

Pemodelan Penjalaran Gelombang Tsunami dan Inundasi di Daerah Bolaang Mongondow Selatan sebagai Akibat Gempa pada Zona Selatan Subduksi Ganda Laut Maluku (Studi Kasus: Desa Salongo dan Desa Pinolosian)

Risnawati M. Popoji*, Gerald Hendrik Tamuntuan, Guntur Pasau

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sam Ratulangi, Jl. Kampus Unsrat Kleak, Manado, Sulawesi Utara, 95115

*Corresponding author: risnawatimp@gmail.com

Abstrak

Telah dilakukan penelitian untuk mengestimasi waktu penjalaran gelombang tsunami dan tinggi gelombang tsunami serta pembuatan peta penjalaran gelombang tsunami yang dapat menerjang Desa Salongo dan Desa Pinolosian dengan menggunakan software TUNAMI-N2. Simulasi menggunakan skenario gempabumi yang berkekuatan $8,5 M_w$ pada 2 lokasi penelitian dengan titik koordinat Desa Salongo $123^{\circ}55'13,10'' - 124^{\circ}03'9,10''$ BT dan $0^{\circ}19'20,12'' - 0^{\circ}25'8,38''$ LU dan Desa Pinolosian $124^{\circ}04'17'' - 124^{\circ}12'10''$ BT dan $0^{\circ}18'30'' - 0^{\circ}28'38''$ LU diberikan 4 titik pengamatan atau tide gauge pada setiap lokasi penelitian untuk mendapatkan waktu penjalaran dan tinggi gelombang tsunami. Hasilnya menunjukkan bahwa tsunami dengan perkiraan kekuatan gempabumi $8,5 M_w$ pada lokasi penelitian memiliki ketinggian maksimum penjalaran gelombang tsunami mencapai ketinggian 0,74 m pada Desa Salongo yang di kategorikan rendah dan ketinggian 1,15 m pada Desa Pinolosian dikategorikan sedang.

Kata kunci: Gelombang Tsunami; Inundasi; TUNAMI-N2.

Modeling of Tsunami Wave Propagation and Inundation in the South Bolaang Mongondow Area as a Result of Earthquake in the Southern Zone of the Maluku Sea Double Subduction (Case Study: Salongo Village and Pinolosian Village)

Abstract

Research has been carried out to estimate the time of tsunami wave propagation and tsunami wave height and create a tsunami wave propagation map that can hit Salongo Village and Pinolosian Village using TUNAMI-N2 software. The simulation uses a powerful earthquake magnitude of $8,5 M_w$ scenario at 2 research locations with the coordinate points of Salongo Village $123^{\circ}55'13,10'' - 124^{\circ}03'9,10''$ E dan $0^{\circ}19'20,12'' - 0^{\circ}25'8,38''$ N and Pinolosian Village $124^{\circ}04'17'' - 124^{\circ}12'10''$ E dan $0^{\circ}18'30'' - 0^{\circ}28'38''$ N, 4 observation points or tide gauges were given at each research location to obtain the propagation time and height of tsunami waves. The results showed that the tsunami with an estimated earthquake strength $8,5 M_w$. The research site's maximum height was 0,74 m in Salongo Village, categorized as low, and 1,15 m in Pinolosian Village, as moderate.

Keywords: Inundation; Tsunami Wave; TUNAMI-N2.

PENDAHULUAN

Bagian Sulawesi yang sangat rawan gempa salah satunya daerah Sulawesi Utara. Lokasi ini merupakan daerah dengan tingkat aktivitas gempabumi yang sangat tinggi. Hal ini karena daerah Sulawesi Utara dan sekitarnya terletak di antara batas-batas lempeng yang saling berinteraksi satu lempeng dengan lempeng lainnya, interaksi ini mengakibatkan terbentuknya jalur subduksi dan sesar (Mustakim, 2017). Interaksi lempeng seperti pertemuan tiga lempeng konvergen, akan menimbulkan pengembangan semua jenis struktur.

Termasuk Subduksi Laut Sulawesi (*North Sulawesi Trench / Minahasa Trench*), Sesar Gorontalo, *Sulu Thrust*, dan Tumbukan Ganda Laut Maluku (*Molluca sea collision*). Tumbukan Ganda Laut Maluku memiliki konfigurasi penunjaman yang sangat unik dan telah diamati terdapat penunjaman *slab* dari lempeng Maluku, lempeng tersebut menunjам ke dua arah yaitu timur dan barat dengan bentuk seperti U terbalik (Widiyantoro, 2007).

Tsunami merupakan istilah dari bahasa Jepang yang terdiri dari dua kata, yaitu *Tsu* dan *Nami*. *Tsu* berarti pelabuhan dan *Nami* adalah gelombang besar. Lebih tepatnya, tsunami diartikan sebagai suatu gelombang laut yang terjadi secara mendadak yang disebabkan karena kestabilan air laut terganggu akibat gempa bumi (tektonik, vulkanik) dan benda angkasa yang jatuh di dasar laut (Pasaribu, 2005).

Tsunami merupakan fenomena alam yang menyatakan suatu gelombang laut yang terjadi akibat gempa bumi tektonik atau vulkanik dan benda angkasa yang jatuh di dasar laut. Tsunami mempunyai panjang gelombang maksimum yang mencapai pantai sekitar 4 – 24 meter (Rohim, 2009). Tsunami merupakan gelombang yang disebabkan oleh gerakan vertikal secara tiba-tiba di dasar laut sehingga menyebabkan perubahan kolom air laut yang dibangkitkan oleh bermacam gangguan di dasar samudra. Gangguan ini dapat berupa aktivitas seismik, pergeseran lempeng, gunung meletus, longsor di dasar atau di atas laut, meteorologis (badai tropis) dan tubrukan benda langit. Tsunami tidak terlihat saat posisinya masih berada jauh di tengah lautan, namun ketika mencapai wilayah dangkal gelombang tersebut bergerak cepat dan akan semakin membesar (Bryant, 2008).

Gelombang tsunami dan gelombang biasa sebagian besar memiliki terminologi yang sama, sehingga panjang gelombang, kecepatan fase, periode gelombang dan tinggi gelombang menjadi parameter utama yang menggambarkan gelombang tsunami. Tsunami memiliki panjang gelombang berkisar 100 km di laut lepas dan tinggi gelombang dapat mencapai 30 m. Gelombang tsunami dapat menyapu seluruh yang ada disekitar pantai. Tsunami yang diawali dengan patahan di dasar laut membuat air laut menjadi surut dan setelah itu dengan energi yang terkumpul akan membuat air laut mengalir kedarat dengan kecepatan *run-up* yang bisa mencapai 25 – 100 km/jam. Tsunami datang terjadi kurang lebih 15 menit setelah gempa (Robke dan Vott, 2017). Tinggi gelombang tsunami bisa berubah disebabkan adanya konversi energi dari bentuk energi kinetik menjadi energi potensial. Berkurangnya kecepatan gelombang yang artinya terdapat perpindahan energi menjadi energi potensial yang menyebabkan bertambah tingginya gelombang. Tinggi tsunami disebabkan karena terjadinya konversi energi kinetik gelombang menjadi energi potensial. Artinya, kehilangan energi akibat berkurangnya kecepatan ditransfer ke dalam bentuk pembesaran tinggi gelombang (*run-up*). Patahan dapat mencapai kedalaman 15 meter sepanjang ratusan kilometer (Titov, 2011).

TUNAMI adalah singkatan dari *Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation*. TUNAMI-N2 didasarkan pada teori linear di dalam laut atau teori perairan dangkal laut dan *run-up* di darat dengan menggunakan analisis hidrodinamik berbasis persamaan-persamaan kontinuitas dan persamaan kekekalan momentum sebagai persamaan pengatur (*governing equation*) serta syarat-syarat batas tertentu dan persamaan perairan dangkal yang diselesaikan dengan menggunakan skema *Leap-Frog* untuk laut dangkal dan dalam. TUNAMI-N2 memiliki kemampuan yang lebih akurat dibandingkan dengan *software* lain karena menggunakan solusi *Bousinessq* (Imamura et al., 2006).

Quantum GIS atau Q-GIS merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk keperluan pengolahan data geospasial. Quantum GIS (*Geographic Information System*) adalah *software* SIG (Sistem Informasi Geografis) multiplatform. Quantum GIS ini dapat digunakan untuk input data SIG dan pengolahan data geospasial sebagai pilihan alternatif SIG komersial seperti *ArcView*, *ArcGIS* atau *Mapinfo Professional* (Astrini, 2012).

Inundasi atau genangan adalah hasil penjalaran tsunami yang menempuh jarak jauh ke pedalaman dan merupakan pengukuran horizontal jalur tsunami. Genangan bisa terjadi hingga 300 meter atau lebih menutupi daerah dengan puing-puing. Saat tsunami tiba di garis pantai, gelombang pecah dan menjalar ke daratan. Penggenangan didefinisikan sebagai *maximum horizontal penetration of the tsunami from the shoreline*, sehingga dapat diartikan sebagai jarak horizontal antara tempat yang tertutup air sebagai akibat penjalaran gelombang tsunami di sepanjang daratan terhadap titik acuan tertentu yang umumnya berupa garis pantai. Penggenangan maksimum umumnya diukur dari jarak horizontal penetrasi maksimum gelombang tsunami ke wilayah daratan hingga masing-masing garis pantai yang dilanda tsunami (Pertiwi et al., 2018).

METODOLOGI

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Agustus 2023 sampai Juli 2024 di Laboratorium Fisika Lanjut, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sam Ratulangi.

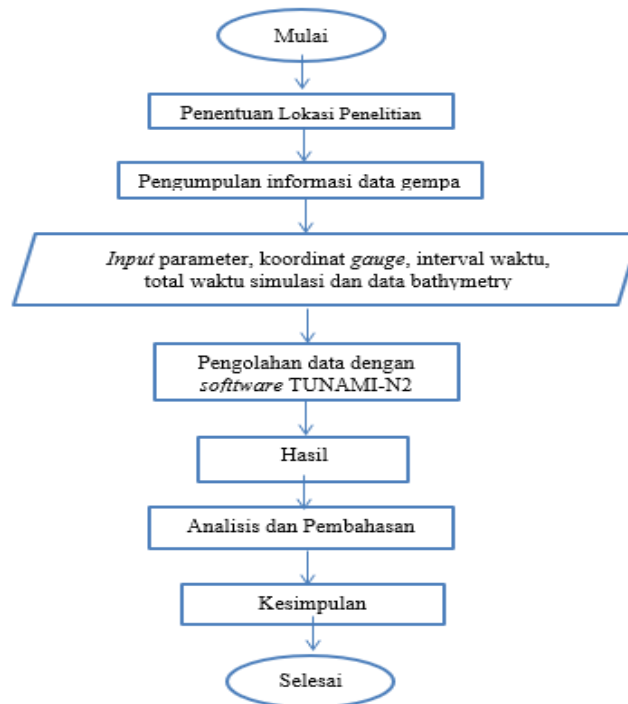
Alat dan Data Penelitian

Alat yang digunakan dalam proses penelitian

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1. Laptop | 5. Perangkat lunak TUNAMI-N2 |
| 2. Perangkat lunak GMT | 6. Perangkat lunak Quantum GIS |
| 3. Perangkat lunak Excel | 7. Data Bathymetry |
| 4. Perangkat lunak Cygwin | 8. Data Topografi |

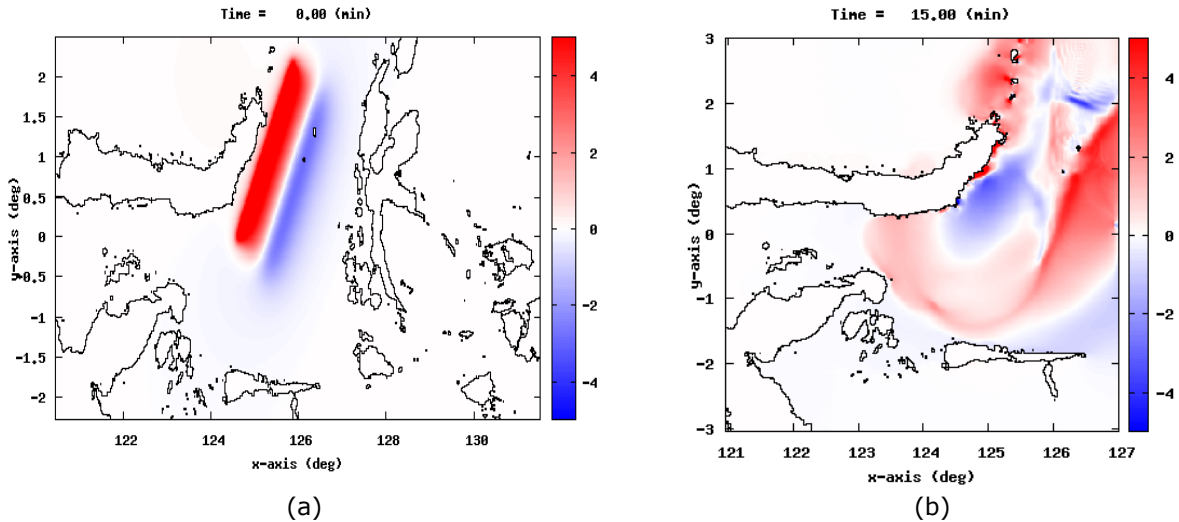
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemodelan komputasi. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak TUNAMI-N2 dan pemetaan menggunakan Perangkat Lunak Quantum GIS. Penjalaran tsunami di Desa Salongo dan Desa Pinolosian disimulasikan sebagai bahan mitigasi untuk mengetahui waktu tiba dan tinggi gelombang tsunami serta membuat peta inundasi akibat gelombang tsunami.

Diagram Alir Penelitian



HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh dalam pemodelan tsunami antara lain adalah waktu penjalaran tsunami dan ketinggian tsunami dan peta rendaman tsunami (Chaeroni et al., 2013), yang dibangkitkan oleh gempa yang berkekuatan 8,5 Mw pada lokasi sesar $124^{\circ}38'44,11''$ BT, $0^{\circ}02'11''$ LS. Pusat gempa, Panjang dan lebar sesar yang di simulasikan pada Koordinat $121^{\circ}00'1,54''$ BT – $3^{\circ}00'2,20''$ LS dan $127^{\circ}00'2,54''$ BT – $3^{\circ}00'5,20''$ LU yang merupakan layer 1 daerah penelitian seperti pada gambar 1.



Gambar 1. (a) layer 1 penelitian menit ke-0 dan (b) penjalaran tsunami menit ke-15.

Gambar 1 menunjukkan adanya perubahan permukaan air laut ketika terjadi gempa pada menit ke-0 berupa kenaikan permukaan air laut yang digambarkan oleh area berwarna merah sedangkan penurunan permukaan air laut digambarkan oleh area berwarna biru yang disebabkan oleh deformasi berupa pemekaran bidang patahan yang terjadi (Pandey et al., 2015) kemudian pada menit ke-15 terjadi penjalaran gelombang tsunami.

Pemodelan penjalaran di simulasikan dengan parameter pembangkit gempa ditampilkan pada tabel berikut :

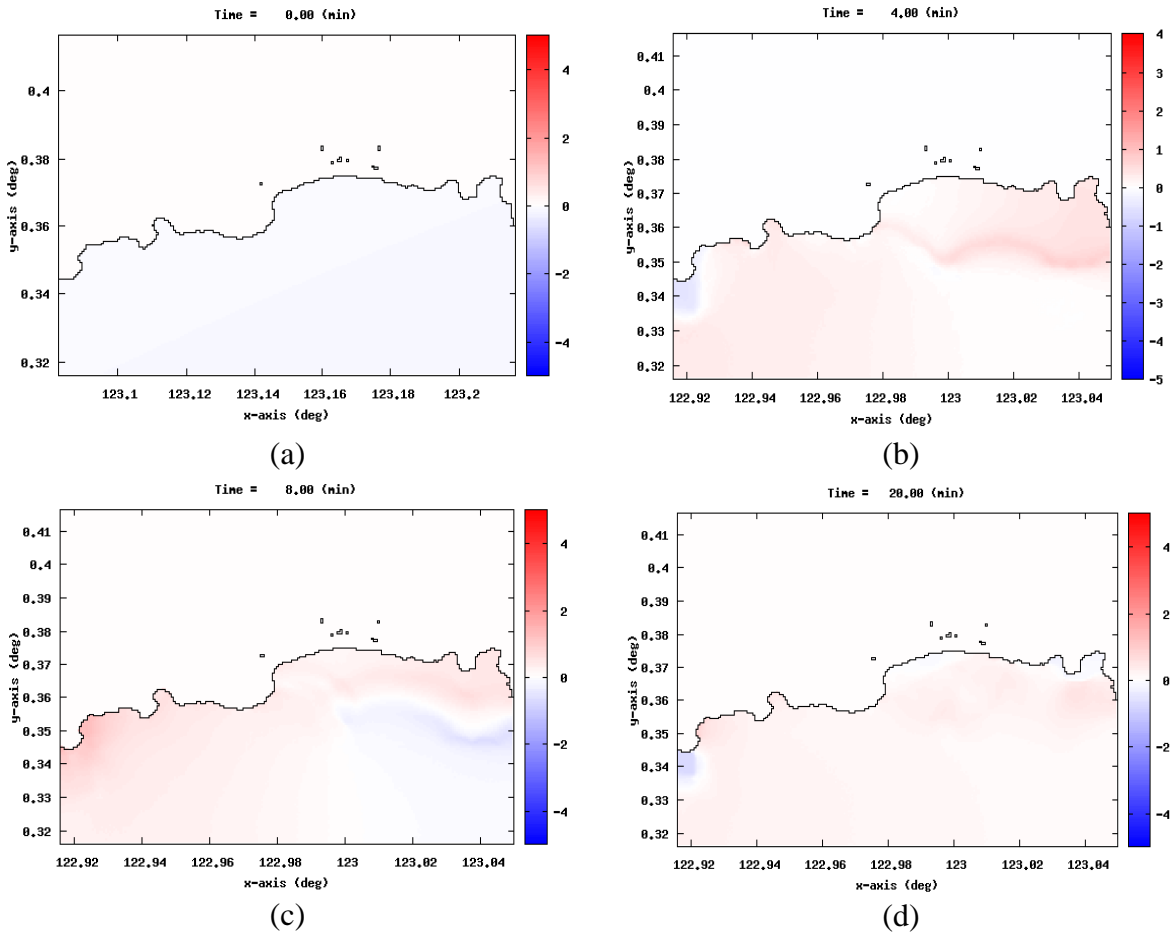
Tabel 1. Tabel Parameter Pembangkit Gempa

Parameter	Nilai
<i>Depth (km)</i>	10
<i>Slip (m)</i>	30
<i>Dip</i>	10
<i>Strike</i>	210
<i>Slip Angle</i>	89
<i>Length (km)</i>	572
<i>Width (km)</i>	130

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

a. Skenario Penjalaran untuk Desa Salongo

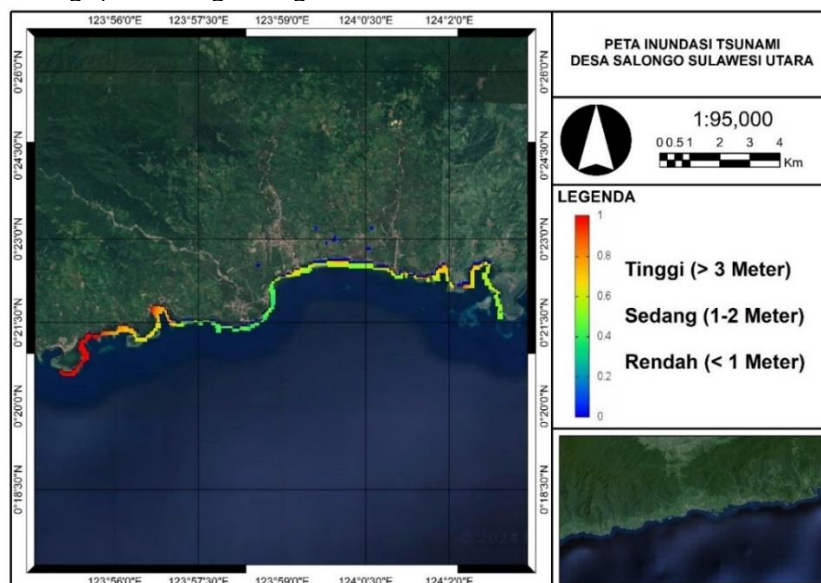
Skenario penjalaran gelombang tsunami disimulasikan di Desa Salongo pada koordinat 123°55'13,10" – 124°03'9,10" BT dan 0°19'20,12" – 0°25'8,38" LU :



Gambar 2. Penjalaran Gelombang Tsunami di Desa Salongo.

Dari simulasi yang telah dilakukan diperoleh hasil pemodelan pada *layer* 4 Desa Salongo ditunjukkan oleh Gambar 2 Dengan (a) menunjukkan adanya perubahan permukaan air laut berupa penurunan permukaan air laut digambarkan oleh area berwarna biru. (b) menunjukkan kenaikan permukaan air laut pada menit ke-4. (c) menunjukkan penjalaran gelombang tsunami pada menit ke-8. (d) menunjukkan di menit ke-20 gelombang tsunami sudah sampai pesisir pantai Desa Salongo.

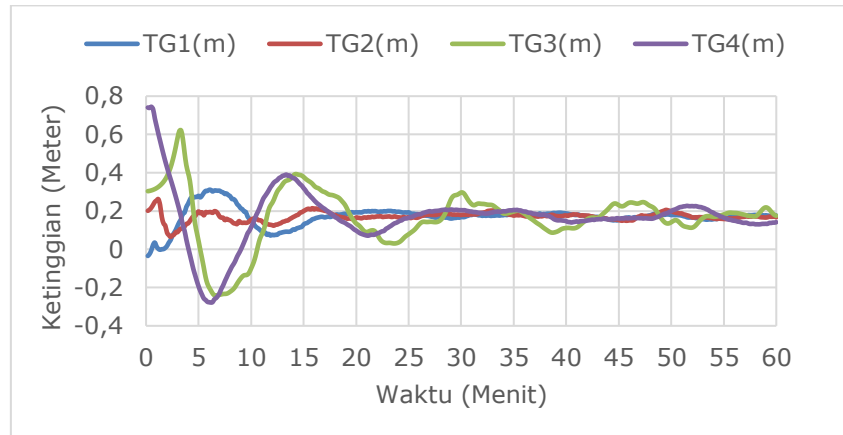
Berdasarkan hasil simulasi penjalaran tsunami atau inundasi juga didapatkan hasil pemetaan *run-up* di Desa Salongo, Bolaang Mongondow Selatan :



Gambar 3. Peta Inundasi Desa Salongo Sulawesi Utara.

Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa wilayah yang terkena penjalaran gelombang tsunami tertinggi terdapat pada area berwarna merah, dengan ketinggian gelombang maksimum terdapat pada *tide gauge* 4 yaitu 0,74 meter pada waktu penjalaran 0,5 menit (setara 30 detik). Gelombang tsunami yang dihasilkan gempa bumi dengan magnitudo 8,5 M_w saat menerjang Desa Salongo menghasilkan ketinggian tsunami yang bervariasi dengan *range run-up* 0 – 1 m, dan termasuk dalam kategori rendah.

Berikut grafik ketinggian penjalaran gelombang tsunami pada *tide gauge layer* 4 Desa Salongo :

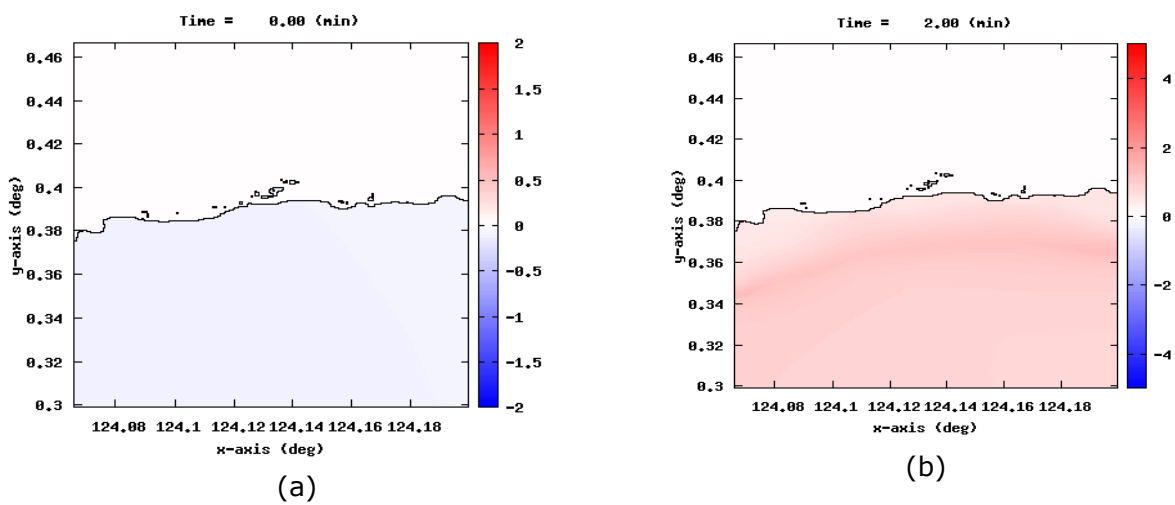


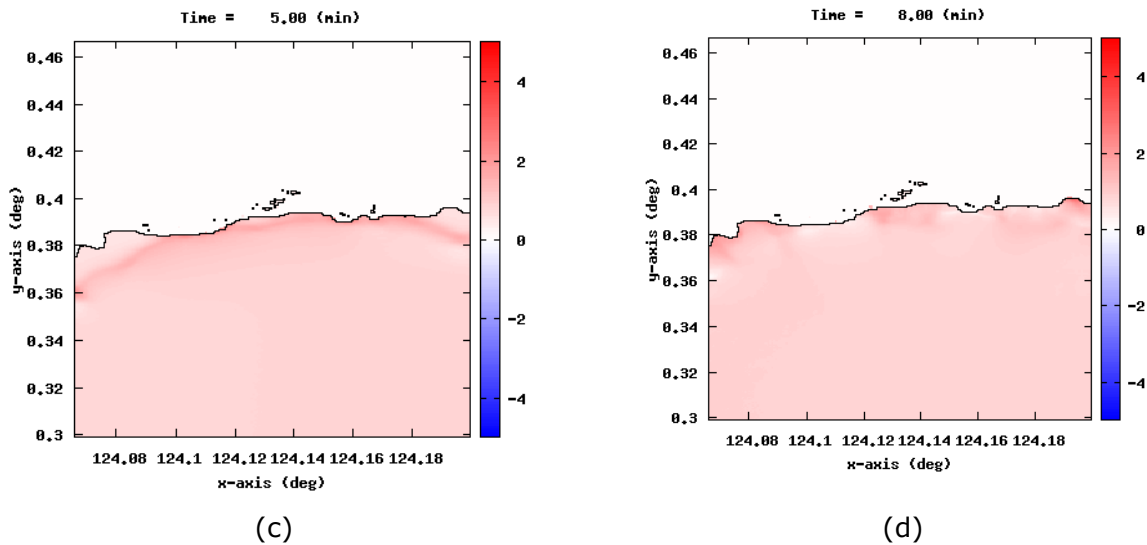
Gambar 3. Grafik Penjalaran Gelombang Tsunami pada *tide gauge layer* 4 Desa Salongo.

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa ketinggian tiap *tide gauge* bervariasi, pada *tide gauge* 1 ketinggian maksimum ada pada menit ke-6 yaitu pada ketinggian 0,31 m, *tide gauge* 2 ketinggian maksimum pada menit ke-1 dengan ketinggian 0,21 m, *tide gauge* 3 pada menit ke-3 dengan ketinggian 0,62 m dan *tide gauge* 4 ketinggian maksimum pada menit ke 0,5 (setara 30 detik) dengan ketinggian 0,74 m, sehingga berdasarkan Tabel ketinggian maksimum gelombang tsunami didapatkan ketinggian gelombang tsunami maksimum untuk Desa Salongo berada pada *tide gauge* 4.

b. Skenario Penjalaran untuk Desa Pinolosian

Skenario penjalaran gelombang tsunami disimulasikan di Desa Pinolosian pada koordinat $124^{\circ}04'17'' - 124^{\circ}12'10''\text{BT}$ dan $0^{\circ}18'30'' - 0^{\circ}28'38''\text{LU}$:

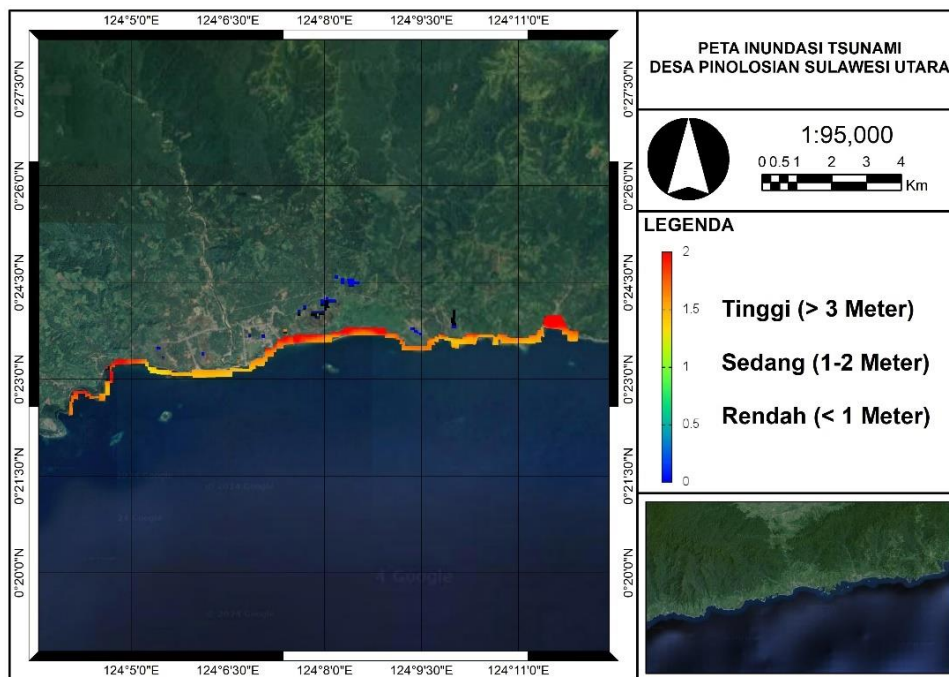




Gambar 4. Penjalaran Gelombang Tsunami di Desa Pinolosian.

Berdasarkan simulasi yang dilakukan diperoleh hasil pemodelan pada *layer* 4 ditunjukkan oleh Gambar 4 Dengan (a) menunjukkan adanya perubahan permukaan air laut berupa penurunan permukaan air laut digambarkan oleh area berwarna biru. (b) menunjukkan kenaikan permukaan air laut pada menit ke-4. (c) menunjukkan penjalaran gelombang tsunami pada menit ke-5. (d) menunjukkan di menit ke-8 gelombang tsunami sudah sampai pesisir pantai Desa Pinolosian.

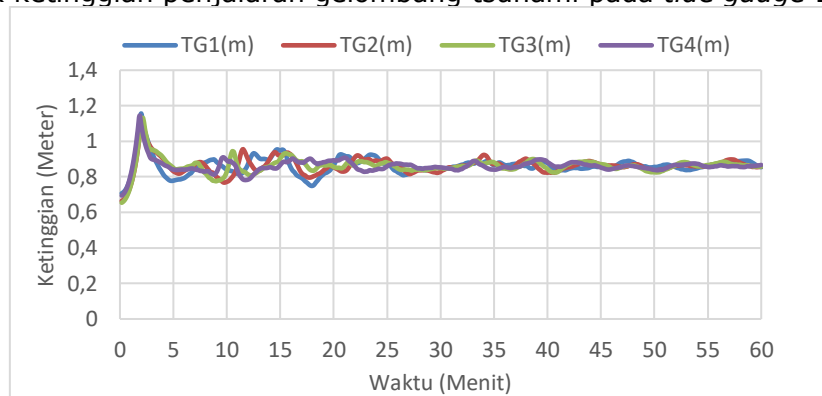
Berdasarkan hasil simulasi penjalaran tsunami atau inundasi juga didapatkan hasil pemetaan *run-up* di Desa Pinolosian, Bolaang Mongondow Selatan :



Gambar 5. Peta Inundasi Desa Pinolosian Sulawesi Utara.

Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa wilayah yang terkena penjalaran gelombang tsunami tertinggi terdapat pada area berwarna merah, dengan ketinggian gelombang maksimum terdapat pada *tide gauge* 1 yaitu 1,15 m pada waktu penjalaran 2 menit. Gelombang tsunami yang dihasilkan gempa bumi dengan magnitudo 8,5 M_w saat menerjang Desa Pinolosian menghasilkan ketinggian tsunami yang bervariasi dengan *range run-up* 0 – 2 m, dan termasuk dalam kategori sedang.

Berikut grafik ketinggian penjalaran gelombang tsunami pada *tide gauge* Desa Pinolosian :



Gambar 6. Grafik Penjalaran Gelombang Tsunami pada *tide gauge* layer 4 Desa Pinolosian.

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa ketinggian tiap *tide gauge* bervariasi, pada *tide gauge* 1 ketinggian maksimum ada pada menit ke-2 yaitu pada ketinggian 1,15 m, *tide gauge* 2 ketinggian maksimum pada menit ke-2 dengan ketinggian 1,11 m, *tide gauge* 3 pada menit ke-2 dengan ketinggian 1,13 m dan *tide gauge* 4 ketinggian maksimum pada menit ke-1,8 dengan ketinggian 1,14 m, sehingga berdasarkan Tabel ketinggian maksimum gelombang tsunami didapatkan ketinggian gelombang tsunami maksimum untuk Desa Pinolosian berada pada *tide gauge* 1.

Penelitian terdahulu yang pernah dilakukan oleh (Mambu *et al.*, 2019) menunjukkan waktu penjalaran dan ketinggian maksimum khususnya di Tahuna, Sulawesi Utara dengan sumber gempa yang dibangkitkan oleh gempa di Laut Sulawesi dengan magnitudo 8,0 M_w . Gempa bumi dengan magnitudo 8,0 M_w menghasilkan ketinggian gelombang tsunami maksimum 0,23 m dengan waktu tiba sekitar 50 menit setelah tsunami dibangkitkan.

KESIMPULAN

Berdasarkan Simulasi penjalaran gelombang tsunami di Desa Salongo dan Desa Pinolosian telah didapatkan hasil penjalaran berupa waktu penjalaran dan ketinggian gelombang tsunami berbeda-beda pada setiap titik pengamatan atau *Tide gauge* menggunakan skenario magnitudo gempa 8,5 M_w . Ketinggian maksimum gelombang tsunami Desa Salongo terjadi pada *Tide gauge* 4 dengan ketinggian 0,74 meter pada waktu penjalaran gelombang tsunami di menit ke-0,5 sedangkan ketinggian maksimum gelombang tsunami untuk Desa Pinolosian terjadi pada *Tide gauge* 1 dengan ketinggian 1,15 meter pada waktu penjalaran gelombang tsunami di menit ke-2. Skenario penjalaran gelombang tsunami didapatkan peta inundasi untuk Desa Salongo dan Desa Pinolosian seperti pada Gambar 3 dan Gambar 6, dengan skala yang sama yaitu 1:95.000 (satu berbanding sembilan puluh lima ribu) yang berarti 1 cm peta sama dengan 95.000 cm pada jarak sebenarnya, dan dengan legenda ketinggian gelombang tsunami yaitu < 1 meter di kategorikan rendah, 1 – 2 meter di kategorikan sedang dan > 3 meter di kategorikan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Astrini, R. 2012. Modul Pelatihan Quantum GIS Tingkat Dasar untuk Pemetaan Evakuasi Tsunami. Mataram.
- Bryant, E. (2008). *Tsunami: The Underrated Hazard*. Springer Berlin Heidelberg.
- Chaeron., Hendriyono, W., dan Kongko, W. 2013. Pemodelan Tsunami dan Pembuatan Peta Rendaman untuk Keperluan Mitigasi di Teluk Teleng, Pacitan. Yogyakarta. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. **4(2)**: 87-97.
- Imamura, F., A.C. Yalciner, dan G. Ozyurt. 2006. *Tsunami Modelling Manual* (TUNAMI model). Jepang. Tohoku University.
- Mambu, B., Tamuntuan, G.H., dan Pasau, G. 2019. Simulasi Ketinggian dan Waktu Tiba Gelombang Tsunami di Tahuna sebagai Upaya Mitigasi Bencana. Jurnal MIPA UNSRAT online. **8(1)**: 13-16.
- Mustakim. 2017. Analisis Seismisitas pada Daerah Sulawesi Utara. Universitas Hasanuddin. Makassar. Jurnal Geoceles. **1(2)**: 53-61.

- Pandey, F., Pasau, G., dan Tongkukut, S.H.J. (2015). Simulasi Penjalaran Gelombang Tsunami di Beberapa Pantai di Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana. *Jurnal MIPA UNSRAT online*. **4(2)**: 103-107.
- Pasaribu, R. 2005. *Tsunami, Penyebab Dan Akibatnya*. Badan Meteorologi dan Geofisika. Jakarta.
- Pertiwi, I.I., M.H. Fattah., A. Rauf. 2018. *Estimation of Tsunami Inundation and Disaster Mitigation in Bulukumba, Indonesia*. *Jurnal Geofisika*. **16(1)**: 01-08.
- Robke, B.R., dan Vott, A. 2017. *The Tsunami Phenomenon*. *Progress in Oceanography*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2017.09.003>.
- Rohim, F. 2009. *Tsunami Simulation Using TUNAMI-N2 To Identify Affected Area By Tsunami As Mitigation*. Universitas Brawijaya. Malang.
- Titov, Vasily., dan González, Frank. 1997. *Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model*. NOAA Tech. Memorandum ERL PMEL-112.
- Widiyantoro, S. 2007. *Fisika dan Struktur Interior Bumi*. Badan Meteorologi dan Geofisika Jakarta, ISBN 978-979-1241-06-09.