



OSEANOLOGI DAN LIMNOLOGI DI INDONESIA

Print ISSN: 0125-9830 Online ISSN: 2477-328X

Nomor Akreditasi: 712/AU3/P2MI – LIPI/10/2015

<http://jurnal-oldi.or.id>



Validasi Potensi Tsunami Berdasarkan Estimasi Durasi Patahan dan Pemodelan Tsunami di Wilayah Barat Sumatra (Studi Kasus: Gempa Bumi Nias 2005 dan Mentawai 2010)

Validation of Potential Tsunami Based on Rupture Duration Estimation and Tsunami Modeling in the West Sumatran Region (Case Study: Nias 2005 and Mentawai 2010 Earthquakes)

Sayyidatul Khoiridah¹, Moh Ikhyaul Ibad², dan Wiko Setyonegoro³

^{1,2}Jurusan Fisika Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember

³Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG

Email: wiko.setyonegoro@bmkg.go.id

Submitted 4 February 2016. Reviewed 30 August 2016. Accepted 4 April 2017.

Abstrak

Penelitian ini dilakukan di wilayah barat Sumatra untuk mengetahui karakteristik gempa pembangkit tsunami melalui hasil estimasi durasi patahan dan pemodelan tsunami. Studi kasus dilakukan dari kejadian gempa bumi Nias 28 Maret 2005 dan Mentawai 25 Oktober 2010, yaitu dengan mengestimasi karakteristik potensi tsunami yang terjadi di wilayah barat Sumatra berdasarkan durasi patahan dan divalidasi dengan pemodelan tsunami. Metode untuk validasi potensi tsunami dilakukan dengan menganalisis sumber gempa bumi (*source modeling*), penjalaran gelombang tsunami (*ocean modeling*), dan ketinggian tsunami (*run-up* tsunami). Hasil estimasi penelitian menunjukkan durasi patahan gempa bumi Nias 2005 dan Mentawai 2010 lebih dari 50 detik. Hal ini menjelaskan kedua gempa bumi tersebut berpotensi tsunami. Hasil dari *source* model adalah propagasi tsunami pada menit ke 58 lebih 20 detik sudah menjalar ke beberapa daerah di dekat sumber gempa bumi Nias. Daerah terdampak tsunami di Nias meliputi Pulau Salaut, bagian barat laut Simeulue, bagian barat daya Simeulue, Pulau Babi, Pulau Bangkuru, Pulau Tuangku, Singkil, Sarangbaung, Pulau Asu, barat daya Lagundri Nias, dan barat laut Pulau Batu dengan kenaikan tertinggi berada di Pulau Babi, yaitu 13,80 m. Lebih lanjut, daerah terdampak tsunami di Mentawai meliputi Pantai Batimonga, Pantai Ghobi, Pantai Tumale, Pantai Pasangan, Pantai Sabeugunggung, Pantai Malacopa, dan Pantai Asahan dengan nilai *run-up* tertinggi berada di Pantai Malacopa, yaitu 8,17 m.

Kata kunci: durasi patahan, gempa bumi Mentawai dan Nias, pemodelan tsunami.

Abstract

This research was conducted in the earthquake areas in the West Sumatra to determine the characteristics of tsunami generation through estimation of rupture duration and modeling of tsunamis. The case studies were carried out at two incidents: earthquake in Nias on March 28, 2005 and in Mentawai on October 25, 2010. The purpose of this study was to estimate the characteristics of potential earthquake-triggering tsunamis in the western region of Sumatra based on the duration of rupture, which was then validated by a tsunami modeling. A method for validation was carried out by analyzing a potency of a

tsunami based on the earthquake source (source modeling), the propagation of the tsunami wave (ocean modeling), and the height of the tsunami (run-up tsunami). The results showed the duration of the earthquakes in Nias rupture (2005) and Mentawai rupture (2010) were more than 50 seconds, thus, both earthquakes promoted tsunami. The results of tsunami propagation revealed that the tsunami had spread to some areas near the source of the Nias earthquake after 58 minutes and 20 seconds. The area affected by the Nias tsunami included the Salaut island, a section at northwestern Simeulue, a section at southwestern Simeulue, Babi island, Bangkuru island, Tuangku island, Singkil, Sarangbaung, Asu island, southwestern Lagundri Nias, and Northwestern Batu island. The highest tsunami hit Babi island with the magnitude of 13.80 m. Moreover, the tsunami affected the wider areas in Mentawai including Batimonga beach, Ghobi beach, Tumale beach, Pasangan beach, Sabeugunggung beach, Malacopa beach, and Asahan beach with the highest value of run-up on Malacopa beach was 8.17 m.

Keywords: rupture duration, Mentawai and Nias earthquakes, tsunami modelling.

Pendahuluan

Indonesia berada di pertemuan tiga lempeng besar, yaitu Indo-Australia, Pasifik, dan Eurasia. Lempeng Eurasia relatif diam, sementara lempeng Pasifik bergerak ke arah Timur menekan lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara menekan lempeng Eurasia. Kejadian gempa bumi besar dan merusak umumnya terjadi di sepanjang pertemuan ketiga lempeng besar tersebut dan juga di jalur patahan-patahan aktif yang terbentuk di bagian interior lempeng Kepulauan Indonesia. Sebagian sumber gempa bumi tersebut berada di bawah laut, sehingga berpotensi tsunami (Natawidjaya 2007).

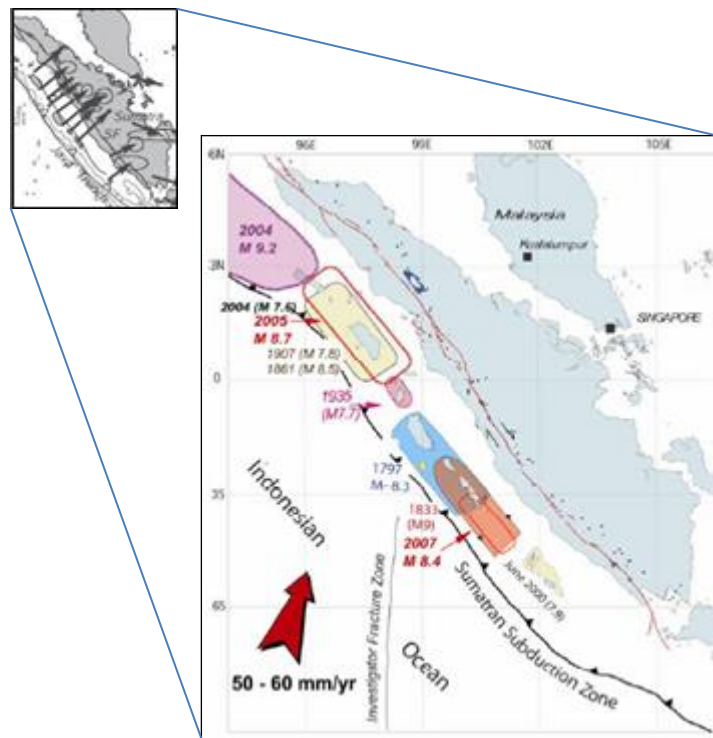
Pulau Sumatra merupakan salah satu wilayah tektonik aktif. Subduksi yang terjadi antara lempeng Indo-Australia terhadap Eurasia menyebabkan *oblique* konvergen muncul. *Oblique* konvergen dibagi menjadi dua komponen, yaitu komponen *dip-slip* yang terdapat di zona subduksi antara lempeng, dan komponen *strike-slip* di sesar besar Sumatra (Natawidjaya 2002). Zona subduksi Sumatra merupakan jalur gempa bumi di Indonesia yang paling banyak menyerap dan mengeluarkan energi gempa bumi dengan magnitudo $M_w \geq 8$ SR, sehingga berpotensi menimbulkan tsunami (Newcomb dan McCann 1987; Natawidjaya 2002). Salah satu segmen yang berada persis di atas zona *megathrust* (sumber gempa zona subduksi) dan pernah menimbulkan gempa bumi sampai membangkitkan tsunami adalah Nias dan Mentawai yang terletak di wilayah barat Sumatra (Natawidjaya 2007) (Gambar 1). Gempa bumi Nias yang mengakibatkan tsunami terjadi pada 28 Maret 2005 dengan magnitudo M_w 8,7 SR (Setyonegoro et al. 2015). Gempa tersebut merupakan gempa bumi terbesar kedua setelah gempa bumi Aceh-Andaman yang terjadi pada 26 Desember 2004

dengan magnitudo M_w 9,0 SR (Briggs et al. 2006; Cattin et al. 2009). Gempa bumi berikutnya yang membangkitkan tsunami berada di segmen Mentawai pada 25 Oktober 2010 dengan magnitudo M_w 7,8 SR pada kedalaman 20 km, dengan posisi kurang lebih 78 km barat daya Pagai Selatan, Mentawai – Sumatra Barat (Setyonegoro et al. 2012; USGS 2016).

Gempa Nias 2005 memakan korban jiwa hampir dua ribu orang dan menghancurkan banyak bangunan di sekitar Kota Gunung Sitoli dan Sinabang. Selain itu, gempa Nias juga mengakibatkan pengangkatan dan penurunan muka bumi antara 1 dan 3 m yang memberikan dampak kerusakan pada lingkungan. Pengangkatan muka bumi terjadi di sepanjang tepian pantai barat Nias dan di bagian selatan Simelue. Sebaliknya, penurunan terjadi di bagian barat, wilayah timur Simelue, Banyak, dan Nias (Natawidjaya 2007).

Gempa Mentawai tahun 2010 menimbulkan korban meninggal dunia sebanyak 286 jiwa, 252 orang hilang, dan 536 bangunan rusak (German-Indonesia Tsunami Survey Team 2010). Studi kasus yang dipilih dalam penelitian ini adalah gempa bumi Nias yang terjadi pada 28 Maret 2005 dan gempa bumi Mentawai yang terjadi pada 25 Oktober 2010 karena dampak yang diakibatkan oleh kedua gempa tersebut sangat besar. Selain itu, kedua gempa tersebut berada di wilayah lautan dan di zona subduksi, sehingga sangat berpotensi menimbulkan tsunami.

Dalam kurun 200 tahun terakhir, segmen Nias sudah mengalami empat kali bencana gempa bumi dan tsunami, yaitu tahun 1861 ($M \sim 8,5$), 1907 ($M \sim 7,4$), 2004 ($M \sim 9,2$), dan 2005 ($M \sim 8,7$). Gempa bumi sebelumnya yang memecahkan segmen (sumber gempa) yang sama dengan gempa 2005 adalah gempa bumi tahun 1861. Segmen Nias terakhir melepaskan simpanan



Gambar 1. Tektonik aktif Pulau Sumatra yang memengaruhi gempa bumi Nias (Bock dan Prawirodirdjo 2003; Natawidjaya 2007).

Figure 1. Active Tectonics of Sumatra that affect the Nias earthquake (Bock and Prawirodirdjo 2003; Natawidjaya 2007).

energinya sekitar 145 tahun yang lalu (Natawidjaya 2007), sedangkan segmen Mentawai pernah melepaskan energinya sebesar M_w 8,4 SR pada September 2007. Berdasarkan penghitungan energi yang tersimpan sampai September 2007, ternyata hanya kurang dari sepertiga energi yang terlepas dari total energi yang sudah terkumpul lagi sejak tahun 1797 dan 1833 (Newcomb dan McCann 1987). Dengan demikian, potensi kejadian gempa bumi dan tsunami masih ada (Bock dan Prawirodirdjo 2003). Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengantisipasi dan meminimalisasi kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa bumi dan tsunami yaitu melakukan perencanaan dan pemanfaatan sistem mitigasi bencana gempa bumi dan tsunami dengan kinerja yang baik. Dalam upaya tersebut, maka pemahaman tentang karakteristik gempa pembangkit tsunami (*tsunamigenic earthquake*) sangat diperlukan. Berdasarkan hal tersebut, maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik potensi tsunami, khususnya yang terjadi di wilayah barat Sumatra berdasarkan durasi patahan dan divalidasi dengan pemodelan tsunami yang terdiri dari pemodelan sumber gempa bumi sebagai pembangkit tsunami (*source modeling*), penjalaran gelombang tsunami (*ocean*

modeling), dan ketinggian tsunami (*run-up tsunami*).

Metodologi

Data Gempa Bumi dan Stasiun Penelitian

Data yang digunakan untuk mengestimasi durasi patahan pada gempa bumi Nias 28 Maret 2005 dan Mentawai 25 Oktober 2010 diambil dari *broad-band IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology)*. Adapun data kejadian gempa bumi dengan data stasiun yang digunakan ditunjukkan dalam Tabel 1 dan Tabel 2. Pemilihan stasiun didasarkan atas beberapa pertimbangan, yaitu memiliki *coverage* yang baik, yaitu mengelilingi episentrum dan *waveform broadband* komponen vertikal yang dihasilkan memiliki *noise* kecil. Untuk pemodelan tsunami digunakan data batimetri yang diunduh dari situs oseanografi dunia GEBCO NOAA (*the General of Bathymetry Chart of the Oceans*) dengan alamat www.ngdc.noaa.gov. Data batimetri yang digunakan yaitu data Etopo2 dengan grid data 2 menit atau sekitar 3,7 km dengan format ASCII XYZ.

Tabel 1. Stasiun gempa bumi Nias, 28 Maret 2005.

Table 1. Earthquake stations in Nias, March 28, 2005.

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Distance (°)	Elevation (m)
FURI	8,90	38,68	58,50	2570
KMI	25,12	102,74	23,66	1975
WRAB	-19,93	134,36	42,66	366
DGAR	-7,41	72,45	26,38	1
GUMO	13,59	144,87	48,58	170

Tabel 2. Stasiun pencatat gempa bumi Mentawai 25 Oktober 2010.

Table 2. Recording stations for Mentawai earthquake October 25, 2010.

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Distance (°)	Elevation (m)
KAPI	-5,01	119,75	19,65	300
CHTO	18,81	98,94	22,37	420
PALK	7,27	80,70	22,17	600
QIZ	19,03	109,84	24,51	240
MBWA	-21,16	119,73	25,98	190

Estimasi Durasi Patahan (T_{dur})

Algoritma yang digunakan untuk mengestimasi durasi patahan (T_{dur}) adalah (1) menyediakan seismogram komponen vertikal dalam format SAC sebagai *raw data* (Goldstein dan Snoke 2005), (2) menerapkan 4-pole dan filter *band-pass* Butterworth 5–20 Hz untuk mendapatkan seismogram rekaman kecepatan pada *high frequency* (HF) untuk masing-masing stasiun, (3) mengonversi data seismogram HF menjadi *velocity-squared envelopes* untuk mendapatkan *rmse* amplitudo yang berarti nilai eror terkecil dari seluruh nilai amplitudo, (4) melakukan *picking* atas *arrival time* gelombang P secara otomatis pada seismogram HF tersebut. Gelombang P adalah gelombang gempa bumi yang pertama kali tiba di stasiun pencatat (sensor) gempa bumi, (5) mengukur *delay* waktu setelah kedatangan gelombang P untuk 90% ($T^{0,9}$), 80% ($T^{0,8}$), 50% ($T^{0,5}$), dan 20% ($T^{0,2}$) dari nilai puncaknya, (6) menghitung durasi patahan untuk masing-masing stasiun dengan menggunakan persamaan (1) dan (2):

$$T_{dur} = (1-w)T^{0,9} + wT^{0,2} \dots\dots\dots(1)$$

$$w = [(T^{0,2} + T^{0,5}) / 2 - 20] / 40s \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

T_{dur} = Durasi patahan (s)

w = Konstanta

T^n = Waktu tunda (*delay*) gelombang P (s)

s = Waktu (detik)

Dan nilai w dibatasi pada $0 \leq w \leq 1$ (Lomax dan Michelini 2009a), dan (7) Plot $T^{0,2}$, $T^{0,5}$, $T^{0,8}$, $T^{0,9}$, dan T_{dur} pada seismogram. Algoritma tersebut diimplementasikan ke dalam *software* SeisGram2k untuk menghitung T_{dur} . Dari 330 EQ kejadian gempa bumi dengan $R^2 = 0.998$, dapat ditemukan hubungan T_d and M_w , sebagai berikut:

$$\text{Log } T_d = 0.24 M_w - 1.41 \dots\dots\dots(3)$$

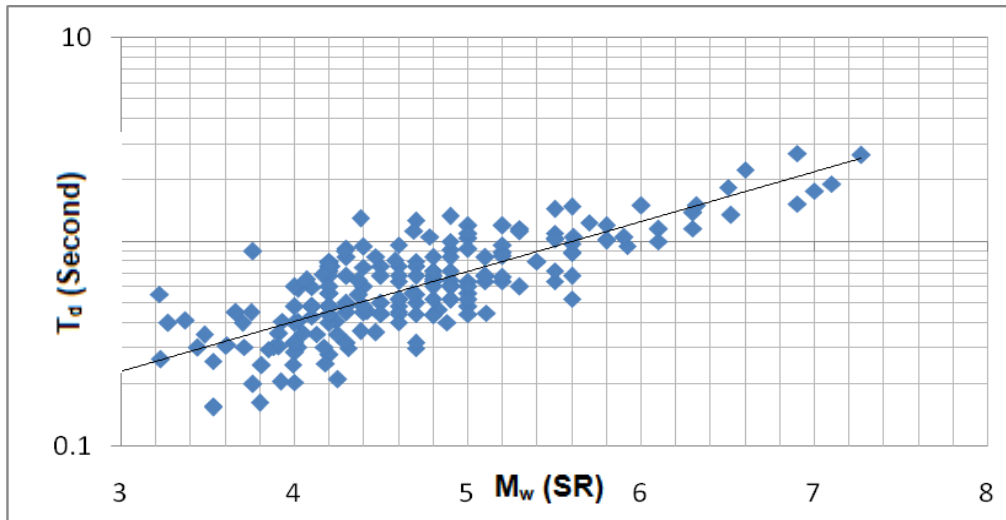
Keterangan:

T_d = Periode dominan (s)

M_w = Momen magnitudo (SR)

Parameter gempa bumi magnitudo (M_w) dapat ditentukan berdasarkan periode dominan (T_d) (Persamaan (3), tahap awal dari 3 detik pertama gelombang P (Gambar 2).

Besar dan dampak tsunami sangat terpengaruh oleh pergeseran lantai dasar laut yang berhubungan dengan panjang (L), lebar (W), *mean slip* (D), dan kedalaman (z), dari patahan gempa bumi. Penelitian Lomax dan Michelini (2009b) telah menemukan bahwa parameter panjang patahan dari suatu gempa bumi merupakan parameter yang paling dominan sebagai penyebab tsunami.



Gambar 2. Hubungan antara T_d dan M_w berdasarkan analisis 330 kejadian gempa bumi.
Figure 2. The relation between T_d and M_w based on analysis 330 earthquake event.

Untuk mengukur panjang patahan diperlukan metode yang kompleks dan waktu komputasi yang lebih lama, sehingga tidak layak digunakan untuk peringatan dini tsunami. Lomax dan Micheline (2009b) juga menemukan hubungan antara L dan durasi patahan yang bisa dinyatakan bahwa durasi sebanding dengan panjang patahan. Estimasi durasi patahan (T_0 atau T_{dur}) bisa dilakukan dengan cara menganalisis seismogram-seismogram grup gelombang P yang dominan dari seismogram berfrekuensi tinggi, sehingga durasi patahan gempa bumi bisa digunakan untuk peringatan dini tsunami (Geist dan Yoshioka 1996). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Okal (1988), Geist dan Yoshioka (1996), serta Lomax dan Micheline (2011) menjelaskan bahwa gempa bumi yang memiliki durasi patahan lebih dari 50 detik dapat memicu kejadian tsunami. Kemudian, dengan melihat hubungan antara M_w , panjang (L), dan lebar (W), maka diperoleh luas patahan dari persamaan Wells dan Coppersmith (1994), pada Persamaan (4) dan Persamaan (5), sebagai berikut.:

$$M_w = 5,00 + 1,22 * \log RL \dots\dots\dots (4)$$

untuk $4,8 \leq M_w \leq 8,1$

$$M_w = 4,37 + 1,95 * \log RW \dots\dots\dots (5)$$

untuk $4,8 \leq M_w \leq 8,1$

Keterangan:

RL = panjang patahan (km)

RW = lebar patahan (km).

Sistem penentuan potensi tsunami menggunakan parameter durasi patahan (T_{dur}),

periode dominan (T_d), durasi lebih dari 50 detik (T_{50Ex}), $T_d * T_{dur}$, dan $T_d * T_{50Ex}$ yang cukup konsisten untuk menentukan potensi tsunami secara *real time* (Madlazim 2012a, 2012b). Komputasi perkalian antara T_{dur} dan T_d ($T_{dur} * T_d$) dan perkalian antara T_d dan T_{50Ex} ($T_d * T_{50Ex}$) dilakukan untuk memberikan deskripsi tentang luas patahan. Jika terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua hasil perkalian tersebut, maka perkalian antara T_{50Ex} dan T_d yang digunakan sebagai bahan pengambilan keputusan apakah gempa bumi tersebut menimbulkan tsunami atau tidak. Indikator potensi tsunami dari masing-masing parameter adalah jika $T_{dur} > 65$, $T_d > 10$, $T_{50Ex} > 1$, $T_{dur} * T_d > 650$, $T_d * T_{50Ex} > 10$ (Hardy et al. 2013).

Pemodelan Tsunami

Proses pemodelan tsunami menggunakan *software* Tsunami L-2008. *Software* tersebut dikembangkan oleh Nakamura (2009) dari University of Ryukyus. Pemodelan tsunami terdiri dari pemodelan sumber tsunami (*source modeling*), penalaran gelombang tsunami (*ocean modeling*), dan ketinggian tsunami (*run-up modeling*). Parameter *input* yang diperlukan untuk pemodelan sumber tsunami (*source modeling*) antara lain lokasi episentrum gempa, magnitudo gempa, *strike*, *dip*, *slip*, panjang dan lebar patahan (Setyonegoro 2011). Nilai momen seismik dihitung dari magnitudo gempa bumi menurut Persamaan (6) oleh Hanks dan Kanamori (1979), sebagai berikut:

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 6,07 \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

M_w = Momen magnitudo (SR)

M_0 = Momen seismik (Nm)

Kemudian, nilai momen seismik digunakan untuk mencari nilai *slip* dengan menggunakan Persamaan (7) dari Wells dan Coppersmith (1994), sebagai berikut:

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot D \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

M_0 = Momen seismik (Nm)

μ = rigiditas (tingkat kekakuan benda)

Apabila benda semakin keras maka energi yang diperlukan untuk menggerakkannya semakin besar. Artinya, momen seismiknya semakin besar (N/m^2), A adalah luas bidang sesar (m^2), dan D adalah dislokasi (m) (Hanks dan Kanamori 1979). Gempa Nias dan Mentawai berada di zona subduksi Sumatra. Oleh karena itu, penghitungan panjang dan lebar *fault* menggunakan persamaan Wells dan Coppersmith (1994) untuk jenis patahan naik (*reverse*). Persamaan ini dipilih karena data katalog gempa bumi dari IRIS Earthquake Browser (2016) menunjukkan bahwa jenis patahan yang dihasilkan oleh gempa bumi Nias dan Mentawai adalah sesar naik. *Output* dari pemodelan sumber gempa bumi (*source modeling*) berupa deformasi vertikal yaitu deformasi yang terjadi di dasar laut yang selanjutnya akan digunakan dalam *ocean modeling* dan *run-up modeling*.

Parameter simulasi *ocean modeling* yang menjadi *input* dalam program Tsunami L-2008 sebagai formulasi dari Nakamura (2006, 2009) meliputi *maximum time*, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi, yang ditetapkan selama 3600 detik pada penelitian ini. *Graph interval* dipilih 50 detik ($Dt = 5$ detik) agar hasil simulasi disimpan tiap 25 detik. *Hmax* merupakan nilai estimasi *run-up* yang diperoleh dari referensi, yaitu sebesar 5 m, sedangkan *Hmin* sebesar -5 m. Batas toleransi (*maning parameter*) ditentukan sebesar 0,025 m, *max depth for friction* 50 meter.

Hasil dari *ocean modeling* berupa simulasi penjaralan gelombang tsunami tiap 25 detik. Dalam penelitian ini, *run-up* tsunami adalah jarak vertikal antara ujung tsunami di pantai dengan titik nol muka laut atau *mean sea level*. Adapun *output* dari *run-up modelling* yaitu berupa nilai ketinggian tsunami (*max. tsunami height*) sebelum mencapai garis pantai dan *run-up* tsunami saat

berada di garis pantai. Untuk mengidentifikasi potensi tsunami di beberapa titik target, maka *run-up modeling* dilakukan di lokasi-lokasi yang telah disesuaikan untuk komparasi hasil. Lokasi digitasi pemodelan *run-up* dalam penelitian ini untuk gempa bumi Nias meliputi Pulau Salaut, bagian barat laut Simeulue, bagian barat daya Simeulue, Pulau Babi, Pulau Bangkuru, Pulau Tuangku, Singkil, Sarangbaung, Pulau Asu, barat daya Lagundri Nias, dan barat laut Pulau Batu, sedangkan gempa bumi Mentawai meliputi Pantai Batimonga, Pantai Ghobi, Pantai Tumale, Pantai Pasangan, Pantai Sabeugunggung, Pantai Malacopa, dan Pantai Asahan.

Hubungan Struktur Geologi Area Penelitian dan Frekuensi Kejadian Gempa Bumi

Wilayah Sumatra bagian utara merupakan wilayah yang rawan terhadap gempa tektonik. Sumber gempa tektonik berasal dari aktivitas subduksi antara Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dan Sesar Sumatra yang membentang dari Teluk Andaman di ujung utara hingga Teluk Semangko di ujung selatan. Karakter struktur geologi terbentuk dari sesar yang memengaruhi gempa besar yang dihasilkan. Seperti telah dijelaskan di pendahuluan, bahwa *oblique* dapat terjadi dari mekanisme sumber gempa bumi dari komponen *dip-slip* yang terdapat di zona subduksi antarlempeng dan komponen *strike-slip* di sesar besar Sumatra (Natawidjaya 2002). Salah satu parameter penting dalam keakuratan lokasi hiposentrum gempa bumi yaitu model kecepatan gelombang seismik dalam skala lokal atau regional dengan tingkat presisi yang tinggi (Persamaan 5), sebagai berikut:

Untuk lapisan permukaan tempat gempa-gempa terjadi dengan kedalaman 15 km nilai V_p/V_s adalah 1,79. Selanjutnya, jarak episentrum dan kedalaman gempa ditentukan berdasarkan Gambar 3 (Persamaan 8, 9, 10, 11).

$$d = \frac{V_p}{\frac{V_p}{V_s} - 1} \cdot (S - P) \dots\dots\dots (8)$$

$$d = k \cdot (S - P) \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

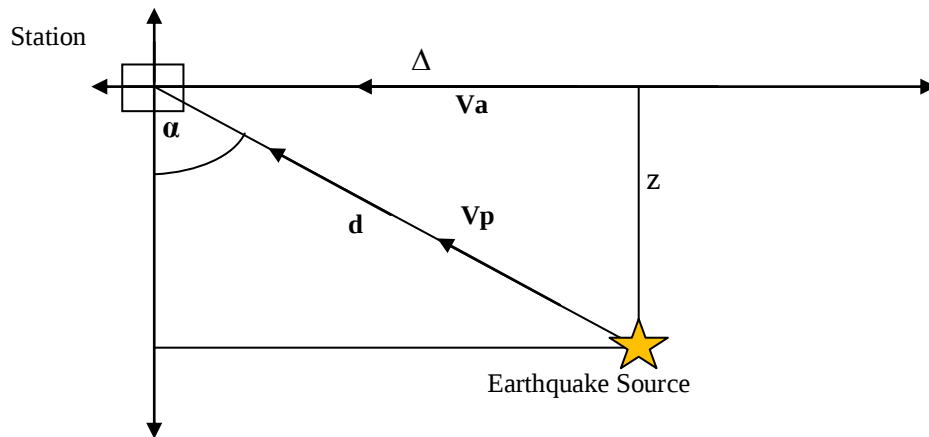
k = konstanta Omori = $[V_p / (V_p/V_s) - 1]$

d = Hiposentrum gempa bumi (km)

Kemudian dapat dihitung

$$\Delta = d \sin \alpha \dots\dots\dots (10)$$

$$Z = d \cos \alpha \dots\dots\dots (11)$$

Gambar 3. Ilustrasi hubungan antara V_p , d , Δ , z , S , dan P .Figure 3. Illustration of relations among V_p , d , Δ , z , S , and P .

Keterangan:

Δ = Episentrum gempa bumi (km)

Z = Kedalaman gempa bumi (km)

Waktu *delay* stasiun yang bernilai negatif menunjukkan bahwa waktu tempuh gelombang P lebih cepat untuk sampai di stasiun pencatat karena struktur tanah di bawah stasiun seismik tersebut tersusun atas bebatuan padat (*hardrock*). Sebaliknya, waktu *delay* stasiun yang bernilai positif mengindikasikan bahwa struktur batuan stasiun seismik tersebut tersusun atas batuan sedimen yang menyebabkan gelombang P merambat lebih lambat untuk sampai di stasiun pencatat (Madlazim et al. 2010).

Hasil

Hasil estimasi durasi patahan menunjukkan kesesuaian hasil estimasi ini dengan kesimpulan identifikasi potensi tsunami yang diperoleh melalui pemodelan tsunami (Tabel 4 dan Tabel 5). Durasi patahan memiliki pengaruh besar untuk memicu kejadian tsunami. Penelitian yang dilakukan oleh Okal (1988); Geist dan Yoshioka (1996); Lomax dan Michelini (2011) menjelaskan

bahwa gempa bumi yang memiliki durasi patahan lebih dari 50 detik dapat memicu kejadian tsunami. Hasil estimasi pada penelitian pemodelan tsunami ini memiliki kesesuaian dengan penelitian potensi tsunami yang menggunakan durasi patahan, yaitu durasi patahan gempa bumi Nias 2005 dan Mentawai 2010 yang lebih dari 50 detik dalam kenyataannya telah menyebabkan tsunami (Gambar 4 dan Gambar 5). Batas koordinat batimetri untuk gempa bumi Nias dan gempa bumi Mentawai ditampilkan dalam Tabel 3.

Lokasi yang diambil untuk melihat pengaruh kedalaman dasar laut terhadap tinggi *run-up* tsunami ada tiga, yaitu sekitar pusat gempa (A) yang ditarik garis lurus terhadap Pulau Simeulue (B) (Gambar 9), sekitar pusat gempa (B) yang ditarik garis lurus terhadap Pulau Banyak (C) (Gambar 10), dan sekitar pusat gempa (C) yang ditarik garis lurus terhadap Pulau Nias (D) (Gambar 11). Dari ketiga gambar hasil plot *cross section ocean modeling* ditampilkan masing-masing kurva propagasi tsunami dari sumber gempa bumi dengan mengikuti batimetri, tampilan ini merupakan pengolahan *run-up* dari Tabel 6.

Tabel 3. Data gempa bumi Nias 28-03-2005 dan Mentawai 25-10-2010 (IRIS Earthquake Browser 2016).

Table 3. Data of Nias 03-28-2005 and Mentawai 10-25-2010 earthquakes (IRIS Earthquake Browser 2016).

Event	Latitude	Longitude	Origine time	Depth	Magnitude	Bathymetric Boundary Area
Nias	2,0964°	97,1131°	16:09:35 UTC	30 km	8,7 SR	6°LU–3°LS 91°BT–100°BT
Mentawai	-3,5248°	100,1042°	14:42:22 UTC	20 km	7,8 SR	1°LU–7°LS 97°BT–105°BT

Tabel 4. Hasil estimasi durasi patahan pada gempa bumi Nias 28 Maret 2005.

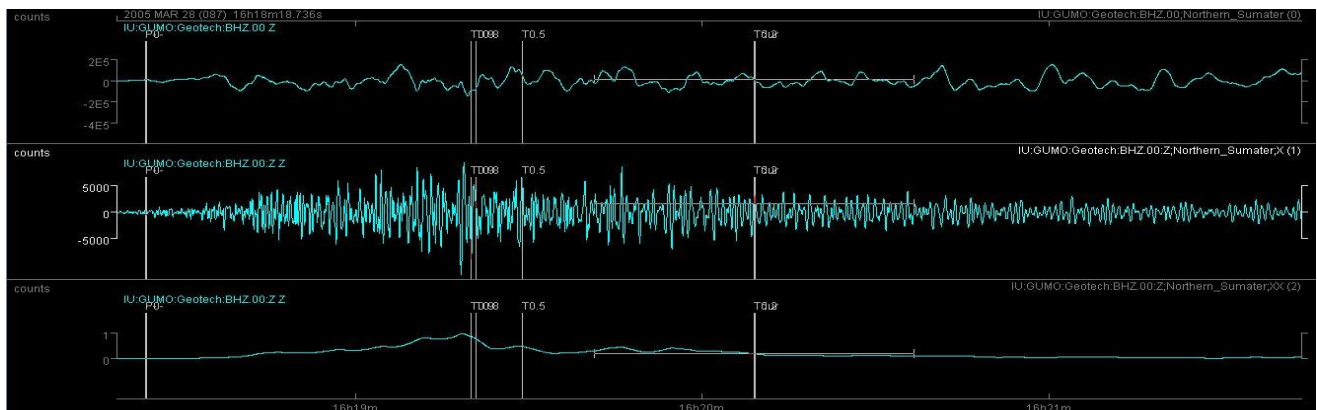
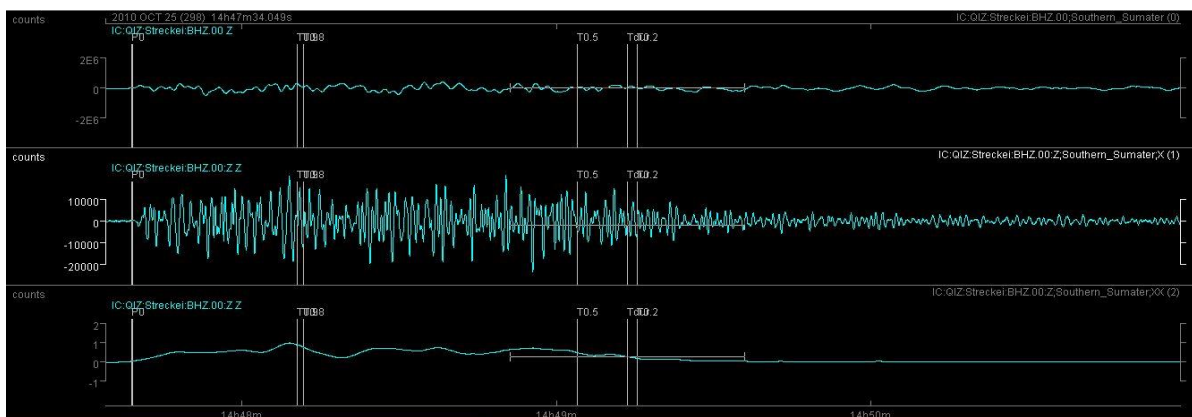
Table 4. Results of the estimation of rupture duration of the Nias earthquake on March 28, 2005.

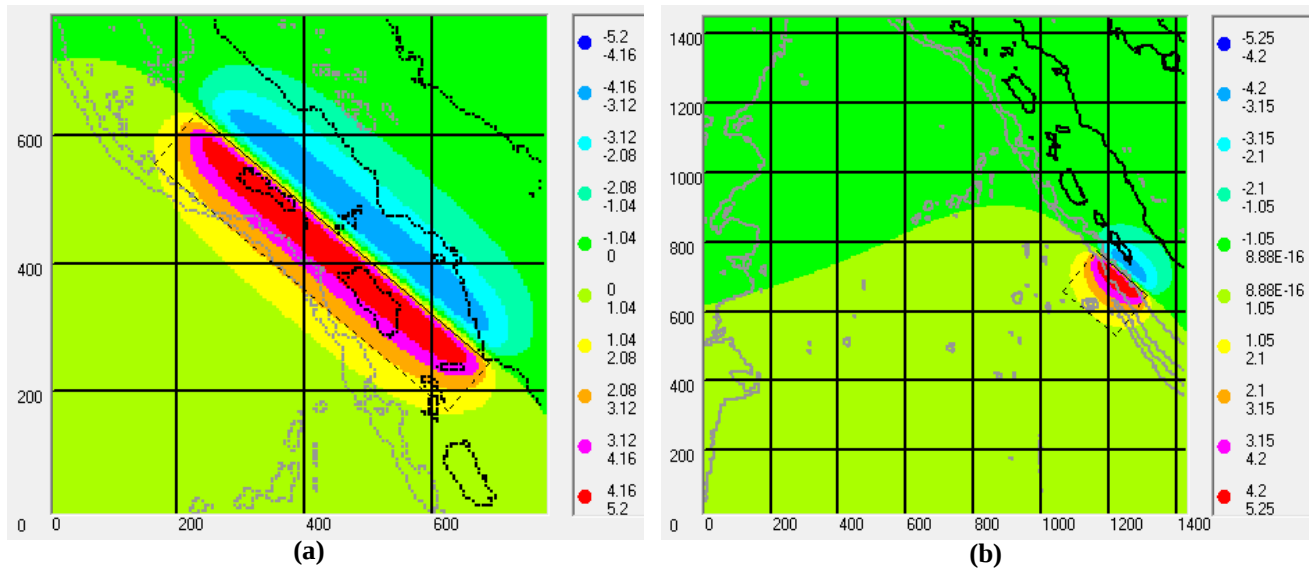
Station	$T^{0,9}$ (s)	$T^{0,8}$ (s)	$T^{0,5}$ (s)	$T^{0,2}$ (s)	T_{dur} (s)
FURI	62,30	63,10	65,35	135,85	129,28
KMI	35,15	36,00	46,65	88,80	51,93
WRAB	64,90	66,25	85,15	95,30	90,25
DGAR	72,85	73,55	113,95	156,20	151,15
GUMO	61,25	62,15	70,25	110,35	105,30

Tabel 5. Hasil estimasi durasi patahan pada gempa bumi Mentawai 20 Oktober 2010.

Table 5. Results of the estimation of rupture duration of the Mentawai earthquake on October 20, 2010.

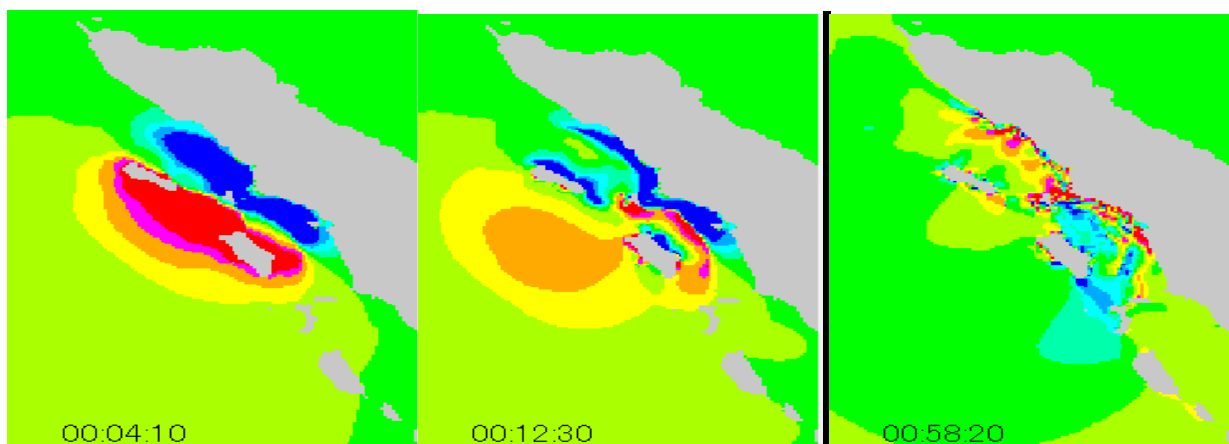
Station	$T^{0,9}$ (s)	$T^{0,8}$ (s)	$T^{0,5}$ (s)	$T^{0,2}$ (s)	T_{dur} (s)
KAPI	44,2	45,10	84,80	113,15	107,93
CHTO	34,75	48,55	83,85	127,55	122,49
PALK	60,05	62,00	82,55	125,75	120,69
QIZ	36,65	37,70	90,00	101,50	94,50
MBWA	51,35	53,9	132,10	145,15	21,86

Gambar 4. Durasi patahan gempa bumi Nias 28 Maret 2005 di stasiun GUMO ($T_{dur} = 105,30$ s).Figure 4. Rupture duration of Nias earthquake March 28, 2005 at GUMO station ($T_{dur} = 105.30$ s).Gambar 5. Durasi patahan gempa bumi Mentawai 20 Oktober 2010 di stasiun QIZ ($T_{dur} = 94,50$ s).Figure 5. Rupture duration of Mentawai earthquake on October 20, 2010 at QIZ station ($T_{dur} = 94.50$ s).



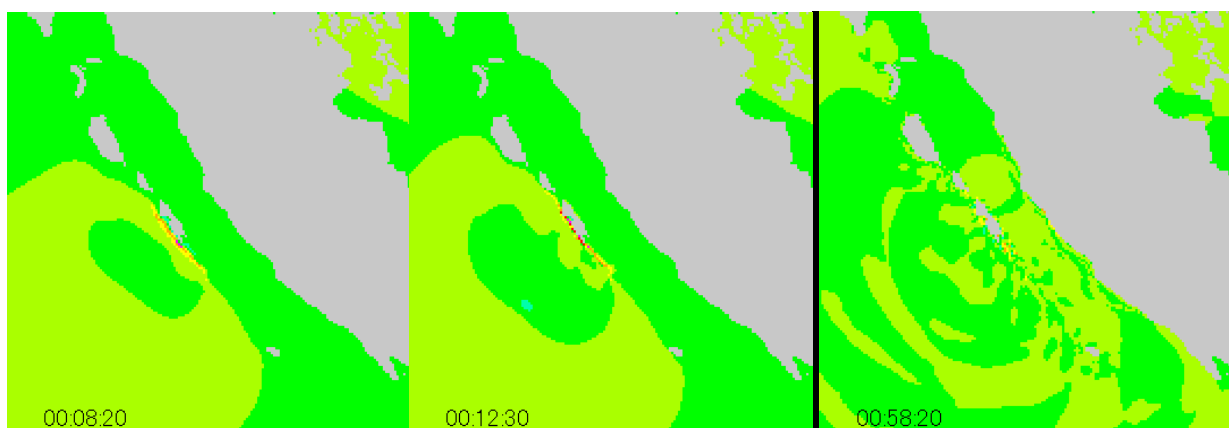
Gambar 6. Deformasi vertikal (a) Gempa Nias 28 Maret 2005, (b) Gempa Mentawai 25 Oktober 2010.

Figure 6. Vertical displacement (a) Nias earthquake March 28, 2005, (b) Mentawai earthquake October 25, 2010.



Gambar 7. Waktu penjaran simulasi gelombang tsunami gempa bumi Nias 2005.

Figure 7. Time of tsunami wave propagation simulation of 2005 Nias earthquake.



Gambar 8. Waktu penjaran gelombang tsunami gempa bumi Mentawai 2010.

Figure 8. Time of tsunami wave propagation simulation of 2010 Mentawai earthquake.

Tabel 6. Hasil estimasi *run-up* tsunami gempa Nias 2005.

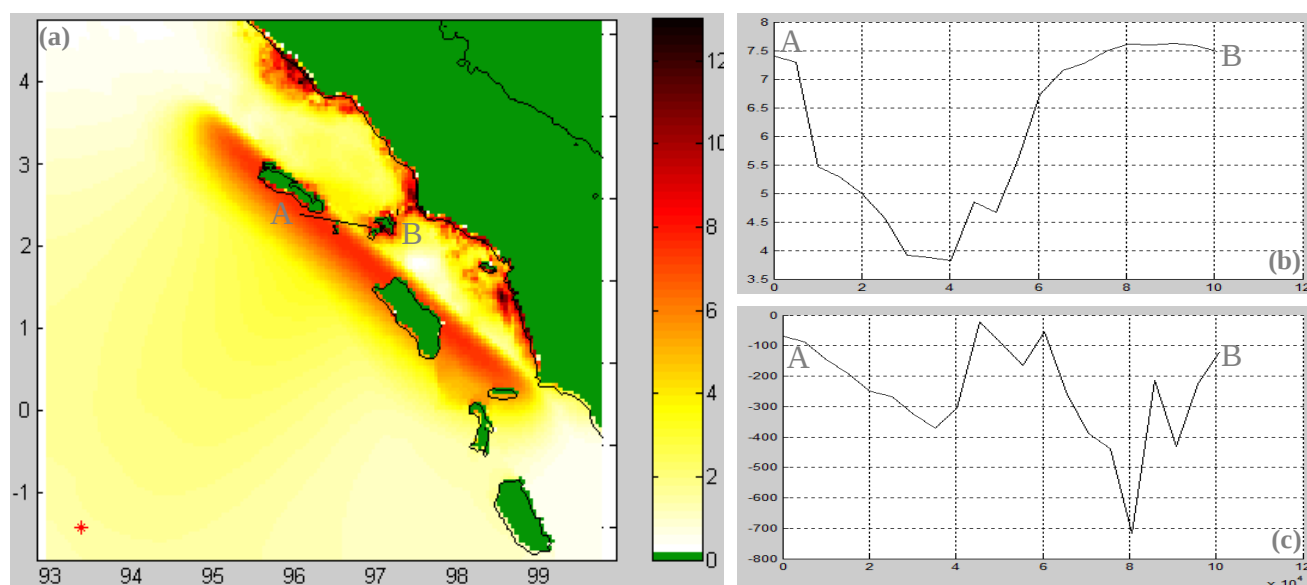
Table 6. Results of tsunami run-up estimation of 2005 Nias earthquake.

Affected Locations	Run-up (m)
Salaut island	6.32
Northwest Simeulue	8.55
Southwest Simeulue	12.72
Babi island	13.80
Bangkuru island	11.48
Tuangku island	5.28
Singkil	10.25
Sarangbaung	11.63
Asu island	9.54
Southwest Lagundri Nias	7.79
Northwest Pulau Batu	2.47

Tabel 7. Hasil estimasi *run-up* tsunami gempa Mentawai 2010.

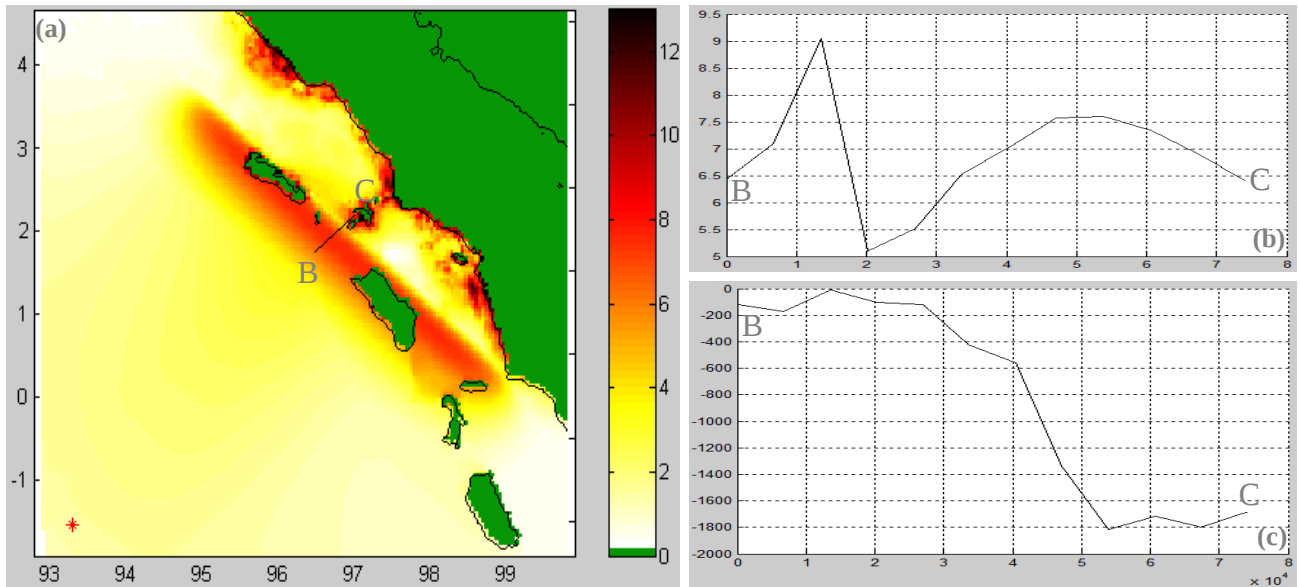
Table 7. Results of tsunami run-up estimation of 2010 Mentawai earthquake.

Affected locations	Run-up (m)
Batimonga beach	2.68
Ghobi beach	4.08
Tumale beach	6.09
Pasangan beach	7.06
Sabeugung beach	8.11
Malacopa beach	8.17
Asahan beach	7.58



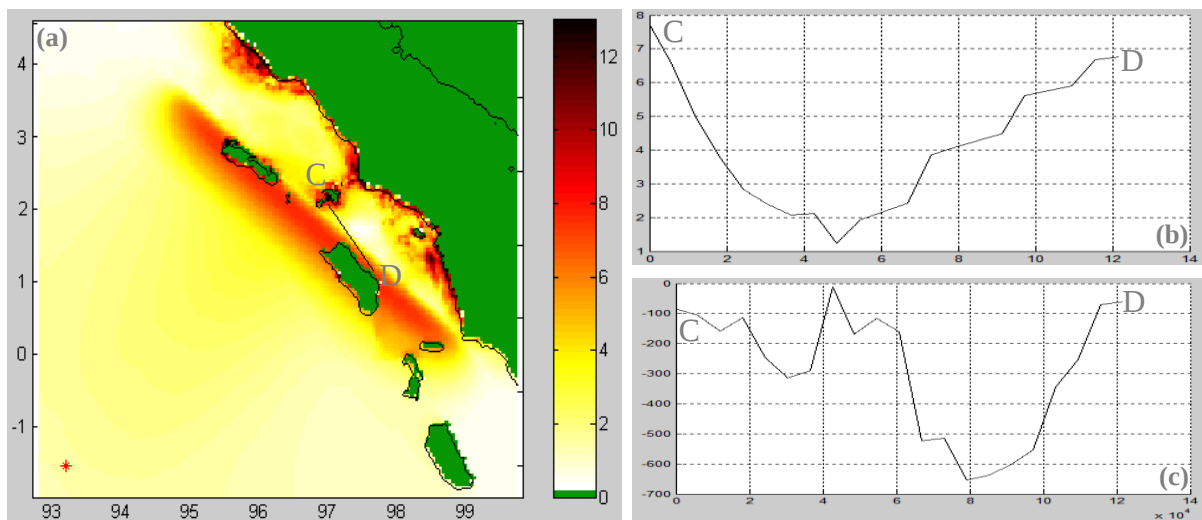
Gambar 9. Plot *cross-section* pada jarak 100,8653 km saat gempa bumi Nias 2005. (a). Plot *cross-section* A-B (Pulau Simeuleu), (b). Kurva *cross-section* ketinggian tsunami dari A ke B. (c). Kurva *cross-section* ocean bottom dari A ke B.

Figure 9. Plot cross-section with interval of 100.8653 km at 2005 Nias earthquake. (a). Plot cross-section A-B (Simeuleu Island). (b). Cross-section curve of tsunami height from A to B. (c). Cross section curve of ocean bottom from A to B.



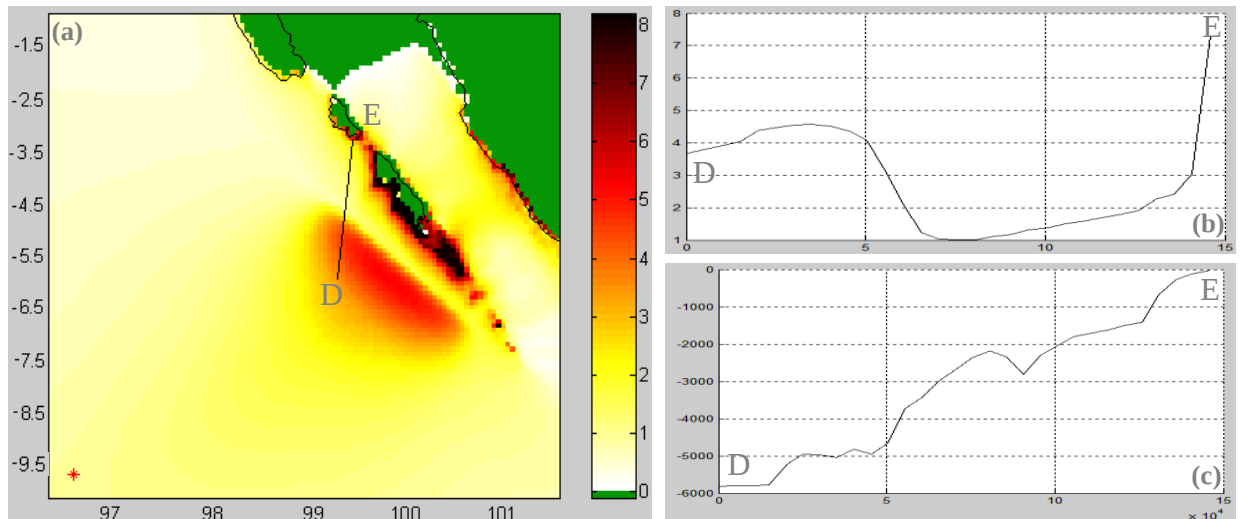
Gambar 10. Plot *cross-section* pada jarak 74,1333 km saat gempa bumi Nias 2005. (a). Plot *cross-section* B-C (Pulau Banyak). (b). Kurva *cross-section* ketinggian tsunami dari B ke C. (c). Kurva *cross-section* ocean bottom dari B ke C.

Figure 10. Plot *cross-section* with interval of 74.1333 km at 2005 Nias earthquake. (a). Plot *cross-section* B-C (Banyak Island). (b). Cross-section curve of tsunami height from B to C. (c). Cross section curve of ocean bottom form B to C.



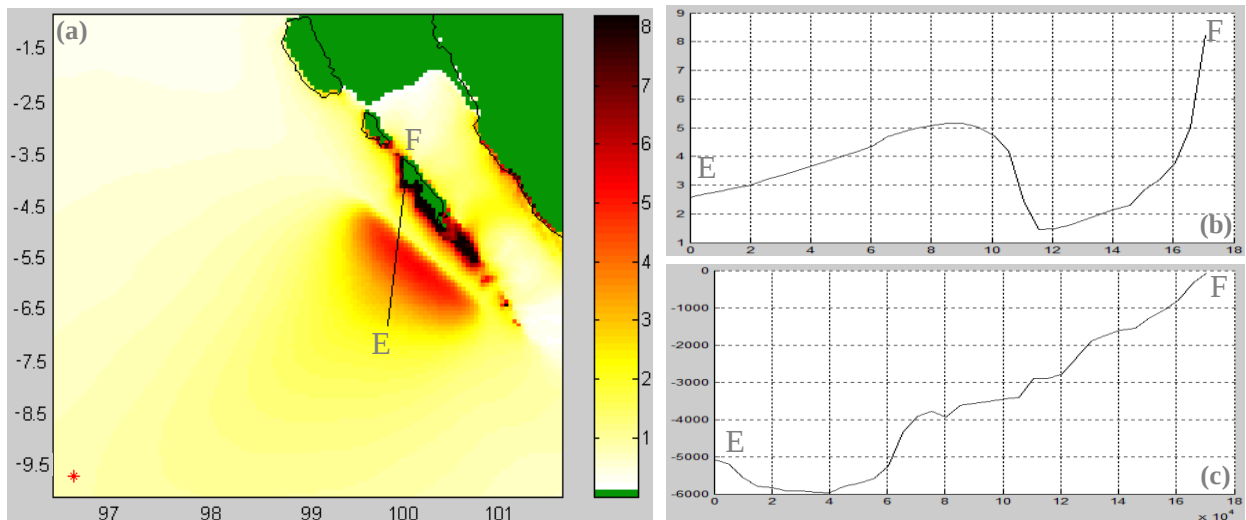
Gambar 11. Plot *cross-section* pada jarak 121,733 km saat gempa bumi Nias 2005. (a). Plot *cross-section* C-D (Pulau Nias). (b). Kurva *cross-section* ketinggian tsunami dari C ke D. (c). Kurva *cross-section* ocean bottom dari C ke D.

Figure 11. Plot *cross-section* with interval of 121.733 km at 2005 Nias earthquake. (a). Plot *cross-section* C-D (Nias Island). (b). Cross-section curve of tsunami height from C to D. (c). Cross section curve of ocean bottom form C to D.



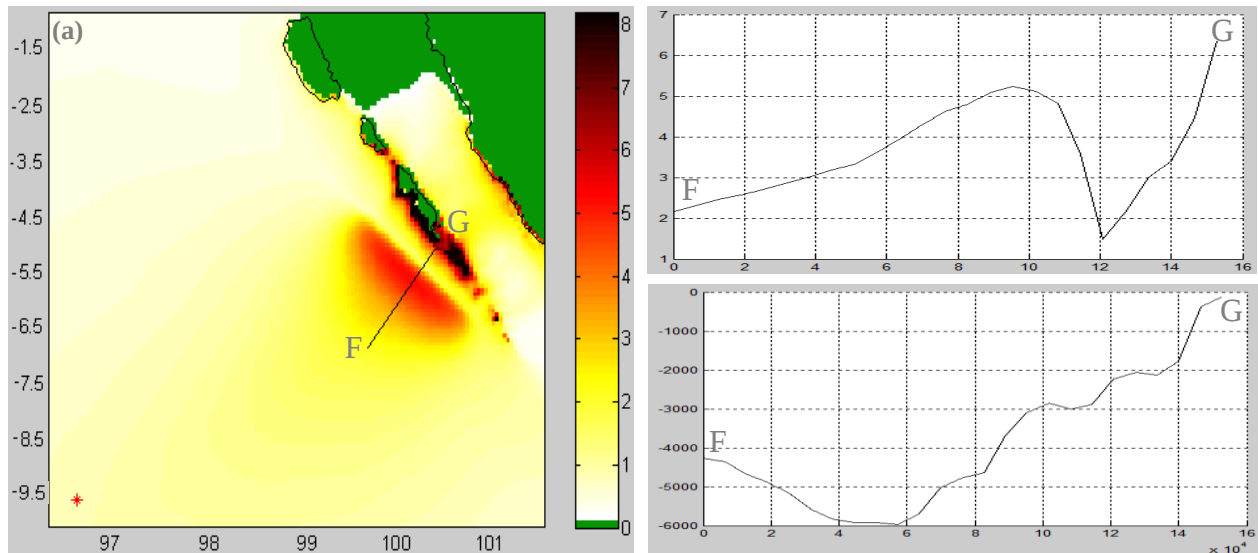
Gambar 12. Plot *cross-section* pada jarak 145,9627 km saat gempa bumi Mentawai 2010. (a). Plot *cross-section* D-E (Pulau Sipora). (b). Kurva *cross-section* ketinggian tsunami dari D ke E. (c). Kurva *cross-section* *ocean bottom* dari D ke E.

Figure 12. Plot *cross-section* with interval of 145.9627 km at 2010 Mentawai earthquake. (a). Plot *cross-section* D-E (Sipora Island). (b). Cross-section curve of tsunami height from D to E. (c). Cross section curve of ocean bottom form D to E.



Gambar 13. Plot *cross-section* pada jarak 170,6915 km saat gempa bumi Mentawai 2010. (a). Plot *cross-section* E-F (Pulau Pagai Utara). (b). Kurva *cross-section* ketinggian tsunami dari E ke F. (c). Kurva *cross-section* *ocean bottom* dari E ke F.

Figure 13. Plot *cross-section* with interval 145.9627 km at 2010 Mentawai earthquake. (a). Plot *cross-section* E-F (North Pagai Island). (b). Cross-section curve of tsunami height from E to F. (c). Cross section curve of ocean bottom form E to F.



Gambar 14. Plot *cross-section* pada jarak 152,7275 km saat gempa bumi Mentawai 2010. (a). Plot *cross-section* F-G (Pulau Pagai Selatan). (b). Kurva *cross-section ketinggian tsunami* dari F ke G. (c). Kurva *cross-section ocean bottom* dari F ke G.

Figure 14. Plot cross-section with interval 145.9627 km at 2010 Mentawai earthquake. (a). Plot cross-section F-G (South Pagai Island). (b). Cross-section curve of tsunami height from F to G. (c). Cross section curve of ocean bottom form F to G.

Pembahasan

Pada Gambar 5 terlihat bahwa durasi patahan sebanding dengan panjang patahan, sehingga semakin lama durasi patahan suatu gempa bumi, maka semakin besar pula panjang patahan (Lomax dan Michelini 2005). Semakin panjang patahan suatu gempa bumi, semakin besar peluang gempa bumi tersebut memicu tsunami, bila gempa tersebut terjadi di laut. Hasil penghitungan panjang dan lebar *fault* berdasarkan Persamaan (5) dan (6) untuk gempa Nias adalah 346,73 km x 81,28 km, sedangkan untuk gempa bumi Mentawai adalah 194,98 km x 57,54 km. Hasil penghitungan panjang dan lebar *fault* ini menunjukkan kesesuaian korelasinya dengan hasil estimasi durasi patahan. Hasil rata-rata durasi patahan gempa bumi Nias lebih besar jika dibandingkan dengan gempa bumi Mentawai, sementara itu hasil penghitungan panjang dan lebar *fault* gempa bumi Nias juga diketahui lebih besar jika dibandingkan dengan gempa bumi Mentawai.

Hasil panjang dan lebar *fault* kemudian digunakan untuk pemodelan sumber gempa bumi pembangkit tsunami (*source modeling*) dengan karakteristik bidang patahan yang digunakan untuk gempa Nias adalah *strike* = 130°, *dip* = 83°, dan *slip* = 72,8 m, sedangkan untuk gempa Mentawai yaitu *strike* = 130°, *dip* = 82°, dan *slip*

= 13,7 m. Nilai *strike* dan *dip* diambil dari katalog IRIS, sedangkan nilai *slip* didapatkan dari hasil penghitungan dengan menggunakan hubungan antara Persamaan (3) dan (4). Nilai *output* yang didapat dari *source modeling* adalah deformasi vertikal yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Gempa bumi Nias memiliki nilai maksimum deformasi vertikal 20,3 m dan nilai minimum deformasi vertikal -20,3 m. Sebaliknya, gempa bumi Mentawai memiliki nilai maksimum deformasi vertikal 3,97 m dan nilai *minimum deformasi vertikal* -3,97 m. Pada gempa bumi di wilayah barat Sumatra deformasi dasar laut yang dapat membangkitkan tsunami adalah deformasi arah vertikal dengan jenis patahan naik (*reverse fault*) (Gambar 6).

Pergerakan vertikal lantai samudra naik (*uplift*) atau turun dengan cepat sebagai respon dari gempa bumi yang akan menaikkan dan menurunkan air laut dalam skala besar. Karakteristik gempa tektonik yang dapat menyebabkan tsunami dapat dipenuhi oleh jenis gempa tektonik di zona subduksi. Hasil penjalaran gelombang (*ocean modeling*) memperlihatkan penjalaran gelombang tsunami dari sumber ke segala arah yang ditunjukkan oleh Gambar 7 dan Gambar 8. Gambar 7 menunjukkan bahwa gelombang tsunami Nias memasuki daerah Lagundri yang berada di arah barat daya Pulau Nias pada menit keempat lebih 10 detik sampai

menit kedua belas lebih tiga puluh detik. Sebaliknya, daerah Singkil terkena gelombang tsunami pada menit kelima puluh delapan lebih dua puluh detik. Perbedaan waktu penjalaran gelombang tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kondisi batimetri bawah permukaan yang berbeda-beda dan tingkat kelandaian pantai. Waktu kedatangan tsunami diperkirakan melalui model kecepatan dan pembiasan gelombang tsunami ketika bergerak dari sumbernya. Waktu kedatangan penjalaran tsunami dapat diperkirakan dengan ketepatan yang sangat baik jika batimetri dan sumber gempa diketahui (UNESCO 2007). Perbedaan waktu antara gempa Nias dan Mentawai dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain perbedaan nilai parameter sesar seperti *strike*, *dip*, *slip*, panjang dan lebar *fault*. *Run-up* tsunami yang merupakan jarak vertikal di garis pantai dan dihitung dari rata-rata muka air laut diperlihatkan dalam Tabel 6 dan Tabel 7. Tinggi *run-up* tsunami tergantung pada magnitudo gempa, morfologi dasar laut, dan bentuk pantai. Pada penjalaran gelombang tsunami dari sumber gempa bumi di laut hingga mencapai garis pantai, kecepatan berkurang, sedangkan amplitudo gelombang tsunami mengalami kenaikan. Kenaikan *run-up* tsunami di garis pantai dipengaruhi oleh kondisi batimetri bawah permukaan laut (*ocean bottom*). Hal ini dapat dilihat dari hasil plot *cross-section ocean modeling* (Gambar 9).

Gambar 8 menunjukkan penjalaran gelombang tsunami pada gempa Mentawai. Pada menit kedelapan lebih 20 detik gelombang tsunami sudah menjalar ke Pagai Utara dan Pagai Selatan yang meliputi Pantai Tumale, Pantai Sabeugunggung, Pantai Malacopa, dan Pantai Asahan. Pada menit ke-12 lebih 30 detik sampai menit ke-58 lebih 20 detik gelombang tsunami sudah menjalar ke Pagai Utara, Pagai Selatan, dan Pulau Sipora.

Cross section ocean modeling gempa Mentawai dilakukan di tiga lokasi, yaitu di daerah sekitar pusat gempa (D) yang ditarik garis lurus terhadap Pulau Sipora (E) (Gambar 12), di daerah sekitar pusat gempa (E) yang ditarik garis lurus terhadap Pulau Pagai Utara (F) (Gambar 13), dan di sekitar pusat gempa (F) yang ditarik garis lurus terhadap Pulau Pagai Selatan (G) (Gambar 14). Analisis ketiga daerah tersebut menunjukkan bahwa bentuk permukaan dasar laut (*ocean bottom*) dapat memengaruhi penjalaran gelombang tsunami dan ketinggian tsunami. Ketika tsunami semakin mendekati daratan, maka gelombangnya semakin tinggi. Hal ini menjadi

penyebab ketinggian tsunami jauh lebih tinggi ketika mencapai daerah pesisir pantai daripada ketinggian gelombang di lokasi awal pusat gempa. Tinggi tsunami pada saat mendekati pantai akan mengalami perbesaran amplitudo karena ada penumpukan massa air akibat penurunan kecepatan penjalaran gelombang. Kecepatan penjalaran gelombang tsunami bergantung pada kedalaman air dan tinggi tsunami. Hal ini terjadi karena ada konversi energi kinetik gelombang menjadi energi potensial, yaitu kehilangan energi akibat kecepatan yang ditransfer ke dalam bentuk perbesaran tinggi gelombang (*run-up*) berkurang.

Kesimpulan

Nilai maksimum T_{dur} untuk gempa bumi Nias 2005 di stasiun DGAR adalah 151,15 detik dan nilai minimum T_{dur} di stasiun KMI adalah 51,93 detik, sedangkan nilai maksimum T_{dur} untuk gempa bumi Mentawai 2010 di Stasiun CHTO yaitu 122,49 detik. Hal ini dapat diestimasi berdasarkan karakteristik parameter pada gempa bumi Nias 2005 dan Mentawai 2010 yang memiliki durasi patahan lebih dari 50 detik, sehingga dapat memicu tsunami. Hasil estimasi potensi tsunami melalui durasi patahan divalidasi dengan hasil pemodelan sumber gempa pembangkit tsunami (*source modeling*), yang pada gempa bumi Nias 2005 memiliki nilai *maximum deformasi vertikal* 20,3 m dan nilai *minimum deformasi vertikal* -20,3 m. Gempa bumi Mentawai 2010 memiliki nilai *maximum deformasi vertikal* 3,97 m dan nilai *minimum deformasi vertikal* -3,97 m. Hasil penjalaran gelombang tsunami Nias pada menit ke-58 lebih 20 detik sudah berdampak ke Pulau Nias dan sekitarnya yang meliputi Pulau Salaut, bagian barat laut Simeulue, bagian barat daya Simeulue, Pulau Babi, Pulau Bangkuru, Pulau Tuangku, Singkil, Sarangbaung, Pulau Asu, barat daya Lagundri Nias, dan barat laut Pulau Batu. Sebaliknya, penjalaran gelombang tsunami Mentawai pada menit ke-58 lebih 20 detik sudah menjalar ke Pagai Utara, Pagai Selatan, dan Pulau Sipora. Daerah yang terdampak *run-up* akibat tsunami Nias 2005 adalah Pulau Babi yang mencapai *run-up* maksimum 13,80 m. Pada tsunami Mentawai, daerah yang terdampak *run-up* maksimum berada di pantai Malacopa, yaitu 8,17 m. Dengan demikian, estimasi karakteristik potensi tsunami berdasarkan asipatahan yang divalidasi dengan pemodelan tsunami memberikan identifikasi hasil yang sesuai.

Persantunan

Kami mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing Jurusan Fisika ITS atas perizinan dan pendanaan kegiatan riset lanjutan Kerja Praktek di Puslitbang BMKG. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada pemimpin dan pembimbing dari staf peneliti Bidang Geofisika Puslitbang BMKG atas hibah software modeling tsunami dan bimbingannya, sehingga publikasi karya tulis ilmiah ini dapat dihasilkan. Kami mengharapkan karya tulis ilmiah ini dapat bermanfaat untuk pengembangan dan penelitian lebih lanjut terkait tema pemodelan tsunami ini.

Daftar Pustaka

- Bock, L. Y., dan J. F. Prawirodirdjo. 2003. Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements. *Journal of Geophysical Research* 108(8):2367.
- Briggs, R. W., K. Sieh, A. J. Meltzner, dan D. H. Natawidjaja. 2006. Deformation and slip along the Sunda megathrust in the great 2005 Nias-Simeulue earthquake. *Science* 311(5769):1897–1901.
- Geist, E. dan S. Yoshioka. 1996. Source Parameters Controlling the Generation and Propagation of Potential Local Tsunami. *Natural Hazards* 13:151–177.
- GITST (*German-Indonesia Tsunami Survey Team*). 2010. Jejak tsunami 25 Oktober 2010 di kepulauan Mentawai berdasarkan penelitian kebumian dan wawancara. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi* 1(3):165–181.
- Goldstein, P., dan A. Snoke. 2005. SAC Availability for the IRIS Community, IRIS Consortium.
- Hanks, T. C., dan H. Kanamori. 1979. Moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research* 84(B5):2348–2350.
- Hardy, T., Madlazim, J. Nugraha, S. Pakpahan, dan W. Setyonegoro. 2013. Pengembangan dan Automatisasi Sistem Penentuan Potensi Tsunami dengan Perhitungan durasi patahan (*rupture*) (T_{dur}), Periode Dominan (T_d) dan T50EX. *Prosiding Seminar Tahunan Hasil-hasil Penelitian dan Pengembangan Puslitbang BMKG Tahun 2013*:87–92.
- IRIS Earthquake Browser. 2016. (<http://ds.iris.edu/ieb/>), diakses tanggal 8 September 2016.
- Lomax, A., dan Michelini A. 2005. Rapid determination of earthquake size for Hazard warning, *EOS, Trans. Am. Geophys. Un.* 86(21):202.
- Lomax, A., dan A. Michelini. 2009a. M_w pd: a Duration-amplitude proceess for rapid determination of earthquake magnitude and tsunamigenic potential from P waveforms. *Geophys. J. Int.* 176:200–214. doi :10.1111/j.1365-246X.2008.03974.x.
- Lomax, A., dan A. Michelini. 2009b. Tsunami early warning using earthquake rupture ation. *Geophys. Res. Lett.* 36:L09306. doi :10.1029/2009GL037223.
- Lomax, A., dan A. Michelini. 2011. Tsunami early warning using earthquake rupture ation and P-wave dominant period: the importance of length and depth of faulting. *Geophys. J. Int.* 185:283–291. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.
- Madlazim. 2012a. Toward tsunami early warning system in Indonesia by using rapid rupture ations estimation, AIP Conf. Proc. International Conference on Physics and Its Applications: 1454:142–145. (ICPAP 2011), doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4730707>.
- Madlazim. 2011b. Toward Indonesian Tsunami Early Warning System By Using Rapid Rupture ations Calculation. *Science Of Tsunami Hazards* 32(1):29–38.
- Madlazim, B. J. Santosa, J. M. Lees, dan W. Utama. 2010. Earthquake Source Parameters at Sumatran Fault Zone: Identification of the Activated Fault Plane, *Cent. Eur. J. Geosci.* 2(4):455–474. doi:10.2478/v10085-010-0016-5.,
- Nakamura, M. 2009. Tsunami Numerical Simulation. *Journal of Ryukyu University* 17(1):18–22.
- Nakamura, M. 2006. Source fault model of the 1771 Yaeyama Tsunami Southern Ryukyu island Japan Inferred from Numerical Simulation., *Pure Appl. Geophys.* 163:41–54.
- Natawidjaya, D. H. 2002. Neotectonics of the Sumatera Fault and Paleogeodesy of the Sumatera Sudbuction Zone. Thesis on California Institute of Technology Pasadena.
- Natawidjaya, D. H. 2007. Gempa bumi dan Tsunami di Sumatera dan Upaya Untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup Yang Aman Dari Bencana Alam, Laporan KHL, LIPI, Jakarta. 136 pp.
- Newcomb, K. R., dan W. R. McCann. 1987. Seismic history and seismotectonics of the Sunda Arc. *Journal of Geophysical Research* 92:421–439.

- Okal, E. A. 1988. Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: a review. *Nat. Hazard* 1: 67–96.
- Chamot-Rooke, R. C., M. Pubellier, A. Rabaute, M. Delescluse, C. Vigny, L. Fleitout, dan P. Dubernet. 2009. Stress change and effective friction coefficient along the Sumatara-Andaman-Sagaing fault system after the 26 December 2004 ($M_w = 9,2$) and the 28 March 2005 ($M_w = 8,7$) earthquakes. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 10(3):1–21. doi:10.1029/2008GC002167.
- Setyonegoro, W. 2011. Tsunami Numerical Simulation Applied to Tsunami Early Warning System, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* (12)1:21–32.
- Setyonegoro, W., B. Sunardi, Sulastri, J. Nugraha, dan P. Susilanto. 2012. Analisis Sumber Gempa bumi dengan Potensi Tsunami pada Segmen Mentawai, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 13(2):139–138.
- Setyonegoro, W., S. Khoiridah, dan M. I. Ibad. 2015. "Validasi Pemodelan Tsunami Berdasarkan Software L-2008 Menggunakan Data Sumber Gempa bumi USGS, IRIS, CMT dan GFZ untuk Studi Kasus Tsunami Nias 28 Maret 2005". *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 16(1):25–36.
- UNESCO. 2007. Rangkuman Istilah Tsunami. Jakarta: UNESCO-IOC.
- USGS. 2016. Data historis kejadian gempa bumi. (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). (Agustus 2016).
- Wells, D. L., dan K. J. Coppersmith. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacements. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84:974–1002.