

Kajian Potensi Genangan dan Waktu Tiba Tsunami Di Kota Lhokseumawe

Ibrahim^{1*}, Tursina¹, Syarifah Keumala Intan², Mirza Fahmi³, Zairipan Jaya⁴,
Abdullah Irwansyah⁵

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe Indonesia

*Koresponden email: ibrahim@pnl.ac.id

Diterima: 13 Februari 2024

Disetujui: 25 Maret 2024

Abstract

Lhokseumawe was one of the towns affected by the 2004 tsunami. During the last tsunami, tsunami waves arrived last on the coast of Lhokseumawe compared to the western and northern coastal areas of Aceh. Therefore, this tsunami modelling study was conducted to determine the arrival time of tsunami waves on the coast of Lhokseumawe city and to determine the affected areas from the tsunami inundation map information. The method used is tsunami numerical modelling using the COMCOT (Cornell Multi Grid Coupled Tsunami Model) model. The earthquake source used to generate the tsunami is a 9.15 Mw earthquake of the magnitude of the 2004 earthquake, 8.0 Mw and 8.5 Mw earthquake scenarios. Bathymetric data were used to provide information on sea depth and topographic data to provide information on land elevation in the study area. Observation points were placed on the coast to record when the waves reached the coast. The maximum tsunami height occurred in Blang Mangat subdistrict with a tsunami height of 5 m and inundation distance of 1 km. The arrival time of the tsunami in Lhokseumawe town was 75-80 min after the earthquake. This information on tsunami height and arrival time can be used as preliminary information for tsunami mitigation planning and rapid response in the event of an earthquake with tsunami potential.

Keywords: *tsunami, numerical simulation, tsunami modelling, inundation map, ETA*

Abstrak

Lhokseumawe merupakan salah satu kota yang terdampak tsunami 2004. Kajian tsunami juga sulit dilakukan secara langsung secara fisik di lapangan, karena tsunami tidak bisa diprediksi kejadiannya. Oleh karena itu, penelitian pemodelan tsunami ini dilakukan yang bertujuan untuk mengetahui waktu tiba gelombang tsunami di pesisir Kota Lhokseumawe dan untuk mengetahui daerah yang terdampak dari informasi peta genangan tsunami. Metode yang digunakan adalah pemodelan numerik tsunami menggunakan model COMCOT (*Cornell Multi Grid Coupled Tsunami Model*). Sumber gempa yang digunakan sebagai pembangkit tsunami merupakan gempa 9.15 Mw seperti kekuatan gempa tahun 2004, skenario gempa 8.0 Mw dan 8.5 Mw. Data batimetri digunakan sebagai informasi kedalaman laut dan data topografi sebagai informasi elevasi daratan daerah tinjauan. Titik observasi ditempatkan di pesisir pantai untuk mencatat kapan gelombang tiba di pesisir. Ketinggian tsunami maksimum terjadi di Kecamatan Blang Mangat dengan tinggi tsunami mencapai 5 m dengan jarak inundasi mencapai 1 km. Waktu tiba tsunami di Kota Lhokseumawe adalah 75 -80 menit setelah terjadinya gempa. Informasi tinggi dan waktu tiba tsunami ini dapat dijadikan sebagai informasi awal dalam perencanaan mitigasi tsunami dan tindakan cepat ketika gempa yang potensi tsunami terjadi.

Kata Kunci: *tsunami, simulasi numerik, pemodelan tsunami, peta genangan, ETA*

1. Pendahuluan

Provinsi Aceh dilanda gempa berkekuatan 9,15 Mw pada 26 Desember 2004 lalu [1], [2]. Gempa tersebut bersumber dari patahan bawah laut pada zona subduksi Sumatera-Andaman (Sumatera-Andaman Subduction Zone) di wilayah pantai barat Aceh. Setelah gempa, disusul gelombang tsunami besar menyerang kawasan pesisir Aceh. Wilayah pesisir Aceh mengalami kerusakan yang masif dan sekitar 15.000 orang kehilangan jiwa. Kota-kota di pesisir Aceh yang terdampak tsunami adalah Kota Banda Aceh, Meulaboh, Simeulue, Calang, Pidie dan Kota Lhokseumawe. Saat tsunami lalu, gelombang tsunami tiba paling terakhir di pesisir Lhokseumawe dibandingkan dengan kawasan pesisir Aceh bagian barat dan utara [3]. Pasca tsunami 2004, kajian bahaya tsunami intens dilakukan di Kota Banda Aceh dan kota pesisir di kawasan pantai barat. Upaya mitigasi bencana tsunami seperti rambu evakuasi dan escape building juga banyak dilakukan di daerah tersebut.

Berbeda halnya dengan kajian tsunami di Kota Lhokseumawe. Meskipun dampaknya tidak terlalu besar dibandingkan Banda Aceh dan pantai barat Aceh [4], mitigasi bencana tsunami juga diperlukan sebagai daerah yang pernah terdampak tsunami. Lhokseumawe juga merupakan kota pesisir yang berpenduduk padat. Objek Vital Nasional juga banyak ditemui di Lhokseumawe seperti PT. Perta Arun Gas dan PT. Pupuk Iskandar Muda. Untuk itu perlu informasi peta genangan tsunami dan waktu tiba tsunami untuk proses evakuasi.

Tsunami merupakan bencana alam yang tidak dapat diprediksi kejadiannya sehingga sulit dilakukan penelitian lapangan untuk mendapat data fisik tsunami. Oleh karena itu, pemodelan numerik merupakan tools yang cukup baik dalam memahami proses tsunami. Informasi hidrodinamika tsunami seperti genangan, kedalaman aliran dan kecepatan akan membantu perencana pesisir dalam meningkatkan penilaian bahaya tsunami dalam mitigasi bencana. Sejauh ini, masih jarang ditemukan pemodelan numerik tsunami dengan studi kasus Kota Lhokseumawe.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menambah informasi tentang bahaya tsunami di Kota Lhokseumawe (**Gambar 1**). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui waktu tiba gelombang tsunami di Kota Lhokseumawe dan mengetahui daerah yang terdampak dari informasi peta genangan tsunami Kota Lhokseumawe. Penelitian ini penting dilakukan mengingat minimnya kajian bahaya tsunami di Kota Lhokseumawe. Diharapkan dengan penelitian ini dapat memberi manfaat sebagai bahan informasi untuk pemerintah daerah dalam mitigasi bencana tsunami. Penelitian ini merupakan studi pendahuluan (*preliminary study*). Sehingga jika penelitian ini dapat dilaksanakan, hasilnya akan menjadi dasar untuk pengembangan kajian yang lebih komprehensif tentang bahaya tsunami dan strategi mitigasi yang sesuai di Kota Lhokseumawe.



Gambar 1. Lokasi Penelitian berada di Kota Lhokseumawe

2. Metode Penelitian

Tsunami adalah gelombang air dangkal yang panjang yang biasanya terjadi di lautan atau danau yang besar. Tsunami terjadi karena adanya perpindahan volume air tiba-tiba akibat gempa bumi, longsor bawah laut, gunung api, jatuhnya meteor dan gangguan atmosfer. Parameter utama gelombang tsunami secara umum sama dengan gelombang angin biasa diantaranya memiliki panjang gelombang, kecepatan, periode dan tinggi gelombang. Selain itu gelombang tsunami juga memiliki perilaku refraksi, difraksi, shoaling dan breaking atau pecah saat mendekati Pantai [5] [6].

A. Pembangkit Gelombang

Tsunami adalah pergerakan air dalam jumlah besar, dan diperlukan sumber energi yang signifikan untuk menghasilkannya. Gempa bumi bawah laut dan dekat pantai, tanah longsor, dan letusan gunung berapi dapat memicu terjadinya tsunami [7]. Sekitar 80% dari seluruh tsunami di seluruh dunia yang teramati disebabkan oleh gempa bumi bawah laut [8], dan sumber utama tsunami di wilayah studi ini adalah zona subduksi di lepas pantai barat Sumatera [9]. Dalam studi ini, kami membatasi pembangkit gelombang yang disebabkan oleh gempa bumi dan lokasi patahan yang paling dekat dengan lokasi studi, yaitu patahan megathrust Aceh-Andaman [10].

Wells dan Coppersmith mengembangkan metode untuk memprediksi parameter tsunami berdasarkan magnitudo, dan beberapa analisis regresi telah diaplikasikan untuk mempelajari hubungan antara magnitudo dan area rupture [11], seperti pada Persamaan (1) sampai (3).

$$\text{Log} (RLD) = -2.42 + 0.58 * M \quad (1)$$

$$\text{Log} (RW) = -1.61 + 0.41 * M \quad (2)$$

$$\text{Log} (MD) = -1.84 + 0.29 * M \quad (3)$$

di mana SRL adalah panjang permukaan rupture, RW adalah lebar rupture, M adalah magnitudo, a dan b adalah koefisien regresi yang bergantung pada jenis slip (strike-slip, reverse, dan normal).

B. Simulasi Numerik

Model COMCOT mampu mensimulasikan perambatan gelombang tsunami dari pusat gempa di laut dalam sampai titik *run-up* terjauh. COMCOT menggunakan SWE (*Shallow Water Equations*) linear dan non linear dengan metode beda hingga *leap-frog finite difference*. COMCOT dalam mensimulasikan perambatan gelombang tsunami dari laut dalam menggunakan persamaan linear SWE dan simulasi perambatan gelombang di laut dangkal menggunakan persamaan nonlinear SWE [12].

C. Perkiraan Waktu Tiba Tsunami (*Estimate Tsunami Arrival-ETA*)

Perkiraan waktu tiba tsunami (ETA) didefinisikan sebagai waktu kedatangan gelombang tsunami pertama yang dihitung setelah terjadinya gempa bumi yang menghasilkan tsunami [13]. Waktu tempuh tsunami berkorelasi dengan waktu evakuasi untuk meningkatkan jumlah korban yang selamat di daerah pesisir yang terkena dampak tsunami. Perencanaan evakuasi kota harus mempertimbangkan waktu terpendek yang diperlukan tsunami untuk mencapai daerah pesisir untuk memastikan bahwa mereka dapat mengevakuasi penduduknya tepat waktu. ETA dan jumlah pengungsi akan menentukan di mana tempat penampungan tsunami harus ditempatkan, rute evakuasi, dimensi jalan evakuasi, serta manajemen lalu lintas evakuasi. Banyak model yang digunakan untuk mempelajari ETA di berbagai lokasi. ETA yang didasarkan pada skenario tsunami historis merupakan faktor kunci dalam menyelamatkan nyawa.

Mengetahui ETA untuk suatu daerah tertentu tidak hanya penting untuk tsunami jarak dekat, di mana ETA-nya lebih cepat dari 30 menit, tetapi juga untuk tsunami jarak jauh. Hasil studi tersebut perlu disertakan untuk meningkatkan prosedur evakuasi di masa depan untuk wilayah studi dan didiskusikan dengan pihak terkait (misal BNPB) untuk melihat kepraktisan penggunaan informasi ETA untuk lokasi potensi bencana. Hasil dari pemodelan ini kemudian dapat menjadi masukan bagi pemangku kepentingan di lokasi tersebut dalam rangka mitigasi tsunami seperti prosedur evakuasi.

D. Pengumpulan Data

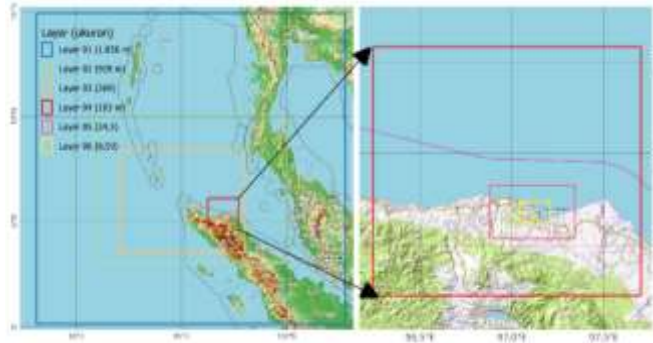
Penelitian ini dilakukan di Kota Lhokseumawe sebagai kota yang berpotensi mengalami ancaman tsunami. Data yang digunakan berupa data primer dan data sekunder. Data yang akan digunakan diantaranya data topografi, batimetri, dan parameter gempa.

E. Model setup

Pemodelan gelombang terdiri dari beberapa tahapan. Tahapan pertama adalah membangkitkan gelombang tsunami dari pusat/sumber tsunami. Dalam tahapan pertama ini, diperlukan data batimetri kawasan Indian Ocean sampai dengan lokasi studi seperti yang ditunjukkan pada layer 01 (lihat Gambar 2 (a)). Data ini di dapatkan dari GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean) dengan resolusi gris sebesar 1 menit (1.856 km) [14]. Pembangkitan gelombang tsunami pada pemodelan ini disebabkan oleh gempa pada Subduction zone dengan magnitudo gempa 9.2 atau berdasarkan gempa dan tsunami di lautan Andaman pada t=Tahun 2004 [15] dan juga skenario gempa 8.0 Mw dan 8.5 Mw.

Tahapan kedua dalam pemodelan tsunami adalah penjaralan (propagation) gelombang tsunami dari sumber tsunami sampai dengan landaan (inundation) tsunami di daratan. Dalam tahapan ini diperlukan data yang lebih detail untuk batimetri di laut dangkal, topografi, dan data tutupan lahan. Untuk data batimetri diperoleh dari BATNAS (batimetri) dengan resolusi spasial 180 meter (6 arcsecond). Data topografi diperoleh dari DEMNAS (Digital Elevation Model Nasional) dengan resolusi spasial 8,35 m (0,27 arsecond). Tutupan lahan dalam penelitian ini berdasarkan data tutupan lahan Provinsi Aceh tahun 2009 yang dapat di akses melalui <http://appgis.menlhk.go.id/> [16]. Tutupan lahan dalam studi area ini di kategorikan menjadi hutan/tanaman (n=0,035), Pemukiman/daerah terbangun (n=0,040), daerah terbuka (n=0,02) dan Kawasan basah/tambak (n=0,017).

Skema multi grid digunakan dalam penelitian pemodelan tsunami ini yang terdiri dari 6 layer. Data topografi/bathimetri tiap layernya bersumber dari gabungan data GEBCO, BATNAS dan DEMNAS. Layer 01 dengan ukuran grid terbesar yaitu 1.856 m dan layer 06 dengan ukuran grid terkecil yaitu 8,59 m. Peta yang menunjukkan pembagian layer dalam simulasi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema multi grid digunakan untuk simulasi model COMCOT:

(a) Layers 01–03 and (b) Layer 04 – Layer 06

Sumber: Quantum GIS

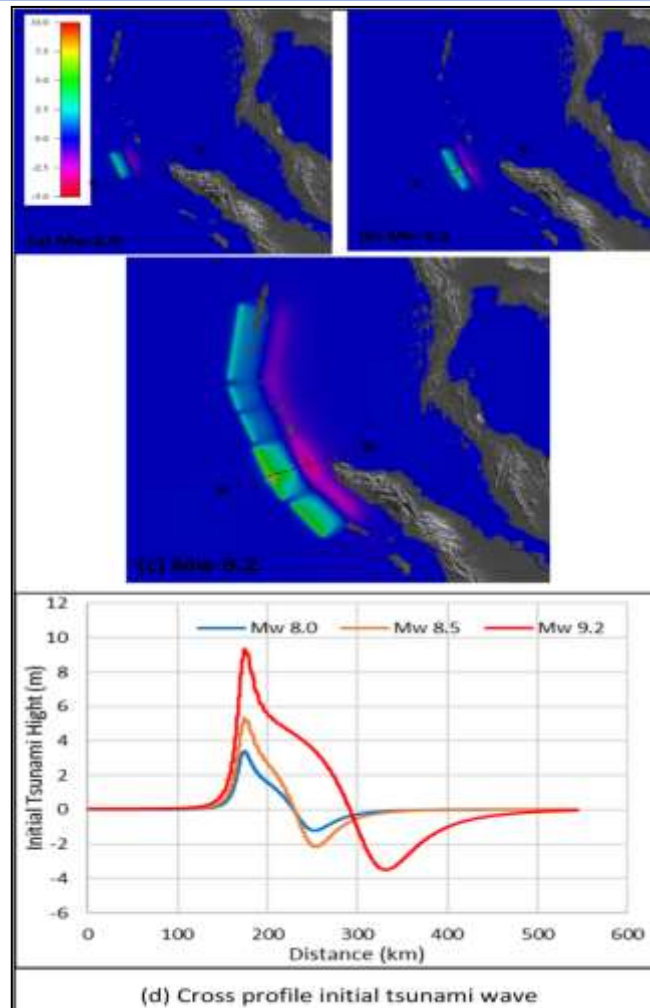
3. Hasil dan Pembahasan

A. Pembangkitan gelombang

Pembangkitan gelombang didasarkan pada tiga magnitudo gempa yaitu earthquake magnitudo Mw 8.0, Mw 8.5, and Mw 9.2. untuk magnitudo gempa 9.2, rapture parameternya berdasarkan kondisi gempa tahun 2004 [15]. Parameter rapture/patahan untuk scenario Mw 8.0 dan Mw 8.5 dihitung menggunakan persamaan oleh Wells and Coppersmith [11]. Lokasi pembangkit gelombang yang berpotensi menghasilkan tsunami di Kota Lhokseumawe berada di sepanjang Zona subduksi Sumatra Andaman. Lokasi pusat gempa diprediksi berada pada lokasi gempa pada tahun 2004. Parameter patahan untuk ketiga skenario ditunjukkan pada perubahan permukaan air laut pada saat awal tsunami untuk berbagai macam skenario ditunjukkan pada **Gambar 3**. Warna hijau menunjukkan gelombang positif atau naik, dan warna magenta menunjukkan gelombang negatif atau turun. Kondisi awal gelombang tsunami untuk skenario Mw 8.0.

Tabel 1. Parameter patahan (Rapture parameter)

Scenario	1			2			3		
Mw	8.0			8.5			9.2		
L_m (Km)	165	125	180	200	125	180	145	125	380
W_m (km)	75	75	75	150	150	150	150	150	150
Dis (m)	8	8	8	14	13	15	7	7	7
Strike (°)	340	335	340	323	335	340	340	345	7
Dip (°)	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Rake (°)	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Epicenter	Long.	93	93	93	94	93	93	92	92
	lat	6	4	6	3	4	6	7	8
total L_m (km)	165			305			1155		
Depth, D_m (Km)	10			10			10		



Gambar 3. Initial tsunami height with earthquake magnitude Mw 8.0 (a), Mw 8.5 (b) Mw 9.2 (c), and cross profile of initial tsunami wave for different magnitude (d)

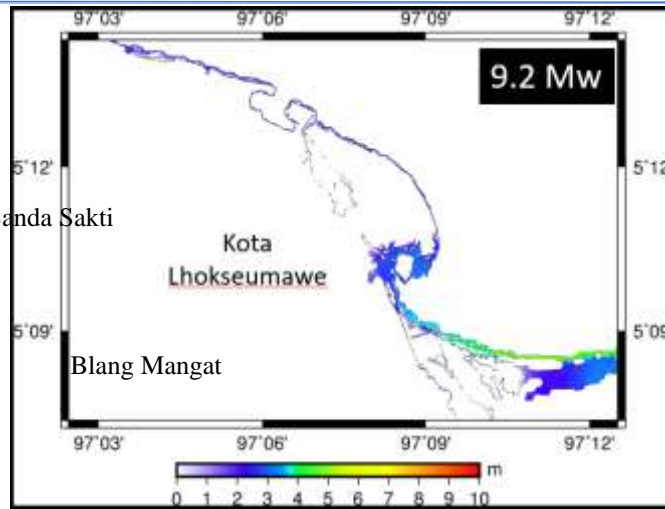
Dari **Gambar 3** tersebut dapat dilihat bahwa pembangkit gelombang adalah patahan tunggal (single fault) dengan tinggi gelombang maksimum adalah +3.40 m dan minimum adalah -1.21 m. pada skenario Mw 8.5, tinggi gelombang maksimum adalah +5.30 m dan minimum adalah -2.15 m dengan bentuk patahan sebanyak 2 bagian, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3** (b). Tinggi gelombang di pusat pembangkit tsunami maksimum terjadi pada skenario ketiga atau Mw 9.2 dengan tinggi gelombang maksimum adalah +9.378 m dan minimum adalah -3.507 m dengan kondisi patahan sebanyak 6 bagian (**Gambar 3**(c)). Potongan melintang profil muka air di pusat pembangkit gelombang tsunami untuk ketiga skenario ditunjukkan pada **Gambar 3** (d).

B. Tinggi Tsunami dan Area Inundasi

Gambar 4 sampai dengan **Gambar 7** menunjukkan hasil pemodelan untuk 3 skenario gempa. Dari gambar terlihat peta inundasi tsunami dan ketinggian tsunami. Inundation area yang terluas dan tertinggi terjadi akibat tsunami dengan Mw 9.2 seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4** dan **Gambar 5** yang ditandai dengan warna biru sampai dengan merah sesuai dengan skala tinggi tsunami. Maksimum jarak landaan tsunami terjadi pada Kecamatan Blang Mangat dengan jarak inundasi mencapai 1 km dengan ketinggian tsunami Maksimum adalah mencapai 5 meter. Hal ini sejalan atau mendekati dengan hasil informasi tsunami terdahulu pada lokasi ini [17], dengan area yang paling parah dihantam tsunami di Kota Lhokseumawe adalah Kecamatan Banda Sakti.

Muara Satu

Banda Sakti

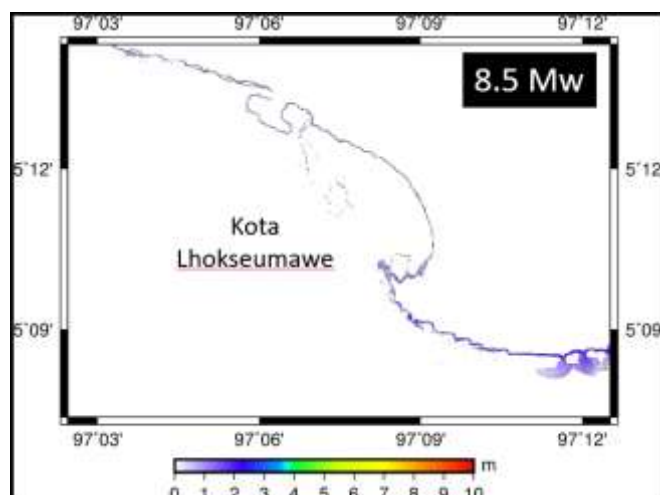


Gambar 4. Peta Tinggi tsunami dan area inundasi untuk skenario gempa 9.2 Mw

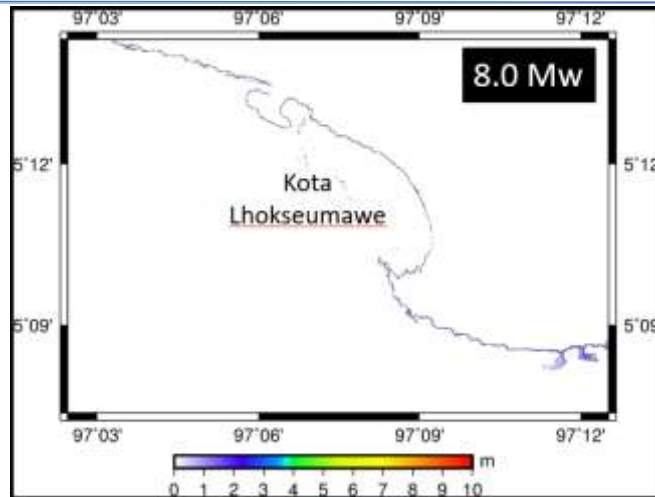


Gambar 5. Peta Tinggi tsunami dan area inundasi untuk skenario gempa 9.2 Mw dengan latar belakang foto udara

Potensi Area yang terkena gelombang tsunami lainnya adalah di Kecamatan Banda Sakti bagian Timur atau kawasan Pusong dengan tinggi tsunami mencapai 2-3 meter. Pada area lainnya tsunami juga terjadi tetapi hanya di bagian garis pantai atau masuk melalui alur sungai. Dengan magnitudo gempa 8,0 Mw dan 8,5 Mw dengan lokasi pusat gempa serupa dengan gempa tahun 2004, gelombang tsunami yang sampai di Kota Lhokseumawe dampaknya lebih dengan area yang terkena gelombang tsunami sebagai kecil kawasan Kecamatan Blang Mangat dan di sepanjang garis pantai dengan ketinggian tsunami mencapai lebih kecil dari 2 m.



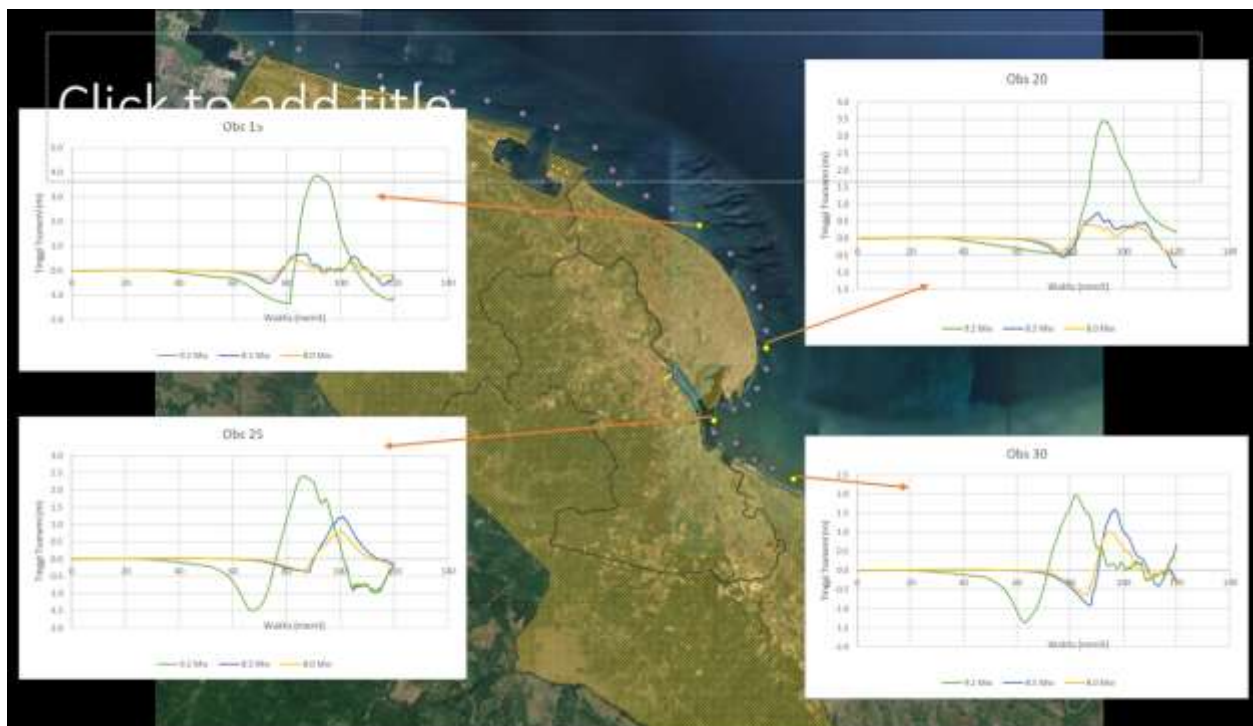
Gambar 6. Peta Tinggi tsunami dan area inundasi untuk skenario gempa 8.5 Mw



Gambar 7. Peta Tinggi tsunami dan area inundasi untuk skenario gempa 8.0 Mw

C. Waktu Tiba Tsunami (Estimate Tsunami Arrival-ETA)

Titik pengamatan ETA ditempatkan di beberapa garis kontur yang dekat dengan kota-kota di Kota Lhokseumawe. Berdasarkan hal ini, titik-titik pengamatan yang digunakan untuk menentukan ETA ditempatkan pada jarak 200 meter dari garis pantai dengan kedalaman mencapai 10 m. ETA disimulasikan berdasarkan 3 skenario gempa yaitu magnitude Mw 8.0, Mw 8.5, and Mw 9.2. Dari **Gambar 8** terlihat lokasi dan grafik waktu tiba Tsunami untuk 4 lokasi yang berada di Kecamatan Muara Satu, Kecamatan Banda Sakti dan Kecamatan Blang Mangat. Skenario tsunami yang disebabkan oleh gempa Mw 9.2 menghasilkan ETA yang paling pendek seperti yang terjadi di lokasi Blang Mangat. ETA pada lokasi ini adalah 75 menit untuk skenario Mw 9.2 dan mendekati 90 menit untuk skenario Mw 8.5 dan Mw 8.0. Untuk lokasi Banda Sakti, ETA pada lokasi ini hampir sama untuk ketiga skenario dengan ETA nya adalah 80 menit. Bentuk garis pantai dan kedalaman laut berpengaruh terhadap ETA pada masing-masing lokasi. Lokasi Kecamatan Blang Mangat yang agak cekung dari sisi darat, yang menghasilkan waktu tiba tsunami yang lebih cepat dibandingkan dengan garis pantai yang cembung, seperti kecamatan Banda Sakti.



Gambar 8. Waktu tiba tsunami untuk beberapa titik lokasi di Kota Lhokseumawe dengan skenario gempa 9.2 Mw

Informasi ini akan memungkinkan kota-kota tersebut untuk mempersiapkan secara memadai untuk evakuasi tsunami jika Megathrust Laut Andaman terjadi. Berdasarkan skenario yang ada, datang gelombang tsunami didahului oleh surutnya air laut. Menjadi catatan bahwa ETA yang dihasilkan dalam studi ini tidak merupakan data waktu real di lapangan, tetapi lebih untuk menyediakan informasi awal bagi pihak berwenang untuk mengambil tindakan cepat apabila terjadi potensi tsunami di daerah mereka dan juga dapat dijadikan dasar perencanaan mitigasi tsunami terkait jalur evakuasi dan lainnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa ketinggian tsunami maksimum terjadi di Kecamatan Blang Mangat dengan tinggi tsunami mencapai 5 m dengan jarak inundasi mencapai 1 km. Waktu tiba tsunami di Kota Lhokseumawe adalah 75 -80 menit setelah terjadinya gempa. Informasi tinggi dan waktu tiba tsunami ini dapat dijadikan sebagai informasi awal dalam perencanaan mitigasi tsunami dan tindakan cepat ketika gempa yang potensi tsunami terjadi.

5. Referensi

- [1] S. Koshimura, T. Oie, H. Yanagisawa, and F. Imamura, "Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from banda aceh, Indonesia," *Coastal Engineering Journal*, vol. 51, no. 3, pp. 243–273, Sep. 2009, doi: 10.1142/S0578563409002004.
- [2] C. E. Synolakis, E. N. Bernard, V. V. Titov, U. Kânoğlu, and F. I. González, "Validation and verification of tsunami numerical models," in *Pure and Applied Geophysics*, 2008, pp. 2197–2228. doi: 10.1007/s00024-004-0427-y.
- [3] Ibrahim, S. K. Intan, and F. A. Gani, "Pemodelan Penjalaran Gelombang Tsunami Di sepanjang Pantai Timur Aceh," *PORTAL*, vol. 3, no. Oktober 2011, pp. 35–44, 2011.
- [4] Ibrahim, Syamsidik, Azmeri, M. Hasan, and Tursina, "Investigating characteristics of tsunami hazards for west coast of Aceh Besar district, Indonesia," *E3S Web Conf.*, vol. 340, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234001005>
- [5] Behrens, Jörn, et al. "Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps." *Frontiers in Earth Science* 9 (2021): 628772.
- [6] Kamphuis, J. William. *Introduction to coastal engineering and management*. Vol. 48. World Scientific, 2020.
- [7] Bobrowsky, Peter T., ed. *Encyclopedia of natural hazards*. Vol. 1135. Dordrecht: Springer, 2013.
- [8] UNISDR, "Tsunami Hazard and Risk Assessment," *Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment*, no. July, pp. 1–9, 2017, [Online]. Available: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/57441>
- [9] S. Pribadi, Afnimar, N. T. Puspito, and G. Ibrahim, "Characteristics of earthquake-generated tsunamis in Indonesia based on source parameter analysis," *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, vol. 45, no. 2, pp. 189–207, 2013, doi: 10.5614/j.math.fund.sci.2013.45.2.8.
- [10] Tim Pusat Studi Gempa Nasional, *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. 2017.
- [11] D. Wells and K. 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. August 1994, pp. 974–1002, Aug. 1994.
- [12] L. Li, Z. Huang, Q. Qiu, D. H. Natawidjaja, and K. Sieh, "Tsunami-induced coastal change: Scenario studies for Painan, West Sumatra, Indonesia," *Earth, Planets and Space*, vol. 64, no. 10, pp. 799–816, 2012, doi: 10.5047/eps.2011.08.002.
- [13] T. Steinmetz *et al.*, "Tsunami early warning and decision support," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 10, no. 9, pp. 1839–1850, 2010, doi: 10.5194/nhess-10-1839-2010.
- [14] Kapoor, D. C. "General bathymetric chart of the oceans (GEBCO)." *Marine Geodesy* 5.1 (1981): 73–80
- [15] S. Koshimura, T. Oie, H. Yanagisawa, and F. Imamura, "Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from banda aceh, Indonesia," *Coastal Engineering Journal*, vol. 51, no. 3, pp. 243–273, 2009, doi: 10.1142/S0578563409002004.
- [16] Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan, "Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan." Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: <http://appgis.menlhk.go.id/>
- [17] Meigh, John David, Ir Minanto Minanto, and Abdul Rachim. "Aceh and Nias, Indonesia post-tsunami reconstruction by survivor participation." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Forensic Engineering* 171.2 (2018): 70-79.