



ASESMEN POTENSI TSUNAMI DAN KESIAPSIAGAAN MASYARAKAT PESISIR: STUDI KASUS TELUK ULEE LHEUE, ACEH BESAR

ASSESSMENT OF TSUNAMI POTENTIAL AND COASTAL COMMUNITY PREPAREDNESS: CASE STUDY OF ULEE LHEUE BAY, ACEH BESAR

Benazir¹⁾*, Syamsidik²⁾, Yunita Idris²⁾

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

²⁾ Tsunami and Disaster Management Research Center, Universitas Syiah Kuala
Jl. Hamzah Fansuri No.8, Kopelma Darussalam, Kota Banda Aceh, Indonesia

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

Accepted: ; Revised: ; Approved:

ABSTRACT

Western Sumatra's oceans feature relatively high-intensity tectonic activity, which could trigger a tsunami. The 2004 Indian Ocean Tsunami, which devastated the coasts of Aceh and Nias, revealed that the event was a mega-hazard category. Following the disaster, a new era in the development of tsunami mitigation throughout the archipelago began. Nonetheless, given the impact of the two tsunamis that occurred at the end of 2018, achieving mitigation within 17 years poses a unique challenge and high priority. The relationship between tsunami-prone areas and community preparedness has become a crucial factor in achieving regional disaster resilience. The objective of this research is to provide a regional assessment of tsunamis risk as well as community preparedness for future tsunami. The coast of Teluk Ulee Lheue, Aceh Besar, was chosen as the location for the assessment as a role model. The research method consists of tsunami mathematical modeling considering the impact caused by the magnitude of earthquakes 8.2, 9.15, and 9.2. The Nonlinear Shallow Water Equation (NSWE) model was used in the simulation, which was discretized using the explicit leap-frog Finite Difference Method. Field activities were included not only to collect topography and land use data but also to gather information and community response. The data was provided directly from the local community through in-depth interviews using a questionnaire. The findings of this study reveal that the consequences of the tsunami inundation remain quite considerable, even for a smaller-scale earthquake than the previous 2004 event. In general, the degree of community preparedness seems to be quite high, especially in terms of tsunami awareness. An improvement in disaster emergencies is required, specifically in the household sector. However, with a high degree of community preparedness, it would be essential to carry out individual evacuations rapidly.

Keywords: tsunami hydrodynamics, numerical simulation, run-up, community preparedness, environmental social

ABSTRAK

Perairan barat Sumatera memiliki aktivitas tektonik dengan intensitas yang relatif tinggi yang merupakan zona megathrust sebagai sumber pemicu tsunami. Peristiwa Tsunami Samudera Hindia 2004 yang meluluhlantakkan pesisir Aceh dan Nias telah membuktikan bahwa bencana ini termasuk kategori mega-hazard. Pasca-kejadian tersebut merupakan era baru dalam pengembangan mitigasi tsunami di Nusantara. Meskipun demikian implementasi mitigasi dalam kurun waktu 17 tahun ini masih membutuhkan perhatian dan prioritas utama jika ditinjau dari dampak dua kejadian tsunami di akhir 2018 lalu. Hubungan antara wilayah yang rentan tsunami dan kesiapsiagaan masyarakatnya menjadi parameter penting dalam mewujudkan ketahanan wilayah terhadap bencana. Tujuan penelitian ini adalah melakukan asesmen kewilayahan terhadap potensi tsunami dan kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi tsunami di masa mendatang. Lokasi tinjauan sebagai role model ditentukan untuk pesisir pantai Teluk Ulee Lheue, Aceh Besar. Metode penelitian terdiri pemodelan matematik tsunami dengan variasi tsunami dibangkitkan oleh gempa 8.2 Mw, 9.15 Mw, dan 9.2 Mw. Pemodelan dilaksanakan dengan Model Nonlinear Shallow Water Equation (NSWE) yang didiskritisasi dengan Metode Beda Hingga eksplisit leap-frog. Kegiatan lapangan selain untuk akuisisi data topografi dan tata guna lahan, juga untuk memperoleh informasi dan respon masyarakat terhadap tsunami. Data tersebut diperoleh secara langsung dari masyarakat setempat dengan wawancara mendalam dalam bentuk kuisioner. Hasil kajian menunjukkan bahwa dampak rendaman tsunami masih cukup besar bahkan untuk skala gempa yang lebih kecil dari kejadian 2004 sebelumnya. Tingkat kesiapsiagaan masyarakat secara umum sangat baik terutama tentang pengetahuan tsunami. Peningkatan terhadap darurat bencana diperlukan khususnya dalam lingkup rumah tangga. Meskipun demikian, dengan tingkat kesiapsiagaan masyarakat yang tinggi, akan memberikan respon yang cepat dalam melakukan evakuasi mandiri.

Kata Kunci: hidrodinamika tsunami, simulasi numerik, run-up, kesiapsiagaan masyarakat, sosial lingkungan.

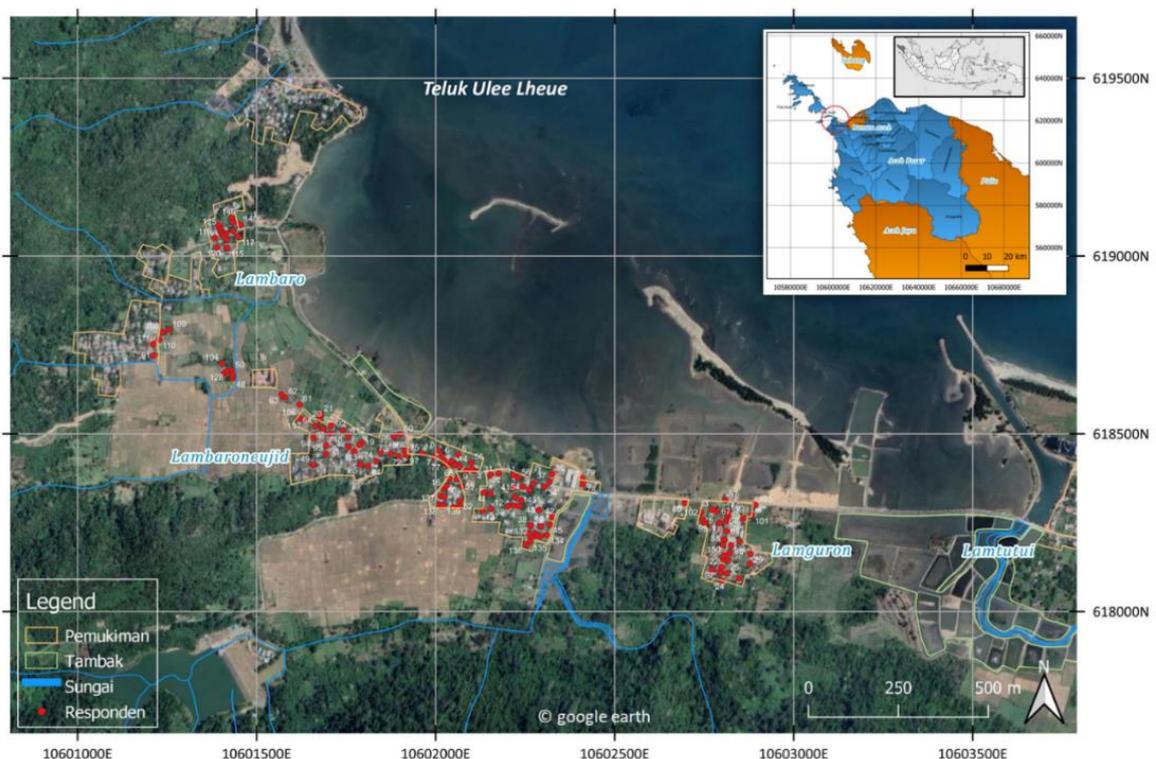
PENDAHULUAN

Tsunami Samudera Hindia 2004 yang dibangkitkan oleh 9.15 Mw telah meluluhlantakkan pesisir Aceh dan Nias dan beberapa negara lainnya. Dampak dari peristiwa ini membuktikan bahwa skala tsunami saat itu merupakan *mega-hazard* (Synolakis dkk, 2005). Pasca bencana tersebut merupakan era baru dalam pengembangan mitigasi tsunami di Nusantara baik regulasi dalam penanggulangan bencana maupun implementasi teknologi sebagai perwujudan pengembangan mitigasi tsunami. Meskipun demikian, peningkatan sistem mitigasi dalam kurun waktu 17 tahun ini masih membutuhkan perhatian dan prioritas utama jika ditinjau dari dampak dua kejadian tsunami di akhir 2018 lalu, yaitu Tsunami Palu-Donggala dan Tsunami Anak Karakatau. Dibalik rentannya Indonesia sebagai zona berpotensi tsunami yang membutuhkan pembangunan mitigasi yang memadai, di sisi lain justru Indonesia sebagai negara berkembang di mana masih sangat terbatas dari segi alokasi anggaran dalam membangun sistem mitigasi seperti negara maju.

Instalasi bangunan mitigasi di pesisir seperti *seawall* adalah bentuk penanganan bersifat *hard-structure* yang membutuhkan pendanaan relatif besar. Selain itu juga perlu ditinjau dari aspek sosial dan lingkungan terhadap pelaksanaan fisik konstruksi tersebut. Alternatif mitigasi lainnya adalah berupa *soft-structure* dengan pertimbangan adaptasi lingkungan dan tatanan kehidupan sosial setempat. Tipikal sistem

mitigasi ini sangat ditentukan oleh kondisi lapangan di area tinjauan serta kearifan masyarakat lokal. Upaya mitigasi jenis ini bisa dilakukan dengan penanaman vegetasi sepanjang pantai sebagai *buffer zone*, membangun jalur evakuasi dengan menyesuaikan kondisi topografi setempat (ketersediaan dataran tinggi/bukit), adaptasi hunian masyarakat (misalkan rumah panggung) dan relokasi menjauhi sempadan pantai. Implementasi sistem alami ini kadang tidak efektif jika hanya diterapkan satu jenis penanganan. Maka bentuk upaya pengembangan mitigasi dapat dilakukan dengan kombinasi (*multi layer protections*). Hal ini tentu sangat dipengaruhi oleh ketersediaan lahan dan tatanan kehidupan sosial-lingkungan setempat.

Dasar konsep penelitian ini adalah pembelajaran dari beberapa kejadian tsunami sebelumnya di Indonesia yang masih banyak menimbulkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur daratan. Penerapan penelitian dengan studi kasus ini dapat merepresentasikan kondisi mitigasi saat ini yang sesuai dan kearifan lokal baik bagi masyarakat dan lingkungan, tentu akan menjadi nilai lebih sebagai masukan dalam pengembangan mitigasi tsunami di Indonesia. Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah melakukan asesmen terhadap dampak tsunami dari skala potensi gempa berdasarkan historis kejadian sebelumnya. Selanjutnya juga dipetakan tingkat kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi potensi tsunami mendatang di lokasi studi.



Gambar 1 Lokasi studi

Lokasi penelitian difokuskan di kawasan pantai Teluk Ulee Lheue Kecamatan Peukan Bada, Aceh Besar, Provinsi Aceh. Pemilihan lokasi tersebut berdasarkan pada rentannya kejadian tsunami pada lokasi tersebut baik secara historis tsunami di masa lalu dan potensi dari asesmen tatanan tektonik di Sumudera Hindia. Ditambah lagi pasca Tsunami 2004, belum adanya implementasi upaya mitigasi fisik kecuali dalam bentuk sosialisasi dan rambu evakuasi (Syamsidik dkk, 2019). Mengacu pada sejarah berdasarkan kajian paleo-tsunami dan arkeologi, tsunami yang melanda Aceh merupakan kejadian berulang yang terjadi dalam siklus tertentu (Monecke dkk, 2008; Rubin dkk, 2017; Daly dkk, 2019). Pusat Studi Gempa Nasional (PusGen) melakukan pemutakhiran gempa bumi yang berpotensi membangkitkan tsunami di mana untuk perairan barat Sumatera mencapai skala maksimum 9.2 Mw pada segmen Andaman-Aceh (PusGen, 2017). Dengan demikian didasari oleh rekaman sejarah dan tatanan tektonik di perairan Sumatera, kawasan Aceh masih rawan terhadap kedatangan tsunami di masa mendatang.

LOKASI STUDI

Lokasi studi penelitian ini terletak di pesisir pantai Teluk Ulee Lheue, Aceh Besar. Secara administrasi berada di *Gampong* (desa) Lam Guron, Lambaro Neujid, dan Lambaro. Ketiga *gampong* ini berada dalam Mukim Lam Pageu, Kecamatan Peukan Bada, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh. Lokasi studi diperlihatkan pada

Gambar 1 dengan lokasinya berhadapan langsung dengan laut terbuka. Mukim Lam Pageu ini terpilih menjadi lokasi studi dengan beberapa pertimbangan. Kawasan ini rentan terhadap serangan tsunami langsung, yaitu berdampak terhadap kejadian tsunami 2004 dan belum adanya sistem mitasi secara fisik yang di lapangan. Selain itu juga terdapat ruang terbuka untuk mendukung implementasi sistem mitigasi tsunami. Secara umum, mata pencaharian penduduk setempat adalah di sektor pertanian dan perikanan sebagai petani dan nelayan (BPS, 2020). Berdasarkan kejadian Tsunami 2004 yang melanda kawasan ini, tinggi tsunami tercatat sebesar 20 m dan 13.7 m di lereng bukit Gampong Lambaro Neujid (Lavigne dkk, 2009).

Kondisi topografi relatif datar dengan ketinggian 2-4 m di atas permukaan laut untuk kawasan daratan pantai. Kawasan pantai ini digunakan sebagai lahan perikanan dan pertanian berupa tambak dan sawah. Pemukiman sendiri juga berada di kawasan sempadan pantai dengan juga terdapat beberapa fasilitas umum seperti masjid dan musholla, pukesmas, dan sekolah. Sekitar 500 m menjauhi pantai, topografinya berubah lebih curam, yaitu keberadaan lereng bukit yang mengelilingi kawasan ini. Tampak udara kawasan studi diperlihatkan pada Gambar 2. Perspektif dari udara pada foto tersebut memperlihatkan juga kondisi tata ruang Mukim Lam Pageu setelah pemulihan dari dampak Tsunami Samudera Hindia pada 26 Desember 2004 yang terjadi 17 tahun yang lalu.



Gambar 2 Foto udara sebagian lokasi studi (Gampong Lambaro Neujid)

Dampak Tsunami Samudera Hindia 2004 telah memberikan banyak perubahan di kawasan pesisir Aceh seperti pada aspek garis pantai, tataguna lahan, pemukiman masyarakat, dan infrastruktur (Syamsidik dkk, 2019). Selain berdampak secara langsung pada sektor-sektor

tersebut, perubahan besar juga terjadi pada aspek kehidupan sosial masyarakat pesisir pasca-tsunami tersebut. Karakteristik tsunami yang melanda lokasi studi ini merupakan *mega hazard* dengan ketinggian tsunami berkisar 15-20 m di pesisir pantai (Lavigne dkk, 2009). Besarnya skala

gelombang yang tercatat tersebut dipengaruhi oleh jarak antara sumber pembangkitan dengan pesisir pantai Aceh yang relatif dekat, yaitu dikategorikan sebagai *near-field* tsunami. Dengan demikian, skala gelombang yang besar ini menimbulkan dampak kerusakan signifikan di daratan seperti pada sektor pertanian dan perikanan. Keberadaan *greenbelt* berupa mangrove di lokasi studi tidak banyak berperan dalam mereduksi Tsunami 2004 tersebut. Sebaliknya justru peran positif terjadi di pesisir India dan Srilanka, yaitu keberadaan hutan pantai mampu mereduksi kerusakan yang ditimbulkan oleh kedatangan tsunami yang sama dengan tingginya kurang dari 7 m (Griffin dkk, 2013).

Kerusakan pada sektor perikanan dan pertanian selanjutnya berdampak pada mata pencaharian masyarakat. Di pesisir Teluk Ulee Lheue, kerusakan signifikan terjadi cukup parah untuk areal tambak dan sawah di daratan pantai. Dari 149 ha areal tambak yang rusak, hanya 28 ha (19%) yang berhasil pulih di kawasan ini setelah 10 tahun tsunami (Fahmi dkk, 2017). Rendahnya laju pemulihan sektor perikanan tambak ini dikarenakan sebagian tambak mengalami kerusakan besar (erosi) dan juga faktor salinitas (Syamsidik dkk, 2015). Proses pemulihan pada sektor pertanian khususnya sawah berbanding terbalik dengan yang terjadi pada tambak. Dari 189 ha luas sawah sebelum tsunami, sebanyak 80% dari sawah ini telah pulih secara berangsur-angsur (Fahmi dkk, 2017). Data ini menunjukkan bahwa, sektor pertanian lebih dominan mengalami pemulihan dibandingkan dengan perikanan tambak. Hal ini mengindikasikan bahwa adanya perubahan mata pencaharian masyarakat setempat yang lebih dominan sebagai petani sawah pasca-tsunami melanda. Upaya mobilisasi perubahan mata pencaharian

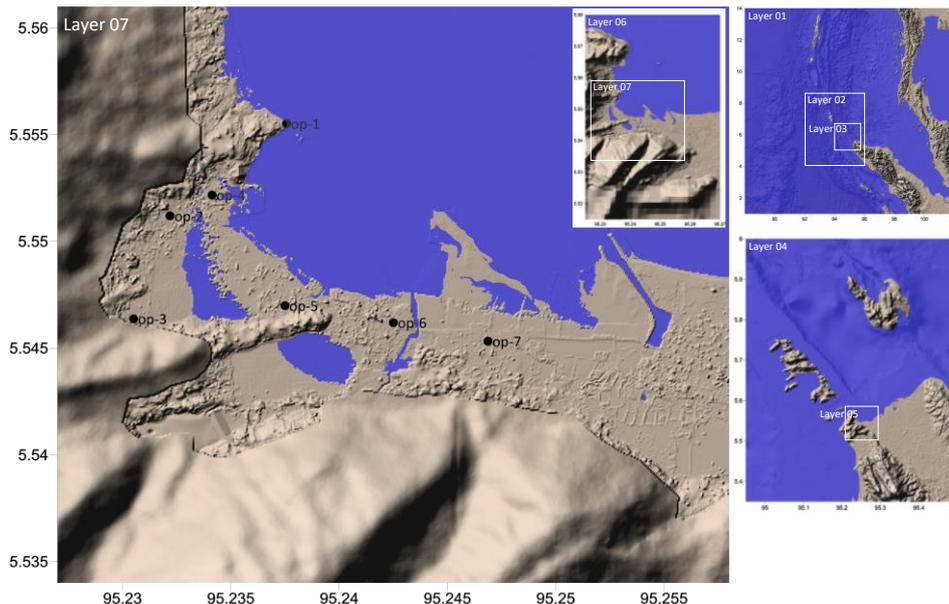
masyarakat setelah Tsunami 2004 adalah sebagai kondisi adaptasi pasca-bencana (Ismail dkk, 2018).

METODE

Lingkup metode penelitian ini diklasifikasikan dalam pengambilan data primer dan pemodelan matematik. Data primer terdiri data untuk masukan model dan gambaran lokasi studi. Data primer untuk kebutuhan simulasi diperoleh dengan melakukan pengukuran dan observasi lapangan pada lokasi studi. Inventarisasi dan investigasi dilakukan untuk melihat kondisi eksisting topografi dan penggunaan lahannya. Pemetaan elevasi kontur dilakukan untuk memperoleh data elevasi permukaan tanah sedangkan bathimetri diperoleh dari data sekunder. Pemetaan untuk tata guna lahan dilakukan dengan pengambilan foto udara menggunakan *drone*. Sedangkan kajian aspek lingkungan dan sosial diperlukan sebagai asesmen tingkat kesiapsiagaan masyarakat. Data ini diperoleh menggunakan edaran kuisioner dan wawancara langsung dengan masyarakat setempat.

Pemodelan Numerik Tsunami

Model tsunami Cornell Multigrid Coupled Tsunami (COMCOT) oleh Liu dkk (1994) digunakan dalam memodelkan pembangkitan, penjalaran, dan genangan tsunami di Teluk Ulee Lheue. Versi COMCOT terakhir yang dipublikasikan dapat dirujuk dalam Wang (2009). Model ini menyelesaikan bentuk nonlinear persamaan gelombang panjang bersama gesekan dasar dengan Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*) menggunakan skema eksplisit *leapfrog*.



Gambar 3 Tujuh layer domain komputasi

Tabel 1 Domain komputasi berdasarkan konfigurasi *nested grid*

Domain Komputasi	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6	Layer 7
Latitude (°)	1.00-14.00	4.00-9.00	5.00-6.75	5.35-6.00	5.51-5.60	5.528-5.585	5.534-5.561
Longitude (°)	88.00-102.00	92.00-96.00	94.00-95.75	94.95-95.50	95.21-95.30	95.225-95.270	95.227-95.258
Jumlah grid	841 x 781	717 x 897	924 x 1074	888 x 1047	432 x 432	654 x 942	1353 x 1176
Ukuran grid (m)	1110	370	123.33	41.11	13.7	4.57	1.52
Rasio	1	3	3	3	3	3	3
Time step (s)	1	1	0.5	0.25	0.25	0.08	0.0625
SWE	linear	linear	linear	linear	linear	linear	non-linear
Sumber data	Topex	Topex	Batnas	Batnas	Batnas-hasil pengukuran	Batnas-hasil pengukuran	Batnas-hasil pengukuran

Tabel 2 Skenario pemilihan skala gempa dan parameternya sebagai kondisi inisiasi model

Skenario	Mw	L (km)	W (km)	Total L (km)	Epicenter (°)		D (km)	Dis (m)	Strike (°)	Dip (°)	Tipe Fault	Ref			
					lon.	lat.									
1	8.2	216.77	56.49	216.77	94.162	5.670	10.0	5.9	329	8	single	Tursina dkk (2021)			
		200	150		94.400	3.030							14	323	15
		125	150		93.320	4.480							12.6	335	15
2	9.15	180	150	1155	92.870	5.510	10.0	15.1	340	15	multi-fault	Koshimura dkk (2009)			
		145	150		92.340	7.140							7	340	15
		125	150		91.880	8.470							7	345	15
		380	150		91.900	11.000							7	7	15
3	9.2	200	150	1300	94.400	3.030	10.0	15.80	336	15	multi-fault	Hypothetical Model			
		150	150		93.540	4.400							12.90	333	15
		205	150		92.970	5.630							7.78	340	15
		165	150		92.340	7.140							7.78	340	15
		180	150		91.890	8.470							7.78	345	15
400	150	91.900	11.000	15.56	9	15									

Domain komputasi numerik mencakup lokasi inisiasi pembangkitan tsunami, yaitu segmen patahan Aceh-Andaman dan lokasi studi yang berada di Aceh, Pulau Sumatera. Untuk mendapatkan detail penjalaran gelombang di daratan dan durasi komputasi, maka diimplementasikan konfigurasi *nested grid* (grid sisipan). Domain komputasi komputasi dikategorikan menjadi 7 *layer* seperti pada Gambar 3. Data bathimetri untuk *Layer 1* dan 2 bersumber dari Topex yang diunduh melalui https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi. Data Bathimetri Nasional (BATNAS) yang diunduh melalui <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/batnas> merupakan pembentuk untuk *Layer 3* dan 4. Sedangkan *Layer 5-7* adalah gabungan antara data BATNAS dan data topografi dari hasil pengukuran lapangan yang dilakukan. Informasi selengkapnya untuk keseluruhan domain komputasi ini ditabulasikan pada Tabel 1.

Kondisi awal untuk pembangkitan tsunami disimulasi menggunakan model dari Mansinha & Smylie (1971) dan Okada (1985). Penentuan skenario skala gempa ditentukan dengan penelusuran skala gempa dan sumber pembangkitan tsunami di masa lalu yang berdampak di lokasi studi. Tiga skenario skala gempa ditentukan untuk menyimulasikan potensi tsunami berdasarkan potensi dan sejarah tsunami sebelumnya, yaitu 8.2, 9.15, dan 9.2 Mw. Skala gempa 8.2 Mw untuk merepresentasikan tsunami dengan skala yang lebih kecil dibandingkan dengan kejadian terakhir. Penentuan skala tersebut berdasarkan ancaman tsunami terakhir

di perairan barat-selatan Aceh pada 11 April 2012. Pada hari yang sama terjadi dua gempa besar dengan guncangan pertama sebesar 8.6 Mw (330 km dari barat-barat daya episentrum kejadian 2004) dan 2 jam kemudian diikuti oleh gempa susulan dengan skala 8.2 Mw yang terletak sekitar 180 km selatan dari lokasi pertama (Delescluse dkk, 2012). Skenario ini dirujuk dari Tursina dkk (2021) di mana memproyeksikan genangan tsunami dan kenaikan permukaan laut di kawasan Banda Aceh, yaitu berada di sisi timur dari lokasi ini. Skenario kedua dengan kekuatan gempa 9.15 Mw merupakan rekonstruksi Tsunami 2004 yang lalu dengan parameter *rupture* yang diusulkan Koshimura dkk (2009). Selain kedua skenario tersebut, Pusat Studi Gempa Nasional melakukan pemutakhiran peta zonasi gempa pada 2017 lalu. Berdasarkan tabulasi data dari pengukuran geodetik, diperoleh *sliprate* 4 mm/tahun. *Rupture* Segmen Aceh-Andaman pada kejadian 2004 sepanjang 1300 km (Lay dkk., 2005). Dengan aplikasi persamaan Hanks & Kanamori (1979) serta Wells & Coppersmith (1994) diperoleh magnitude maksimum pada segmen ini sebesar 9.2 Mw. Dengan demikian, skenario ketiga ditentukan berdasarkan asesmen tersebut sebagai potensi tsunami dengan skala lebih besar (*hypotetic model*) melanda lokasi kajian. Selengkapnya skenario inisiasi tsunami akibat gempa dan parameternya ditabulasikan dalam Tabel 2.

Survey Tingkat Kesiapsiagaan Masyarakat

Pengetahuan dan respon masyarakat menjadi tinjauan penting dalam mengembangkan suatu

sistem mitigasi. Peranan masyarakat setempat tidak hanya dipertimbangkan sebagai objek akan tetapi mempunyai peran sebagai pelopor dalam melakukan evakuasi mandiri serta kelestarian sistem evakuasi pada generasi selanjutnya. Pada penelitian ini, asesmen pengetahuan masyarakat dilakukan dengan wawancara secara langsung dengan sejumlah responden di lapangan. Kegiatan asesmen ini dilakukan di tahap awal penelitian berlangsung sebagai pertimbangan penentuan lokasi studi di luar aspek teknis lainnya. Jumlah responden ditentukan berdasarkan Persamaan 1, yaitu penerapan Rumus Slovin.

$$n = \frac{N}{1+Ne^2} \quad (1)$$

Dengan n adalah jumlah responden, N adalah jumlah penduduk, dan e merupakan persen kelonggaran ketidakteelitian karena kesalahan penarikan sampel yang masih dapat ditolerir atau diinginkan. Mengacu pada BPS (2020), jumlah penduduk di lokasi studi, yaitu ketiga desa adalah 1390 jiwa (Tabel 3). Dengan ditentukan e sebesar 10%, maka diperoleh jumlah responden sejumlah 93 jiwa. Bertujuan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dan pertimbangan kerusakan data, maka total responden yang diasesmen pada penelitian ini adalah sebesar 150 jiwa.

Tabel 3 Jumlah penduduk di lokasi studi

No	Nama Desa	Pria	Wanita	Total (jiwa)
1	Lam Guron	81	64	145
2	Lam Badeuk	140	139	279
3	Lambaro Neujid	504	462	966
Total				1390

Sumber: BPS (2020)

Metode pengambilan data merupakan *probability sampling*, yaitu teknik *sampling* dengan setiap anggota populasi memiliki peluang sama dipilih menjadi sampel. Dengan kata lain, semua anggota tunggal dari populasi memiliki peluang tidak nol. Kriteria responden mencakup sebagai warga yang berdomisili di lokasi tinjauan baik warga asli atau pendatang (selama bukan tamu), usia minimal 17 tahun (remaja), tidak membedakan antara korban Tsunami 2004 atau bukan korban, tidak membedakan latar pendidikan dan pekerjaan, responden terdiri dari lelaki dan perempuan, dan setiap individu tidak mewakili *household* (dalam satu rumah diizinkan diwakili lebih dari 1 orang selama ketentuan sebelumnya memenuhi). Materi asesmen diklasifikasikan menjadi empat kelompok selain dari biodata singkat responden, yaitu:

1. Pengetahuan tentang bahaya tsunami (refleksi dari kejadian Tsunami Samudera Hindia 2004);
2. Rencana tanggap darurat yang diketahui dan diaplikasikan masyarakat setempat;

3. Pengetahuan tentang peringatan dini tsunami; dan
4. Pandangan tentang konsep mitigasi yang tepat di kawasan masyarakat setempat.

HASIL PENELITIAN

Potensi Tsunami

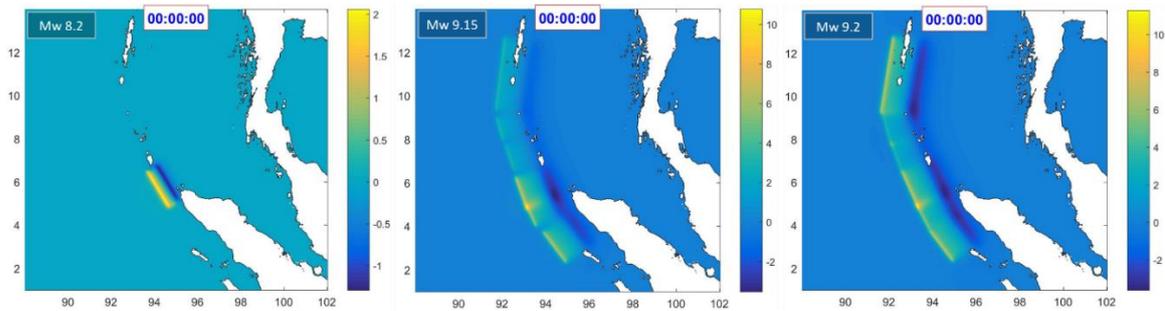
Pemodelan numerik tsunami dipicu gempa bumi, bentuk awal gelombang didekati dengan solusi analitik oleh Manshinha dan Smylie (1975) dan Okada (1985) di mana mempresentasikan gangguan permukaan air akibat bidang pergeseran di dasar laut untuk patahan yang cenderung *strike-slip* dan *dip-slip*. Bidang *rupture* yang di dekati dengan panjang dan lebar area yang patah mempengaruhi skala tsunami yang dibangkitkan. Pada kasus mega-tsunami seperti kejadian 2004, bidang *rupture* akan lebih mewakili kondisi di lapangan dengan melakukan pembagian pada *fault segment* (multi-fault) dibandingkan dengan *single fault*. Pada skenario 8.2 Mw, ditentukan *single fault* karena panjang patahan yang mengalami *rupture* hanya 217 km. Sebaliknya untuk kedua skenario lainnya dengan $Mw > 9$ (panjang *rupture* > 1000 km), dilakukan pendekatan dengan 6 segmen patahan yang mengalami *rupture*. Hasil pemodelan kondisi awal pada saat pembentukan tsunami untuk ketiga skenario diperlihatkan pada Gambar 4. Pada kondisi awal tersebut menghasilkan tinggi gelombang positif (warna kuning) dan negatif (warna biru) sebesar 2.06 m dan -1.30 m, 10.78 m dan -3.53 m, serta 11.29 m dan -3.62 m untuk skenario 8.2, 9.15, dan 9.2 Mw secara berturut-turut. Keseluruhan skenario tersebut juga memperlihatkan indikasi kedatangan tsunami didahului oleh penurunan muka air laut untuk perairan Sumatera. Banyak laporan dari saksi atau korban bahwa tsunami tiba di pantai dengan didahului oleh kemunduran air laut pada kejadian Tsunami Samudera Hindia 2004 di Aceh, Thailand, dan sekitarnya (Tsuji dkk, 2006; Satake, 2014).

Dampak rendaman tsunami di daratan diperlihatkan pada Gambar 5 untuk ketiga skenario. Pada magnitudo 8.2, genangan meluap ke seluruh desa di lokasi studi. Panjang rendaman di Desa Lambaro Neujid mencapai 400 m. Jauhnya capaian gelombang meskipun skala tsunaminya jauh lebih kecil dari kejadian sebelumnya dipengaruhi oleh kondisi topografi. Keberadaan lahan sawah di desa ini memberikan dampak genangan yang lebih luas dikarenakan elevasi sawah ini sendiri berada sedikit di bawah permukaan air laut (lihat Gambar 2). Pengaruh perubahan topografi dari datar ke curam berupa kaki bukit di belakang Desa Lambaro dan Lamguron, menjadikan panjang rendaman di kedua desa ini tidak sejauh capaian di Desa Lambaro Neujid. Capaian genangan lebih luas

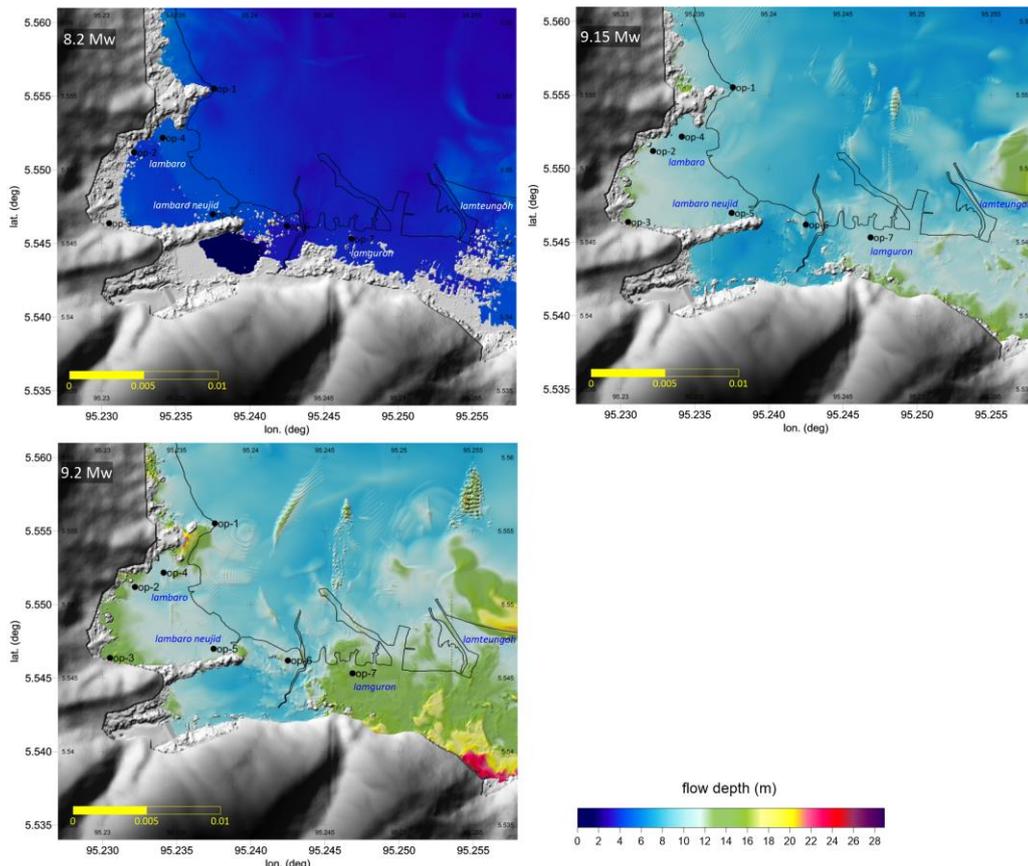
diperoleh lebih luas di Desa Lamteungoh dengan kondisinya yang terbuka ke perairan juga kondisi topografi yang relatif landai di kawasan ini. Selain itu, pengaruh rendaman tsunami dari timur (Peukan Bada) juga berpengaruh di desa ini.

Dampak tsunami menjadi jauh lebih besar untuk skenario dibangkitkan oleh gempa 9.15 Mw (skenario 2). Panjang rendaman di Lambaro Neujid mencapai 493 m dari garis pantai. Jarak genangan ini akan menjadi lebih besar jika tidak adanya bukit di belakang pemukiman tersebut seperti yang terjadi di area belakang Desa

Lamteungoh dengan capaian panjang rendamannya 675 m. Dampak area rendaman juga terlihat sangat kontras dibandingkan skenario sebelumnya untuk area timur Lambaro Neujid. Rendaman tsunami bahkan mencapai Embung Lambadeuk. Skala tsunami 9.15 adalah untuk merepresentasikan kekuatan tsunami pada Tahun 2004 dengan kondisi penggunaan lahan saat ini (17 tahun setelah tsunami). Bagaimanapun skenario ini tidak bertujuan untuk merekonstruksikan Tsunami 2004 dikarenakan kondisi topografi dan tata guna lahan yang berbeda.



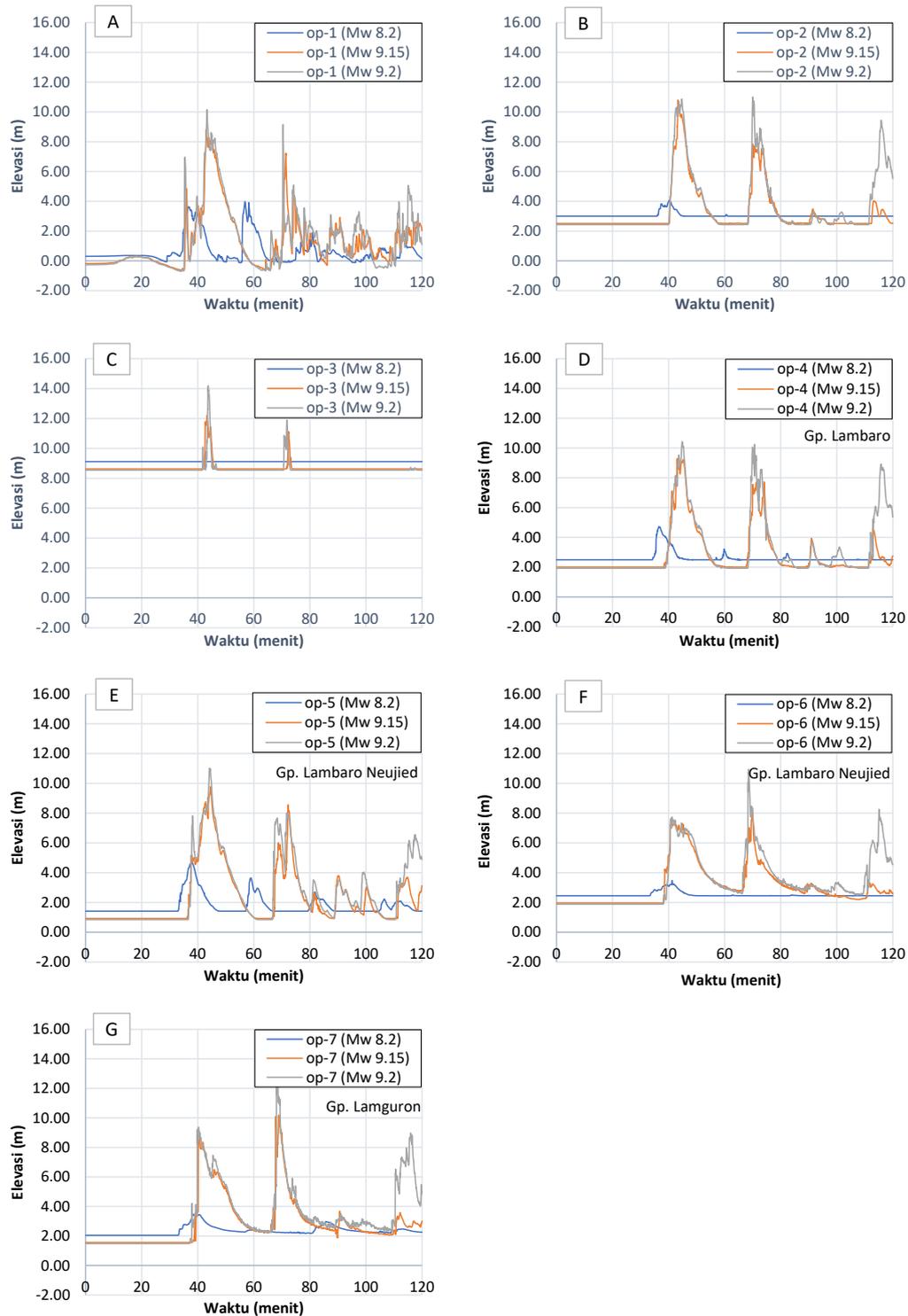
Gambar 4 Kondisi awal untuk ketiga skenario yang disimulasikan



Gambar 5 Kondisi awal untuk ketiga skenario yang disimulasikan

Pada skenario 3, skala gempanya 9.2 Mw tidak terlalu banyak berbeda terhadap skenario yang merepresentasikan skala gempa saat tsunami lalu yang diusulkan oleh Koshimura dkk (2009). Tinggi dan luasan genangan menghasilkan sedikit

lebih besar dibandingkan dengan skala 9.15 Mw. Perbandingan capaian genangan maksimum untuk skenario 9.15 dan 9.2 Mw diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Tinggi fluktuasi tsunami pada titik observasi op-1 sampai op-7

Pengamatan tinggi tsunami di daratan dilakukan beberapa lokasi (*observation point*, op) yang tersebar 7 titik di lokasi studi (disimbolkan titik hitam pada Gambar 5). Tiga stasiun pengamatan di pada Gambar 5 merupakan titik pengamatan yang sama dengan hasil *post-survey* yang dilakukan oleh Lavigne dkk (2009). Hasil *post-survey* tersebut mencatat bahwa kedalaman genangan sebesar 12.3 m, 20 m, dan 13.7 m untuk op-1, op-2, op-3 secara berturut-turut. Hasil pemodelan untuk kasus Tsunami 2004 diwakili

oleh garis jingga pada Gambar 6A-C memperlihatkan bahwa ada perbedaan elevasi genangan dengan data lapangan. Hal ini seperti dibahas sebelumnya bahwasanya skenario 2 (9.15 Mw) tidak dapat merepresentasikan sebagai model rekonstruksi Tsunami 2004 dikarenakan kondisi topografi dan tata guna lahan yang telah banyak mengalami perubahan. Selain itu, data bathimetri merupakan data sekunder dan data ini berperan banyak dalam menentukan karakteristik tsunami terutama di

perairan dangkal (termasuk pengaruh kekasaran dasar).

Error! Reference source not found. 6D-G merupakan hasil pengukuran genangan tsunami di setiap desa (*gampong*) di lokasi studi untuk keseluruhan skenario pemodelan. Pada gambar tersebut juga memperlihatkan bahwa terdapat dua gelombang utama yang tiba di daratan dengan selisih 20 menit. Lambaro yang terletak paling barat dilanda tsunami sekitar 3 m untuk skenario gempa kecil dan berkisar 7-8 m untuk skala gempa >9 Mw. Tsunami dengan kedalaman genangan 4.3 m (8.2 Mw) dan 9-10 m (>9 Mw) menggenangi Lambaro Neujid sisi barat. Sedangkan untuk sisi timur area tersebut, capaian gelombang berkisar 3 m untuk skala pembangkitan 8.2 Mw dan 6.3-8 m untuk skala gempa >9 Mw. Hal ini dipengaruhi oleh keberadaan bukit yang menghalangi gelombang dari barat di lokasi ini. Di Lamguron diperoleh 3.7 m genangan tsunami untuk skenario 1 dan berkisar 9-10 m untuk skenario 2 dan 3.

Pengetahuan dan Kesiapsiagaan Masyarakat

Kajian pengetahuan dan persepsi masyarakat ini sebagai upaya mengetahui dan mengevaluasi tingkat kesiapsiagaan masyarakat pesisir dalam menghadapi bencana tsunami. Lokasi kajian merupakan kawasan rawan terhadap tsunami dan pernah berdampak langsung dengan tsunami dua dekade sebelumnya. Pengalaman masyarakat pesisir tersebut akan memberikan peran yang cukup penting dalam mewujudkan kesiapsiagaan dan ketahanan masyarakat sebagai upaya mitigasi pada kejadian tsunami mendatang. Distribusi responden yang dilakukan wawancara dapat dilihat pada Gambar 1 sebelumnya (ditandai dengan titik merah). Parameter yang dievaluasi pada kajian ini adalah pengetahuan dasar masyarakat tentang fenomena tsunami dan dampaknya, rencana tanggap darurat sebagai upaya kesiapsiagaan menghadapi bencana, dan adaptasi sistem peringatan dini sebagai wujud aplikasi terhadap upaya mitigasi.

Hasil asesmen dengan parameter pengetahuan dasar tentang fenomena tsunami diperlihatkan pada Gambar 7. Masyarakat setempat memahami dengan baik bahwa tsunami dibangkitkan oleh gempa bumi. Meskipun, hanya 42% yang mengetahui bahwa tsunami juga dapat dibangkitkan oleh longsor di dasar laut. Faktor jarangya tsunami yang terjadi akibat longsor menjadikan kekurangan informasi bagi masyarakat. Berdasarkan catatan dalam rentang tahun 1666-1999, kejadian tsunami di Indonesia dibangkitkan oleh gempa bumi (90%), diikuti oleh akibat letusan gunung api sebanyak 8% dan hanya 1% yang dipicu oleh longsor (Latief dkk, 2000). Kejadian tsunami yang melanda pesisir Selat Sunda kurang dari 3 tahun lalu, juga tidak menjadi perhatian khusus bagi sebagian

masyarakat setempat. Bagaimanapun, pengalaman mengalami bencana merupakan ingatan dan juga pengetahuan berharga bagi masyarakat. Setelah proses pembangkitan akibat gempa, sebagian besar masyarakat memiliki pemahaman bahwa setelah gempa akan diikuti surutnya air laut sebagai tanda akan kedatangan tsunami (88%). Pengalaman kejadian Tsunami 2004 menjadi dasar pengetahuan bagi masyarakat bahwa fenomena tsunami akan selalu diikuti oleh surutnya air laut terlebih dahulu. Meskipun pada kenyataannya tidak semua kejadian tsunami (baik dipicu gempa atau non-gempa) akan didahului oleh fenomena surutnya air laut seperti pada kasus Tsunami Mentawai 2010. Penanda kedatangan tsunami lainnya seperti suara gemuruh dari arah laut sebelum tsunami membanjiri daratan juga diketahui oleh masyarakat (85%) dan perubahan perilaku dari hewan sebesar 52%.

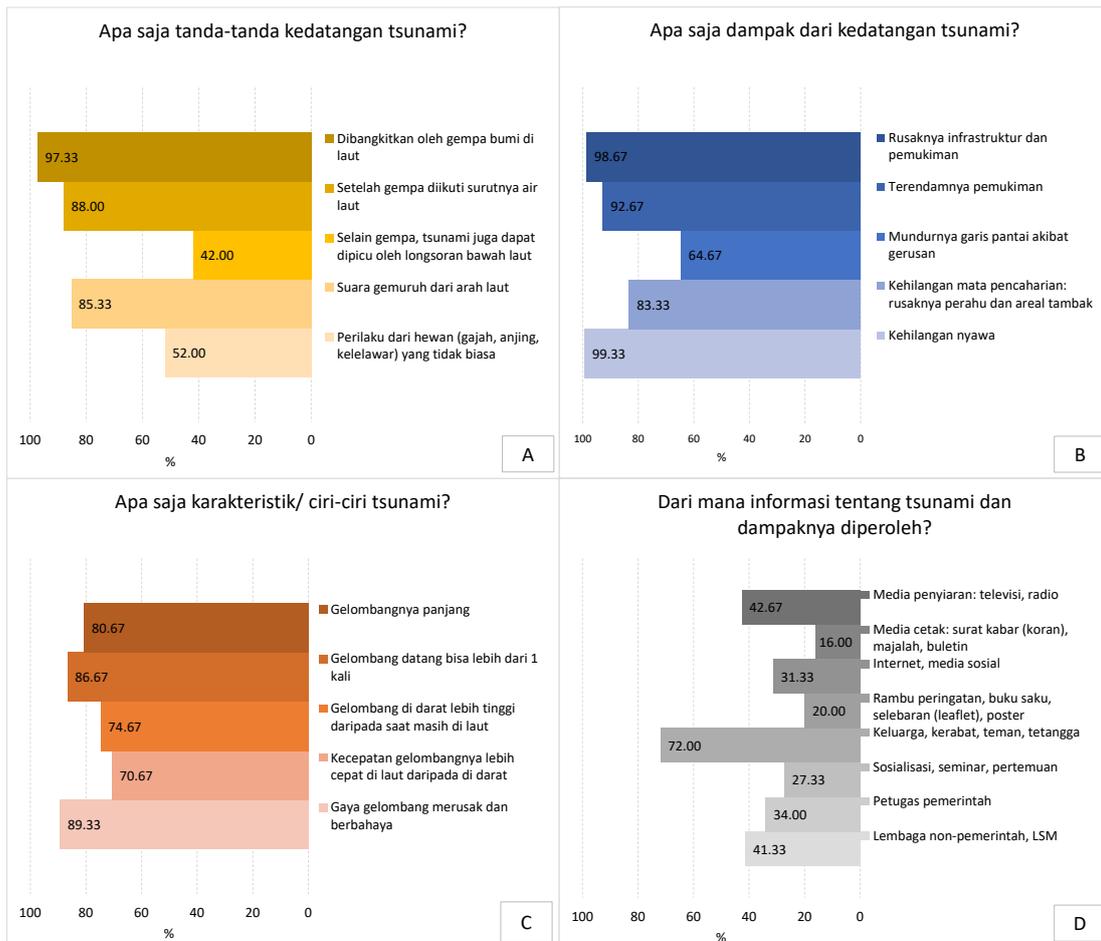
Masyarakat mengetahui dengan pasti bahwa dampak tsunami menyebabkan kehilangan nyawa, kerusakan pada pemukiman dan infrastruktur lainnya, dan kehilangan mata pencaharian. Dahsyatnya kejadian tsunami di masa lalu membekas diingatan masyarakat, terutama responden yang menjadi korban tsunami secara langsung baik kehilangan anggota keluarga maupun kerugian materi. Sejumlah 75.33% atau 113 responden dari 150 yang diwawancarai sebagai responden pada kajian ini merupakan korban Tsunami Samudera Hindia 2004. Sedangkan pengetahuan terhadap kemunduran garis pantai dikarenakan gerusan akibat tsunami hanya dipahami sebagian masyarakat (64.67%). Proses pemulihan garis pantai Teluk Ulee Lheue cukup baik setelah 17 tahun. Saat ini kondisi pemulihan yang belum sepenuhnya berhasil adalah pada lahan-lahan tambak yang sudah ditelantarkan. Generasi muda yang menjadi responden tidak terlalu menyadari perubahan garis pantai yang terjadi setelah dilanda tsunami. Pemantauan tahapan proses pemulihan garis pantai di lokasi studi dapat dirujuk dalam Syamsidik dkk (2015).

Masyarakat memiliki pengetahuan yang cukup baik untuk karakteristik tsunami, yaitu berkisar 75-89%. Sebagian mereka setuju bahwa tsunami merupakan gelombang panjang, gelombang bisa tiba lebih dari satu kali, tinggi gelombang jauh lebih besar ketika tiba di darat dibandingkan saat di laut, kecepatan gelombang lebih cepat di laut daripada saat tiba di daratan, dan gaya yang dibawa tsunami sangat merusak dan berbahaya.

Sumber informasi masyarakat tentang tsunami Sebagian besar (72%) diperoleh dari interaksi antar anggota keluarga, kerabat, teman, dan tetangga. Faktor ini tidak terlepas dari budaya masyarakat setempat dengan kebiasaan saling berkumpul dan berdiskusi di warung kopi dan tempat umum lainnya. Media informasi seperti

televisi dan radio juga berperan dalam menambah pengetahuan masyarakat (42.67%). Sosialisasi yang dilakukan oleh lembaga-lembaga non-pemerintah ataupun Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) juga berdampak terhadap pengetahuan masyarakat setempat. Selain itu, penyampaian informasi juga diterima oleh masyarakat dari peran sosialisasi pemerintah, media cetak, dan interaksi dengan internet serta media sosial. Dewasa ini, perkembangan media sosial berkembang cukup pesat dan diminati oleh kalangan masyarakat sebagai media penyampaian informasi. Respon masyarakat hanya sekitar 31% yang mengakses informasi

terkait bencana melalui media sosial dipengaruhi oleh lintas generasi sebagai responden. Media sosial mempunyai potensi yang cukup besar dalam penyebarluasan kondisi bencana baik informasi saat bencana terjadi atau sebagai penyampaian pembelajaran dari kejadian bencana yang terjadi (Simon dkk, 2015). Namun demikian, potensi terjadinya kesalahan informasi juga mungkin terjadi (Peary dkk, 2012). Di lapangan juga ditemukan bahwa pertemuan atau seminar yang melibatkan masyarakat juga berperan positif dalam menambah pengetahuan seperti forum hilirisasi penelitian oleh beberapa peneliti tsunami yang telah dilakukan di lapangan.



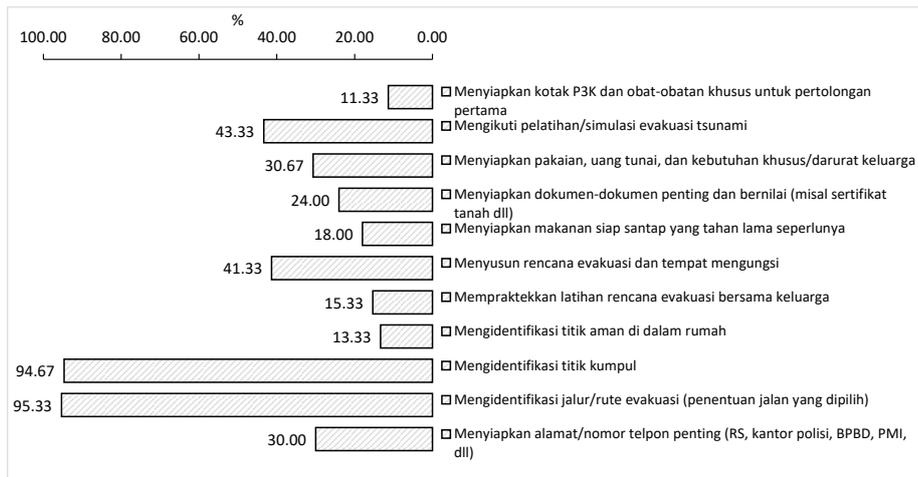
Gambar 7 Hasil asesmen tentang pengetahuan umum bencana tsunami

Bentuk rencana tanggap darurat sebagai upaya kesiapsiagaan masyarakat terhadap ancaman kedatangan tsunami di masa mendatang diperlihatkan pada Gambar 8. Berkisar 95% masyarakat telah mengidentifikasi titik kumpul dan jalur/rute evakuasi yang digunakan saat bencana terjadi. Di kawasan studi terdapat rambu-rambu evakuasi yang cukup mudah dikenali dan dipahami oleh. Upaya meningkatkan kesiapsiagaan lainnya, sekitar 43.33% dan 41.33% masyarakat ikut mengikuti pelatihan atau simulasi evakuasi (tsunami *drill*) dan telah menyusun rencana evakuasi dan lokasi pengungsian. Masyarakat juga menyiapkan kebutuhan-kebutuhan yang diperlukan selama

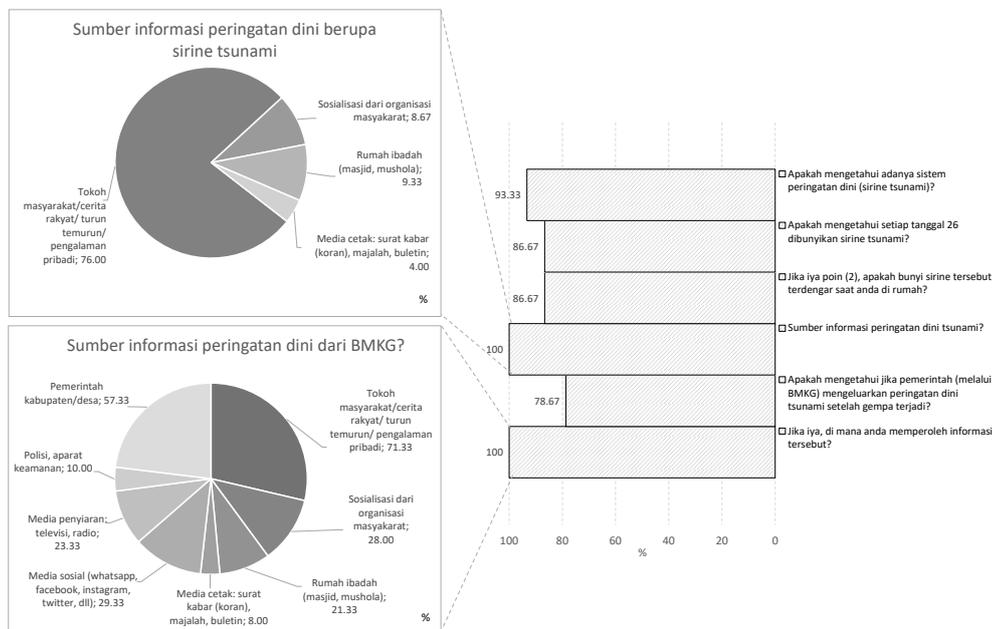
keadaan darurat terjadi seperti pakaian, uang tunai, nomor telepon penting, serta dokumen-dokumen penting (24-30%). Namun hanya sebagian kecil masyarakat (kurang dari 15%) yang menerapkan protokol darurat bencana dalam lingkup rumah tangga seperti menyiapkan kotak P3K atau obat-obat darurat, mengidentifikasi titik aman di dalam rumah, dan mempraktekkan latihan rencana evakuasi bersama keluarga. Rendahnya kesadaran membangun sikap kewaspadaan di lingkup rumah tangga menjadi perhatian khusus. Waktu evakuasi yang cukup singkat saat bencana terjadi menjadikan tingkat keberhasilan mitigasi tergantung dari respon cepat masyarakat dalam

melakukan evakuasi mandiri. Dengan demikian, keberhasilan menyelamatkan diri ini tergantung dari perencanaan dengan berbagai skenario (waktu terjadi bencana, anggota keluarga yang

berada di rumah saat bencana terjadi dan lainnya), latihan evakuasi yang dilakukan bersama anggota keluarga.



Gambar 8 Hasil asesmen tentang rencana tanggap darurat



Gambar 9 Hasil asesmen tentang respon masyarakat terhadap peringatan dini

Pengetahuan masyarakat setempat terhadap peringatan dini diperlihatkan pada Gambar 9. Parameter peringatan dini ini merepresentasikan tingkat pengetahuan masyarakat terhadap keberadaan sistem peringatan dini yang ada. Pasca-tsunami 2004, di sebagai wilayah Aceh sendiri telah diinstalasi sirine tsunami sebagai sistem peringatan dini tsunami selain yang dikeluarkan pemerintah melalui Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Sebagian besar masyarakat mengenal sirine tsunami tersebut (93.33%) dan juga mengetahui bahwa sirine tersebut dibunyikan setiap tanggal 26 dan terdengar ke sampai ke rumah masyarakat (86.67%). Data ini menunjukkan bahwa di luar adanya masyarakat yang belum mengetahui keberadaan sirene

tsunami (16.67%) tetapi juga terdapatnya masyarakat yang hanya mengetahui keberadaan sirine tanpa menyadari bahwa dibunyikan secara periodik bulanan (6.66%). Pengetahuan tentang peringatan dini dominan diperoleh dari tokoh masyarakat dan cerita antar masyarakat sendiri (76%) dibandingkan dari rumah ibadah (9.33%), sosialisasi dari organisasi masyarakat (8.67%), dan media cetak (4%). Masyarakat juga mengetahui adanya peringatan tsunami yang dikeluarkan oleh BMKG setelah gempa terjadi (78.67%). Informasi ini juga banyak diperoleh masyarakat dari tokoh dan cerita lintas masyarakat (71.33%), dan dari sosialisasi pemerintah kabupaten/desa (57.33%) serta sosialisasi dari organisasi masyarakat (28%).

PEMBAHASAN

Inventarisasi pengetahuan dan respon masyarakat terhadap tsunami menunjukkan tingkat kesiapsiagaan masyarakat. Tingkat kesiapsiagaan sangat baik pada parameter pengetahuan tentang tsunami. Sebagian besar masyarakat berpengalaman langsung dengan tsunami 17 tahun lalu dan sebagian lainnya berdampak tidak langsung. Pengetahuan yang diperoleh melalui pengalaman ini menjadi ingatan yang kuat yang dapat diimplementasikan sebagai modal dalam menghadapi bencana di masa depan. Pengetahuan tambahan terkait karakteristik tsunami perlu dibagikan kepada masyarakat untuk mengupayakan ketahanan masyarakat yang lebih baik. Pengetahuan telah berkembang di tengah masyarakat dengan sosialisasi-sosialisasi dan peran pemangku kepentingan serta tokoh masyarakat. Meskipun demikian, mendorong partisipasi dalam kegiatan penguatan bencana secara langsung akan memiliki nilai positif dalam mitigasi bencana (Witvorapong dkk, 2015).

Konsep rencana tanggap darurat yang sistematis berperan dalam merespon tindakan yang perlu dilakukan saat bencana terjadi dalam waktu terbatas. Parameter tanggap darurat ini masih rendah tingkat aplikasinya terutama di kalangan rumah tangga. Penerapan protokol dalam lingkup rumah tangga menjadi peran penting dalam melakukan evakuasi mandiri. Dimulai dengan respon apa yang perlu dilakukan setiap anggota keluarga saat gempa terjadi sampai dengan pembagian tugas antar anggota keluarga dalam melakukan evakuasi mandiri. Skenario-skenario dapat dimasukkan dalam tanggap darurat skala rumah tangga, misalkan dengan pertimbangan ada anggota keluarga yang berada di luar rumah saat bencana terjadi, penentuan titik kumpul, dan lain sebagainya.

Parameter peringatan dini menunjukkan tingkat kesiapsiagaan masyarakat dalam mengambil keputusan evakuasi. Keberadaan sirine tsunami merupakan perangkat dalam menegaskan waktu evakuasi menjadi terbatas di saat terjadinya kerusakan atau *human error* dalam pengoperasian (Oktari dkk, 2014). Kearifan lokal masyarakat menjadi salah satu kunci sukses dalam menyelamatkan diri terhadap tsunami. Salah satunya dibuktikan oleh masyarakat Simeuleu pada kejadian 2004 lalu di mana narasi dalam *Smong* yang berkelanjutan diceritakan lintas generasi, telah membangun kesadaran bencana dan dijadikan sebagai pengetahuan peringatan dini (Rahman dkk, 2018).

Lokasi studi yang berada di Kecamatan Peukan Bada, yaitu sebagian daratan pantai Teluk Ulee Lheue masih sangat rentan terhadap kedatangan tsunami. Hasil simulasi yang dibahas sebelumnya menunjukkan panjang rendaman di Mukim Lampageu tersebut mencapai 1 km ke

daratan. Pada skala gempa yang kecil dari kejadian 2004, tinggi tsunami di kawasan ini berkisar 3-4 m dan rayapannya mencapai 500 m menuju pemukiman. Dengan demikian, selain penguatan dalam sektor kesiapsiagaan masyarakat perlu didukung dengan implementasi sistem mitigasi terintegrasi dengan lingkungan di kawasan tersebut. Keberadaan sistem mitigasi harapannya memberikan waktu tambahan kepada masyarakat dalam melakukan evakuasi mandiri.

Pengembangan konsep mitigasi di kawasan pesisir Teluk Ulee Lheue perlu memperhatikan aspek sosial masyarakat dan kondisi lingkungan kawasan. Selain itu, konsep mitigasi harus saling terintegrasi dengan sistem mitigasi yang telah ada, yaitu jalur evakuasi. Keberadaan lahan tambak yang rusak akibat tsunami sebelumnya di garis pantai saat ini dapat dimanfaatkan sebagai *buffer zone*. Zona penyangga ini berupa vegetasi pantai yang ditanam sepanjang pantai. Jenis vegetasi yang direkomendasikan adalah cemara laut dibandingkan dengan mangrove. Berdasarkan pengalaman, jenis mangrove banyak mengalami gagal tumbuh di lokasi ini (Syamsidik dkk, 2005). Spesies *Casuarina equisetifolia* (cemara laut) umumnya dapat tumbuh di pantai berpasir dengan dukungan debit sungai sekitar seperti di Lembah Geurute (Benazir dkk, 2017) dan di Teluk Pacitan (Muhari dkk, 2012). Karakteristik pantai tersebut juga terdapat di lokasi kajian, namun sebagian lahan tambak yang rusak pada 2004 lalu perlu direklamasi. Hal ini bertujuan untuk memberikan kesempatan pada vegetasi pantai untuk tumbuh dan berkembang dari serangan gelombang angin.

KESIMPULAN

Tingkat kesiapsiagaan masyarakat secara umum sangat baik terutama tentang pengetahuan tsunami. Peningkatan terhadap darurat bencana perlu ditingkatkan terutama dalam lingkup rumah tangga. Kajian potensi rendaman tsunami menunjukkan dampaknya masih cukup besar bahkan untuk skala gempa yang kurang dari kejadian 2004 sebelumnya. Peranan pendukung dari sistem mitigasi akan memberikan waktu tambahan bagi masyarakat dalam melakukan evakuasi mandiri dan mengurangi dampak tsunami ke daratan. Berdasarkan kondisi lingkungan, sosial budaya masyarakat, integrasi dengan sistem mitigasi yang ada, kawasan pantai dapat dikembangkan menjadi zona penyangga dengan vegetasi pantai. Studi tingkat keberhasilan konsep mitigasi ini diperlukan kajian lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset

dan Inovasi Nasional serta DRPM Universitas Syiah Kuala atas pendanaan hibah Penelitian Kompetitif Nasional skema Penelitian Dasar (SBK Riset Dasar) berdasarkan Surat Keputusan Nomor 25/UN11.2.1/PT.01.03/DPRM/2021 dan Perjanjian/Kontrak Nomor 154/SP2H/LT/DPRM/2021 dengan judul *Mitigasi Tsunami Berbasis Soft-Structure dengan Tinjauan Aspek Lingkungan dan Sosial*. Publikasi ini merupakan bagian dari luaran hibah penelitian tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Benazir, Triatmadja, R., Rahardjo, A. P. & Yuwono, N., 2017. Comparison of Methods for Simulating Tsunami Run-up Through Coastal Forests. *Science of Tsunami Hazards*, 36(3): 167-182.
- BPS, 2020. Kecamatan Peukan Bada dalam Angka 2020, ISSN 2407-5272, Badan Pusat Statistik Aceh Besar.
- Daly, P., Kerry Sieh, Tai Yew Seng, Edmund Edwards McKinnon, Andrew C. Parnell, Ardiansyah, R. Michael Feener, Nazli Ismail, Nizamuddin, Jędrzej Majewski, 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), 11679-11686; DOI: 10.1073/pnas.1902241116
- Delescluse, M., Chamot-Rooke, N., Cattin, R. et al. April 2012 intra-oceanic seismicity off Sumatra boosted by the Banda-Aceh megathrust. *Nature* 490, 240–244 (2012). <https://doi.org/10.1038/nature11520>
- Fahmi, M., Syamsidik, E. Fatimah, and M. Al'Ala, 2017. "A Decade Process of Coastal Land Use Changes in Peukan Bada-Aceh after the 2004 Indian Ocean Tsunami." *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 56. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/56/1/012012>.
- Griffin, C., David Ellis, Sara Beavis, and Doracie Zoleta-Nantes. 2013. Coastal Resources, Livelihoods and the 2004 Indian Ocean Tsunami in Aceh, Indonesia. *Ocean and Coastal Management*, 71: 176–86. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.10.017>.
- Hanks, T. C. & Kanamori, H., 1979. A Moment Magnitude Scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5): 2348-2350.
- Ismail, N., Kenji Okazaki, Chiho Ochiai, Glenn Fernandez, 2018. Livelihood changes in Banda Aceh, Indonesia after the 2004 Indian Ocean Tsunami. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28: 439–449.
- 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: 243-273.
- Latief, H., Puspito, N. T. & Imamura, F., 2000. Tsunami Catalog and Zones in Indonesia. *Natural Disaster Science*, 22: 25-43.
- Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, M. Nettles, S. N. Ward, R. C. Aster, S. L. Beck, S. L. Bilek, M. R. Brudzinski, R. Butler, H. R. DeShon, G. Ekström, K. Satake, and S. Sipkin, 2005. The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004, *Science*, 308: 1127–1132.
- Muhari, A., Muck, M., Diposaptono, S. & Spahn, H., 2012. Tsunami Mitigation Planning in Pacitan, Indonesia: A Review of Existing Effort and Ways Ahead. *Science of Tsunami Hazard*, 11: 244-267.
- Lavigne et al., 2009. Reconstruction of Tsunami Inland Propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, Indonesia, through Field Investigations. *Pure appl. geophys.*, 166, 259–281, DOI 10.1007/s00024-008-0431-8.
- Liu, P. L. F., Y. S. Cho, S. B. Yoon, and S. N. Seo., 1994. Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii, in *Recent Developments in Tsunami Research*, edited by M. I. El-Sabh, pp. 99–115, Kluwer Acad., Dordrecht, Netherlands.
- Mansinha, L. & Smylie, D. E., 1971. The Displacement Fields of Inclined Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5): 1433-1440.
- Monecke, K., Willi Finger, David Klarer, Widjo Kongko, Brian G. McAdo, Andrew L. Moore, & Sam U. Sudrajat, 2008. A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. *Nature*, 455: 1232-1234, DOI:10.1038/nature07374.
- Okada, Y., 1985. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Sapce. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135-1154.

- Oktari, R.S., Munadi, K. and Ridha, M., 2014. Effectiveness of Dissemination and Communication Element of Tsunami Early Warning System in Aceh. *Procedia Economics and Finance*, 18: 136-142.
- Peary, Brett D. M., Rajib Shaw, Yukiko Takeuchi, 2012. Utilization of Social Media in the East Japan Earthquake and Tsunami and its Effectiveness, *Journal of Natural Disaster Science*, 34 (1): 3-18.
- 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.
- Rahman, A., Sakurai, A. and Munadi, K., 2018. The analysis of the development of the Smong story on the 1907 and 2004 Indian Ocean tsunamis in strengthening the Simeulue island community's resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 29: 13-23.
- Rubin, C. M., Benjamin P. Horton, Kerry Sieh, Jessica E. Pilarczyk, Patrick Daly, Nazli Ismail, & Andrew C. Parnell, 2017. Highly variable recurrence of tsunamis in the 7,400 years before the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nature Communications*, 8:16019, DOI: 10.1038/ncomms16019.
- Satake, K., 2014. Advances in Earthquake and Tsunami Sciences and Disaster Risk Reduction Since the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Geosci. Lett.* 1(15). <https://doi.org/10.1186/s40562-014-0015-7>.
- Simon, T., Avishay Goldberg, Bruria Adini, 2015. Socializing in emergencies—A review of the use of social media in emergency situations, *International Journal of Information Management*, 35(5): 609-619, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2015.07.001>.
- Syamsidik, Adhitya Iskandar, and Teuku Muhammad Rasyif, 2015. Progress of Coastal Line Rehabilitation After the Indian Ocean Tsunami Around Banda Aceh Coasts." In *Recovery from the Indian Ocean Tsunami: A Ten-Year Journey*, edited by R. Shaw, 175–89. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55117-1>.
- Syamsidik, Agus Nugroho, Rina Suryani Oktari, Mirza Fahmi, 2019. Aceh Pasca 15 Tahun Tsunami: Kilas Balik dan Proses Pemulihan. Tsunami and Disaster Research Center (TDMRC), Banda Aceh-Indonesia.
- 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.
- Syamsidik, Tursina, Anawat Suppasri, Musa Al ala, Mumtaz Luthfi, and Louise K. Comfort, 2019. Assessing the Tsunami Mitigation Effectiveness of the Planned Banda Aceh Outer Ring Road (BORR), Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19 (1): 299–312. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-299-2019>.
- Synolakis, C., Okal, E. & Bernard, E., 2005. The Megatsunami of December 26, 2004. *The Bridge*, 35(2): 26-35.
- Tsuji, Y., Y. Namegaya, H. Matsumoto, S. Iwasaki, W. Kanbua, M. Sriwichai, and V. Meesuk, 2006. The 2004 Indian tsunami in Thailand: Surveyed runup heights and tide gauges records, *Earth Planets Space*, 58(2): 223 –232.
- Tursina, Syamsidik, S. Kato, and, M. Afifuddin, 2021. Coupling sea-level rise with tsunamis: Projected adverse impact of future tsunamis on Banda Aceh city, Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 55: 102084, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102084>.
- Wang, X., 2009. User Manual for COMCOT Version 1.7 (First Draft), Available from: http://ceeserver.cee.cornell.edu/pll-group/comcot_down.htm., Last accessed: 2015, April 17.
- 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): 974-1002.
- Witvorapong N, Muttarak R, Pothisiri W., (2015). Social Participation and Disaster Risk Reduction Behaviors in Tsunami Prone Areas. *PLoS ONE* 10(7): e01.

