

Analisis Potensial Penjalaran Gelombang Tsunami di Pesisir Barat Lampung, Indonesia

Dian Pratiwi^{1*} dan Arniza Fitri²

^{1,2} *Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Teknokrat Indonesia, Bandar Lampung, Indonesia*

Email: dian.pратиwi@teknokrat.ac.id

Dikirim: 24 November 2020

Direvisi: 30 Januari 2021

Diterima: 31 Januari 2021

ABSTRACT

Earthquake followed tsunami can cause serious damage to the coastal community especially those near the epicenter. Concerning to the Earthquake followed tsunami in 2004, the Government began to encourage the importance of tsunami mitigation to protect coastal surrounding area. The West Coast of Lampung Province is an area directly adjacent to the Eurasian plate. Therefore, there is a high possibility of Earthquake followed tsunami occurrence around West Coast of Lampung Province. The objective of this study is to simulate the potential of tsunami movement on the West Coast of Lampung Province. The simulations were carried out for two stages: 1) simulation of the Earthquake movement due to actual earthquake magnitude occurred in 2019 (5,1 magnitude, around West Coast of Lampung Province) and earthquake magnitude assumption of 6,0; 7,0; and 8,0 by using deformation method; 2) Simulation of Earthquake followed tsunami by using TUNAMI Modified (beta version). Based on simulations, Earthquake followed tsunami due to earthquake magnitude of 5,1 did not reached the coastline in Krui and Bengkunt areas. As for the earthquakes with magnitude of 8,0, it produced approximately 1,14 meters height of the waves around the Bengkunt coastline. Even though the produced wave from 5,1 earthquake magnitude did not reached the coastline in Krui and Bengkunt areas, the potential of tsunami for higher earthquake magnitudes are required in order to help the coastal manager in deciding the proper tsunami mitigation in West Coast of Lampung province.

Keyword: Earthquake Followed Tsunami, Earthquake movement, Wave movement, West Coast of Lampung Province.

ABSTRAK

Tsunami yang didasari oleh kejadian gempa bumi dapat menyebabkan kerusakan yang serius untuk penduduk wilayah pesisir pantai, terutama yang berada dekat dengan pusat gempa. Merujuk pada kejadian tsunami yang terjadi pada tahun 2004, pemerintah mulai mencanangkan pentingnya mitigasi untuk melindungi daerah pesisir pantai. Daerah Pesisir Barat Lampung merupakan daerah yang berbatasan langsung dengan lempeng Eurasia. Hal ini dapat menjadi salah satu pemicu kemungkinan terjadinya gelombang tsunami pada Pesisir Barat Lampung. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk memperlihatkan potensi penjalaran gelombang tsunami di daerah Pesisir Barat Lampung. Simulasi yang dilakukan dalam kajian ini meliputi dua tahapan: 1) simulasi dari penjalaran gelombang gempa dengan menggunakan data gempa pada tahun 2019 (magnitudo 5,1 di area sekitar Pesisir Barat Lampung) dan dengan mengasumsi magnitudo gempa sebesar 6,0; 7,0 dan 8,0 (simulasi dilakukan dengan menggunakan metode deformasi), 2) Simulasi penjalaran gelombang tsunami dengan menggunakan TUNAMI Modified (beta version). Berdasarkan hasil simulasi, penjalaran gelombang tsunami dengan magnitudo 5,1 tidak mencapai garis pantai pada daerah Krui dan Bengkunt. Sedangkan untuk gempa dengan magnitudo 8,0 menghasilkan gelombang sebesar 1,14 meter pada garis pantai Bengkunt. Walaupun penjalaran gelombang pada gempa 5,1 tidak mencapai garis pantai, namun perlu adanya simulasi potensial penjalaran gelombang tsunami untuk magtitudo gempa yang lebih besar guna pengambilan keputusan dalam penentuan mitigasi bencana di daerah Pesisir Barat Lampung.

Kata Kunci: Gempa diikuti Tsunami, Penjalaran Gempa, Penjalaran Gelombang, Pantai Barat Provinsi Lampung

1. PENDAHULUAN

Tsunami merupakan serangkaian air yang disebabkan oleh perpindahan tubuh besar air di laut atau danau besar yang menjadi serangkaian gelombang destruktif yang kuat ketika tiba di pantai (Yonghai & Jiancheng, 2014). Sebagai bagian dari hidrodinamika di laut, tsunami dapat merusak populasi pantai (Yonghai & Jiancheng, 2014), dapat mengubah pola arus air laut (Fitri et al., 2017) dan juga dapat mengubah pola erosi-deposisi di daerah pesisir pantai (Fitri et al., 2015; Fitri et al., 2019a; Fitri et al., 2019b; Fitri & Yao, 2019; Hashim et al., 2013, Hashim et al., 2016). Dampak terbesar terhadap kejadian tsunami dapat dirasakan langsung oleh Penduduk lokal yang tinggal di pesisir pantai (Mikami et al., 2020). Pada 24 Desember 2004, gempa tektonik Sumatera-Andaman yang berpusat di 3.295°N dan 95.982°E menjadi pemicu gelombang tsunami besar di sekitar pesisir barat pantai Propinsi Aceh. Dampak terbesar dirasakan pada daerah Lhok Nga dengan tinggi gelombang tsunami pada daerah pesisirnya mencapai 35 meter, sedangkan daerah lain di pesisir Aceh terkena tsunami dengan ketinggian sekitar 15 meter (Lavigne et al., 2009). Kejadian tsunami di Indonesia sendiri menyebabkan banyak korban jiwa. Berdasarkan data dari USAID, korban tsunami bulan Desember 2004 mencapai 226.000 (meninggal atau hilang) yang ada di beberapa lokasi seperti Indonesia, Thailand, Malaysia, Myanmar, Bangladesh, India, Sri Lanka, and Maldives, termasuk negara-negara di Afrika (Lavigne et al., 2009).

Sementara itu, Kepulauan Sumatera (terutama pada kawasan sebelah barat) telah menjadi salah satu daerah rawan terhadap bencana tsunami karena kawasannya berhadapan langsung dengan lempeng Eurasia dan Australia (Ibrahim, 2015). Propinsi Lampung yang merupakan salah satu pintu masuk masyarakat pulau Jawa merupakan daerah yang rawan bencana baik di bagian barat dan timurnya. Secara keseluruhan, wilayah Lampung rentan terhadap kenaikan gelombang laut akibat efek dari *climate change* yang bersumber pada pola perubahan kecepatan angin (Pratiwi, 2020). Pada bagian barat Lampung terutama Pesisir Barat Lampung rentan terhadap tsunami karena lokasi daerah Pesisir Barat Lampung berbatasan langsung dengan lempeng Eurasia. Daerah Krui dan Bengkunt yang merupakan bagian dari Pesisir Barat Lampung merupakan daerah yang padat penduduknya dan merupakan sentra pengembangan wisata dan pengembangan pelabuhan pada wilayah Bengkunt (Kurniawan, 2019). Walaupun tsunami belum pernah terjadi di wilayah tersebut, namun langkah mitigasi perlu dilakukan dalam rangka menumbuhkan keselamatan dan kenyamanan penduduk pesisir pantai sehingga roda perekonomian pada daerah Pesisir Barat Lampung terutama daerah Krui dan Bengkunt dapat berjalan sebagaimana mestinya (Jokowinarno, 2011). Salah satu langkah atau usaha mitigasi yang dapat dilakukan di daerah Pesisir Barat Lampung adalah dengan cara simulasi penjalanan gelombang tsunami yang kemudian dapat dijadikan sebagai dasar dalam pengembangan mitigasi struktural maupun non struktural pada wilayah Pesisir Barat Lampung. Oleh karena itu, kajian ini bertujuan untuk memperlihatkan simulasi potensial penjalanan gelombang tsunami akibat kejadian gempa di sekitar Pantai Barat Lampung dengan mengimplementasikan beberapa nilai magnitudo gempa rencana.

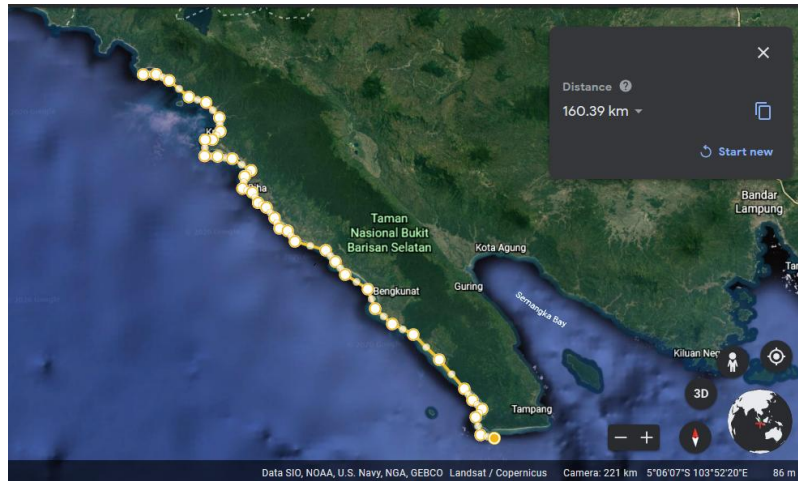
2. METODOLOGI

2.1 Studi Area

Penelitian ini dilakukan pada wilayah Pesisir Barat Lampung yang dimulai dari daerah Krui sampai Bengkunt. Panjang garis pantai di wilayah studi adalah sebesar $\pm 160,39$ km (Gambar 1). Pada kajian ini, penentuan tinggi gelombang tsunami adalah berdasarkan *gauge* yang diasumsikan dipasang pada koordinat $5,5888^{\circ}\text{LS}$ dan $104,312^{\circ}\text{BT}$ di daerah Krui dan koordinat $5,129^{\circ}\text{LS}$ dan $103,245^{\circ}\text{BT}$ di daerah Bengkunt.

2.2 Data

Data yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari data sekunder yaitu berupa Geo-data. Geodata yang dipergunakan berupa data batimetri yang berasal dari SRTM30_PLUS dengan spasi grid horizontal 30 detik busur ($0,0083333333$ derajat atau sekitar 1 km) (Jarvis et al., 2008). Selain itu, angka kekasaran atau angka Manning juga diperlukan dalam simulasi penjalanan gelombang tsunami. Dalam kajian ini, angka kekasaran atau angka Manning yang dipergunakan di wilayah kajian adalah angka Manning yang didasarkan pada tingkat kekasaran di *natural channel* yang dapat dirujuk pada penelitian yang telah dilakukan oleh Imamura (Imamura *et al.*, 2006). Dengan merujuk kepada penelitian terdahulu (Imamura *et al.*, 2006), angka Manning yang dipergunakan di daerah domain pada wilayah kajian adalah 0,016 untuk daerah laut dan 0,025–0,035 untuk daerah pesisir pantai (tergantung dari tutupan permukaan lahan tersebut).



Gambar 1. Wilayah Studi Penjalaran Gelombang Tsunami
(Gambar diambil menggunakan Google Earth)

2.3 Pemodelan Deformasi dan Tsunami

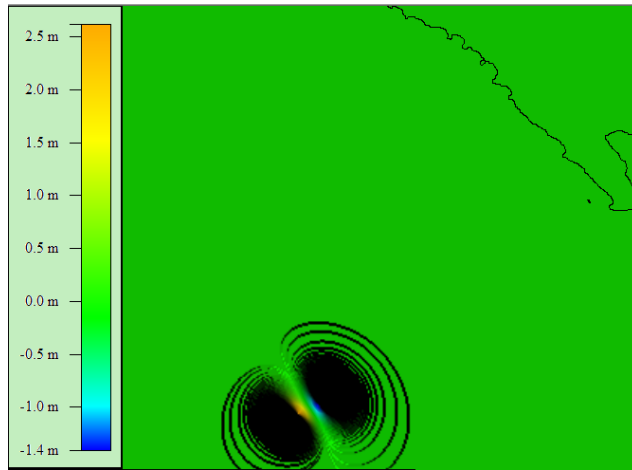
Berdasarkan Tunami Model Manual, teori-teori yang digunakan dalam penelitian ini adalah teori gelombang dangkal (*Shallow water theory*), *Bottom Friction* dan persamaan gelombang tsunami yang telah dikembangkan dalam model simulasi tsunami (Imamura *et al.*, 2006). Pada kajian ini, pemodelan yang dilakukan terdiri dari dua fase atau tahapan, yaitu 1) fase model patahan dan deformasi serta skenario akibat gempa bumi dan 2) fase simulasi tsunami (dengan menggunakan model TUNAMI). Model deformasi menyajikan informasi dan simulasi penyebaran gempa bumi, sedangkan model tsunami digunakan untuk memperlihatkan propagasi dan kenaikan muka air laut akibat penjalaran gelombang tsunami.

2.4 Patahan dan Model Deformasi

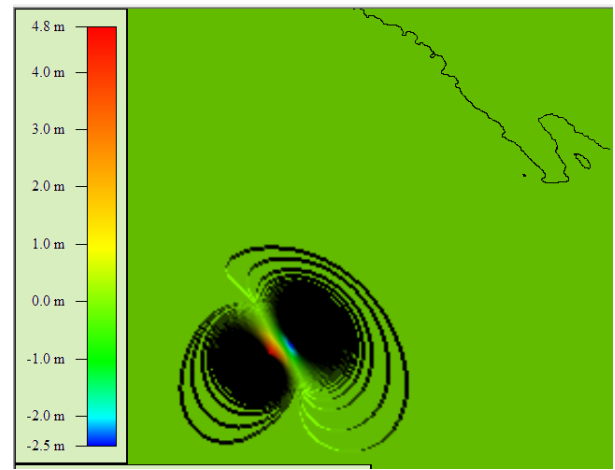
Dalam penelitian ini, pemodelan deformasi untuk penjalaran gelombang gempa merujuk kepada rumusan yang telah dikembangkan oleh Kongko dan Schlurmann (Kongko & Schlurmann, 2011) yang mana merupakan modifikasi rumusan dan skrip yang telah dikembangkan oleh Mansinha (Mansinha & Smylie, 1971) dan Okada (Okada, 1985). Mansinha and Smylie (Mansinha & Smylie, 1971) menggunakan kode skrip dalam sistem koordinat Cartesian dan Okada (Okada, 1985) menggunakan kode skrip dalam sistem koordinat bola (Kongko & Schlurmann, 2011). Dalam menganalisis model deformasi, parameter yang digunakan berupa pencatatan gempa bumi pada tahun 2019 sebesar Magnitudo 5,1 yang terletak pada episenter 7,110°S dan 102,905°E (data momen tensor diberikan oleh USGS). Selanjutnya, berdasarkan data gempa yang didapat dari USGS, perhitungan bidang sesar dilakukan dengan merujuk kepada metode perhitungan yang telah dilakukan oleh Wifayanti, E.J. dan Santosa, B.J. (Wifayanti & Santosa, 2014). Dalam kajian ini, perhitungan bidang sesar mencakup: panjang bidang sesar; lebar bidang sesar dan besar slip bidang patahan. Kemudian, simulasi penjalaran gelombang gempa dilakukan untuk gempa dengan Magnitudo, 6,0; 7,0; dan 8,0 dengan lokasi yang sama pada kejadian gempa dengan magnitudo 5,1. Informasi lengkap mengenai perhitungan parameter gempa dan dimensi patahan gempa diberikan pada Tabel 1. Sementara itu, penjalaran gelombang gempa dengan magnitudo 5,1; 6,0; 7,0; dan 8,0 ditunjukkan oleh Gambar 2.

Tabel 1. Perhitungan Parameter Gempa dan Dimensi Patahan

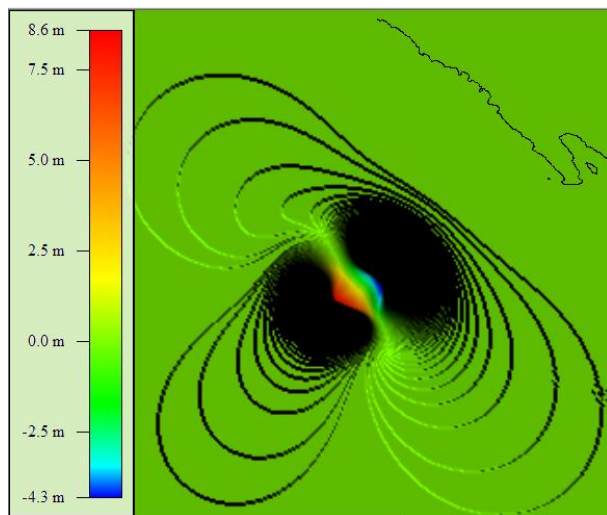
No	Magnitudo	Episenter		L (Panjang Sesar)	W (lebar Sesar)	Parameter Sudut Patahan			Du (Slip)	Kedalaman Pusat Gempa
		Lat.	Long.	Km	km	strike	dip	rake	m	Km
1	5,1	-7,110 ⁰	102,905 ⁰	4,93	8,12	289 ⁰	14 ⁰	46 ⁰	28.8	10
2	6,0	-7,110 ⁰	102,905 ⁰	12,88	16,94	289 ⁰	14 ⁰	46 ⁰	28.8	10
3	7,0	-7,110 ⁰	102,905 ⁰	45,71	34,67	289 ⁰	14 ⁰	46 ⁰	28.8	10
4	8,0	-7,110 ⁰	102,905 ⁰	162,18	70,17	289 ⁰	14 ⁰	46 ⁰	28.8	10



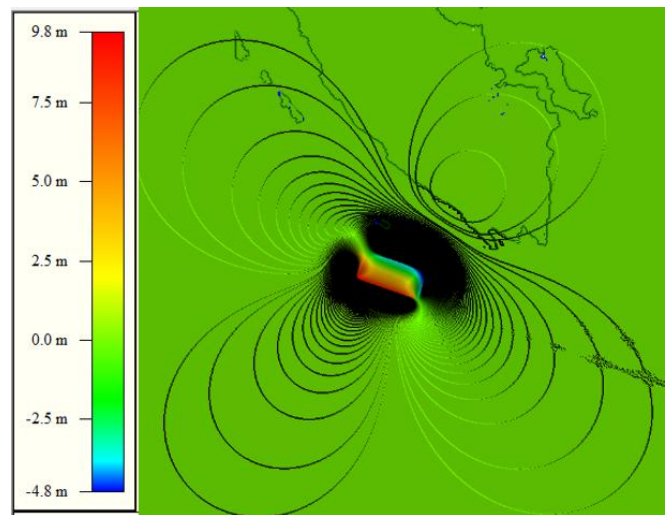
a. Penjalaran gelombang gempa dengan Magnitudo gempa 5,1.



b. Penjalaran gelombang gempa dengan Magnitudo gempa 6,0



c. Penjalaran gelombang gempa dengan Magnitudo gempa 7,0

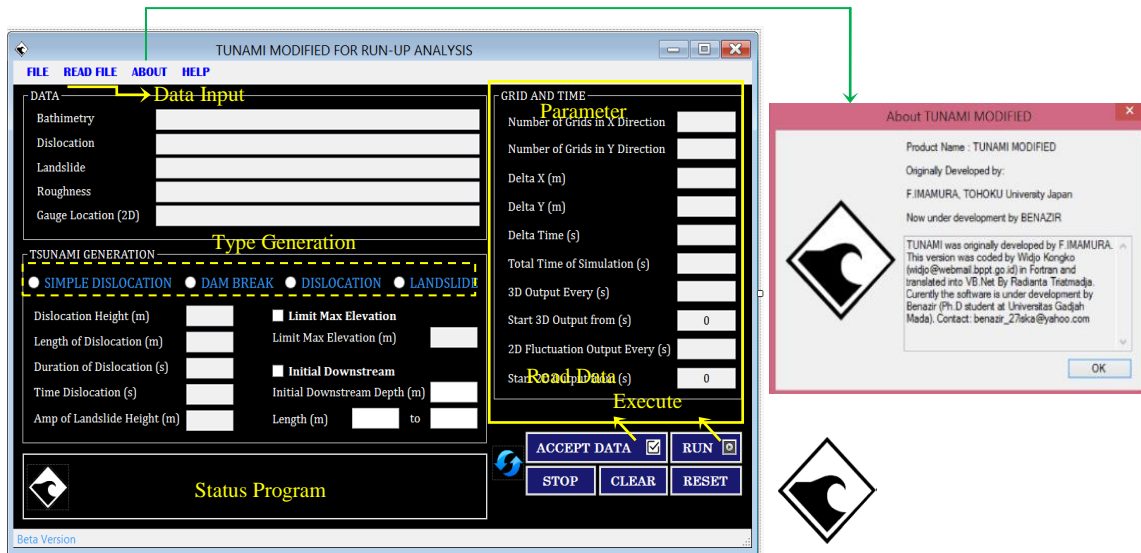


d. Penjalaran gelombang gempa dengan Magnitudo gempa 8,0

Gambar 2. Sebaran Penjalaran gelombang Gempa dengan Magnitudo Gempa 5,1; 6,0; 7,0; dan 8,0.

2.5 Model TUNAMI

Dalam kajian ini, pemodelan simulasi penjalaran gelombang tsunami dilakukan dengan menggunakan Model Analisis Numerik untuk Penggenangan (TUNAMI) yang dikembangkan oleh Universitas Tohoku. Pada dasarnya, ada lima jenis kode TUNAMI secara resmi yaitu panggilan dengan TUNAMI - N1, TUNAMI - N2, TUNAMI - N3, TUNAMI - F1 dan TUNAMI - F2. N dan F dalam akhiran TUNAMI menentukan sistem koordinat yang digunakan, yaitu koordinat Cartesian untuk akhiran N dan koordinat spherical untuk akhiran F. Pemodelan tsunami untuk penelitian ini menggunakan TUNAMI Modified Programme (versi beta). Model ini merupakan modifikasi dari TUNAMI-N2 yang dikembangkan oleh Goto (Goto et al., 1997) dan Imamura (Imamura et al., 2006). Model TUNAMI Modified selanjutnya dikembangkan oleh Benazir (Benazir, 2016). Kode sumber TUNAMI dimodifikasi dengan mengubah bahasa pemrograman FORTAN 77 menjadi bahasa dasar melalui Visual Basic.NET. Gambar 3 memperlihatkan program model TUNAMI Modified (beta version).



Gambar 3. TUNAMI Modified Program (beta version).

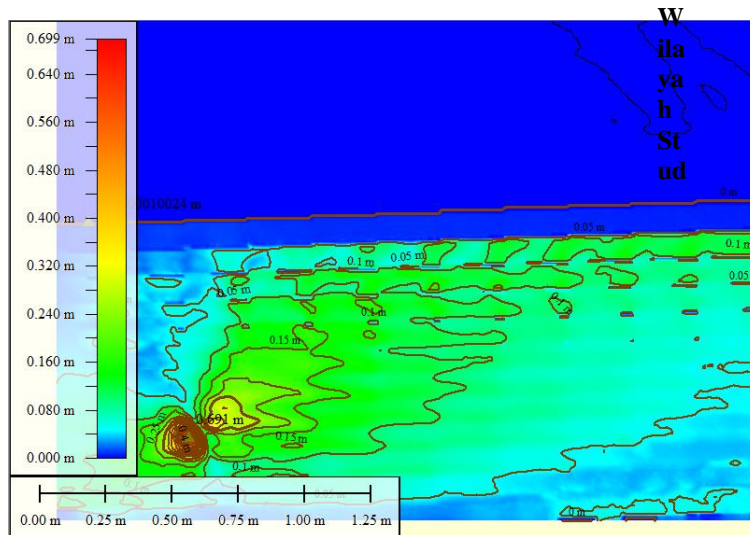
Tahap simulasi penjarangan gelombang tsunami menggunakan program TUNAMI Modified dimulai ketika semua data yang diperlukan tersedia. Langkah awal adalah memasukkan parameter input seperti jumlah kisi pada sumbu x, ukuran kisi spasial, total waktu simulasi, langkah waktu, interval waktu data output, data batimetri, area dislokasi, dan koefisien kekasaran. Penentuan gelombang awal harus dilakukan sebagai kondisi awal model. Skenario simulasi tsunami berasal dari dislokasi bawah laut. Parameter simulasi adalah tinggi dislokasi awal, kemudian menjadi inisial dari tinggi gelombang di sumber propagasi. Keterangan mengenai data/parameter input beserta batasan untuk daerah domain dalam simulasi (Batas Utara, Selatan, Barat dan Timur) yang digunakan pada program TUNAMI modified untuk simulasi penjarangan gelombang tsunami dalam kajian ini didiskripsikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data input parameter pada program TUNAMI

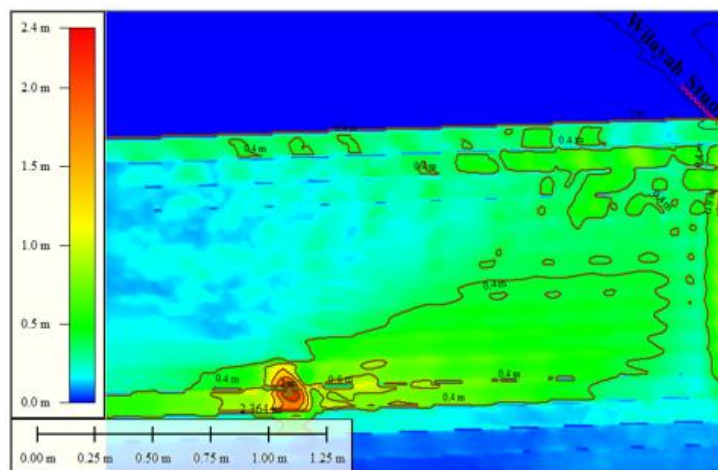
No	Magnitudo Gempa	Jumlah Kisi/grid		Ukuran kisi/grid arah sumbu x dan sumbu y (m)	Waktu simulasi (detik)	Batas Daerah Penjarangan			
		Arah Sumbu x	Arah Sumbu y			Utara (°LS)	Selatan (°LS)	Barat (°BT)	Timur (°BT)
1	5,1	319	348	900	5400	4,504	7,396	102,334	104,994
2	6,0	360	348	900	5400	4,504	7,396	102,004	104,994
3	7,0	535	348	900	5400	4,504	7,396	100,544	104,994
4	8,0	535	348	900	5400	4,504	7,396	100,544	104,994

3. HASIL DAN DISKUSI

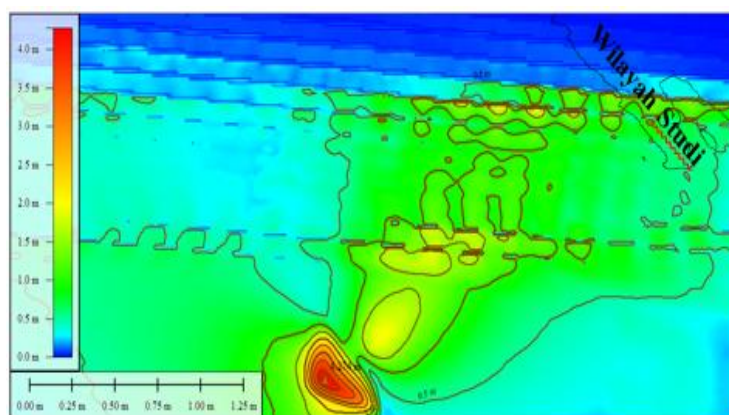
Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7 memperlihatkan hasil simulasi dari penjarangan gelombang tsunami di daerah Pesisir Barat Lampung dengan menggunakan model TUNAMI Modified (beta version) yang dirunning selama 5400 detik. Sebaran tinggi gelombang pada Pesisir Barat Lampung dengan Magnitudo gempa 5,1; 6,0; 7,0; dan 8,0 diperlihatkan dengan jelas pada gambar tersebut. Berdasarkan gambar tersebut, hasil simulasi memperlihatkan bahwa penjarangan gelombang tsunami sangat bervariasi untuk setiap nilai magnitudo gempa yang berbeda.



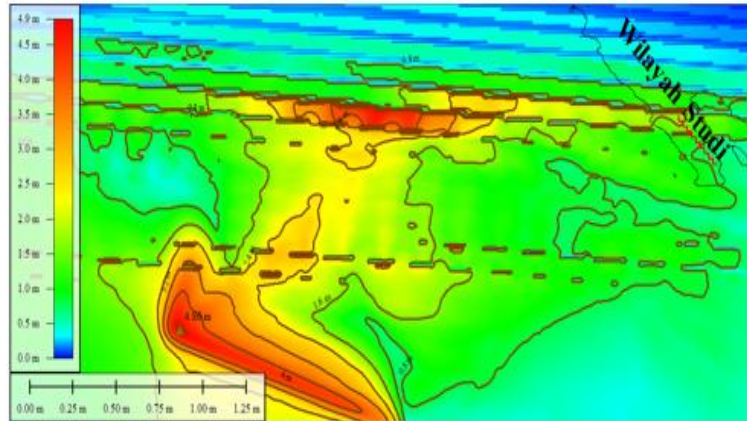
Gambar 4. Sebaran tinggi gelombang tsunami pada Pesisir Barat Lampung dengan Magnitudo Gempa 5,1.



Gambar 5. Sebaran tinggi gelombang tsunami pada Pesisir Barat Lampung dengan Magnitudo Gempa 6,0.



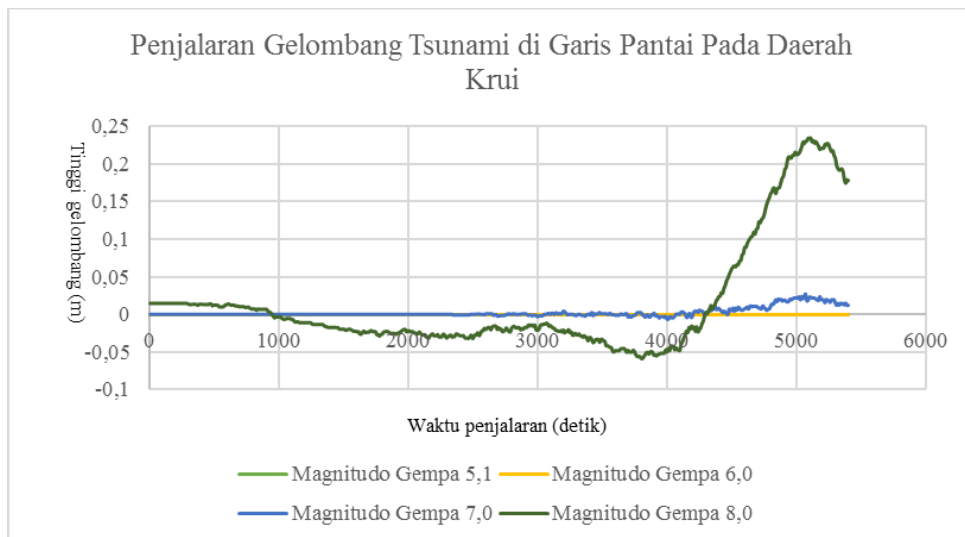
Gambar 6. Sebaran tinggi gelombang tsunami pada Pesisir Barat Lampung dengan Magnitudo Gempa 7,0.



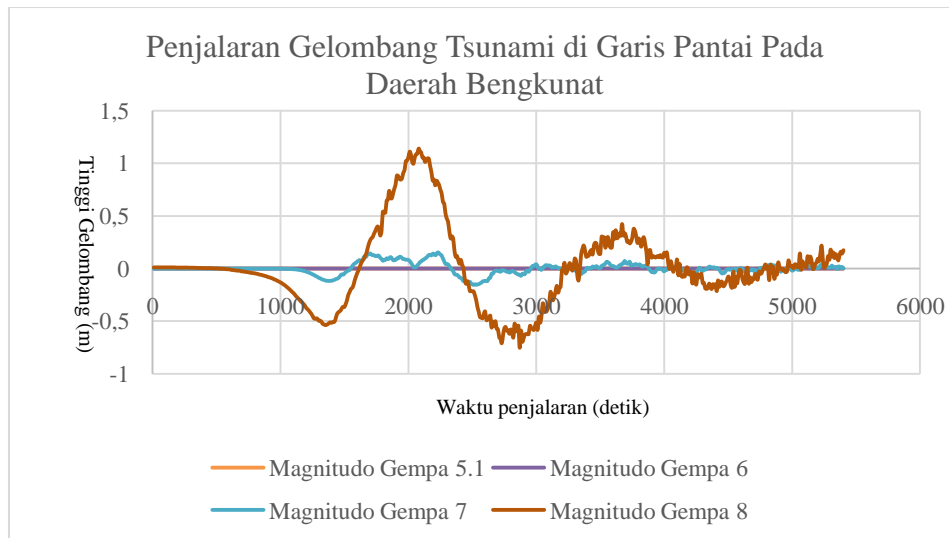
Gambar 7. Sebaran tinggi gelombang tsunami pada Pesisir Barat Lampung dengan Magnitudo Gempa 8,0.

Hasil simulasi dari pendistribusian sebaran gelombang tsunami (sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 4, 5, 6 dan 7) merupakan hasil penjalaran gelombang tsunami pada luasan grid area sebesar 900 m, waktu penjalaran 0,5 detik dan waktu dislokasi 1 detik. Gambar 4 mengilustrasikan sebaran tinggi gelombang pada tsunami dengan magnitudo gempa 5,1 (gempa yang terjadi pada 11 Agustus 2019) yang merupakan keadaan aktual pada daerah Pesisir Barat Lampung. Berdasarkan gambar tersebut, hasil simulasi menunjukkan bahwa tsunami tidak tergenerasi dengan intensitas magnitudo gempa 5,1. Kemudian, setelah mensimulasikan tsunami dengan Magnitudo Gempa 6,0; 7,0; dan 8,0, maka terlihat penjalaran tsunami yang meningkat secara signifikan, walaupun belum dapat diidentifikasi tinggi gelombang yang mencapai garis pantai.

Untuk mendeteksi tinggi gelombang yang mencapai garis pantai, pada studi ini dilakukan simulasi pemasangan *Gauge*. Penempatan *Gauge* diasumsikan terletak pada koordinat 5,5888° LS dan 104,312° BT pada daerah Krui dan koordinat 5.129° LS dan 103.245° BT pada daerah Bengkunt. Pertimbangan yang digunakan dalam perletakan alat tersebut yaitu terdapatnya fasilitas transportasi berupa pengembangan pelabuhan di daerah Bengkunt dan objek wisata yang terdapat pada Daerah Krui. Hasil pencatatan gelombang tsunami dari gauge yang diasumsikan terpasang di daerah Krui dan Bengkunt diperlihatkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Tsunami Maerogram pada Garis Pantai Krui (5,5888° LS dan 104.312° BT).



Gambar 9. Tsunami Maerogram pada Garis Pantai Bengkunt ($5,129^{\circ}$ LS dan 103.245° BT).

Berdasarkan Gambar 8 dan Gambar 9, alat pencatatan gelombang (gauge) yang diasumsikan terletak pada garis pantai di daerah Krui dan Bengkunt memperlihatkan bahwa adanya penjalaran gelombang pada tsunami dengan magnitudo gempa 5,1; 6,0; 7,0 dan 8,0. Pada daerah Krui dan Bengkunt, tsunami dengan magnitudo gempa 5,1 dan 6,0 tidak mencapai garis pantai. Namun, pada gempa dengan magnitudo 7,0 dan 8,0 menunjukkan adanya penjalaran gelombang tsunami yang sampai pada garis pantai di daerah Krui dan Bengkunt. Gempa dengan magnitudo 7,0 menghasilkan gelombang tertinggi pada daerah Krui sebesar 0,03 m atau 3 cm pada detik ke 5070. Begitu juga pada daerah Bengkunt, tsunami yang terjadi dengan magnitudo gempa 7,0 menghasilkan ketinggian gelombang tertinggi sebesar 0,15 m atau 15 cm pada detik ke 2230. Kemudian, pada gempa dengan magnitudo 8,0 menghasilkan gelombang tsunami tertinggi sebesar 1,14 meter pada detik ke 2080 pada daerah Bengkunt. Sedangkan pada daerah Krui, gelombang yang terjadi hanya 0,24 meter atau 24 cm pada detik ke 5110. Perbedaan ketinggian gelombang tsunami tersebut terjadi karena letak daerah Krui lebih jauh dari pusat gempa dibandingkan dengan daerah Bengkunt.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian ini, penjalaran gelombang tsunami dengan magnitudo gempa 5,1 yang terjadi pada 11 Agustus 2019 memperlihatkan penjalaran gelombang yang lemah dan tidak mencapai daerah Krui dan Bengkunt yang merupakan daerah dengan transportasi dan pariwisata yang masih berkembang. Kemudian, simulasi penjalaran gelombang dengan magnitudo gempa 7,0 dan 8,0 memberikan hasil gelombang tertinggi pada garis pantai daerah Bengkunt sebesar 1,14 meter. Hal ini dapat dijadikan suatu indikasi adanya bahaya gelombang tsunami walaupun gempa dengan magnitudo 8,0 belum pernah terjadi pada daerah tersebut. Dari kesimpulan diatas, maka rekomendasi yang dapat diberikan adalah perlunya membuat suatu mitigasi baik berupa mitigasi non struktural maupun struktural berupa penanaman *Natural Barrier* dengan pertimbangan penjalaran gelombang yang dihasilkan tidak terlalu besar. Mitigasi sendiri dapat memberikan kontribusi yang baik dan menumbuhkan kenyamanan bagi penduduk lokal untuk meningkatkan perekonomian dan menumbuhkan kenyamanan dalam melakukan aktifitas kehidupan terutama bagi penduduk lokal dan wisatawan.

Selain itu, dikarenakan grid modeling yang digunakan dalam kajian ini cukup besar (± 1 km), maka simulasi penjalaran gelombang tsunami dengan grid data yang lebih kecil diharapkan dapat memberikan hasil simulasi yang dapat mendekati keadaan sebenarnya pada daerah berkembang di wilayah Pesisir Barat Lampung. Sehingga pengambilan keputusan mengenai langkah mitigasi akan semakin baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Teknokrat Indonesia melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) atas dana yang dihibahkan dalam melakukan penelitian ini dengan Nomor: 029/UTI/LPPM/E.1.1/VII/2020.

DAFTAR PUSTAKA

- Benazir. (2016). *Pengembangan Metode Simulasi Run-up Tsunami dan Aplikasinya pada Beberapa Kasus Tsunami di Indonesia*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Fitri, A., & Yao, L. (2019). The impact of parameter changes of a detached breakwater on coastal morphodynamic at cohesive shore: A simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 365(1), 12054.
- Fitri, A., Yao, L., & Sofawi, B. (2019a). Evaluation of mangrove rehabilitation project at Carey Island coast, Peninsular Malaysia based on long-term geochemical changes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 365(1), 12055.
- Fitri, A., Hashim, R., Abolfathi, S., & Maulud, K. N. A. (2019b). Dynamics of sediment transport and erosion-deposition patterns in the locality of a detached low-crested breakwater on a cohesive coast. *Water (Switzerland)*, 11(8), 1721. <https://doi.org/10.3390/w11081721>
- Fitri, A., Hashim, R., & Motamedi, S. (2017). Estimation and validation of nearshore current at the coast of Carey Island, Malaysia. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 25(3), 1009–1018.
- Fitri, A., Hashim, R., Song, K. II, & Motamedi, S. (2015). Evaluation of Morphodynamic Changes in the Vicinity of Low-Crested Breakwater on Cohesive Shore of Carey Island, Malaysia. *Coastal Engineering Journal*, 57(04), 1550023. <https://doi.org/10.1142/S0578563415500230>
- Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N., & Imamura, F. (1997). Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. *IOC Manuals and Guides*, 35, 130.
- Hashim, R., Fitri, A., Motamedi, S., & Hashim, A. M. (2013). Modeling of coastal hydrodynamic associated with coastal structures: A review. *Malaysian Journal of Science*, 32(4), 149–154.
- Hashim, R., Roy, C., Shamsirband, S., Motamedi, S., Fitri, A., Petković, D., & Song, K. I. I. L. (2016). Estimation of Wind-Driven Coastal Waves Near a Mangrove Forest Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Water Resources Management*, 30(7), 2391–2404. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1267-0>
- Ibrahim, M. S. I. B. (2015). *Simulation of Tsunami run-up along Parangtritis Beach*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Imamura, F., Yalciner, A. C., & Ozyurt, G. (2006). Tsunami modelling manual. In *UNESCO IOC international training course on Tsunami Numerical Modelling*.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., Guevara, E., & others. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<Http://Srtm.Csi.Cgiar.Org>), 15, 25–54.
- Jokowinarso, D. (2011). Mitigasi bencana tsunami di wilayah pesisir lampung. *Rekayasa: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*, 15(1), 13–20.
- Kongko, W., & Schlurmann, T. (2011). The Java tsunami model: using highly-resolved data to model the past event and to estimate the future hazard. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference (2010)*, 1(32).
- Kurniawan, F. (2019). *Pemodelan Tsunami dan Alternatif Jalur Evakuasi Berbasis Sistem Informasi Geografi di Kecamatan Krui Selatan Kabupaten Pesisir Barat Tahun 2019*. Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Lavigne, F., Paris, R., Grancher, D., Wassmer, P., Brunstein, D., Vautier, F., Leone, F., Flohic, F., de Coster, B., Gunawan, T., Gomez, C., Setiawan, A., Cahyadi, R., & 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>
- Mansinha, L., & Smylie, D. E. (1971). The Displacement Fields of Inclined Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), 1433–1440.
- Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M., & Aránguiz, R. (2020). Comparative Analysis of Triggers for Evacuation during Recent Tsunami Events. *Natural Hazards Review*, 3(21), 04020022. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nh.1527-6996.0000386](https://doi.org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000386)
- Okada, Y. (1985). Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135–1154.
- Pratiwi, D. (2020). Studi Time Series Hidro Oseanografi Untuk Pengembangan Pelabuhan Panjang. *Journal of Infrastructural in Civil Engineering*, 1(01), 1–13.
- Wifayanti, E. J., & Santosa, B. J. (2014). Estimasi Pola Bidang Sesar dan Moment Tensor Gempa Bumi Jepang pada Tahun 2003 Menggunakan Analisis Inversi Waveform 3 Komponen. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 3(2), B126–B131.
- Yonghai, C., & Jiancheng, L. (2014). Extraction of two tsunamis signals generated by earthquakes around the Pacific rim. *Geodesy and Geodynamics*, 5(2), 1–13. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1246.2014.02038>