



## ESTIMASI WAKTU KEDATANGAN TSUNAMI BERDASARKAN PATAHAN SEGMENT ACEH-ANDAMAN UNTUK DARATAN PANTAI UTARA ACEH

### ESTIMATED TSUNAMI ARRIVAL TIME BASED ON THE ACEH-ANDAMAN FAULT SEGMENT FOR NORTH COAST OF ACEH

Benazir<sup>1)\*</sup>, Kuswandi<sup>2)</sup>, M. Hafiz Aslami<sup>3)</sup>, M. Faisi Ikhwal<sup>4)</sup>, Siti Nurul Hijah<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika, Kampus No.2, Yogyakarta, Indonesia

<sup>2)</sup> Universitas Prima Indonesia, Medan

<sup>3)</sup> Departemen Teknik Sipil, Binus University, DKI Jakarta

<sup>4)</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, UIN Ar-Raniry, Banda Aceh

<sup>5)</sup> Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Islam Al-Azhar, Mataram

\*Correspondent E-Mail: [benazir@ugm.ac.id](mailto:benazir@ugm.ac.id)

Diterima: 19 November 2022; Direvisi: 13 Desember 2022; Disetujui: 15 Desember 2022

#### ABSTRACT

Historical records and paleo-tsunami studies show that tsunami cycles occurred on the Aceh coast regularly. Emergency response plans and responses to early warnings could even enhance community preparedness. Estimated Times of Arrival (ETA) of the tsunami determines evacuation time, which is the golden time for responding to further actions after the earthquake. The estimated evacuation time determines the likelihood of surviving the incoming tsunami. Thus, the purpose of this research is to assess the availability of critical time for the community in the study locations to respond and evacuate after an earthquake occurs. ETA observations were made along Aceh's north coast, including Banda Aceh and Lhoknga, as well as the surrounding outer islands of Weh, Nasi, and Breuh islands. This research examined the ETA caused by the Aceh-Andaman Segment fault. The earthquake scale scenario is designated at 9.15 Mw as a reconstruction of the 2004 Tsunami and 9.2 Mw as the most severe condition that could occur. The tsunami was mathematically modeled using the Nonlinear Shallow Water Equation (NSWE) model, with numerical discretization solved using the Finite Difference Method with an explicit Leap Frog scheme. The tsunami arrival time is projected at the observation point with the characteristic phases of the tsunami arrival. According to the modeling results, the tsunami will arrive around 18-22 minutes for Sabang, 21-27 minutes for Nasi and Breuh Islands, and 34 minutes for Banda Aceh and Lhoknga. Mapping the tsunami's arrival time provides in the planning and development of a tsunami mitigation system, particularly in terms of estimating the time to evacuate to the gathering point, as well as planning evacuation routes and the number and location of escape buildings.

**Keywords:** coastal hydrodynamics, tsunami numerical model, tsunami arrival time, evacuation time, tsunami mitigation.

#### ABSTRAK

Catatan sejarah dan kajian paleo-tsunami membuktikan bahwa siklus tsunami terjadi secara periodik di pesisir Aceh. Kesiapsiagaan masyarakat dapat ditingkatkan dengan rencana tanggap darurat dan respon terhadap peringatan dini. Waktu evakuasi ditentukan oleh perkiraan waktu kedatangan (Estimated Times of Arrival, ETA) tsunami yang menjadi golden time dalam merespon tindakan selanjutnya setelah gempa. Estimasi waktu evakuasi menjadi penentu tingkat keberhasilan saat proses menyelamatkan diri dari kedatangan tsunami. Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk memetakan ketersediaan waktu kritis bagi masyarakat di lokasi-lokasi tinjauan dalam merespon dan melakukan evakuasi setelah gempa terjadi. Pengamatan ETA dilakukan di utara pesisir Aceh, yaitu mencakup Banda Aceh dan Lhoknga juga pulau-pulau terluar sekitar; Pulau Weh, Pulau Nasi, dan Pulau Breuh. Makalah ini melakukan kajian tentang ETA yang dipicu oleh patahan Segmen Aceh-Andaman. Skenario skala gempa ditentukan sebesar 9,15 sebagai rekonstruksi Tsunami 2004 dan 9,2 Mw sebagai kondisi maksimum yang berpotensi terjadi. Pemodelan matematik tsunami dilakukan dengan model Nonlinear Shallow Water Equation (NSWE) dengan diskritisasi numeriknya diselesaikan berdasarkan Metode Beda Hingga skema eksplisit Leap Frog. Proyeksi waktu kedatangan tsunami di titik pengamatan ditentukan dengan fase-fase karakteristik kedatangan gelombangnya. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa waktu kedatangan tsunami berdasarkan skenario yang ditentukan berkisar 18-22 menit untuk Sabang, 21-27 menit untuk Pulau Nasi dan Breuh, serta 34 menit untuk Banda Aceh dan Lhoknga. Pemetaan waktu kedatangan tsunami ini memberikan pengetahuan dalam perencanaan dan pengembangan sistem mitigasi tsunami khususnya dari aspek estimasi waktu dalam melakukan evakuasi menuju titik kumpul serta perencanaan jalur evakuasi dan jumlah maupun lokasi pembangunan bangunan evakuasi.

**Kata Kunci:** hidrodinamika pantai, model numerik tsunami, tsunami arrival time, waktu evakuasi, mitigasi tsunami.

## PENDAHULUAN

Aktivitas seismik di perairan Sumatera tercatat sangat aktif dan menimbulkan gempa-gempa yang dapat berpotensi tsunami (Haridhi et al., 2018; Lange et al., 2018; Weller et al., 2012). Gempa tektonik skala besar yang menghasilkan tsunami telah berulang kali terjadi di wilayah ini (Meltzner et al., 2006; Natawidjaja et al., 2006; Newcomb & McCann, 1987). Fenomena bencana ini cukup berdampak terhadap aspek sosial dan ekonomi, khususnya di wilayah utara Sumatera, yaitu Aceh. Dalam dua dekade terakhir, Tsunami Samudera Hindia 2004 dengan skala kerusakan yang masif telah menjadi tolak ukur bagi dunia dalam mempelajari karakteristik tsunami lebih lanjut. Tiga bulan setelahnya, disusul tsunami yang melanda pesisir Pulau Simeuleu dan Nias pada 28 Maret 2005. Ancaman tsunami juga kembali terjadi di wilayah ini saat gempa berkekuatan 8,6 dan 8,2 Mw pada 11 April 2012. Selain itu, sejarah kejadian tsunami di masa lalu untuk kawasan Aceh juga telah dibuktikan dengan kajian paleo-tsunami dan arkeologi yang dilakukan oleh Monecke et al. (2008), Rubin et al. (2017), dan Daly et al. (2019). Tatanan tektonik Sumatera yang sedemikian rupa berperan langsung terhadap aktivitas seismik yang membangkitkan tsunami di masa lalu tersebut. Zonasi patahan di perairan Sumatera dimulai dari Segmen Aceh-Andaman di mana *rupture* segmen ini terjadi pada 26 Desember 2004 lalu. Lay et al. (2005) memprediksi *rupture* ini sepanjang 1300 km pada saat gempa dahsyat tersebut. Berdasarkan Pusgen (2017) dari data geodetik didapatkan *sliprate* 4 mm/tahun dan dari estimasi dapat menghasilkan magnitudo maksimum mencapai 9,2 Mw.

Wilayah dengan ancaman tsunami yang cukup tinggi seperti di Aceh ini membutuhkan suatu sistem peringatan dini (*early warning system*, EWS) yang baik. Menurut Basher et al. (2006) dan UN/ISDR (2006), keefektifan suatu peringatan dini harus terintegrasi dengan empat unsur, yaitu: 1) pengetahuan risiko; 2) pemantauan teknis dan layanan peringatan dini; 3) penyebaran dan komunikasi tentang pengetahuan peringatan dini kepada mereka yang berisiko; serta 4) kesadaran dan kesiapan publik untuk bereaksi terhadap peringatan dini. Selain empat unsur tersebut, agar lebih efektif, sistem peringatan dini juga harus mempertimbangkan isu lintas sektor termasuk pengaturan tata kelola dan kelembagaan yang efektif, pendekatan *multi-hazard*, keterlibatan masyarakat lokal, pertimbangan perspektif gender dan keanekaragaman budaya (UN/ISDR, 2006). Namun dalam implementasi yang terjadi, bentuk respon masyarakat dalam melakukan evakuasi cenderung disebabkan oleh sistem peringatan yang

tidak resmi yang dikeluarkan oleh pemerintah atau *stakeholder* terkait. Kebanyakan mengikuti peringatan alami seperti saat surutnya air laut di pantai menjadi keputusan dalam melakukan evakuasi (Muhari et al., 2012). Fakta lainnya juga terjadi saat kejadian Tsunami Palu-Donggala pada 28 September 2018. Berdasarkan beberapa rekaman CCTV (*Closed-circuit Television*) yang beredar di media sosial mendokumentasikan kronologis saat itu. Sesaat setelah gempa, masyarakat langsung melakukan evakuasi keluar dari bangunan namun setelahnya tidak langsung melakukan evakuasi untuk tsunami. Masyarakat baru merespon evakuasi ketika melihat warga lainnya yang berlarian menjauh dari pantai atau saat mereka melihat tsunami yang telah tiba di daratan. Kasus ini menunjukkan adanya kesenjangan terkait dengan respon masyarakat terhadap peringatan dini.

Oktari et al. (2014) melakukan evaluasi terhadap sistem peringatan dini yang telah diinstalasi di Aceh setelah Tsunami 2004. Hasil kajian mereka menunjukkan sistem peringatan dini tsunami di Aceh telah mencapai kemajuan, tetapi kebijakan sistematis dan/atau komitmen kelembagaan yang belum ada. Sistem peringatan dini tsunami yang berupa sirine ini teruji saat Gempa 11 April 2012. Kesalahan teknis dan persepsi masyarakat terhadap sistem peringatan dini pada saat itu justru menyebabkan kepanikan di tengah-tengah pelaksanaan evakuasi berlangsung (Tim Kaji Cepat, 2011). Kurangnya koordinasi antara lembaga respon dikarenakan pemahaman yang tidak memadai peran lembaga dan tanggung jawab juga menjadi keterbatasan dalam pengembangan sistem peringatan tsunami di Aceh saat ini (Sufri et al., 2020). Beberapa penelitian mengidentifikasi berbagai faktor yang menyebabkan tingkat kematian pada kejadian tsunami. Faktor-faktor tersebut berperan dalam pengembangan penelitian tentang evakuasi (Mas et al., 2012; Péroche et al., 2014; Wang et al., 2016), yaitu:

1. Karakteristik tsunami (waktu kedatangan dan kedalaman genangan);
2. Karakteristik daerah (*slope* dan elevasi permukaan);
3. Karakteristik upaya mitigasi tsunami (zona dan rute evakuasi, manajemen risiko bencana); dan
4. Karakteristik pribadi (kesadaran tsunami, pengetahuan zona dan rute evakuasi, kemampuan fisik dan mental).

Informasi waktu kedatangan tsunami untuk komunitas masyarakat pesisir menjadi penting sebagai upaya kesiapsiagaan. Terutama jika

tsunami lokal (*near-field*) yang terjadi di mana waktu penggenangan yang sangat cepat dan terbatasnya waktu respons dalam melakukan evakuasi dan merencanakan rute penyelamatan, tujuan, dan akomodasi (Lindell et al., 2018). Informasi tersebut dapat dilakukan pendekatan dengan memperkirakan waktu kedatangan tsunami (*Estimated Times of Arrival*, ETA).

ETA merupakan hasil komputasi untuk prediksi waktu kedatangan tsunami (gelombang pertama) setelah kejadian gempa yang membangkitkan tsunami (IOC-UNESCO, 2019; Steinmetz et al., 2010; Strunz et al., 2011). Pengetahuan waktu kedatangan tsunami terkait erat dengan waktu evakuasi bagi korban sehingga sukses dalam menyelamatkan diri. Selain itu, hubungan antara ETA dan jumlah pengungsi akan menentukan lokasi *shelter*, rute evakuasi, dimensi jalur evakuasi, dan juga manajemen lalu lintas evakuasi (Rahayu et al., 2014).

Terdapat beberapa penelitian yang memodelkan ETA untuk berbagai lokasi studi yang rentan terhadap tsunami. Bagaimanapun, tujuan dari pemodelan ETA dari berbagai skenario tsunami terdahulu adalah sebagai upaya meningkatkan laju keberhasilan dalam menyelamatkan diri (Syamsidik & Istiyanto, 2013; Zhang et al., 2009). Selain itu, informasi ETA juga berkaitan dengan kajian mekanisme sumber tsunami. Satake & Kanamori (1991) mengusulkan teori Invers dalam melakukan studi sumber gempa berdasarkan bentuk tsunami dari stasiun pencatatan pengukur pasang surut. Shuto & Matsutomi (1995) juga menekankan perlunya variabel waktu kedatangan dari saksi mata di lapangan dalam pengembangan sumber tsunami di skema pemodelannya. Titov et al. (2008) mengimplementasikan *database* kejadian seismik yang telah dihitung sebelumnya untuk meramalkan parameter tsunami yang termasuk di dalamnya waktu kedatangan dan ketinggian tsunami maksimum. Di sisi lain, Greenslade et al., (2011) menerapkan model untuk meramalkan tsunami dari *database* skenario seismik, yang digunakan oleh Pusat Peringatan Tsunami di Australia untuk *bouy* di lepas pantai, bukan untuk pengukur pasang surut di pantai. Jiménez (2010) menyajikan algoritma untuk menghitung dengan cepat waktu kedatangan tsunami pertama berdasarkan lintasan linier yang diikuti oleh tsunami menurut bathimetri aktual. Kajian tersebut dilanjutkan oleh Jiménez et al. (2018) untuk menghitung kedatangan tsunami pertama dan tinggi tsunami maksimum pada titik pengukuran pasang surut sebenarnya baik di lapangan maupun virtual. Syamsidik et al. (2015) melakukan beberapa skenario pemodelan dalam menentukan ETA untuk beberapa kota yang berada di pesisir barat Aceh.

Skenario inisiasi tsunami ditentukan dari beberapa kejadian tsunami di masa lalu mulai yang melanda pesisir Sumatera mulai dari Tsunami 2004, 2005, 2007, 2010, dan 2012.

Penelitian ini menelaah lebih lanjut tentang ETA tsunami dengan sumber pembangkitan tsunami dari Segmen Aceh-Andaman. Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk memetakan ketersediaan waktu kritis bagi masyarakat di Banda Aceh dan Aceh Besar (khususnya Lhoknga) dan kawasan strategis di pulau-pulau terluar Sumatera seperti Pulau Weh, Pulau Nasi, dan Pulau Breuh dalam merespon dan melakukan evakuasi setelah gempa terjadi. Proyeksi perambatan gelombang terhadap keberadaan pulau-pulau luar tersebut juga didiskusikan dalam makalah ini. Hubungan ETA yang diperoleh tidak dibahas terlalu spesifik terkait pengembangan sistem peringatan dini. Namun, gambaran hasil ETA tersebut dikaitkan dengan catatan-catatan yang perlu dipertimbangkan dalam membuat keputusan melakukan evakuasi mandiri.

## METODOLOGI

Tsunami dahsyat yang melanda Aceh 18 tahun lalu dibangkitkan oleh gempa bumi berkekuatan 9,15 Mw (Chlieh et al., 2007; Meltzner et al., 2006) dengan pusat gempa terletak di 3.3° N, 95.8° E dengan kedalaman *epicenter* sekitar 30 km. Gempa tektonik tersebut bertanggung jawab atas slip sesar yang diperkirakan 12-15 m (Lay et al., 2005; Synolakis et al., 2005). Segmen *rupture* pada Tsunami 2004 berada pada zonasi Aceh-Andaman. Dengan demikian, rekonstruksi kejadian 26 Desember 2004 dilakukan sebagai salah satu skenario untuk melihat kembali ETA di daratan saat itu. Lokasi studi difokuskan di pesisir pantai dan pulau-pulau terluar utara Aceh. Pemilihan lokasi pengamatan ETA dipengaruhi oleh dampak tsunami yang melanda kawasan-kawasan tersebut di masa lalu seperti Tsunami Samudera Hindia 26 Desember 2004, Tsunami Aceh 11 April 2012 (tsunami kecil), dan beberapa tsunami lainnya yang melanda Aceh di masa lalu (1907, 1861, 1797). Zona pengamatan ETA utara Aceh ini terdiri dari pulau utama, yaitu Sumatera (Kota Banda Aceh dan Lhoknga), Pulau Weh (Kota Sabang, 0 km, Balohan), Pulau Nasi (Deudap, Lamteng), dan Pulau Breuh (Meulingge, Seurapong, Lampuyang) yang selengkapnya dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Tabel 1**.

Pemodelan tsunami mulai pembangkitan, penjaralan, dan rayapannya di daratan pantai dilakukan dengan *Cornel Multi-grid Coupled Tsunami Model* (COMCOT). Model ini menyelesaikan *Shallow Water Equation* (SWE) dengan *Finite Different Method* skema eksplisit

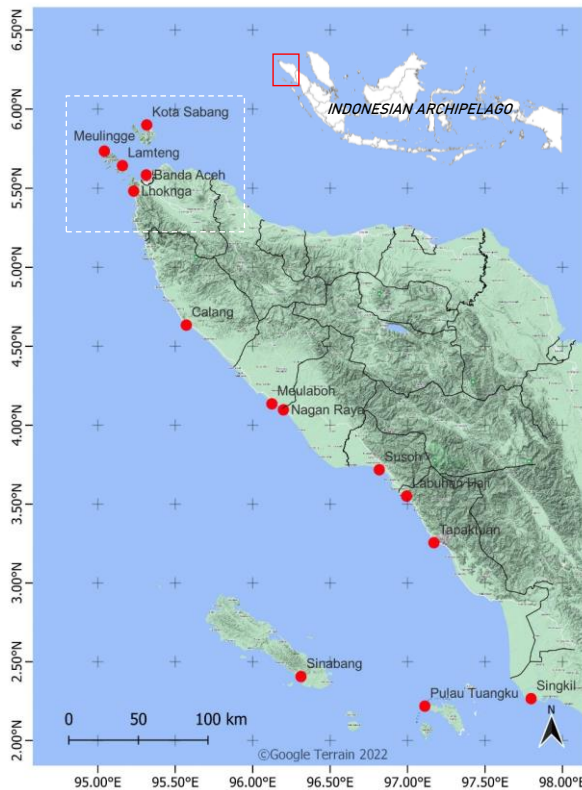
staggared leap-frog. Persamaan pengatur pada model ini dibedakan untuk linear dan nonlinear SWE. Persamaan Nonlinear SWE untuk koordinat kartesius adalah sebagai berikut (Wang, 2009).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left[ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right] = - \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{H^{7/3}} P (P^2 + Q^2)^{1/2} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q (P^2 + Q^2)^{1/2} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

Variabel  $\eta$  adalah elevasi permukaan air, ( $P, Q$ ) dinotasikan sebagai volume fluks arah  $x$  dan  $y$ ,  $H$  merupakan total kedalaman air,  $H = \eta + h$ , sedangkan suku terakhir merepresentasikan kekasaran yang dievaluasi oleh koefisien Manning ( $n$ ). Nilai kekasaran Manning yang digunakan pada model ini adalah seragam, yaitu 0,025.



Gambar 1 Lokasi studi

Area komputasi dikategorikan menjadi tiga domain dengan domain pertama mencakup lokasi pembangkitan sampai keseluruhan kawasan yang dipilih. Grid sisipan diterapkan untuk domain 2 dan 3 untuk mendapatkan komputasi yang lebih detail yang selengkapnya disajikan pada **Tabel 2**. Sumber data diperoleh dari [https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_srtm30.cgi](https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi) untuk domain pertama sedangkan domain kedua merupakan interpolasi dari data domain pertama. Pada domain terakhir

sumber datanya adalah <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/batnas> untuk mendapatkan resolusi data yang lebih baik juga perhitungannya diaplikasikan nonlinear SWE untuk memperoleh rayapan dan genangan tsunami di daratan pantai.

Model Mansinha & Smylie (1971) dan Okada (1985) diaplikasikan untuk memodelkan inisiasi model tsunami di lokasi pembangkitan. Terdapat dua skenario pemodelan, yaitu 9,15 Mw sebagai rekonstruksi Tsunami Samudera Hindia 2004 yang berdasarkan Koshimura et al. (2009) dan 9,2 Mw sebagai skenario maksimum yang berpotensi terjadi berdasarkan Benazir et al. (2022). Skenario mereka sebenarnya juga mengacu pada Koshimura et al. (2009) dengan perubahan pada dimensi *rupture* dan penyesuaian sudut patahan. Skala *moment magnitude* ini diproyeksikan dengan pendekatan formula dari Hanks & Kanamori (1979) dan Wells & Coppersmith (1994). Kedua skenario dimodelkan dengan *multi-fault* dengan parameter gempa selengkapnya ditabulasikan dalam **Tabel 3**.

Pengamatan ETA dilakukan pada 10 lokasi pengukuran di garis pantai (pada kedalaman rerata kurang dari -1 m). Definisi ETA ditentukan berdasarkan metode yang dilakukan oleh Hayashi et al. (2011). Waktu kedatangan dikategorikan dalam empat fase gelombang, yaitu fase kedatangan tsunami pertama (*tsunami arrival*), lembah awal (*initial trough*), puncak lokal (*local crest*), dan puncak utama (*primary crest*).

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Inisiasi tsunami sebagai sumber pembangkitan berdasarkan model dari Mansinha & Smylie (1971) dan Okada (1985) menghasilkan deformasi permukaan air yang selanjutnya dalam COMCOT dilanjutkan perhitungan menggunakan Persamaan (1) sampai (3). Skenario 9,15 Mw sebagai rekonstruksi kejadian di masa lalu ini telah memberikan hasil yang cukup baik dalam memodelkan tsunami dengan verifikasi modelnya dapat dilihat dalam Koshimura et al. (2009). Tingkat ketelitian hasil model ini juga dipengaruhi oleh pembagian segmen patahan (*multi-fault*) dibandingkan dengan hanya menggunakan *single-fault* terutama untuk skala gempa yang besar (>8 Mw). Berdasarkan parameter gempa pada **Tabel 3**, bentuk inisiasi tsunami untuk kedua skenario diperlihatkan pada **Gambar 2**. Pada saat dislokasi, skenario 9,15 dan 9,2 Mw menghasilkan gelombang negatif sebesar -3,53 m dan -4,18 m serta gelombang positif sebesar 10,78 m dan 11,45 m, secara berturut-turut. Kedua skenario juga menunjukkan terjadinya penurunan muka air terlebih dahulu untuk sisi Sumatera yang sama

dengan kejadian 2004. **Gambar 3** menunjukkan hasil pemodelan tsunami mulai dari perambatan di laut sampai dengan tiba di daratan pantai. Gelombang mengalami *split* di mana sebagian menuju timur sebagai *near-field* tsunami bagi pulau-

pulau terluar dan Pulau Sumatera sendiri. Sedangkan gelombang yang menuju barat merupakan *far-field* tsunami bagi Srilanka sekitarnya dan juga pesisir barat Afrika.

**Tabel 1** Lokasi titik pengamatan ETA

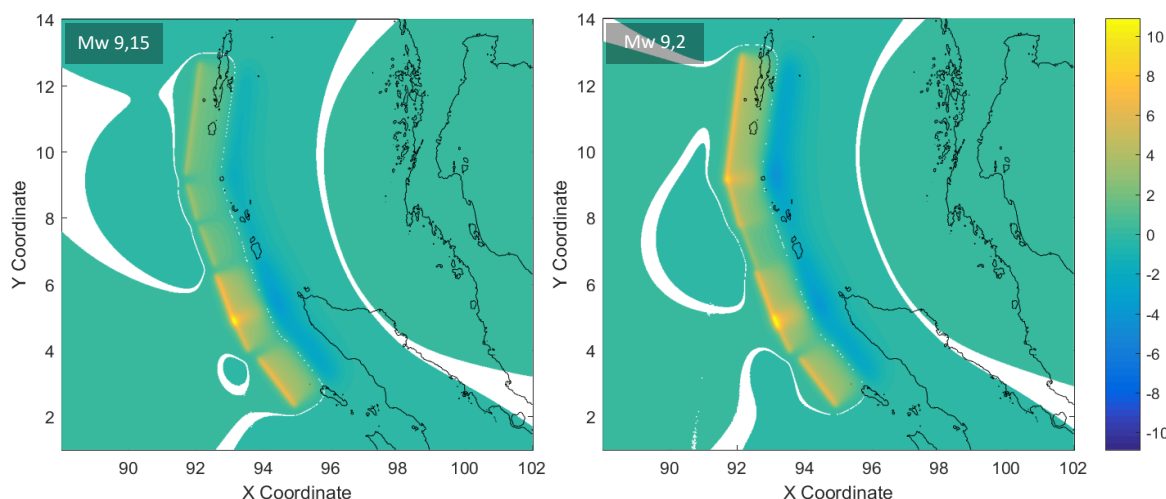
Titik Pengukuran	Lon. (deg)	Lat. (deg)	Elevasi (m)	Keterangan Lokasi
op-01	95.3132	5.5834	-0,48	Banda Aceh (Lampulo)
op-02	95.2319	5.4816	-1,09	Lhoknga
op-03	95.3160	5.8996	-0,13	Sabang (Kota)
op-04	95.2168	5.9075	-0,49	Sabang (0 km)
op-05	95.3469	5.8275	-1,07	Sabang (Balohan)
op-06	95.1746	5.6077	-0,63	Pulau Nasi (Deudap)
op-07	95.1590	5.6427	-0,35	Pulau Nasi (Lamteng)
op-08	95.0425	5.7342	-0,43	Pulau Breuh (Meulingge)
op-09	95.0680	5.6652	-0,91	Pulau Breuh (Seurapong)
op-10	95.1345	5.6676	-0,60	Pulau Breuh (Lampuyang)

**Tabel 2** Pembagian domain komputasi dan sumber datanya

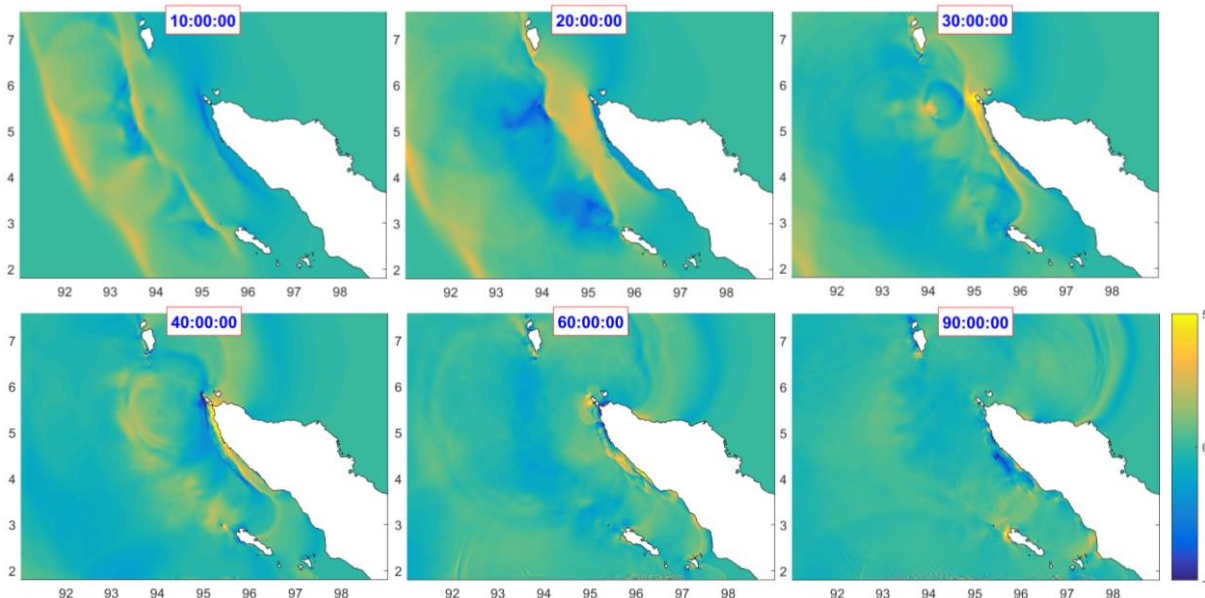
Domain Komputasi	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Latitude (°)	1.00-14.00	1.80-7.60	1.90-6.00
Longitude (°)	88.00-102.00	91.00-99.00	94.50-97.80
Jumlah grid	841 x 781	1441 x 1045	1783 x 2215
Ukuran grid (m)	1110	370	123,33
Rasio	1	3	3
Langkah waktu (s)	1	1	0,5
SWE	linear	linear	non-linear
Sumber data	Topex	Topex	Batnas

**Tabel 3** Skenario inisiasi sumber pembangkitan tsunami

Skenario	Mw	L (km)	W (km)	Total L (km)	Epicenter (°)		D (km)	Dis (m)	Strike (°)	Dip (°)	Tipe Fault	Referensi
					lon.	lat.						
1	9,15	200	150	1155	94.400	3.030	10,0	14,0	323	15	multi-fault	Koshimura et al. (2009)
		125	150		93.320	4.480		12,6	335	15		
		180	150		92.870	5.510		15,1	340	15		
		145	150		92.340	7.140		7,0	340	15		
		125	150		91.880	8.470		7,0	345	15		
2	9,2	200	150	1300	94.400	3.030	10,0	14,0	323	15	multi-fault	Benazir et al. (2022)
		135	150		93.320	4.480		12,6	335	15		
		205	150		92.870	5.510		15,1	340	15		
		160	150		92.340	7.140		7,0	340	15		
		170	150		91.880	8.470		12,6	345	15		
430	150	91.900	11.000	15,1	7	15						



**Gambar 2** Inisiasi tsunami untuk kedua skenario



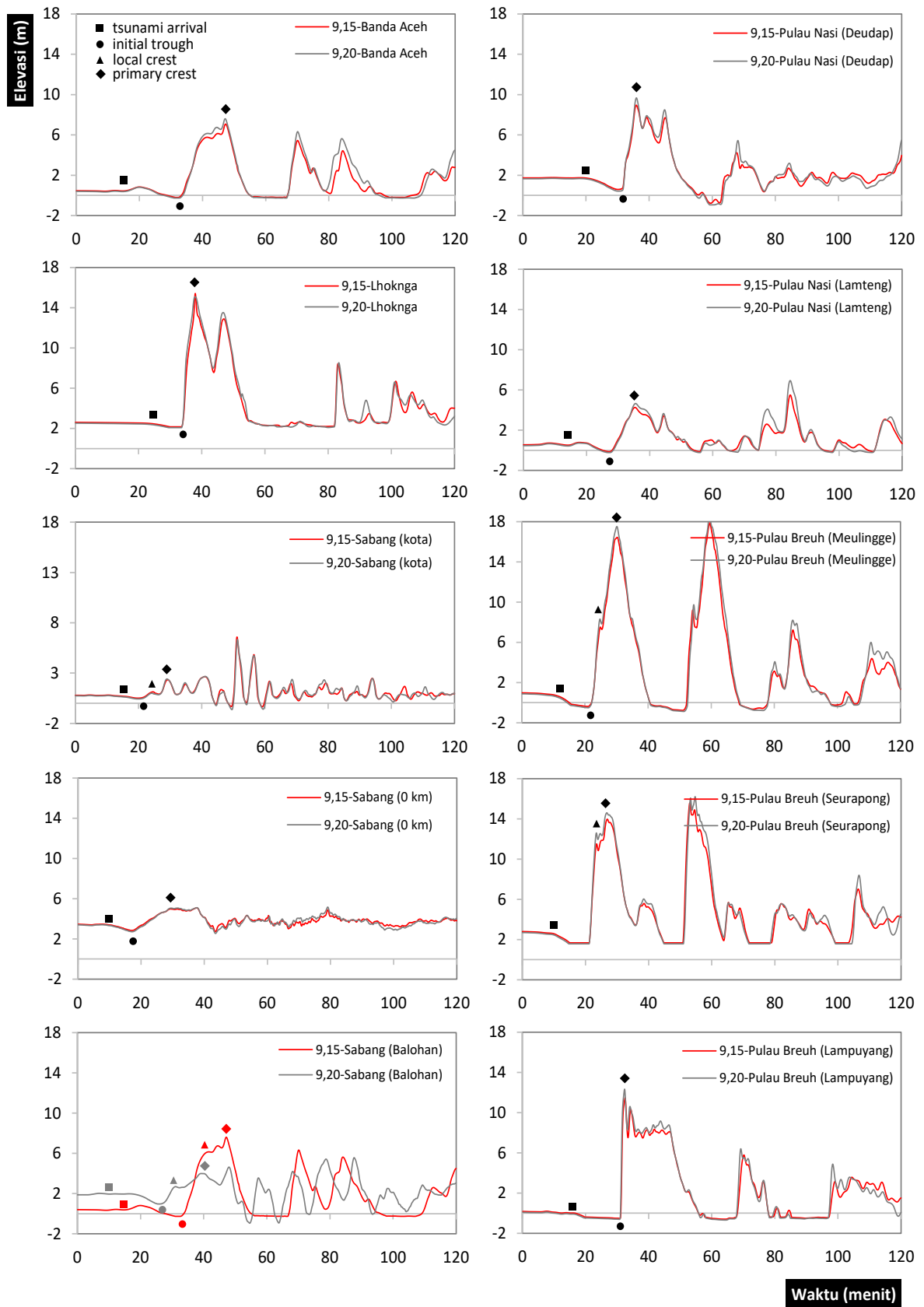
Gambar 3 Snapshot penjalaran tsunami skenario 9,15 Mw pada Domain 2

Hubungan kedua skenario yang disimulasikan tidak memberikan terlalu banyak perbedaan untuk waktu kedatangannya. Namun terdapat sedikit selisih antara skala 9,15 dan 9,2 Mw dalam perolehan elevasi gelombang, yaitu dengan skala gempa yang besar menghasilkan tsunami yang juga signifikan. Hasil yang cukup kontras antara dua skenario ini terlihat untuk pencatatan di Balohan, Pulau Weh. Keberadaan Balohan dengan morfologi pantai sebagai teluk panjang mempengaruhi deformasi gelombang selama perjalanannya menuju lokasi. Waktu kedatangan tsunami terlihat sangat variatif untuk semua lokasi yang diamati. Bagaimanapun, pengaruh jarak antara area terdampak dengan pusat gempa sebagai sumber pembangkit tsunami sangat berperan.

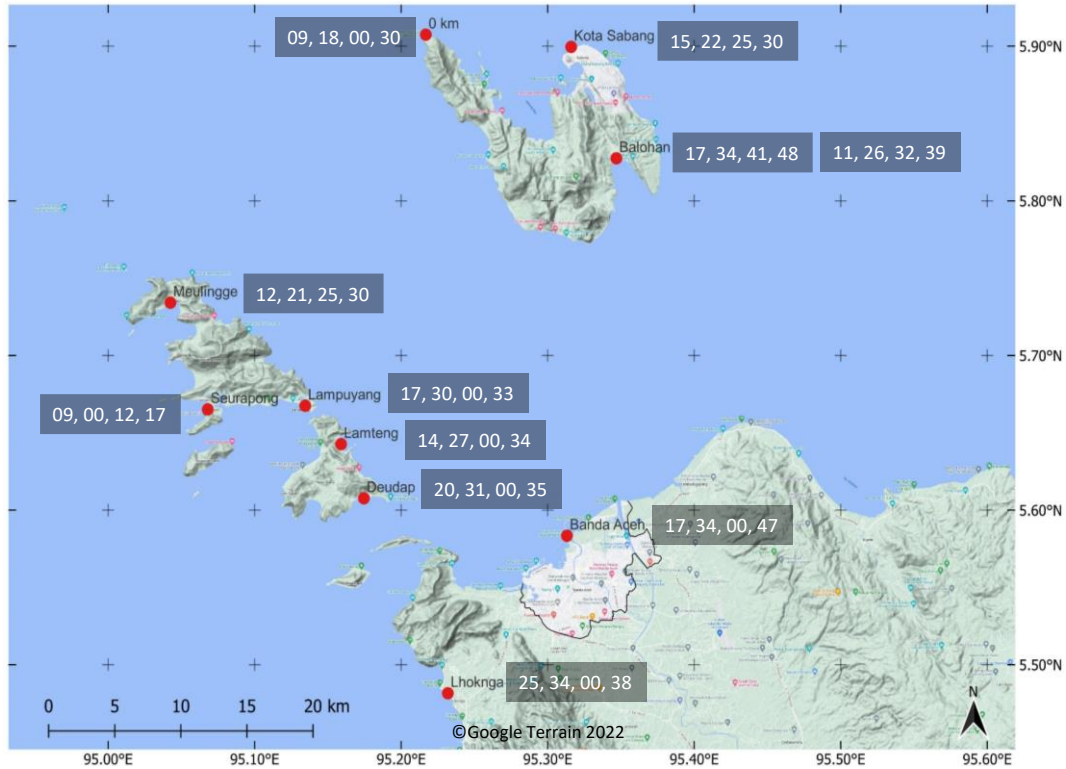
Karakteristik ETA seluruh area pengamatan di lokasi studi diperlihatkan pada Gambar 4 sedangkan rekapitulasinya diplotkan pada Gambar 5. ETA untuk kedua skenario gempa dapat direratakan seperti pada Gambar 5 (kecuali untuk kawasan Balohan). Dengan demikian, hasil pemodelan menunjukkan kedatangan tsunami diperkirakan tiba lebih dulu di Pulau Weh dan Pulau Nasi yang cukup dekat dengan zona subduksi dengan rerata waktunya adalah 9 menit (*arrival phase*). Ketiga pulau terluar Sumatera menghasilkan ETA yang kurang dari 10 menit kecuali untuk Pulau Breuh. Lokasi Pulau Breuh yang berada di belakang dari Pulau Nasi diperoleh ETA sebesar 14 menit di Lamteng dan 17 menit di Deudap. Kedua desa tersebut merupakan kawasan yang dengan populasi dominan di pulau tersebut. ETA 9 menit di 0 km Pulau Weh karena lokasinya yang cukup dekat dengan sumber pembangkitan. Namun kawasan ini mempunyai karakteristik

pantai dengan tebing yang cukup terjal. Populasi dominan di pulau berada di dua lokasi pengukuran lainnya, yaitu Kota Sabang dan Balohan.

Secara umum, kedatangan tsunami pertama tidak langsung membentuk fase gelombang puncak lokal akan tetapi setelah tanda kedatangan tsunami terekam, akan diikuti oleh gelombang negatif atau membentuk fase lembah awal. Faktor jarak kembali dibahas dalam hal ini, yaitu area subduksi yang berada di perairan barat Sumatera tersebut menghasilkan kategori tsunami lokal. Mekanisme patahan di zona subduksi menyebabkan tsunami dimulai dengan surutnya permukaan laut. Secara aktual saat kejadian 2004, perairan Banda Aceh dan Lhoknga mengalami kemunduran air laut hingga 1 km (Lavigne et al., 2013). Meskipun demikian tidak semua *near-field* tsunami skala besar akan selalu ditandai dengan surutnya air laut seperti ketika Tsunami Jepang 2011 (Muhari et al., 2012). Keberadaan Pulau Nasi dan Pulau Breuh di barat laut Banda Aceh tidak banyak memperlambat waktu kedatangan tsunami. Pada menit ke 17, mulai tercatat kehadirannya dan gelombang utama sampai dengan fase puncaknya tiba 34-47 menit setelah gempa. Hal ini didasari oleh panjang segmen yang *rupture* mencapai 1300 km, yaitu sampai ke Kepulauan Nicobar dan Andaman. Pulau-pulau terluar tersebut menghasilkan ETA 9 menit dan yang diikuti oleh fase lembah berkisar 18-21 menit sebelum menuju fase puncak terbentuk. Khusus untuk Seurapong, fase lembah awal tidak terbentuk dikarenakan keterbatasan bathimetri di lokasi titik pengamatan. Jika memiliki cukup kedalaman tentu akan membentuk fase awal lembah sebelum menuju fase puncak seperti lokasi sekitar lainnya.



Gambar 4 ETA tsunami dengan karakteristik fase gelombangya



**Gambar 5** Karakteristik kedatangan tsunami berdasarkan fase gelombangnya (*tsunami arrival, initial trough, local crest, primary crest: menit*)

Fase gelombang menentukan pemilihan ETA tsunami yang tepat dalam mitigasi. Bagaimanapun, bentuk gelombang sangat tergantung dengan mekanisme pembangkitannya. Pada scenario model ini menghasilkan fase lembah awal terlebih dahulu untuk Banda Aceh (34 menit). Namun osilasi dari fase kedatangan gelombang (*tsunami arrival*) telah terindikasi lebih dahulu pada menit ke 17. Adakalanya ETA ditentukan saat tinggi gelombang yang mencapai 0,5 m dari MSL (*mean sea level*) di dekat pantai (BMKG, 2012). Syamsidik et al. (2015) menggunakan ketentuan ini dalam menentukan ETA untuk Banda Aceh sebesar 35 menit. Skenario pemodelan mereka berdasarkan rekonstruksi Tsunami 2004 dengan titik pembacaan ETA pada kedalaman 10 m. ETA 35 menit tersebut merupakan pada fase lembah awal (*initial trough*) jika dihubungkan dalam penelitian ini, yaitu 34 menit untuk Banda Aceh. Meskipun demikian, fase kedatangan (*tsunami arrival*) menjadi penting sebagai waktu paling kritis terutama bagi masyarakat yang berada di kawasan pantai saat gempa terjadi.

Di daratan, informasi terjadinya tsunami akan sangat baik jika dapat diterima lebih cepat. Metode pembacaan ETA pada kajian ini secara aktual berupa sensor tsunami yang diinstalasi di perairan dangkal misalkan di pelabuhan dengan membaca fluktuasi tinggi gelombangnya. Informasi kejadian tsunami akan lebih cepat jika sensor tsunami

tersebut dipasang di laut lepas atau di pulau terluar yang berada di depan pulau utama. Sensor juga dapat dipasang di badan kapal nelayan sehingga jika tsunami terjadi dan nelayan berada di laut lepas, informasi kejadian akan lebih cepat ditransmisikan ke daratan (Nurendyastuti et al., 2022). Saat ini beberapa pengembangan dalam mendeteksi tsunami lebih dini juga telah dikembangkan. Salah satunya adalah pendeteksian tsunami dengan radar frekuensi tinggi dengan variabel berupa kecepatan tsunami seperti saat Tsunami Tohoku 2011 (Lipa et al., 2019). Selain itu, juga peramalan tsunami *real-time* sesaat setelah gempa dengan pendekatan parameter gempa seperti pada Tsunami Aceh 2012 oleh Wang et al. (2012).

Asesmen ETA ini berperan penting dalam penguatan pengurangan risiko bencana kewilayahan. Kawasan kota dengan pemukiman penduduk yang padat seperti Sabang dan Banda Aceh memiliki waktu sekitar 22-34 menit setelah gempa. Waktu berharga ini (*golden time*) akan digunakan baik untuk membuat keputusan (kapan, pilihan rute, dan titik evakuasi) maupun aksi evakuasinya. Tingkat keberhasilannya sangat tergantung dengan kesadaran dan pengetahuan manajemen bencana yang telah dibekali atau pengalaman sebelumnya (Chen et al., 2022). Kesiapsiagaan masyarakat tentang upaya penyelamatan mandiri menjadi kunci keberhasilan yang lebih spesifik di mana akan bergantung pada



penggunaan waktu evakuasi, jarak ke zona evakuasi yang dipilih, dan metode transportasi yang digunakan (Kubisch et al., 2020). Penggunaan waktu kritis tersebut juga mencakup kesiapan psikologis individu dalam mencari informasi status terkini yang dilanjutkan ke tahap pengambilan keputusan melakukan evakuasi (Lindell et al., 2018; National Research Council, 2011; Wood et al., 2018). Ditambah dengan persiapan logistik dan pengepakan termasuk di dalamnya mengumpulkan dokumen berharga yang akan ikut dibawa bersama saat evakuasi (Lindell et al., 2005). Perilaku-perilaku tersebut perlu disesuaikan dengan ketersediaan ETA yang berlaku untuk setiap kawasan yang rentan terhadap kedatangan tsunami.

## KESIMPULAN

Waktu kedatangan tsunami berdasarkan skenario *rupture* Segmen Aceh-Andaman berkisar 18-22 menit untuk Sabang, 21-27 menit untuk Pulau Nasi dan Breuh, serta 34 menit untuk Banda Aceh dan Lhoknga. Waktu tersebut adalah *design time* yang ditentukan berdasarkan karakteristik ETA antara fase *tsunami arrival* dan *local trough* yang berlaku untuk skenario yang ditentukan sebelumnya. Asesmen ETA untuk kawasan yang rentan tsunami merupakan bagian dari upaya pengurangan risiko bencana (*disaster risk reduction*), yaitu berkaitan langsung dengan ketersediaan waktu evakuasi. Bagaimanapun, laju keberhasilan evakuasi juga ditentukan dengan adaptasi perilaku masyarakat sesuai dengan alokasi ETA yang ada.

Kajian tentang ETA masih cukup terbuka dilakukan lebih komprehensif baik skenario potensial *rupture* maupun zona pengamatan yang lebih luas. Mekanisme pembangkitan tsunami juga dapat dimodelkan lebih luas dalam melengkapi kajian ETA ini seperti tsunami yang dibangkitkan oleh longsoran bawah laut baik akibat gempa (seperti kasus Tsunami Palu-Donggala 2018) maupun aktivitas vulkanik (Tsunami Anak Krakatau 2018).

## DAFTAR PUSTAKA

- Basher, R., Page, J., Woo, J., Davies, M. L., Synolakis, C. E., Farnsworth, A. F., & Steacey, S. (2006). Global early warning systems for natural hazards: Systematic and people-centred. In *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 364, Issue 1845, pp. 2167–2182). Royal Society.  
<https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819>
- Benazir, Syamsidik, & Idris, Y. (2022). Asesmen Potensi Tsunami dan Kesiapsiagaan Masyarakat Pesisir:

Studi Kasus Teluk Ulee Lheue, Aceh Besar. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 13(1), 1–16.  
<https://doi.org/10.32679/jth.v13i1.678>

- BMKG (Meteorological Climatological and Geophysical Agency). (2012). *Tsunami Early Warning Service Guidebook for InaTEWS* (Second Edition). Badan Meteorologi Klimatologi & Geofisika (BMKG). <https://www.gitews.org/tsunami-kit/en/E3/tool/Tsunami%20Early%20Warning%20Service%20Guidebook%20for%20InaTEWS.pdf> (diakses pada 7 November 2022)
- Chen, C., Wang, H., Lindell, M. K., Jung, M. C., & Siam, M. R. K. (2022). Tsunami preparedness and resilience: Evacuation logistics and time estimations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109, 103324.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103324>
- Chlieh, M., Avouac, J. P., Hjorleifsdottir, V., Song, T. R. A., Ji, C., Sieh, K., Sladen, A., Hebert, H., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., & Galetzka, J. (2007). Coseismic slip and afterslip of the great Mw 9.15 Sumatra-Andaman earthquake of 2004. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(1 A SUPPL.). <https://doi.org/10.1785/0120050631>
- Daly, P., Sieh, K., Seng, T. Y., McKinnon, E. E., Parnell, A. C., Ardiansyah, Feener, R. M., Ismail, N., Nizamuddin, & Majewski, J. (2019). Archaeological evidence that a late 14th-century tsunami devastated the coast of northern Sumatra and redirected history. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(24), 11679–11686.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1902241116>
- Greenslade, D. J. M., Allen, S. C. R., & Simanjuntak, M. A. (2011). An evaluation of tsunami forecasts from the T2 scenario database. *Pure and Applied Geophysics*, 168(6–7), 1137–1151.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-010-0229-3>
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350.  
<https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Haridhi, H. A., Huang, B. S., Wen, K. L., Denzema, D., Agung Prasetyo, R., & Lee, C. S. (2018). A study of large earthquake sequences in the Sumatra subduction zone and its possible implications. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 29(6), 635–652.  
<https://doi.org/10.3319/TAO.2018.08.22.01>
- Hayashi, Y., Tsushima, H., Hirata, K., Kimura, K., & Maeda, K. (2011). Tsunami source area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake determined from tsunami arrival times at offshore observation stations. *Earth, Planets and*

- Space, 63(7), 809–813.  
<https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.042>
- IOC-UNESCO. (2019). *Tsunami Glossary: Technical Series 85* (Fourth Edition). Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. [http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com\\_content&view=category&id=1142&Itemid=2433](http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=category&id=1142&Itemid=2433) (diakses pada 7 November 2022)
- Jiménez, C. (2010). Software for Determination of Occurrence of Tsunamis. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 104, 25–31.  
<https://www.dhn.mil.pe/files/cnat/pdf/articulos/Software%20para%20ocurrencia%20de%20maremotos.pdf> (diakses pada 7 November 2022)
- Jiménez, C., Carbonel, C., & Rojas, J. (2018). Numerical Procedure to Forecast the Tsunami Parameters from a Database of Pre-Simulated Seismic Unit Sources. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4), 1473–1483. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1660-5>
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., & Imamura, F. (2009). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*, 51(3), 243–273.  
<https://doi.org/10.1142/S0578563409002004>
- Kubisch, S., Guth, J., Keller, S., Bull, M. T., Keller, L., & Braun, A. C. (2020). The contribution of tsunami evacuation analysis to evacuation planning in Chile: Applying a multi-perspective research design. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 45.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101462>
- Lange, D., Tilmann, F., Henstock, T., Rietbrock, A., Natawidjaja, D., & Kopp, H. (2018). Structure of the central Sumatran subduction zone revealed by local earthquake travel-time tomography using an amphibious network. *Solid Earth*, 9(4), 1035–1049. <https://doi.org/10.5194/se-9-1035-2018>
- Lavigne, F., Paris, R., Leone, F., Gaillard, J. C., & Morin, J. (2013). Indian Ocean Tsunami, 2004. In P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 529–535). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4\\_192](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_192)
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Nettles, M., Ward, S. N., Aster, R. C., Beck, S. L., Bilek, S. L., Brudzinski, M. R., Butler, R., Deshon, H. R., Ekström, G., Satake, K., & Sipkin, S. (2005). The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004. In *Science* (Vol. 308, Issue 5725, pp. 1127–1133).  
<https://doi.org/10.1126/science.1112250>
- Lindell, M. K., Lu, J.-C., & Prater, C. S. (2005). Household Decision Making and Evacuation in Response to Hurricane Lili. *Natural Hazards Review*, 6(4), 171–179.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2005\)6:4\(171\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2005)6:4(171))
- Lindell, M. K., Murray-Tuite, P., Wolshon, B., & Baker, E. J. (2018). *Large-Scale Evacuation: The Analysis, Modeling, and Management of Emergency Relocation from Hazardous Areas* (1st Edition). CRC Press.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781315119045>
- Lipa, B., Barrick, D., & Isaacson, J. (2019). Evaluating HF coastal radar site performance for Tsunami warning. *Remote Sensing*, 11(23).  
<https://doi.org/10.3390/rs11232773>
- Mansinha, L., & Smylie, D. E. (1971). The Displacement Fields of Inclined Faults. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 61, Issue 5).  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1785/BSSAO610051433>
- Mas, E., Suppasri, A., Imamura, F., & Koshimura, S. (2012). Agent-based Simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake/Tsunami Evacuation: An Integrated Model of Tsunami Inundation and Evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 41–57.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2328/jnds.34.41>
- Meltzner, A. J., Sieh, K., Abrams, M., Agnew, D. C., Hudnut, K. W., Avouac, J. P., & Natawidjaja, D. H. (2006). Uplift and subsidence associated with the great Aceh-Andaman earthquake of 2004. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(2). <https://doi.org/10.1029/2005JB003891>
- Monecke, K., Finger, W., Klarer, D., Kongko, W., McAdoo, B. G., Moore, A. L., & Sudrajat, S. U. (2008). A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. *Nature*, 455(7217), 1232–1234.  
<https://doi.org/10.1038/nature07374>
- Muhari, A., Imamura, F., Suppasri, A., & Mas, E. (2012). Tsunami arrival time characteristics of the 2011 East Japan Tsunami obtained from eyewitness accounts, evidence and numerical simulation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 91–104.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2328/jnds.34.91>

- Natawidjaja, D. H., Sieh, K., Chlieh, M., Galetzka, J., Suwargadi, B. W., Cheng, H., Edwards, R. L., Avouac, J. P., & Ward, S. N. (2006). Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(6). <https://doi.org/10.1029/2005JB004025>
- National Research Council. (2011). *Tsunami Warning and Preparedness: An Assessment of the U.S. Tsunami Program and the Nation's Preparedness Efforts*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12628>
- Newcomb, K. R., & McCann, W. R. (1987). Newcomb & McCann 1987. *Journal of Geophysical Research*, 92(B1), 421–439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00421>
- Nurendyastuti, A. K., Dinata, M. M. M., Mitayani, A., Purnama, M. R., Adityawan, M. B., Farid, M., Kuntoro, A. A., & Widyaningtias. (2022). Tsunami Early Warning System Based on Maritime Wireless Communication. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 8(2), 115–124. <https://doi.org/10.22146/jcef.2878>
- Okada, Y. (1985). Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135–1154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1785/BSSAO750041135>
- Okhari, R. S., Munadi, K., & Ridha, M. (2014). Effectiveness of Dissemination and Communication Element of Tsunami Early Warning System in Aceh. *Procedia Economics and Finance*, 18, 136–142. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(14\)00923-x](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(14)00923-x)
- Péroche, M., Leone, F., & Gutton, R. (2014). An accessibility graph-based model to optimize tsunami evacuation sites and routes in Martinique, France. *Advances in Geosciences*, 38, 1–8. <https://doi.org/10.5194/adgeo-38-1-2014>
- Pusgen. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Studi Gempa Nasional (Indonesia).
- Rahayu, H. P., Latief, H., Anita, J., Riawan, E., Bisri, M. B. F., & Rizka, S. (2014). *Pedoman Perencanaan Jalur dan Rambu Evakuasi Tsunami*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana. <https://perpustakaan.bnpb.go.id/bulian/index.php?p=fstream-pdf&fid=262&bid=1915> (diakses pada 7 November 2022)
- Rubin, C. M., Horton, B. P., Sieh, K., Pilarczyk, J. E., Daly, P., Ismail, N., & Parnell, A. C. (2017). Highly variable recurrence of tsunamis in the 7,400 years before the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nature Communications*, 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms16019>
- Satake, K., & Kanamori, H. (1991). Use of tsunami waveforms for earthquake source study. *Natural Hazards*, 4(2), 193–208. <https://doi.org/10.1007/BF00162787>
- Shuto, N., & Matsutomi, H. (1995). Field survey of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 144(3), 649–663. <https://doi.org/10.1007/BF00874388>
- Steinmetz, T., Raape, U., Teßmann, S., Strobl, C., Friedemann, M., Kukofka, T., Riedlinger, T., Mikusch, E., & Dech, S. (2010). Tsunami early warning and decision support. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(9), 1839–1850. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1839-2010>
- Strunz, G., Post, J., Zosseder, K., Wegscheider, S., Mück, M., Riedlinger, T., Mehl, H., Dech, S., Birkmann, J., Gebert, N., Harjono, H., Anwar, H. Z., Sumaryono, Khomarudin, R. M., & Muhari, A. (2011). Tsunami risk assessment in Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(1), 67–82. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-67-2011>
- Sufri, S., Dwirahmadi, F., Phung, D., & Rutherford, S. (2020). Progress in the early warning system in Aceh province, Indonesia since the 2004 earthquake-tsunami. *Environmental Hazards*, 19(5), 463–487. <https://doi.org/10.1080/17477891.2019.1653816>
- Syamsidik, & Istiyanto, D. C. (2013). Tsunami mitigation measures for tsunami prone small islands: Lessons learned from the 2010 tsunami around the Mentawai Islands of Indonesia. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 7(1). <https://doi.org/10.1142/S1793431113500024>
- Syamsidik, Rasyif, T. M., & Kato, S. (2015). Development of accurate tsunami estimated times of arrival for tsunami-prone cities in Aceh, Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.006>
- Synolakis, C., Okal, E., & Bernard, E. (2005). The Megatsunami of December 26, 2004. *The Bridge, Summer 2005*. <https://www.pmel.noaa.gov/pubs/PDF/syno2380/syno2380.pdf> (diakses pada 7 November 2022)

- Tim Kaji Cepat. (2011). Evaluasi Sistem Peringatan Dini Tsunami pada Kejadian Gempabumi & Tsunami Aceh 11 April 2012. *Laporan Awal Kaji Cepat Bersama, BMKG – BNPB – LIPI – BPPT – RISTEK – GIZ-IS PROTECTS – UNESCO-JTIC – UNDP – KKP – Tohoku University – TDMRC – Universitas Syiah Kuala – UNDP – DRRRA Universitas Andalas – Universitas Bung Hatta – KOGAMI*. [https://www.gitews.org/tsunami-kit/en/E4/further\\_resources/case\\_study/Evaluasi%20Sistem%20Peringatan%20Dini%20Tsunami%20pada%20Kejadian%20Gempabumi%20&%20Tsunami%20Aceh%2011%20April%202012.pdf](https://www.gitews.org/tsunami-kit/en/E4/further_resources/case_study/Evaluasi%20Sistem%20Peringatan%20Dini%20Tsunami%20pada%20Kejadian%20Gempabumi%20&%20Tsunami%20Aceh%2011%20April%202012.pdf) (diakses pada 7 November 2022)
- Titov, V. v, Gica, E., & Spillane, M. C. (2008). *Development of the Forecast Propagation Database for NOAA's Short-term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT)*. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/11079> (diakses pada 7 November 2022)
- United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR). (2006). *Global Survey of Early Warning Systems: An assessment of capacities, gaps and opportunities towards building a comprehensive global early warning system for all natural hazards*. <https://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/Global-Survey-of-Early-Warning-Systems.pdf> (diakses pada 7 November 2022)
- Wang, D., Becker, N. C., Walsh, D., Fryer, G. J., Weinstein, S. A., McCreery, C. S., Sardiña, V., Hsu, V., Hirshorn, B. F., Hayes, G. P., Duputel, Z., Rivera, L., Kanamori, H., Koyanagi, K. K., & Shiro, B. (2012). Real-time forecasting of the April 11, 2012 Sumatra tsunami. *Geophysical Research Letters*, 39(18). <https://doi.org/10.1029/2012GL053081>
- Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L. A., Cox, D., & Park, H. (2016). An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 86–100. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.11.010>
- Wang, X. (2009). *User Manual for COMCOT Version 1.7 (first draft)*. [http://ceeserver.cee.cornell.edu/pllgroup/comcot\\_down.htm](http://ceeserver.cee.cornell.edu/pllgroup/comcot_down.htm). (diakses pada 28 April 2017)
- Weller, O., Lange, D., Tilmann, F., Natawidjaja, D., Rietbrock, A., Collings, R., & Gregory, L. (2012). The structure of the Sumatran Fault revealed by local seismicity. *Geophysical Research Letters*, 39(1). <https://doi.org/10.1029/2011GL050440>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismology Society of America*, 84(4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Wood, N., Jones, J., Peters, J., & Richards, K. (2018). Pedestrian evacuation modeling to reduce vehicle use for distant tsunami evacuations in Hawai'i. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.009>
- Zhang, D. H., Yip, T. L., & Ng, C. O. (2009). Predicting tsunami arrivals: Estimates and policy implications. *Marine Policy*, 33(4), 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2008.12.011>