

Risk Analysis and Tsunami Disaster Mapping in Mamuju, West Sulawesi Using TUNAMI-N2

Theresya M S Bandangan¹⁾, Guntur Pasau^{2*)}, Gerald H Tamuntuan³⁾

^{1,2,3)} Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

*Corresponding author: guntur_pasau@unsrat.ac.id

ABSTRACT

Mamuju City is an area that has extraordinary natural beauty and is often used as a tourist attraction, especially marine tourism. The potential for a tsunami disaster in this region is very large because it is located directly opposite the Makassar Strait which is the location of the center of tectonic earthquakes. This study aims to determine the maximum height of tsunami waves and the arrival time of tsunami waves that can hit Mamuju City and analyze the risks that occur due to the tsunami waves. The method used in this study was modeling using TUNAMI-N2 software. The results of this study showed that a tsunami with an earthquake magnitude of 7,2 and 7.3 Mw had a maximum wave height of 7,91 m and 8.04 m at the 18th minute with a very high risk.

Keywords: Disaster; model; risk; tsunami.

Analisis Resiko dan Pemetaan Bencana Tsunami di Mamuju Sulawesi Barat Menggunakan TUNAMI-N2

ABSTRAK

Kota Mamuju merupakan kawasan yang memiliki keindahan alam yang luar biasa dan sering dijadikan objek wisata khususnya wisata bahari. Potensi terjadinya bencana tsunami dikawasan ini sangat besar karena letaknya berhadapan langsung dengan selat makassar yang merupakan lokasi pusat gempa bumi tektonik. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan ketinggian maksimum gelombang tsunami dan waktu tiba gelombang tsunami yang dapat menerjang Kota Mamuju serta menganalisis resiko yang terjadi akibat gelombang tsunami tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemodelan menggunakan perangkat lunak TUNAMI-N2. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa tsunami dengan kekuatan gempa 7,2 dan 7,3 Mw memiliki ketinggian gelombang maksimum 7,91 m dan 8,04 m pada menit ke-18 dengan risiko yang sangat tinggi.

Kata kunci: Bencana; model; risiko; tsunami

(Article History: Received 25-07-2023; Accepted 28-10-2023; Published 28-10-2023)

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang paling rawan mengalami berbagai bencana alam. Salah satu bencana yang paling sering terjadi di Indonesia adalah gempa bumi dan tsunami. Hal ini dapat terjadi karena Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng yang konvergen yaitu lempeng Pasifik (termasuk lempeng Caroline dan Filipina), lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia (Honthaas *et al.*, 1998). Selain itu, Indonesia juga termasuk dalam jalur sirkum Pasifik dimana jalur tersebut merupakan jalur gempa bumi yang masih aktif melintas ke wilayah Filipina dan Indonesia (Mardiatno *et al.*, 2017). Secara umum tsunami adalah rangkaian gelombang dengan jangka waktu lama yang ditimbulkan

oleh gangguan yang terjadi di lingkungan laut dan dapat mempengaruhi lingkungan pantai (Mutaqin *et al.*, 2019). Gelombang tsunami biasanya dicirikan oleh karakteristik panjang gelombang yang lebih panjang dari kedalaman laut (Selva *et al.*, 2021). Gelombang tsunami akan semakin melemah jika waktunya bertambah, peristiwa ini dikenal sebagai sifat gelombang trasien dan impulsif (Purnama *et al.*, 2019)

Secara tektonik kabupaten Mamuju memiliki tingkat aktivitas kegempaan yang relatif tinggi, karena letak geografisnya yang dilalui sesar aktif dan kondisi litologi batuan cenderung lunak sehingga memicu efek guncangan cenderung tinggi (Said *et al.*, 2023). Keadaan litotektonik daerah Majene, Mamuju sampai Palopo dibagi menjadi tiga domain tektonik utama yang mengarah dari utara ke selatan yang dimulai dari lajur lipatan – sesar naik aktif ke lajur vulkano – plutonik sampai lajur batuan ofiolit (kompleks Lamasi). Hal tersebut merupakan bukti bahwa struktur Sulawesi Barat dipengaruhi oleh kompresi (Fajriani, 2021). Fase kompresi yang ditunjukkan oleh adanya sesar naik dan lipatan di selat sebelah timur mempunyai kecondongan (vergence) kebarat, sementara diselat sebelah barat memiliki kecondongan ke timur (Zakaria & Sidarto, 2015). Gerak relatif antara blok Makassar dan lempeng Sunda ditampung oleh *Makassar Strait Thrust*, yang dibagi menjadi 4 segmen yaitu Somba, Mamuju, *Central* dan *North* (Meilano *et al.*, 2023). *Makassar Strait Thrust* pernah menyebabkan gempa bumi berpotensi tsunami di daerah Mamuju pada tanggal 8 Januari 1984 dengan kekuatan gempa bumi adalah 6,7 Mw. Gempa bumi dan tsunami tersebut menyebabkan kerusakan infrastruktur, dan memakan korban jiwa baik luka-luka maupun meninggal dunia (Susanto *et al.*, 2020).

Mamuju merupakan salah satu kota di Sulawesi Barat yang memiliki keindahan alam yang luar biasa hal ini menyebabkan kota Mamuju sering di jadikan salah satu tempat untuk berwisata khususnya wisata bahari, Selain dari pada itu dengan tingkat kepadatan penduduk yang terus bertambah maka pembangunan infrastruktur juga akan terus berkembang. Hal ini dipandang akan menjadikan Mamuju kedepannya menjadi kota yang akan maju dan ramai penduduk. Berkaitan dengan hal itu, karena letak kawasan kota Mamuju berhadapan langsung dengan selat makassar yang merupakan salah satu lokasi pusat gempa tektonik (*Makassar strait thrust*) maka dari itu perlu dipastikan pemerintah Sulawesi Barat menyiapkan segala kemungkinan dan mitigasinya dalam hal kebencanaan salah satunya adalah tsunami. Simulasi atau pemodelan bencana tsunami menggunakan perangkat lunak TUNAMI-N2 dapat menjadi salah satu metode yang digunakan untuk memberikan informasi dalam penyusunan strategi mitigasi bencana alam. Perangkat lunak TUNAMI-N2 memecahkan serangkaian perkiraan air dangkal nonlinear dari persamaan Navier–Stokes. Model ini menggunakan skema beda hingga *leap-frog* eksplisit orde dua untuk mendiskritisasi himpunan persamaan air dangkal nonlinear (Oishi *et al.*, 2015).

Mengacu pada penelitian pemodelan penalaran gelombang tsunami yang dilakukan oleh (Baeda *et al.*, 2015) dengan memanfaatkan perangkat lunak TUNAMI-N2 menggunakan magnitudo 6,5 Mw, maka dilakukanlah penelitian ini dengan memvariasikan titik pusat gempa dan magnitudo gempa serta memperluas jangkauan penelitian yaitu sepanjang pesisir pantai yang ada di Kota Mamuju. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi tentang ketinggian maksimum dan waktu tiba gelombang tsunami, besar resiko terjadinya tsunami serta peta inundansi atau jangkauan gelombang tsunami sampai kedaratan kota Mamuju, Sulawesi Barat.

METODE PENELITIAN

a. Data Penelitian

Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data bathymetri yang diperoleh dari GEBCO (*General Bathymetric Chart Ocean*), data topografi dari USGS, dan data panjang dan lebar dari sesar yang diperoleh dengan memasukkan magnitudo gempa bumi yang diskenariokan ke dalam persamaan Wells dan Coppersmith. Menurut Khoiridah & Santosa (2015) untuk menentukan panjang dan lebar dari deformasi pada kasus patahan naik (reverse) menggunakan persamaan wells dan coppersmith sebagai berikut:

$$M_w = 5,00 + 1,22 \times \log L \quad (1)$$

$$M_w = 4,37 + 1,95 \times \log W \quad (2)$$

Dimana L adalah *rupture length* (km), dan W adalah *rupture width* (km).

b. Prosedur Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemodelan menggunakan TUNAMI-N2. Pemodelan tsunami dilakukan sebagai reverensi atau memberikan gambaran dalam mengetahui sebaran gelombang tsunami dari sumber gempa, waktu penjaran gelombang (*travel time*) dan ketinggian tsunami (*run up*) yang dapat melalui daerah terdampak (Nurfitriani *et al.*, 2018). Perbedaan perangkat lunak TUNAMI-N2 dengan perangkat lunak mitigasi bencana tsunami lainnya seperti COMCOT dan WinITB sebenarnya tidak terlalu signifikan, TUNAMI-N2 dan COMCOT digunakan untuk tsunami jarak dekat dan perbedaannya hanya terletak pada diskritisasinya sedangkan WinITB untuk tsunami jarak jauh. Penelitian ini memanfaatkan perangkat lunak TUNAMI-N2 karena tsunami yang disimulasikan merupakan tsunami jarak dekat dan penggunaannya yang lebih sederhana. Selain itu, data-data yang diperoleh seperti data topografi biasanya belum *upgrade* sehingga tidak cocok dengan perangkat lunak lainnya.



Gambar 1. Lokasi Pusat Gempa

Gambar 1 menunjukkan lokasi gempa pembangkit yang digunakan dalam penelitian ini yang merupakan gempa tektonik dengan magnitudo 7,2 dan 7,3 Mw dan lokasi sesar yaitu $1^{\circ} 55' 26.49''$ LS dan $118^{\circ} 25' 33.75''$ BT yang berada di laut sulawesi. Menurut rekaman data gempa yang pernah terjadi di Mamuju, gempa dengan magnitudo 7,3 Mw adalah gempa dengan magnitudo maksimum walaupun masih mungkin untuk terjadi gempa dengan magnitudo 7,5 Mw. Lokasi sesar juga dipilih berdasarkan data gempa yang pernah terjadi di Mamuju.

1. Penentuan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan penentuan lokasi penelitian yaitu membagi *layer* menjadi 4. Titik fokus pada penelitian ini terdapat pada *layer* 4. Jangkauan dari *layer* 1 sampai 4 akan semakin kecil dengan perbandingan 1/3, semakin kecil ukuran dari *layer* maka semakin besar tingkat akurasi dari data (Mambu et al., 2019).



Gambar 2. Lokasi 7 titik *Tide Gauge*

Gambar 2 menunjukkan posisi pada *layer* 4, dimana diletakkan 7 *tide gauge* virtual disepanjang pesisir pantai Kota Mamuju, untuk mendapatkan nilai ketinggian maksimum dan waktu tiba gelombang tsunami. Data dari *tide gauge* kemudian akan ditampilkan dalam bentuk grafik.

2. Penentuan Parameter inputan

Pada penelitian ini, sebelum melakukan proses pengolahan data menggunakan *software* TUNAMI-N2 maka diperlukan parameter pengontrol dan inputan yang akan digunakan dalam pemrograman yang ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Pembangkit Gempa Bumi

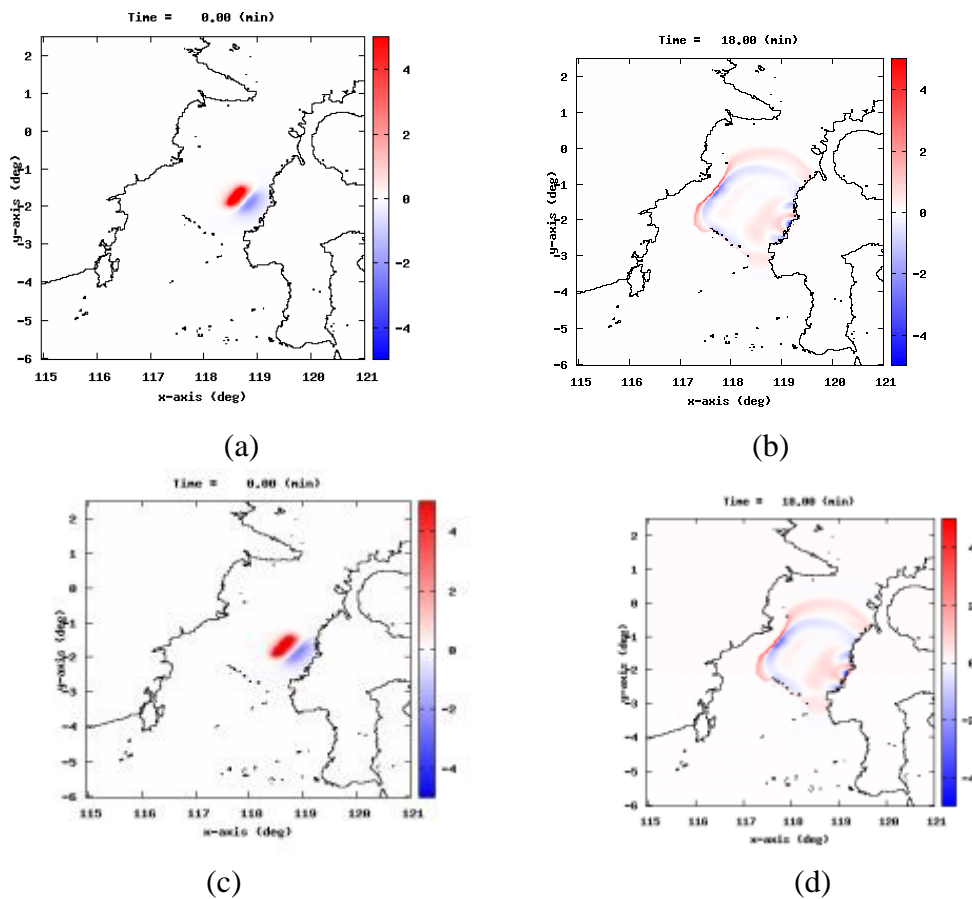
Parameter	Skenario
Longitude	118,426
Latitude	1,924
Lenght (km)	71
Width (km)	35
Strike	30
Dip	20
Slip Angle	20
Depth (km)	10

Setiap parameter, batas koordinat setiap *layer* dan titik koordinat *tide gauge* yang telah diperoleh selanjutnya akan di masukkan kedalam pemrograman sebelum *run* perangkat lunak TUNAMI-N2 dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

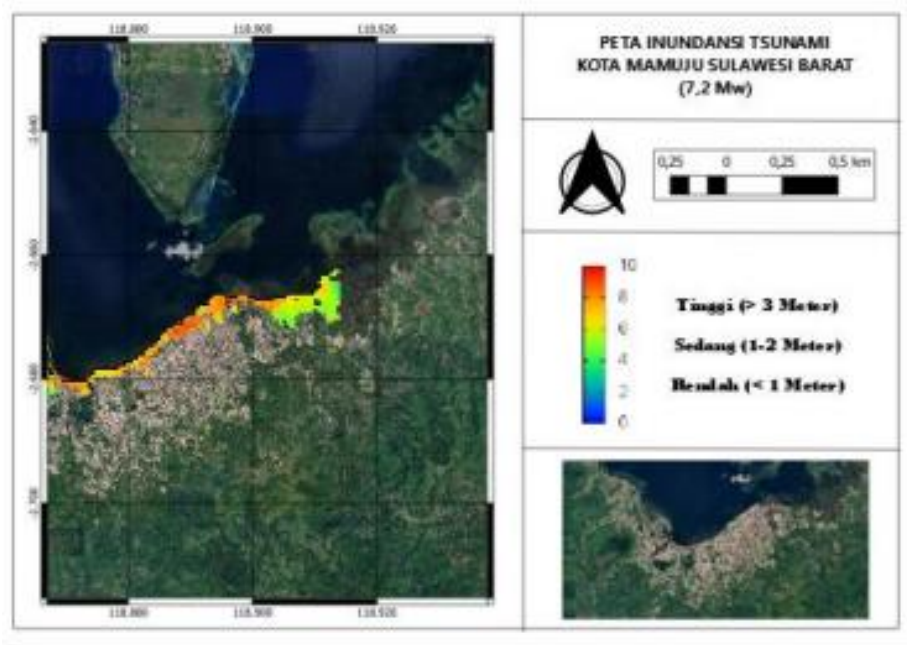
Skenario penjalaran gelombang tsunami telah dilakukan di Kota Mamuju, Sulawesi Barat yang dibangkitkan oleh gempa bumi dengan magnitudo 7,2 dan 7,3 Mw. Nilai yang di *input* untuk membangkitkan tsunami adalah nilai panjang dan lebar sesar yang di peroleh dari perhitungan menggunakan persamaan Wells dan Coppersmith (1994). Hasil pemodelan berupa *snapshot* per menit yang menggambarkan waktu propagasi gelombang tsunami (waktu tempuh) dan tinggi tsunami (*run up*) (Pasau *et al.*, 2019).

Pada Gambar 3 terlihat bahwa sesaat setelah gempa bumi (menit ke-0) terjadi perubahan permukaan air laut berupa kenaikan permukaan air laut yang digambarkan oleh area berwarna merah sedangkan penurunan permukaan air laut yang digambarkan oleh area berwarna biru yang disebabkan oleh deformasi berupa pemekaran bidang patahan yang terjadi (Pandey *et al.*, 2015) kemudian terjadi propagasi gelombang tsunami dengan ketinggian maksimum terjadi pada menit ke-18.

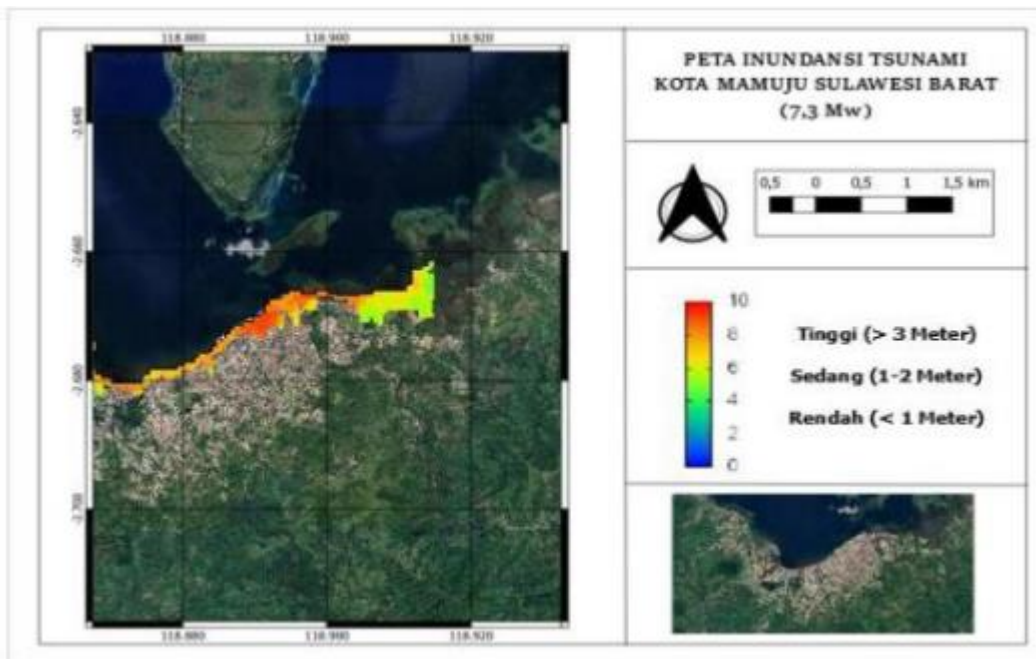


Gambar 3 a;b (7,2 Mw) dan c;d (7,3 Mw) snapshot Penjalaran Gelombang Tsunami pada menit ke-0 dan menit ke-18

Berdasarkan hasil simulasi penjalaran tsunami juga didapatkan hasil pemetaan run-up tsunami di Kota Mamuju, Sulawesi Barat sebagai berikut :



(a)

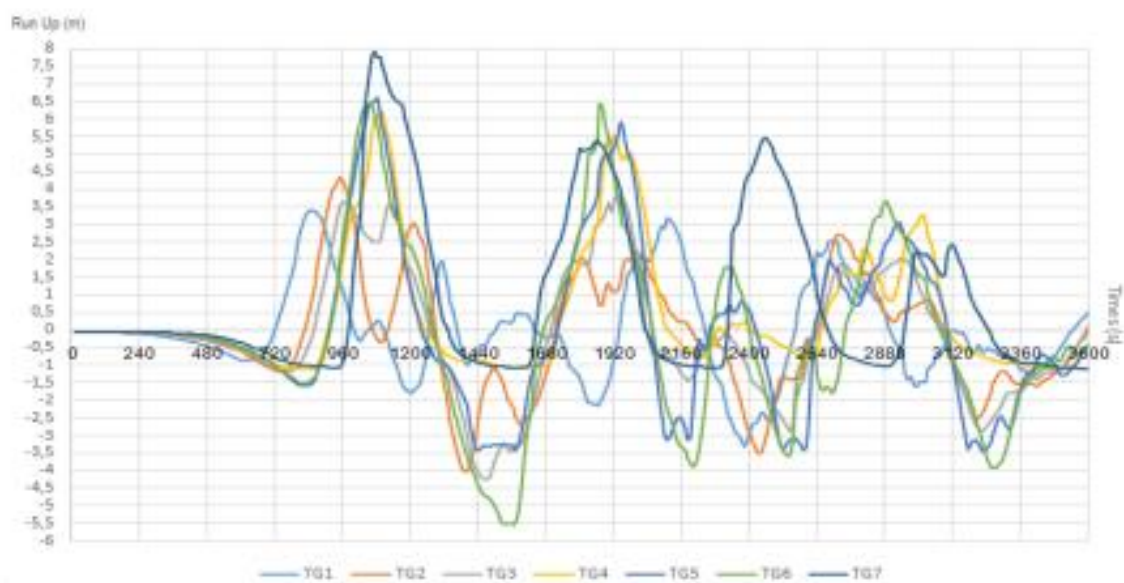


(b)

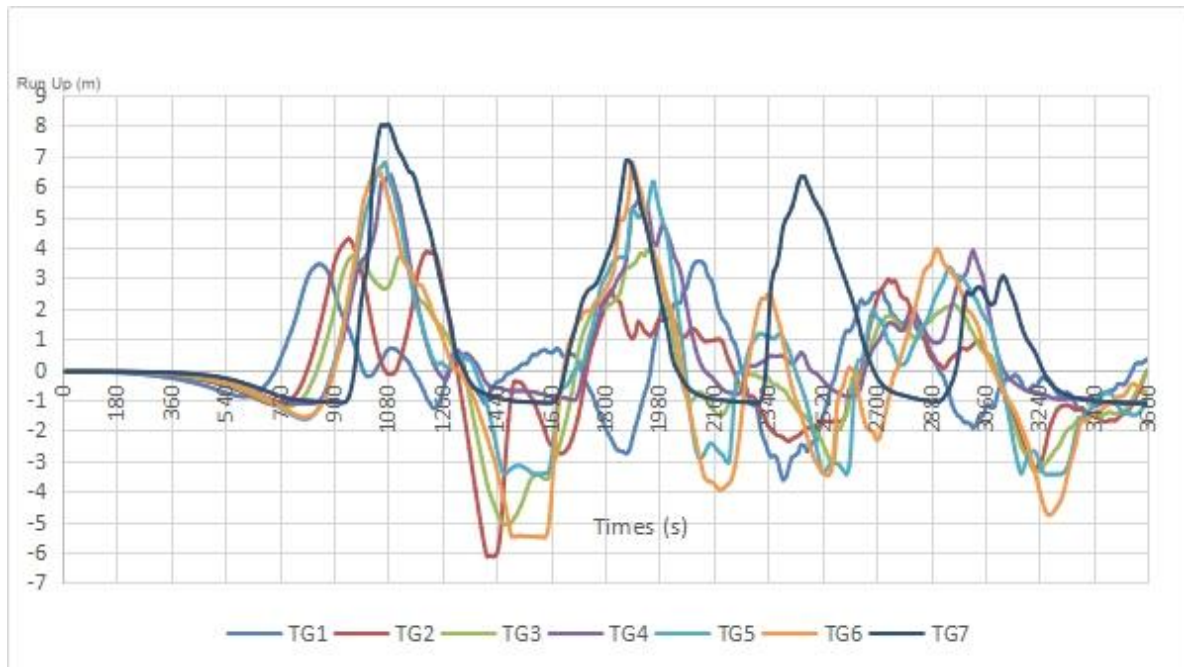
Gambar 4 a dan b Peta Inundansi Gelombang Tsunami di Kota Mamuju dengan magnitudo 7,2 dan 7,3 Mw

Pada Gambar 4 terlihat wilayah yang terkena tsunami dengan ketinggian tsunami yang bervariasi dengan range run-up maksimum 0-10 m. Dari hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwa gelombang tsunami yang terdapat pada setiap *tide gauge* yang menggunakan gempa pembangkit dengan magnitudo 7,2 dan 7,3 Mw termasuk dalam kategori berbahaya dengan kelas tinggi dan ketinggian rata-rata adalah 6 m - 8 m. Setiap titik yang diamati pada daerah di Kota Mamuju, Sulawesi Barat bahkan daerah di sekitarnya menunjukkan bahwa daerah-daerah ini beresiko tinggi dan rawan akan bencana tsunami karena berhadapan langsung dengan pantai dan tidak adanya hutan bakau/mangrove yang menahan gelombang.

Resiko yang pasti terjadi ketika bencana tsunami terjadi adalah kerusakan infrastruktur, bangunan rumah dan korban jiwa. Walaupun begitu masih mungkin untuk meminimalisir korban jiwa maka diperlukan penelitian ini sebagai sistem peringatan dini yang dapat berupa informasi mengenai magnitudo gempa yaitu 7,2 dan 7,3 Mw dengan potensi tsunami, ketinggian yang mencapai lebih dari 6 meter dengan waktu penjaran gelombang paling cepat adalah 12 menit. Dengan informasi tersebut masyarakat dapat menentukan strategi penyelamatan diri (lari, berjalan atau menggunakan kendaraan) dan menuju tempat yang dianggap lebih aman dalam waktu 12 menit. Selain itu, informasi mengenai analisis resiko ini dapat membantu pemerintah untuk menambah kapasitas yaitu pembangunan kesiapsiagaan, dengan memperhatikan ketinggian maksimum dan waktu penjaran gelombang. Pemerintah dapat membuat jalur evakuasi yang di sebarakan melalui sistem peringatan dini BMKG yang dapat diakses dalam waktu 12 menit.



(a)



(b)

Gambar 5 a dan b. Grafik ketinggian tsunami dan waktu tiba penjalaran gelombang dengan magnitudo 7,2 dan 7,3 Mw

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa waktu penjalaran tercepat terjadi ketika gelombang pasang tiba yaitu pada menit ke-12 terdapat pada *tide gauge* 1 dengan ketinggian 1 cm dan ketinggian gelombang tsunami paling maksimum tercatat di *tide gauge* 7 dengan puncak mencapai 7,91 dan 8,04 m dengan waktu penjalaran yaitu pada menit ke-18. Sedangkan ketinggian gelombang terkecil terdapat pada *tide gauge* 3 yaitu mencapai 0,3 cm pada waktu kurang dari 1 menit. Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa semakin besar magnitudo gempa yang diskenariokan maka semakin besar ketinggian tsunami yang dihasilkan. Sedangkan jika ditinjau dari waktu penjalaran gelombang tsunami, secara teori magnitudo tidak mempengaruhi kecepatan gelombang tsunami tetapi dari hasil penelitian terdapat perbedaan waktu penjalaran meskipun hanya beberapa detik pada saat magnitudo yang diskenariokan semakin besar. Hal ini disebabkan karena prinsip yang digunakan didalam perangkat lunak TUNAMI-N2 ini adalah teori air dangkal yang didalam persamaannya mengandung unsur energi sehingga dapat mempengaruhi hasil akhir dari waktu penjalaran gelombang tsunami. Selain itu, ketinggian gelombang tsunami tidak selalu dipengaruhi oleh magnitudo gempa. Ketinggian gelombang tsunami dapat juga dipengaruhi oleh lokasi gempa, dan besarnya deformasi vertikal dasar Laut, juga disebabkan oleh bentuk batimetri, topografi, dan geomorfologi pantai. Tinggi tsunami akan mencapai nilai maksimum pada pantai dengan morfologi landai dan berkeluk seperti teluk atau muara sungai (Purnama *et al.*, 2019)

Penelitian terdahulu yang pernah dilakukan oleh (Baeda *et al.*, 2015) menunjukkan waktu penjalaran gelombang yang lebih lama sampai menyentuh ke pesisir pantai kota Mamuju, khususnya pada pantai Manakkara. Waktu yang diperlukan untuk penjalaran gelombang setidaknya adalah 50 menit dengan besar gempa pembangkit yaitu 6,5 Mw, dan waktu yang dapat digunakan untuk evakuasi adalah maksimal 30 menit. dari perbandingan

tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar magnitudo gempa pembangkit maka semakin sedikit waktu yang dapat digunakan untuk evakuasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa jika terjadi gempa bumi dengan magnitudo 7,2 dan 7,3 Mw di sekitar Selat Makassar maka gelombang tsunami yang akan dihasilkan adalah gelombang dengan ketinggian maksimum 7,91 dan 8,04 cm dengan waktu tiba pada menit ke-18. Ketinggian gelombang tsunami dipengaruhi oleh magnitudo gempa, semakin besar magnitudo gempa maka semakin besar ketinggian yang dihasilkan. Dari data ketinggian tersebut maka dapat dilihat bahwa resiko bencana tsunami di Kota Mamuju, Sulawesi Barat sangat tinggi. Oleh karena itu, untuk meminimalisir kerusakan, kerugian dan jatuhnya korban jiwa akibat bencana tsunami maka pemerintah Kota Mamuju perlu membuat skema mitigasi dengan memperhatikan hasil dari penelitian. Salah satu mitigasi yang mungkin dapat dilakukan adalah dengan membuat peta jalur evakuasi, dimana jalur tersebut dapat diakses dengan waktu kurang dari 12 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- Baeda, A.Y., Dadang, A.S., Hasdinar, U., & Taufiqur, R. (2015). Tsunami Mitigation Plan for Manakarra Beach of West Sulawesi Province, Indonesia. *In Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 134–40.
- Fajriani. (2021). Analisis Seismitas Sulawesi Barat Berdasarkan Data Gempa 1967-2021.
- Honthaas, C., Rehault, J-P., Maury, R.C., Bellon, H., Hemond, C., Malod, J-A., Cornee, J-J., & Villeneuve, M. (1998). A Neogene Back-Arc Origin for the Banda Sea Basins: Geochemical and Geochronological Constraints from the Banda Ridges (East Indonesia). *Tectonophysics*, 298(4), 297-317.
- Khoiridah, S., & Santosa, B.J. (2015). Estimasi Centroid Momen Tensor (CMT), Bidang Sesar, Durasi Rupture, Dan Pemodelan Deformasi Vertikal Sumber Gempa Bumi Studi Potensi Bahaya Tsunami Di Laut Selatan Jawa. *JURNAL SAINS DAN SENI POMITS*, 3(2), 2337–3520.
- Mambu, Brian, Tamuntuan, G.H., & Pasau, G. (2019). Simulasi Ketinggian Dan Waktu Tiba Gelombang Tsunami Di Tahuna Sebagai Upaya Mitigasi Bencana. *Jurnal MIPA UNSRAT Online*, 8(1), 13–16.
- Mardiatno, D., Malawani, M.N., Annisa, D.N., & Wacano, D. (2017). Review on Tsunami Risk Reduction in Indonesia Based on Coastal and Settlement Typology. *Indonesian Journal of Geography*, 49(2), 186–94.
- Meilano, I., Salman, R., Susilo, S., Shiddiqi, H.A., Supendi, P., Lythgoe, K., Tay, C., Bradly, K., Rahmadani, S., Kristyawan, S., & Yun, S.H. (2023). The 2021 M W 6.2 Mamuju, West Sulawesi, Indonesia Earthquake: Partial Rupture of the Makassar Strait Thrust. *Geophysical Journal International* 233(3), 1694–1707. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac512>.
- Mutaqin, B.W., Lavigne, F., Hadmoko, D.S., & Ngalawani, M.N. (2019). Volcanic Eruption-Induced Tsunami in Indonesia: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing.

- Nurfitriani, N., Mamuaya, G.E., Djamaluddin, R., & Yatimantoro, T. (2018). Analisis Potensi Rambatan Tsunami Di Pantai Utara Desa Dulukapa Dan Deme 1 Kabupaten Gorontalo Utara Untuk Mitigasi Bencana Tsunami. *Majalah Ilmiah Globe*, 20(2), 68. DOI:10.24895/MIG.2018.20-2.767.
- Oishi, Y., Imamura, F., & Sugawara, D. (2015). Near-Field Tsunami Inundation Forecast Using the Parallel TUNAMI-N2 Model: Application to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Combined with Source Inversions. *Geophysical Research Letters*, 42(4), 1083–1091.
- Pandey, F., Pasau, G., & Tongkukut, S.H.J. (2015). Simulasi Penjalaran Tsunami Di Beberapa Pantai Di Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana. *Jurnal MIPA UNSRAT online*, 4(2), 103–107.
- Pasau, G., Tamuntuan, G.H., Tanauma, A. (2019). Numerical Modelling for Tsunami Wave Propagation (Case Study: Manado Bays). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing.
- Purnama, A.A.D.S., Paramarta, I.B.A., & Rahman, M.S.S. (2019). Estimasi Run Up Dan Waktu Tiba Tsunami di Daerah Bali Berdasarkan Simulasi TOAST. *Buletin Fisika*, 20(1), 29-35.
- Said, M.L., Ramadhan, A.S., Kusmiran, A., & Priadi, R. (2023). Analisis Kecocokan Nilai PGA Metode Donovan Terhadap Data Acceletograph (Studi Kasus Gempa Mamuju, 14 Januari 2021). *JoP*, 8(2), 29–36.
- Selva, J., Amato, A., Armigliato, A., Basili, R., Bernardi, F., Brizuela, B., & Cerminara, M. (2021). Tsunami Risk Management for Crustal Earthquakes and Non-Seismic Sources in Italy. *La Rivista del Nuovo Cimento*, 44(2), 69–144.
- Susanto, E., Arsyad, M., & Setyahagi, A.R. (2020). Pemodelan Waktu Tiba Gelombang Tsunami di Wilayah Pesisir Provinsi Sulawesi Barat. *Prosiding Seminar Nasional Fisika PPs UNM 2*, 80–83.
- Zakaria, Z., & Sidarto, S. (2015). Aktifitas Tektonik Di Sulawesi Dan Sekitarnya Sejak Mesozoikum Hingga Kini Sebagai Akibat Interaksi Aktifitas Tektonik Lempeng Tektonik Utama Di Sekitarnya. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 16(3), 115-127.