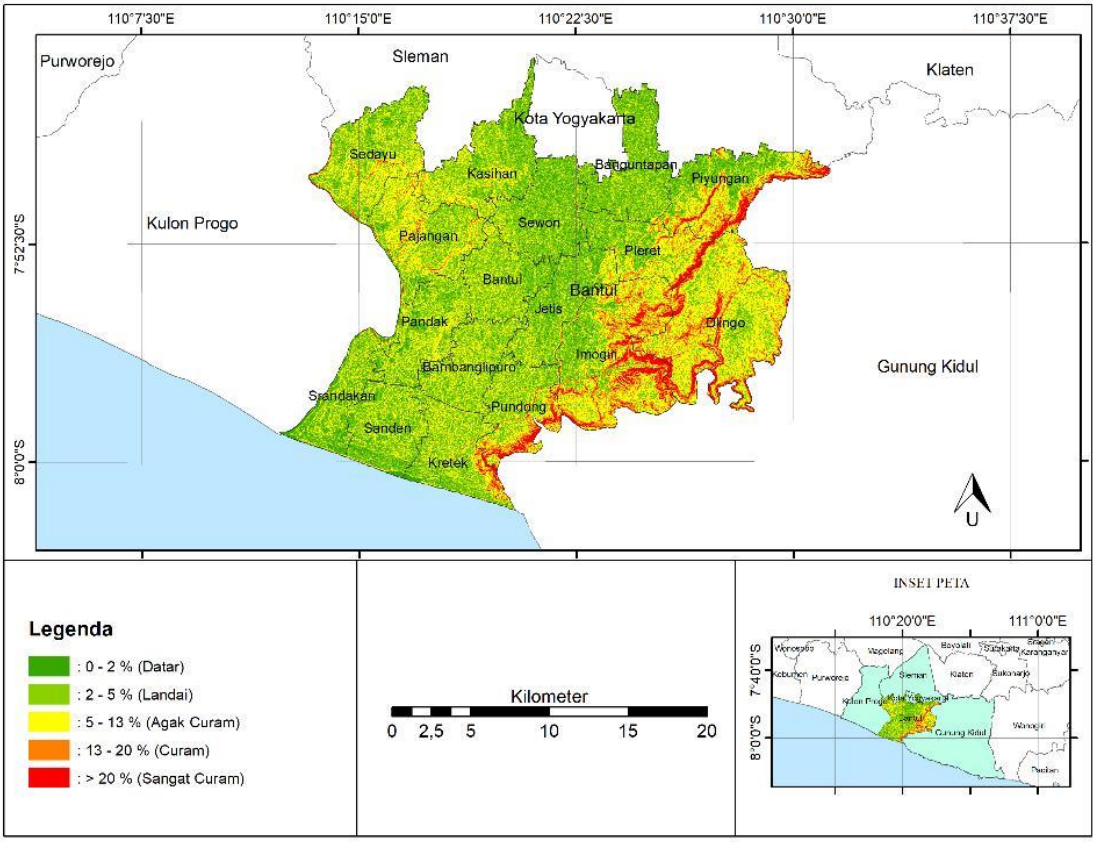


Gambar 3. Peta tingkat elevasi Kabupaten Bantul

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Tabel 5. Luas dan persentase kelas kemiringan lereng pada peta awal

Kelerengan (%)	Luas (ha)	Persentase (%)	Skor	Kelas indeks
0–<2	8.904,54	17,3	5	Sangat tinggi
2–<5	20.087,49	39,1	4	Tinggi
5–<13	16.766,42	32,6	3	Sedang
13–20	3.544,14	6,9	2	Rendah
>20	2.067,72	4,02	1	Sangat rendah
Total (peta awal)	51.370,31	100		



Gambar 4. Peta kemiringan lereng Kabupaten Bantul.

Semakin dekat suatu lokasi dengan garis pantai, semakin besar skor kerentanannya, karena jarak pantai mewakili posisi relatif terhadap sumber paparan tsunami dari laut. Penjalaran air turut dipengaruhi oleh elevasi, kemiringan, dan bentuk lahan, sehingga parameter ini dipakai bersama indikator lain dalam indeks komposit (Effendi *et al*., 2025). Distribusi jarak dari garis pantai di Kabupaten Bantul disajikan pada Gambar 5. Zona 0–500 m membentuk jalur terdekat di sepanjang pesisir Srandakan, Sanden, dan Kretek. Ke arah darat, jarak bertambah melalui kelas 500–<1.000 m, 1.000–<1.500 m, dan 1.500–3.000 m. Sebagian besar wilayah kabupaten berada lebih dari 3.000 m dari garis pantai. Setiap kelas diberi skor yang menurun seiring bertambahnya jarak.

Wilayah yang berjarak lebih dari 3.000 m dari garis pantai mencakup 47.504,76 ha atau 92,19% dari luas peta awal (Tabel 6). Dominasi kelas tersebut terkait dengan cakupan penelitian pada seluruh kabupaten. Untuk interpretasi tsunami pesisir, analisis selanjutnya difokuskan pada daratan

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

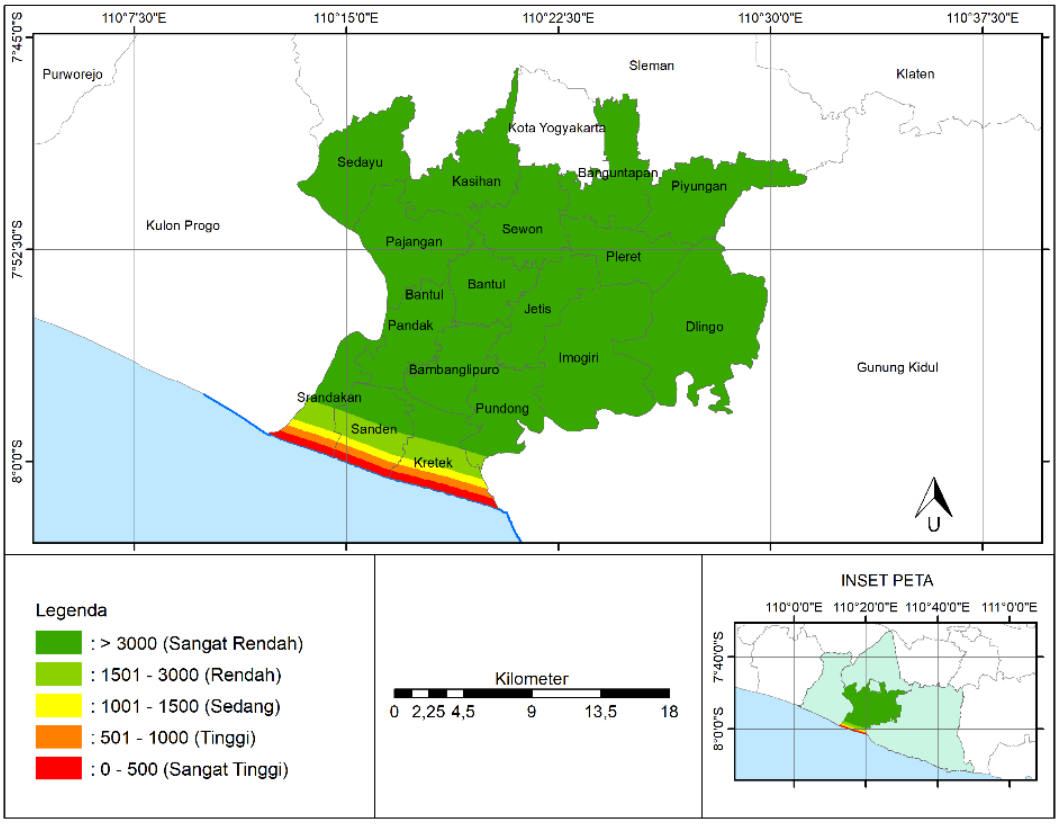
hingga 3.000 m dari pantai. Hasil indeks juga dibandingkan secara kualitatif dengan informasi bahaya tsunami dari InaRISK BNPB.

Dari lima parameter, hanya penggunaan lahan yang dimodifikasi dalam skenario NbS. Kelas permukiman, perkebunan, sawah, area terbuka atau semak, dan hutan diberi skor berbeda sesuai skema indeks, dan pemberian skor ini merupakan asumsi dalam analisis kerentanan spasial.

Peta penggunaan lahan tahun 2025 memperlihatkan persebaran permukiman, sawah, perkebunan, area terbuka atau semak, hutan, dan badan air (Gambar 6). Permukiman tersebar di bagian tengah serta kawasan perkotaan, sedangkan area pertanian dan vegetasi menempati bagian wilayah lainnya. Perbedaan tutupan lahan tersebut menjadi dasar penetapan skor penggunaan lahan sebelum simulasi NbS.

Tabel 6. Luas dan persentase kelas jarak dari garis pantai pada peta awal

Jarak pantai (m)	Luas (ha)	Persentase (%)	Skor	Kelas indeks
0–500	766,60	1,48	5	Sangat tinggi
501–1.000	709,82	1,37	4	Tinggi
1.001–1.500	672,48	1,30	3	Sedang
1.501–3.000	1.872,44	3,63	2	Rendah
>3.000	47.504,76	92,19	1	Sangat rendah
Total (peta awal)	51.526,10	100		



Gambar 5. Peta jarak dari garis pantai Kabupaten Bantul.

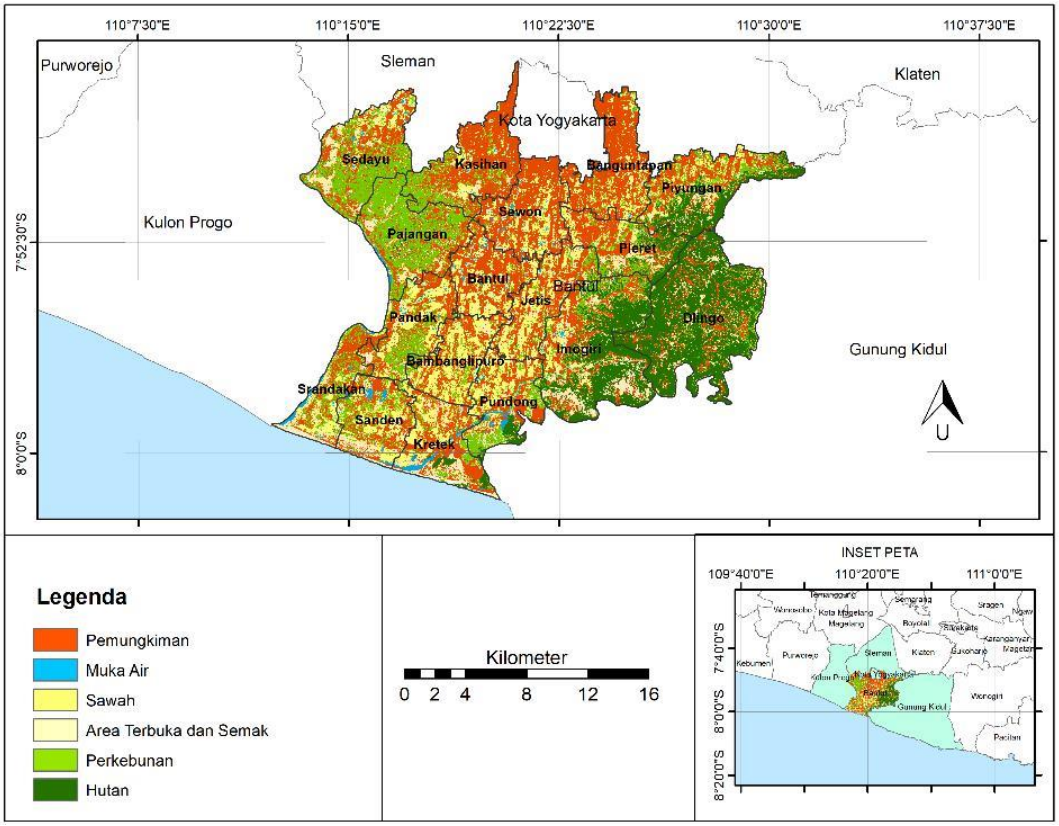
Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Luas lima kelas daratan pada Tabel 7 berjumlah 50.596,85 ha. Badan air mencakup 939,95 ha dan dicatat sebagai kelas terpisah, sehingga jumlah seluruh kelas menjadi sekitar 51.536,80 ha. Dalam skema penilaian daratan, badan air tidak diberi skor kerentanan 1–5. Total luas antartabel tidak identik karena cakupan raster dan piksel valid tiap parameter berbeda, sehingga perbandingan antarparameter dilakukan pada luas kelas masing-masing.

Muara dan alur sungai dapat menjadi jalur masuknya air laut ke daratan saat tsunami, terutama pada pesisir rendah, sehingga berpotensi memengaruhi pola genangan dan jangkauan aliran. Atas dasar itu, jarak dari sungai dimasukkan sebagai salah satu indikator indeks kerentanan spasial (Latue dan Rakuasa, 2022).

Tabel 7. Luas kelas penggunaan lahan pada peta awal Kabupaten Bantul

Jenis lahan	Luas (ha)	Persentase (%)	Skor	Kelas indeks
Permukiman	19.060,95	36,98	5	Sangat tinggi
Perkebunan	8.851,14	17,17	4	Tinggi
Sawah	9.139,11	17,73	3	Sedang
Area terbuka	4.786,61	9,28	2	Rendah
Hutan	8.759,04	16,99	1	Sangat rendah
Jumlah lima kelas daratan	50.596,85	98,15		
Badan air	939,95	1,82	—	Di luar indeks
Total seluruh kelas	51.536,80	100		



Gambar 6. Peta penggunaan lahan Kabupaten Bantul.

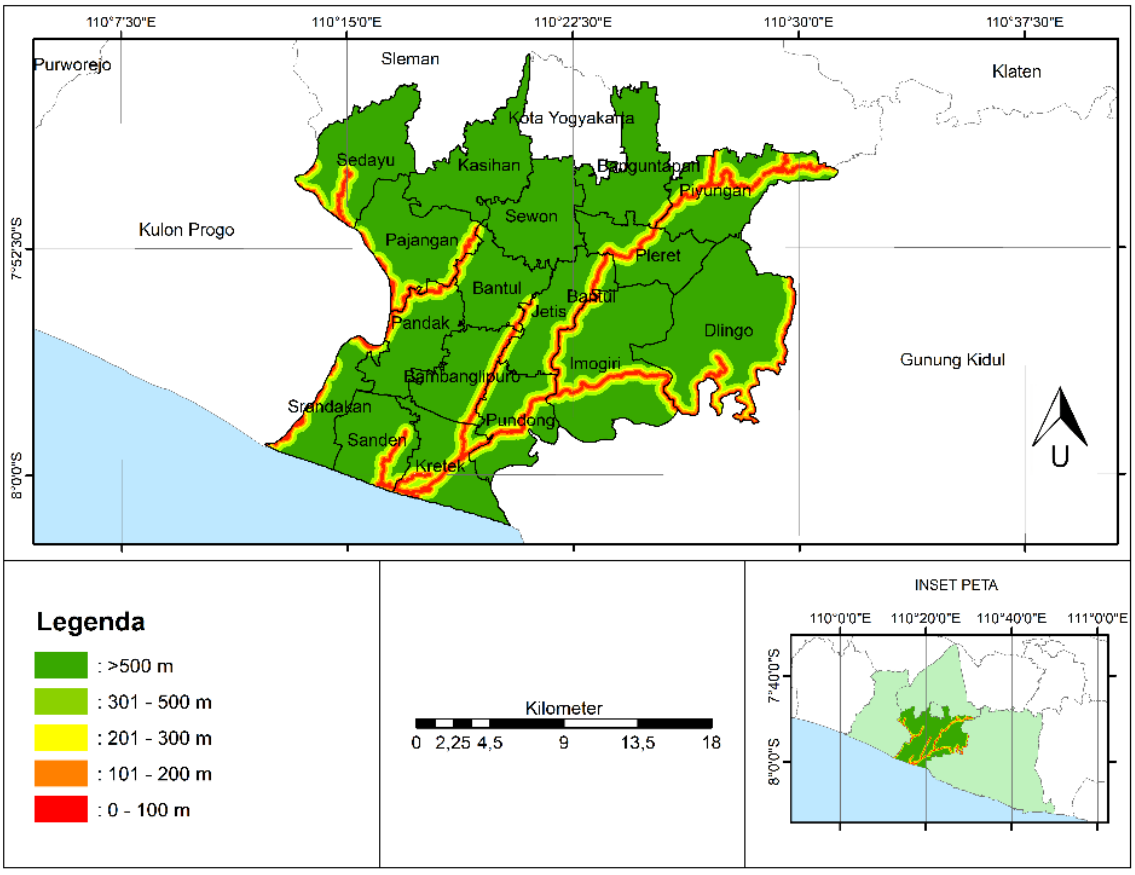
Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Gambar 7 menampilkan hasil penghitungan jarak terhadap seluruh jaringan sungai RBI. Peta tersebut juga mencakup alur sungai dan saluran di wilayah pedalaman. Tidak semua jaringan tersebut merupakan jalur potensial penjalaran tsunami. Oleh karena itu, hasil awal dibandingkan dengan seleksi Sungai Progo dan Sungai Opak pada analisis yang berfokus pada pesisir.

Pada perhitungan awal, 62,7% wilayah kabupaten berada dalam jarak hingga 200 m dari jaringan sungai RBI (Tabel 8). Angka ini menggambarkan kedekatan terhadap seluruh jaringan, termasuk saluran pedalaman. Setelah pembatasan pada koridor sungai terpilih, luas kelas 0–100 m dilaporkan sebesar 2.438,90 ha dan kelas 100–200 m sebesar 2.272,54 ha. Keduanya setara sekitar 9,1% dari total wilayah kabupaten pada cakupan penghitungan tersebut.

Tabel 8. Luas dan persentase jarak dari sungai pada peta awal Kabupaten Bantul

Jarak sungai (m)	Luas (ha)	Persentase (%)	Skor	Kelas indeks
0–100	19.708,87	38,2	5	Sangat tinggi
101–200	12.665,40	24,5	4	Tinggi
201–300	7.434,76	14,4	3	Sedang
301–500	6.774,99	13,1	2	Rendah
>500	4.942,09	9,5	1	Sangat rendah
Total (peta awal)	51.526,11	100		



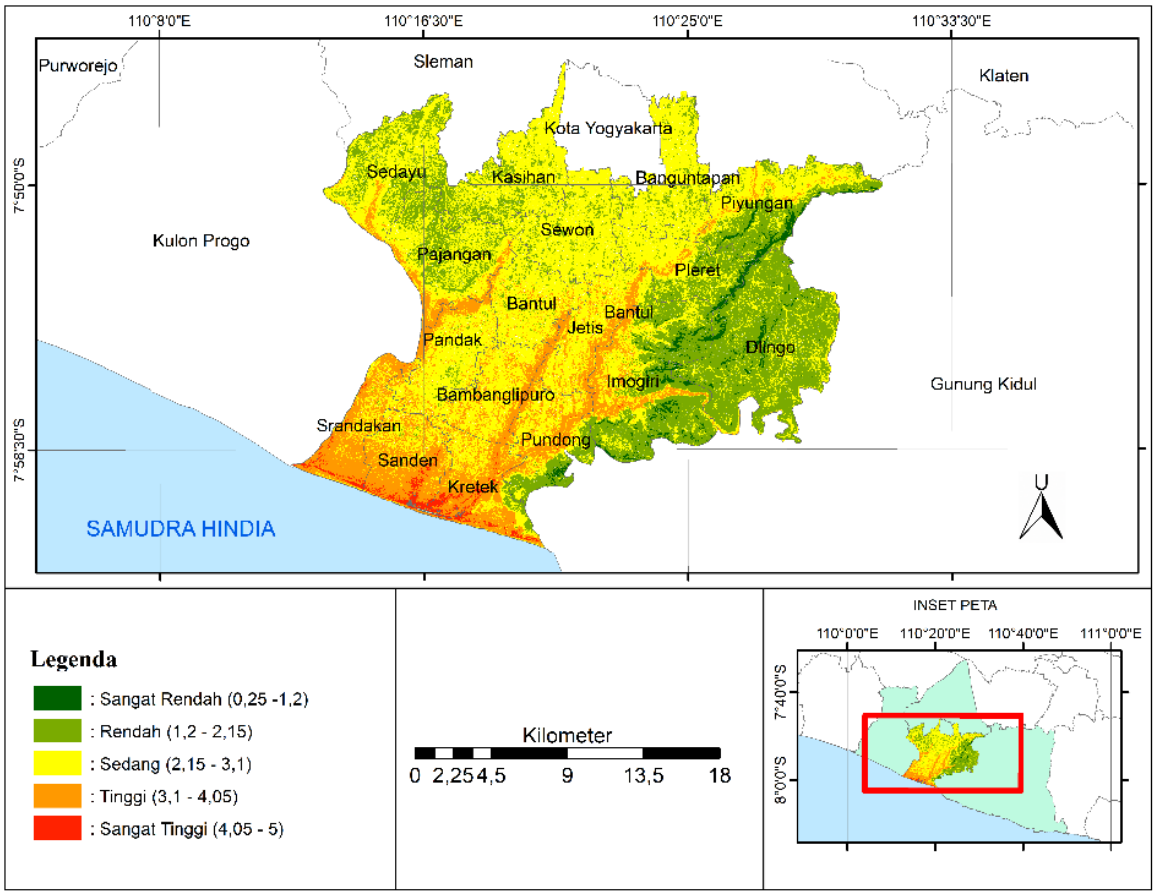
Gambar 7. Jarak dari jaringan sungai RBI di Kabupaten Bantul sebelum seleksi koridor sungai pesisir.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Indeks kondisi eksisting merupakan skor komposit dari lima parameter spasial yang digabungkan melalui weighted overlay, sehingga nilainya menggambarkan kerentanan relatif menurut klasifikasi dan bobot yang digunakan. Peta indeks seluruh Kabupaten Bantul menunjukkan nilai lebih tinggi pada kawasan dataran rendah bagian selatan (Gambar 8). Nilai ini berkaitan dengan kombinasi elevasi rendah, lereng landai, dan jarak yang dekat dengan pantai. Distribusi indeks memperlihatkan kecenderungan serupa dengan informasi bahaya tsunami InaRISK, yaitu konsentrasi nilai tinggi pada dataran pesisir. Perbandingan tersebut bersifat kualitatif dan tidak menggantikan validasi menggunakan data genangan aktual.

Tabel 9. Distribusi kelas indeks kondisi eksisting pada perhitungan awal Kabupaten Bantul

Interval skor asli	Luas (ha)	Persentase (%)	Skor kelas	Kelas
4,05–5,00	548,12	1,06	5	Sangat tinggi
3,10–<4,05	8.850,97	17,1	4	Tinggi
2,15–<3,10	26.419,35	51,1	3	Sedang
1,20–<2,15	14.731,48	28,5	2	Rendah
0,25–<1,20	1.102,86	2,1	1	Sangat rendah
Total area peta	51.652,78	100		



Gambar 8. Indeks kerentanan tsunami pada kondisi eksisting di Kabupaten Bantul; legenda mengikuti interval kelas pada Tabel 9.

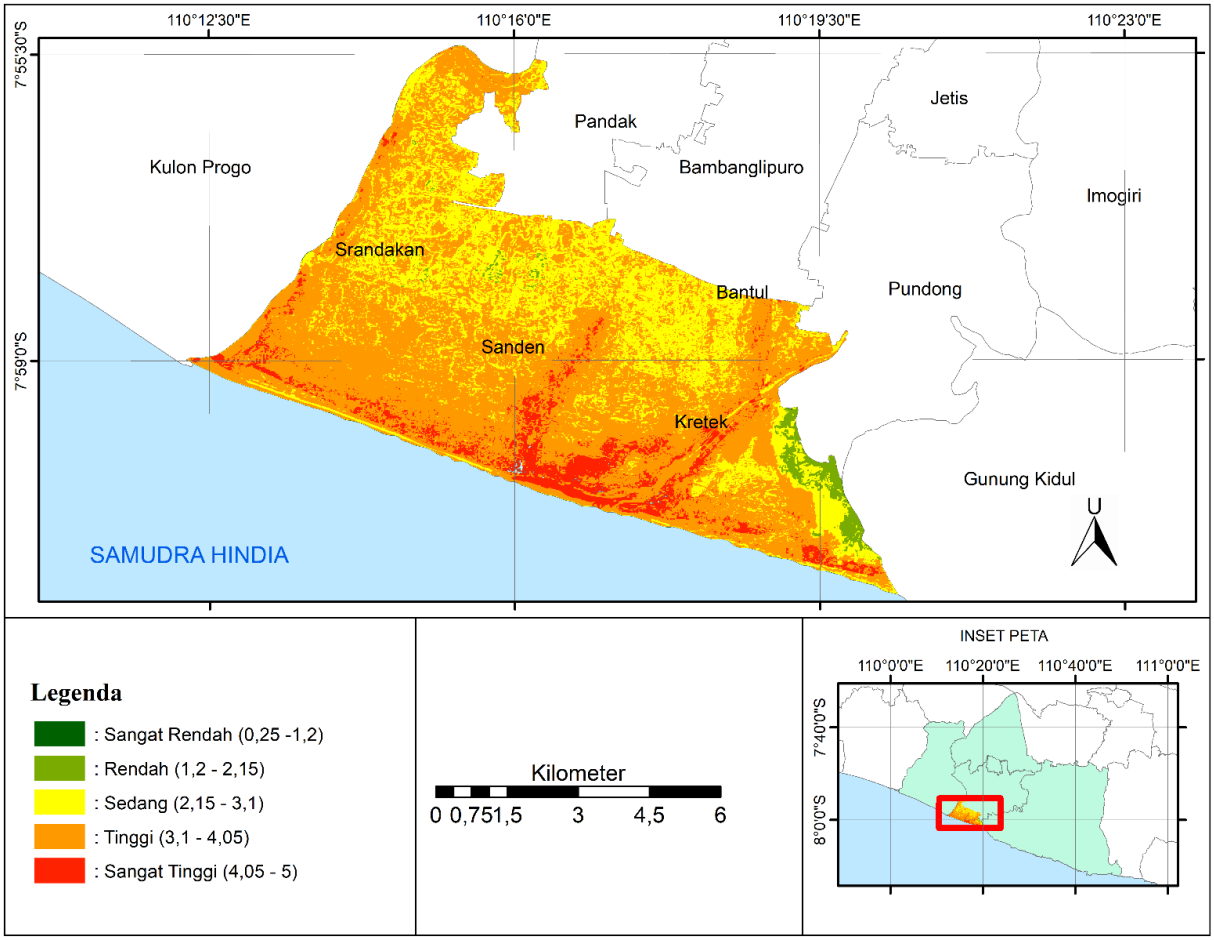
Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Pada analisis khusus pesisir (Kecamatan Srandakan, Sanden, dan Kretek; sekitar 6.924 ha), kelas tinggi mendominasi, sedangkan pada tingkat kabupaten yang mendominasi adalah kelas sedang. Selisih ini mencerminkan pengaruh batas wilayah analisis terhadap komposisi kelas indeks. Distribusi kondisi eksisting di pesisir disajikan pada Gambar 9 dan Tabel 10.

Skenario NbS hanya mengubah kelas penggunaan lahan pada poligon sabuk hijau pantai; empat parameter lain dipertahankan dan indeks dihitung ulang. Hasilnya menunjukkan respons indeks terhadap perubahan penggunaan lahan. Pada skala kabupaten, kelas kerentanan lebih tinggi masih terkonsentrasi di kawasan pesisir setelah penerapan skenario NbS (Gambar 10).

Tabel 10. Sebaran kelas indeks kerentanan di wilayah pesisir sebelum skenario NbS

Kelas indeks	Luas (ha)	Persentase (%)
Sangat tinggi	528,77	7,64
Tinggi	4.260,79	61,54
Sedang	2.005,09	28,96
Rendah	127,16	1,84
Sangat rendah	2,19	0,03
Total sebelum NbS	6.924,00	100,00



Gambar 9. Peta indeks kerentanan tsunami pada wilayah pesisir Bantul sebelum skenario NbS; legenda mengikuti interval kelas pada Tabel 10

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Konversi penggunaan lahan disimulasikan pada sabuk hijau seluas sekitar 178 ha di pesisir Sanden dan Kretek. Peta hasil pada area pesisir disajikan secara terpisah pada Gambar 11 untuk memperlihatkan perubahan di sekitar lokasi intervensi.Luas area pada peta kabupaten sebelum dan setelah skenario masing-masing 51.652,78 ha dan 51.659,09 ha. Selisih kedua peta sebesar 6,31 ha. Pada wilayah pesisir, perbedaannya lebih kecil, yaitu 6.924,00 ha pada kondisi eksisting dan 6.924,10 ha pada skenario NbS. Perbedaan cakupan ini membatasi interpretasi perubahan luas kelas yang kecil. Karena itu, hasil perbandingan terutama digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan indeks.

Peta skenario pada wilayah pesisir menunjukkan perubahan distribusi kelas indeks di sekitar poligon intervensi (Gambar 11). Luas setiap kelas dihitung kembali dengan skema penggunaan lahan NbS (Tabel 12). Total cakupan skenario sebesar 6.924,10 ha sedikit lebih luas daripada kondisi eksisting 6.924,00 ha. Perbedaan 0,10 ha tersebut dipertimbangkan dalam interpretasi perubahan luas kelas. Kepadatan penduduk dianalisis terpisah untuk memberi gambaran konsentrasi penduduk pada tiap kecamatan di Kabupaten Bantul. Jumlah penduduk di dalam area genangan tsunami tidak dihitung karena data simulasi genangan tidak digunakan.

Tabel 11. Distribusi kelas indeks pada skenario NbS untuk Kabupaten Bantul

Interval skor asli	Luas (ha)	Persentase (%)	Skor kelas	Kelas
4,05–5,00	512,14	0,9	5	Sangat tinggi
3,10–<4,05	8.754,79	16,9	4	Tinggi
2,15–<3,10	26.098,35	50,5	3	Sedang
1,20–<2,15	15.098,65	29,2	2	Rendah
0,25–<1,20	1.195,16	2,3	1	Sangat rendah
Total area peta	51.659,09	100		

Tabel 12. Sebaran kelas indeks kerentanan pesisir pada skenario NbS

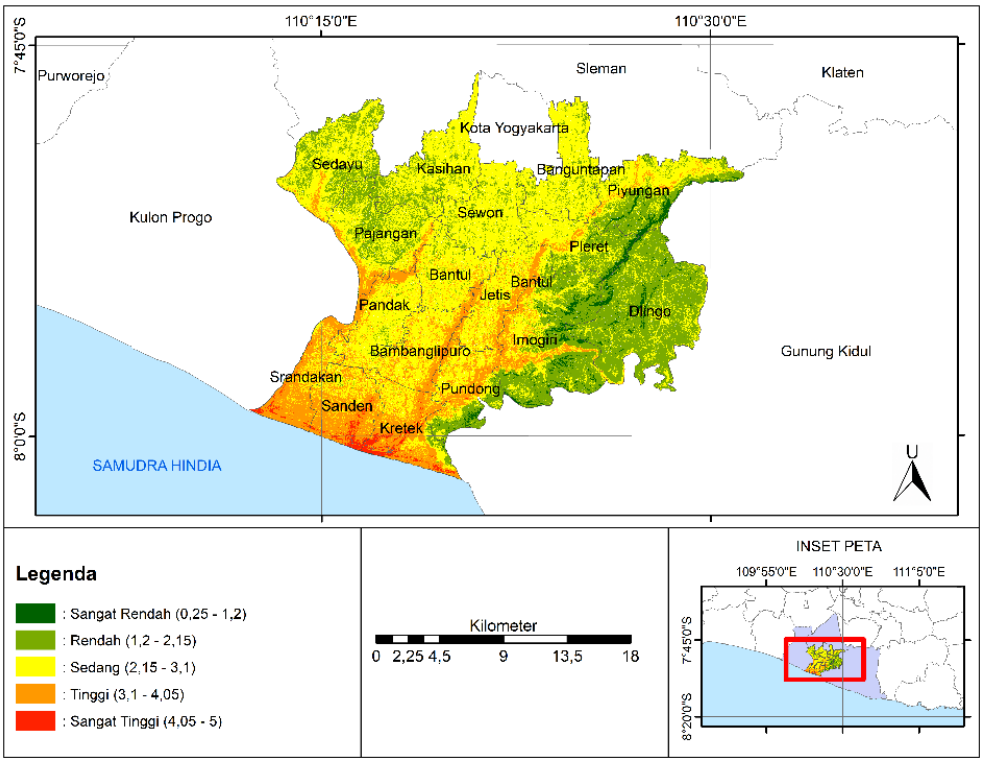
Kelas indeks	Luas (ha)	Persentase (%)
Sangat tinggi	490,75	7,09
Tinggi	4.237,07	61,19
Sedang	2.033,69	29,37
Rendah	158,80	2,29
Sangat rendah	3,79	0,05
Total skenario NbS	6.924,10	100,00

Tabel 13. Perubahan luas kelas indeks kerentanan pesisir antara kondisi eksisting dan skenario NbS

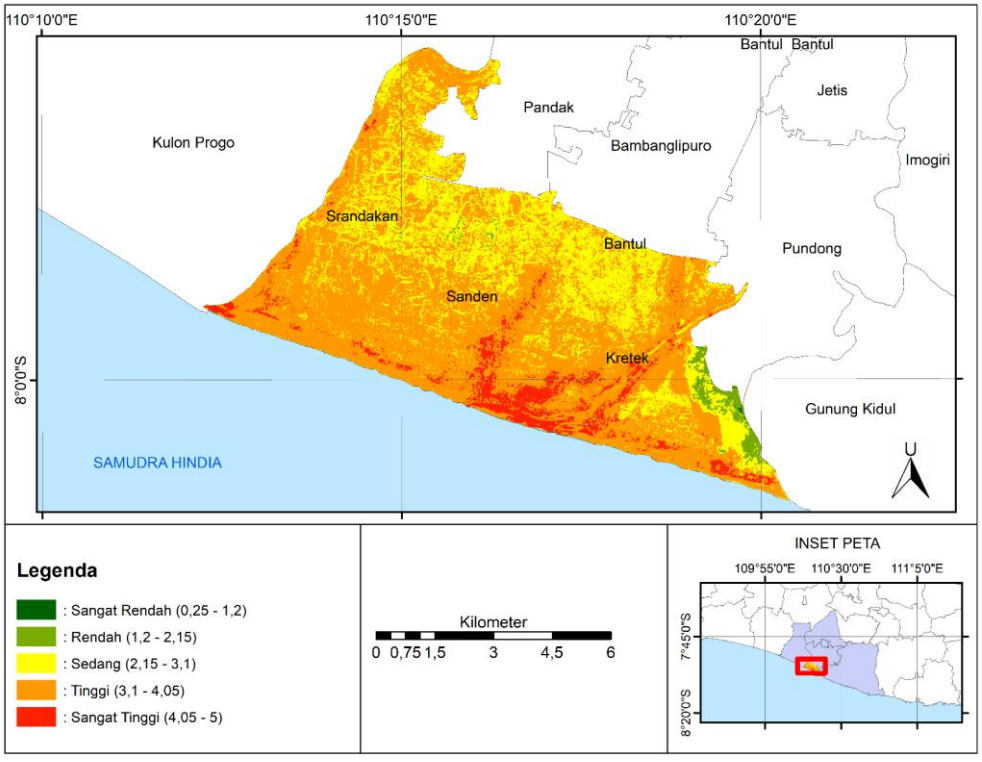
Kelas	Sebelum NbS (ha)	Skenario NbS (ha)	Perubahan (ha)
Sangat tinggi	528,77	490,75	-38,02
Tinggi	4.260,79	4.237,07	-23,72
Sedang	2.005,09	2.033,69	+28,60
Rendah	127,16	158,80	+31,64
Sangat rendah	2,19	3,79	+1,60
Total	6.924,00	6.924,10	+0,10

Keterangan: tanda negatif menunjukkan pengurangan luas kelas dan tanda positif menunjukkan penambahan. Selisih luas cakupan kedua peta sebesar 0,10 ha.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856



Gambar 10. Indeks kerentanan tsunami Kabupaten Bantul pada skenario NbS; legenda mengikuti interval kelas pada Tabel 11.



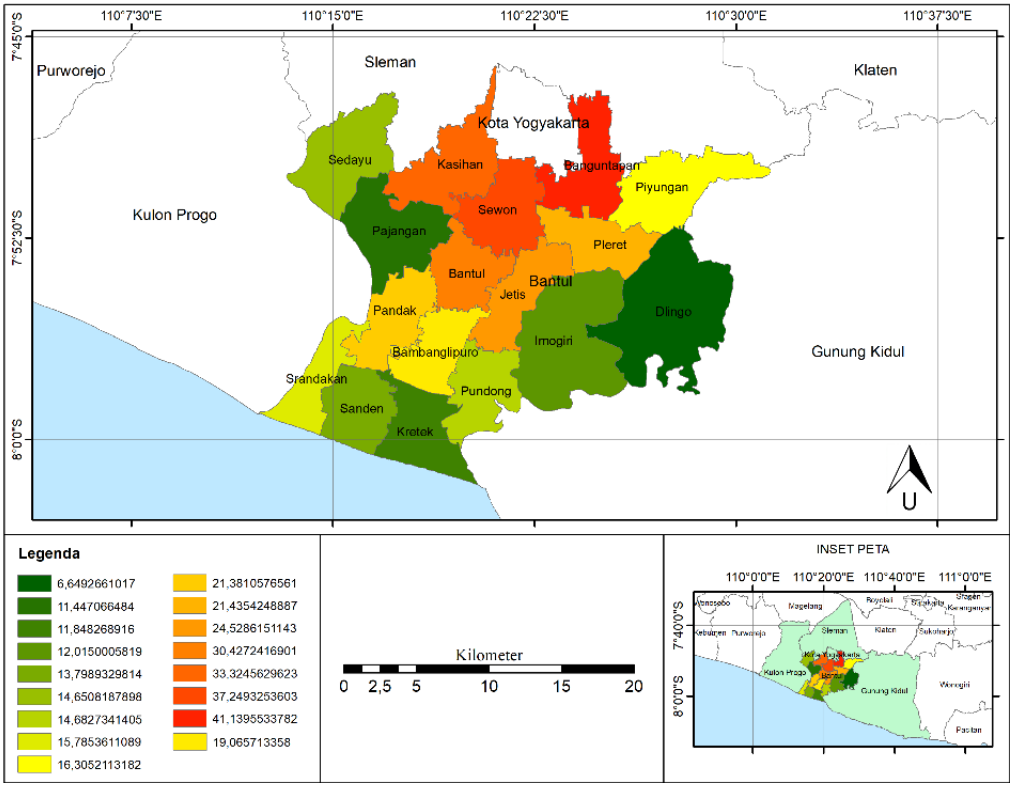
Gambar 11. Indeks kerentanan tsunami wilayah pesisir Bantul pada skenario NbS; legenda mengikuti interval kelas pada Tabel 11.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Berdasarkan klasifikasi kepadatan, seluruh kecamatan kecuali Dlingo termasuk kategori tinggi, yaitu lebih dari 10 jiwa/ha. Kepadatan di Kecamatan Dlingo sebesar 6,64 jiwa/ha dan termasuk kategori sedang. Dlingo berada pada kawasan perbukitan di bagian timur Kabupaten Bantul. Sebaran kepadatan tersebut ditampilkan pada Gambar 12 dan Tabel 14.

Tabel 14. Jumlah dan kepadatan penduduk per kecamatan di Kabupaten Bantul

Kecamatan	Jumlah penduduk	Luas (ha)	Kepadatan (jiwa/ha)	Kelas
Bambanglipuro	42.153	2.210,93	19,06	Tinggi
Banguntapan	117.875	2.865,24	41,13	Tinggi
Bantul	66.705	2.192,27	30,42	Tinggi
Dlingo	40.524	6.094,50	6,64	Sedang
Imogiri	65.013	5.410,98	12,01	Tinggi
Jetis	59.962	2.444,57	24,52	Tinggi
Kasihan	108.779	3.264,22	33,32	Tinggi
Kretek	30.866	2.605,10	11,84	Tinggi
Pajangan	38.113	3.329,49	11,44	Tinggi
Pandak	52.732	2.466,29	21,38	Tinggi
Piyungan	54.691	3.354,20	16,30	Tinggi
Pleret	50.191	2.341,49	21,43	Tinggi
Pundong	36.331	2.474,40	14,68	Tinggi
Sanden	31.883	2.310,54	13,79	Tinggi
Sedayu	50.034	3.415,09	14,65	Tinggi
Sewon	103.238	2.771,54	37,24	Tinggi
Srandakan	31.179	1.975,18	15,78	Tinggi
Kab. Bantul	980.269	51.526,03	19,02	Rata-rata wilayah



Gambar 12. Peta kepadatan penduduk Kabupaten Bantul

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Jumlah penduduk Kabupaten Bantul pada data tahun 2024 mencapai 980.269 jiwa. Dengan luas administratif 51.526,03 ha, kepadatan rata-rata wilayah mencapai 19,02 jiwa/ha atau sekitar 1.902 jiwa/km². Nilai ini dihitung dari jumlah penduduk kabupaten dibagi luas wilayah, bukan dari penjumlahan kepadatan setiap kecamatan.

Elevasi memperoleh bobot tertinggi (0,25), diikuti jarak pantai dan kemiringan lereng (masing-masing 0,20). Bobot penggunaan lahan (0,15) dan jarak sungai (0,20) konsisten antara Persamaan (1) dan Tabel 2. Karena hanya penggunaan lahan yang diubah dalam skenario NbS, besar perubahan indeks bergantung pada bobot 0,15 tersebut dan pada pertimbangan ahli yang mendasari pembobotan. Pada pemetaan skala kabupaten, kelas sedang mencakup sekitar 51,1% wilayah pada perhitungan awal. Komposisi berbeda ditemukan pada kawasan pesisir seluas sekitar 6.924 ha. Kelas tinggi menempati 4.260,79 ha (61,54%), kelas sangat tinggi 528,77 ha (7,64%), dan kelas sedang 2.005,09 ha (28,96%). Dominasi kelas tinggi di pesisir menunjukkan keterkaitan antara nilai indeks, topografi rendah, dan kedekatan dengan pantai. Penggunaan seluruh alur RBI menghasilkan 62,7% wilayah kabupaten berada hingga 200 m dari sungai, tetapi angka ini mencakup saluran pedalaman yang tidak seluruhnya relevan dengan penetrasi tsunami. Pembatasan pada Sungai Progo dan Sungai Opak memberi fokus spasial yang lebih sesuai untuk mengkaji koridor sungai pesisir, sehingga pemilihan jaringan sungai berpengaruh terhadap distribusi skor jarak sungai.

Pada wilayah pesisir, luas kelas sangat tinggi berkurang dari 528,77 menjadi 490,75 ha atau sebesar 38,02 ha setelah skenario NbS. Kelas tinggi berkurang 23,72 ha, dari 4.260,79 menjadi 4.237,07 ha. Sementara itu, kelas sedang dan rendah bertambah masing-masing 28,60 dan sekitar 31,64 ha. Perubahan ini menunjukkan pergeseran kategori dalam indeks berbasis skor, bukan penurunan energi atau tinggi gelombang tsunami, dan masih dipengaruhi oleh perbedaan kecil cakupan spasial antarpeta. Rancangan vegetasi pantai perlu memperhatikan perbedaan kondisi ekologis di pesisir Bantul. Pantai berpasir terbuka, laguna, dan muara memiliki karakteristik substrat serta paparan gelombang yang berbeda. Cemara udang (*Casuarina equisetifolia*), pandan laut (*Pandanus tectorius*), dan ketapang (*Terminalia catappa*) dapat dipertimbangkan untuk habitat pantai berpasir. Sebaliknya, *Rhizophora mucronata* lebih terkait dengan habitat muara dan laguna berlumpur. Penentuan jenis pada tingkat tapak tetap memerlukan evaluasi kesesuaian habitat (Alongi, 2008; Tanaka *et al*., 2007).

Estimasi penduduk terdampak memerlukan pemadanan data kependudukan dengan peta bahaya atau hasil simulasi inundasi. Tanpa itu, kepadatan penduduk hanya memberi informasi persebaran dan belum menunjukkan keterpaparan terhadap genangan, dan penelitian ini tidak dapat menyimpulkan besarnya kerugian maupun efektivitas jalur evakuasi. Komposisi kelas indeks pada tingkat kabupaten dan pesisir berbeda karena cakupan spasialnya tidak sama. Skenario NbS mengubah luas beberapa kelas, tetapi perubahannya relatif kecil terhadap keseluruhan area pesisir. Keterbatasan utama perbandingan kuantitatif adalah ketidakseragaman luas peta dan pembobotan berbasis pertimbangan ahli; evaluasi manfaat fisik NbS terhadap bahaya tsunami memerlukan parameter vegetasi terukur dan pemodelan hidrodinamika yang sesuai. Keseragaman cakupan serta evaluasi ketidakpastian luas merupakan aspek penting dalam perbandingan keluaran pemetaan (Olofsson *et al*., 2014).

KESIMPULAN

Indeks kerentanan tsunami di pesisir Srandakan, Sanden, dan Kretek didominasi kelas tinggi seluas 4.260,79 ha (61,54%) dan sangat tinggi seluas 528,77 ha (7,64%). Setelah skenario NbS, luas kedua kelas tersebut menjadi 4.237,07 dan 490,75 ha. Pergeseran ini menggambarkan perubahan skor akibat simulasi penggunaan lahan, bukan reduksi bahaya tsunami secara fisik. Perbedaan cakupan spasial dan pembobotan berbasis pertimbangan ahli membatasi interpretasi kuantitatif hasil.

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

DAFTAR PUSTAKA

Alongi, D.M. 2008. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1): 1–13. DOI: 10.1016/j.ecss.2007.08.024

Chatenoux, B. & Peduzzi, P. 2007. Impacts from the 2004 Indian Ocean tsunami: analysing the potential protecting role of environmental features. *Natural Hazards*, 40(2): 289–304. DOI: 10.1007/s11069-006-0015-9

Congalton, R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1): 35–46. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90048-B

Danielsen, F., Sørensen, M.K., Olwig, M.F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N.D., Hiraishi, T., Karunagaran, V.M., Rasmussen, M.S., Hansen, L.B. & Quarto, A 2005. The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation. *Science*, 310(5748): 643. DOI: 10.1126/science.1118387

Effendi, N.A.F.N., Khanan, M.F.A., & Azmy, S.N. 2025. Integrating Coastal Vulnerability Index (CVI), remote sensing and GIS for tsunami vulnerability assessment in rural Malaysian communities. *Geografia*, 21(3): 39–60. DOI: 10.17576/geo-2025-2103-03

Foody, G.M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 185–201. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00295-4

Fritz, H.M., Kongko, W., Moore, A., McAdoo, B., Goff, J., Harbitz, C., et al. 2007. Extreme runup from the 17 July 2006 Java tsunami. *Geophysical Research Letters*, 34: L12602. DOI: 10.1029/2007GL029404

Fuad, M.A.Z., Kurniasari, D., & Dewi, C.S.U. 2025. Pemetaan kerentanan tsunami di kawasan wisata pantai: studi kasus di Pulau Merah, Banyuwangi-Indonesia. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 9(2): 14–23. DOI: 10.21776/ub.jfmr.2025.009.02.2

Horspool, N., Pranantyo, I., Griffin, J., Latief, H., Natawidjaja, D.H., Kongko, W., Cipta, A., Bustaman, B., Anugrah, S.D. & Thio, H.K 2014. A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14: 3105–3122. DOI: 10.5194/nhess-14-3105-2014

Kathiresan, K. & Rajendran, N. 2005. Coastal mangrove forests mitigated tsunami. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65(3): 601–606. DOI: 10.1016/j.ecss.2005.06.022

Latue, P.C. & Rakuasa, H. 2022. Dinamika spasial wilayah rawan tsunami di Kecamatan Nusaniwe, Kota Ambon, Provinsi Maluku. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 3(2): 77–87. DOI: 10.23960/jgrs.2022.v3i2.98

Lavigne, F., Gomez, C., Giffo, M., Wassmer, P., Hoebreck, C., Mardiatno, D., Prioyono, J., & Paris, R. 2007. Field observations of the 17 July 2006 tsunami in Java. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7: 177–183. DOI: 10.5194/nhess-7-177-2007

Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7): 703–726. DOI: 10.1080/13658810600661508

Nabillah, R., Setiawan, I., & Waluya, B. 2020. Kerentanan sosial pada wilayah potensi bencana tsunami di pesisir Kecamatan Rajabasa Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Geografi, Edukasi dan Lingkungan*, 4(2): 96–112. DOI: 10.29405/jgel.v4i2.4318

Narayan, S., Beck, M.W., Reguero, B.G., Losada, I.J., Van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J.N., Ingram, J.C., Lange, G.M. & Burks-Copes, K.A. 2016. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLoS ONE*, 11(5): e0154735. DOI: 10.1371/journal.pone.0154735

Oktaviana, Dewi, P.U., Wahdini, M., Prasiamratri, N., Alghifarry, M.B., & Utami, N.A. 2020. Aplikasi SIG untuk pemetaan zona tingkat bahaya dan keterpaparan pemukiman terhadap tsunami Kota Denpasar. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 1(2): 80–88. DOI: 10.23960/jgrs.2020.v1i2.28

Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E., & Wulder, M.A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148: 42–57. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.015

Osti, R., Tanaka, S., & Tokioka, T. 2009. The importance of mangrove forest in tsunami disaster mitigation. *Disasters*, 33(2): 203–213. DOI: 10.1111/j.1467-7717.2008.01070.x

Reid, J.A. & Mooney, W.D. 2023. Tsunami occurrence 1900–2020: a global review, with examples from Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, 180(5): 1549–1571. DOI: 10.1007/s00024-022-03057-1

Sambah, A.B., Masnagari, L.M.S., Fuad, M.A.Z., & Intyas, C.A. 2024. Tsunami run-up modelling in comparison with coastal vulnerability mapping. *International Journal of GEOMATE*, 27(119): 10–17. DOI: 10.21660/2024.119.4000

Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C.A.J., Smith, A., & Turner, B. 2020. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical*

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 838-856

Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 375(1794): 20190120. DOI: 10.1098/rstb.2019.0120

Spalding, M.D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L.Z., Shepard, C.C., & Beck, M.W. 2014. The role of ecosystems in coastal protection: adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*, 90: 50–57. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2013.09.007

Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M.I.M., Jinadasa, K.B.S.N., & Homchuen, S. 2007. Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landscape and Ecological Engineering*, 3(1): 33–45. DOI: 10.1007/s11355-006-0013-9

Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T.J., Herman, P.M.J., Ysebaert, T., & de Vriend, H.J. 2013. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 504: 79–83. DOI: 10.1038/nature12859

Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N.R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H.A., Nugraha, A.D. & Putra, H.E. 2020. Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, 10: 15274. DOI: 10.1038/s41598-020-72142-z