

# PEMODELAN INUNDASI DAN WAKTU TIBA TSUNAMI DI KOTA BITUNG, SULAWESI UTARA BERDASARKAN SKENARIO GEMPABUMI LAUT MALUKU

(*Tsunami Inundation and Arrival Time Modeling in Bitung City, North Sulawesi Based on Molucca Sea Earthquake Scenario*)

**Sesar Prabu Dwi Sriyanto, Nurfitriani, Muhammad Zulkifli, dan Sandy Nur Eko Wibowo**

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Geofisika Manado

Jl. Harapan No. 42, Manado, Indonesia

E-mail: [sesar.sriyanto@bmgk.go.id](mailto:sesar.sriyanto@bmgk.go.id)

*Diterima: 12 Februari 2019; Direvisi: 12 Mei 2019; Disetujui untuk Dipublikasikan: xxx*

## ABSTRAK

Kota Bitung sebagai salah satu kawasan strategis dan pusat perekonomian di Sulawesi Utara, berpotensi terdampak oleh bencana tsunami karena berada di pesisir Laut Maluku yang bisa menjadi lokasi pusat gempa bumi besar pemicu tsunami. Untuk mengetahui potensi area terdampak dan waktu tiba tsunami di wilayah Bitung, dilakukan pemodelan penjalaran tsunami dengan skenario gempa bumi Mw 7,9 dengan episenter di Laut Maluku menggunakan perangkat lunak TUNAMI-N2 (*Tohoku University's Numerical Analysis Model Investigation of Tsunami No 2*). Data yang digunakan berupa parameter skenario gempa bumi pembangkit dan data elevasi. Data elevasi terdiri dari data topografi primer hasil pengukuran lapangan menggunakan altimeter digital dan data sekunder berupa data batimetri dari GEBCO (*General Bathymetric Chart of The Ocean*) dan data topografi daratan SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) dari USGS (*United States Geological Survey*). Hasil pemodelan menunjukkan bahwa tsunami pertama kali mencapai di wilayah Bitung tepatnya di pantai timur Pulau Lembeh pada detik ke-520 setelah gempa bumi. Ketinggian maksimum tsunami bisa mencapai 7,625 meter, sedangkan inundasi terjauh dan potensi area tergenang masing-masing mencapai 750 meter dan 2,1 km<sup>2</sup>. Lokasi dengan tingkat bahaya tertinggi ada di sebelah barat Pelabuhan Bitung karena topografi yang landai dan berhadapan dengan perairan yang berbentuk teluk sehingga terjadi amplifikasi gelombang. Pantai yang berbentuk teluk ini juga menyebabkan gelombang tertinggi terjadi pada gelombang yang kedua.

**Kata kunci:** pemodelan tsunami, TUNAMI-N2, waktu tiba tsunami, inundasi

## ABSTRACT

*Bitung City, one of strategic areas and economic center in North Sulawesi, is potentially affected by tsunami disaster because it is located in the coast of the Molucca Sea that could be the epicenter of tsunamigenic earthquake. To find out the impacted areas and tsunami arrival time in Bitung, we conducted tsunami propagation modeling triggered by earthquake scenario Mw 7.9 using TUNAMI-N2 (Tohoku University's Numerical Analysis Model Investigation of Tsunami No 2) software. The data used were earthquake scenario parameters and elevation data. The elevation data consisted of primary topographic data from field measurements using a digital altimeter and secondary data, that consisted of bathymetry data from GEBCO (General Bathymetric Chart of The Ocean) and SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) topography data from USGS (United States Geological Survey). The results showed that tsunami reached Bitung region in the east coast of Lembeh island at 520 seconds after earthquake origin time. The maximum height of tsunami could reach 7.625 meters, while the farthest inundation and potential flooded areas reached 750 meters and 2.1 km<sup>2</sup>, respectively. The highest hazard level was in the west of Bitung Port due to the sloping topography and facing the bay shaped that could cause wave amplification. This bay-shaped coast also caused the highest waves to occur in the second wave.*

**Keywords:** tsunami modeling, TUNAMI-N2, tsunami arrival time, inundation

## PENDAHULUAN

Kota Bitung merupakan salah satu kota yang menjadi fokus pembangunan di Sulawesi Utara karena Bitung telah ditetapkan sebagai salah satu Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) di Indonesia

(Republik Indonesia, 2014). Kota yang terletak di pesisir timur Sulawesi Utara ini juga ditetapkan menjadi Kawasan Strategis Nasional di Provinsi Sulawesi Utara (Pemerintah Provinsi Sulawesi Utara, 2014). Kota ini diproyeksikan bisa menjadi pusat perekonomian yang menunjang wilayah utara

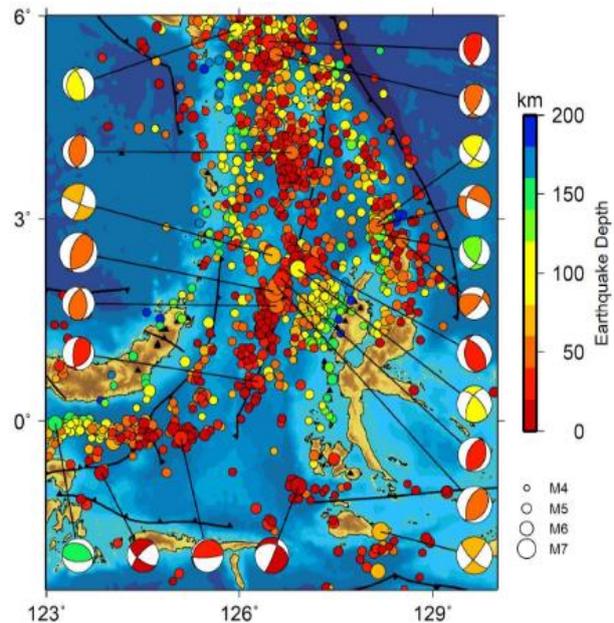
dan timur Indonesia. Pembangunan infrastruktur seperti jalan tol Manado-Bitung dan peningkatan kapasitas Pelabuhan Bitung menjadi pelabuhan internasional, serta rencana pembangunan jalur kereta api Manado-Bitung merupakan beberapa langkah yang dilakukan pemerintah untuk mendukung Bitung sebagai salah satu wilayah penting di Sulawesi Utara. Meskipun secara perekonomian Bitung memiliki lokasi yang strategis, namun bila ditinjau dari potensi kebencanaan Bitung termasuk wilayah yang rawan dilanda bencana geologi, salah satunya adalah tsunami. Hal ini disebabkan karena Kota Bitung menghadap langsung ke perairan Laut Maluku yang berpotensi menjadi lokasi gempa bumi besar pembangkit tsunami.

Tsunami merupakan salah satu bencana alam yang sangat merusak, seperti kejadian tsunami tahun 1883 akibat letusan Gunung Krakatau di Selat Sunda, tsunami tahun 2004 akibat gempa bumi dengan magnitudo Mw 9,3 di Aceh, hingga yang terbaru tsunami tahun 2018 akibat gempa bumi dengan magnitudo Mw 7,4 di Palu-Donggala, Sulawesi Tengah (NOAA, 2018). Tsunami didefinisikan sebagai rangkaian gelombang yang disebabkan oleh gerakan vertikal secara tiba-tiba di dasar laut sehingga menyebabkan perubahan kolom air laut (Bryant, 2008). Tsunami terbaru yang melanda Sulawesi Utara adalah tsunami yang diakibatkan oleh gempa bumi dengan magnitudo Mw 7,2 dengan lokasi episenter di tengah Laut Maluku. Gempa bumi yang dirasakan hampir di seluruh Sulawesi Utara dan Maluku Utara ini membangkitkan tsunami yang tercatat *tide gauge* di Jailolo, Tobelo, dan Manado dengan ketinggian masing-masing 9, 1, dan 3 cm (Gusman et al., 2017). Area *rupture* gempa Laut Maluku 2014 ini sekitar 100 km berarah barat daya-timur laut dan mekanisme sumber gempa utamanya berupa patahan *oblique* dominasi naik dengan *strike* 192° dan *dip* 55° (Shiddiqi et al., 2016).

Wilayah Laut Maluku merupakan salah satu zona seismik aktif. Zona seismisitas tinggi daerah Laut Maluku terkonsentrasi di zona Mayu-Talaud yang memanjang barat daya-timur laut. Pada zona ini terdapat sesar aktif yang terbentuk akibat adanya pergerakan Lempeng Pasifik ke arah barat yang tertahan oleh lempeng Laut Sulawesi di sebelah barat sehingga memunculkan busur dalam vulkanik Sangihe dan busur luar non vulkanik Talaud (Setyana & Setiadi, 2011). USGS (*United States Geological Survey*) mencatat selama kurun waktu 1900-2018 telah terjadi 13 kejadian gempa bumi dengan  $M \geq 7,0$  (USGS, 2018a).

Berdasarkan data mekanisme sumber gempa bumi yang diperoleh dari Global CMT (Ekström et al., 2012), dapat diketahui bahwa mekanisme sumber gempa bumi dengan magnitudo lebih dari 6 yang terjadi di zona Mayu-Talaud didominasi oleh gempa bumi dengan tipe patahan

naik, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Hal ini memperkuat bahwa potensi gempa bumi besar pembangkit tsunami di zona ini cukup besar karena secara historis wilayah ini telah beberapa kali terjadi gempa bumi dengan  $M \geq 7,0$  berkedalaman dangkal dan didominasi oleh gempa bumi dengan tipe patahan naik. Oleh karena itu, studi ini dilakukan untuk mengetahui potensi bahaya tsunami akibat gempa bumi dengan episenter di Laut Maluku yang bisa berdampak di pesisir Kota Bitung.



Sumber: (PUSGEN, 2017)

**Gambar 1.** Peta sebaran episenter gempa bumi di Laut Maluku dan sekitarnya dengan kedalaman  $\leq 200$  km dan magnitudo  $\geq 4$ . Mekanisme fokus merupakan solusi dari Global CMT untuk gempa bumi dengan magnitudo  $\geq 6$ .

## METODE

Data yang digunakan dalam studi ini berupa data elevasi yang dibedakan menjadi dua jenis yaitu data primer dan data sekunder. Data primer yang digunakan berupa data pengukuran topografi lapangan menggunakan *altimeter digital* dengan ketelitian alat 0,1 meter, sedangkan data sekunder yang digunakan berupa data batimetri wilayah penelitian yang diperoleh dari GEBCO (*General Bathymetric Chart of The Ocean*) dengan grid 30 *arc second* (BODC, 2018) dan data topografi daratan SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) dengan grid 1 *arc second* yang diperoleh dari USGS (USGS, 2018b). Data topografi hasil pengukuran lapangan digunakan untuk mengoreksi data topografi SRTM yang merupakan hasil pengukuran satelit.

Dalam pemodelan penjalaran tsunami, digunakan perangkat lunak TUNAMI-N2 (*Tohoku University's Numerical Analysis Model Investigation of Tsunami No. 2*). Dalam proses pemodelan penjalaran tsunami, limpasan (*run up*), tinggi dan waktu tempuh tsunami, aplikasi ini menggunakan teori linear perambatan gelombang untuk perairan

dalam, teori gelombang perairan dangkal (*shallow water*) dan daerah landaan dengan grid yang konstan. TUNAMI-N2 menggunakan diskritisasi dengan metode *finite difference* skema numerik *leap-frog*, yang mengaplikasikan skema beda pusat dengan kesalahan pemotongan orde kedua (Basith et al., 2012).

Persamaan empiris yang digunakan dalam perhitungan pemodelan tsunami adalah **Persamaan 1, Persamaan 2, Persamaan 3, Persamaan 4, Persamaan 5, Persamaan 6, dan Persamaan 7** (Imamura et al., 2006):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \dots (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \dots (3)$$

$$M = \int_{-h}^{\eta} u \, dz = \bar{u}(\eta + h) \dots\dots\dots (4)$$

$$(\eta + h) = D, \text{ maka} \dots\dots\dots (5)$$

$$M = \int_{-h}^{\eta} u \, dz = \bar{u} D \dots\dots\dots (6)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v \, dz = \bar{v}(\eta + h) = \bar{v} D \dots\dots\dots (7)$$

di mana:

- N = persamaan perubahan fluks massa air (water discharge fluxes) pada sumbu y,
- M = persamaan perubahan fluks massa air (water discharge fluxes) pada sumbu x,
- D = jumlah kedalaman air sampai ke puncak/permukaan air sesaat,
- h = kedalaman air dari dasar laut ke muka air rata-rata (m),
- $\eta$  = ketinggian air dari muka air rata-rata hingga permukaan sesaat (m),
- t = waktu (detik),
- g = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>),
- n = koefisien kekasaran Manning.
- u = Kecepatan pertikel air di sumbu x, dan
- v = Kecepatan pertikel air di sumbu y.

Untuk mensimulasikan tsunami, dibutuhkan skenario gempabumi yang menjadi pembangkit. Skenario yang digunakan berupa skenario gempabumi terburuk yang berpotensi terjadi di Laut Maluku. Dalam studi ini digunakan gempabumi dengan episenter di Laut Maluku, tepatnya pada zona Mayu-Talau, Mw 7,9, kedalaman 15 km, dan tipe patahan naik. Parameter yang dibutuhkan TUNAMI-N2 untuk menghasilkan gempabumi pembangkit antara lain *strike, slip, dip, slip angle*, panjang dan lebar patahan. Nilai panjang dan lebar patahan dapat diperoleh melalui konversi nilai magnitudo dengan rumusan skala gempabumi (*Scaling Law of Earthquake*) seperti ditunjukkan pada **Persamaan 8, Persamaan 9, dan Persamaan 10** (Wells & Coppersmith, 1994):

$$\log L = (0,5 \times Mw) - 1,8 \dots\dots\dots (8)$$

$$\log W = (0,5 \times Mw) - 2,1 \dots\dots\dots (9)$$

$$\log U = (0,5 \times Mw) - 3,3 \dots\dots\dots (10)$$

di mana:

- L = panjang sesar (km)
- W = lebar sesar (km)
- U = jarak slip (m)
- Mw = magnitudo momen

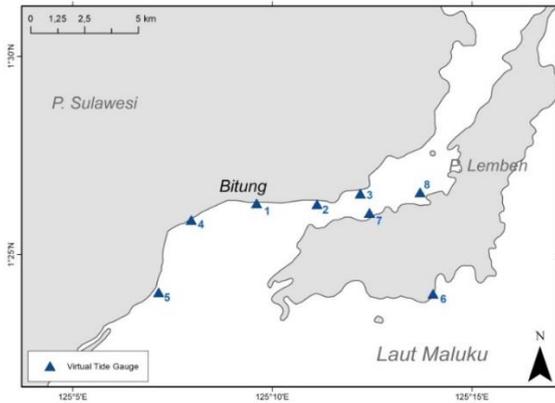
**Tabel 1.** Parameter gempabumi pembangkit tsunami.

Parameter Gempabumi	Nilai
Lintang (°)	0,167
Bujur (°)	125,670
Kedalaman (km)	10
Slip (m)	10
Dip (°)	23
Strike (°)	19
Slip Angle (°)	118
Panjang (km)	145,2
Lebar (km)	42.6

Selain parameter gempabumi pembangkit seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1** tersebut, parameter lain yang penting digunakan sebagai input untuk simulasi tsunami antara lain koefisien kekasaran (*manning coefficient*) dan koordinat *virtual tide gauge* (stasiun pasang surut virtual). Nilai koefisien kekasaran merupakan nilai yang menggambarkan tingkat kekasaran permukaan daratan yang diterjang oleh tsunami. Pada studi ini, nilai koefisien kekasaran yang digunakan adalah 0,025, yang menggambarkan keberadaan laut, sungai, persawahan, dan lahan kosong (Te Chow, 1959).

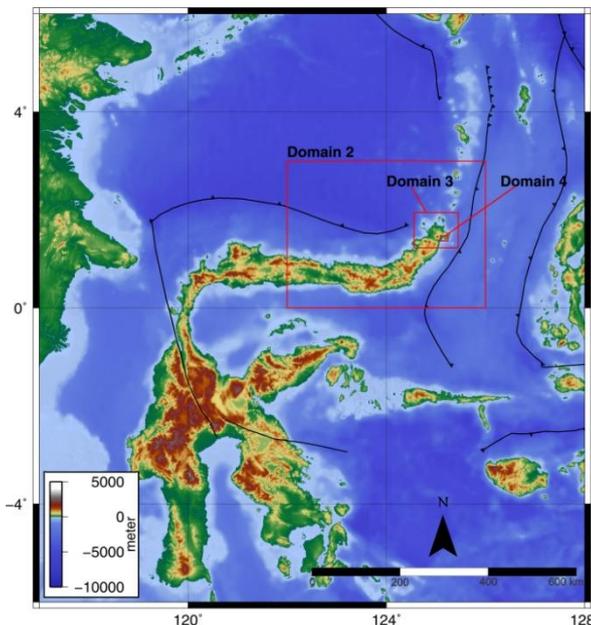
Nilai koefisien ini dipilih untuk mengetahui kondisi terburuk yang bisa diakibatkan oleh tsunami karena tutupan lahan di pesisir akan mempengaruhi tingkat genangan tsunami dan tindakan mitigasi (Mardiatno, 2013). Pertimbangan kondisi terburuk dengan area genangan tsunami terluas diharapkan dapat diketahui area-area yang aman untuk evakuasi. Sementara itu, *virtual tide gauge* merupakan stasiun pasang surut virtual yang dibutuhkan untuk mengetahui grafik prediksi tinggi tsunami secara temporal hasil pemodelan penjalaran tsunami di koordinat yang ditentukan sehingga bisa diketahui ketinggian maksimum dan waktu tiba tsunami.

Pada **Gambar 2** ditunjukkan sebaran lokasi *virtual tide gauge* yang digunakan dalam proses pemodelan penjalaran tsunami. Setelah menentukan parameter yang digunakan dalam input pemodelan, selanjutnya dilakukan penentuan area simulasi menggunakan metode *nesting grid*. Metode ini membagi area simulasi menjadi 4 tahapan resolusi spasial (domain) yang dimulai dari area luas yang mencakup lokasi bidang sesar kemudian menyempit hingga domain terkecil yang masih berada dalam cakupan domain sebelumnya dan beresolusi spasial lebih tinggi (Basith et al., 2012).



**Gambar 2.** Perbesaran area domain 4 dengan sebaran lokasi *virtual tide gauge* yang digunakan pada pemodelan.

Pada domain 1 hingga 3, data elevasi yang digunakan hanya data batimetri tanpa melibatkan data topografi karena untuk mengurangi beban komputasi dan pemodelan difokuskan pada penjalaran tsunami di perairan. Sementara itu, untuk domain 4 digunakan data batimetri dan topografi karena pada domain ini dimodelkan pula penjalaran tsunami di daratan sehingga akan didapatkan area inundasi dan tinggi tsunami. Peta area yang digunakan pada tiap domain ditunjukkan pada **Gambar 3**.



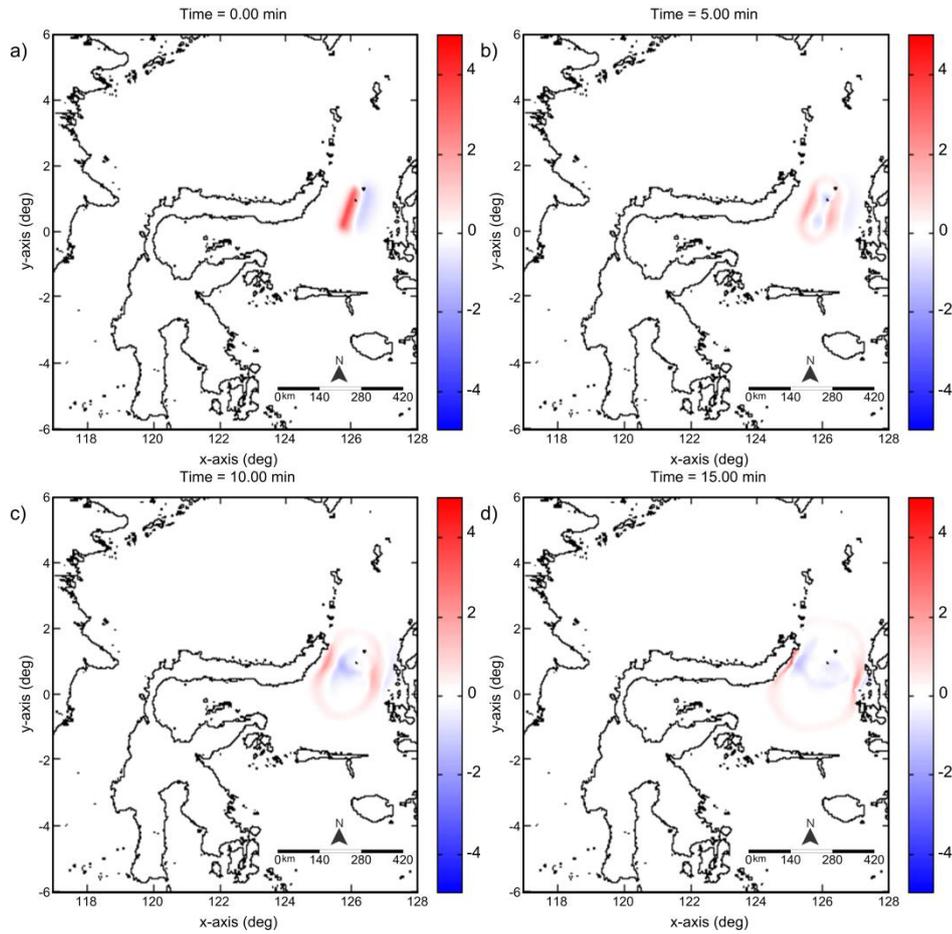
**Gambar 3.** Area simulasi untuk domain 1, dengan area domain 2 hingga domain 4 ditunjukkan pada kotak merah.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

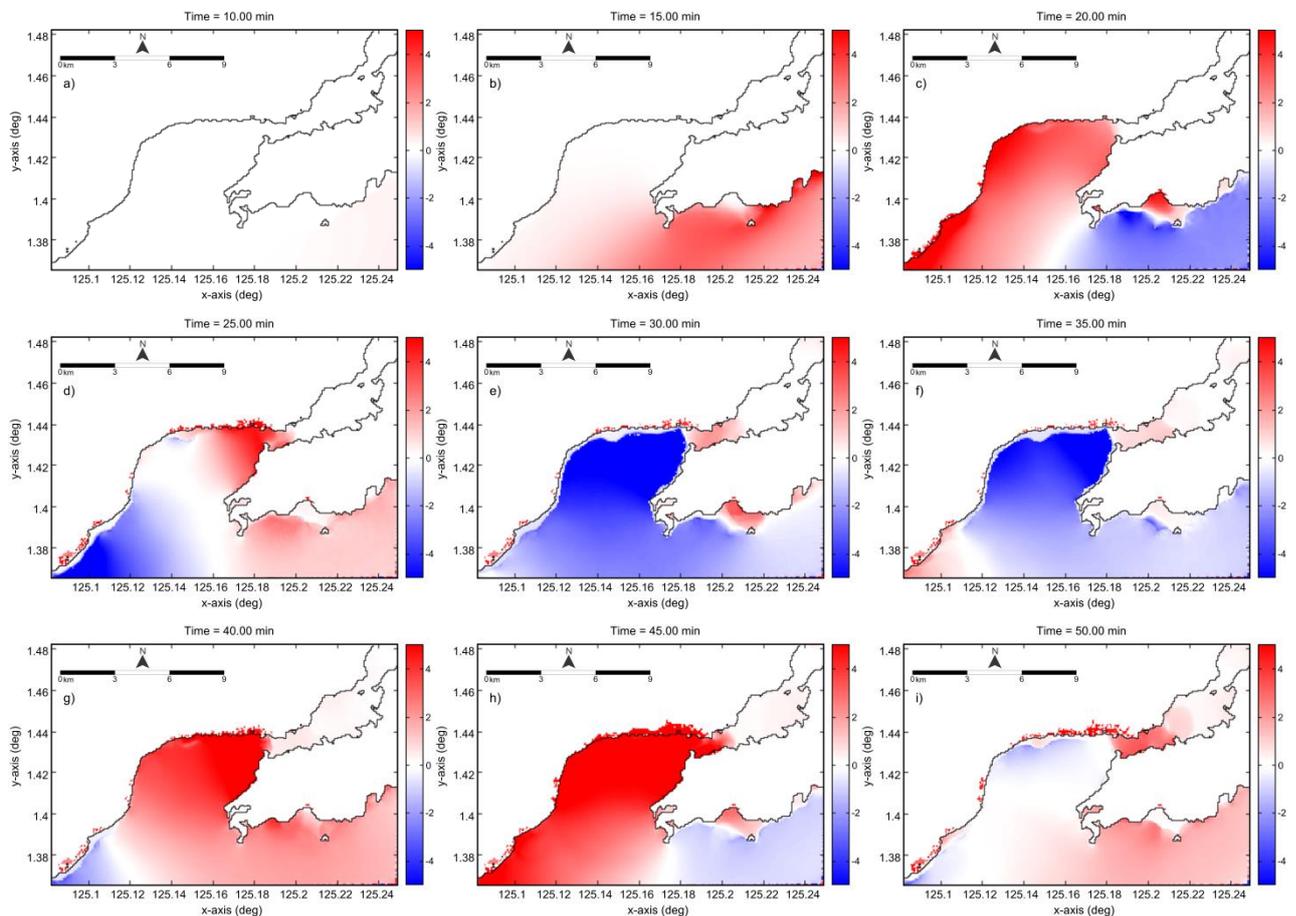
Setelah dilakukan pemodelan, diperoleh beberapa gambaran (*snapshot*) pola ketinggian tsunami setelah terjadi gempa bumi pada setiap domain. Pada gambaran hasil pemodelan, area laut yang berwarna biru menunjukkan adanya penurunan muka air laut sedangkan area laut yang berwarna merah menunjukkan terjadinya kenaikan permukaan air laut. Hasil pemodelan pada domain 1 yang disajikan pada **Gambar 4** dapat dilihat bahwa pola penjalaran gelombang tsunami yang terbentuk mengikuti pola skenario gempa bumi yang dibuat. Pada menit ke-0 atau sesaat setelah terjadi gempa bumi terjadi deformasi bidang patahan di dasar laut yang menyebabkan turunnya muka air laut bagian timur patahan dan kenaikan di bagian barat patahan.

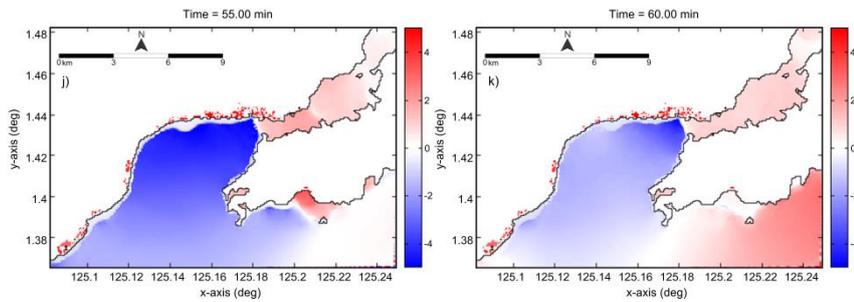
Pola penjalaran tsunami akibat gempa bumi ini dominan ke arah barat dan timur dari patahan sesuai dengan *slip angle* atau sudut pergerakan patahan yang tegak lurus terhadap arah *strike*. Pada menit ke-10, tsunami telah mencapai pantai baik di wilayah Sulawesi Utara yang berada di sebelah barat sumber maupun di wilayah Maluku Utara yang berada di sebelah timur sumber. Sementara itu, penjalaran tsunami yang berdampak di wilayah Bitung dapat lebih jelas dilihat pada hasil pemodelan domain 4 yang ditunjukkan dengan *snapshot* penjalaran tsunami tiap 5 menit pada **Gambar 5**.

Pada **Gambar 5** dapat dilihat bahwa untuk wilayah administrasi Kota Bitung, tsunami telah mencapai pantai pada menit ke-10, tepatnya di pantai timur Pulau Lembah. Selanjutnya pada menit ke-15 tsunami juga mulai memasuki wilayah perairan Selat Lembah dan tiba di pesisir pusat Kota Bitung. Penetrasi tsunami terjauh ke daratan terlihat terjadi pada menit ke-45. Penetrasi tsunami pada menit ke-45 ini memiliki jarak yang lebih jauh daripada penetrasi tsunami pertama yang terpantau pada menit ke-25. Penjalaran tsunami hasil pemodelan ini dapat dilihat lebih jelas melalui catatan *virtual tide gauge* yang lokasinya tersebar di Kota Bitung, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**. Waktu tiba tsunami di masing-masing *virtual tide gauge* dipengaruhi oleh jarak penjalaran gelombang dari sumber gempa bumi.

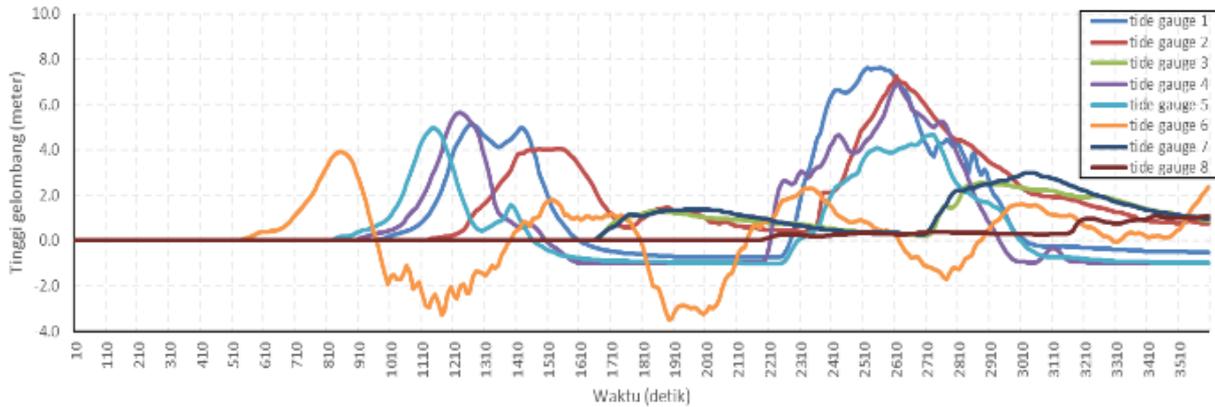


**Gambar 4.** Perubahan muka air laut akibat tsunami di area domain 1 pada (a) menit ke-0, (b) menit ke-5, (c) menit ke-10, dan (d) menit ke-15.





**Gambar 5.** Pemodelan penjarangan tsunami di area domain 4 pada (a) menit ke-10, (b) menit ke-15, (c) menit ke-20, (d) menit ke-25, (e) menit ke-30, (f) menit ke-35, (g) menit ke-40, (h) menit ke-45, (i) menit ke-50, (j) menit ke-55, dan (k) menit ke-60.



**Gambar 6.** Grafik catatan tinggi gelombang 8 *virtual tide gauge* di Kota Bitung.

Pada **Gambar 6** dapat dilihat bahwa tsunami pertama kali tiba di *virtual tide gauge* yang menghadap langsung ke Laut Maluku, yaitu *virtual tide gauge* 6 pada detik ke 520. Selanjutnya tsunami secara berurutan tiba di *virtual tide gauge* nomor 5, 4, 1, 2, 7, 3, dan 8. Tsunami tiba di *virtual tide gauge* 7 dan 3 sekitar detik ke-1600 atau sekitar menit ke-26 setelah gempa bumi, selanjutnya tiba di *virtual tide gauge* 8 sekitar menit ke-36. Selisih waktu tsunami tiba di *virtual tide gauge* 5 dengan *virtual tide gauge* 7, 3, dan 8 dapat menunjukkan perlambatan kecepatan tsunami setelah masuk dalam area perairan Selat Lembeh yang diakibatkan oleh batimetri yang semakin dangkal.

Lokasi dengan tinggi tsunami maksimum tidak berada di *virtual tide gauge* yang menghadap langsung ke Laut Maluku melainkan berada di *virtual tide gauge* 1 dengan ketinggian maksimum 7.625 meter pada detik ke-2560. Hal ini disebabkan karena *virtual tide gauge* 1 berada di pesisir yang berbentuk teluk dan menghadap Pulau Lembeh sehingga terjadi refleksi dan refraksi gelombang yang menyebabkan superposisi gelombang di perairan tersebut. Fenomena ini juga diperkuat dengan pola deret waktu gelombang yang linier pada *virtual tide gauge* 1, 2, 4, dan 5, yang menunjukkan terjadi dua puncak dengan puncak kedua relatif lebih tinggi daripada puncak pertama. Puncak pertama merupakan gelombang yang langsung menjangar dari pusat tsunami ke masing-masing *virtual tide gauge*, sedangkan puncak kedua

merupakan gelombang akibat superposisi hasil refleksi dan bentuk topografi pantai (Supparsi et al., 2017). Topografi pantai menyebabkan gelombang teramplifikasi di bagian laut dangkal dan dibiarkan ke dalam teluk. Ketinggian tsunami di area pantai lengkung cenderung tinggi akibat dari pantulan gelombang, akumulasi air karena bentuknya yang sempit dan tertutup, dan menyimpan resonansi (Yudhicara et al., 2014).

Meskipun lokasi *virtual tide gauge* 7, 3, dan 8 dekat dengan *virtual tide gauge* 2, namun tidak memiliki pola gelombang yang sama dan tidak mengalami perbesaran gelombang. Hal ini disebabkan karena ketiga *virtual tide gauge* tersebut masuk pada perairan tertutup yang dominan terlindungi oleh Pulau Lembeh. Pesisir pantai yang terlindung mendapatkan pengaruh difraksi gelombang yang menyebabkan pembelokan arah gelombang sehingga terjadi penurunan ketinggian gelombang yang masuk ke daerah tersebut (Aeda et al., 2017).

Untuk memberikan gambaran validitas hasil simulasi apakah sesuai dengan hasil observasi lapangan, maka dilakukan pemodelan penjarangan tsunami dari kejadian sebelumnya. Validasi dilakukan menggunakan parameter gempa bumi tanggal 6 September 1889 berkekuatan magnitudo 8,0 yang menyebabkan tsunami di daerah Kema, Kabupaten Minahasa Utara. Berdasarkan basis data tsunami yang dimiliki *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2018), gempa bumi yang berpusat di Laut Maluku dengan

koordinat  $1^{\circ}$  LU dan  $126,25^{\circ}$  BT ini menyebabkan tsunami di daerah Kema setinggi 4 meter. Setelah dilakukan pemodelan tsunami menggunakan parameter gempa bumi tersebut, diperoleh hasil tinggi maksimum tsunami yang menerjang Kema adalah 3,307 meter. Nilai ini memiliki selisih 0,693 meter dengan hasil observasi sehingga bisa dikatakan bahwa hasil ini memiliki kesalahan yang kecil. Hal ini juga sesuai dengan beberapa penelitian lain yang menunjukkan bahwa TUNAMI-N2 memiliki kesesuaian dengan hasil observasi. Sugianto et al. (2017) dan Muqoddas (2018) membandingkan hasil observasi tinggi tsunami Pangandaran 17 Juli 2006 dengan hasil pemodelan menggunakan TUNAMI-N2. Hasilnya, Sugianto et al. (2017) menyebutkan bahwa nilai akar rata-rata kuadrat kesalahan atau *Root Mean Square Error* (RMSE) dari perbandingan tinggi maksimum tsunami hasil observasi di beberapa titik sepanjang pantai selatan Jawa dengan hasil pemodelan adalah 0,98. Sementara itu, Muqoddas (2018) yang membandingkan deret waktu gelombang hasil catatan stasiun pasang surut Cilacap dengan hasil pemodelan, menggambarkan bahwa ada kemiripan pola gelombang antara keduanya dengan nilai RMSE 0,29.

Selain didapatkan model penjalaran dan tinggi tsunami, dari pemodelan ini juga didapatkan jangkauan inundasi dari tsunami yang berguna untuk mendelineasi daerah aman dari bahaya bencana tsunami. Selain inundasi atau luas daerah yang tergenang tsunami, dapat diketahui pula penetrasi tsunami terjauh di wilayah penelitian. Berdasarkan hasil pemodelan inundasi tsunami yang ditunjukkan pada **Gambar 7**, wilayah Kota Bitung yang berpotensi tergenangi tsunami bisa mencapai  $2,1 \text{ km}^2$  dengan area terluas berada di sebelah barat Pelabuhan Bitung. Area ini juga

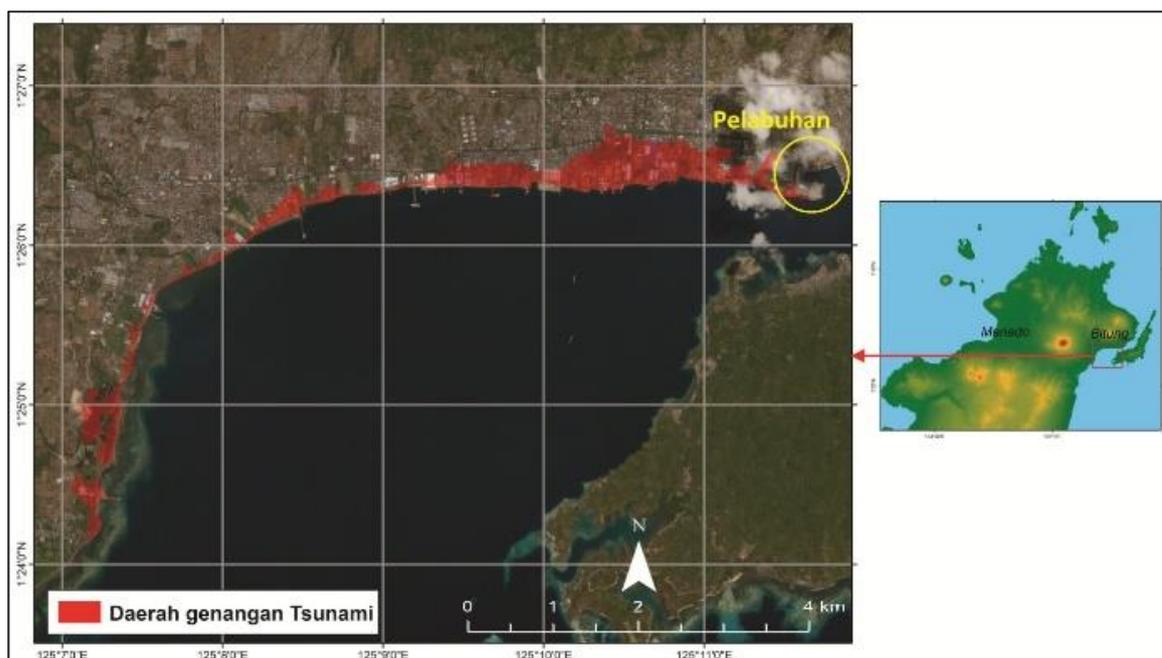
menjadi lokasi penetrasi terjauh tsunami ke daratan yang dapat mencapai 750 meter.

Area di sebelah barat pelabuhan merupakan lokasi bangunan-bangunan infrastruktur penting penunjang pelabuhan, seperti stasiun pengisian bahan bakar dan kawasan perindustrian. Kontur topografi yang landai dan lokasi yang menghadap perairan tertutup menjadi penyebab area ini berpotensi menjadi lokasi dengan dampak tsunami paling besar. Oleh karena itu, perlu disiapkan infrastruktur mitigasi dan kapasitas masyarakat agar dampak yang ditimbulkan tsunami bisa direduksi.

Hasil pemodelan ini sudah bisa menggambarkan daerah-daerah berpotensi terdampak tsunami di Kota Bitung karena model TUNAMI-N2 memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan catatan observasi tsunami. Namun demikian, dibutuhkan kajian lebih lanjut terkait faktor pasang surut air laut yang belum diperhitungkan dalam pemodelan ini karena kondisi pasang surut air laut juga berpengaruh pada tinggi maksimum dan inundasi tsunami (Lee et al., 2015). Oleh karena itu, kajian mendalam terkait faktor ini akan mampu menghasilkan peta bahaya tsunami yang lebih baik.

## KESIMPULAN

Berdasarkan pemodelan tsunami yang dibangkitkan oleh skenario gempa bumi dengan episenter di Laut Maluku dan magnitudo Mw 7,9, Kota Bitung berpotensi terpapar tsunami dengan waktu tiba tercepat di pesisir timur Pulau Lembeh pada detik ke-520 setelah kejadian gempa bumi. Tsunami tersebut diperkirakan dapat mencapai tinggi maksimum 7,625 meter di lokasi *virtual tide gauge* 1 pada detik ke-2560.



**Gambar 7.** Peta potensi inundasi tsunami Kota Bitung hasil pemodelan.

Inundasi tsunami terjauh bisa mencapai 750 meter dan menggenangi area sekitar 2,1 km<sup>2</sup>. Jika ditinjau dari estimasi tinggi tsunami di pantai dan potensi penetrasi tsunami ke daratan dalam model ini, daerah sebelah barat Pelabuhan Bitung memiliki potensi terdampak tsunami yang lebih besar di bandingkan daerah yang lainnya. Hal ini disebabkan karena topografi yang landai dan berhadapan dengan perairan yang berbentuk teluk sehingga terjadi amplifikasi gelombang.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terselenggara atas pendanaan dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Penulis mengucapkan terimakasih atas kerjasama dan dukungan dari pimpinan dan seluruh staf Stasiun Geofisika Manado selama pengambilan, pengolahan, hingga analisis data.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aeda, S. A., Saputro, S., & Subardjo, P. (2017). Simulasi Penjalaran dan Penentuan Run-Up Gelombang Tsunami di Teluk Pangandaran, Jawa Barat. *Jurnal Oseanografi*, 6(1), 254–262.
- Basith, A., Kongko, W., & Oktaviani, N. (2012). Pemodelan Spasial Landaan Tsunami Menggunakan Variasi Lokasi Sumber dan Magnitud Gempa Studi Kasus Kota Padang. In *Conference on Geospatial Science and Engineering*. Yogyakarta.
- BODC. (2018). GEBCO gridded bathymetry data. Retrieved April 5, 2018, from [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)
- Bryant, E. (2008). *Tsunami: The Underrated Hazard*. Springer Berlin Heidelberg.
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewonski, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- Gusman, A. R., Nugraha, A. D., & Shiddiqi, H. A. (2017). Hypocenter relocations and tsunami simulation for the 15 November 2014 Northern Molucca Sea earthquake in Indonesia. *Jurnal Geofisika*, 15(1).
- Imamura, F., Yalciner, A. C., & Ozyurt, G. (2006). *Tsunami Modelling Manual (TUNAMI model)* (3.1). Retrieved from <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/pjects/manual-ver-3.1.pdf>
- Lee, H. S., Shimoyama, T., & Popinet, S. (2015). Impacts of tides on tsunami propagation due to potential Nankai Trough earthquakes in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 6865–6883. <https://doi.org/10.1002/2015JC010995>
- Mardiatno, D. (2013). A proposal for tsunami mitigation by using coastal vegetations: Some finding from southern coastal area of Central Java, Indonesia. *Journal of Natural Resources and Development*, 3, 85–95.
- Muqoddas, M. M. (2018). *Pengaruh kekasaran Manning terhadap pemodelan inundasi di Cilacap*. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- NOAA. (2018). National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. Retrieved April 8, 2018, from <https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=167&d=166>
- Pemerintah Provinsi Sulawesi Utara. (2014). Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi Sulawesi Utara Tahun 2014-2034. Indonesia.
- PUSGEN. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. (M. Irsyam, S. Widiyantoro, D. H. Natawidjaja, I. Meilano, A. Rudyanto, S. Hidayati, ... S. Sunarjito, Eds.) (1st ed.). Bandung: Puslitbang Perumahan dan Permukiman, Balitbang Kementerian PUPR.
- Republik Indonesia. (2014). Kawasan Ekonomi Khusus Bitung. Indonesia.
- Setyana, B., & Setiadi, A. (2011). Model struktur subduksi kerak di perairan Laut Maluku dan vulkanisme berdasarkan analisis gaya berat dan kegempaan. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 21(4), 213–223. Retrieved from <http://jgsm.geologi.esdm.go.id/index.php/JGSM/article/view/148/144>
- Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Ramdhan, M., Wiyono, S. H., & Wandono, W. (2016). Analysis of Mw 7.2 2014 Molucca Sea earthquake and its aftershocks. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1730, p. 20010). <https://doi.org/10.1063/1.4947378>
- Sugianto, D., Nurjaya, I. W., Natih, N. M., & Pandoe, W. W. (2017). Potensi rendaman tsunami di wilayah Lebak Banten. *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(1), 9–18.
- Suppasi, A., Leelawat, N., Latcharote, P., Roeber, V., Yamashita, K., Hayashi, A., ... Imamura, F. (2017). The 2016 Fukushima earthquake and tsunami: Local tsunami behavior and recommendations for tsunami disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 21, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.12.016>
- Te Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- USGS. (2018a). Earthquake catalog. Retrieved April 7, 2018, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- USGS. (2018b). The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data. Retrieved April 5, 2018, from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- Yudhicara, Y., Robiana, R., & Priambodo, I. C. (2014). The Influence of Coastal Conditions to Tsunami Inundation of Bima Bay, West Nusa Tenggara. *Bulletin of the Marine Geology*, 29(1), 29–42. Retrieved from <http://ejournal.mgi.esdm.go.id/index.php/bomg/article/view/63/64>