

ANALISIS POTENSI RAMBATAN TSUNAMI DI PANTAI UTARA DESA DULUKAPA DAN DEME 1 KABUPATEN GORONTALO UTARA UNTUK MITIGASI BENCANA TSUNAMI

(Analysis of Tsunami Propagation Potential in the Northern Coast of Dulukapa and Deme 1 Villages, North Gorontalo District for Tsunami Disaster Mitigation)

Nurfitriani ^{1,2}, Gybert E. Mamuya ², Rignolda Djamaluddin ², dan Tatok Yatimantoro ¹

¹ Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Geofisika Manado

² Program Pasca Sarjana Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi
Jl. Harapan no. 42, Manado, Indonesia
E-mail: nurfitriislamuddin@gmail.com

Diterima (received): 18 Januari 2018; Direvisi (revised): 25 Mei 2018; Disetujui untuk dipublikasikan (accepted): 21 Juni 2018

ABSTRAK

Secara tektonik, zona subduksi di utara Gorontalo berpotensi menimbulkan gempa bumi yang dapat mengakibatkan tsunami. Kajian statistik seismisitas menunjukkan adanya indikasi celah kegempaan di wilayah tersebut dengan Magnitudo maksimum sebesar 8,2 Mw. Pemodelan tsunami dilakukan untuk mengestimasi ketinggian *run up* tsunami di pesisir pantai dan luasan daerah genangan tsunami sebagai upaya mitigasi bencana tsunami di Desa Dulukapa dan Deme 1. Pemodelan tsunami menggunakan teori gelombang linier di laut dalam dan gelombang perairan dangkal pada perairan dengan kedalaman dangkal dan daerah landaan dengan grid yang konstan dengan bantuan aplikasi TUNAMI-N2. Gempa bumi yang digunakan untuk pemodelan merupakan skenario terburuk berdasarkan tatanan tektonik dan sejarah kegempaan wilayah penelitian. Data yang digunakan meliputi data batimetri GEBCO (*General Bathymetric Chart Of The Ocean*) grid 30 *arc second* dan topografi SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) grid 1 *arc second* yang dikeluarkan oleh USGS. Selanjutnya, data gempa bumi dan tsunami masing-masing diperoleh dari katalog gempa bumi *Advanced Nasional Seismic System* (ANSS) dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Hasil penelitian menunjukkan waktu penjarangan gelombang dari episenter ke pantai utara Desa Dulukapa 18,2–13,8 menit dengan *run up* 9,8–13,8 m dan jarak terjauh landaan tsunami sejauh 800 m. Sementara itu, waktu tiba tsunami di Desa Deme 1 sekitar 18,8–23,83 menit dengan *run up* 10,76–15,1 m, dan jarak terjauh landaan tsunami sejauh 830 m. Luasan daerah landaan tsunami mencapai 1900 m² pada kedua desa tersebut. Kedua desa tersebut merupakan wilayah yang rawan terdampak tsunami sehingga perlu dilakukan upaya mitigasi bahaya tsunami untuk mengurangi resiko yang ditimbulkan.

Kata kunci: Pemodelan tsunami, *run up*, daerah genangan, TUNAMI-N2

ABSTRACT

Tectonically, subduction zone in northern Gorontalo has potential to cause an earthquake that could lead to a tsunami. The statistical seismicity study shows an indication of seismic gap with a maximum magnitude of 8.2 Mw in this area. Tsunami propagation modeling should be done to estimate the height of tsunami run up in coastal area and wide of inundation area as effort to tsunami mitigation for Dulukapa and Deme 1 Villages. The worst-case earthquake scenario based on tectonic setting and earthquake history used for the tsunami modelling. The data that used in this study are GEBCO 30 arc second grid for the bathymetry and SRTM 1 second grid for the topography data. Furthermore, the earthquake and tsunami history data are obtained from ANSS and BMKG, respectively. Tsunami modelling has done by using TUNAMI-N2. The result shows the tsunami travel time from the epicenter to the north coast of Dulukapa village from 18.2-13.8 minutes with run up height of 9.8-13.8 m, with the farthest distance of tsunami to the land as far as 800 m from the coastline. In Deme 1, the tsunami arrival time is around 18.8-23.83 minutes with run up height of 10.76-15.1 m, with the farthest distance of tsunami to land about 830 m from coastline. The tsunami-affected area reaches 1900 m² in both villages. Based from this study, both villages are tsunami prone areas, so it is necessary to mitigate tsunami hazard to reduce the impact of tsunami.

Keywords: Tsunami modelling, *run up*, inundation area, TUNAMI-N2

PENDAHULUAN

Pulau Sulawesi terletak pada zona pertemuan tiga lempeng besar yakni lempeng Indo-Australia bergerak ke utara dengan kecepatan rata-rata 7 cm/tahun, lempeng Pasifik dari timur dengan

kecepatan rata-rata 6 cm/tahun dan lempeng Eurasia yang bergerak pasif ke arah selatan-tenggara dengan pergerakan rata-rata 3 cm per tahun (Kaharuddin et al., 2011). Sebelah utara lengan utara Pulau Sulawesi terdapat subduksi sub

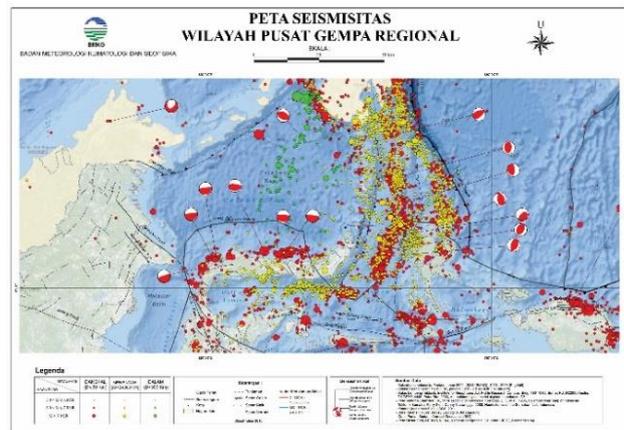
lempeng Laut Sulawesi dari arah utara. Akibat pergerakan lempeng menyebabkan terjadinya deformasi terus menerus dan menyebabkan aktifnya daerah subduksi lempeng Laut Sulawesi dan patahan Gorontalo (Kaharuddin et al., 2011). Kondisi tektonik yang demikian menyebabkan lengan utara Pulau Sulawesi termasuk Gorontalo Utara menjadi wilayah yang relatif rawan terhadap kejadian gempa bumi. Peta sebaran episenter gempa bumi periode tahun 1973-2015 pada **Gambar 1** menunjukkan bahwa sebagian besar gempa bumi yang terjadi memiliki episenter di laut dan tersebar searah dengan zona subduksi lempeng Laut Sulawesi.

Gempa bumi memberikan dampak merugikan bagi infrastruktur dan membahayakan jiwa manusia. Tidak hanya sebatas itu, gempa bumi dengan kriteria tertentu akan menjadi pembangkit gelombang tsunami. Berikut asumsi konvensional mengenai tipe gempa pembangkit tsunami: Gempa langsung menyebabkan deformasi permanen dari dasar laut; Gempa bumi dengan hiposenter di laut; Gempa bumi dengan magnitudo lebih besar dari 7.0 skala Richter; Gempa bumi dengan pusat gempa dangkal; Gempa bumi dengan pola mekanisme fokus dominan adalah sesar naik atau sesar turun; dan Morfologi pantai atau bentuk pantai biasanya pantai terbuka dan landai serta berbentuk teluk.

Sejarah mencatat 82% dari gelombang tsunami yang pernah terjadi di dunia dibangkitkan oleh gempa bumi dan 90,4% kejadian gempa bumi di Indonesia dibangkitkan oleh gempa bumi (Hamzah et al., 2000). Berdasarkan peta yang ditunjukkan pada **Gambar 1**, kawasan yang memiliki potensi dampak kejadian gempa bumi terbesar di Pulau Sulawesi adalah lengan utara Pulau Sulawesi, khususnya di pantai Utara, Selatan dan Timur. Histori menyebutkan lengan utara Pulau Sulawesi pernah beberapa kali diterjang tsunami. Tsunami terjadi di wilayah pesisir utara lengan utara Pulau Sulawesi pada 14 Agustus 1968 di Tambu, Kabupaten Donggala. Tsunami yang terjadi dengan ketinggian *run up* 8 hingga 10 m dengan korban meninggal dan luka-luka diperkirakan mencapai 392 jiwa (Hamzah et al., 2000). Kemudian tsunami kembali terjadi pada tanggal 1 Januari 1996 di wilayah Toli-Toli dengan ketinggian *run up* 3,4 m dan menyebabkan 9 jiwa meninggal dan 63 orang mengalami luka-luka (Lander et al., 2003). Jarak episenter gempa bumi yang sangat dekat menyebabkan masyarakat hanya memiliki waktu yang sangat singkat untuk evakuasi jika terjadi tsunami.

Kejadian tsunami di Indonesia rata-rata terjadi dua kali setahun, dengan periode ulang puluhan hingga ratusan tahun. Probabilitas tahunan untuk wilayah Sulawesi bagian utara mengalami tsunami setinggi > 3m sekitar 0,1-1%. Dalam periode ulang 2500 tahun Pulau Sulawesi memiliki probabilitas terdampak tsunami dengan ketinggian 12-20 m di Sulawesi (Horspool et al., 2014). Kawasan pantai yang memiliki potensi dampak kejadian gempa bumi terbesar di Pulau Sulawesi adalah lengan

utara pulau Sulawesi, khususnya di pantai Utara, Selatan dan Timur (Baeda & Husain, 2012) Kajian statistik seismisitas juga menunjukkan adanya indikasi celah kegempaan di sebelah utara Gorontalo dan sebagian wilayah Sulawesi Utara (Bakar et al., 2017). Magnitudo maksimum yang diperkirakan dapat terjadi di wilayah ini mencapai magnitudo sebesar 8,2 Mw (Irsyam et al., 2010). Daerah Gorontalo Utara yang secara geografis berhadapan langsung dengan Laut Sulawesi menjadi salah satu daerah yang terancam terdampak tsunami. Terdapat beberapa desa di pesisir utara Gorontalo Utara, di antaranya Deme 1 dan Dulukapa. Kedua desa ini memiliki sebaran penduduk yang tersebar sejajar sehingga dianggap perlu untuk mengkaji potensi tsunami di dua desa tersebut.



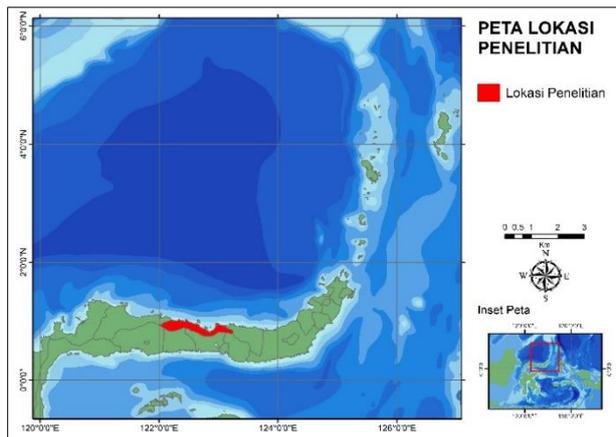
Gambar 1. Peta seismisitas wilayah utara Sulawesi dan Kepulauan Halmahera.

Pemodelan tsunami dilakukan untuk mengetahui sebaran gelombang tsunami dari sumber gempa, waktu penjalaran gelombang (*travel time*) dan ketinggian tsunami (*run up*) yang akan melanda daerah terdampak. Dengan mengetahui estimasi *travel time*, maka dapat diketahui berapa estimasi waktu evakuasi warga saat tsunami terjadi. Mengetahui estimasi *run up* di daerah terdampak, dapat memberikan gambaran dalam memetakan jalur evakuasi, daerah evakuasi yang aman, dan lebih jauh dapat digunakan sebagai acuan perencanaan wilayah yang berbasis bencana.

Untuk itu diperlukan model untuk menggambarkan waktu tiba gelombang tsunami di wilayah terancam dengan pendekatan menggunakan asumsi tsunami sebagai gelombang perairan dangkal. Hasil pemodelan ini berupa *run up* gelombang tsunami, informasi estimasi waktu tiba gelombang tsunami, dan luasnya jangkauan tsunami ke daratan. Dengan adanya informasi ini, dapat digunakan dalam penentuan tingkat kerawanan bencana tsunami di suatu wilayah (Imamura et al., 2006). Lebih jauh lagi, dengan mengetahui ketinggian maksimum gelombang tsunami yang mungkin menerjang wilayah terdampak dapat membantu terutama sebagai bahan pertimbangan dalam pengelolaan pesisir yang rawan bencana.

METODE

Penelitian ini difokuskan pada potensi kejadian tsunami di wilayah pesisir utara Sulawesi dengan posisi geografisnya terletak antara 0,2°–4,0°LU, 119,5°–125,5° BT. Wilayah penelitian untuk ketinggian tsunami dan genangan tsunami di fokuskan pada desa yang berhadapan langsung dengan Laut Sulawesi, yaitu Desa Deme 1 dan Dulukapa. Kedua desa ini terletak di Kabupaten Gorontalo Utara, Provinsi Gorontalo. Lokasi penelitian ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data sejarah kejadian gempa bumi, parameter gempa bumi pembangkit tsunami di wilayah laut Sulawesi dengan batasan 0,2°-4,5°LU dan 119,5°-125,2°BT periode 1898–2016, dari katalog gempa bumi *Advanced Nasional Seismic System* (ANSS), dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Data sejarah parameter bidang sesar (*strike, slip dan rake*) dari katalog Global CMT Harvard.

Data panjang dan lebar patahan (*rupture*) menggunakan analisis tataan tektonik dan sejarah kegempaan daerah penelitian. Hal ini dilakukan dengan memetakan sebaran episenter gempa bumi dan menghitung luasan sebaran titik epicenter, dari luasan inilah diperoleh panjang dan lebar patahan. Data sejarah tsunami masa lampau di wilayah penelitian periode 1900-2016 dari NOAA/NGDC/WDC *Tsunami Database* dan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Data batimetri pantai utara Lengan Utara Pulau Sulawesi, yaitu GEBCO (*General Bathymetric Chart of The Ocean*) *grid 30 arc second* dan topografi daratan menggunakan data SRTM (*Shuttle radar Topography Mission*) dengan *grid 1 arc second* yang dikeluarkan oleh USGS.

Citra satelit pada wilayah penelitian, digunakan sebagai data untuk menafsirkan jenis tutupan lahan area penelitian. Tutupan lahan yang akan menjadi perhatian adalah sebaran permukiman penduduk, keberadaan sungai dan lahan bervegetasi. Dengan adanya informasi ini, maka selanjutnya dapat lebih jauh dianalisis sejauh mana kerentanan wilayah ini terhadap ancaman bahaya tsunami. Penelitian ini

menggunakan citra satelit *Worldview 02* tanggal 17 November 2017 yang diakses dengan menggunakan aplikasi *Google Earth*. Secara umum tutupan lahan daerah ini berupa permukiman yang polanya cenderung memanjang searah jalan di Desa Dulukapa dan memanjang searah pantai dan jalan di Desa Deme 1. Daerah tutupan lahan dengan vegetasi terdapat di sebagian pesisir kedua desa ini. Lahan persawahan yang cukup luas dan sungai yang bermuara ke Laut Sulawesi ditemui baik di Desa Dulukapa maupun Desa Deme 1.

Pemodelan tsunami dalam penelitian ini menggunakan *software Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Near-field Tsunamis, No.2 (TUNAMI N2)*. Generasi pertama aplikasi ini hanya menggunakan teori linear perambatan gelombang pada ukuran *grid* yang konstan. Pada generasi ke-2 yang digunakan dalam pemodelan ini menggunakan teori gelombang linear di laut dalam dan gelombang perairan dangkal (*shallow water*) pada perairan dengan kedalaman dangkal dan daerah landaan dengan *grid* yang konstan (Basith et al., 2012). Pendekatan empiris dasar yang digunakan dalam pemodelan tsunami ditunjukkan pada **Persamaan 1, Persamaan 2, dan Persamaan 3** (Immamura et al., 2006) :

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

- N = persamaan perubahan fluks massa air (*water discharge fluxes*) pada sumbu y,
- M = persamaan perubahan air (*water discharge fluxes*) pada arah sumbu x,
- D = (h+ η) atau jumlah kedalaman air sampai ke puncak/ permukaan air sesaat (m)
- h = kedalaman air dari dasar laut ke muka air rata-rata (m), nilai negatif h merujuk pada kedalaman batimetri
- η = ketinggian air dari muka air rata-rata hingga permukaan sesaat (m), dan
- t = waktu (detik).
- τ_x = efek gesekan dari arah x
- τ_y = efek gesekan dari arah y
- g = percepatan gravitasi

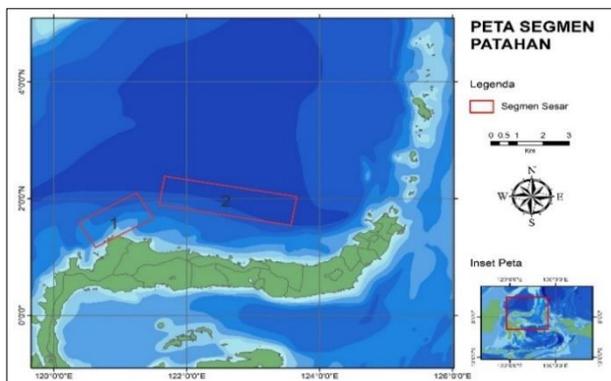
Tahapan penelitian dimulai dari pengumpulan data, dan penentuan skenario gempa bumi yang terdiri dari parameter gempa bumi dan dari parameter bidang sesar berdasarkan analisis celah kegempaan dari penelitian terdahulu. Parameter sesar bidang sesar seperti *stike, slip, dip, dan slip angle* diperoleh dari data histori parameter patahan gempa bumi yang terjadi di area penelitian. Luasan *seismic gap* digunakan sebagai acuan dalam

membuat skenario terkait panjang dan lebar patahan.

Berdasarkan peta seismisitas gempa bumi di wilayah Sulawesi Utara pada **Gambar 1**, menunjukkan tipe gempa bumi yang tersebar di Laut Sulawesi adalah tipe gempa bumi dangkal dengan kedalaman kurang dari 60 km. **Gambar 3** menunjukkan tipe patahan yang dominan adalah patahan naik dan patahan *oblique*. Arah *strike* yang searah dengan zona subduksi di sebelah utara Pulau Sulawesi, yakni membujur dari barat dan berkisar antara 45° hingga 135°. Untuk mendekati pola patahan yang sesuai dengan kenyataan di lapangan, patahan dalam model ini dibuat dua segmen patahan yang aktif saat gempa bumi terjadi, dengan arah dan luas bidang patahan yang berbeda. Parameter bidang sesar disajikan pada **Tabel 1**, dan visualisasi segmen patahan disajikan pada **Gambar 3**.

Tabel 1. Parameter sesar.

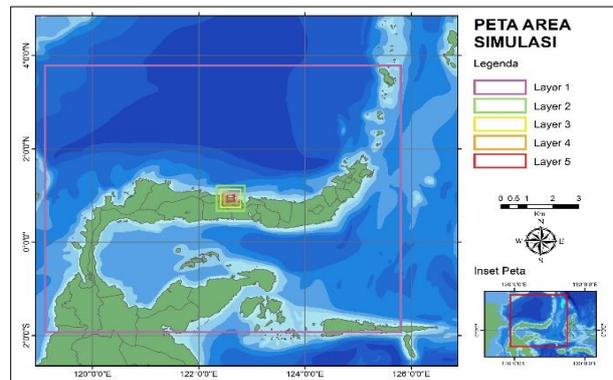
Parameter	Sesar	
	1	2
Kedalaman (km)	10	10
Slip (°)	18	18
Dip (°)	20	20
Strike (°)	60	100
Sudut Slip (°)	85	85
Panjang (km)	100	200
Lebar (km)	60	60



Gambar 3. Peta segmentasi patahan.

Setelah dilakukan ekstraksi batimetri dan topografi, maka dilanjutkan dengan membuat *file control* yang memuat informasi tentang setiap *layer* yang akan digunakan. Lama waktu simulasi yang digunakan selama 120 menit. Berdasarkan standar operasional prosedur INATEWS peringatan dini tsunami diakhiri dalam 2 jam, dianggap pada waktu ini ancaman tsunami akibat gempa bumi lokal untuk wilayah Indonesia dianggap sudah berakhir (BMKG, 2012). Nilai koefisien kekasaran (*mannings coefficient*) yang digunakan adalah 0,025, yang menggambarkan keberadaan laut, sungai, persawahan, dan lahan kosong (Chow, 1959). Keberadaan permukiman, hutan dan bentuk tutupan lahan lainnya diabaikan dalam model ini.

Selanjutnya dilakukan penentuan area simulasi. Penentuan wilayah ini, digunakan metode *nesting grid* yang dilakukan dengan membagi wilayah penelitian menjadi 5 tahapan resolusi spasial (*layer*). Sistem *grid* yang digunakan yaitu *nesting grid*. Metode ini membagi *layer* dimulai dari area dengan cakupan luas dan resolusi yang spasial yang mencakupi letak bidang sesar pada bagian terluar. Kemudian *layer* selanjutnya menyempit, masih berada dalam cakupan wilayah *layer* sebelumnya, dan beresolusi spasial lebih tinggi (Basith et al., 2012). Pada *layer* 1 hingga *layer* 4, data wilayah diekstraksi dengan data batimetri, sedangkan *layer* 5 dilakukan ekstraksi data wilayah dengan batimetri dan topografi. Proses ini melibatkan banyak data dan waktu yang panjang sehingga ekstraksi kedua data ini hanya dilakukan di daerah fokus penelitian saja, yaitu *layer* 5. Peta area simulasi disajikan pada **Gambar 4**, dengan profil topografi dan batimetri setiap *layer* disajikan pada **Gambar 5**. Informasi terkait ukuran dan jumlah *grid* untuk setiap *layer* disajikan pada **Tabel 2**.



Gambar 4. Peta area simulasi.

Tabel 2. Data ukuran *grid* dan total *grid* pada setiap *layer*.

Layer	Ukuran	Total Grid	
		Arah x	Arah y
1	1885	420	360
2	628	99	99
3	209	207	207
4	69	351	351
5	23	243	243

Terkait kestabilan simulasi ini, model harus memenuhi syarat stabilitas model $CFL_{max} < 1$ dengan formulasi (Basith et al., 2012) yang di tunjukan pada **Persamaan 4**.

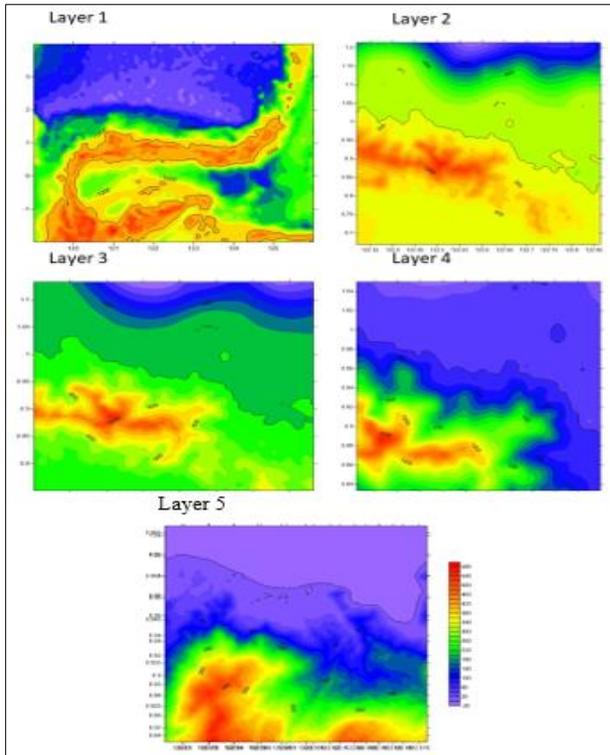
$$CFL_{max} = \sqrt{gh_{max}} \frac{dt}{dx} \dots \dots \dots (4)$$

dengan

- h_{max} = Kedalaman perairan maksimum
- dt = langkah waktu perhitungan
- g = gaya gravitasi (9,8 m/s)

Langkah waktu perhitungan (dt) yang mewakili ukuran temporal *grid* yang digunakan adalah 2. Pemodelan ini menggunakan konsep *nested grid*, dimana masing masing *layer* memiliki *grid* yang

berbeda. Perbandingan yang digunakan adalah bilangan ganjil 1:3, karena pada perbandingan ini model lebih stabil. Untuk mengetahui ketinggian tsunami di garis pantai maka perlu memasukkan koordinat *virtual tide gauge* ke *layer 5*. *File control* juga memuat data sumber berupa mekanisme bidang sesar (*strike, slip, dip, slip angle*, panjang dan lebar patahan) seperti yang digambarkan pada **Tabel 1**.

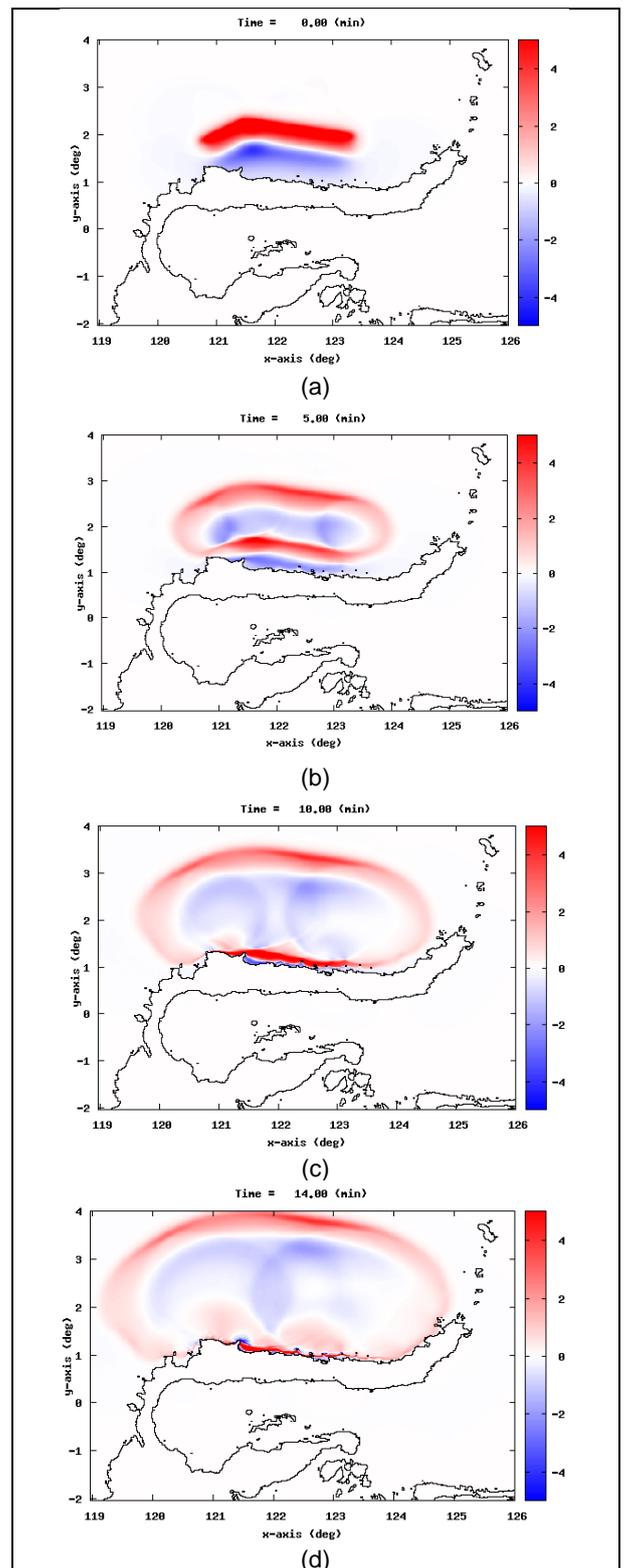


Gambar 5. Profil batimetri dan topografi area simulasi.

Langkah selanjutnya yaitu menjalankan *software* TUNAMI-N2 untuk memperoleh model penjalaran gelombang tsunami. Hasil yang diperoleh kemudian dianalisis waktu tiba dan ketinggian tsunami pada masing-masing lokasi *virtual tide gauge*. Selain itu juga dianalisis ketinggian *run up*, luas genangan (inundasi) tsunami pada *layer 5* dan jarak landaan tsunami terjauh ke daratan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

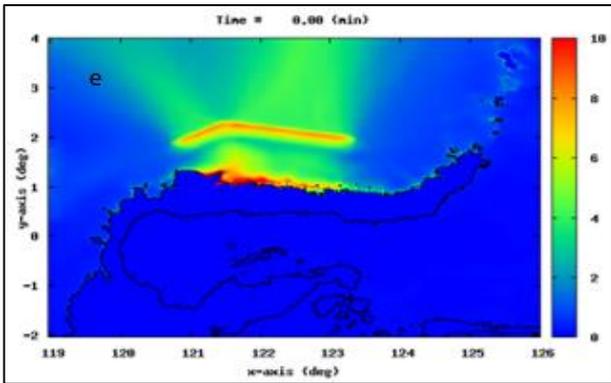
Setelah data dihimpun, kemudian dibuat simulasi penjalaran tsunami, diperoleh model penjalaran pada setiap *layer*. Hasil pemodelan pada *layer 1* yang disajikan pada **Gambar 6** menunjukkan adanya perubahan muka laut berupa kenaikan muka air laut yang digambarkan dengan area berwarna merah dan pada sisi lain mengalami penurunan muka air laut yang digambarkan dengan area berwarna biru. Sebagian gelombang tsunami merambat ke arah pantai dan bagian lainnya menyebar ke laut lepas. Hal tersebut biasanya terjadi pada tsunami yang dibangkitkan gempa bumi dengan Magnitudo yang relatif besar (Pujiastuti, 2010).



Gambar 6. Hasil simulasi penjalaran tsunami di *layer 1* pada (a) menit ke-0, (b) menit ke-5, (c) menit ke-10, (d) menit ke-14.

Pada menit ke-0 atau sesaat setelah gempa bumi terjadi deformasi berupa penurunan bidang patahan yang menyebabkan turunnya muka air laut di bagian selatan patahan. Bagian selatan yang berhadapan langsung dengan wilayah pesisir utara wilayah lengan utara Pulau Sulawesi cenderung mengalami surut. Sementara di bagian utara, terjadi deformasi bidang patahan ke atas sehingga

menyebabkan terjadinya kenaikan muka air laut. Kondisi ini mengindikasikan bahwa mekanisme patahan yang bekerja pada gempa bumi ini adalah *Thrust Fault* (patahan naik). Pada menit ke-10, tsunami mencapai pantai di wilayah Buol dan sekitarnya dan meluas ke arah timur, hingga pada menit ke-14 tsunami mencapai wilayah pesisir utara Gorontalo utara dan sekitarnya. Posisi ketinggian muka air laut maksimum akibat tsunami di sekitar pantai sepanjang pesisir utara lengan utara Pulau Sulawesi ditunjukkan pada **Gambar 7**. Hal ini disebabkan karena semakin mendekati pantai terjadi pendangkalan batimetri laut yang menyebabkan terjadinya pemendekan panjang tsunami dan amplifikasi amplitudo tsunami yang maksimum di area pantai.

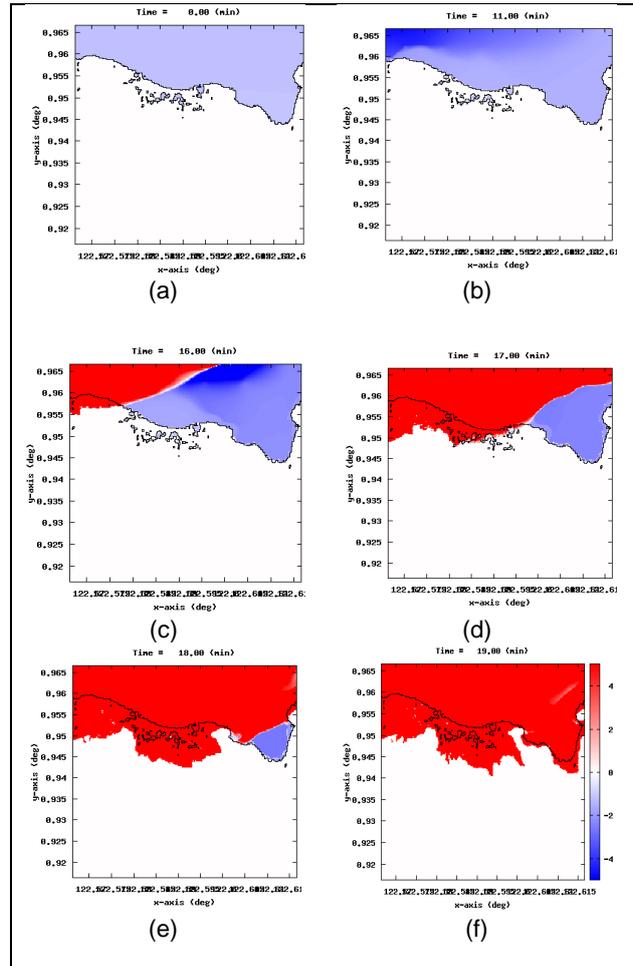


Gambar 7. Ketinggian maksimum tsunami pada area simulasi.

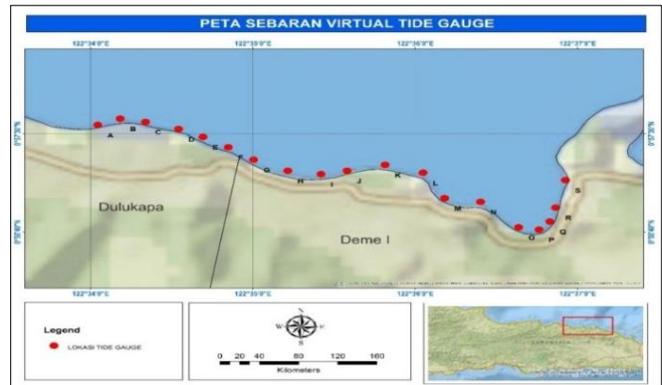
Sementara itu, hasil pemodelan pada *layer 5* yang disajikan pada **Gambar 8** menunjukkan cakupan wilayah lebih sempit dan difokuskan pada pesisir utara Gorontalo Utara yaitu di Desa Dulukapa dan Desa Deme 1 yang terdampak tsunami. Pada menit ke-0 atau sesaat setelah gempa bumi terjadi, belum ada perubahan muka air laut. Pada menit ke-11 terjadi surut di bagian barat pesisir utara Desa Dulukapa dan Deme 1. Tsunami pertama kali mencapai pantai utara Gorontalo Utara pada menit ke-16 dan mencapai keseluruhan pesisir utara pada menit ke-20.

Untuk mengetahui lebih detail ketinggian *run up* tsunami sepanjang pantai, maka perlu dibuat *virtual tide gauge*, yang dapat memberikan informasi ketinggian muka air laut pada titik tertentu pada fungsi waktu. Pada penelitian ini dibuat 6 titik *virtual tide gauge* yang tersebar di pesisir utara Desa Dulukapa dan 13 titik di Desa Deme 1, lokasi *tide gauge* ditampilkan pada **Gambar 9**. Hasil rekaman perubahan muka air laut pada saat simulasi berlangsung pada masing-masing *tide gauge* yang di pasang di Desa Dulukapa disajikan pada **Gambar 10**. Pada saat gempa bumi terjadi, muka air laut di wilayah pantai mengalami penurunan (surut) dan kemudian terjadi kenaikan yang signifikan dengan tinggi minimum 9,8 m pada titik F dan maksimum pada titik C setinggi 13,8 m. Waktu penjalaran tsunami dari pusat gempa bumi hingga ke pantai berkisar antar 18,2 hingga 18,9 menit. Ketinggian rata-rata tsunami di pantai Desa

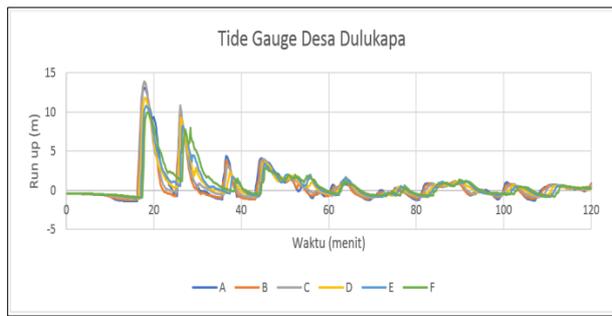
Dulukapa sebesar 11,95 m dengan waktu penjalaran tsunami rata-rata sebesar 18,4 menit. Ketinggian *run up* maksimum dan waktu penjalaran lebih rinci disajikan dalam **Tabel 3**.



Gambar 8. Hasil simulasi penjalaran tsunami pada *layer 5* pada menit Ke-0, (b) menit ke-11, (c) menit ke-16, (d) menit ke-17, (e) menit ke-18, (f) menit ke-19.



Gambar 9. Peta sebaran *virtual tide gauge*.



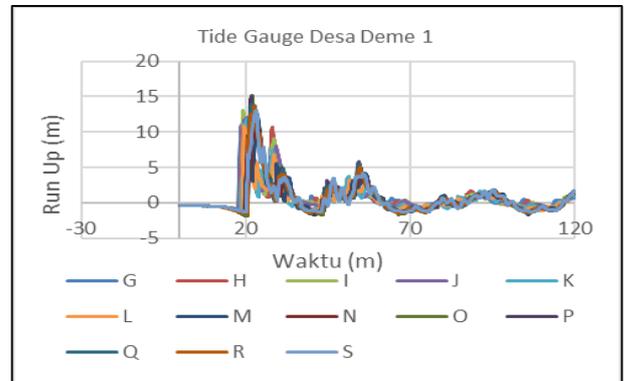
Gambar 10. Grafik ketinggian muka air laut hasil simulasi akibat tsunami pada setiap *virtual tide gauge* di Desa Dulukapa.

Tabel 3. Waktu tiba dan ketinggian *run up* di pantai yang tercatat pada *virtual tide gauge* di Desa Dulukapa.

Tide Gauge	Lintang (°)	Bujur (°)	Waktu datang tsunami (menit)	Run up Maksimum (m)
G	0,954645	122,5830	18,80	10,76
H	0,953087	122,5860	19,50	12,05
I	0,952615	122,5903	19,30	12,96
J	0,953087	122,5930	20,50	12,05
K	0,953912	122,5969	19,70	11,58
L	0,952812	122,6008	20,60	10,83
M	0,949219	122,6030	23,83	12,10
N	0,948705	122,6067	22,30	10,90
O	0,945112	122,6106	22	15,08
P	0,944780	122,6127	21,70	15,10
Q	0,945919	122,6138	22,70	13,98
R	0,947899	122,6144	22,83	13,66
S	0,951766	122,6154	23,30	12,87
		Rata-rata	21,31	12,60

Hasil rekaman perubahan muka air laut pada saat simulasi berlangsung pada *tide gauge* yang dipasang di Desa Deme 1 disajikan pada **Gambar 11**, sedangkan waktu tiba dan *run up* maksimum pada masing-masing *tide gauge* disajikan pada **Tabel 4**. Pada saat gempa bumi terjadi, muka air laut di wilayah pantai mengalami penurunan (surut) dan kemudian terjadi kenaikan yang signifikan. Ketinggian minimum tsunami yakni 10,76 m pada titik G dan maksimum pada titik P setinggi 15,1 m. Titik P merupakan pantai dengan karakteristik berupa teluk, sehingga pada daerah ini terjadi amplifikasi amplitudo gelombang. Kondisi ini menyebabkan ketinggian tsunami di pantai ini menjadi lebih tinggi dibanding daerah lainnya. Waktu penjalaran tsunami dari pusat gempa bumi hingga ke pantai (*travel time*) berkisar antara 18,8 hingga 23,83 menit. Ketinggian rata-rata tsunami di pantai Desa Dulukapa sebesar 12,6 m dengan waktu penjalaran tsunami rata-rata sebesar 21,31 menit. Berdasarkan hasil pemodelan TUNAMI-N2 diperoleh ketinggian genangan/genangan tsunami maksimum saat mencapai daratan untuk setiap *grid* spasial. Nilai ketinggian maksimum pada setiap titik *grid* kemudian dipetakan dan ditumpang tindihkan (*overlay*) citra satelit *Worldview 02* tanggal 17 November 2017 yang diakses dengan

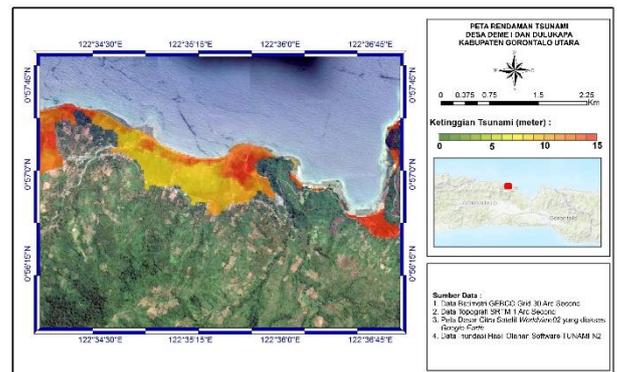
menggunakan aplikasi *Google Earth*. Hasil tumpang tindih tersebut ditampilkan pada **Gambar 12**. Peta inundasi tsunami menunjukkan ketinggian maksimum genangan tsunami di daratan mencapai 15,58 m di desa Dulukapa dan 20 m di desa Deme 1.



Gambar 11. Grafik ketinggian muka air laut hasil simulasi akibat tsunami pada setiap *virtual tide gauge* di Desa Deme 1.

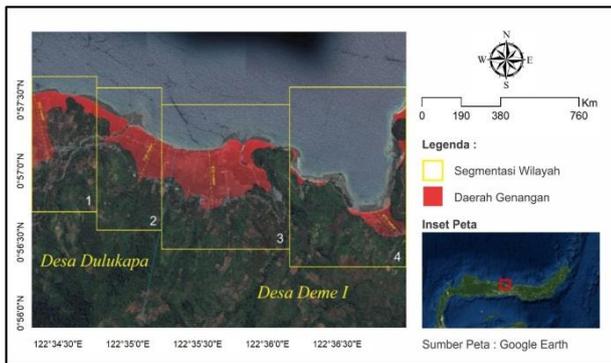
Tabel 4. Waktu tiba dan ketinggian *run up* di pantai yang tercatat pada *virtual tide gauge* di Desa Deme 1.

Tide Gauge	Lintang (°)	Bujur (°)	Waktu Tiba Gelombang Pertama (menit)	Ketinggian Maksimum (m)
A	0,959558	122,567	18,2	12,8
B	0,960437	122,569	18,2	13,7
C	0,959977	122,572	18,2	13,8
D	0,958971	122,575	18,2	11,7
E	0,957871	122,578	18,7	9,94
F	0,956405	122,580	18,9	9,8
		Rata-rata	18,4	11,95



Gambar 12. Peta ketinggian genangan tsunami Desa Dulukapa dan Deme 1.

Peta inundasi tsunami menunjukkan tsunami melanda hampir di semua pantai pada kedua desa. Ketinggian maksimum genangan tsunami di daratan mencapai 15 m di wilayah Desa Dulukapa maupun Desa Deme 1. Luas wilayah terendam akibat tsunami mencapai 1,9 km² dan jarak genangan terjauh di Desa Deme 1 sejauh 830 m dari garis pantai (**Gambar 12**).



Gambar 13. Pembagian segmen area genangan.

Untuk memudahkan dalam analisis, lokasi penelitian dibagi menjadi 4 segmen yang didasarkan pada morfologi pantai digambarkan pada **Gambar 13**. Pada segmen 1 yang merupakan wilayah Desa Dulukapa memiliki ketinggian genangan hingga 15 m dengan jarak terjauh dari garis pantai ke daratan sejauh 800 m. Luasan lahan yang terdampak 320 m². Tutupan lahan pada segmen ini sebagian besar adalah kawasan hutan.

Pada segmen 2 juga masih termasuk dalam wilayah Desa Dulukapa dengan ketinggian genangan berkisar 5–10 m dan jarak genangan dari garis pantai ke daratan sejauh 730 m. Luas daerah terdampak pada segmen ini sebesar 370 m². Tutupan lahan pada segmen ini cukup beragam, yaitu terdapat daerah permukiman yang memanjang searah garis pantai dan juga tegak lurus garis pantai. Selain itu terdapat area persawahan di bagian tengah dan area perkebunan dengan vegetasi yang dominan adalah pohon kelapa di pesisir sebelah barat segmen ini.

Pada segmen 3 yang merupakan wilayah Desa Deme 1 memiliki ketinggian genangan berkisar 5-15 m. Luasan daerah genangan tsunami sebesar 1.010 m². Jarak landaan air laut dari garis pantai sejauh 830 m. Daerah aliran sungai memiliki kecepatan aliran dan kedalaman genangan tsunami yang lebih besar di bandingkan daerah lainnya. Maka diperkirakan ketinggian genangan dan jarak landaan ke daratan yang lebih besar dan lebih jauh dibanding wilayah sekitarnya diakibatkan karena keberadaan daerah aliran sungai dan muara sungai ini (Bakar et al., 2017). Fungsi lahan pada segmen ini beragam. Pada bagian pesisir digunakan sebagai lokasi permukiman yang memanjang di pesisir utara sebelah barat, tengah dan timur segmen ini. Area persawahan ditemukan di bagian tengah dan dan di bagian timur tampak adanya daerah hutan. Daoed et al., (2013) menunjukkan bahwa daerah aliran sungai memiliki kecepatan aliran dan kedalaman genangan tsunami yang lebih besar di bandingkan daerah lainnya. Maka diperkirakan ketinggian genangan dan jarak landaan ke daratan yang lebih besar dan lebih jauh dibanding wilayah sekitarnya diakibatkan karena keberadaan daerah aliran sungai dan muara sungai ini.

Pada segmen 4 juga termasuk dalam area Desa Deme 1 memiliki ketinggian tsunami

mencapai 15–20 m dengan landaan tsunami ke daratan sejauh 470 m. Luas daerah genangan sebesar 200 m². Karakteristik pantai pada segmen ini adalah berbentuk teluk dengan topografi pantai yang relatif landai. Karakteristik teluk ini yang diperkirakan menyebabkan ketinggian tsunami di wilayah ini paling besar dibandingkan wilayah sekitarnya. Berdasarkan cakupan luas genangan dan estimasi waktu tiba gelombang tsunami ini, evakuasi mandiri memungkinkan untuk dilakukan di kedua desa ini. Evakuasi mandiri yang dapat dilakukan berupa lari ke arah tegak lurus menjauhi pantai sesaat setelah gempa bumi terjadi. Namun, strategi mitigasi seyogyanya mempertimbangkan tipologi pesisir dan permukiman pada masing-masing wilayah (Mardiatno et al., 2017).

Pada model ini, koefisien kekasaran (*mannning coefficient*) yang digunakan masih sebatas mempertimbangkan keberadaan lautan, sungai, dan daratan tanpa ada objek lain yang berada di dalamnya. Artinya, dalam perhitungan genangan pada model TUNAMI-N2 ini, belum mempertimbangkan keberadaan permukiman, hutan dan bentuk penggunaan lain fungsi lahan lainnya. Hal ini dikarenakan keterbatasan *software* TUNAMI N2 dalam memetakan model genangan dengan area yang memiliki koefisien kekasaran yang beragam. Pada penelitian terdahulu menunjukkan bahwa koefisien kekasaran sebagai faktor penghambat gelombang tsunami sampai ke daratan. Kondisi pesisir dengan perbedaan topografi dan tutupan lahan akan mempengaruhi tingkat potensi genangan tsunami dan tindakan mitigasi (Mardiatno, 2013). Sehingga untuk mengetahui cakupan genangan yang lebih akurat, parameter koefisien kekasaran yang lebih detail perlu dimasukkan dalam model ini.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan. Sesuai model penjalaran gelombang tsunami yang ditimbulkan gempa tektonik berkekuatan 8,2 Mw, tinggi gelombang dan waktu tibanya di pantai utara Desa Dulukapa diestimasi 9,8-13,8 m dan 18,2–18,9 menit. Sementara di pantai Desa Deme 1 gelombang ini diestimasi mencapai ketinggian 10,76–15,1 m dan waktu tibanya sekitar 18,8–23,83 menit. *Run up* tsunami maksimum setinggi 15 m di Desa Dulukapa dengan genangan seluas 690 m² dan jarak landaan tsunami sejauh 800 m dari garis pantai. Di Desa Deme 1, tinggi *run up* maksimum 20 m, genangan seluas 1.210 m² dan jarak landaan tsunami terjauh sejauh 830 m.

Berdasarkan hasil pemodelan tsunami diketahui bahwa Desa Dulukapa dan Desa Deme 1 merupakan wilayah yang memiliki potensi terdampak tsunami, sehingga perlu dilakukan upaya mitigasi bahaya tsunami. Evakuasi mandiri berupa lari ke arah tegak lurus menjauhi pantai sesaat setelah gempa bumi terjadi memungkinkan

dilakukan oleh warga untuk dilakukan di kedua desa ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini menjadi bagian dari penyelesaian studi Pasca Sarjana di Program Studi Ilmu Perairan Fakultas Perikanan dan Kelautan Universitas Sam Ratulangi Manado. Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan pendanaan dari Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

DAFTAR PUSTAKA

- Baeda, A. Y., & Husain, F. (2012). Kajian Potensi Tsunami Akibat Gempa Bumi Bawah Laut di Perairan Pulau Sulawesi. *Jurnal Teknik Sipil*, 19(1), 75-82.
- Bakar, A. A., Mardiatno, D., & Marfai, M. A. (2017). Study on potential tsunami by earthquake in subduction zone of Sulawesi Sea. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(24), 553. doi: 10.1007/s12517-017-3286-4
- Basith, A., Kongko, W., & Oktaviani, N. (2012). Pemodelan Spasial Landaan Tsunami Menggunakan Variasi Lokasi Sumber dan Magnitud Gempa Studi Kasus Kota Padang. *Proceeding of Conference on Geospatial Science and Engineering*, Yogyakarta.
- BMKG. (2012). *Buku Pedoman Pelayanan Peringatan Dini Tsunami InaTEWS*.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. MacGraw Hill Kogakusha, Ltd. Tokyo.
- Daoed, D., Febriansyah, M. D., & Syukur, M. (2013). Model fisik arah aliran gelombang tsunami di daerah purus dan ulak karang padang. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 9(2), 20–30. doi: 10.25077/jrs.9.2.20-30.2013
- Hamzah, L., Puspito, N. T., & Imamura, F. (2000). Tsunami Catalog and Zones in Indonesia. *Journal of Natural Disaster Science*, 22 (1), 25–43.
- Horspool, N., Pranantyo, I., Griffin, J., Latief, H., Natawidjaja, D., Kongko, W., ... Thio, H. (2014). A Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), 3105–3122. doi: 10.5194/nhess-14-3105-2014
- Imamura, F., Yalciner, A. C., & Ozyurt, G. (2006). *Tsunami Modelling Manual (TUNAMI Model)*.
- Irsyam, M., Sengara, I. W., Aldiarnar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D. H., ... Ridwan, M. (2010). *Development of Seismic Hazard Maps of Indonesia for Revision of Seismic Hazard Maps in SNI 03-1726-2002*. (Research report submitted to the Ministry of Public Works by the Team for Revision of Seismic Hazard Maps of Indonesia.).
- Kaharuddin, Hutagalung, R., & Nurhamdan. (2011). Perkembangan Tektonik dan Implikasinya terhadap Potensi Gempa dan Tsunami di Kawasan Pulau Sulawesi. In *Proceedings JCM Makassar*. Makassar.
- Lander, J. F., Whiteside, L. S., & Lockridge, P. A. (2003). Two Decades Of Global Tsunamis 1982-2002. *Science of Tsunami Hazards*, 21(1), 3.
- Mardiatno, D. (2013). A proposal for tsunami mitigation by using coastal vegetations: some findings from southern coastal area of Central Java, Indonesia. *Journal of Natural Resources and Development*, 3. doi: 10.5027/jnrd.v3i0.07.
- Mardiatno, D., Malawani, M. N., Annisa, D. N., & Wacano, D. (2017). Review on Tsunami Risk Reduction in Indonesia Based on Coastal and Settlement Typology. *The Indonesian Journal of Geography*, 49 (2). doi: 10.22146/ijg.28406
- Pujiastuti, D. (2010). Visualisasi Penjalaran Gelombang Tsunami Di Kabupaten Pesisir Selatan Sumatera Barat. *Jurnal Ilmu Fisika Universitas Andalas*, 2(1).

Halaman ini sengaja dikosongkan