

PENILAIAN KERENTANAN BANGUNAN TERHADAP TSUNAMI MENGUNAKAN MODEL PTVA-4 DI WILAYAH KEPESISIRAN BATUHIU, KABUPATEN PANGANDARAN

*(Building Vulnerability Assessment to Tsunami using PTVA-4 Model
in Batuhui Coastal Area, Pangandaran Region)*

Ratri Ma'rifatun Nisaa¹, Junun Sartohadi² dan Djati Mardiatno³

¹Minat Studi Geoinformasi untuk Manajemen Bencana, Sekolah Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

²Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada

³Pusat Studi Bencana Alam Universitas Gadjah Mada

Jl. Teknik Utara, Pogung, Sleman, Yogyakarta 55281 Indonesia

E-mail: ratri.marifatun.n@mail.ugm.ac.id

Diterima: 29 Januari 2019; Direvisi: 28 Juli 2019; Disetujui untuk Dipublikasikan: 30 September 2019

ABSTRAK

Model PTVA-4 perlu dikaji lebih lanjut untuk wilayah pesisir di Indonesia. PTVA-4 merupakan salah satu metode untuk menilai kerentanan struktural bangunan di wilayah pesisir. Tujuan utama penelitian ini adalah menilai kerentanan bangunan terhadap tsunami menggunakan PTVA-4. Namun, diperlukan penyesuaian parameter dan atribut PTVA-4 sesuai dengan kondisi bangunan di wilayah kepebisiran Batuhui. Model genangan tsunami dibuat dengan menggunakan formula yang dikembangkan oleh Berryman. Interpretasi foto udara dan survei lapangan dilakukan untuk mendapatkan informasi karakteristik bangunan. Model PTVA-4 diterapkan dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Hasil yang didapatkan adalah mayoritas bangunan di pesisir Batuhui terklasifikasikan kerentanan tinggi (51 bangunan) dan kerentanan sedang (41 bangunan) dari total 180 bangunan. Sebanyak 88 bangunan terklasifikasikan kerentanan rendah karena berlokasi jauh dari pantai dan juga dihalangi oleh sebuah bukit kecil. Parameter PTVA-4 yang memerlukan penyesuaian adalah material bangunan dan kedalaman fondasi.

Kata kunci: kerentanan bangunan, tsunami, PTVA-4, SIG

ABSTRACT

PTVA-4 model needs to be studied further for coastal areas in Indonesia. PTVA-4 is one method for assessing structural vulnerability of buildings in coastal areas. The main objective of this study is to assess the vulnerability of buildings using PTVA-4. However, it is necessary to adjust the parameters and attributes of PTVA-4 according to the condition of the building in the Batuhui tourist area. Tsunami inundation model was made using formula that developed by Berryman. Aerial photo interpretation and field surveys were carried out to obtain information on building characteristics. The PTVA-4 model was applied using a Geographic Information System (GIS). The results obtained were the majority of buildings in coastal Batuhui classified as high vulnerability (51 buildings) and moderate vulnerability (41 buildings) out of a total of 180 buildings. A total of 88 buildings were classified as low vulnerabilities because they were located far from the coast and were also blocked by a small hill. The PTVA-4 parameters that require adjustment are building materials and foundation depth.

Keywords: tsunami, building vulnerability, PTVA-4, GIS

PENDAHULUAN

Bagian selatan Pulau Jawa merupakan wilayah yang berhadapan langsung dengan zona subduksi antara lempeng India-Australia dan Eurasia. Tanggal 17 Juli 2006, sebuah tsunami melanda pantai selatan Jawa, Indonesia. Gempa yang memicu terletak 225 km di lepas Pantai Pangandaran dengan magnitude 7,7 SR, sehingga menyebabkan lebih dari 730 korban jiwa (Lavigne et al., 2007). Lavigne et al., (2009) mengungkapkan bahwa bangunan yang berada dekat dengan pantai mengalami kerusakan parah. Kedalaman aliran hingga 5 m menyebabkan kehancuran 3000 rumah di Pangandaran (Fritz et al., 2007).

Bangunan selalu menjadi fokus dalam manajemen risiko. Bangunan merupakan salah satu aspek yang penting untuk dilindungi, karena selain memiliki nilai ekonomi bangunan juga berfungsi sebagai tempat tinggal bagi mereka yang selamat dari bencana (Wibowo et al., 2013). Kerentanan fisik bangunan menyebabkan cedera dan kematian bagi penduduk serta kerusakan barang milik mereka jika terjadi bencana (Thapaliya, 2006). Westen et al., (2009) menyebutkan bahwa hilangnya nyawa yang lebih besar akibat bencana di negara berkembang disebabkan oleh kurangnya kesadaran dan kesiapsiagaan bencana oleh masyarakat. Selain itu, bangunan yang memiliki kualitas buruk serta

kurangnya rencana tata ruang untuk bangunan yang dibangun di kawasan rawan bencana juga menjadi faktor hilangnya nyawa akibat bencana.

Setiap tindakan untuk mengelola risiko harus mempertimbangkan penilaian kerentanan bangunan dan berusaha memperbaiki ketahuannya terhadap bencana yang mungkin terjadi. Ukuran bentuk bangunan, teknik konstruksi, material, pondasi dan kombinasi diantaranya berbeda untuk hampir setiap bangunan. Informasi fisik, spasial, dan lokasi spesifik diperlukan untuk penilaian kerentanan bangunan yang lebih baik (Thapaliya, 2006).

Beberapa model dan metode telah banyak dikembangkan untuk menilai kerentanan bangunan. Model yang paling terkenal adalah Model *Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment* (PTVA) yang diperkenalkan pertama kali oleh Papathoma et al., (2003) disebut PTVA-1. Kemudian, model tersebut direvisi oleh Dominey-Howes & Papathoma (2007) menjadi PTVA-2, Dall'Osso et al., (2009a) untuk PTVA-3 dan Dall'Osso et al., (2016) untuk PTVA-4. Model tersebut telah banyak dikembangkan di beberapa wilayah di dunia seperti PTVA-1 – Greece (Papathoma & Dominey-Howes, 2003; Papathoma et al., 2003); PTVA-2 – Seaside, USA (Dominey-Howes, et al., 2010); PTVA-3 – Sydney (Dall'Osso, et al., 2009b), Pulau Aeolian, Italia (Dall'Osso et al., 2010), Malaysia (Ismail et al., 2012), Portugal (Santos et al., 2014), Jepang (Voulgaris & Murayama, 2014), Teluk Chabahar, Iran (Madani et al., 2017), Chili (Fritis et al., 2018); PTVA-4 – Sydney, Australia (Dall'Osso et al., 2016), Chili (Fritis et al., 2018).

Metode PTVA-4 merupakan metode yang relatif baru dan mutakhir untuk parameter yang dipertimbangkan untuk mempengaruhi kerentanan struktural bangunan. Model PTVA-4 sudah pernah diterapkan di Pulau Mentawai Sumatera Barat, namun perlu dikaji lebih lanjut untuk wilayah pesisir lainnya di Indonesia. Parameter yang bersifat universal memungkinkan untuk dihilangkan atau ditambahkan dalam penilaian kerentanan bangunan di wilayah pesisir Batuhui. Perlunya ada penyesuaian (*adjustment*) atribut dari parameter sesuai dengan kondisi di lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk 1) menilai kerentanan bangunan menggunakan Model PTVA-4, dan 2) menyesuaikan atribut dari model PTVA-4 sesuai dengan kondisi bangunan di wilayah kepesisiran Batuhui.

METODE

Model Genangan Tsunami

Model genangan tsunami dibuat dengan perangkat lunak SIG menggunakan formula yang dikembangkan oleh Berryman (2006). Tiga input utama yang dibutuhkan terdiri dari ketinggian gelombang pada bibir pantai, kekasaran permukaan, dan kemiringan lereng. Ketinggian

gelombang pada garis pantai didasarkan pada penelitian Reese et al., (2007) yang menunjukkan ketinggian air mencapai 5 m pada Pantai Batuhui. Kekasaran permukaan didapatkan dari turunan penggunaan lahan. Peta penggunaan lahan diinterpretasi melalui citra foto udara. Selanjutnya, DEM yang disediakan Pemerintah Indonesia melalui Badan Informasi Geospasial (BIG) digunakan untuk menurunkan informasi kemiringan lereng. DEM ini memiliki resolusi spasial 27-arcsecond atau 8,1 m dan dapat didownload melalui <http://tides.big.go.id/DEMNAS/>. Formula untuk menghitung sebaran genangan tsunami adalah sebagai berikut (**Persamaan 1**).

$$H_{loss} = (176.n^2 / H_0^{\frac{1}{3}}) + 5 \sin S \dots \dots \dots (1)$$

di mana

H_{loss} = kehilangan ketinggian tsunami per 1 m jarak inundasi

H_0 = Ketinggian gelombang tsunami di garis pantai (m),

n = Koefisien kekasaran permukaan, dan S merupakan kemiringan lereng.

Penilaian Kerentanan Bangunan Menggunakan Model PTVA-4

Kerentanan Struktural (S_v)

Kerentanan struktural " S_v " sebuah bangunan ditentukan oleh atribut dari struktur bangunan (B_v), kedalaman air genangan (Ex) pada titik dimana bangunan berada; dan bangunan sekitarnya ($Surr$). Kerentanan struktural (S_v) dihitung dengan menggunakan **Persamaan 2** berikut.

$$S_v = B_v.Surr.Ex \dots \dots \dots (2)$$

Nilai " B_v " masing-masing bangunan dihitung dengan mempertimbangkan kontribusi yang dibuat oleh atribut jumlah lantai (s), material bangunan dan teknik konstruksi (m), hidrodinamisasi lantai dasar (g), fondasi (f), bentuk tapak bangunan (sh), dan pemeliharaan bangunan (pc) (**Tabel 1**). Persamaan yang digunakan untuk menghitung kerentanan bangunan (B_v) adalah sebagai berikut (**Persamaan 3**).

$$B_v = 1/409 (100.m + 85.s + 69.g + 69.f + 52.sh + 34.pc) \dots \dots \dots (3)$$

Elemen selanjutnya adalah bangunan sekitar " $surr$ ". Faktor-faktor yang mempengaruhi perlindungan yang diberikan ke bangunan oleh sekitarnya adalah baris bangunan (br), keberadaan *seawall* (sw), penghalang alami (nb): penghalang alami muncul untuk mengurangi kecepatan dan memerangkap puing-puing dan benda-benda berat mengambang yang akan merusak bangunan, kehadiran dinding bata di sekitar bangunan (w), dan objek bergerak (mo) (**Tabel 2**). **Persamaan 4** yang digunakan untuk menghitung bangunan sekitar ($Surr$) adalah sebagai berikut.

$$\text{Surr} = 1/356 (100.\text{br} + 84.\text{sw} + 72.\text{nb} + 58.\text{mo} + 42.\text{w}) \dots \dots \dots (4)$$

Eksposur "Ex" merupakan elemen yang berhubungan dengan kedalaman aliran air pada titik dimana bangunan berada. Tingkat kerusakan struktural diperkirakan meningkat dengan kedalaman air karena tekanan yang diberikan pada bangunan dan kecepatan aliran adalah fungsi langsung kedalaman aliran (Dall'Osso et al., 2009a). **Persamaan 5** untuk menghitung eksposur (Ex) adalah sebagai berikut.

$$\text{Ex} = \text{WD}/\text{WD}_{\text{max}} \dots \dots \dots (5)$$

Dimana WD merupakan kedalaman air yang mempengaruhi bangunan, yaitu kedalaman air di atas *terrain level* pada titik area studi dimana bangunan berada; WD_{max} merupakan nilai

maksimum WD di antara semua bangunan yang kerentanannya dinilai.

Kerentanan Bangunan Terhadap Kontak Air (W_v)

Apabila lantai sebuah bangunan terendam, semua bagian lantai yang rusak oleh air (termasuk, dalam beberapa kasus, dinding sebelahnya) perlu diperbaiki atau diganti. Dengan demikian, kerentanan keseluruhan bangunan untuk kontak dengan air jelas tergantung pada jumlah lantai yang terendam di setiap bangunan (termasuk ruang bawah tanah). Oleh karena itu, ditetapkan " W_v " skor yang menunjukkan berapa persen dari lantai bangunan akan tergenang. Oleh karena itu, untuk setiap bangunan (**Persamaan 6**):

$$W_v = \frac{\text{Jumlah tingkat penggenangan/}}{\text{Jumlah total tingkat}} \dots \dots \dots (6)$$

Tabel 1. Nilai numerik yang diberikan pada atribut komponen "Bv" berdasarkan karakteristik bangunan.

	-1	-0,5	0	+0,5	+1
Jumlah lantai (s)	Lebih dari 5 lantai	4 lantai	3 lantai	2 lantai	1 lantai
Material bangunan (m)	Beton bertulang atau baja		Batu bata		Kayu, timah, tanah liat atau bahan ringan
Hidrodinamisasi lantai dasar (g)	Ruang terbuka	Sekitar 75% ruang terbuka	Sekitar 50% ruang terbuka	Sekitar 25% ruang terbuka	Tidak ada ruang terbuka, tidak ada atau sangat sedikit bukaan di lantai dasar
Ketahanan fondasi (f)	Pondasi tiang dalam		Pondasi kedalaman rata-rata		Pondasi dangkal
Bentuk tapak bangunan (sh)	Seperti lingkaran atau segitiga	Persegi atau hampir persegi	Persegi panjang	Persegi panjang yang panjang	Kompleks (bentuk bangunan L, T, atau X, atau geometri kompleks lainnya)
Pemeliharaan bangunan (pc)	Sangat baik	Baik	Rata-rata	Buruk	Sangat buruk

Sumber: (Dall'Osso et al., 2016)

Tabel 2. Nilai numerik yang akan diberikan pada atribut komponen Surr berdasarkan bangunan sekitar

	-1	-0,5	0	+0,5	+1
Prot_br (baris bangunan)	>10	7-8-9-10	4-5-6	2-3	1
Prot_nb (penghalang alami)	Perlindungan sangat tinggi	Perlindungan tinggi	Perlindungan rata-rata	Perlindungan sedang	Tidak ada perlindungan
Prot_sw (tinggi dan bentuk seawall)	Vertikal dan >5m	Vertikal dan 3-5m	Vertikal dan 1,5-3m	Vertikal dan 0-1,5m atau miring dan 1,5-3m	Miring dan 0-1,5m atau tidak ada seawall
Prot_w (dinding batubata sekitar bangunan)	Tinggi dinding adalah dari 80%-100% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 60%-80% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 40%-60% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 20%-40% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 0%-20% dari kedalaman air
Objek bergerak (mo)	Risiko sangat rendah dari benda bergerak		Risiko rata-rata dari benda bergerak		Risiko sangat tinggi dari benda bergerak

Sumber: (Dall'Osso et al., 2016)

Relative Vulnerability Index (RVI)

Nilai RVI bangunan yang menggunakan Model PTVA-4 dihitung sebagai **Persamaan 7**:

$$RVI = 2/3 (SV) + 1/3 (WV) \dots \dots \dots (7)$$

Dimana SV adalah skor standar untuk kerentanan struktural, dan WV adalah skor standar untuk kerentanan terhadap intrusi air.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Genangan Tsunami

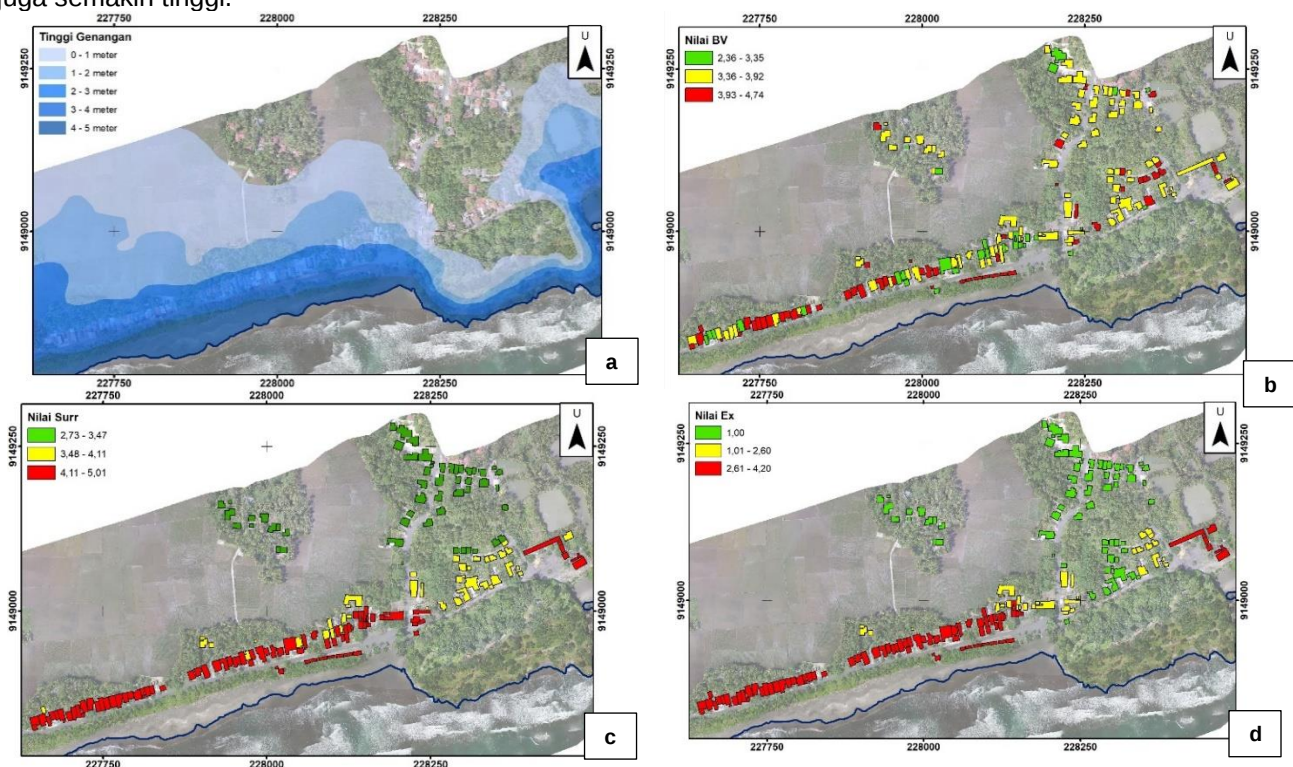
Peta genangan tsunami dibuat dengan menggunakan ketinggian gelombang pada garis pantai sebesar 5 m yang didasarkan pada Reese et al., (2007). Klasifikasi genangan tsunami terbagi menjadi 5 kelas yakni kedalaman 0-1 m, 1-2 m, 2-3 m, 3-4 m, dan 4-5 m dengan luas yang dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Gambar 1a**. Terdapat bukit kecil yang berada di pinggir pantai. Bukit ini memberikan perlindungan pada area di belakangnya dari gelombang laut. Bukit kecil tersebut merupakan komposisi dari kalkarenit dan batugamping klastika berselingan dengan napal. Berbeda dengan area sekitarnya yang cenderung datar hingga landai karena terbentuk dari endapan aluvial berupa lumpur, pasir dan kerikil. Peta genangan tsunami dibuat untuk mendapatkan nilai tinggi genangan pada setiap bangunan. Setiap bangunan memiliki nilai genangan tersendiri. Hal ini tentunya sangat berpengaruh terhadap kerentanan bangunan dimana semakin besar bahaya maka kerentanan juga semakin tinggi.

Penilaian Kerentanan Bangunan Terhadap Tsunami menggunakan PTVA-4

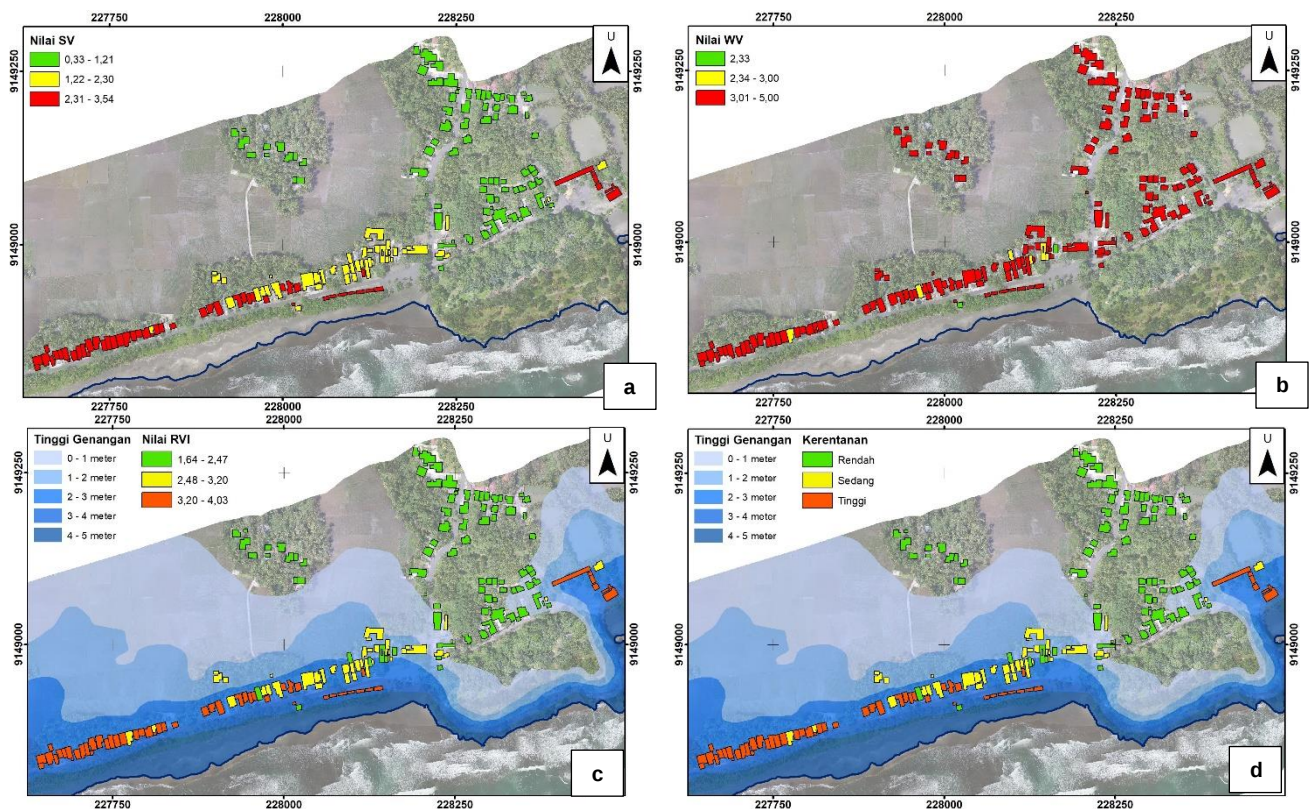
Nilai kerentanan struktural bangunan (SV) didapatkan dengan melakukan perkalian antara kerentanan bangunan (Bv) (**Gambar 1b**), kerentanan akibat bangunan sekitar (Surr) (**Gambar 1c**) dan eksposur (Ex) (**Gambar 1d**). Nilai perkalian tersebut memiliki rentang antara 8 hingga 87. Nilai tersebut kemudian diskalakan menjadi rentang 1 hingga 5 dengan dibagi oleh angka 25. Rentang nilai SV yang diskalakan berkisar antara 0,33 – 3,54. Pola yang sama antara nilai eksposur dan nilai SV terlihat pada peta kerentanan struktural bangunan (**Gambar 2a**). Bangunan yang berlokasi persis menghadap laut memiliki nilai SV tinggi (2,31 – 3,54) yang artinya kerentanannya termasuk dalam kategori tinggi. Kemudian diikuti oleh nilai SV menengah dengan rentang nilai 1,22 – 2,30.

Tabel 3. Luas area genangan pada masing-masing kelas.

Tinggi Genangan	Luas (ha)	Persentase (%)
Zona aman	10,59	30,72
0 - 1 meter	9,06	26,28
1 - 2 meter	5,98	17,35
2 - 3 meter	3,94	11,43
3 - 4 meter	2,34	6,79
4 - 5 meter	2,56	7,43
Total	35,47	100



Gambar 1. (a) Zona genangan tsunami, (b) Sebaran kerentanan bangunan (Bv), (c) Sebaran kerentanan bangunan sekitar (Surr), (d) Sebaran eksposur.

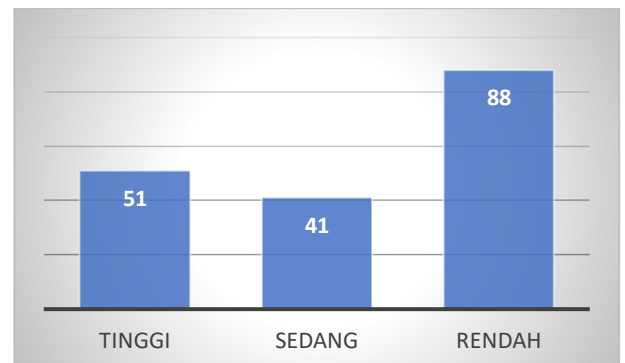


Gambar 2. (a) Sebaran kerentanan struktural (SV), (b) Sebaran bangunan terhadap kontak air WV, (c) Sebaran nilai indeks kerentanan relative RVI, (d) Sebaran kerentanan bangunan terhadap tsunami.

Kerentanan bangunan terhadap kontak air dihitung dengan membagi berapa lantai yang tergenang dengan jumlah semua lantai pada tiap bangunan. Skor WV menunjukkan berapa persen dari lantai bangunan yang akan tergenang. Jika dilihat pada **Gambar 2b**, sebagian besar bangunan memiliki kerentanan bangunan yang tinggi dengan rentang skor 3,01 – 5. *Relative Vulnerability Index* (RVI) didapatkan dengan mengolah SV yang merupakan skor standar untuk kerentanan struktural, dan WV adalah skor standar untuk kerentanan terhadap intrusi air. Keluaran dari model PTVA-4 adalah nilai RVI yang berkisar antara 1,64 – 4,03 (**Gambar 2c**). Skor RVI hanya dapat digunakan untuk membandingkan kerentanan bangunan yang berbeda, tidak untuk memperkirakan kerusakan absolut (Dall'Osso et al., 2016).

Nilai RVI diklasifikasikan berdasarkan Jenk's interval pada ArcGIS ke dalam 3 kelas yakni kerentanan tinggi, kerentanan sedang dan kerentanan rendah (**Gambar 2d**). Sebanyak 51 bangunan terklasifikasi dalam kerentanan tinggi, 41 bangunan adalah kerentanan menengah, dan 88 bangunan terklasifikasi kerentanan menengah (**Gambar 3**). Bangunan yang berada tepat di depan garis pantai memiliki kerentanan yang tinggi. Mayoritas bangunan berfungsi sebagai warung dan café. Beralih ke tengah, terdapat variasi bangunan kerentanan sedang dan kerentanan rendah. Bangunan ini rata-rata memiliki fungsi penginapan dan toko. Bangunan yang terlindung oleh bukit kecil serta bangunan yang lokasinya jauh dari pantai

memiliki kerentanan yang rendah dan berfungsi sebagai rumah tinggal. Berbagai jenis bangunan di lokasi penelitian dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 3. Jumlah bangunan pada tiap kelas kerentanan

Penyesuaian Model PTVA-4

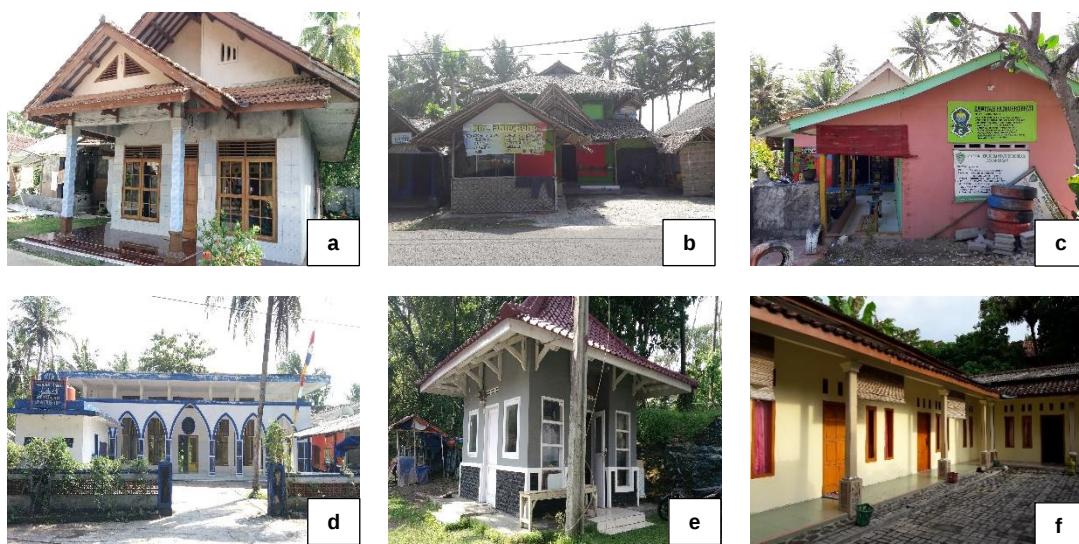
Dall'Osso et al., (2016) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa terdapat tiga jenis material pada kriteria kerentanan tsunami. Material sangat rentan adalah kayu atau bahan ringan, material kerentanan menengah adalah batu bata, dan kerentanan sangat rendah adalah beton bertulang. Dari hasil pengamatan di lapangan, terdapat dua jenis material yang tidak disebutkan oleh Dall'Osso et al., (2016) yakni kayu atau bambu dengan sedikit bata dan batu bata dengan kolom bertulang (konstruksi sederhana). Oleh, karena itu kedua material ini penulis tambahkan untuk disesuaikan dalam pengolahan data lebih lanjut (lihat **Tabel 4**).

Tabel 4. Penyesuaan nilai numerik yang diberikan pada atribut komponen “Bv” berdasarkan karakteristik bangunan di lapangan.

	-1	-0,5	0	+0,5	+1
Jumlah lantai (s)	Lebih dari 5 lantai	4 lantai	3 lantai	2 lantai	1 lantai
Material bangunan (m)	Beton bertulang atau baja	Bata dengan kolom bertulang	Batu bata	Kayu dan sedikit bata	Kayu, timah, tanah liat atau bahan ringan
Hidrodinamisi lantai dasar (g)	Ruang terbuka	Sekitar 75% ruang terbuka	Sekitar 50% ruang terbuka	Sekitar 25% ruang terbuka	Tidak ada ruang terbuka, tidak ada atau sangat sedikit bukaan di lantai dasar
Ketahanan fondasi (f)	Fondasi tiang dalam	Fondasi agak dalam	Fondasi kedalaman rata-rata	Fondasi agak dangkal	Pondasi dangkal
Bentuk tapak bangunan (sh)	Seperti lingkaran atau segitiga	Persegi atau hampir persegi	Persegi panjang	Persegi panjang yang panjang	Kompleks (bentuk bangunan L, T, atau X, atau geometri kompleks lainnya)
Pemeliharaan bangunan (pc)	Sangat baik	Baik	Rata-rata	Buruk	Sangat buruk

Tabel 5. Penyesuaan nilai numerik yang diberikan pada atribut komponen “Surr” berdasarkan karakteristik bangunan di lapangan.

	-1	-0,5	0	+0,5	+1
Prot_br (baris bangunan)	>10	7-8-9-10	4-5-6	2-3	1
Prot_nb (penghalang alami)	Perlindungan sangat tinggi	Perlindungan tinggi	Perlindungan rata-rata	Perlindungan sedang	Tidak ada perlindungan
Prot_w (dinding batubata sekitar bangunan)	Tinggi dinding adalah dari 80%-100% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 60%-80% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 40%-60% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 20%-40% dari kedalaman air	Tinggi dinding adalah dari 0%-20% dari kedalaman air
Objek bergerak (mo)	Risiko sangat rendah dari benda bergerak		Risiko rata-rata dari benda bergerak		Risiko sangat tinggi dari benda bergerak

**Gambar 4.** Berbagai jenis bangunan di wilayah kepesisiran Batuhui, (a) rumah tinggal, (b) cafe, (c) sekolah, (d) masjid, (e) kantor, (f) hotel/penginapan.

Kriteria fondasi dalam Dall'Osso et al. (2016) terdiri dari tiga kelas yakni fondasi dangkal dengan kerentanan sangat tinggi, fondasi rata-rata untuk kerentanan menengah, dan fondasi sangat dalam

untuk kerentanan rendah. Di lapangan ditemui fondasi dangkal untuk material bangunan berupa kayu/bambu dan fondasi rata-rata untuk material bangunan yang terbuat dari konstruksi sederhana.

Bangunan baru dengan jumlah lantai lebih dari satu, fondasi yang digunakan adalah fondasi agak dalam. Selanjutnya, fondasi pada bangunan yang terbuat dari kayu atau bambu dengan sedikit bata memiliki fondasi yang agak dangkal. Sehingga, penulis menambahkan atribut fondasi agak dalam dan fondasi agak dangkal pada tabel kriteria. Keberadaan seawall (sw) pada kriteria bangunan sekitar (Surr) dihilangkan (**Tabel 5**). Di lapangan, tidak ditemui adanya dinding laut yang dapat menghalangi tsunami memasuki daratan. Terdapat tembok pembatas setinggi 1 m yang sudah rusak akibat diterjang gelombang ekstrim pada 25 Juli 2018.

Susunan Keruangan (*Spatial Arrangement*) Bangunan Rentan

Analisis spasial merupakan suatu himpunan teknik untuk menganalisis data spasial. Hasil analisis spasial tergantung pada lokasi objek yang dianalisis. Susunan keruangan dilakukan untuk mengetahui keterkaitan antara satu bangunan dengan bangunan lain dan sebarannya di lokasi penelitian. Memperhatikan hasil peta kerentanan bangunan berdasarkan PTVA-4, bangunan yang berlokasi tepat di hadapan bibir pantai, memiliki kerentanan yang tinggi. Bangunan dengan kerentanan yang tinggi berada di depan barisan bangunan yang memiliki kerentanan sedang, sehingga keadaan tersebut berpotensi mengakibatkan kerusakan bangunan di belakangnya. Hal ini dapat disebabkan oleh sampah (puing-puing) atau adanya objek bergerak yang terbawa oleh bangunan di barisan depan. Pada hasil penilaian kerentanan menggunakan PTVA-4, bangunan yang berpotensi memiliki kerentanan tinggi adalah 41 bangunan atau 22,7%. Sedangkan, bangunan awal yang memiliki kerentanan tinggi adalah 51 bangunan. Total bangunan yang berpotensi memiliki kerusakan tinggi adalah 92 bangunan atau 50% dari jumlah keseluruhan bangunan.

KESIMPULAN

Hampir semua bangunan yang berlokasi di pinggir Pantai Batuhiu memiliki kerentanan yang tinggi. Penilaian kerentanan bangunan terhadap tsunami menggunakan Model PTVA-4 menunjukkan bahwa sebanyak 51 bangunan terklasifikasikan kerentanan tinggi, 41 bangunan terklasifikasikan kerentanan menengah, dan 88 bangunan terklasifikasikan kerentanan rendah. Bangunan dengan kerentanan rendah berlokasi jauh dari pantai atau berada di balik bukit kecil yang menghalangi gelombang laut masuk ke daratan. Penyesuaian atribut untuk model PTVA-4 diterapkan pada parameter material bangunan dan fondasi. Selain itu, pada komponen bangunan sekitar (surr), kriteria keberadaan dinding laut (seawall) dihilangkan karena tidak ditemui adanya dinding laut di lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Pusat Studi Bencana Alam (PSBA) Universitas Gadjah Mada yang telah menyediakan data berupa foto udara dan keperluan lain dalam melaksanakan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Berryman, K. (2006). *Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand*, report by the institute of geological and Nuclear Science. New Zealand.
- Dall'Osso, F., Dominey-Howes, D., Tarbotton, C., Summerhayes, S., & Withycombe, G. (2016). Revision and improvement of the PTVA-3 model for assessing tsunami building vulnerability using "international expert judgment": introducing the PTVA-4 model. *Natural Hazards*, 83(2), 1229–1256. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2387-9>
- Dall'Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., & Dominey-Howes, D. (2009a). A revised (PTVA) model for assessing the Vulnerability of buildings to Tsunami damage. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(5), 1557–1565. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1557-2009>
- Dall'Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., & Dominey-Howes, D. (2009b). Assessing the vulnerability of buildings to tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(6), 2015–2026. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2015-2009>
- Dall'Osso, F., Maramai, A., Graziani, L., Brizuela, B., Cavalletti, A., Gonella, M., & Tinti, S. (2010). Applying and validating the PTVA-3 model at the Aeolian Islands, Italy: Assessment of the vulnerability of buildings to tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(7), 1547–1562. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1547-2010>
- Dominey-Howes, D., Dunbar, P., Varner, J., & Papathoma-Köhle, M. (2010). Estimating probable maximum loss from a Cascadia tsunami. *Natural Hazards*, 53(1), 43–61. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9409-9>
- Dominey-Howes, D., & Papathoma, M. (2007). Validating a tsunami vulnerability assessment model (the PTVA Model) using field data from the 2004 indian ocean tsunami. *Natural Hazards*, 40(1), 113–136. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0007-9>
- Fritis, E., Izquierdo, T., & Abad, M. (2018). Assessing the tsunami building vulnerability PTVA-3 and PTVA-4 models after the 16S 2015 event in the cities of Coquimbo- La Serena (Chile). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(6), 1703-1716.
- Fritz, H. M., Kongko, W., Moore, A., McAdoo, B., Goff, J., Harbitz, C., ... Synolakis, C. (2007). Extreme runup from the 17 July 2006 Java tsunami. *Geophysical Research Letters*, 34(12), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL029404>
- Ismail, H., Wahab, A. K. A., Amin, M. F.M., Yunus, M. Z. M., Sidek, F. J., & Esfandier J., B. (2012). A 3-tier tsunami vulnerability assessment technique for the north-west coast of Peninsular Malaysia. *Natural Hazards*, 63(2), 549–573. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0166-9>
- Lavigne, F., Gomez, C., Giffó, M., Wassmer, P., Hoebreck, C., Mardiatno, D., ... & Paris, R. (2007). Field observations of the 17 July 2006 Tsunami in Java. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(1), 177–183. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-177-2007>

- 177-2007
- Lavigne, F., Paris, R., Grancher, D., Wassmer, P., Brunstein, D., Vautier, F., ... & Fachrizal. (2009). Reconstruction of tsunami inland propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, Indonesia, through field investigations. *Pure and Applied Geophysics*, 166(1-2), 259-281. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0431-8>
- Madani, S., Khaleghi, S., & Jannat, M. R. A. (2017). Assessing building vulnerability to tsunami using the PTV3 model: A case study of Chabahar Bay, Iran. *Natural Hazards*, 85(1), 349-359. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2567-7>
- Papathoma, M., & Dominey-Howes, D. (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6), 733-747. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-733-2003>
- Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, Y., & Smith, D. (2003). Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(5), 377-389. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-377-2003>
- Reese, S., Cousins, W. J., Power, W. L., Palmer, N. G., Tejakusuma, I. G., & Nugrahadi, S. (2007). Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java - Field observations after the July 2006 Java tsunami. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(5), 573-589. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-573-2007>
- Santos, A., Tavares, A. O., & Emidio, A. (2014). Comparative tsunami vulnerability assessment of an urban area: An analysis of Setúbal city, Portugal. *Applied Geography*, 55, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.009>
- Thapaliya, R. (2006). *Assessing Building Vulnerability for Earthquake using Field Survey and Development Control Data: A Case study in Lalitpur Sub-Metropolitan City, Nepal*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Voulgaris, G., & Murayama, Y. (2014). Tsunami vulnerability assessment in the southern boso peninsula, Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, 190-200. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.08.001>
- Westen, C. J. V., Alkema, D., Damen, M. C. J., Kerle, N., & Kingma, N. C. (2009). Multi-hazard risk assessment. Distance education course. Guide book. United Nation University-ITC School on Disasater Geoinformation Management: Tokyo, Japan.
- Wibowo, T. W. M., Mardiatno, D & Sunarto (2013). Penilaian Kerentanan Bangunan Terhadap Bencana Tsunami Melalui Identifikasi Bentuk Atap Pada Citra Resolusi Tinggi. *Prosiding Simposium National Sains Geoinformasi, III*, 177-185. (<https://doi.org/10.13140/2.1.2175.8248>)