



Pemodelan risiko tsunami menggunakan metode Berryman: Studi Kasus Kabupaten Kepulauan Mentawai

Said Willya Putra¹, Aditya Saputra²

^{1,2} *Fakultas Geografi Universitas Muhammadiyah Surakarta*
e-mail: E100212071@student.ums.ac.id

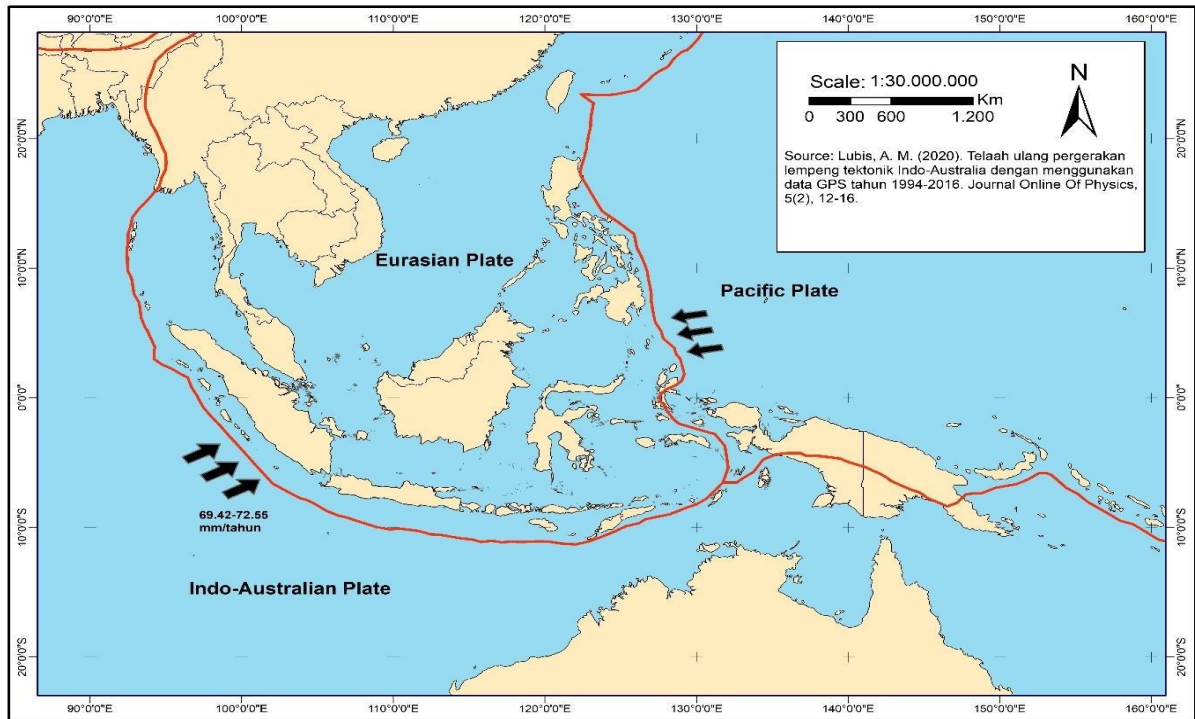
ABSTRAK. Kepulauan Mentawai adalah sebuah kepulauan yang terletak di Provinsi Sumatera Barat yang merupakan daerah yang rawan bencana tsunami yang disebabkan oleh gempa megathrust di Indonesia. Hal ini dikarenakan Kepulauan Mentawai berbatasan langsung dengan laut lepas Samudra Hindia dan terletak di segmen lempeng tengah Sumatera yang memiliki gempa bumi berkekuatan maksimal 8,5 – 8,6 MW. Hasil peta bencana wilayah ini diharapkan dapat memberikan informasi dasar mengenai risiko tsunami tertinggi di Kepulauan Mentawai, karena penelitian ini bertujuan untuk Memodelkan daerah yang berpotensi terendam tsunami menggunakan metode Berryman. Pembuatan peta kerentanan tsunami ini menggunakan perhitungan H-Loss yang dikembangkan oleh Berryman pada tahun 2006. Dalam konsep perhitungan H-Loss ini, kehilangan ketinggian tsunami dihitung untuk setiap jarak inudasi 1 meter (genangan gelombang) berdasarkan faktor kekasaran permukaan dan kemiringan.

Kata kunci: Tsunami, Metode Berryman, Megathurst

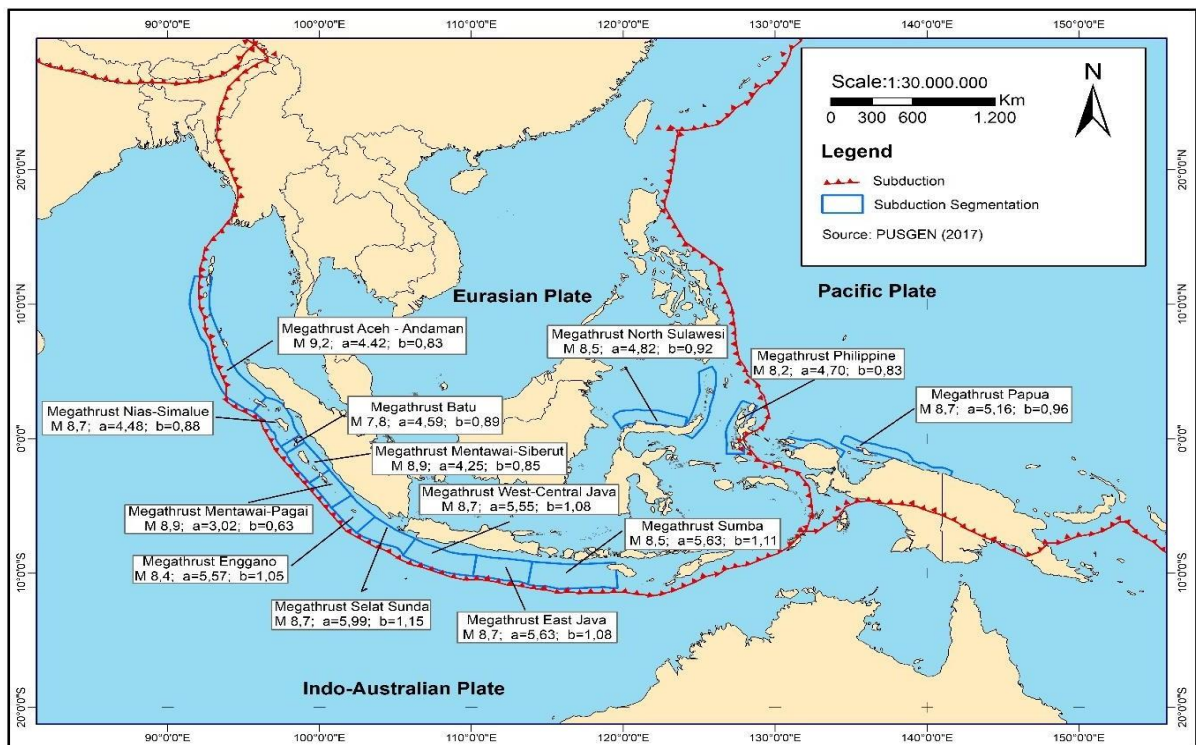
PENDAHULUAN

Tsunami adalah bencana alam yang menjadi momok bagi masyarakat yang tinggal di daerah pesisir. Meskipun tsunami jarang terjadi, begitu terjadi mereka menghancurkan segala sesuatu yang menghalangi jalurnya, sehingga penting untuk memperhitungkan dampak bencana alam ini terhadap masyarakat (Subardjo, 2016; Saputra, 2019; Imamura, 2019). Tsunami berasal dari bahasa Jepang, Tsu yang berarti gelombang dan Nami yang berarti pelabuhan, oleh karena itu tsunami dapat diartikan sebagai bencana alam dimana air laut bergelombang di pelabuhan atau wilayah daratan. Gelombang air laut di laut lepas ini memiliki ketinggian yang lebih rendah daripada di area pelabuhan, hal ini disebabkan oleh penyempitan ruang gelombang air laut yang telah tiba di pelabuhan atau darat (Murata, 2018; Saito, 2019). Tsunami di Indonesia umumnya disebabkan oleh gempa bawah laut, namun aktivitas vulkanik bawah laut dan tanah longsor yang terjadi di laut juga dapat memicu tsunami (Nur, 2010, Prasetyo, 2019).

Indonesia merupakan negara yang berada pada titik pertemuan 3 lempeng besar di dunia (Gambar 1), yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik dan lempeng Indo-Australia. Hal ini menyebabkan Indonesia menjadi daerah yang rawan gempa, dan jika gempa bumi terjadi di bawah laut akan memicu gelombang tsunami (Horspool, 2014; Marfai, 2019; Syifa, 2023). Gempa bumi sendiri merupakan getaran yang disebabkan oleh pergerakan lempeng dunia, dan berdasarkan data dari BMKG terdapat beberapa Celah Seismik yang membentang dari sepanjang pulau Sumatera hingga pulau-pulau di Nusa Tenggara Timur (Gambar 2) (Nugroho, 2022). Celah Seismic adalah area di sepanjang lempeng dan belum pernah terjadi gempa bumi selama lebih dari 30 tahun, sehingga diperkirakan akan terjadi penguncian pergeseran lempeng dan potensi gempa bumi besar (Megathrust) bersifat Tsunamigenic (Adventari, 2021, Gusman, 2018).



Gambar 1. Peta Perpindahan 3 Lempeng di Indonesia
Sumber: Lubis, 2020

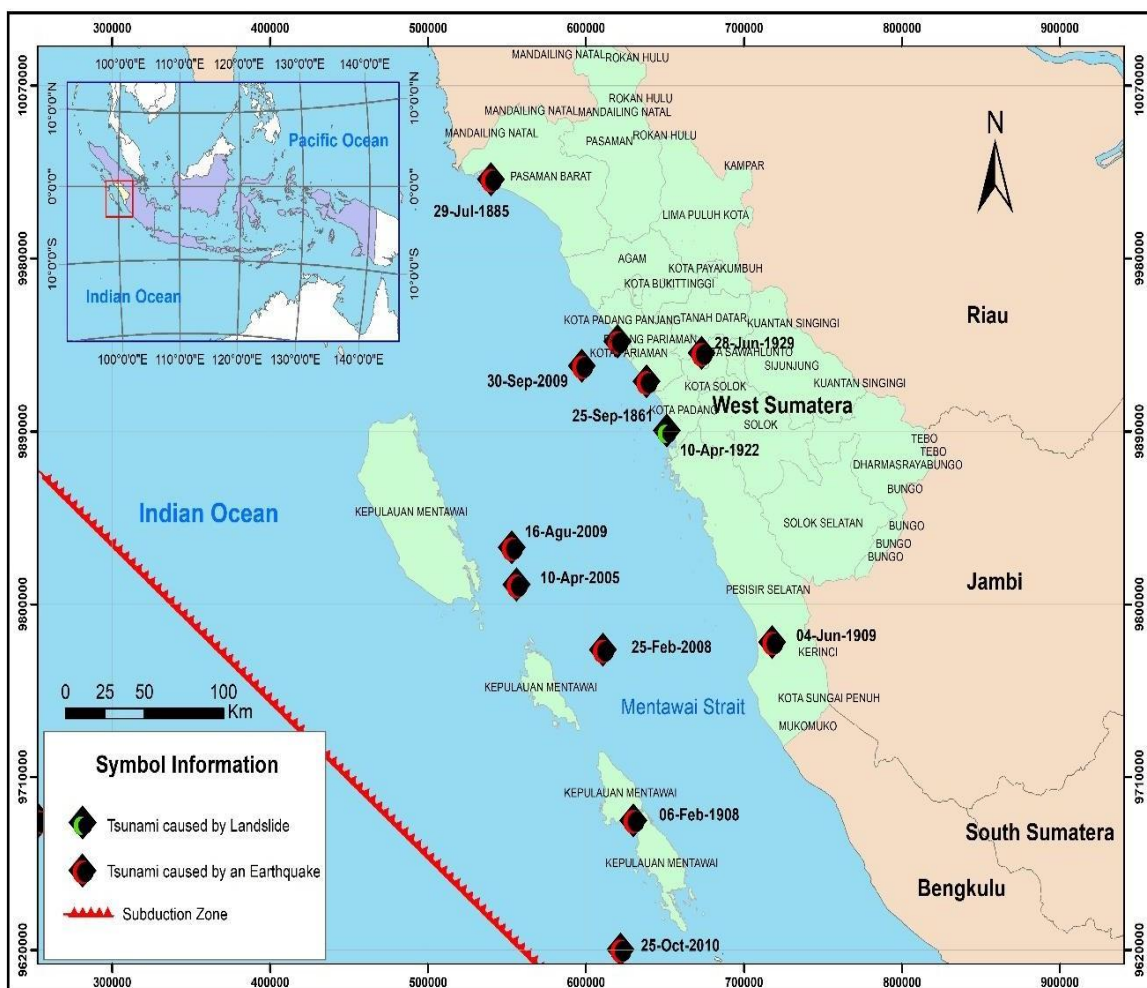


Gambar 2. Peta Kesenjangan Seismik di Indonesia
Sumber: PUSGEN, 2017



Kepulauan Mentawai adalah sebuah kepulauan yang terletak di Provinsi Sumatera Barat yang merupakan daerah yang rawan bencana tsunami yang disebabkan oleh gempa megathrust di Indonesia. Hal ini dikarenakan Kepulauan Mentawai berbatasan langsung dengan laut lepas Samudera Hindia dan terletak di segmen lempeng tengah Sumatera yang memiliki magnitudo maksimal 8,5 –

8,6 MW (Saputra, 2018; Yue, 2014; Jujur, 2015; Razi, 2023), selain itu telah terjadi beberapa peristiwa tsunami di Provinsi Sumatera Barat dalam beberapa tahun terakhir, diantaranya pada tanggal 30 September 2009 terjadi gempa bumi Mw7,5 di 57 km barat daya Kota Pariaman pada kedalaman 81 km, menyebabkan tsunami setinggi 27 cm dan menyebabkan 1117 korban jiwa akibat gempa, sementara yang terakhir pada tanggal 25 Oktober 2010 gempa bumi mengguncang Kepulauan Mentawai pada kedalaman 20,6 km, gempa ini menyebabkan tsunami di beberapa pulau di Nusantara. Mentawai, termasuk Kecamatan Pagai Utara, mengalami tsunami setinggi 2,4-8m, dan di Kecamatan Pagai Selatan terjadi tsunami setinggi 2,5-12,4m, sedangkan di Pulau Sipora ketinggian tsunami hanya <1 – 3,5m. Gempa yang terjadi di sepanjang pesisir Pagai Utara, Pagai Selatan dan Pulau Sipora menyebabkan 448 orang meninggal dunia dan merusak rumah warga dan fasilitas umum di sepanjang pantai (Yudhicara, 2023; Muin, 2018).



Gambar 3. Peta Sebaran Tsunami Sumatera Barat
Sumber: Yudhicara, 2023



Gambar 4. (A) Efek tsunami di Desa Bosua, 25 Oktober 2010. (B & C) Efek tsunami di Pulau Sibigou. (D) Jejak tsunami Mentawai di Pulau Kasi. (E) Jejak tsunami Mentawai di Pulau Bitojat

Sumber: Yudhicara, 2023

Berikut ini adalah jejak sejarah tsunami yang melanda Kepulauan Mentawai pada 25 Oktober 2010. Sekitar pukul 21.00 pada tanggal 25 Oktober 2010 terjadi gempa dangkal yang mengguncang Kepulauan Mentawai (Gambar 3) menyebabkan tsunami yang melanda beberapa pulau di Kepulauan Mentawai (A). Beberapa tanaman di Pulau Sibigou sedang berbaring, ini menandakan arah arus tsunami yang melanda pada tahun 2010 (B&C) selain itu, ada juga bebatuan yang terdorong dan terbalik oleh ombak di Pulau Kasi (D).

Banyak peneliti telah melakukan pemodelan tsunami di pantai pesisir, termasuk Farhan. (2017) yang mengkaji risiko bencana tsunami dari berbagai variabel seperti sosial, ekonomi, fisik, lingkungan, untuk menemukan beberapa titik desa yang memiliki kerentanan tsunami rendah hingga tinggi di Kabupaten Aceh Singkil, Marfai. (2019) yang memodelkan bencana tsunami dengan lima skenario, yaitu 4m, 6m, 8m, 10m, dan 12m menggunakan data bangunan, topografi dan DEM yang diperoleh menggunakan fotografi udara atau Unmanned Aerial Vehicle (UAV) di Pantai Drini, Gunung Kidul, Yogyakarta, Jujur. (2015) yang memodelkan tsunami berdasarkan nilai indeks kerentanan relatif bangunan di Kecamatan Ulak Karang dan Pasir Jambak, Kota Padang dan dampak gelombang tsunami hingga 200m dari garis pantai mengakibatkan bangunan di Kecamatan Ulak Karang lebih rentan terhadap tsunami Selain itu, ada beberapa peneliti yang telah meneliti bahaya tsunami di Kepulauan Mentawai, salah satunya



adalah, Muin. (2017)) yang meneliti bahaya tsunami menggunakan aplikasi MuTsunami untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami dari titik gempa ke daratan.

Selain itu, ada penelitian dari, Putra. (2016) yang meneliti lokasi evakuasi tsunami. di Kabupaten Pagai Utara sedangkan dalam penelitian ini peneliti menggunakan metode perhitungan H-loss dari metode Berryman untuk pemodelan tsunami di Kepulauan Mentawai, hal ini dikarenakan Kepulauan Mentawai memiliki potensi kejadian tsunami yang sangat tinggi, karena Kepulauan Mentawai berada di celah seismik lempeng tengah Sumatera sehingga memiliki risiko gempa bumi sebesar 8,5-8,6 MW, misalnya, pada tahun 2010 terjadi tsunami dengan ketinggian hingga 2,5-12,4m dan menyebabkan 448 korban jiwa di Kepulauan Mentawai (Paramita, 2021). Hasil peta bencana wilayah ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi daerah dengan risiko tsunami tertinggi di Kepulauan Mentawai, karena penelitian ini bertujuan untuk Memodelkan daerah yang berpotensi terendam tsunami menggunakan metode Berryman.

METODE

Pembuatan peta kerentanan tsunami ini menggunakan perhitungan H-Loss yang dikembangkan oleh Berryman pada tahun 2006. Dalam konsep perhitungan H-Loss ini, kehilangan ketinggian tsunami dihitung untuk setiap 1 meter jarak inudasi (genangan gelombang) berdasarkan faktor kekasaran permukaan dan kemiringan kemiringan (Zahro, 2017).

Tabel 2. Koefisien Kekasaran Permukaan untuk setiap jenis permukaan tanah

Tidak	Jenis Permukaan Tanah	Koefisien Kekasaran Permukaan
1	Badan air	0,007
2	Semak	0,040
3	Hutan	0,070
4	Perkebunan	0,035
5	Lapangan Terbuka	0,018
6	Lahan pertanian	0,025
7	Membangun	0,045
8	Bakau	0,025
9	Kolam ikan	0,010

Sumber: Berryman, 2006

Tabel 2 adalah tabel jenis penggunaan lahan beserta koefisien kekasaran permukaan yang digunakan sebagai salah satu variabel untuk menghitung persamaan pemodelan dampak tsunami menggunakan metode H-loss yang dikembangkan oleh Berryman, 2006.

Mengacu pada penelitian Muhammad tahun 2016 tentang bahaya tsunami di megathrust Sumatera dengan skenario gempa bumi 8,5 – 9,0, ketinggian tsunami maksimum di pulau Mentawai adalah 20 meter. M_w

$$\text{Benang} \frac{2}{H1/3} \equiv (167^n) + 5 \text{ dosa} S \dots \dots \dots (1)$$



Di mana "Hloss" adalah hilangnya ketinggian tsunami setiap jarak inudasi 1m, "n" adalah koefisien kekasaran permukaan, "H0" adalah ketinggian gelombang maksimum, "S" adalah kemiringan lereng pada titik itu.

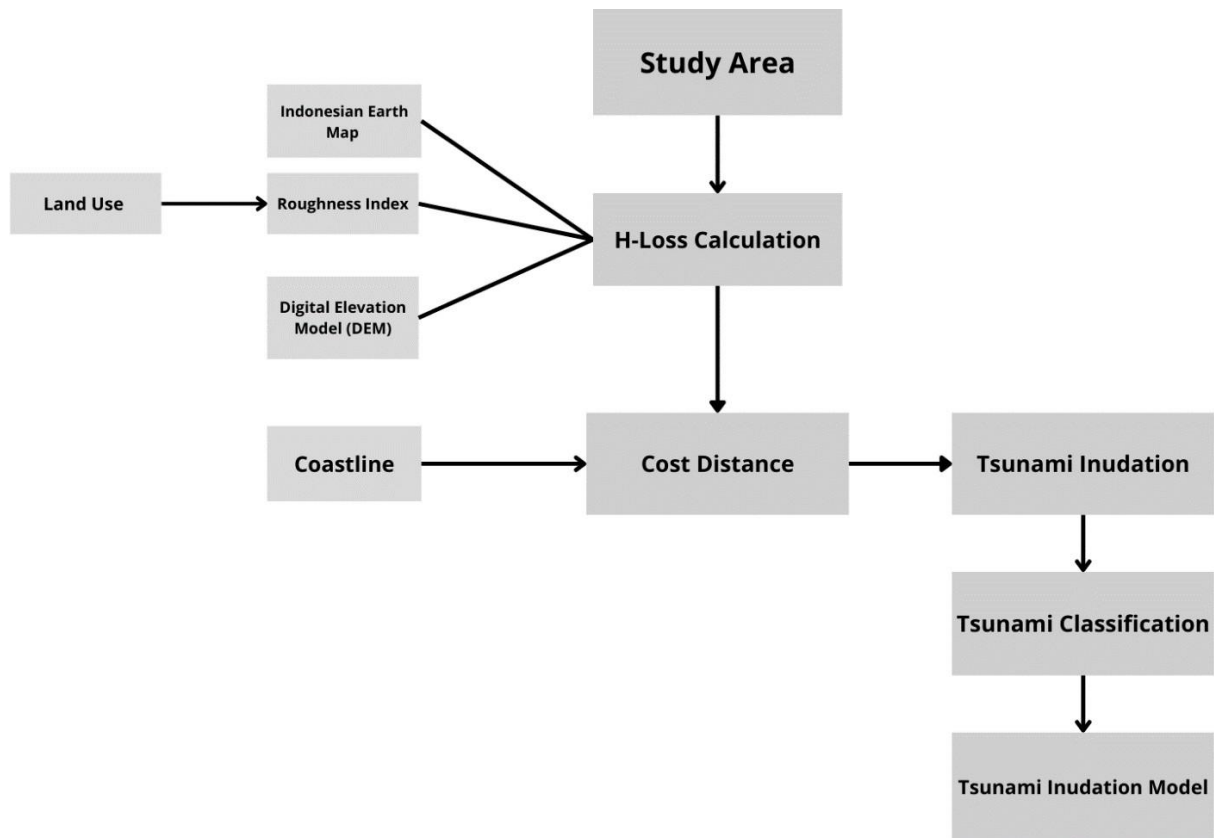
Data yang Digunakan

Semua data dalam pemodelan ini menggunakan data spasial berupa peta tematik, yaitu Digital Elevation Model (DEM), Land Use (PL), Indonesian Earth Map (RBI), dan Coastline, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data yang digunakan dalam penelitian

Tidak	Data	Sisik	Sumber	Maksud
1	<i>Model Elevasi Digital (DEM)</i>	1:2.000.000	Badan Informasi Geografis (BESAR)	Informasi Ketinggian Kabupaten Kepulauan Mentawai
2	Penggunaan Lahan Kabupaten Kepulauan Mentawai	1:2.000.000	Indonesia Geospasial	Permukaan Referensi koefisien kekasaran
3	Peta Bumi Indonesia	1:2.000.000	Badan Informasi Geografis (BESAR)	Keterbatasan area penelitian
4	Garis Pantai Indonesia	1:2.000.000	Badan Informasi Geografis (BESAR)	Referensi dasar untuk menghitung jarak inudasi tsunami

Tabel 3 adalah tabel data yang digunakan, data yang digunakan adalah Peta Digital Elevation Model (DEM) yang memiliki skala 1:2.000.000. Data tersebut diperoleh dari website Badan Informasi Geografis (BIG) dan digunakan untuk Informasi Elevasi di Kabupaten Kepulauan Mentawai sebagai salah satu variabel perhitungan metode H-Loss, setelah itu Peta Penggunaan Lahan (PL) Kabupaten Kepulauan Mentawai yang memiliki skala data 1:2.000.000 diperoleh dari website Indonesia Geospasial dan digunakan sebagai acuan Koefisien Kekasaran Permukaan sebagai salah satu variabel perhitungan H-Loss, setelah itu Peta Garis Pantai Indonesia digunakan pada skala 1:2.000.000 sebagai acuan lokasi. Data tersebut diperoleh dari Badan Informasi Geografis (BIG) sebagai acuan dasar untuk menghitung jarak genangan tsunami menggunakan metode H-Loss, setelah itu skala akhir Peta Bumi Indonesia yang digunakan adalah data 1:2.000.000 yang diperoleh dari situs web Badan Informasi Geografis (BIG) dan digunakan sebagai batas wilayah penelitian (Kabupaten Kepulauan Mentawai).

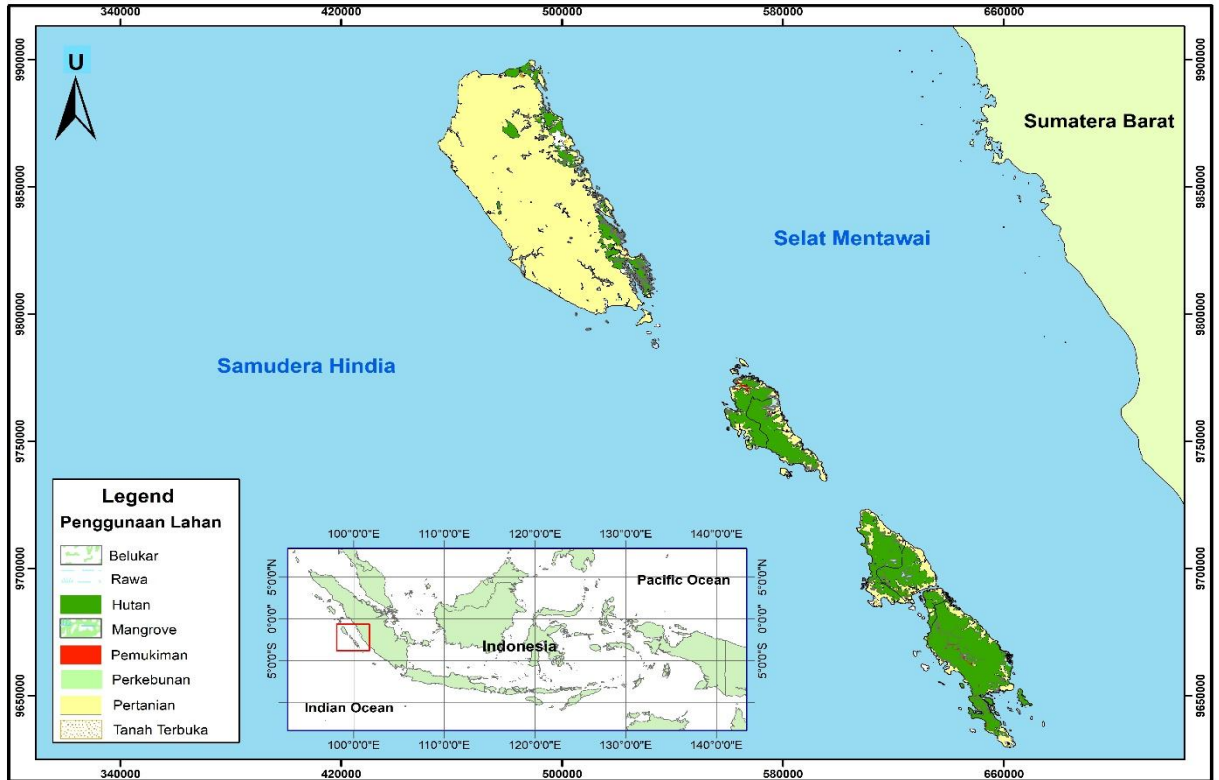


Gambar 8. Diagram Alir Pemrosesan Data

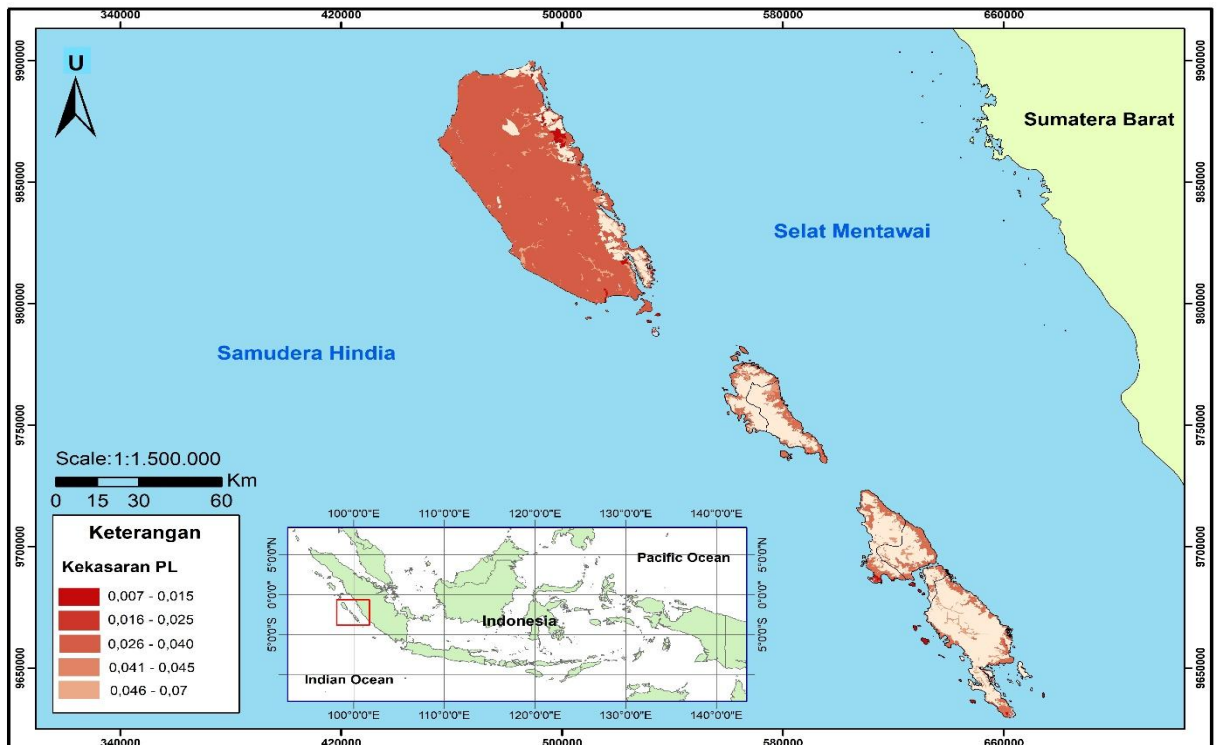
Dalam Pemodelan Tsunami menggunakan metode H-Loss dari Berryman 2006, terdapat beberapa langkah dalam mengolah data, terlebih dahulu overlay data peta tematik yang diperoleh sebelumnya seperti Digital Elevation Model (DEM), Indonesian Landform (RBI), Land Use (PL), untuk menghitung perhitungan H-Loss. Untuk detail selengkapnya, lihat Gambar 8..

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kabupaten Kepulauan Mentawai merupakan kabupaten yang berbatasan langsung dengan lempeng Mentawai dan berpotensi terjadi gempa megathrust serta risiko tsunami setinggi 20 meter (Muhammad, 2016). Kepulauan Mentawai terdiri dari 3 pulau besar, yaitu Pulau Siberut, Pulau Sipora, dan Pulau Pagai, dengan luas wilayah 6.033,76 km², terdiri dari 10 kecamatan dan jumlah penduduk 96.570 jiwa. Kepulauan Mentawai didominasi penggunaan lahan sebagai Hutan dan Pertanian (gambar 9) yang akan digunakan untuk bahan koefisien kekasaran penggunaan lahan di Kabupaten Kepulauan Mentawai (gambar 10).



Gambar 9. Penggunaan Lahan Kabupaten Kepulauan Mentawai



Gambar 10. Kekasaran Penggunaan Lahan



Klasifikasi Indeks Bahaya

Setelah melakukan pemodelan inudasi tsunami menggunakan metode H-Loss, lalu mengklasifikasikan ketinggian gelombang menggunakan *Fuzzy Membership*, dimana *tool* ini berada di ArcMap yang akan mengklasifikasikan indeks bahaya dengan nilai 0-1.

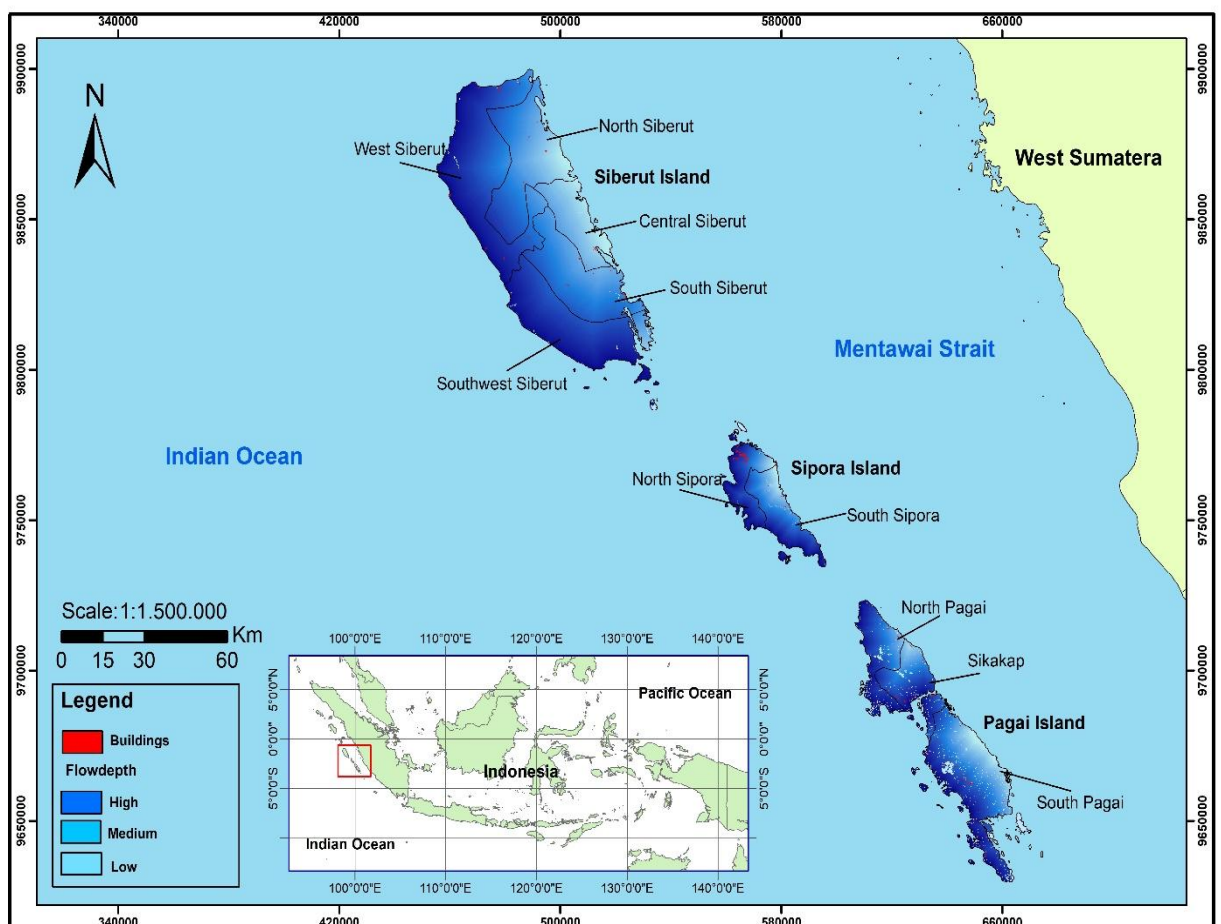
Tabel 4. Kelas indeks bahaya

Kelas Bahaya	Indeks Bahaya
Rendah	$H \leq 0,333$
Sedang	$0,333 < H \leq 0,666$
Tinggi	$H > 0,666$

Sumber: Nugroho et all., 2018

Inudasi Tsunami

Setelah melakukan pemodelan menggunakan metode H-Loss hingga klasifikasi indeks bahaya, di dapatkan hasil sebagai berikut (gambar 11) dimana warna biru tua menyatakan daerah yang memiliki kelas bahaya yang tinggi hingga warna biru muda menunjukkan kelas bahaya rendah.



Gambar 11. Model Inudasi Tsunami



Pembahasan

Pemodelan tsunami ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ario Muhammad pada tahun 2016 tentang bahaya tsunami di zona Sumatra Megathrust yang menggunakan model gempa 9,0 skala richter dan tinggi maksimum 20 meter. Dapat dilihat pada Gambar 9 bahwa genangan tsunami di Kepulauan Mentawai telah meliputi seluruh bagian Kepulauan Mentawai dengan Kecamatan Siberut Barat Daya, Siberut Barat, Sipora Utara, Sipora Selatan, Pagai Utara, dan Sikakap sebagai daerah yang terdampak paling besar. Bangunan pada peta ditunjukkan dengan warna merah yang terdiri dari area pemukiman dan bangunan lainnya. Dapat dilihat pada peta bahwa bangunan di kabupaten Mentawai tersebar merata di wilayah pesisir. Berdasarkan peta tersebut, dari warna biru tua hingga biru muda, menunjukkan kerentanan tinggi hingga rendah di Kepulauan Mentawai.

Secara geologis Kabupaten Kepulauan Mentawai berada pada perbatasan lempeng indo-australia dan eurasia yang memiliki kerentanan terhadap bencana gempa bumi hingga tsunami selain itu Kepulauan Mentawai berada di atas *Seismic Gap* Megathrust Mentawai-Pagai dan Megathrust Mentawai-Siberut, hal ini dapat dilihat pada jejak historis penelitian dari Kenji Satake et all. (2012) yang dimana penelitian ini tentang tsunami yang terjadi di Kepulauan Pagai tahun 2010. Selain itu berdasarkan penelitian oleh AO Konca et all. (2008) Megathrust Mentawai memiliki potensi besar terhadap gempa Megathrust yang besar yang disebabkan *Seismic Gap* Megathrust Mentawai terjadi penguncian pada celah lempeng ini. Penelitian dari Santius, S.H. (2015) menggunakan pemodelan luas gelombang tsunami dari berryman 2006 yang dimana model tsunami ini cocok sebagai langkah awal dari pemodelan tsunami di sebuah wilayah serta dapat digunakan dalam berbagai skala kejadian baik akibat longsor, vulkanik maupun gempa bumi yang dimana relevan dengan kondisi di Kepulauan Mentawai.

Melalui pemodelan ini diharapkan berguna bagi pemerintah Kabupaten Kepulauan Mentawai sebagai bahan mitigasi bencana di Kabupaten tersebut. Berdasarkan penelitian dari Ulinnuha, H et all (2019) menerangkan pentingnya pemantauan secara berkala pada aktivitas tektonik segmen Mentawai, karena masih terdapat pergerakan aktivitas lempeng setelah terjadi gempa bumi pada segmen tersebut. Oleh karena itu, sistem peringatan dini dan perencanaan ruang berbasis risiko perlu diterapkan oleh pemerintah Kabupaten Kepulauan Mentawai sehingga dapat meminimalisir dampak yang akan ditimbulkan dari tsunami yang akan terjadi di Kepulauan Mentawai kelak.

KESIMPULAN

Berdasarkan model induksi tsunami di Kepulauan Mentawai dengan ketinggian gelombang tsunami maksimal 20 meter, diketahui bahwa seluruh pulau di Kepulauan Mentawai terdampak tsunami, sehingga dapat disimpulkan bahwa 96.570 warga di Kepulauan Mentawai diharuskan mengungsi ke salah satu kabupaten di Sumatera Barat. Penelitian ini penting untuk digunakan untuk menyelidiki risiko tsunami dan sebagai bahan mitigasi tsunami di Kepulauan Mentawai. Namun, metode ini memiliki beberapa kekurangan yang perlu ditinjau ulang, yaitu asumsi yang digunakan sebagai variabel untuk menghitung indikasi terlalu sederhana dan akurasi serta keterbatasan datanya sangat buruk, oleh karena itu meskipun metode ini cocok sebagai perhitungan awal dan cepat, diperlukan penelitian yang menggunakan metode yang lebih kompleks untuk hasil yang lebih akurat.



REFERENSI

- Adventari, T., dkk. (2021). Penjalaran Tsunami menuju ke outlet Arlindo berdasarkan skenario gempa megathrust Selatan Jawa: Tsunami propagation towards Arlindo outlet based on South South South South Megathrust earthquake. *Jurnal Chart Datum*, 7(1), 1-10.
- Berryman, K. 2006. Tinjauan Bahaya dan Risiko Tsunami di Selandia Baru. Institut Ilmu Geologi dan Nuklir. Hutt Bawah. Selandia Baru
- Indonesia BESAR. 2024. Diakses pada 10 September 2024, dari <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh>
- BMKG. (2024). *Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416-2023*. Jakarta: Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika.
- Farhan, A., & Akhyar, H. (2017). Analisis peta bencana tsunami berdasarkan sistem informasi geografis (SIG): Aceh Singkil-Indonesia. Dalam *seri konferensi IOP: ilmu bumi dan lingkungan* (Vol. 56, No. 1, hlm. 012002). Penerbitan IOP.
- Gusman, AR (2018). Perpindahan permukaan laut optimal dan distribusi slip sesar dari gempa bumi Tehuantepec 2017 (Mw 8.2) di Meksiko diperkirakan dari bentuk gelombang tsunami. *Surat Penelitian Geofisika*, 646-653.
- Honesti, L., dkk. (2015). Pemodelan Potensi Risiko Kerentanan Bangunan terhadap Bahaya Tsunami di Kecamatan Ulak Karang dan Pasir Jambak, Padang. *Jurnal Teknologi*, 72(4).
- Harig, S., dkk. (2020). Database Skenario Tsunami Sistem Peringatan Dini Tsunami Indonesia (InaTEWS): evolusi cakupan dan pendekatan pemodelan yang terlibat. *Geofisika Murni dan Terapan*, 177, 1379-1401.
- Horspool, N., dkk. (2014). Penilaian bahaya tsunami probabilistik untuk Indonesia. *Bahaya Alam dan Ilmu Sistem*, 3105-3122
- Imamura, F., dkk. (2019). Kejadian kerusakan tsunami serius baru-baru ini dan tantangan pengurangan risiko bencana tsunami di masa depan. *Kemajuan dalam Ilmu Bencana*, 1, 100009.
- Jokowinarno, D. (2011). Mitigasi bencana tsunami di wilayah pesisir lampung. *Jurnal Rekayasa*, 15(1), 13-20.
- Lubis, AM (2020). Telaah ulang pergerakan lempeng tektonik Indo-Australia dengan menggunakan data GPS tahun 1994-2016. *Jurnal Online Fisika*, 5(2), 12-16.
- Marfai, MA, dkk. (2019). Pemetaan bahaya tsunami dan estimasi kerugian menggunakan sistem informasi geografis di Pantai Drini, Wilayah Pesisir Gunungkidul, Yogyakarta, Indonesia. Dalam *Web Konferensi E3S* (Vol. 76, hlm. 03010). Ilmu EDP.
- Martinawati, R. (2018). *Pemodelan Tsunami Sumba 19 Agustus 1977 Menggunakan Software Toast Dengan Simulasi Easywave Dan Tsunami* (Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya).
- Muhammad, A., dkk. (2016). Analisis bahaya tsunami gempa bumi sumatera megathrust masa depan di Padang, Indonesia menggunakan simulasi tsunami stokastik. *Perbatasan dalam Lingkungan Binaan*, 2, 33.
- Muin, M., dkk. (2018). Penerapan MuTsunami di Pulau Mentawai, Indonesia. Dalam *MATEC Web of Conferences* (Vol. 147, hlm. 05005). Ilmu EDP.
- Murata, S., dkk. (2018). *Tsunami: untuk bertahan hidup dari tsunami*.
- Nugroho, PC, dkk. 2018. Modul Teknis Penyusunan Kajian Risiko Bencana Tsunami. Direktorat Pengurangan Risiko Bencana Badan Nasional Penanggulangan Bencana.



- Nugroho, WO, dkk. (2022). Evolusi kode bangunan seismik dan beton Indonesia: Dari masa lalu hingga sekarang. Dalam *Struktur* (Vol. 41, hlm. 1092-1108). Elsevier.
- Nur, A. M. (2010). Gempa bumi, tsunami dan mitigasinya. *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*, 7(1).
- Palupi, I. R., dkk. (2018). Pemodelan Tsunami Sederhana dengan Menggunakan Persamaan Differensial Parsial. *Jurnal Fisika Terapan Indonesia*, 8(1), 26.
- Parsial, MSP DD (2018). Perbandingan Finite Difference Method dan Finite Element Method dalam. *PRISMA*, 1, 886.
- Prasetyo, K. (2019). Model adaptasi setelah bahaya tsunami 1994 di South Beach Jawa Timur. Dalam *Seri Konferensi IOP: Ilmu Bumi dan Lingkungan* (Vol. 314, No. 1, hlm. 012025). Penerbitan IOP.
- PUSGEN. (2017). *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Jakarta: Badan Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Putra, A., & Mutmainah, H. (2016). Pemetaan Tempat Pengungsian Sementara (TES) dan Rute Evakuasi Tsunami di Pulau Pagai Utara, Kabupaten Kepulauan Mentawai-Indonesia. Dalam *Seri Konferensi IOP: Ilmu Bumi dan Lingkungan* (Vol. 47, No. 1, hlm. 012020). Penerbitan IOP.
- Ramadhan, H. Y. (2023). *Pemodelan Tingkat Risiko Bencana Tsunami Pada Permukiman Di Kabupaten Lombok Tengah Menggunakan Sistem Informasi Geografis* (Doctoral dissertation, ITN MALANG).
- Razi, P., dkk. (2023). Pemantauan deformasi tektonik pada celah seismik Kepulauan Mentawai menggunakan ALOS-1 dan ALOS-2. *Aplikasi Penginderaan Jauh: Masyarakat dan Lingkungan*, 30, 100973.
- Saputra, A. (2018). Memahami multi-bahaya dan risiko gempa menggunakan penginderaan jauh dan sistem informasi geografis di Pleret, Yogyakarta, Indonesia. Tesis, Departemen Geografi. Christchurch: Universitas Canterbury.
- Saputra, A., dkk. (2019). Model genangan Tsunami berbasis skenario di Kota Cilacap, Jawa Tengah Selatan, Indonesia. *Kemajuan Bencana*, 10-22.
- Saito, T. (2019). *Generasi dan penyebaran tsunami*. Tokyo: Springer Jepang.
- Setiowati, A. R., dkk. (2023). Analisis Tingkat Risiko Tsunami Kota Ambon Dengan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP). *Jurnal Geodesi Undip*, 12(1), 30-39.
- Subardjo, P., & Ario, R. (2016). Uji kerawanan terhadap tsunami dengan sistem informasi geografis (SIG) di pesisir Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul, Yogyakarta. *Jurnal Kelautan Tropis*, 18(2).
- Syifa, SR (2023). Parameter Variasi Model Tsunami Samudera Hindia 2004 untuk Pemetaan Wilayah Rawan Tsunami di Provinsi Aceh Bagian Utara. *Jurnal Geosains Indonesia*, 167-179.
- Widiyantoro, S., dkk. (2020). Implikasi gempa bumi megathrust dan tsunami dari celah seismik selatan Jawa Indonesia. *Laporan ilmiah*, 10(1), 15274.
- Yue, H., dkk. (2014). Proses pecahnya gempa bumi Mentawai tsunami 2010 M w 7.8 dari inversi bersama rekaman gelombang hr-GPS dan teleseismik body yang dibatasi oleh pengamatan tsunami. *Surat Penelitian Geofisika*, 5574-5593.



- Yudhicara. (2023). *Katalog Tsunami Indonesia tahun 416 2021*. Diakses dari Geologi.esdm.go.id: <https://geologi.esdm.go.id/publikasi/laporan-dan-buku/katalog-tsunami-indonesia-tahun-416-2021>
- Zahro, Q. 2017. Kajian Spasial Risiko Bencana Tsunami Kabupaten Serang, Banten. *Jurnal Sains dan Teknologi Mitigasi Bencana*, 12(1):44–52.