

ESTIMASI WAKTU KEDATANGAN TSUNAMI BERDASARKAN PATAHAN SEGMENT ACEH-ANDAMAN

ESTIMATED TSUNAMI ARRIVAL TIME BASED ON THE ACEH-ANDAMAN FAULT SEGMENT

Benazir¹⁾*, Kuswandi²⁾, M. Hafiz Aslami³⁾, M. Faisi Ikhwal⁴⁾, Siti Nurul Hijah⁵⁾

¹⁾ Civil and Environmental Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika, Kampus No.2, Yogyakarta, Indonesia

²⁾ Universitas Prima Indonesia, Medan

³⁾ Departemen Teknik Sipil, Binus University, DKI Jakarta

⁴⁾ Program Studi Teknik Lingkungan, UIN Ar-Raniry, Banda Aceh

⁵⁾ Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Islam Al-Azhar, Mataram

*Correspondent E-Mail: benazir@ugm.ac.id

Accepted: ; Revised: ; Approved:

ABSTRACT

Historical records and paleo-tsunami studies show that tsunami cycles occur on the Aceh coast regularly. Following the 2004 Indian Ocean Tsunami, extensive mapping of the Sumatran tectonic system was conducted. Based on these data, an assessment of the potential for a tsunami and its impact on the coasts of Aceh can be performed as part of the ongoing development of disaster mitigation and preparedness efforts. The estimated evacuation time determines the likelihood of surviving the incoming tsunami. The estimation time of arrival (ETA) of the tsunami determines evacuation time, which is the golden time for responding to further actions after the earthquake, particularly for coastal communities. ETA observations were made along Aceh's north coast, including Banda Aceh and Lhoknga on Sumatra Island, as well as the surrounding outer islands of Pulau Weh, Pulau Nasi, and Pulau Breuh. This research examined the arrival time of the tsunami 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 after the tsunami is generated in the subduction zone until the wave propagates 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 priodik di pesisir Aceh. Setelah fenomena Tsunami Samudera Hindia 2004, pemetaan terhadap tatanan tektonik Sumatera semakin intensif dilakukan. Berdasarkan data tersebut, selanjutnya dapat dilakukan asesmen potensi tsunami dan dampaknya di daratan Aceh sebagai kelanjutan dalam pengembangan mitigasi dan usaha kesiapsiagaan bencana. Estimasi waktu evakuasi menjadi penentu tingkat keberhasilan saat proses menyelamatkan diri dari kedatangan tsunami. Waktu evakuasi ditentukan oleh waktu kedatangan tsunami (ETA) yang menjadi golden time dalam merespon tindakan selanjutnya setelah gempa berlangsung terutama bagi masyarakat pesisir. Pengamatan ETA dilakukan di utara pesisir Aceh, yaitu mencakup Banda Aceh dan Lhoknga di Pulau Sumatera juga pulau-pulau terluar sekitar; Pulau Weh, Pulau Nasi, dan Pulau Breuh. Makalah ini melakukan kajian tentang waktu kedatangan tsunami 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 dilakukan setelah pembangkitan tsunami di zona subduksi sampai dengan penjalaran gelombangnya di titik pengamatan dengan fase-fase karakteristik kedatangan tsunami. 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 (Weller dkk., 2010; Haridhi dkk., 2018; Lange dkk., 2018). Gempa tektonik skala besar yang menghasilkan tsunami telah berulang kali terjadi di wilayah ini (Newcomb & McCann, 1987; Meltzner dkk., 2006; Natawidjaja dkk., 2006). Fenomena bencana alam 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 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 dkk. (2008); Rubin dkk. (2017); dan Daly dkk. (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 dkk. (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 yang baik. Menurut Basher dkk. (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. Namun dalam implementasi yang terjadi, bentuk respon masyarakat dalam melakukan evakuasi cenderung disebabkan oleh sistem peringatan yang tidak resmi yang dikeluarkan oleh pemerintah atau lembaga negara. Kebanyakan mengikuti peringatan alami seperti saat surutnya air laut di pantai menjadi keputusan dalam melakukan evakuasi (Muhari dkk., 2012). Beberapa penelitian mengidentifikasi berbagai faktor yang menyebabkan tingkat kematian pada kejadian tsunami. Faktor-faktor tersebut berperan dalam pengembangan penelitian

tentang evakuasi (Mas dkk., 2012; Péroche dkk., 2014; Wang dkk., 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 dkk., 2019). 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 (Steinmetz dkk., 2010; Strunz dkk., 2011; IOT-UNESCO, 2019). 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 (BSN, 2012).

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 (Zhang dkk., 2009; Syamsidik & Istiyanto, 2013). 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. Gica dkk. (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 dkk. (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 dkk. (2017) untuk menghitung kedatangan tsunami pertama dan tinggi tsunami maksimum pada titik pengukuran pasang surut sebenarnya baik di lapangan maupun virtual. Syamsidik dkk. (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. ETA ditentukan untuk Banda Aceh dan Aceh Besar (khususnya Lhoknga) dan kawasan strategis di pulau-pulau terluar Sumatera seperti Pulau Weh, Pulau Nasi, Pulau Breuh, dan Pulau Simeuleu. 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 (Meltzner dkk., 2006; Chlieh dkk., 2007) 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 (Synolakis dkk., 2005; Lay dkk., 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. 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, penjararan, 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, 2019).

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

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

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

Variabel η 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 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 Manshinha dan 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 dkk. (2009) dan 9.2 Mw sebagai skenario maksimum yang berpotensi terjadi berdasarkan Benazir dkk. (2022). Skenario Benazir dkk (2022) sebenarnya juga mengacu pada Koshimura dkk (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**.

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

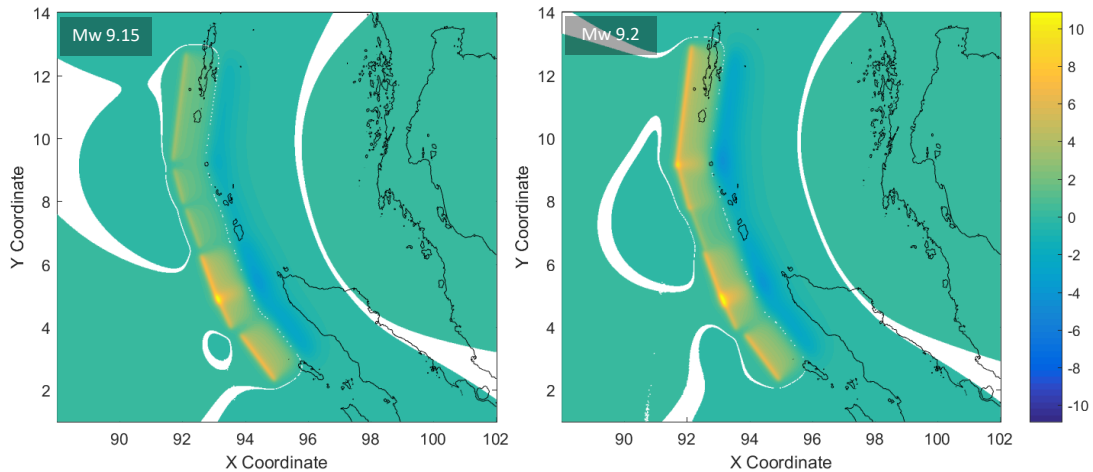
Tabel 3 Skenario inisiasi sumber pembangkitan tsunami

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 dkk (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		
		380	150		91.900	11.000		7.0	7	15		
2	9.2	200	150	1300	94.400	3.030	10.0	14.0	323	15	multi-fault	Benazir dkk (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		

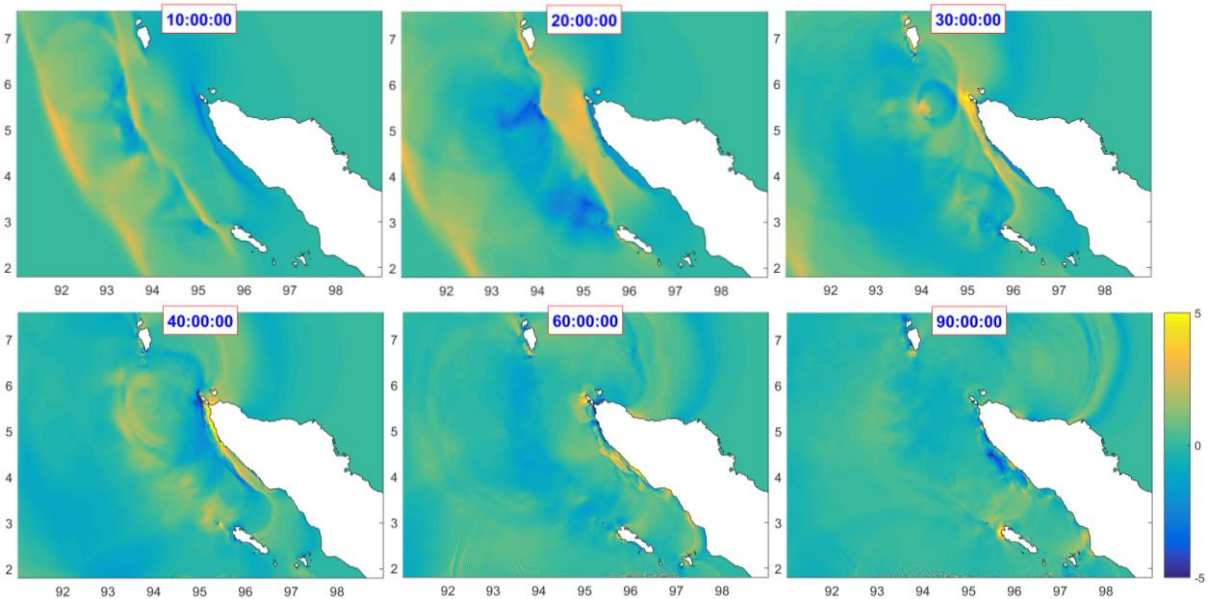
HASIL DAN PEMBAHASAN

Inisiasi tsunami sebagai sumber pembangkitan berdasarkan model dari Manshinha dan 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 dkk. (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.



Gambar 2. Inisiasi tsunami untuk kedua skenario



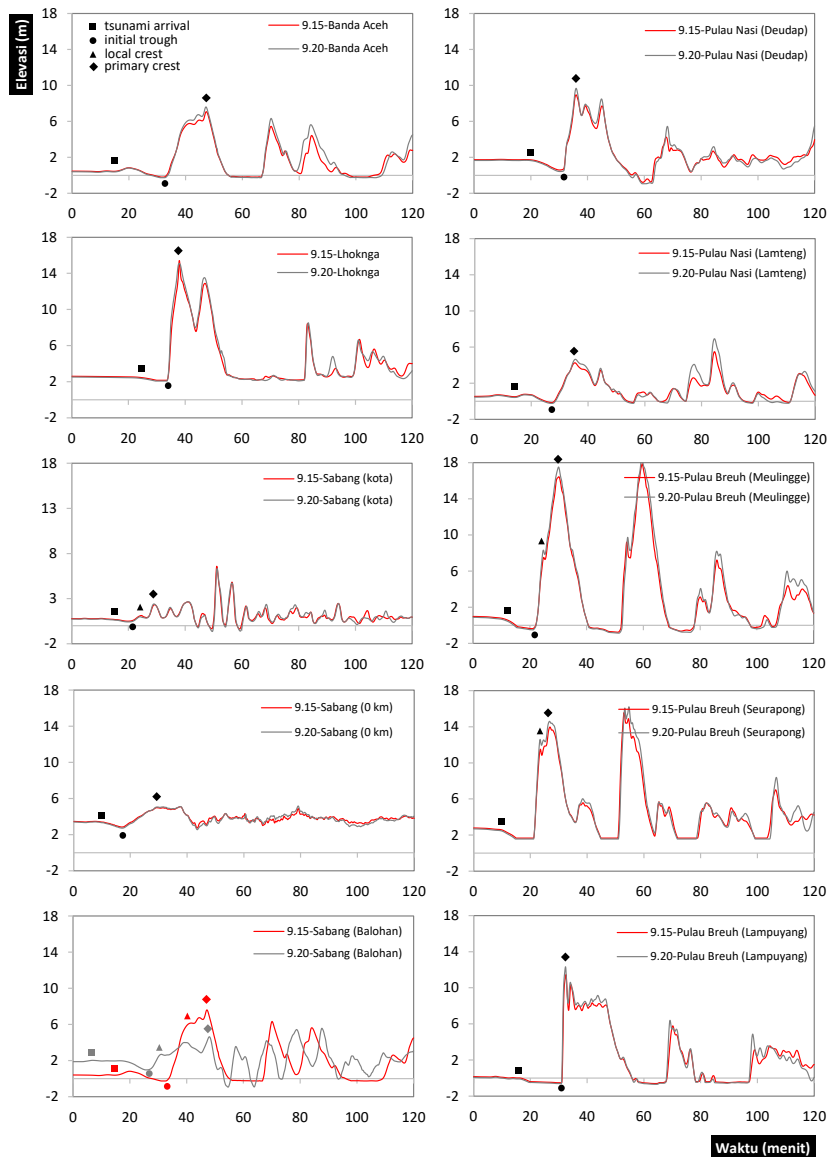
Gambar 2. Snapshot penjarangan tsunami skenario 9.15 Mw pada Domain 2

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 dkk. (2011). Waktu kedatangan dikategorikan dalam 4 fase gelombang, yaitu fase kedatangan tsunami pertama (*tsunami arrival*), lembah awal (*initial trough*), puncak lokal (*local crest*), dan puncak utama (*primary crest*).

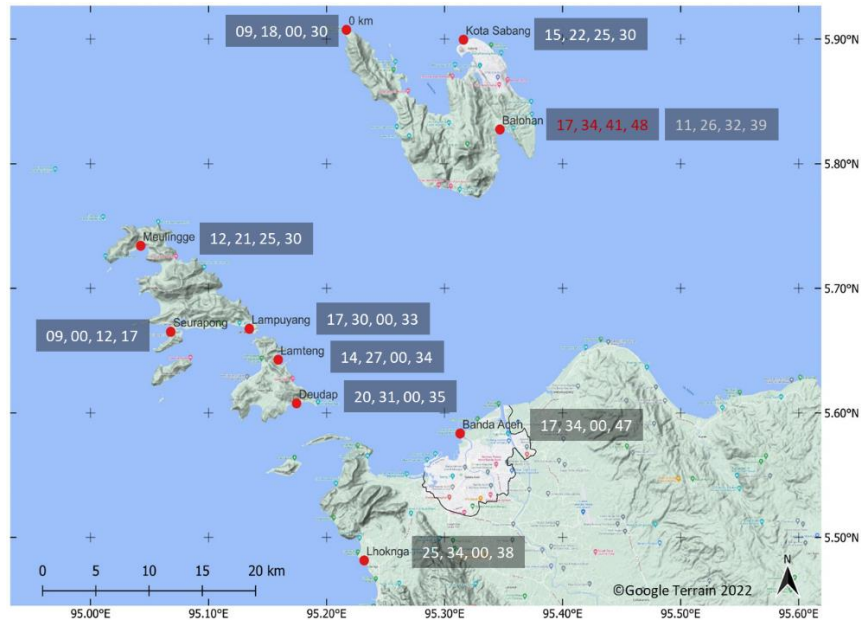
Hubungan kedua skenario yang disimulasikan tidak memberikan terlalu banyak perbedaan untuk waktu kedatangannya. Namun terdapat sedikit selisih antara skala 9.15 dan 9.2 Mw dalam perolehan elevasi gelombang, yaitu dengan skala gempa yang besar menghasilkan tsunami yang juga signifikan. Hasil yang cukup kontras antara dua skenario ini terlihat untuk 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*).



Gambar 3. ETA dengan tiap karakteristik fase gelombangnya



Gambar 4. Karakteristik kedatangan tsunami berdasarkan fase gelombangnya

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 local trough. 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 dkk., 2013). Meskipun demikian tidak semua near-field tsunami skala besar akan selalu ditandai dengan surutnya air laut seperti pada Tsunami Jepang 2011 (Muhari dkk., 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.

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 dkk., 2020). 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 dkk., 2020). Penggunaan waktu kritis tersebut juga mencakup kesiapan psikologis individu dalam mencari informasi status terkini yang dilanjutkan ke tahap pengambilan keputusan melakukan evakuasi (Wood dkk., 2018). Ditambah dengan persiapan logistik dan pengepakan termasuk di dalamnya mengumpulkan dokumen berharga yang akan ikut dibawa bersama saat evakuasi (Lindell dkk., 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

- Badan Standardisasi Nasional, 2012. Jalur Evakuasi Tsunami, SNI 7766:2012, Jakarta, Indonesia.
- Basher, R., 2006. Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred, *Philos. T. Roy. Soc. A*, 364, 2167–2182, <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819>.
- Benazir, Syamsidik, Y. Idris, 2022. Asesmen Potensi Tsunami dan Kesiapsiagaan Masyarakat Pesisir: Studi Kasus Teluk Ulee Lheue, Aceh Besar, *Jurnal Teknik Hidraulik*, 13(1), <https://doi.org/10.32679/jth.v13i1.678>.
- Chen, C., H. Wang, M. K. Lindell, M. C. Jung, M.R.K. Siam, 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., Sieh, K., Sladen, A., Hébert, H., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., and 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, pp. 152–173.
- Daly, P., Sieh, K., Seng, T. Y., McKinnon, E. E., Parnell, A. C., Ardiansyah, . . . 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*, 116(24), pp. 11679–11686. <https://doi.org/10.1073/pnas.1902241116>.
- Gica, E., Spillane, E., Titov, V., Chamberlin, C., & Newman, J. (2008). Development of the forecast propagation database for NOAA's short-term inundation forecast for Tsunamis (SIFT). NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139, pp. 89.
- Greenslade, D., Allen, S., & Simanjuntak, M., 2011. An evaluation of tsunami forecasts from the T2 scenario database. *Pure and Applied Geophysics*, 168, pp. 1137–1151.
- Hanks, T. C., & Kanamori, H., 1979. A Moment Magnitude Scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), pp. 2348–2350.
- Haridhi, H. A., B.-S. Huang, K.-L. Wen, D. Denzema, R. A. Prasetyo, and C.-S. Lee, 2018. A study of large earthquake sequences in the Sumatra subduction zone and its possible implications. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 29, 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 station, *Earth Planet and Space*, 63(7), pp. 809–813.
- Intergovernmental Oceanographic Commission (IOT-UNESCO), 2019. Tsunami Glossary. Fourth Edition. Paris, UNESCO. IOC Technical Series, 85. http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=category&id=1142&Itemid=2433 (diakses 15 September 2022).
- Jiménez, C., 2010. Software para determinación de ocurrencia de maremotos. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú.*, 104, pp. 25–31.
- Jiménez, C., Carbonel, C. & Rojas, J., 2018. Numerical Procedure to Forecast the Tsunami Parameters from a Database of Pre-Simulated Seismic Unit Sources. *Pure Appl. Geophys.* 175, pp. 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, pp. 243–273.
- Kubisch, S., J. Guth, S. Keller, M. T. Bull, L. Keller, A. Ch. Braun, 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, 101462, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101462>.
- Lange, D., Tilmann, F., Henstock, T., Rietbrock, A., Natawidjaja, D., and Kopp, H., 2018. Structure of the central Sumatran subduction zone revealed by local earthquake travel-time

- tomography using an amphibious network, *Solid Earth*, 9, pp. 1035–1049, <https://doi.org/10.5194/se-9-1035-2018>.
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Nettles, M., Ward, S. N., Aster, R. C., . . . Sipkin, S., 2005. The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004. *Science*, 308, pp. 1127–1132.
- Lavigne, F., Paris, R., Leone, F., Gaillard, J.C., Morin, J., 2013. Indian Ocean Tsunami, 2004. In: Bobrowsky, P.T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_192.
- Lindell, M.K., Lu, J.-C., Prater, C.S., 2005. Household decision making and evacuation in response to hurricane Lili. *Nat. Hazards Rev.*, 6 (4), pp. 171–179.
- Lindell, M.K., Murray-Tuite, P., Wolshon, B., Baker, E.J., 2019. Large-Scale Evacuation: The Analysis, Modeling, and Management of Emergency Relocation from Hazardous Areas. *Routledge*, pp. 461-501.
- Mansinha, L., & Smylie, D. E., 1971. The Displacement Fields of Inclined Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), pp. 1433-1440.
- Mas, E., A. Suppasri, F. Imamura, S. Koshimura, 2012. Agent-based simulation of the 2011 Great East Japan earthquake/tsunami evacuation: an integrated model of tsunami inundation and evacuation, *J. Nat. Disaster Sci.* 34(1), pp. 41–57.
- Meltzner, A. J., K. Sieh, M. Abrams, D. C. Agnew, K. W. Hudnut, J. P. Avouac, and D. H. Natawidjaja, 2006. Uplift and subsidence associated with the great Aceh-Andaman earthquake of 2004. *J. Geophys. Res.*, 111, <https://doi.org/10.1029/2005JB003891>.
- Muhari, A., F. Imamura, A. Suppasri, E. Mas, 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), pp. 91-104.
- 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, pp. 1232-1234. <https://doi.org/10.1038/nature07374>.
- Natawidjaja, D. H., K. Sieh, M. Chlieh, J. Galetzka, B. W. Suwargadi, H. Cheng, R. L. Edwards, J. P. Avouac, and S. N. Ward, 2006. Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls. *J. Geophys. Res.*, 111, <https://doi.org/10.1029/2005JB004025>.
- Newcomb, K. R. and W. R. McCann, 1987. Seismic history and seismotectonics of the Sunda Arc., *J. Geophys. Res.*, 92, pp. 421-439, <https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00421>.
- Okada, Y., 1985. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), pp. 1135-1154.
- Péroche, M., F. Leone, R. Gutton, 2014. An accessibility graph-based model to optimize tsunami evacuation sites and routes in Martinique, France, *Adv. Geosci.* 38, pp. 1–8.
- Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen), 2017. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Cetakan Pertama ed.). Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- 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(16019). <https://doi.org/10.1038/ncomms16019>.
- Satake, K., & Kanamori, H., 1991. Use of tsunami waveforms for earthquake source study. *Natural Hazards*, 4(2-3), pp. 193-208. <https://doi.org/10.1007/BF00162787>.
- Shuto, N and Matsutomi, H., 1995. Field survey of the 1993 Hokkaido Nansei-Okai earthquake tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 144(3/4), pp. 649-663.
- Steinmetz, T. U. Raape, S. Tebmann, C. Strobl, M. Friedemann, T. Kukofka, T. Riedlinger, E. Mikusch, S. Dech, 2010. Tsunami early warning and decision support, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, pp. 1839–1850.
- Strunz, G. J. Post, K. Zosseder, S. Wegscheider, M. Muck, T. Riedlinger, H. Mehl, S. Dech, J. Birkman, N. Gebert, H. Harjono, H. Z. Anwar, Sumaryono, R. M. Khomaruddin, A. Muhari, 2011. Tsunami risk assessment in Indonesia, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, pp. 67–82.
- Syamsidik and Istiyanto D. C., 2013. Tsunami mitigation measures for tsunami prone small islands: lessons learned from the 2010 tsunami around the Mentawai Islands of Indonesia, *J. Earthquake and Tsunami*, 7(1) 1350002.
- Syamsidik, T. M. Rasyif, S. Kato, 2015. Development of accurate tsunami estimated times of arrival for tsunami-prone cities in Aceh, Indonesia,

- International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14 (4), pp. 403-410, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.006>.
- Synolakis, C. E., Okal, E. A., and Bernard, E. N., 2005. The Megatsunami of December 26 2004. *The Bridge*, 35(2), pp. 26–35.
- UN/ISDR, 2006. Global survey of early warning systems, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, pp. 56.
- Wang, X. (2009). User Manual for COMCOT Version 1.7 (First Draft). http://ceeserver.cee.cornell.edu/pllgrou/co/mcot_down.htm., (last accessed: 2015, April 17).
- Wang, H., A. Mostafizi, L.A. Cramer, D. Cox, H. Park, 2016. An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: decision-making and life safety, *Transp. Res. C: Emerg. Technol*, 64, pp. 86–100.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological of America*, 84(4), 9741002.
- Weller, O., D. Lange, F. Tilmann, D. Natawidjaja, A. Rietbrock, R. Collings, and L.Gregory, 2012. The structure of the Sumatran Fault revealed by local seismicity, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L01306, <https://doi.org/10.1029/2011GL050440>.
- Zhang, D. H., T. L. Yip, C. O. Ng, 2009. Predicting Tsunami arrivals: estimates and policy implications, *Mar. Policy* 333, 643650.

