

Pemetaan Kerentanan Bahaya Tsunami dengan Pemodelan Inundansi Studi Kasus: Kabupaten Bantul

Michael Jayanto Budiman¹, Sutoyo^{1*}, dan Moh Fifik Syafiudin²

¹ Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, 16680, Indonesia

² Badan Informasi Geospasial, Bogor, Indonesia 16911

* penulis koresponden: sutoyo@apps.ipb.ac.id

Abstrak: Indonesia terletak di antara tiga pelat tektonik utama dunia yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia yang saling berinteraksi. Dari interaksi lempeng ini, terdapat potensi gempa besar berdasarkan pemodelan gempa *megathrust* pada *seismic gaps* dengan data histori gempa serta tsunami sebelumnya. Akumulasi energi dari *seismic gaps* ini dapat mencapai titik kritis yang dapat menyebabkan gempa bumi berskala besar dan menimbulkan tsunami. Hasil pemodelan tsunami mencapai ketinggian maksimal 20 m dan 12 m sepanjang pesisir selatan Pulau Jawa. Tujuan penelitian adalah menganalisis bahaya tsunami untuk mendapatkan luas genangannya, tutupan lahan terdampak tsunami, dan jumlah penduduk yang terdampak. Bahaya tsunami didapat dari pemodelan inundasi tsunami dengan skenario *run up* tsunami 10, 15, dan 20 meter. Pemodelan inundasi tsunami menggunakan bantuan *tool model builder* pada aplikasi ArcGIS dengan mengolah data spasial menggunakan persamaan yang dikembangkan Berryman. Data spasial yang digunakan dalam persamaan ini adalah data tutupan lahan, kelerengan, dan garis pantai. Hasil dari pengolahan ini berupa data luas genangan tsunami berbagai skenario ketinggian. Data tutupan lahan diolah dengan melakukan proses *clipping* dengan data hasil pemodelan inundasi tsunami. Untuk jumlah penduduk dilakukan dengan mengalikan luas genangan tsunami dengan kepadatan penduduk. Dari hasil pemodelan didapat bahwa luas genangan untuk *run up* tsunami 10 meter adalah 9,72 km²; *run up* tsunami 15 meter 15,69 km²; dan *run up* tsunami 20 meter 21,29 km². Tutupan lahan berjenis padang rumput, pasir darat, perkebunan, tegalan / ladang, sawah terdampak limpasan tsunami yang luas. Terdapat total 8940 penduduk yang terdampak oleh limpasan tsunami saat ketinggian *run up* tsunami 10 meter, 15060 penduduk yang terdampak saat *run up* tsunami 15 meter, dan terdapat dan 23870 penduduk yang terdampak saat ketinggian *run up* tsunami 20 meter.

Diterima: 01 Mei 2024
Diperbaiki: 26 Agustus 2024
Disetujui: 07 Oktober 2024

Kata kunci: pemodelan, genangan, inundasi, *run up*, tsunami

1. Pendahuluan

Secara geografis, Indonesia terletak di garis khatulistiwa tepatnya pada 95° - 140° BT dan 6° LU - 11° LS dimana dua pertiga wilayahnya berupa lautan dan 17.504 pulau lainnya tersebar serta 99.093 km² garis pantai [1]. Indonesia juga terletak di antara tiga pelat tektonik utama dunia. Ketiga lempeng ini yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia. Hal ini menjadikan Indonesia sebagai wilayah tektonik aktif dan tingkat seismik dan intensitas gempa yang tinggi [11]. Dengan interaksi antar ketiga lempeng ini, menjadikan wilayah Indonesia rawan terhadap bencana gempa bumi atau tsunami [2].

Penelitian sebelumnya oleh Widiyantoro et al. [3] menunjukkan adanya potensi tsunami yang dapat terjadi di sepanjang pesisir selatan Pulau Jawa. Potensi tsunami ini didasarkan dari pemodelan gempa megathrust pada seismic gaps dengan data gempa serta tsunami yang digunakan menggunakan data historis. Wilayah ini dianggap berpotensi terjadi gempa bumi besar di masa depan karena adanya penumpukan energi di zona tersebut. Akumulasi energi ini jika mencapai titik kritis dapat menyebabkan gempa bumi berskala besar yang dapat diikuti tsunami. Hasil pemodelan tsunami mencapai ketinggian maksimal 20 meter dan 12 meter dengan rata – rata ketinggiannya mencapai 4,5 meter. Salah satu wilayah yang terdampak dari pemodelan ini adalah Kabupaten Bantul.

Dari hal tersebut, maka dapat dilakukan upaya mitigasi terhadap bencana tsunami yang mungkin dapat terjadi di Kabupaten Bantul. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir korban jiwa yang mungkin timbul. Upaya mitigasi yang dapat dilakukan yaitu dengan perencanaan dan pembuatan jalur evakuasi serta area yang tepat dijadikan tempat evakuasi (*shelter*). Sebelum dilakukan perencanaan jalur evakuasi dan shelter, maka diperlukan pemodelan inundasi tsunami sebagai dasar analisis bahaya tsunami yang dapat terjadi [12]. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui luasan genangan tsunami, luas tutupan lahan yang terlampaui oleh gelombang tsunami, dan jumlah penduduk yang terdampak. Pemodelan inundasi tsunami ini menggunakan skenario variasi tinggi tsunami pada garis pantai yang dikenal dengan istilah *run up* tsunami [7].

2. Metode

Penelitian ini terdiri dari penggunaan perangkat yaitu perangkat keras, perangkat lunak, dan data sekunder. Penelitian dilakukan menggunakan perangkat keras berupa laptop dengan dukungan perangkat lunak ArcGIS, QGIS, Google Earth, Microsoft Excel, Global Mapper, dan Microsoft Word. Pada penelitian ini, bahan yang digunakan berupa data sekunder meliputi peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), DEMNAS yang didapat dari Badan Informasi Geospasial (BIG), dan data kepadatan penduduk yang didapat dari World Population 2020 milik PBB.

2.1. Pemodelan Inundasi Tsunami

Pemodelan ini memperhitungkan secara matematis sebaran luas dan rambatan gelombang tsunami di daratan. Langkah awal dilakukan dengan membuat file raster kelerengan, tutupan lahan, dan garis pantai. Pada parameter kemiringan lereng, dihasilkan dari pengolahan data raster DEMNAS dimana dilakukan konversi nilai dari derajat ke nilai radian. Koefisien kekasaran dari tiap jenis tutupan lahan didasarkan menurut penelitian sebelumnya oleh Berryman [4]. Nilai koefisien kekasaran tiap jenis tutupan lahan dapat dilihat pada **Tabel 1**. Pada penelitian ini digunakan skenario ketinggian tsunami 10, 15, dan 20 meter dan dilakukan perhitungan Hloss. Perhitungan Hloss dilakukan didasarkan pada kehilangan ketinggian tsunami per 1 meter jarak inundasi atau ketinggian genangannya. Perhitungan ini secara numerikal didasarkan pada ketinggian *run up* saat di garis pantai dan dihitung menggunakan **Persamaan (1)** [4].

Tabel 1. Nilai koefisien kekasaran tiap jenis tutupan lahan [4]

Jenis Tutupan Lahan	Nilai Koefisien Kekasaran
Badan Air	0,007
Belukar / Semak	0,04
Hutan	0,07
Kebun / Perkebunan	0,035
Lahan Kosong / Terbuka	0,015
Lahan Pertanian	0,025
Permukiman / Lahan Terbangun	0,045

Mangrove	0,025
Tambak / Empang	0,01

$$H_{loss} = \left(\frac{167n^2}{Ho^{\frac{1}{3}}} \right) + 5 \sin S \quad (1)$$

- H_{loss} : Kehilangan ketinggian gelombang tsunami per 1 m jarak inundasi
 n : Koefisien kekasaran permukaan dari penutup lahan
 Ho : Ketinggian gelombang tsunami saat di garis pantai (m)
 S : Besarnya nilai lereng permukaan (derajat)

Setelah dilakukan perhitungan H_{loss} , maka dilakukan analisis *cost distance* dengan tujuan mengetahui jarak *cost* antara titik terjauh tsunami dengan sumber rambatan tsunami yaitu garis pantai Kabupaten Bantul. Hasil dari pengolahan ini berupa data raster genangan tsunami untuk *run up* 10, 15, dan 20 meter. Pengolahan data spasial dilakukan di software ArcGIS dengan bantuan *tool Model Builder* untuk mengkoneksikan tool lainnya menjadi sebuah alur kerja [10]. Raster genangan tsunami yang telah didapat maka diubah menjadi format shapefile lalu dilakukan perhitungan luas genangan tsunami dengan *tool calculate geometry*. Setelah diubah lalu dilakukan pemrosesan clipping antara data tutupan lahan eksisting dengan shapefile genangan tsunami.

2.2. Kerentanan Tsunami

Kerentanan wilayah dimodelkan dengan menggunakan empat parameter dengan nilai pembobotan yang berbeda sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya [15], yaitu elevasi sebesar 45,96%, kelerengan sebesar 25,53%, tutupan lahan sebesar 11,81%, dan jarak dari garis pantai sebesar 16,71%. Elevasi dan kelerengan diolah dari data DEM dan diklasifikasikan ulang dan dilanjutkan dengan fitur slope untuk menghasilkan kelerengan. Parameter elevasi diklasifikasikan dengan lima kategori yang diurutkan dari kelas kerentanan sangat tinggi hingga sangat rendah yaitu, <5 m; 10 – 15 m; 10 – 15 m; 15 – 20 m; dan >20 m. Untuk parameter kelerengan diklasifikasikan dengan lima kategori yang diurutkan dari kelas kerentanan sangat tinggi hingga sangat rendah yaitu < 2%; 2 – 6%; 6 – 13%; 13 – 20%; dan rendah < 20%. Peta tutupan lahan diklasifikasikan dengan lima kategori yang diurutkan dari kelas kerentanan sangat tinggi hingga sangat rendah, yaitu permukiman, agrikultur, lahan terbuka, badan air, dan hutan. Peta garis pantai dilakukan pengukuran penjaralan maksimum gelombang seperti pada **Persamaan (2)** [16] dimana hasil dari perhitungan tersebut dimasukkan dalam multiple buffer ring jarak dari garis pantai. Keempat parameter kemudian diolah menggunakan *weighted overlay* dengan bobot yang telah ditetapkan.

$$\log X_{max} = \log 1400 + \frac{4}{3} \log \left(\frac{Y_o}{10} \right) \quad (2)$$

- X_{max} : jangkauan maksimum gelombang di daratan
 Y_o : Ketinggian tsunami di garis pantai (m)

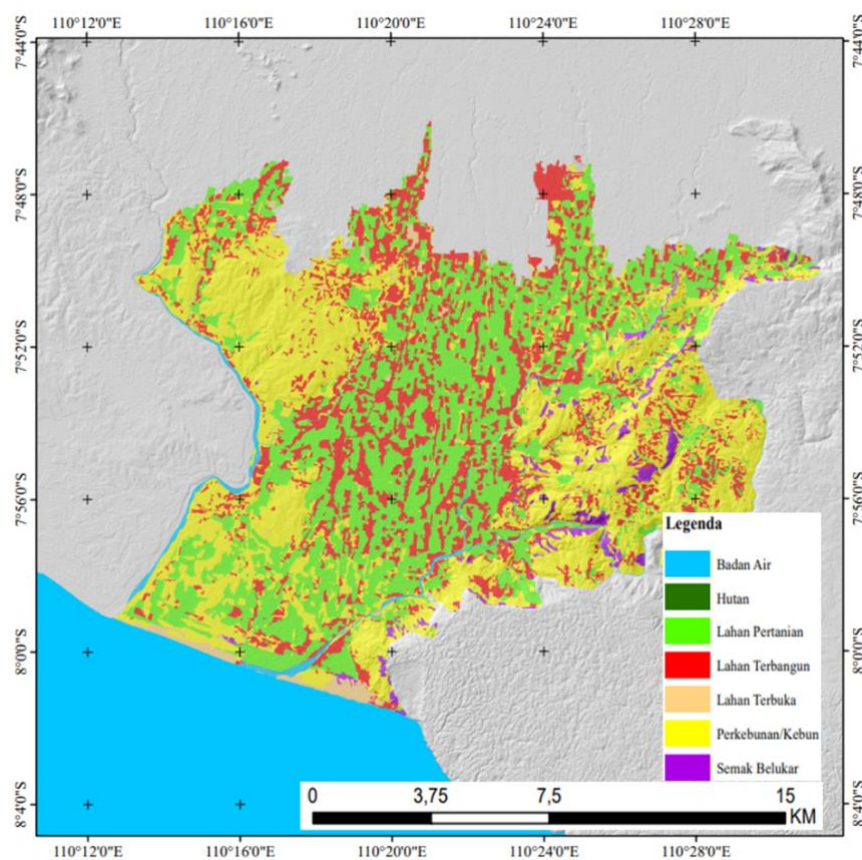
2.3. Jumlah Penduduk Terdampak

Langkah terakhir adalah menghitung jumlah penduduk yang terdampak *run up* tsunami yang telah dimodelkan. Data yang diolah berupa raster kepadatan populasi dari World Population 2020 milik PBB dan diolah dengan bantuan aplikasi QGIS dengan tools InaSAFE. Pertama, clip raster kepadatan populasi dengan shapefile wilayah administrasi Kabupaten Bantul. Setelah itu, lakukan kembali clip antara raster inundasi tsunami raster hasil kerentanan tsunami dari metode *weighted overlay*. Lalu pada

tools InaSAFE buka keyword wizard dengan memilih raster hasil clip kerentanan dan inundasi sebagai *hazard type single event* dan raster kepadatan populasi sebagai *exposure type continuous*. Klik run untuk melakukan pengolahan. Hasil output berupa data jumlah populasi yang terdampak pada berbagai skenario *run up* tsunami.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada pengolahan parameter tutupan lahan, tiap jenis tutupan lahan diisi nilai koefisien kekasaran menggunakan parameter yang digunakan oleh Berryman [4]. Nilai koefisien kekasaran ini akan mereduksi limpasan tsunami dari pemodelan inundasi tsunami. Semakin luas tutupan lahan yang bervegetasi rapat maka daerah inudasinya akan semakin kecil [9]. Kabupaten Bantul memiliki luas wilayah seluas 510,87 km² dimana didominasi oleh lahan perkebunan diikuti pertaniann. Adapun luas tutupan lahan daerah Kabupaten Bantul dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Tabel 2**.

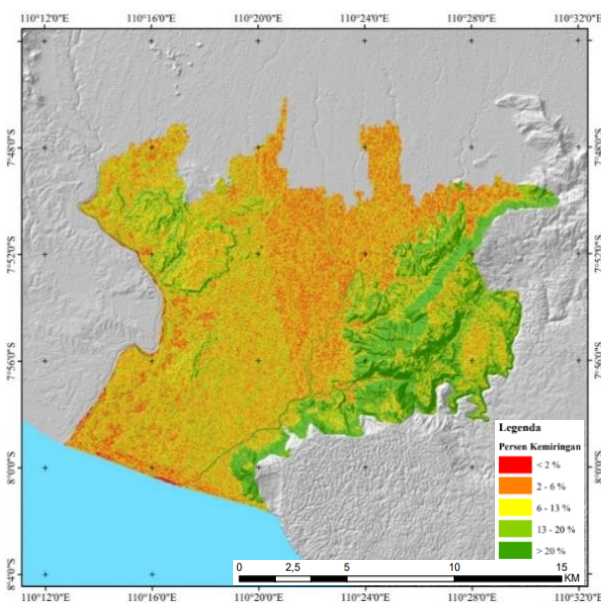


Gambar 1. Peta tutupan lahan di Kabupaten Bantul

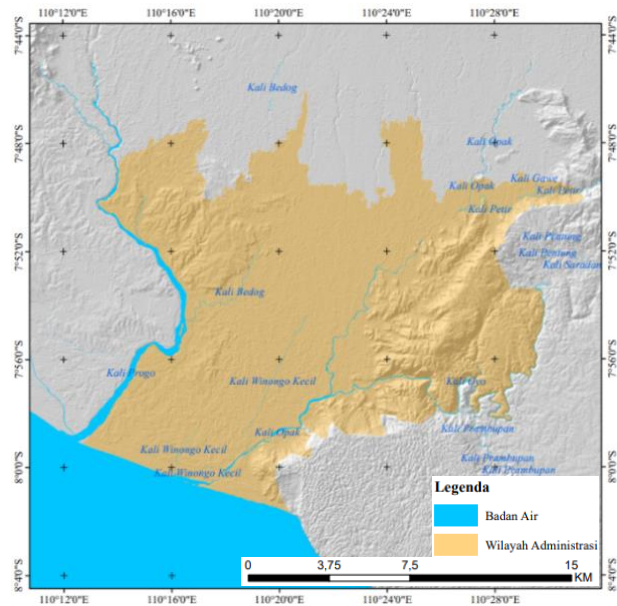
Tabel 1. Luas tutupan lahan di Kabupaten Bantul

Vegetasi	Luas (km ²)
Badan Air	8,21
Hutan	0,02
Lahan Pertanian	173,10
Lahan Terbangun	110,32
Lahan Terbuka	7,33
Perkebunan / Kebun	200,96
Semak Belukar	10,93

Kabupaten Bantul memiliki wilayah yang relatif rendah mulai dari pesisir selatan hingga wilayah utara. Hal ini sesuai dengan pernyataan oleh Setyadi et al. bahwa pesisir pantai selatan wilayah Bantul memiliki elevasi yang rendah [2]. Kemiringan lereng (slope) mempengaruhi laju aliran tsunami yang datang. Peta kemiringan lereng dapat dijelaskan pada **Gambar 2**. Pada pantai yang terjal, tsunami tidak akan terlalu jauh masuk ke daratan karena tertahan dan akan dipantulkan kembali oleh tebing pantai [5]. Pesisir selatan Kabupaten Bantul dipisahkan dengan garis pantai sejauh 15,1 km. Selain itu, bermuara juga dua sungai besar yaitu Kali Progo dan Kali Opak juga berpengaruh pada hasil inundasi tsunami seperti tampak pada **Gambar 3**. Penyempitan dari muara menuju hulu pada sungai dapat menyebabkan peningkatan kecepatan dan ketinggian muka air. Hal ini dikarenakan debit massa air tsunami yang sama harus menjaral melalui celah yang lebih sempit dalam waktu yang bersamaan [6].



Gambar 2. Peta kemiringan lereng di Kabupaten Bantul



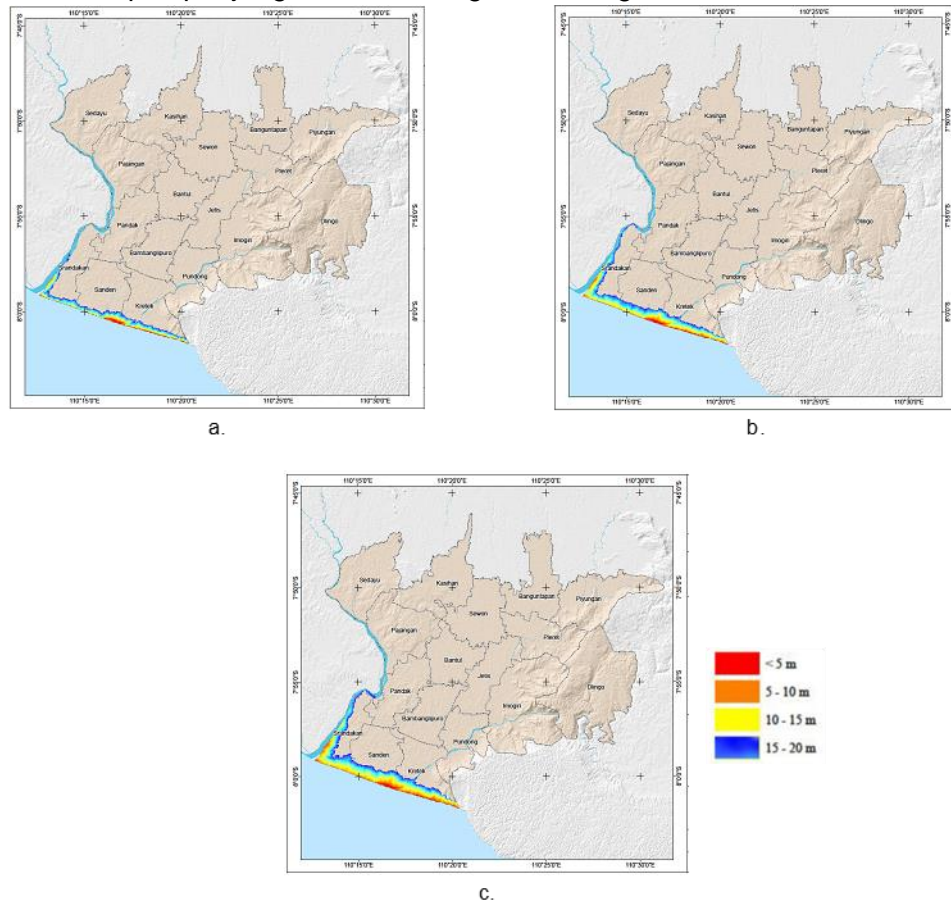
Gambar 3. Peta sungai dan garis pantai di Kabupaten Bantul

Peta *run up* tsunami pada Kabupaten Bantul dibuat bertujuan untuk mengetahui seberapa jauh limpasan air dari gelombang tsunami serta area yang tergenang. *Run up* tsunami didefinisikan sebagai ketinggian gelombang tsunami saat berada di pantai yang diukur dari tinggi gelombang tsunami dengan titik nol muka air laut (mean sea level) [7]. Ketinggian gelombang tsunami dipengaruhi banyak faktor seperti kekuatan gempa, kedalaman pusat gempa, jarak pusat gempa ke pesisir pantai, dan pergerakan bidang patahan suatu [8]. Pemodelan *run up* tsunami akan menggunakan ketinggian skenario 10, 15, dan 20 meter dengan hasil yang dapat dilihat pada **Gambar 4**. Hal ini didasarkan dari penelitian sebelumnya oleh Widiyantoro et al. yang telah memodelkan probabilitas ketinggian tsunami yang dapat terjadi dengan ketinggian maksimalnya 20 meter [3].

Analisis kerentanan tsunami menggunakan metode weighted overlay yang diolah dari empat parameter yaitu elevasi, kelerengan, tutupan lahan, dan jarak dari garis pantai. Menurut Veronica et al. [14], metode ini mengaplikasikan nilai bobot yang telah ditentukan sebelumnya untuk membedakan dan mengabaikan beberapa nilai ke dalam analisis untuk ditentukan tiap faktor dalam kesesuaian proses. Untuk peta parameter kelerengan dapat dilihat pada **Gambar 2**. Hasil peta kerentanan tsunami dengan metode weighted overlay dapat dilihat pada **Gambar 8**.

Untuk tsunami dengan ketinggian 10 meter maka menggenangi area seluas 9,72 km²; ketinggian 15 meter seluas 15,69 km², dan ketinggian 20 meter 21,29 km². Kecamatan Kretek, Sanden, dan Srandakan menjadi kecamatan yang terdampak oleh hasil pemodelan tsunami. Hal ini dikarenakan

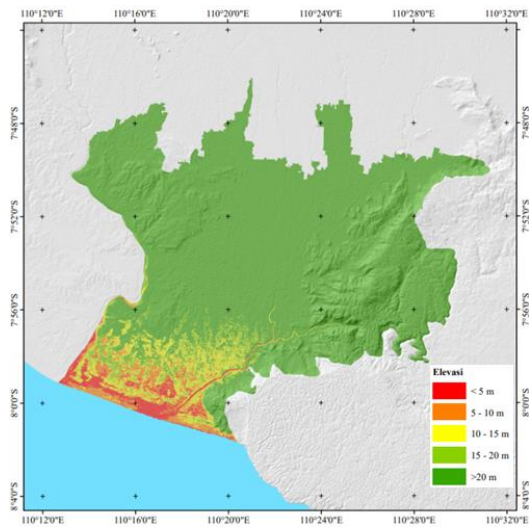
ketiga kecamatan ini berada di wilayah yang berbatasan langsung dengan Samudra Hindia di pesisir selatan Kabupaten Bantul. Pada **Tabel 3** dapat dilihat bahwa semakin tinggi run up tsunami maka makin luas genangan tsunami. Kecamatan yang paling luas genangan tsunaminya adalah Kecamatan Srandakan. Hal ini disebabkan Kecamatan Srandakan dilewati oleh Kali Progo dimana sebagai badan air, banyak limpasan meluap sepanjang bantaran sungai Kali Progo.



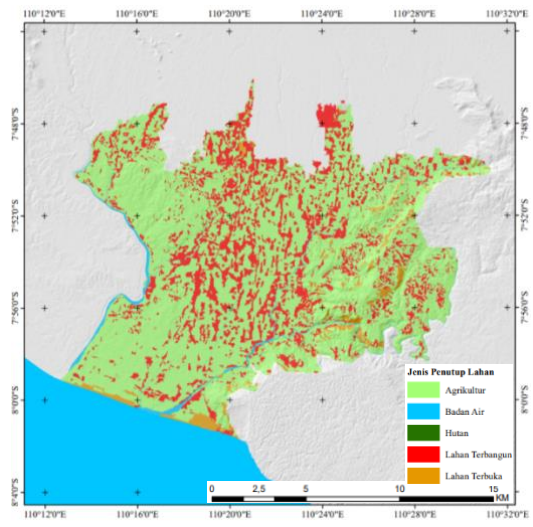
Gambar 4. Peta model inundasi ketinggian 10 m (a), 15 m (b), 20 m (c)

Tabel 3. Luas genangan terdampak di kecamatan yang terdampak

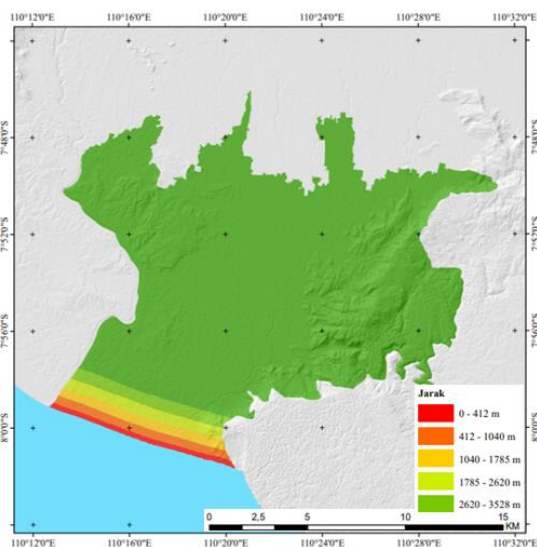
Kecamatan	Luas (km ²)	Ketinggian Run Up	Luas Inundasi (km ²)	Presentase Terendam (%)
Kretek	26,46	10 m	4,35	16,44
		15 m	5,99	22,64
		20 m	7,52	28,42
Sanden	23,10	10 m	2,42	10,48
		15 m	4,21	18,23
		20 m	5,46	23,64
Srandakan	18,50	10 m	2,94	15,89
		15 m	5,50	29,73
		20 m	8,31	44,92
Kabupaten Bantul	511,36	10 m	9,72	1,90
		15 m	15,69	3,07
		20 m	21,29	4,16



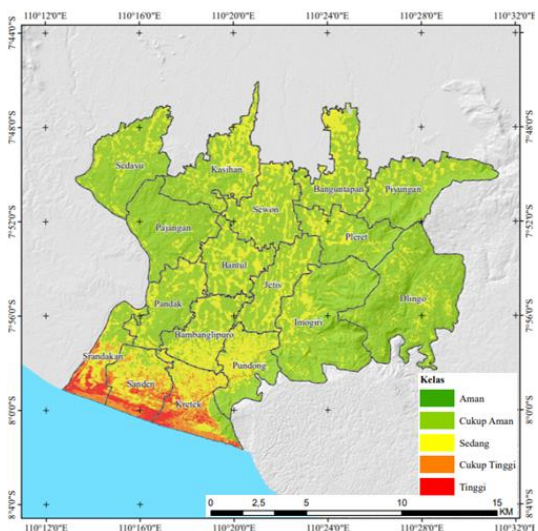
Gambar 5. Parameter Elevasi



Gambar 6. Parameter tutupan lahan



Gambar 7. Parameter jarak dari garis pantai



Gambar 8. Peta kerentanan tsunami hasil metode weighted overlay

Pada **Tabel 4**, dapat dilihat luas tutupan lahan pada Kabupaten Bantul yang terdampak limpasan tsunami pada *run up* 10, 15, 20 meter. Padang rumput, pasir darat, perkebunan, tegalan / ladang, sawah terdampak limpasan tsunami yang luas. Hal ini dikarenakan koefisien kekasarannya yang rendah sehingga tidak dapat mereduksi energi dari limpasan tsunami [13]. Selain itu, sebaran lahan yang berada langsung dengan bibir pantai atau bantaran sungai juga berpengaruh.

Skenario populasi yang terdampak oleh tsunami di berbagai skenario *run up* tsunami 10, 15, dan 20 meter diolah menggunakan plug-in InaSAFE 5.0.5 pada aplikasi QGIS. Data penduduk digunakan dari data persebaran populasi terbaru yang tersedia yaitu pada tahun 2020 dari World Population UN. Hasil dari pengolahan data dengan plug-in InaSAFE dapat dilihat pada **Tabel 5**. Terdapat 8940 penduduk yang terdampak tsunami untuk *run up* tsunami 10 meter dengan Kecamatan Kretek terdapat 4620 penduduk, Kecamatan Srandakan terdapat 1530 penduduk, dan Kecamatan Sanden terdapat 2790 penduduk. Untuk *run up* tsunami 15 meter total penduduk yang terdampak adalah 15060 penduduk dengan Kecamatan Kretek terdapat 5210 penduduk, Kecamatan Srandakan terdapat 4050 penduduk,

dan Kecamatan Sanden terdapat 5800 penduduk. Untuk run up tsunami 20 meter total penduduk yang terdampak adalah 23870 penduduk dengan Kecamatan Kretek terdapat 9310 penduduk, Kecamatan Srandakan terdapat 5220 penduduk, dan Kecamatan Sanden terdapat 9340 penduduk.

Tabel 2. Tutupan lahan yang terdampak oleh *run up* tsunami

Jenis Tutupan Lahan	Luas Tutupan Terdampak (km ²)		
	10 m	15 m	20 m
Danau/Situ	0,01	0,01	0,01
Hutan Rawa/Gambut	0,08	0,11	0,11
Padang Rumput	0,88	1,37	1,62
Pasir Bukit /Pasir Darat	2,87	2,90	2,90
Perkebunan/Kebun	0,04	0,32	2,02
Permukiman dan Tempat Kegiatan	0,38	0,74	1,46
Sawah	1,66	3,60	5,08
Sawah Tadah Hujan	0,06	0,06	0,06
Semak Belukar	0,09	0,19	0,49
Sungai	1,24	1,68	2,21
Tegalan/Ladang	2,41	4,72	5,34
TOTAL	9,72	15,69	21,29

Tabel 3. Jumlah penduduk Kabupaten Bantul terdampak *run up* tsunami

Kecamatan	Tinggi Inundasi (m)		
	10	15	20
Kretek	4620	5210	9310
Srandakan	1530	4050	5220
Sanden	2790	5800	9340
Total	8940	15060	23870

4. Kesimpulan

Hasil dari pemodelan inundasi tsunami menunjukkan bahwa luas genangan untuk *run up* tsunami tsunami 10 meter seluas 9,72 km²; *run up* tsunami 15 meter 15,69 km²; dan *run up* tsunami 20 meter 21,29 km². Hasil pemodelan genangan ini berdampak yang luas pada tutupan lahan berjenis padang rumput, pasir darat, perkebunan, tegalan / ladang, dan sawah. Pemetaan kerentanan tsunami tinggi ditunjukkan pada daerah pesisir dekat pantai. Terdapat total 8940 penduduk yang terdampak oleh limpasan tsunami saat ketinggian *run up* tsunami 10 meter, 15060 penduduk yang terdampak saat *run up* tsunami 15 meter, dan terdapat dan 23870 penduduk yang terdampak saat ketinggian *run up* tsunami 20 meter.

Daftar Pustaka

- [1] Soemarmi A, Indarti E, Diamantina A. Konsep Negara Kepulauan Dalam Upaya Perlindungan Wilayah Pengelolaan Perikanan Indonesia. Masalah – Masalah Hukum. 2019; 48(3): 241 – 248. DOI: 10.14710/mmh.48.3.2019.241-248
- [2] Setyadi RG, Nugroho DS, Diposaptono S, Kongko W. Potensi Kerawanan Gelombang Tasunami di Pesisir Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Jurnal Oseanografi. 2015; 4(4): 691 – 699.

- [3] Widiyantoro S, Gunawan E, Muhari A, Rawlinson N, Mori J, Hanifa NR, Susilo S, Supendi P, Shiddiqi HA, Nugraha AD, Putra. 2020. Implication for Megathrust Earthquakes and Tsunamis from Seismic Gaps South of Jawa Indonesia. *Scientific Report Nature Research*. 10(15274): 1-11.
- [4] Berryman K. Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand. Lower Hutt (NZ): Institute of Geological & Nuclear Sciences; 2005.
- [5] Subarjo P, Raden Ario. Uji Kerawanan terhadap Tsunami dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) di Pesisir Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul, Yogyakarta. *Jurnal Kelautan Tropis*. 2015; 18(2):82–97
- [6] Pedersen G, Glimsdal S. Coupling of Dispersive Tsunami Propagation and Shallow Water Coastal Response. *The Open Oceanography Journal*. 2010; 4(1): 71- 82
- [7] Kharis FA, Akbar MAH, Rahmawati OP. Perencanaan lanskap mitigasi tsunami berbasis ekosistem mangrove di Kota Palu. *Jurnal Lanskap Indonesia*. 2020; 12(2): 41 – 53.
- [8] Kurniawan T, Laili AF. Penentuan area terdampak ketinggian maksimum tsunami di Pulau Bali berdasarkan Potensi gempabumi pembangkit tsunami pada segmen megathrust Sumba. *Jurnal Dialog dan Penanggulangan Bencana*. 2019; 10(1): 93 – 104.
- [9] Wahyu RO, Djamaluddin R, Mamuaya GE, Yatimantoro T, Priyobudi. Pemodelan inundasi tsunami di sepanjang pesisir Kota Manado akibat Gempabumi M 8,5 di zona subduksi Sulawesi Utara. *Jurnal Meteorologi DAN Geofisika*. 2018; 19(1): 13 – 18.
- [10] Nugroho RH. Aplikasi ArcGIS Model Builder untuk Analisis Intensitas Pemanfaatan Ruang. Prosiding Seminar Nasional: "Kebijakan Satu Pera dan Implementasinya untuk Perencanaan Wilayah (DAS) dan Mitigasi Bencana". Surakarta, Indonesia, 11 September 2021.
- [11] Syafitri Y, Bahtiar, Didik LA. Analisis pergeseran lempeng bumi yang meningkatkan potensi terjadinya gempa bumi di Pulau Lombok. *Jurnal Fisika dan Pendidikan Fisika*. 2018; 3(2): 139 – 146.
- [12] Santius SH. Pemodelan tingkat risiko bencana tsunami pada permukiman di kota Bengkulu menggunakan sistem informasi geografis. *Jurnal Permukiman*. 2015; 10(2): 92 – 105.
- [13] Nahak PG, Djunaedi, Wonlele T. Studi perencanaan mitigasi bencana tsunami di daerah wisata Pantai Tablolong. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*. 2017; 19(2): 83 – 89.
- [14] Veronica Y, Sutoyo, Rau MI, Arif C. 2020. Di dalam: Veronica, editor. Range, capacity, and closest evacuation route analysis to tsunami evacuation shelter in Pandeglang Regency Banten Indonesia. *The First International Seminar on Civil and Environmental Engineering: "Robust Infrastructure Resilient to Natural Disaster"*. 2020 Nov 2-4: Bogor, Indonesia: hlm 1 – 17; [diakses 2023 Mar 07]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/622/1/012042>
- [15] Sambah AB, Miura F. Integration of Spatial Analysis for Tsunami Inundation and Impact Assessment. *Journal of Geographic Information System*. 2014 Feb 6;6(1):11–22.
- [16] Bretschneider CL, Wybro PG. TSUNAMI INUNDATION PREDICTION. *Coastal Engineering Proceedings*. 1976 Jan 29;(15):59–59.

