

Pemodelan Numerik Tsunami untuk Mengestimasi Waktu Tiba dan Ketinggian Maksimum Gelombang Tsunami di Teluk Amurang

Adelia Fatimah^{1,2*}, Rigolda Djameluddin², Suria Darwisito², Jane Marianne Mamuja², Adnan Sjalout Wantasen², Joshian Nicolas William Schaduw²

¹Stasiun Geofisika Manado, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Manado 95161, Indonesia

²Program Studi Magister Ilmu Perairan, FPIK, Universitas Sam Ratulangi, Manado 95115, Indonesia

*Penulis Korespondensi. Email: fatimah.adelia@gmail.com

Abstrak

Teluk Amurang adalah daerah pesisir Kabupaten Minahasa Selatan yang padat penduduk namun berhadapan dengan zona subduksi Sulawesi Utara yang berpotensi membangkitkan gempa bumi pemicu tsunami. Proses bencana tsunami terjadi dengan cepat, namun dampaknya sangat merusak dan menyebabkan banyak korban jiwa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penjarangan gelombang tsunami dengan skenario terburuk Mw 8,5 di Teluk Amurang. Metode numerik pada perangkat lunak COMCOT digunakan untuk memodelkan penjarangan gelombang tsunami, sehingga diperoleh estimasi waktu tiba dan ketinggian maksimum gelombang tsunami. Hasil pemodelan tsunami menggunakan COMCOT menunjukkan estimasi waktu tiba gelombang tsunami pada titik pengamatan pasang surut virtual di Teluk Amurang yaitu berkisar antara 8 – 11 menit. Ketinggian maksimum gelombang tsunami termasuk dalam kategori awas yaitu 9,55 meter hingga 11,44 meter. Estimasi waktu tiba tercepat tercatat di Kecamatan Amurang Barat dan ketinggian maksimum gelombang tsunami ditemukan di Kecamatan Tumpa. Hasil pemodelan ini dapat digunakan sebagai salah satu langkah mitigasi bencana tsunami dalam membangun kesiapsiagaan masyarakat sekitar dan membantu proses evakuasi ketika bencana tsunami terjadi.

Kata Kunci: Pemodelan Tsunami; COMCOT; Waktu Tiba; Ketinggian Maksimum

Abstract

Amurang Bay is a coastal area of South Minahasa Regency which is densely populated but faces the subduction zone of North Sulawesi which has the potential to generate earthquakes that trigger a tsunami. The process of the tsunami disaster occurred quickly, but the impact was very destructive and caused many casualties. This study aims to determine the propagation of tsunami waves with the worst scenario Mw 8.5 in Amurang Bay. Numerical methods in COMCOT software are used to model the propagation of tsunami waves in order to obtain an estimate of arrival time and maximum height of tsunami waves. Based on this modeling, the estimated arrival time of tsunami waves at the virtual tide gauge point in Amurang Bay is in the range of 8–11 minutes. The maximum height of tsunami waves is included in the alert category, which is 9.55 meters to 11.44 meters. The fastest estimated arrival time was recorded in Amurang Barat District and maximum height of tsunami waves was found in Tumpa District. The results of this modeling can be used as one of the steps for mitigating tsunami disaster by preparing the surrounding community and assisting the evacuation process when a tsunami disaster occurs.

Keywords: *Tsunami Modelling; COMCOT; Time Arrival; Maximum Height*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan yang secara geografis terletak diantara dua benua dan dua samudera, yaitu Benua Asia dan Benua Australia, serta Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Posisi strategis tersebut menyebabkan Indonesia memiliki peranan penting pada sektor pelayaran yang menyediakan jalur perlintasan internasional, pemasok industri perikanan dunia, hingga wisata bahari yang menjadi incaran wisatawan mancanegara. Secara geologis, Indonesia terletak diantara pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik. Akibatnya, Indonesia memiliki dua potensi yang berkebalikan, yaitu potensi sumber energi dan potensi sumber bencana geologi. Potensi sumber energi tersebut diantaranya yaitu tanah yang subur, cekungan air tanah, cekungan sedimen, dan panas bumi. Sedangkan potensi bencana geologi yang mengintai Indonesia yaitu erupsi gunung api, gempa bumi, tsunami, dan gerakan tanah [1].

Pertemuan Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Filipina terjadi diantara wilayah Sulawesi Utara dan Laut Maluku yang bergerak secara konvergen sehingga menghasilkan beberapa patahan dan zona subduksi, baik di darat maupun di laut. Patahan tersebut yaitu Patahan Manado, Patahan Amurang, Patahan Bolaang Mongondow, dan Patahan Gorontalo [2]. Pada bagian utara Pulau Sulawesi tepatnya di Laut Sulawesi, terdapat zona Subduksi Sulawesi Utara yang bergerak dengan kecepatan 42 – 50 mm/th [3] dan dapat memicu gempa bumi hingga kekuatan Mw 8,5 [4] yang berpotensi membangkitkan gelombang tsunami. Potensi tsunami tersebut mengancam sepanjang pesisir utara Pulau Sulawesi, termasuk salah satunya pesisir Teluk Amurang yang berada di Kabupaten Minahasa Selatan, Sulawesi Utara. Karakteristik garis pantai berbentuk teluk dapat menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan gelombang tsunami akibat adanya penyempitan daerah, sehingga memperparah kerusakan yang ditimbulkan seperti kejadian tsunami di Teluk Palu yang telah merenggut 4.340 jiwa meninggal atau hilang dan kerusakan pada 68.451 unit rumah [5].

Sejarah mencatat bahwa Teluk Amurang pernah dilanda gelombang tsunami pada tahun 1930 yang menyebabkan penduduk harus mengungsi dari pantai karena terjadi kenaikan muka air laut dan terjadi amblesan pada muara Sungai Ranowangko [6]. Namun, informasi rinci terkait ketinggian tsunami, luasan area rendaman, dan dampak kerusakan akibat bencana tsunami tersebut tidak tersedia. Menurut kajian pemodelan tsunami, Teluk Amurang termasuk dalam klasifikasi tsunami sangat berbahaya [7]. Padahal, pesisir Teluk Amurang termasuk daerah yang strategis karena berada pada lintas darat jalur Trans Sulawesi yang menghubungkan daerah Kabupaten/Kota hingga Provinsi dalam Pulau Sulawesi. Selain itu, pusat perekonomian dan pemerintahan Kabupaten Minahasa Selatan juga terpusat di pesisir Teluk Amurang yang menyebabkan tingginya laju pertumbuhan penduduk yaitu peringkat ke 3 dari 15 Kab/Kota di Provinsi Sulawesi Utara. Sehingga, pesisir Teluk Amurang memiliki ancaman bahaya tsunami yang tinggi dengan jumlah penduduk yang terpapar sekitar 72.039 jiwa [8].

Penelitian tentang pemodelan tsunami di wilayah Sulawesi Utara telah dilakukan, seperti di Kota Manado [9] dan Kota Bitung [10]. Namun, hingga saat ini belum ada penelitian tentang potensi ancaman tsunami di Teluk Amurang. Potensi bahaya tsunami pada suatu daerah penting untuk diketahui sebagai upaya mitigasi bencana tsunami dalam menekan jumlah korban jika bencana tsunami benar-benar terjadi dan juga sebagai masukan dalam rencana pembangunan daerah terkait. Dalam penelitian ini digunakan skenario kejadian terburuk (*worst scenario*) akibat gempa bumi Mw 8,5 dengan bantuan perangkat lunak COMCOT (*Cornel Multi-grid Coupled Model*).

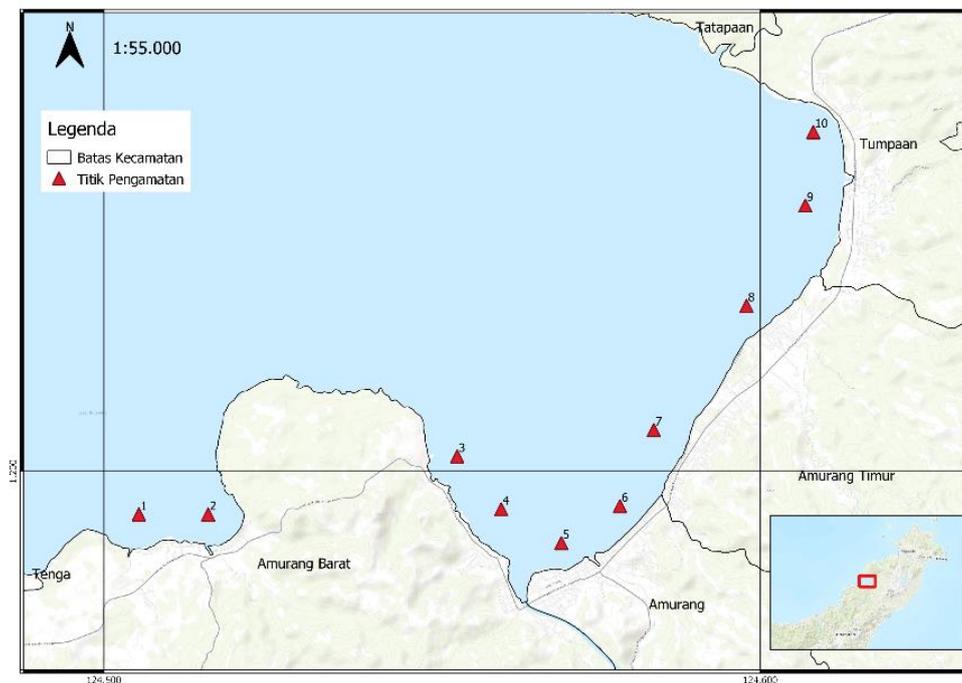
Pemodelan tsunami menggunakan COMCOT telah banyak digunakan dalam penelitian tsunami di Indonesia, diantaranya yaitu oleh Nasir dkk. [11], Widada dkk. [12], dan Ratuluhain dkk. [13]. COMCOT merupakan pemodelan numerik yang menerapkan skema *leap-frog finite difference* dan sistem *nested grid* (grid bersarang), sehingga diperoleh hasil pemodelan yang lebih rinci dengan resolusi yang lebih baik. *Output* dari pemodelan digunakan untuk mengestimasi waktu tiba dan ketinggian gelombang tsunami. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui

waktu tiba dan ketinggian maksimum gelombang tsunami di pesisir Teluk Amurang akibat gempa bumi Mw 8,5 sebagai upaya mitigasi bencana tsunami.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Teluk Amurang seperti yang tersaji pada Gambar 1 yang terdiri dari Kecamatan Tumpaan, Kecamatan Amurang Timur, Kecamatan Amurang, dan Kecamatan Amurang Barat. Waktu penelitian yaitu dimulai dari bulan Januari hingga Mei 2023.



Gambar 1. Area penelitian dan lokasi titik pengamatan pasang surut virtual

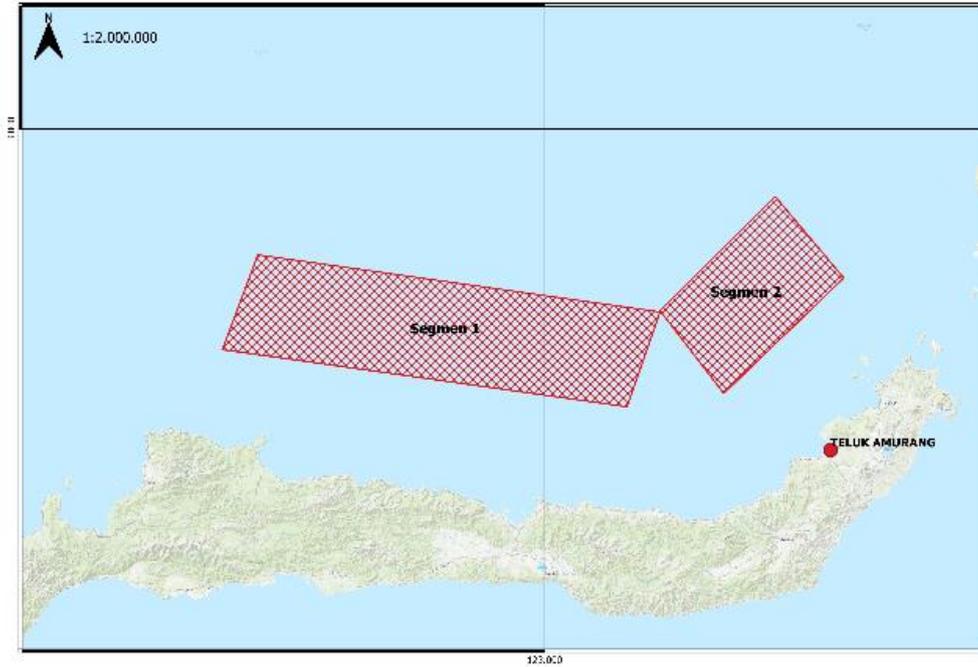
2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian merupakan data sekunder yang terdiri dari data batimetri dan topografi dari Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1:50.000 yang diunduh pada situs resmi Ina-Geoportal milik Badan Informasi Geospasial (BIG); data tutupan lahan dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) yang diunduh dari situs resmi KLHK; dan data parameter sumber patahan pembangkit tsunami dari hasil kajian Pusat Studi Gempa Nasional. Data yang telah dikumpulkan diolah menggunakan perangkat lunak COMCOT untuk memodelkan penjalaran gelombang tsunami, sehingga menghasilkan data waktu tiba dan ketinggian tsunami.

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Penentuan Skenario Gempabumi Pembangkit Tsunami

Prosedur penelitian diawali dengan menentukan skenario gempa bumi pembangkit tsunami sebagai inputan untuk menjalankan pemodelan simulasi tsunami. Penelitian ini menggunakan skenario terburuk akibat gempa bumi zona Subduksi Sulawesi Utara Mw 8,5 dan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan panjang dan lebar patahan menggunakan rumusan *Scaling Law* [14]. Selanjutnya, patahan tersebut dibagi menjadi 2 segmen agar mendekati bentuk subduksi sebenarnya.



Gambar 2. Sketsa Sumber Patahan

2.3.2 Pemodelan tsunami menggunakan COMCOT

Pemodelan tsunami akibat potensi gempa bumi terbesar dilakukan dengan bantuan perangkat lunak COMCOT untuk mendapatkan nilai dari waktu tiba dan ketinggian gelombang tsunami di Teluk Amurang.

Gelombang tsunami menjalar sesuai prinsip pergerakan momentum ke segala arah dan memiliki energi yang stabil, mulai dari permukaan hingga ke dasar perairan. Beberapa pemodelan numerik telah digunakan untuk menjelaskan penjalaran gelombang tsunami salah satunya yaitu COMCOT, yang dikembangkan oleh Wang dan Power [15]. Persamaan dasar yang digunakan dalam pemodelan tsunami adalah persamaan kontinuitas dan persamaan kekekalan momentum sebagai berikut:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

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

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

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

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

Dengan M adalah perubahan air dalam arah x (m/s^2); N adalah perubahan air dalam arah y (m/s^2); h adalah kedalaman air dari dasar laut (m); η adalah elevasi muka air laut (m); u, \bar{u} adalah kecepatan horizontal partikel air dalam arah y (m/s); v, \bar{v} adalah kecepatan horizontal partikel air dalam arah x (m/s); $D = (h + \eta)$ adalah total kedalaman air sesaat dari permukaan hingga dasar (m); g adalah percepatan gravitasi (m/s^2); dan t adalah waktu (s).

Agar memperoleh hasil penjalaran gelombang tsunami yang rinci, COMCOT menerapkan sistem grid bersarang (*nested grid*) yang terhubung secara dinamis, sehingga dalam penelitian ini digunakan 5 tingkatan grid. Grid tingkat 1 adalah grid terluar dengan ukuran grid terbesar dan semua wilayah grid yang berlangsung bersarang di grid tingkat 1 disebut Grid 2 begitu seterusnya. Grid 5 bersesuaian dengan area penelitian yaitu Teluk Amurang (Gambar 1).

Selanjutnya, efek gesekan diperhitungkan dalam pemodelan tsunami COMCOT dengan memanfaatkan nilai *mannig* yang terdapat pada buku panduan COMCOT sesuai data jenis tutupan lahan dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Pemasangan titik pengamatan pasang surut virtual digunakan untuk mendeteksi waktu tiba dan ketinggian gelombang tsunami, tersebar di sepanjang pesisir Teluk Amurang seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1.

2.3.3 Analisis Waktu Tiba dan Ketinggian Maksimum Gelombang Tsunami

Analisis kuantitatif dilakukan berdasarkan hasil pemodelan perangkat lunak COMCOT yaitu estimasi waktu tiba dan ketinggian maksimum gelombang tsunami. Data waktu tiba dan ketinggian maksimum tsunami ditampilkan dalam bentuk tabel.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Parameter Gempabumi Pembangkit Tsunami

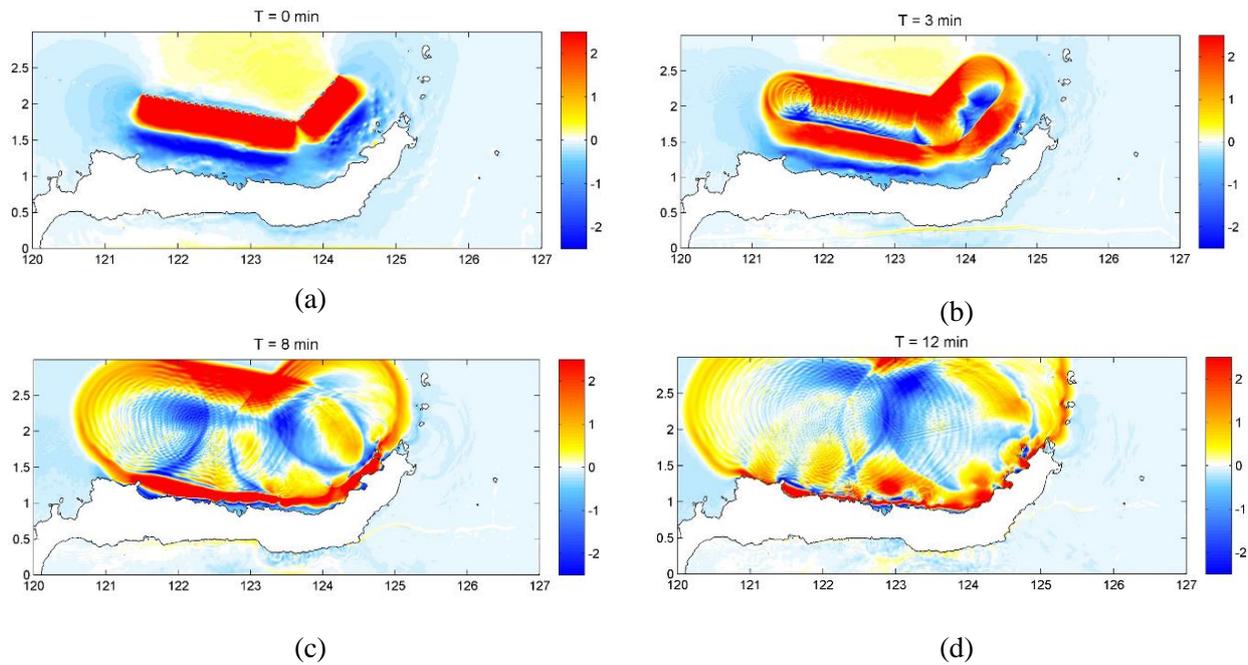
Zona subduksi Sulawesi Utara memiliki potensi gempabumi hingga kekuatan Mw 8,5 yang dapat membangkitkan gelombang tsunami di sepanjang pesisir utara Pulau Sulawesi, termasuk salah satunya yaitu Teluk Amurang. Berdasarkan potensi magnitudo tersebut, dilakukan perhitungan *Scalling Law* untuk menentukan panjang dan lebar bidang patahan. Sedangkan parameter geometri bidang patahan yang terdiri dari *strike*, *dip*, dan *rake* diperoleh dari katalog Global CMT. Parameter bidang patahan tersebut terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter bidang patahan

Mw	Segmen 1						Segmen 2					
	Panjang (km)	Lebar (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Slip (m)	Panjang (km)	Lebar (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Slip (m)
8,5	240	60	100	20	85	20	100	60	42	20	85	20

3.2 Pemodelan Tsunami menggunakan COMCOT

Pemodelan tsunami dengan bantuan perangkat lunak COMCOT pada penelitian ini digunakan untuk mendapatkan estimasi waktu tiba dan ketinggian maksimum gelombang tsunami di Teluk Amurang. Penentuan durasi waktu pemodelan mengacu pada standar operasional prosedur peringatan dini tsunami oleh BMKG yaitu 2 jam atau 120 menit[16]. Hasil pemodelan tsunami di Teluk Amurang pada Grid 1 tersaji dalam Gambar 3. Warna merah pada gambar menunjukkan pergerakan gelombang tsunami naik (*uplift*) dan warna biru merupakan pergerakan gelombang tsunami turun (*subsidence*). Gelombang naik yang sampai ke daratan dan merendam pemukiman masyarakat merupakan gelombang yang berbahaya.



Gambar 3. Hasil pemodelan tsunami pada Grid 1 (a) $t = 0$ menit, (b) $t = 3$ menit, (c) $t = 8$ menit, dan (d) $t = 12$ menit

Berdasarkan hasil pemodelan, gelombang tsunami yang dibangkitkan oleh gempa bumi subduksi Sulawesi Utara Mw 8,5 menjalar ke sepanjang pantai utara Pulau Sulawesi, termasuk Teluk Amurung. Gambar 3(a) – (d) memperlihatkan penjarangan gelombang tsunami pada $t = 0, 3, 8,$ dan 12 menit. Deformasi dasar laut terjadi pada $t = 0$ yang ditandai dengan terjadinya deformasi di permukaan air laut. Pada menit ke-3 gelombang naik mulai menjalar dari sekitar sumber pembangkit ke segala arah. Selanjutnya pada menit ke-8 gelombang naik tersebut mulai memasuki pesisir utara Pulau Sulawesi termasuk Teluk Amurung dan pada menit ke-12 gelombang tsunami telah menggenangi daratan pesisir Teluk Amurung.

3.3 Analisis Waktu Tiba dan Ketinggian Gelombang Tsunami

Hasil pemodelan tsunami yang terdiri dari waktu tiba dan ketinggian gelombang tsunami dilakukan analisis kuantitatif. Tabel 2 di bawah ini merupakan data estimasi waktu tiba dan ketinggian maksimum gelombang tsunami di titik pengamatan pasang surut virtual.

Tabel 2. Estimasi waktu tiba dan ketinggian maksimum gelombang tsunami di titik pengamatan

Titik Pengamatan	Lokasi	Estimasi Waktu Tiba (menit)	Ketinggian Maksimum (meter)
1	Amurang Barat	8,83	9,55
2	Amurang Barat	9,03	10,73
3	Amurang Barat	10,5	8,78
4	Amurang Barat	10,63	9,68
5	Amurang	10,8	10,71
6	Amurang	10,7	10,48
7	Amurang Timur	10,56	10,04
8	Amurang Timur	10,83	10,20
9	Tumpaan	11	10,82
10	Tumpaan	11,1	11,44

Secara umum tidak ada perbedaan signifikan pada estimasi waktu tiba gelombang tsunami tersebut yaitu berkisar antara 8,83 menit hingga 11,1 menit. Titik pengamatan yang pertama mendeteksi gelombang tsunami berlokasi di Amurang Barat yaitu pada Titik Pengamatan 1 pada menit ke 8,83. Titik Pengamatan 1 merupakan titik pengamatan yang terdekat dengan sumber pembangkit tsunami. Sedangkan, estimasi waktu tiba yang lebih lama berada di Titik Pengamatan 10 yaitu pada menit ke 11,1 terletak di Kecamatan Tumpaan. Hal tersebut dikarenakan posisi Titik Pengamatan 10 relatif lebih jauh dari sumber pembangkit tsunami dibandingkan titik pengamatan lainnya.

Selanjutnya, pada Tabel 2 ditunjukkan ketinggian maksimum gelombang tsunami di Teluk Amurang berkisar antara 9,55 – 11,44 meter. Ketinggian maksimum yaitu 11,44 meter berada di Titik Pengamatan 10 yang berlokasi di Kecamatan Tumpaan, sedangkan ketinggian maksimum terendah yaitu 9,55 meter berada di Titik Pengamatan 1 yang berlokasi di Kecamatan Amurang Barat. Secara umum gelombang tsunami yang menerjang Teluk Amurang termasuk dalam kategori Awas, yaitu ketinggian tsunami lebih dari 3 meter. Jika hal ini terjadi maka harus dilakukan evakuasi menyeluruh [16].

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini bersesuaian dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kurniawan, dkk.[17] dengan skenario gempa bumi Mw 8,5 didapatkan estimasi waktu tiba gelombang tsunami di Minahasa Selatan bagian utara yaitu 9 menit. Dengan menggunakan skenario yang sama yaitu Mw 8,5 di zona Subduksi Sulawesi Utara, Wahyu, dkk. [9] melakukan pemodelan tsunami di pesisir Kota Manado dan memperoleh ketinggian tsunami di Kota Manado berkisar antara 7 hingga 15 meter yang mencapai pantai pada menit ke-17. Kota Manado berada pada garis pantai yang berbentuk teluk, sehingga estimasi waktu tiba dan ketinggian yang diperoleh cukup bersesuaian dengan hasil penelitian ini. Adapun perbedaan estimasi waktu tiba tersebut dikarenakan posisi Kota Manado relatif lebih jauh dari sumber pembangkit dibandingkan Teluk Amurang. Selanjutnya, Pandey, dkk. [7] melakukan pemodelan penjalaran tsunami di Pantai Sulawesi Utara dengan skenario gempa bumi M 8,7 dan menyatakan bahwa Amurang termasuk dalam klasifikasi tsunami sangat bahaya dengan ketinggian lebih dari 3 meter.

Tersedianya data estimasi waktu tiba dan ketinggian gelombang tsunami dapat digunakan sebagai acuan untuk merancang jalur evakuasi bencana tsunami, sehingga dapat membangun kesiapsiagaan masyarakat di pesisir Teluk Amurang. Hal tersebut merupakan salah satu langkah mitigasi dalam menekan dampak yang ditimbulkan oleh bencana tsunami dan juga dapat dimanfaatkan dalam rencana pembangunan daerah terkait.

4. Kesimpulan

Pemodelan tsunami di pesisir Teluk Amurang akibat gempa bumi subduksi Sulawesi Utara Mw 8,5 menggunakan bantuan perangkat lunak COMCOT menunjukkan bahwa estimasi waktu tiba tsunami di pesisir Teluk Amurang yaitu 8 – 11 menit. Ketinggian tsunami di Teluk Amurang termasuk dalam kategori Awas dengan ketinggian maksimum gelombang tsunami di titik pengamatan pasang surut virtual mencapai 11,44 meter.

Hasil pemodelan ini dapat dijadikan acuan dalam membangun kesiapsiagaan masyarakat sekitar pesisir Teluk Amurang terhadap kejadian tsunami, salah satunya yaitu dengan edukasi dan pelatihan evakuasi mandiri bencana tsunami. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat dijadikan pertimbangan dalam pembangunan daerah setempat.

Referensi

- [1] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral, “Potensi dan Mitigasi Bencana Geologi,” 2019.
- [2] A. C. Effendi dan S. S. Bawono, *Peta Geologi Manado*, Edisi 2. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1997.

- [3] A. Socquet, *dkk.*, “Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data,” *J Geophys Res Solid Earth*, vol. 111, no. 8, Agu 2006, doi: 10.1029/2005JB003963.
- [4] Pusat Studi Gempa Nasional (PusGen) dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman (Indonesia), *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. 2017.
- [5] Badan Nasional Penanggulangan Bencana, “Laporan Situasi Gempabumi M7,4 & Tsunami Sulawesi Tengah,” 2019.
- [6] S. L. Soloviev and C. N. Go, *Catalogue of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean*. Canada: Institute of Oceanic Sciences, 1984.
- [7] F. Pandey, G. Pasau, dan S. H. J. Tongkukut, “Simulasi Penjalaran Tsunami di beberapa Pantai di Sulawesi Utara sebagai Upaya Mitigasi Bencana,” *Jurnal MIPA Unsrat Online*, vol. 4, no. 2, pp. 103-107, 2015. Tersedia pada: <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmuo/article/view/7977>
- [8] Badan Pusat Statistik Provinsi Sulawesi Utara, “Provinsi Sulawesi Utara Dalam Angka 2022,” Sulawesi Utara, 2022.
- [9] R. O. Wahyu, *dkk.*, “Pemodelan Inundasi Tsunami Di Sepanjang Pesisir Kota Manado Akibat Gempabumi M8,5 Di Zona Subduksi Sulawesi Utara,” *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 19, no. 1, p.13, 2018. doi: 10.31172/jmg.v19i1.448
- [10] S. P. D. Sriyanto, N. Nurfitriani, M. Zulkifli, dan S. N. E. Wibowo, “Pemodelan Inundasi dan Waktu Tiba Tsunami di Kota Bitung, Sulawesi Utara Berdasarkan Skenario Gempabumi Laut Maluku,” *GEOMATIKA*, vol. 25, no. 1, p. 47, Mei 2019, doi: 10.24895/jig.2019.25-1.959.
- [11] M. Nasir, M. Ikhsan, dan D. A. Amir, “Estimasi Waktu Dan Tinggi Gelombang Tsunami di Lhok Kruet Kabupaten Aceh Jaya,” *Jurnal Teknik Sipil dan Teknologi Konstruksi*, vol. 1, no. 1, pp. 84-95, 2015. doi: 10.35308/jts-utu.v1i1.724
- [12] S. Widada, I. M. Darda, dan A. Satriadi, “Identifikasi Wilayah Terdampak Tsunami Berdasarkan Peta Ancaman Tsunami di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur,” *Buletin Oseanografi Marina*, vol. 11, no. 3, pp. 291–305, Sep 2022, doi: 10.14710/buloma.v11i3.44032.
- [13] E. S. Ratuluhain, Y. A. Noya, E. Pradjoko, Rahman, dan R. D. Hukubun, “Rekonstruksi Tsunami Mentawai dengan Menggunakan COMCOT v1.7,” *NEKTON: Jurnal Perikanan dan Ilmu Kelautan*, vol. 2, no. 2, pp. 54–62, Okt 2022, doi: 10.47767/nekton.v2i2.403.
- [14] D. L. Wells dan K. J. Coppersmith, “New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84, no. 4, pp. 974–1002, 1994. doi: 10.1785/BSSA0840040974
- [15] X. Wang dan W. Power, *COMCOT: a Tsunami Generation Propagation and Run-up Model* New Zealand: Lower Hutt, 2011.
- [16] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, “Tsunami Early Warning Service Guidebook for InaTEWS-Second Edition,” 2012. [Daring]. Tersedia pada: www.facebook.com/InfoBMKG
<http://twitter.com/infoBMKG>
- [17] W. Kurniawan, E. Bangun, dan B. Prakoso, “Estimasi Ancaman Tsunami di Zona Subduksi Sulawesi Bagian Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Tsunami,” *PENDIPA Journal of Science Education*, vol. 5, no. 2, pp. 204–209, Jan 2021, doi: 10.33369/pendipa.5.2.204-209.