

PEMODELAN INUNDASI TSUNAMI DI SEPANJANG PESISIR KOTA MANADO AKIBAT GEMPABUMI M8,5 DI ZONA SUBDUKSI SULAWESI UTARA

TSUNAMI INUNDATION MODELLING FOR THE COASTAL AREA OF MANADO DUE TO THE M8.5 EARTHQUAKE IN THE NORTH SULAWESI SUBDUCTION ZONE

Robert Owen Wahyu^{1,2*}, Rignolda Djamaluddin², Gybert E. Mamuaya², Tatok Yatimantoro¹, Priyobudi¹

¹Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Angkasa I no. 2, Kemayoran, Jakarta, Kode Pos 3540

²Program Pasca Sarjana Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Jl. Kampus Unsrat Bahu, Kleak, Manado.

*E-mail: robert.owen@bmk.go.id

Naskah masuk: 12 Oktober 2017; Naskah diperbaiki: 3 Mei 2018; Naskah diterima: 15 Mei 2018

ABSTRAK

Zona subduksi Sulawesi Utara merupakan kawasan tektonik yang sangat aktif. Kota Manado berhadapan langsung dengan zona subduksi tersebut sehingga sangat rawan terhadap bahaya tsunami. Sampai saat ini belum ada penelitian mengenai seberapa besar ancaman tsunami bagi Kota Manado. Pemodelan inundasi tsunami dilakukan untuk memperkirakan besarnya ancaman tsunami di kota ini. Gempabumi dengan magnitudo Mw8.5 digunakan untuk memperkirakan dampak tsunami terburuk. Pemodelan numerik tsunami dilakukan dengan menggunakan TUNAMI-N3 dengan grid bersarang (*nested grid*). Data batimetri dari *GEBCO* 1 *arc* menit dan data topografi SRTM 1 *arc* detik digunakan dalam perhitungan model inundasi tsunami. Beberapa titik *virtual tide gauge* dibuat untuk melihat karakter gelombang tsunami di sepanjang pantai Manado. Model inundasi tsunami yang dihasilkan adalah; jarak inundasi bervariasi antara 500 hingga 1200 meter ke arah darat, ketinggian tsunami di pantai bervariasi antara 7 hingga 15 meter dengan *run-up* maksimum 18 meter, dan waktu tiba tsunami di pantai sekitar 17 menit setelah gempabumi terjadi, dapat disimpulkan bahwa wilayah rawan tsunami di Kota Manado meliputi daerah pantai hingga 500-1200 meter ke arah darat. Pemerintah daerah harus memiliki peta inundasi tsunami yang dibuat menggunakan data topografi detail, dan digunakan untuk menyusun rencana evakuasi tsunami jika kota tersebut terancam tsunami.

Kata kunci : zona subduksi, pemodelan tsunami, inundasi, *run-up*

ABSTRACT

North Sulawesi subduction zone is a very active seismic region. Manado directly faces the subduction zone and therefore made the city prone to tsunami hazards. To the best of our knowledge, there has been no research on how big a threat is tsunami in Manado. A tsunami inundation modelling was performed to estimate the potential threat of tsunami in the city. An earthquake with magnitude of M8.5 represented the worst-case scenario of tsunami. The numerical model for the tsunami modeling used in this study was TUNAMI-N3 with nested grids. For tsunami calculation, 1 arc-minute GEBCO bathymetric data and 1 arc-second SRTM topographic data were used. Several virtual tide gauge locations were set to detect wave characteristics of the tsunami along the coast of Manado. The results showed that the inundation distance varied from 500 to 1200 meters inland, the tsunami wave height varied from 8 to 18 meters, and tsunami arrived at coastal area within 17 minutes after the earthquake. According to this inundation model, tsunami prone area in Manado might extend up to 500-1200 meters inland near the coastal areas. Local government should have tsunami inundation maps generated using detailed topographic data that will be useful for evacuation plans in case of tsunami.

Keywords: *subduction zone, tsunami modelling, inundation, run-up*

1. Pendahuluan

Kota Manado merupakan salah satu kota besar di Indonesia yang dalam beberapa tahun terakhir memperlihatkan perkembangan yang sangat pesat. Kota Manado berhadapan langsung dengan zona

subduksi Sulawesi Utara. Oleh karena itu kota ini rawan terhadap bencana tsunami.

Penelitian tentang tsunami telah banyak dilakukan di Indonesia. Sebagian besar penelitian tersebut dilakukan di wilayah barat Indonesia, seperti di

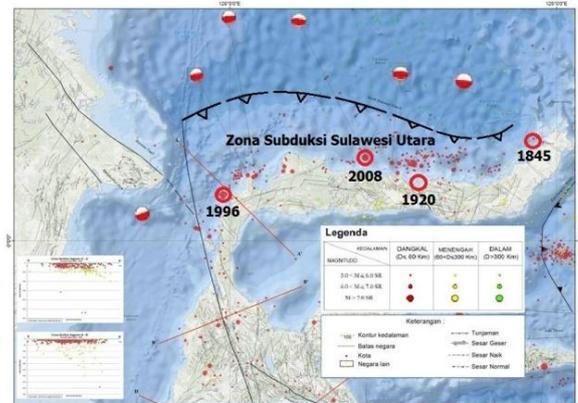
Sumatera[1] dan Jawa[2][3]. Sampai saat ini belum ada penelitian mengenai perkiraan ancaman tsunami bagi Kota Manado seandainya terjadi gempa bumi besar. Perkiraan besarnya ancaman tsunami bagi suatu daerah sangat diperlukan sebagai masukan dalam perencanaan pembangunan daerah dan juga rencana kontigensi yang harus dimiliki oleh daerah rawan tsunami. Dalam penelitian ini besarnya ancaman tsunami diperkirakan dengan menggunakan skenario gempa bumi berkekuatan M8,5 dan pemodelan inundasi tsunami dengan metode numerik [4]. Penelitian ini bertujuan untuk memperkirakan seberapa besar dampak tsunami bagi Kota Manado jika terjadi gempa bumi besar sebagai bahan masukan untuk pembangunan kota dan upaya mitigasi bencana tsunami.

Tatanan tektonik dan kegempaan sekitar Kota Manado. Wilayah Sulawesi Utara merupakan daerah dengan aktivitas seismik/kegempaan yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya pertemuan Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik [5]. Pertemuan kedua lempeng tersebut menyebabkan terbentuknya zona subduksi yang terdapat di sebelah utara dan timur Semenanjung Minahasa. Daerah zona subduksi di utara adalah subduksi lempeng laut Sulawesi yang menyusup di bawah Pulau Sulawesi dan menerus sampai di bawah Teluk Tomini. Di sebelah timur, terdapat penekanan Lempeng Laut Maluku di bawah busur Kepulauan Sangihe dan di bawah Kepulauan Halmahera [6]. Hal ini menyebabkan daerah tersebut tertekan membentuk zona penunjaman dan sesar-sesar yang merupakan sumber-sumber pembangkit gempa bumi.

Lempeng tektonik Halmahera dan lempeng tektonik Sangihe bergerak berlawanan arah, lempeng tektonik Halmahera bergerak ke barat dan lempeng tektonik Sangihe bergerak ke timur. Keduanya menekan lempeng tektonik Laut Maluku, sehingga Laut Maluku menjadi zona yang sangat aktif kegempaanannya dimana sebagian besar gempa bumi yang terjadi merupakan gempa bumi dangkal. Berdasarkan data di katalog gempa bumi BMKG, sebaran episenter gempa bumi sejak tahun 1905 sampai 2016 dapat dilihat di Gambar 1.

Dalam gambar 1 terlihat distribusi gempa bumi di sekitar lengan Sulawesi Utara sangat rapat, menunjukkan tingkat aktivitas gempa yang tinggi, sebagai akibat adanya subduksi Laut Maluku dan subduksi Laut Sulawesi serta sesar lokal lainnya. Di sebelah utara lengan Sulawesi Utara, terlihat distribusi gempa dangkal (kedalaman kurang dari 60 km) sebagai akibat aktivitas subduksi lempeng Laut Sulawesi. Gempa bumi yang diikuti tsunami pernah terjadi pada tahun 1845 dan 1920 (kekuatan gempa tidak diketahui). Dalam 20 tahun terakhir

terjadi dua gempa bumi yang menimbulkan tsunami, yaitu pada tanggal 1 Januari 1996 dengan magnitudo 7,9 di utara Toli-toli dan 16 November 2008 dengan magnitudo 7,3 di utara Gorontalo [7].



Gambar 1. Peta tatanan tektonik Pulau Sulawesi. Busur subduksi ditandai dengan garis tebal putus-putus dengan segitiga. Titik-titik merah adalah episenter gempa bumi. Lingkaran merah adalah gempa bumi yang pernah menimbulkan tsunami. Lingkaran merah-putih adalah bola fokal dari beberapa gempa besar yang pernah terjadi. (BMKG 2017)

2. Metode Penelitian

Untuk memperkirakan genangan tsunami dilakukan pemodelan tsunami dengan menggunakan kode numerik TUNAMI-N3 [8]. Kode ini menggunakan persamaan gelombang air dangkal untuk perhitungan gelombang tsunami di laut dalam. Persamaan gelombang air dangkal menggambarkan gelombang air dimana panjang gelombang jauh lebih besar daripada kedalamannya. Dalam membuat simulasi penalaran gelombang tsunami, digunakan persamaan hukum kekekalan massa (1) dan kekekalan momentum (2 dan 3) yang dibuat dalam dua dimensi, yaitu:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0 \dots \dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) \\ + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\cos \theta \frac{MN}{D} \right) \\ + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} (\cos \theta \eta) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\cos \theta \frac{N^2}{D} \right) \\ + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \dots (3) \end{aligned}$$

dimana, η adalah ketinggian air, λ dan θ adalah lintang dan bujur, M dan N adalah *flux* dalam arah λ dan θ , R jarak dari pusat bumi, t adalah waktu, g adalah percepatan gravitasi, D adalah *total depth* ($= \eta + h$), h adalah kedalaman dan n adalah koefisien *Manning*.

Untuk mendapatkan hasil yang akurat, diperlukan pula analisa kestabilan model numerik yang dijalankan. Oleh karena itu digunakan kondisi *Courant-Friedrichs-Lewy* (CFL) agar model numerik yang dijalankan menjadi stabil. Kondisi stabilitas CFL dapat dicapai dengan memilih ukuran grid dan langkah waktu yang sesuai [9]. Kondisi CFL dapat dicapai apabila :

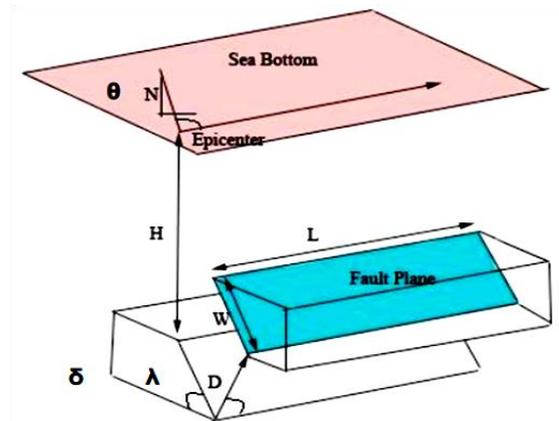
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gd}} \quad (4)$$

dimana Δx adalah ukuran spasial grid, g adalah tetapan gravitasi dan d adalah kedalaman atau batimetri lautan. Persamaan ini menjelaskan bahwa langkah waktu (Δt) harus sama dengan atau lebih kecil dari waktu yang diperlukan gelombang untuk menjalar sejauh ukuran spasial grid (Δx).

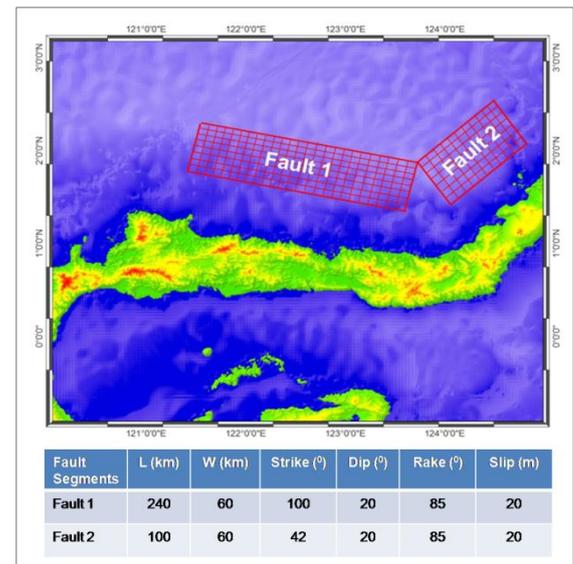
Untuk membuat model awal gelombang tsunami digunakan model deformasi dasar samudera [10]. Model ini menghitung deformasi dasar samudera secara analitik akibat aktivitas sesar yang terjadi di bawahnya. Selanjutnya gelombang awal tsunami dianggap sebangun dengan besarnya deformasi dasar samudera. Model deformasi memerlukan input parameter sesar sebagai berikut, yaitu: L = panjang sesar (km), W = lebar sesar (km), H = kedalaman pusat gempa bumi (km), D = *slip* (m), ϕ = arah *strike* ($^\circ$), δ = *dip* ($^\circ$), dan λ = *rake* ($^\circ$). Untuk lebih detail terkait dengan bidang sesar dan model deformasi dapat dilihat pada Gambar 2.

Untuk keperluan mitigasi bencana tsunami, maka dalam penelitian ini digunakan skenario gempa bumi dengan magnitudo maksimum yang mungkin dapat terjadi di daerah ini. Berdasarkan Peta Gempa Indonesia tahun 2017 [11], potensi gempa bumi di subduksi utara Sulawesi adalah M8,2. Berdasarkan peta tersebut segmen yang aktif adalah antara Toli-toli hingga Gorontalo sepanjang 300 km. Sementara itu gempa bumi penyebab tsunami tahun 1845 dan 1920 tidak diketahui disebabkan oleh segmen yang mana dari zona subduksi ini. Jika mengacu pada tatanan tektoniknya panjang *trench* subduksi Sulawesi Utara mencapai lebih dari 400 km. Berdasarkan pertimbangan dimensi panjang sesar yang lebih panjang 100 km maka potensi gempa bumi M8,2 ditambah faktor 0,3 sehingga potensi gempa bumi adalah M8,5 [12]. Parameter mekanisme sumber gempa bumi diperoleh dari katalog *Global Centroid Moment Tensor* [13]. Berdasarkan data katalog tersebut arah jurus bidang sesar adalah *strike* 100° ,

dip 20° , *rake* 85° (Segmen-1). Untuk segmen-2 arah jurus bidang sesar adalah *strike* 42° , *dip* 20° , *rake* 85° . Gambaran sesar pembangkit tsunami dan parameter bidang sesar tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Parameter-parameter sesar untuk input pemodelan sumber pembangkit tsunami.

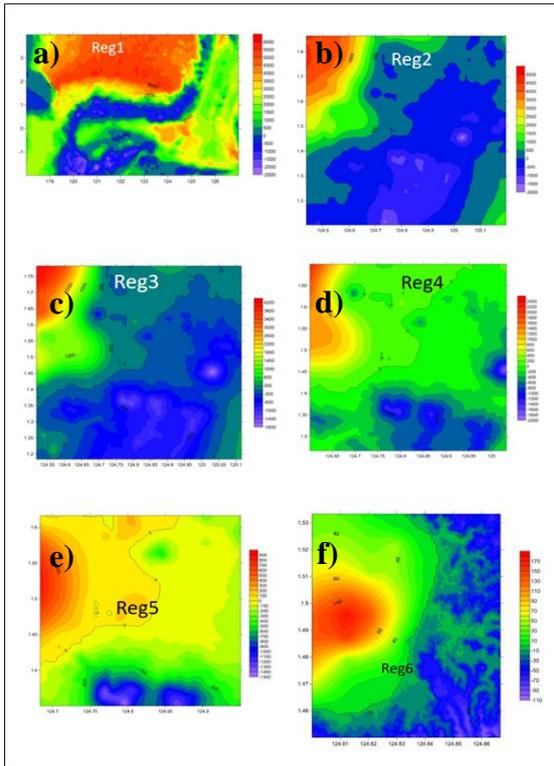


Gambar 3. Segmen sesar dan parameter bidang sesar yang digunakan dalam pemodelan tsunami

Model sesar pembangkit tsunami, dipilih segmen dari Gorontalo hingga Manado. Model sesar pembangkit tsunami diwakili oleh 2 segmen yang memiliki arah *strike* yang berbeda untuk mengakomodasi bentuk *trench* yang berbelok di sekitar Manado. Meskipun terdiri dari 2 segmen, kedua model sesar ini dianggap sebagai satu sumber pembangkit tsunami.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data bathimetri dari *General Bathymetric Chart of the Ocean* atau GEBCO 1arc-menit [14], dan untuk topografi daratan digunakan data SRTM (1 arc-detik) yang dikeluarkan oleh USGS [15]. Area komputasi dari penelitian ini adalah $2^\circ\text{S} - 4^\circ\text{N}$ dan

118°E - 127°E. Untuk mendapatkan hasil yang optimal maka diperlukan grid yang detil dengan kerapatan spasial yang tinggi. Dalam hal ini resolusi data 1 *arc* menit (± 1850 meter) ditingkatkan secara bertahap menjadi resolusi 0,24 *arc* detik menggunakan sistem grid bersarang (*nested grid*). Grid bersarang ini terdiri dari 6 grid dengan perbesaran resolusi 3 kali untuk setiap tahap sehingga grid terakhir memiliki resolusi $\pm 7,6$ meter (Gambar 4). Proses pengolahan data batimetri ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Generic Mapping Tools* atau *GMT* [16].

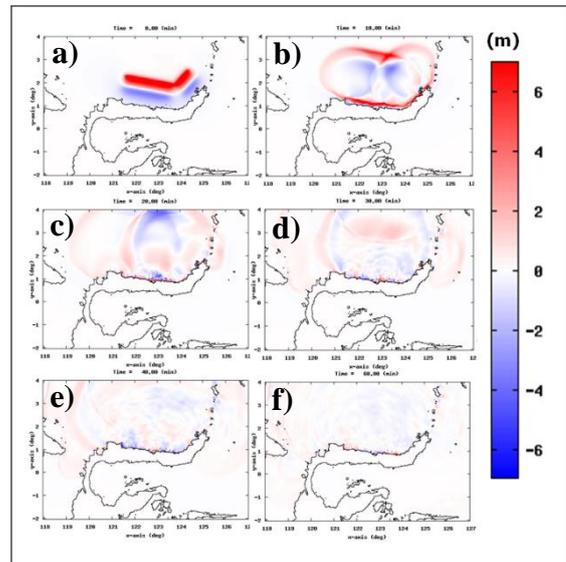


Gambar 4. Pembagian area simulasi tsunami domain model 1 sampai 6. a) Region 1 (1850 m); b) Region2 (616,67 m); c) Region 3 (205,56 m); d) Region 4 (68,52 m); e) Region 5 (22,84 m); f) Region 6 (7,62 m)

3. Hasil dan Pembahasan

Dengan menggunakan model sumber pembangkit tsunami bersegmen dengan arah *strike* yang berbeda maka seluruh pantai utara Sulawesi akan terlanda tsunami dengan magnitudo tsunami yang hampir seragam. Gelombang awal tsunami di pusat gempa pada saat tsunami dibangkitkan mencapai ketinggian 8 meter, hal tersebut digambarkan sebagai area berwarna merah (Gambar 5a). Bersamaan dengan pembangkitan tsunami di tengah lautan, lantai samudera di dekat sumber gempa mengalami penurunan (*subsidence*) hingga 5 meter. Penurunan permukaan tanah ini meluas hingga ke kawasan pantai utara Sulawesi dengan penurunan muka tanah mencapai 1 meter. Hal ini menyebabkan air laut surut secara tiba-tiba sesaat

setelah gempa bumi terjadi. Pada menit ke-10 permukaan air laut yang surut kembali ke ketinggian semula lalu naik sampai ketinggian antara 7-16 meter pada menit ke-17.



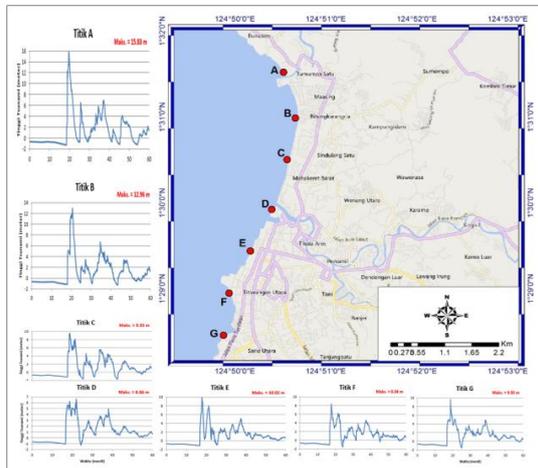
Gambar 5. Snapshot dari penjalaran tsunami pada menit ke 0 (a), 10 (b), 20 (c), 30 (d), 40 (e), dan 60 (f)

Berdasarkan data *time series* gelombang tsunami di 7 lokasi *virtual tide gauge* (Gambar 6) gelombang tsunami tiba di pantai dalam waktu yang hampir bersamaan yaitu pada menit ke-17 setelah gempa bumi terjadi. Berdasarkan data tersebut gelombang tsunami tertinggi adalah gelombang yang pertama datang. Umumnya tsunami terdiri dari 4 hingga 5 gelombang yang datang secara berurutan. Pada *tide gauge* A dan B tsunami tercatat setinggi 15 meter dan 12 meter. Semakin ke selatan (titik C sampai titik D) ketinggian tsunami umumnya di bawah 10 meter.

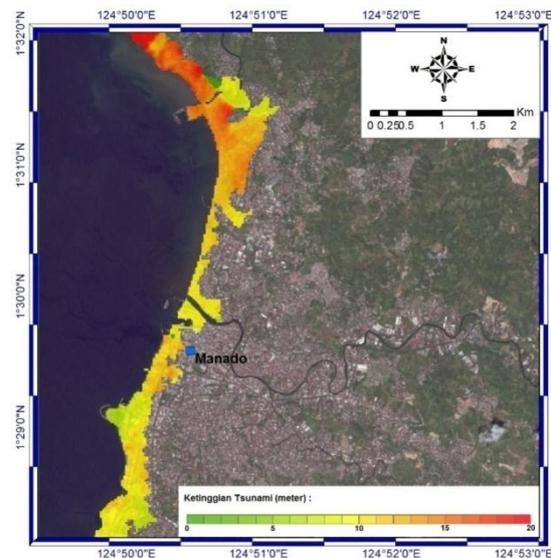
Gambar 7 menunjukkan peta inundasi tsunami di pantai Kota Manado. Berdasarkan peta tersebut ketinggian *run-up* maksimum 18 meter terjadi di daerah utara kota Manado (symbol warna merah). Jangkauan inundasi tsunami di utara Kota Manado mencapai 1200 meter. Sementara itu di pusat kota Manado, *run-up* tsunami mencapai 12 meter dengan jangkauan inundasi 500 meter (symbol warna kuning-jingga).

Tsunami yang terjadi di utara Kota Manado memiliki jarak inundasi yang lebih jauh jika dibandingkan dengan daerah di selatannya. Di pusat kota inundasi tsunami tidak masuk terlalu jauh. Sungai besar di pusat kota seharusnya menjadi jalur tsunami untuk masuk lebih jauh ke darat, tetapi dalam model ini tidak terjadi demikian. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan resolusi model topografi sehingga inundasi tsunami di aliran sungai tidak dapat dimodelkan. Dalam pemodelan

ini data yang digunakan masih terbatas karena menggunakan data topografi SRTM 1 arc detik. Selain tidak dapat memodelkan inundasi tsunami di sungai, data SRTM juga diketahui memiliki kesalahan antara 3 hingga 10 meter sehingga elevasi tanah berdasarkan data ini umumnya lebih tinggi sebenarnya. Akibatnya inundasi yang dihasilkan tidak terlalu jauh.



Gambar 6. Lokasi virtual tide gauge dan gelombang tsunami yang dihasilkan



Gambar 7. Peta inundasi tsunami akibat gempa bumi berkekuatan M8,5 di Manado

Pemodelan inundasi tsunami dengan menggunakan skenario gempa M8,5 pernah dilakukan di Pelabuhan Ratu, Jawa Barat [17] dan di Pantai Kema, Sulawesi Utara [18]. Perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian sebelumnya digambarkan dalam Tabel 1. Tabel tersebut menunjukkan parameter sesar yang berpengaruh besar terhadap ketinggian *run-up* tsunami yaitu parameter *dip*, *slip*. Pemodelan tsunami di Pelabuhan Ratu menggunakan *dip* yang lebih landai (8°) dan *slip* yang lebih kecil (10 meter) dibandingkan dengan penelitian ini yang

menggunakan *dip* 20° dan *slip* 20 meter. Dengan menggunakan besaran *dip* 40% dan *slip* 50% (dibandingkan penelitian ini) ketinggian tsunami yang dihasilkan Pelabuhan Ratu ada di kisaran $30\%-40\%$ dari ketinggian tsunami yang dihasilkan dalam penelitian ini yang mencapai ketinggian 18 meter. Tentu hasil ini juga dipengaruhi oleh kondisi batimetri yang berbeda antara batimetri di laut selatan Jawa Barat dan laut utara Sulawesi. Pemodelan tsunami di Pantai Kema menggunakan besaran *dip* 20° dan *slip* 40% (dibandingkan penelitian ini). Ketinggian tsunami maksimum yang dihasilkan sekitar 14 meter atau 70% dari penelitian ini. Dari hasil perbandingan di atas tampak bahwa metode yang digunakan dalam penelitian ini konsisten dengan hasil pemodelan tsunami di Pelabuhan Ratu, dimana jika input *dip* dan *slip* diperkecil maka ketinggian tsunami yang dihasilkan akan lebih kecil. Pemodelan tsunami di Pantai Kema menggunakan metode yang berbeda dimana hanya menggunakan *single grid* dengan ukuran 1 *arc* menit sehingga meskipun input *dip* dan *slip* lebih kecil tetapi ketinggian tsunami yang dihasilkan masih cukup besar.

Tabel 1. Perbandingan dengan hasil penelitian dengan penelitian sebelumnya

	Tanioka (2012)	Penelitian Rahardjo (2013)	Penelitian ini
Lokasi	Pelabuhan Ratu	Pantai Kema, Sulut	Pantai Manado, Sulut
Metode	<i>Nested Grid</i>	<i>Single Grid</i>	<i>Nested Grid</i>
<i>Dip</i>	8°	20°	20°
<i>Slip</i>	10 meter	8 meter	20 meter
<i>Run up</i>	7 meter	14 meter	18 meter

4. Kesimpulan

Kota Manado merupakan daerah yang rawan terhadap bencana tsunami. Jika terjadi gempa bumi berkekuatan M8,5 maka ketinggian tsunami maksimum mencapai ± 18 meter di pesisir utara kota Manado dengan jangkauan inundasi terjauh ± 1200 meter. Sedangkan untuk pusat kota Manado, ketinggian tsunami maksimum adalah 12 meter dengan jangkauan inundasi terjauh 500 meter. Jika digunakan data topografi detil hasil pengukuran, kemungkinan luas area yang tergenang akan bertambah. Sementara pemodelan ini menggunakan data SRTM yang umumnya memiliki nilai topografi lebih tinggi dari sebenarnya. Waktu tiba hasil simulasi tsunami di pesisir Manado dan sekitarnya adalah ± 17 menit setelah gempa bumi terjadi. Dari hasil kajian ini dapat dirumuskan beberapa saran untuk Pemerintah Daerah Kota Manado sebagai berikut:

1. Pemerintah daerah menyediakan peta topografi detail untuk membuat peta inundasi tsunami Kota Manado.
2. Harus disusun rencana evakuasi tsunami yang efisien sehingga masyarakat yang berada pada jarak 500-1000 meter dari pantai dapat menuju tempat aman tsunami dalam waktu 17 menit jika terjadi gempa berpotensi tsunami bagi kota Manado.
3. Perlu dilakukan sosialisasi rencana evakuasi tsunami secara berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] K. Satake, Y. Nishimura, P. S. Putra, A. R. Gusman, H. Sunendar, Y. Fujii, Y. Tanioka, H. Latief, E. Yulianto, "Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling", *Pure and Applied Geophysics*, Vol.170, issue 9-10, pp. 1567-1582, 2012.
- [2] Y. Fujii and K.Satake, "Source of the July 2006 West Java tsunami estimated from from tide gauge records", *Geophys. Res. Lett.*, 33 L24317 doi:10.1029/2006GL028049, 2006.
- [3] Y. Tanioka, H. Latief, H. Sunendar, AdityaRiadiGusman, S. Koshimura, "Tsunami hazard mitigation at Pelabuhanratu", *Indonesia Journal of Disaster Research*, Vol.7, No.1, 2012.
- [4] H. Latief, N.T. Puspito, dan F. Imamura, "Tsunami Catalog and Zoning in Indonesia", *Journal of Natural Disaster and Science*, Vol.22 No.1, Japan, 2000.
- [5] E.A. Silver, dan J.C. Moore, "The Molucca Sea collision zone, Indonesia," *J. geophys. Res.*, 83, 1681-1691, 1978.
- [6] R. Hall dan W. Spakman. Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.003>, 2015.
- [7] BMKG, "Katalog Gempabumi Merusak Tahun 1821 – 2014," 2015.
- [8] F. Imamura, "Tsunami Modelling Manual (TUNAMI numerical code)," *Disaster Control Research Center, Tohoku University., Sendai, Japan, 2006.*
- [9] R. Courant, K. Friedrichs, H.Lewy, "On the partial difference equations of mathematical physics," *IBM Journal of Research and Development*, 11 (2): 215–234, 1967.
- [10] Y. Okada, "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space," *Bull. Seis. Soc. of America*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- [11] Litbang PU, "Peta Gempa Nasional 2017". Internet:<http://puskim.pu.go.id/6901-2/>, diakses 8 Januari 2018.
- [12] Donald L. Well dan Kevin J. Coppersmith, "New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement," *Bull. Seis. Soc. of America*, Vol.84, No.4, pp.974-1002, 1994.
- [13] NEIC. "Global CMT Catalogue". Internet: www.globalcmt.org/CMTsearch.html, diakses 27 Maret 2014.
- [14] BODC. "General Bathymetric Chart of the Oceans". Internet: http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_one_minute_grid
- [15] USGS. "SRTM-3" Internet: http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/
- [16] P. Wessel, W.H.F. Smith, Free Software Helps Map and Display Data. *Eos. Trans. Am. Geophys. Union*, 85, pp. 159-177, 1995.
- [17] Y. Tanioka, H. Latief, H. Sunendar, Aditya Riadi Gusman, S. Koshimura, "Tsunami hazard mitigation at Pelabuhanratu", *Indonesia Journal of Disaster Research*, Vol.7, No.1, 2012.
- [18] S.S. Raharjo, G.E. Mamuaya, dan L.J.L Lumingas, Mapping of tsunami prone areas in coastal region of Kema, North Sulawesi. *Aq. Sci. Mg.* 1, 2013.