



Model Estimasi Batas Aman Gedung *Shelter* terhadap Tsunami di Kota Padang Menggunakan Model Inundasi Hills dan Mader

Andi Susanto¹, Alya Nabilla¹, Desti Afirda^{1*}, Nabilla Yusda¹, Nurul Annisa Dwinanda²

¹Tadris Matematika, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Imam Bonjol Padang, Indonesia.

²Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Padang, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i3.2693>

Article Info:

Received : 15 Juni 2026

Revised : 26 Juni 2026

Accepted : 16 Juli 2026

Published : 20 Juli 2026

Correspondence:

Desti Afirda

Phone: +6282173209659

Abstract: Padang City is one of the regions with a high risk of earthquakes and tsunamis. Following an earthquake that has the potential to generate a tsunami, residents must immediately evacuate to safer locations. Based on the evacuation simulations conducted by the government, the West Sumatra Grand Mosque has been designated as one of the vertical evacuation shelters. Although the building was designed to withstand earthquakes, it is also necessary to ensure that its elevation is sufficient to protect the community from tsunami hazards. Therefore, this study aims to estimate the safe tsunami limit for the second floor of the West Sumatra Grand Mosque using the Hills and Mader inundation model combined with the SCHEMA model. The results of the study provide a safe tsunami threshold interval by classifying shelter conditions into three categories: safe, when the inundation depth remains below the evacuation floor elevation; alert, when the inundation depth approaches the evacuation floor elevation, requiring evacuation to a higher floor; and unsafe, when the inundation depth exceeds the available evacuation floor elevation. These threshold intervals provide a basis for evaluating the suitability of vertical evacuation shelters under various tsunami scenarios in Padang City. The findings of this study are expected to serve as a reference for the planning and evaluation of vertical evacuation shelters and to support tsunami disaster mitigation efforts in Padang City.

Keywords: Tsunami; Vertical Evacuation; West Sumatra Grand Mosque; Hills and Mader Model; SCHEMA Model.

Citation: Susanto, A., Nabila, A., Afirda, D., Yusda, N., & Dwinanda, N. A. (2026). Model Estimasi Batas Aman Gedung *Shelter* terhadap Tsunami di Kota Padang Menggunakan Model Inundasi Hills dan Mader. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(3), 4073–4079. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i3.2693>

Pendahuluan

Kota Padang merupakan salah satu wilayah pesisir di Indonesia yang memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap bencana gempa bumi dan tsunami (Bernard, 2023). Secara geografis, kota ini terletak di pantai barat Pulau Sumatera yang berhadapan langsung dengan Samudra Hindia, sedangkan secara tektonik berada di dekat zona subduksi Sunda yang berasosiasi dengan Segmen Mentawai (Razi et al., 2023). Segmen tersebut dikenal sebagai salah satu *seismic gap* terbesar di Indonesia karena masih menyimpan akumulasi energi tektonik yang berpotensi dilepaskan dalam bentuk gempa bumi besar. Aktivitas seismik di kawasan ini

telah ditunjukkan oleh Gempa Padang tahun 2009 dengan magnitudo Mw 7,6 yang menyebabkan kerusakan signifikan di wilayah Sumatra Barat (Badan Meteorologi, Klimatologi, n.d.). Meskipun gempa tersebut tidak memicu tsunami besar, berbagai penelitian menunjukkan bahwa Segmen Mentawai masih memiliki potensi menghasilkan gempa *megathrust* berkekuatan lebih dari Mw 8,5 yang dapat memicu tsunami signifikan di wilayah pesisir Sumatra Barat.

Selain itu, catatan historis menunjukkan bahwa gempa besar tahun 1797 dan 1833 di kawasan Mentawai menghasilkan tsunami yang berdampak hingga Kota Padang. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa ancaman

tsunami bagi Kota Padang bukan sekadar kemungkinan teoritis, melainkan risiko nyata yang perlu mendapat perhatian serius dalam upaya mitigasi bencana dan perencanaan keselamatan masyarakat pesisir.

Salah satu tantangan utama dalam mitigasi tsunami di Kota Padang adalah terbatasnya waktu yang tersedia untuk melakukan evakuasi setelah gempa bumi terjadi. Berbagai hasil kajian dan simulasi kebencanaan menunjukkan bahwa tsunami akibat gempa megathrust Mentawai diperkirakan dapat mencapai wilayah pesisir Kota Padang dalam waktu sekitar 20–30 menit setelah gempa terjadi (Mls et al., 2023). Kondisi tersebut menyebabkan evakuasi horizontal menuju daerah yang lebih tinggi menjadi sulit dilakukan, terutama bagi masyarakat yang berada di kawasan padat penduduk, kelompok rentan, maupun wilayah dengan akses jalan yang terbatas. Oleh karena itu, evakuasi vertikal melalui pemanfaatan bangunan bertingkat menjadi salah satu alternatif mitigasi yang banyak direkomendasikan (Ismail et al., 2020). Salah satu bangunan yang telah direkomendasikan sebagai lokasi evakuasi vertikal di Kota Padang adalah Masjid Raya Sumatera Barat karena memiliki struktur beton bertulang yang dirancang tahan gempa, kapasitas tampung yang besar, dan lokasi yang strategis. Namun demikian, hingga saat ini masih terbatas kajian ilmiah yang secara kuantitatif mengevaluasi apakah ketinggian bangunan tersebut telah memenuhi tingkat keselamatan terhadap berbagai skenario tsunami yang berpotensi terjadi. Oleh sebab itu, diperlukan suatu pendekatan matematis yang mampu mengevaluasi hubungan antara karakteristik tsunami, kondisi topografi wilayah, dan keamanan bangunan evakuasi secara lebih objektif.

Untuk memperoleh estimasi yang objektif mengenai tingkat keamanan bangunan evakuasi vertikal, diperlukan suatu pendekatan yang mampu merepresentasikan fenomena tsunami ke dalam bentuk matematis. Pemodelan matematika merupakan suatu pendekatan yang digunakan untuk merepresentasikan perilaku atau fenomena alam ke dalam bahasa dan simbol matematika sehingga dapat dianalisis, diprediksi, dan dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan (Susanto & Rudianto, 2020). Melalui pemodelan matematika, berbagai parameter yang memengaruhi karakteristik tsunami, seperti tinggi gelombang, jarak dari garis pantai, kondisi topografi, dan karakteristik permukaan daratan, dapat diintegrasikan ke dalam suatu model untuk mengestimasi tinggi genangan dan menentukan batas aman bangunan evakuasi vertikal. Dengan demikian, penggunaan model matematika tidak hanya memberikan gambaran kuantitatif mengenai potensi dampak tsunami, tetapi juga menjadi dasar ilmiah dalam mengevaluasi kelayakan *shelter* evakuasi sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji bahaya tsunami di kawasan Sumatra Barat dengan pendekatan yang beragam. Penelitian terkini juga menunjukkan bahwa evaluasi bangunan evakuasi vertikal dan simulasi perilaku evakuasi menjadi aspek penting dalam pengurangan risiko tsunami (Núñez et al., 2022). McCloskey et al (2010) meneliti potensi gempa *megathrust* Mentawai dan implikasinya terhadap risiko tsunami di Kota Padang. Selanjutnya, Razi et al. (2023) menganalisis deformasi tektonik pada zona *seismic gap* Mentawai untuk mengidentifikasi potensi pelepasan energi gempa di masa mendatang. Penelitian lain umumnya berfokus pada simulasi propagasi gelombang tsunami, pemetaan daerah genangan, maupun analisis hidrodinamika tsunami terhadap bangunan (Mulia et al., 2022). Meskipun penelitian-penelitian tersebut memberikan kontribusi penting dalam memahami bahaya tsunami, sebagian besar masih berorientasi pada simulasi numerik, pemetaan wilayah terdampak, atau evaluasi struktur bangunan secara umum. Hingga saat ini masih sangat sedikit penelitian yang mengembangkan model matematis berbasis model inundasi empiris untuk menentukan hubungan antara tinggi tsunami di pantai, jarak inundasi maksimum menuju daratan, serta evaluasi keamanan bangunan evakuasi vertikal pada lokasi tertentu (Best et al., 2013). Selain itu, kajian yang secara khusus mengevaluasi Masjid Raya Sumatera Barat sebagai bangunan evakuasi vertikal menggunakan pendekatan pemodelan matematis juga masih sangat terbatas. Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan perlunya pengembangan model yang mampu mengintegrasikan karakteristik tsunami, parameter topografi, dan kondisi permukaan daratan ke dalam suatu model matematis yang sederhana namun representatif untuk mendukung perencanaan mitigasi bencana.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model matematis untuk menentukan ketinggian evakuasi vertikal minimum pada Masjid Raya Sumatera Barat akibat ancaman tsunami di Kota Padang. Model yang digunakan mengintegrasikan model inundasi empiris Hills dan Mader dengan model SCHEMA melalui pemanfaatan parameter tinggi tsunami di pantai, kemiringan lereng, kekasaran permukaan yang direpresentasikan oleh koefisien Manning, serta karakteristik topografi wilayah (Rashidi et al., 2020). Model tersebut digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara tinggi tsunami, jarak inundasi maksimum, dan keamanan bangunan sebagai lokasi evakuasi vertikal. Kontribusi utama penelitian ini adalah menghasilkan suatu pendekatan matematis yang dapat digunakan untuk mengevaluasi ketinggian minimum bangunan evakuasi pada lokasi tertentu tanpa harus melakukan simulasi hidrodinamika yang kompleks. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi

dasar ilmiah bagi pemerintah daerah, pengelola bangunan, dan masyarakat dalam meningkatkan kesiapsiagaan bencana tsunami serta mendukung perencanaan infrastruktur evakuasi vertikal yang lebih efektif dan berbasis data.

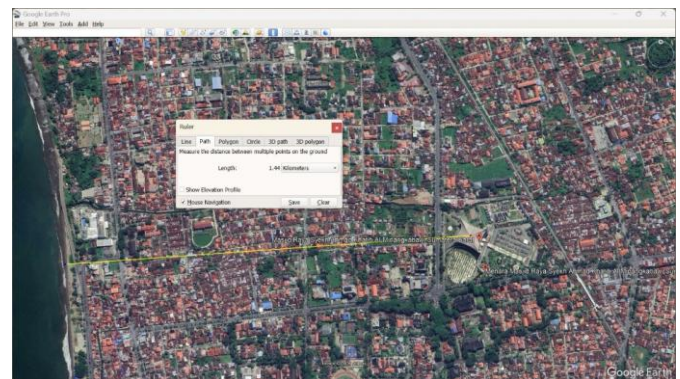
Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan matematis untuk mengestimasi batas aman gelombang tsunami pada lantai 2 Masjid Raya Sumatera Barat. Pendekatan pemodelan matematis banyak digunakan untuk merepresentasikan fenomena nyata ke dalam bentuk persamaan sehingga hubungan antarvariabel dapat dianalisis secara sistematis dan menghasilkan estimasi yang lebih objektif. Oleh karena itu, penggunaan model matematis dalam penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat keamanan bangunan evakuasi terhadap berbagai skenario tinggi gelombang tsunami (Wendra et al., 2024). Estimasi dilakukan dengan mengintegrasikan dua model, yaitu model inundasi empiris Hills dan Mader yang digunakan untuk memperkirakan peluruhan tinggi gelombang tsunami sepanjang jalur penjarannya dari garis pantai ke daratan, dan model SCHEMA (*Scenarios for Hazard-induced Emergencies Management*) yang digunakan untuk menentukan tinggi aman minimum bangunan evakuasi berdasarkan tinggi gelombang yang sampai di lokasi tersebut (Soviana et al., 2024).

Penelitian dilaksanakan di Masjid Raya Sumatera Barat yang berlokasi di Jalan Khatib Sulaiman, Kota Padang, pada koordinat $0^{\circ}55'27,5''$ LS dan $100^{\circ}21'45,4''$ BT dengan elevasi lahan sekitar 12 meter di atas permukaan laut. Bangunan ini dipilih karena telah ditetapkan sebagai tempat evakuasi vertikal dan memiliki struktur beton bertulang yang dirancang tahan gempa. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan *Google Earth Pro*, diperoleh jarak lurus antara garis pantai terdekat dan lokasi penelitian sekitar 1,44 km, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut.

Jalur inundasi sepanjang 1,44 km tersebut dibagi menjadi dua segmen berdasarkan perbedaan karakteristik permukaan yang dilalui air tsunami, yaitu segmen kawasan permukiman dengan jarak 219,63 m, koefisien Manning $n = 0,045$, dan kemiringan $S = 0,5^{\circ}$, serta segmen Jalan Jaksa Agung R. Soeprapto dengan jarak 1.088,62 m, koefisien Manning $n = 0,010$, dan kemiringan $S = 0,1^{\circ}$ (León et al., 2022). Data jarak dan karakteristik tutupan lahan pada kedua segmen diperoleh melalui interpretasi citra satelit *Google Earth*. Pemilihan jalur ini tidak mengikuti garis lurus dari pantai menuju lokasi masjid, melainkan mengikuti koridor jalan, mengingat kawasan tersebut didominasi

permukiman padat yang berpotensi menghambat aliran air tsunami.



Gambar 1. Jarak lurus antara garis pantai dengan Masjid Raya Syekh Ahmad Khatib Al-Minangkabawi Sumatera Barat



Gambar 2. Jalur inundasi tsunami: (a) kawasan permukiman dan (b) Jalan Jaksa Agung R. Soeprapto

Nilai koefisien Manning yang lebih besar pada segmen permukiman menggambarkan tingkat kekasaran permukaan yang lebih tinggi akibat kepadatan bangunan, sedangkan segmen jalan raya memiliki kekasaran yang lebih rendah karena permukaannya beraspal (Siti Nidia Isnin, 2016). Rekapitulasi data kedua segmen tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 1. Rekapitulasi data jalur inundasi pada kedua segmen

Kawasan Permukiman	Jalan Jaksa Agung R. Soeprapto
--------------------	--------------------------------

Jarak	219,63 m	1.088,62 m
Koefisien Manning	0,045	0,010
Kemiringan	0,5°	0,1°

Sebagai data tambahan untuk pengujian sensitivitas model, ditetapkan delapan skenario tinggi gelombang awal di pantai (H_{Si}), yaitu 0,68, 7, 8, 9, 10, 10,5, 10,7 dan 11 meter dengan interval tetap satu meter pada setiap skenario. Skenario tersebut bersifat asumsi karena belum tersedia data prediksi resmi dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mengenai potensi tinggi gelombang tsunami akibat aktivitas megathrust Mentawai di wilayah pesisir Kota Padang. Selain itu, digunakan juga data tinggi dasar lantai 2 masjid dari permukaan jalan, yaitu 7 meter, sebagai ambang batas pembandingan untuk menentukan status keamanan pada setiap skenario yang diuji (Fauzi, G., 2024).

Tahapan perhitungan dimulai dengan mengestimasi tinggi gelombang tsunami pada masing-masing segmen menggunakan persamaan inundasi Hills dan Mader berikut:

$$X_{max} = Hs^{1,33} n^{-2} k \cos S$$

dengan X_{max} adalah jarak maksimum penjalaran air tsunami (meter), Hs adalah tinggi gelombang tsunami di pantai (meter), n adalah koefisien Manning, k adalah konstanta empiris yang bernilai tetap 0,06, dan S adalah kemiringan permukaan lereng yang dilalui air (derajat). Oleh karena variabel yang ingin diperoleh dalam penelitian ini adalah tinggi gelombang di pantai (Hs), persamaan tersebut disusun ulang menjadi bentuk eksplisit terhadap Hs , kemudian diterapkan secara terpisah pada kedua segmen jalur inundasi sehingga diperoleh nilai Hs_1 untuk segmen permukiman dan Hs_2 untuk segmen jalan raya. Kedua nilai tersebut selanjutnya dijumlahkan untuk memperoleh estimasi tinggi gelombang minimum di pantai (Hs_{total}) yang diperlukan agar air tsunami dapat menjalar hingga mencapai lokasi penelitian, sebagaimana dirumuskan pada persamaan berikut.

$$Hs_{total} = Hs_1 + Hs_2$$

Nilai Hs_{total} tersebut kemudian digunakan untuk menentukan sisa tinggi gelombang yang benar-benar mencapai lokasi penelitian (HSM) pada setiap skenario tinggi gelombang di pantai (H_{Si}) yang diuji, melalui persamaan berikut.

$$HSM = H_{Si} - Hs_{total}$$

Nilai HSM tersebut selanjutnya disubstitusikan ke dalam model SCHEMA yang dikutip dari Soviana et al. (2024) untuk memperoleh tinggi aman minimum bangunan evakuasi (H_{safe}), sebagaimana dirumuskan pada persamaan berikut.

$$H_{safe} = (HSM \times 1,3) + 1 \text{ meter}$$

Pada persamaan tersebut, angka 1,3 merupakan faktor keamanan tambahan sebesar 30% yang ditambahkan untuk mengantisipasi ketidakpastian akibat fenomena hidrodinamika air, seperti efek wave run-up dan terjangan puing bangunan, sedangkan angka 1 meter merupakan ruang bebas minimum yang dibutuhkan seorang pengungsi agar dapat bertahan tanpa risiko sesak akibat berdesakan. Nilai H_{safe} pada setiap skenario kemudian dibandingkan dengan tinggi dasar lantai 2 masjid, yaitu 7 meter, untuk menentukan status keamanannya. Lokasi dinyatakan aman untuk evakuasi vertikal apabila nilai H_{safe} lebih kecil daripada 6 meter, dinyatakan waspada apabila nilai H_{safe} mendekati 7 meter, dan dinyatakan tidak aman apabila nilai H_{safe} sama dengan atau melebihi 7 meter.

Hasil dan Diskusi

Penerapan model inundasi Hills dan Mader pada segmen kawasan permukiman, dengan jarak inundasi 219,63 meter, koefisien Manning 0,045, dan kemiringan permukaan 0,5°, menghasilkan tinggi gelombang tsunami di pantai (Hs_1) sebesar 4,51 meter. Penerapan model yang sama pada segmen Jalan Jaksa Agung R. Soeprapto, dengan jarak inundasi 1.088,62 meter, koefisien Manning 0,010, dan kemiringan permukaan 0,1°, menghasilkan tinggi gelombang tsunami di pantai (Hs_2) sebesar 1,57 meter. Kedua nilai tersebut kemudian dijumlahkan sehingga diperoleh estimasi tinggi gelombang minimum total di garis pantai (Hs_{total}) sebesar 6,08 meter.

Nilai Hs_{total} tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung tinggi aman evakuasi (H_{safe}) pada delapan skenario tinggi gelombang di pantai (H_{Si}), yaitu 0,68, 7, 8, 9, 10, 10,5, 10,7 dan 11 meter. Hasil perhitungan pada delapan skenario tersebut disajikan pada tabel berikut.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai H_{safe} meningkat secara konsisten seiring bertambahnya tinggi gelombang tsunami di pantai (H_{Si}). Peningkatan ini terjadi pada setiap skenario yang diuji, tanpa terkecuali, yang mengindikasikan bahwa hubungan antara tinggi gelombang di pantai dan kebutuhan elevasi aman bersifat linear dan dapat diprediksi. Pada skenario 1, tinggi gelombang 6,08 m menghasilkan H_{safe} sebesar 1,000 m. Nilai ini terus naik pada skenario berikutnya, mencapai 2,196 m pada tinggi gelombang 7,00 m, 3,496 m pada tinggi gelombang 8,00 m, hingga

7,396 m pada tinggi gelombang 11,00 m di skenario 8. Selisih kenaikan antar skenario juga relatif konsisten, dengan rata-rata peningkatan H_{safe} sekitar 0,9 hingga 1,3 meter untuk setiap kenaikan tinggi gelombang sebesar 1

meter. Pola kenaikan ini sejalan dengan penelitian Nakai et al. (2022) yang menyatakan bahwa semakin tinggi gelombang tsunami, semakin besar pula elevasi yang dibutuhkan agar lokasi evakuasi tetap aman.

Tabel 2. Rekapitulasi data jalur inundasi pada kedua segmen

Skenario (<i>i</i>)	H_{S_i} (m)	H_{SM} (m)	H_{safe} (m)	Status pada lantai 2 (tinggi 6 m)
1	6,08	0	1	Aman
2	7,00	0,92	2,196	Aman
3	8,00	1,92	3,496	Aman
4	9,00	2,92	4,796	Aman
5	10,00	3,92	6,096	Waspada
6	10,5	4,42	6,746	Waspada
7	10,7	4,62	7,006	Tidak Aman
8	11,00	4,92	7,396	Tidak Aman

Pada skenario 1 sampai 4, lantai 2 dinyatakan berada dalam kategori aman. Tinggi gelombang pada rentang ini berkisar antara 6,08 m sampai 9,00 m, dengan nilai H_{safe} yang dihasilkan masing-masing sebesar 1,000 m, 2,196 m, 3,496 m, dan 4,796 m. Seluruh nilai tersebut masih berada di bawah elevasi lantai 2 yang tingginya 6 meter, dengan selisih yang cukup besar antara nilai H_{safe} dan elevasi lantai, khususnya pada skenario 1 dan 2. Selisih ini menunjukkan bahwa pada kondisi tinggi gelombang rendah hingga sedang, lantai 2 memiliki margin keamanan yang cukup memadai, sehingga genangan tsunami pada keempat skenario ini belum mencapai lantai evakuasi dan aktivitas evakuasi dapat dilakukan tanpa risiko genangan langsung.

Pada skenario 5 dan 6, kondisi lantai 2 berubah menjadi kategori waspada. Tinggi gelombang pada kedua skenario ini adalah 10,00 m dan 10,5 m, dengan nilai H_{safe} yang dihasilkan sebesar 6,096 m dan 6,746 m. Kedua nilai tersebut telah mendekati bahkan melampaui elevasi lantai 2 sebesar 6 meter, meskipun selisihnya masih relatif kecil, yaitu sekitar 0,096 m hingga 0,746 m di atas ambang batas. Kondisi ini menandakan adanya peningkatan risiko yang signifikan dibandingkan skenario sebelumnya, sehingga jemaah pada kondisi ini perlu segera berpindah ke lantai yang lebih tinggi untuk memastikan keselamatan, mengingat margin keamanan yang tersisa sudah sangat tipis.

Pada skenario 7 dan 8, lantai 2 dinyatakan tidak aman digunakan sebagai lokasi evakuasi. Tinggi gelombang pada kedua skenario ini adalah 10,7 m dan 11,00 m, dengan nilai H_{safe} yang dihasilkan sebesar 7,006 m dan 7,396 m. Kedua nilai tersebut jauh melampaui elevasi lantai 2, dengan selisih mencapai lebih dari 1 meter di atas ambang batas, sehingga genangan tsunami pada kondisi ini diperkirakan telah menggenangi lantai tersebut secara signifikan dan berpotensi membahayakan keselamatan jemaah yang masih berada di lokasi tersebut.

Secara keseluruhan, batas aman lantai 2 berada pada tinggi gelombang hingga 9,00 meter. Kondisi berubah menjadi waspada pada rentang tinggi gelombang 10,00 sampai 10,5 meter, dan berubah menjadi tidak aman pada tinggi gelombang 10,7 meter ke atas. Rentang transisi antara kategori aman dan tidak aman ini tergolong sempit, yaitu hanya sekitar 1,7 meter (dari 9,00 m hingga 10,7 m), yang menunjukkan bahwa perubahan kondisi keamanan lantai 2 dapat terjadi secara relatif cepat seiring kenaikan tinggi gelombang. Rentang inilah yang menjadi acuan batas keamanan lantai 2 sebagai lokasi evakuasi vertikal berdasarkan hasil perhitungan pada tabel.

Meskipun demikian, keamanan lantai 2 Masjid Raya Sumatera Barat sebagai lokasi evakuasi vertikal bersifat terbatas pada skenario tsunami berskala sedang. Skenario tinggi gelombang 6,08–11 meter yang digunakan dalam penelitian ini merupakan asumsi untuk analisis sensitivitas model, bukan angka prediksi resmi dari BMKG untuk wilayah pesisir Kota Padang. Dengan demikian, hasil yang diperoleh tidak dapat digeneralisasi sebagai jaminan keamanan mutlak untuk seluruh kemungkinan skenario tsunami yang dapat terjadi di wilayah tersebut. Hasil penelitian ini dimaknai sebagai kajian kerentanan pada skenario terburuk, bukan sebagai prediksi tunggal mengenai tinggi gelombang yang paling mungkin terjadi, sehingga penggunaannya lebih tepat diarahkan untuk keperluan perencanaan mitigasi dan bukan sebagai dasar tunggal pengambilan keputusan pada saat kejadian tsunami yang sesungguhnya.

Temuan ini mengarah pada perlunya prosedur evakuasi vertikal bertingkat, dengan lantai 2 difungsikan sebagai titik kumpul awal untuk skenario tsunami berskala sedang, sedangkan lantai yang lebih tinggi atau menara masjid disiapkan sebagai opsi lanjutan apabila tinggi gelombang yang terjadi melampaui kapasitas aman lantai 2. Pendekatan

bertingkat semacam ini memungkinkan proses evakuasi berlangsung secara lebih fleksibel, karena keputusan perpindahan ke lantai yang lebih tinggi dapat disesuaikan dengan informasi terkini mengenai kondisi tsunami yang sedang berlangsung. Hasil ini perlu dibaca dengan mempertimbangkan beberapa keterbatasan model, yaitu penyederhanaan jalur inundasi menjadi dua segmen lurus, asumsi nilai koefisien Manning dan kemiringan yang homogen pada setiap segmen, serta sifat empiris model Hills dan Mader maupun model SCHEMA yang masih perlu dikonfirmasi melalui pemodelan numerik yang lebih kompleks pada penelitian selanjutnya (León et al., 2022).

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengestimasi batas keamanan lantai 2 Masjid Raya Sumatera Barat sebagai *shelter* evakuasi vertikal terhadap ancaman tsunami menggunakan kombinasi model inundasi Hills dan Mader serta model SCHEMA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lantai 2 Masjid Raya Sumatera Barat masih dapat digunakan sebagai lokasi evakuasi yang aman apabila tinggi gelombang tsunami di garis pantai tidak melebihi 9 meter. Sebaliknya, apabila tinggi gelombang mencapai 10,7 meter atau lebih, lantai 2 tidak lagi mampu memberikan perlindungan yang memadai sehingga evakuasi perlu diarahkan ke bagian bangunan yang lebih tinggi.

Dalam kondisi nyata, setelah terjadi gempa bumi yang berpotensi memicu tsunami, masyarakat diharapkan segera melakukan evakuasi sesuai jalur yang telah ditetapkan serta mengikuti informasi resmi yang dikeluarkan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mengenai potensi dan estimasi tinggi gelombang tsunami. Informasi tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan apakah *shelter* yang dituju masih berada pada batas aman berdasarkan hasil kajian ini.

Hasil penelitian ini masih bersifat estimasi karena diperoleh dari model empiris dengan sejumlah asumsi, sehingga tingkat ketelitiannya dipengaruhi oleh ketersediaan data topografi, karakteristik permukaan, serta belum tersedianya prediksi tinggi gelombang tsunami yang spesifik untuk wilayah pesisir Kota Padang. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat dimanfaatkan sebagai salah satu bahan pendukung dalam penyusunan strategi mitigasi dan perencanaan evakuasi tsunami, bukan sebagai prediksi yang bersifat mutlak.

Berdasarkan hasil penelitian, pemerintah Kota Padang dan instansi terkait disarankan untuk memanfaatkan hasil estimasi ini sebagai salah satu acuan dalam mengevaluasi kapasitas *shelter* evakuasi vertikal dan menyusun prosedur evakuasi yang lebih efektif. Selain pemasangan rambu jalur evakuasi yang

telah tersedia, perlu dipertimbangkan penambahan informasi mengenai elevasi atau ketinggian setiap *shelter*, termasuk lantai yang direkomendasikan sebagai area aman. Informasi tersebut diharapkan dapat membantu masyarakat memilih lokasi evakuasi yang sesuai dengan kondisi tsunami yang diperkirakan saat terjadi bencana.

Selain itu, dalam perencanaan pembangunan *shelter* evakuasi vertikal di masa mendatang, Pemerintah Kota Padang disarankan untuk mempertimbangkan tinggi bangunan atau elevasi lantai evakuasi berdasarkan hasil kajian bahaya tsunami dan skenario tinggi gelombang yang mungkin terjadi. Dengan demikian, setiap *shelter* tidak hanya berfungsi sebagai tujuan evakuasi, tetapi juga memiliki kapasitas perlindungan yang jelas terhadap berbagai skenario tsunami. Penelitian lanjutan dengan pemodelan numerik yang lebih rinci serta didukung data topografi, batimetri, dan prediksi tsunami yang lebih akurat juga diperlukan untuk meningkatkan keandalan hasil estimasi pada masa mendatang.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, informasi, dan kontribusi selama proses pelaksanaan penelitian serta penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak-pihak yang telah menyediakan data dan sumber informasi yang mendukung penelitian mengenai pemodelan estimasi batas aman tsunami pada gedung *shelter* di Kota Padang. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan upaya mitigasi bencana tsunami.

Referensi

- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan G. (n.d.). Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416–2025.
- Bernard, E. N. (2023). Tsunami Preparedness: Is Zero Casualties Possible? *Pure and Applied Geophysics*, 180(5), 1573–1586. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02948-7>
- Best, J., Blois, G., Barros, J., & Christensen, K. (2013). The dynamics of bedform amalgamation: new insights from a very thin flume. *Marine and River Dune Dynamics – MARID IV*, (April), 29–34.
- Fauzi, G., M. A. (2024). Masjid Raya Syekh Ahmad Khatib Al-Minangkabawi Sumatera Barat. Yayasan Pusat Kebudayaan Minangkabau.
- Ismail, F. A., Sunaryati, J., & Sahputra, D. E. (2020). Optimum Structural Design of Self-Supported Shelter for Tsunami Evacuation in Padang City. *E3S Web of Conferences*, 156, 0–4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015605013>

- León, J., Gubler, A., & Ogueda, A. (2022). Modelling geographical and built-environment attributes as predictors of human vulnerability during tsunami evacuations: a multi-case-study and paths to improvement. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(9), 2857–2878. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2857-2022>
- McCloskey, J., Lange, D., Tilmann, F., Nalbant, S. S., Bell, A. F., Natawidjaja, D. H., & Rietbrock, A. (2010). The September 2009 Padang earthquake. *Nature Geoscience*, 3(2), 70–71. <https://doi.org/10.1038/ngeo753>
- Mls, K., Kořínek, M., Štekerová, K., Tučník, P., Bureš, V., Čech, P., Husáková, M., Mikulecký, P., Nacházel, T., Ponce, D., Zanker, M., Babič, F., & Triantafyllou, I. (2023). Agent-based models of human response to natural hazards: systematic review of tsunami evacuation. *Natural Hazards*, 115(3), 1887–1908. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05643-x>
- Mulia, I. E., Ueda, N., Miyoshi, T., Gusman, A. R., & Satake, K. (2022). Machine learning-based tsunami inundation prediction derived from offshore observations. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33253-5>
- Núñez, J., Catalán, P. A., Valle, C., Zamora, N., & Valderrama, A. (2022). Discriminating the occurrence of inundation in tsunami early warning with one-dimensional convolutional neural networks. *Scientific Reports*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13788-9>
- Rashidi, A., Shomali, Z. H., Dutykh, D., & Keshavarz Farajkhah, N. (2020). Tsunami hazard assessment in the Makran subduction zone. *Natural Hazards*, 100(2), 861–875. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03848-1>
- Razi, P., Sumantyo, J. T. S., Chua, M. Y., Ganefri, Perissin, D., & Tadono, T. (2023). Monitoring of tectonic deformation in the seismic gap of the Mentawai Islands using ALOS-1 and ALOS-2. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30(December 2022), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100973>
- Siti Nidia Isnin. (2016). Analisis Tingkat Bahaya Tsunami Di Desa Ulee Lheue Kecamatan Meuraxa Kota Banda Aceh. *Lentera*, 16(19), 8–16.
- Soviana, W., Zein, K. C. S., Abidin, Z., & Ramadhan, M. (2024). Evaluation of Public Buildings as Tsunami Evacuation Vertical Based on Tsunami History. *Semesta Teknik*, 27(2), 182–194. <https://doi.org/10.18196/st.v27i2.19016>
- Susanto, A., & Rudianto, B. (2020). Kestabilan Titik Keseimbangan Model Dua Pemangsa Satu Mangsa Dengan Kriteria Routh-Hurwitz. *MAP Journal*, 75–87.
- Wendra, B., Susanto, A., Nurman, N., & Syaputra, S. E. (2024). INTELLIGENT SYSTEMS AND APPLICATIONS IN ENGINEERING Farmers and Price Instability Risks : An Adaptation of the Black- Scholes Model in the Agricultural Insurance Premium Mathematics Formulation. *12(3)*, 2689–2697.