

## Penentuan Percepatan Tanah Puncak di Pulau Simeulue dengan Metode Deterministik

### *Estimation of Peak Ground Acceleration of Simeulue Island Using Deterministic Method*

Lina Handayani<sup>1</sup>, Nugroho D. Hananto<sup>1</sup>, Titi Anggono<sup>2</sup>,  
Syuhada<sup>2</sup>, Karit L. Gaol<sup>1</sup>, Sonny Aribowo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Puslit Geoteknologi LIPI

Jalan Sangkuriang Bandung 40135 Indonesia

<sup>2</sup> Puslit Fisika LIPI

Puspiptek Serpong, Tangerang 15314 Indonesia

<sup>3</sup> UPT Loka Uji Teknik Penambangan dan Mitigasi Bencana Liwa

Pekon Padang Dalam Kecamatan Balik Bukit, Liwa, Lampung – Indonesia

Naskah diterima tanggal 21 April 2015, selesai direvisi tanggal 07 November 2017,

dan disetujui 10 November 2017

e-mail: lina@geotek.lipi.go.id

#### ABSTRAK

Pulau Simeulue terletak di busur muka subduksi Sumatra bagian utara yang merupakan pulau dengan tingkat bahaya kegempaan sangat tinggi. Catatan sejarah kegempaan menunjukkan bahwa pulau ini merupakan daerah dengan bahaya gempa bumi dan tsunami. Bahaya gempa bumi telah disadari oleh penduduk Pulau Simeulue. Walaupun seluruh penduduk telah mengetahui adanya potensi bahaya gempa bumi, diperlukan peta daerah bahaya gempa bumi yang lebih terperinci. Peta bahaya gempa bumi ini diperlukan sebagai panduan dalam pengembangan infrastruktur di pulau ini. Analisis bahaya gempa bumi dengan metode deterministik dilakukan untuk menyusun peta mikrozonasi bahaya gempa bumi Simeulue. Metode ini dipilih berdasarkan kajian dan analisis tektonik dan kegempaan di Simeulue serta data geologi dan geofisika lainnya. Hasil analisis yang berupa nilai percepatan tanah puncak menunjukkan tingkat bahaya kegempaan secara keseluruhan di Pulau Simeulue yang sangat tinggi, dengan nilai percepatan 0,7 hingga 1,3g. Daerah dengan kemungkinan bahaya tertinggi terletak di daerah pesisir barat laut dan terendah terletak di bagian tenggara Pulau Simeulue.

**Kata kunci:** deterministik, gempa bumi, Pulau Simeulue, percepatan tanah puncak

#### ABSTRACT

*Simeulue Island, located at the forearc region of Sumatra subduction zone, is an island with high seismic hazard. History records show the past disasters caused by great earthquakes and tsunamis. People of Simeulue has already known the threat of the possible earthquakes and tsunamis. However, better knowledge of detailed microzonation is needed as a guide for future development of the island. Deterministic seismic hazard analysis was selected for hazard microzonation of the island. The analysis was based on the geological and geophysical data. The result of the analysis indicated a high value of peak ground acceleration (PGA) for the whole area of the island. The highest acceleration occurred along the southwest coast and the lowest occurred at the southeast end part of the Simeulue Island.*

**Keywords:** deterministic seismic hazard analysis, earthquake, Simeulue Island, peak ground acceleration

## PENDAHULUAN

Pulau Simeulue merupakan satu dari deretan pulau kecil di sepanjang sisi barat Sumatra yang merupakan bagian dari prisma akresi pada busur muka zona subduksi Sumatra. Zona subduksi Busur Sunda yang terbentang dari Andaman hingga Sumba memiliki karakter busur muka yang bervariasi. Deretan pulau kecil di sepanjang sisi barat Sumatra, dengan salah satu faktor pembentukannya adalah tingginya tingkat sedimentasi di daerah ini, sehingga dapat membedakan bagian zona subduksi Sumatra dengan bagian lain dari Busur Sunda (Karig dr., 1979; Karig dr., 1980). Perbedaan sifat tektonik di Sumatra juga terjadi akibat miringnya zona subduksi (relatif terhadap arah konvergensi). Kemiringan subduksi menyebabkan tumbuhnya Zona Sesar Sumatra dan Zona Sesar Mentawai (Diament dr., 1992; McCaffrey, 1992; Malod dan Kemal, 1996). Keseluruhan fitur tektonik aktif tersebut tentunya memengaruhi seismisitas di sepanjang Sumatra. Sumber gempa tidak hanya dari pergerakan zona subduksi, tetapi juga dari sesar-sesar aktif di sepanjang busur.

Saat gempa bumi tanggal 26 Desember 2004 dan 28 Maret 2005 terjadi, Pulau Simeulue termasuk daerah yang mengalami kerusakan sangat berat. Guncangan gempa bumi dan tsunami menghabiskan hampir seluruh perkampungan di pantai baratnya. Hal yang tidak dapat terelakkan tersebut karena pulau ini memang tepat berdiri di atas zona seismogenik, yaitu bagian dari lempeng tersubduksi yang terkoyak oleh sesar naik (*thrust*) pada saat terjadi gempa bumi (Byrne dr., 1988; Singh dr., 2011). Kondisi yang sangat rentan terhadap bahaya gempa bumi dan tsunami tersebut menunjukkan pentingnya usaha pengurangan risiko bahaya di Pulau Simeulue.

Untuk skala regional Indonesia, telah terbit satu seri peta resmi bahaya kegempaan (SNI) yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum (Surat Edaran Menteri Nomor: 12/SE/M/2010 Tentang Pemberlakuan Peta Zonasi Gempa Indonesia). Peta tersebut merupakan hasil revisi peta bahaya gempa bumi sebelumnya (Irsyam dr., 2010). Seri tersebut terdiri atas beberapa peta dengan berbagai probabilitas terlampaui. Pada peta bahaya percepatan tanah puncak dengan probabilitas 10% terlampaui dalam waktu 50 tahun, Pulau Simeulue termasuk ke dalam kelas bahaya tertinggi, yaitu dengan percepatan tanah puncak lebih dari 0,8g. Santoso dr. (2011) yang

melakukan penelitian bahaya kegempaan untuk Sumatra dan sekitarnya, dengan disertai data kegempaan yang lebih detail, menunjukkan hasil perhitungan nilai percepatan tanah di pulau-pulau sepanjang sisi barat Sumatra adalah sekitar 0,9 g atau hanya 0,1 g lebih besar dari data SNI tersebut di atas.

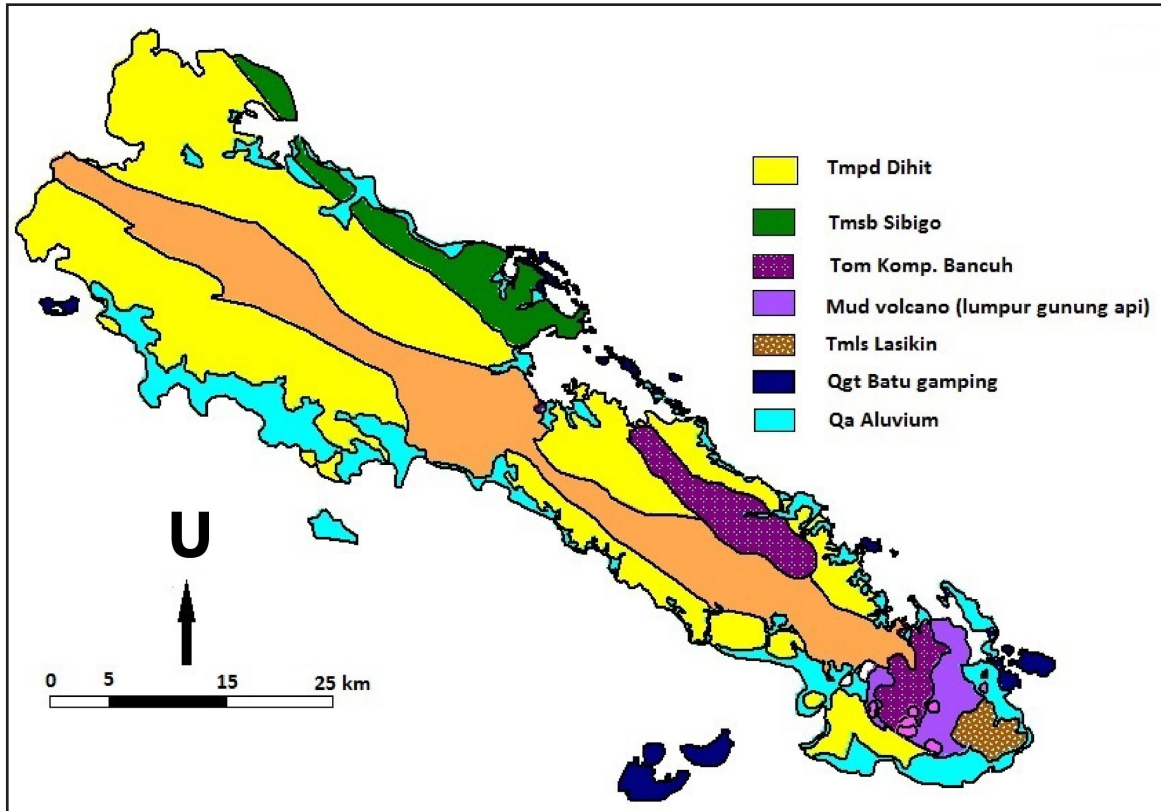
Kedua peta tersebut cukup baik mempresentasikan zona-zona tingkat bahaya kegempaan. Namun, untuk dijadikan bahan acuan dalam pembangunan infrastruktur lokal, diperlukan peta bahaya dengan skala yang lebih kecil lagi (mikrozonasi). Peta ini harus memasukkan sifat-sifat setempat untuk menentukan efek lokal dalam suatu kejadian gempa bumi. Pada tulisan ini dikemukakan hasil analisis bahaya kegempaan dengan metode deterministik berdasarkan satu skenario kejadian gempa (*scenario based deterministic seismic hazard analysis*). Pendekatan ini sangat diperlukan untuk Pulau Simeulue.

## Geologi dan Seismotektonik Pulau Simeulue

Simeulue merupakan suatu pulau yang terbentuk pada prisma akresi di bagian utara busur muka Sumatra. Ciri struktur geologi pada prisma akresi ditandai oleh adanya deretan sesar naik (*thrust*) yang sejajar dengan garis palung (Karig dr., 1979; Schluter dr., 2002; Kopp dr., 2008, Mukti dr., 2012). Biasanya pada prisma akresi ditemukan kompleks batuan bancuh (*mélange*). Di pulau-pulau prisma akresi Sumatra, kompleks batuan tersebut terbentuk karena adanya tekanan berlebih (*overpressure*), yang ditandai dengan munculnya gunung lumpur (*mud diapir*) (Aribowo dr., 2014; Barber, 2013).

Kompleks batuan bancuh dan gunung lumpur (*mud diapir*) tersebut ditemukan di ujung tenggara Pulau Simeulue (Gambar 1). Satuan batuan utama yang mendominasi Pulau Simeulue adalah Formasi Dihit yang merupakan batuan sedimen berumur Tersier. Sedimen berumur Tersier ditemukan juga di sisi timur laut pulau dalam Formasi Sibigo. Batuan beku yang ditemukan di ujung tenggara pulau merupakan bagian dari Formasi Lasikin. Batuan aluvium Kuartar menutupi tepi pantai barat, timur, dan selatan (Endharto dan Sukido, 1994; Aldiss dr., 1993). Indikasi struktur sesar utama di Pulau Simeulue dijumpai berupa kelurusan sesar naik (*thrust*) berarah barat laut - tenggara.

Gempa bumi yang pernah terjadi di sekitar Pulau Simeulue sebarannya seperti terlihat dalam



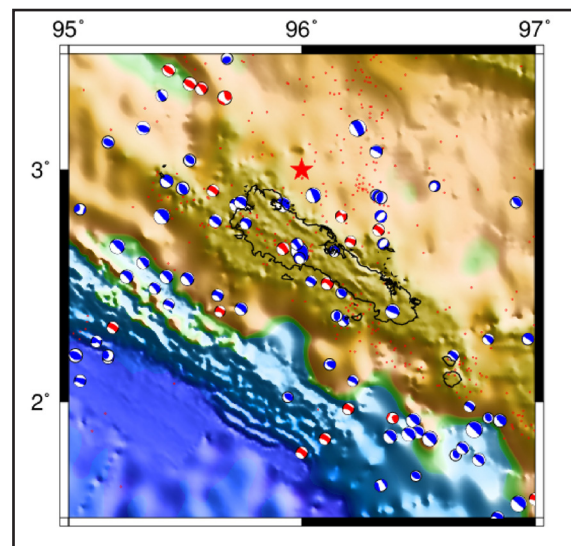
Gambar 1. Peta geologi Pulau Simeulue (modifikasi dari Suwijanto (kom. pri.); Endharto dan Sukido, 1994; Aldiss dr., 1993).

Gambar 2. Dalam gambar ini tampak hampir semua kejadian gempa bumi berasosiasi dengan sesar naik (*thrust*). Kejadian gempa-gempa bumi tersebut dapat dibagi ke dalam beberapa kelompok, yang secara keseluruhan membentuk kelurusan berarah barat laut – tenggara, kecuali satu deretan sesar normal berarah utara - selatan pada bujur 96,3°.

Pola sesar naik (*thrusting*) berarah barat laut - tenggara, yang ditemukan sejajar dengan garis subduksi, mencerminkan pola sumber gempa bumi pada zona seismogenik. Zona seismogenik ini merupakan bagian dari lempeng tersubduksi pada kedalaman kurang dari sekitar 40 km yang merupakan sumber gempa bumi *megathrust*. Gempa bumi besar pada lajur ini kemungkinan besar dapat menyebabkan tsunami (Byrne dr., 1988).

Sejarah kegempaan di Pulau Simeuleu mencatat telah terjadi dua kali gempa bumi besar pada dua belas tahun terakhir, yaitu gempa bumi 26 Desember 2004 dengan magnitudo mencapai 9,3 dan gempa bumi pada 28 Maret 2005 dengan magnitudo 8,6. Gempa bumi pada tahun 2004 merupakan salah satu yang terkuat yang telah menyebabkan kerugian dan korban yang sangat besar. Gempa bumi itu juga menyebabkan tsunami

yang tidak saja menyerang Provinsi Aceh, tetapi juga pantai-pantai di Thailand, Srilanka, India, selatan hingga di pantai timur Afrika (Lay dr., 2005).



Gambar 2. Sebaran episentrum (titik merah) dan mekanisme fokus (bola merah untuk gempa > 40 km; bola biru untuk gempa < 40 km). Bintang merah adalah titik sumber gempa bumi skenario untuk perhitungan DSHA. (Sumber data: Ekström dr., 2012; Becker dr., 2009; Engdahl dr., 2007)

**METODE PENELITIAN**

Stein drr. (2012) berargumen melalui tulisannya mengenai gagalnya peta-peta bahaya gempa bumi yang pernah ada. Pembahasannya meliputi peta bahaya gempa bumi Jepang, Cina, Amerika Serikat, Kanada, Afrika Utara, dan Haiti. Peta-peta tersebut dibandingkan dengan peta bahaya saat terjadi gempa bumi besar. Hasil perbandingan menunjukkan besarnya ketidaksesuaian, terutama pada area yang lebih kecil. Hal tersebut terutama disebabkan oleh banyaknya hal yang belum diketahui mengenai kejadian gempa bumi itu sendiri. Tentunya, semakin banyak data yang dimiliki, maka akan semakin baik peta bahaya gempa buminya. Namun, data utama yang diperlukan adalah data gempa bumi yang panjang. Hal ini sangat sulit diperbaiki saat ini karena perekaman data gempa bumi tidak mungkin bertambah ke masa lalu.

Setiap saat peta bahaya dapat diperbaiki dan diperbaharui, baik dengan data baru maupun metode baru. Oleh karena itu, peta bahaya gempa bumi Pulau Simeulue diupayakan disusun berdasarkan sifat geologi dengan menggunakan metode deterministik.

**Analisis Bahaya Kegempaan Deterministik**

Mikrozonasi daerah berpotensi bahaya gempa bumi untuk Pulau Simeulue dimaksudkan untuk memetakan wilayah yang mengalami bahaya kegempaan dengan membagi wilayah pulau menjadi bagian yang lebih kecil sesuai dengan respons seismik di setiap tempatnya. Pemetaan mikrozonasi di sini dilakukan berdasarkan analisis bahaya seismik yang ditentukan berdasarkan nilai percepatan tanah puncak untuk setiap titik perhitungan.

Terdapat beberapa metode dalam analisis bahaya seismik ,dan yang terpenting diketahui adalah metode probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis – PSHA*) dan deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis – DSHA*). Metode probabilistik PSHA sangat umum dimanfaatkan dalam pemetaan bahaya kegempaan, terutama untuk keperluan pemetaan regional. Dalam PSHA, bahaya kegempaan dinyatakan dalam besarnya getaran tanah dengan kemungkinan (dalam persentase) terlampaui tahunan. Nilainya diperoleh dari model matematika dan berdasarkan hubungan-hubungan statistik antara kejadian-kejadian gempa

bumi dan pergerakan tanah (McGuire, 2001).

Metode DSHA sesungguhnya serupa dengan PSHA, hanya saja tanpa faktor perhitungan probabilitas. Metode ini sangat sesuai digunakan untuk daerah yang data kegempaan sangat sedikit atau ketika suatu gempa bumi besar sudah pasti akan datang (Kataria drr., 2013; Romeo dan Prestininzi, 2000). Metode ini juga sangat sesuai untuk memecahkan masalah sederhana disertai dengan sifat seismisitas dan tektonik yang telah dipahami dengan baik (McGuire 2001; Mourabit drr., 2013). Dalam metode DSHA dengan suatu skenario kejadian, bahaya kegempaan didefinisikan sebagai percepatan tanah puncak yang mungkin terjadi dari satu gempa bumi yang diperkirakan akan terjadi. Metode ini juga digunakan untuk mendetailkan pemetaan bahaya kegempaan pada daerah dengan nilai PSHA yang tinggi (McGuire, 2001).

Di dalam analisis-analisis terdahulu dengan metode PSHA (Irsyam drr., 2010; Santoso drr., 2011), Pulau Simeulue digolongkan ke dalam daerah dengan tingkat bahaya yang sangat tinggi. Dalam penelitian ini metode DSHA digunakan dengan skenario gempa bumi *megathrust* yang bersumber dari sisi timur Pulau Simeulue, tepatnya di titik 96°BT dan 3°LU, kedalaman 30 km dan magnitudo 8 (bintang merah dalam Gambar 2).

Analisis dilakukan dengan pendekatan perhitungan percepatan tanah puncak berdasarkan persamaan empiris Boore (1997, dari Douglas, 2001) yang diperoleh berdasarkan penelitian atenuasi di daerah subduksi. Persamaan Boore 1997 adalah sebagai berikut:

$$\log Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4r + b_5 \log r + b_v(\log V_{s30} - \log V_A)$$

dengan

$r = \sqrt{d^2 + h^2}$ ,  $d$  adalah jarak episentrum,  $M$  adalah magnitudo gempa,  $V_{s30}$  adalah kecepatan gelombang S pada kedalaman 30 m, dan  $Y$  adalah pergerakan tanah horizontal dalam satuan  $g$ . Ada pun konstanta-konstanta yang digunakan adalah  $b_1 = -0.105$ ,  $b_2 = 0.229$ ,  $b_3 = 0$ ,  $b_4 = 0$ ,  $b_5 = -0.778$ ,  $h = 5.57$ ,  $b_v = -0.371$  dan  $V_A = 1400$ , dengan asumsi bahwa gelombang gempa bumi yang diperhitungkan adalah komponen horizontal berarah tak tentu (Douglas, 2001). Penggunaan persamaan atenuasi ini memerlukan data klasifikasi

daerah penelitian yang berdasarkan kecepatan gelombang seismik geser (*shear wave*) untuk 30 m lapisan tanah teratas ( $V_{s30}$ ).

#### Perkiraan Nilai $V_{s30}$

Nilai  $V_s$  diperkirakan berdasarkan satuan litologi permukaan seperti yang dikemukakan oleh Wills dr. (2000), yang mengatakan bahwa satuan geologi pada suatu daerah dibagi menjadi tiga kelompok utama, yaitu batuan keras (B), lunak (C), dan aluvium (D). Batuan beku dan batuan malihan dikelompokkan sebagai batuan keras (B). Batuan sedimen dikelompokkan ke dalam kelompok batuan lunak (C). Batuan beku berumur relatif muda dikategorikan sebagai BC, sedangkan batuan sedimen muda dikelompokkan sebagai CD. Berdasarkan kategorisasi tersebut dan berdasarkan peta geologi Pulau Simeulue yang ada (Gambar 1), maka perkiraan kecepatan  $V_{s30}$  untuk Pulau Simeulue adalah seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

#### Nilai $V_s$ dari pengamatan seismik periode

#### pendek

Nilai  $V_s$  juga diperoleh berdasarkan hasil perhitungan rasio H/V dari pengamatan seismik (Anggono dr., 2016). Rekaman seismik ambien kontinu dianalisis dengan menggunakan metode rasio horizontal terhadap vertikal (*h/v ratio*). Rasio H/V kemudian diinversikan untuk mendapatkan nilai  $V_s$  beberapa lapisan pada setiap titik stasiunnya. Hasil perata-rataan hingga kedalaman 40 m dapat dilihat pada Tabel 2. Pada dasarnya, delapan titik stasiun pengamatan itu dapat dikelompokkan ke dalam dua kelompok besar. Kelompok pertama terdiri atas MAUD, DEHI, LFAK, dan LEWK yang memiliki kecepatan kurang dari 300 m/det.<sup>2</sup> atau termasuk ke dalam batuan kurang kompak (Kelas D). Kelompok kedua terdiri atas BATU, LABU, LUAN, dan PUTR yang memiliki kecepatan lebih dari 300 m/det.<sup>2</sup> atau termasuk ke dalam batuan agak keras (Kelas CD). Nilai  $V_s$  pada masing-masing stasiun ini menjadi masukan tambahan dalam perhitungan percepatan tanah maksimum (*peak ground acceleration*). Hanya saja, terdapat dua

Tabel 1. Karakterisasi Kecepatan Gelombang S pada Kedalaman 30 m

Formasi	Umur	Batuan	Kelas	Perkiraan $V_s$ (m/det. <sup>2</sup> )
Dihit (Tmpd)	Mio-Pliosen Awal	Batu pasir batu lempung	CD	412
Sibigo (Tmsb)	Miosen Tengah	Batu gamping, koral, kalkarenit	C	560
Bancuh (Tom) (Kualamakmur)	Oligo-Miosen	Gabro, basal, filit, rijang ( <i>Melange</i> )	C	560
Lasikin (Tmls)	Miosen Awal	Gabro, basal, rijang	B	760
Mud volcano			CD	412
Batu gamping			CD	412
Aluvium (Qa)	Kuarter	Aluvium	D	270

Tabel 2. Nilai Kecepatan Geser Dangkal pada Stasiun-stasiun Seismik Sementara (Anggono dr., 2015)

Station	Lintang (°S)	Bujur (°E)	$V_{s40}$ (m/det. <sup>2</sup> )
BATU	2,3444	96,4087	376,50
LABU	2,4223	96,3633	416,75
MAUD	2,4674	96,2181	288,50
LUAN	2,6284	96,2048	345,50
PUTR	2,5809	96,0488	457,50
DEHI	2,5479	96,1115	290,75
LFAK	2,8216	95,9309	262,50
LEWK	2,9236	95,8041	213,25

alasan mengapa tambahan tersebut kurang banyak berarti. Pertama, karena sebaran titik stasiun yang sangat sedikit. Dan kedua, data setiap satu titik stasiun tersebut tidak dapat menjadi acuan sebagai nilai Vs untuk daerah sekitarnya. Oleh sebab itu, nilai itu hanya diterapkan pada titik stasiun yang bersangkutan saja.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

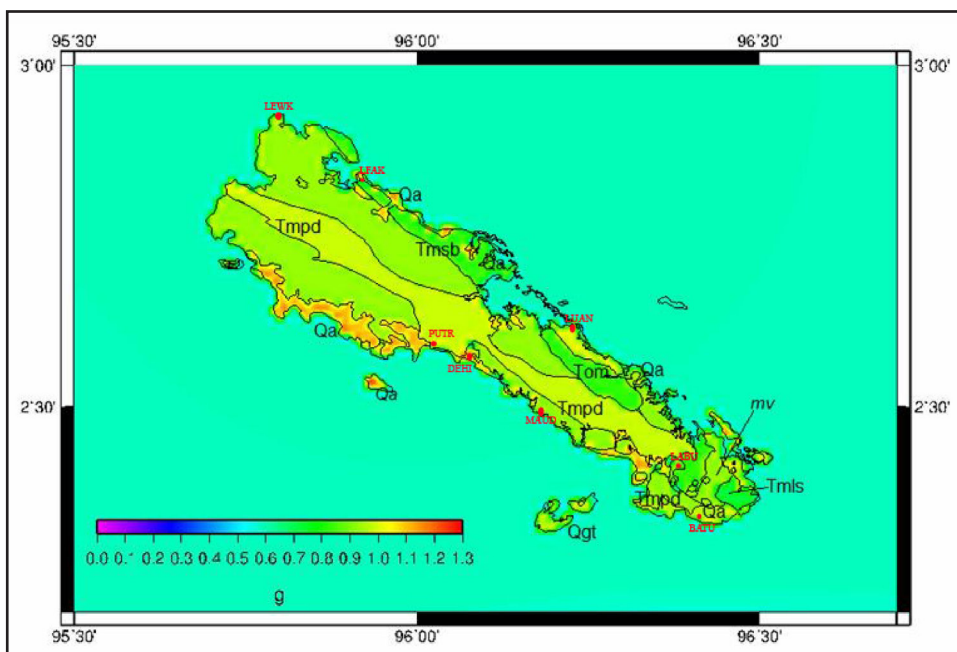
Metode deterministik diterapkan dalam analisis bahaya gempa bumi yang diakibatkan oleh suatu kejadian gempa bumi yang berpusat di sekitar 50 km lepas pantai timur Simeulue Barat (96°BT dan 3°LU), dengan kedalaman 30 km dan magnitudo 8 (bintang merah pada Gambar 2). Hasil analisis berupa nilai percepatan tanah puncak (*peak ground acceleration-PGA*) seperti yang digambarkan pada peta dalam Gambar 3. Peta percepatan tersebut menggambarkan besar percepatan tanah yang diakibatkan oleh getaran gempa bumi. Satuan yang digunakan adalah *g* ( $1 g = 9,8 m/det.^2$ ). Tampak bahwa peta ini mendetailkan peta percepatan yang telah ada sebelumnya ketika Pulau Simeulue dikelompokkan hanya sebagai suatu zona percepatan.

Peta percepatan tanah puncak (Gambar 3) menunjukkan bahwa percepatan (*pga*) pada umumnya sangat tinggi (di atas 0,7 g), yang berarti guncangan akan terasa kuat pada semua titik di Pulau Simeulue dan dapat menyebabkan kerusakan

sedang hingga sangat berat.

Percepatan antara 0,7 – 0,8 g terjadi pada sebagian besar wilayah Pulau Simeulue. Batuan sedimen tersier Formasi Dihit (Tm<sub>pd</sub>) merupakan formasi dominannya. Percepatan tertinggi (antara 1,1 – 1,2 g) terjadi pada daerah dengan batuan aluvium muda (Qa) di sepanjang pantai barat daya bagian utara dan daerah lebih kecil di pantai barat daya bagian selatan. Walaupun lebih dekat dari sumber gempa bumi, percepatan di pantai timur laut tidak terlalu tinggi. Hanya beberapa area kecil saja yang mengalami percepatan di atas 1g. Selain disebabkan oleh sempitnya area endapan aluvium, sisi timur laut pulau juga didominasi oleh endapan sedimen batu gamping (Formasi Sibigo - Tm<sub>sb</sub>) dan kompleks batuan bancuh (Tom) yang memiliki kekerasan batuan relatif lebih tinggi. Zona yang mengalami percepatan paling rendah (0,6 g) terletak di ujung tenggara pulau. Penyebab percepatan rendah adalah karena daerah ini tertutup oleh Formasi Lasikin yang tersusun terutama oleh batuan beku.

Hasil perhitungan percepatan tanah puncak di atas menunjukkan bahwa faktor kekuatan (jenis) batuan akan lebih memengaruhi respons seismik suatu lokasi daripada jaraknya dari sumber gempa bumi. Hal itu ditunjukkan oleh tingginya percepatan di pantai barat daya, sementara sumber gempa bumi ada di lepas pantai timur laut.



Gambar 3. Peta percepatan tanah puncak dengan skenario gempa bumi terjadi pada zona seismogenik di sisi timur Pulau Simeulue (bintang merah pada Gambar 2), dengan kedalaman 30 km dan magnitudo 8. Peta ditumpang susunkan dengan peta geologi. Keterangan nama formasi geologi seperti yang tercantum dalam Gambar 1. Titik dan teks merah adalah stasiun pengamatan seismik yang tercantum dalam Tabel 2.

## KESIMPULAN

Peta bahaya gempa bumi nasional menunjukkan Pulau Simeulue merupakan salah satu daerah dengan tingkat bahaya yang sangat tinggi. Namun, diperlukan pemetaan yang lebih detail, yang dapat memberikan informasi lebih baik untuk usaha mitigasi bahaya kegempaan. Analisis bahaya kegempaan dengan metode deterministik dilakukan berdasarkan suatu skenario kejadian gempa bumi yang mungkin terjadi, dan pengaruhnya akan sangat besar di pulau ini. Hasil pemetaan mikrozonasi menunjukkan bahwa secara keseluruhan Pulau Simeulue akan mengalami percepatan tanah yang sangat tinggi, terutama karena sumber gempa bumi zona seismogenik berada tepat di bawah permukaannya. Beberapa daerah, seperti daerah pesisir barat laut, memerlukan kewaspadaan yang lebih tinggi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian bahaya kegempaan Pulau Simeulue ini merupakan bagian dari Penelitian Kompetitif LIPI Subbidang Kebencanaan dan Lingkungan Tahun anggaran 2013/2014. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Bapak Suwijanto yang telah memberikan hasil interpretasi citra LANDSAT-nya untuk kami pergunakan dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aldiss, D.T., Whandoyo, R., Ghazali, S.A., dan Kusyono, 1993. *Peta Geologi Lembar Sidikalang dan Sebagian Sinabang, Sumatra*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Anggono, T., Syuhada, Hananto, N. D., dan Handayani, L., 2016. Site Response Characteristics of Simuelue Island As Inferred From H/V Spectral Ratio Of Ambient Noise Records. *Journal of Mathematic and Fundamental Sciences*, 48(2), 130 - 142.
- Aribowo, S., Handayani, L., Hananto, N. D., Gaol, K. L., Syuhada, S., dan Anggono, T., 2014. Deformasi Kompleks Di Pulau Simeulue, Sumatra: Interaksi Antara Struktur Dan Diapirisme. *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan*, 24(2), 131. <http://doi.org/10.14203/risetgeotam2014.v24.89>
- Barber, A. J., 2013. The origin of mélanges: Cautionary tales from Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76, 428–438. <http://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.021>
- Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G., Weatherall, P., 2009. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS, *Marine Geodesy*, 32:4, 355 - 371.
- Byrne, D.E., Davis, D., Sykes, M. L.R., 1988. Loci and Maximum size of Thrust Earthquakes and the Mechanics of the Shallow Region of Subduction Zones, *Tectonics*, 7(4), 833 – 857.
- Diament, M., Harjono, H., Karta, K., Deplus, C., Dahrin, D., Zen, M. T., dan Malod, J., 1992. Mentawai fault zone off Sumatra: A new key to the geodynamics of western Indonesia. *Geology*, 20(3), 259-262.
- Douglas, J., 2001. A comprehensive worldwide summary of strong motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). ESEE Report No. 01-1., Imperial College, UK.
- Endharto, M. dan Sukido, 1994. *Peta Geologi Lembar Sinabang, Sumatra*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Engdahl, E. R, Villasenor, A., DeShon, H. R., dan Thurber, C. H., 2007. Teleseismic relocation and assessment of seismicity (1918–2005) in the region of the 2004 Mw 9.0 Sumatra-Andaman and 2005 Mw 8.6 Nias Island great earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97(1A), S43–S61, doi:10.1785/0120050614.
- Ekström, G., Nettles, M., dan Dziewonski, A. M., 2012. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200–201, 1-9, doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaya, D. H., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., Ridwan, M., 2010. Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010. Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, Laporan, AIFDR.
- Karig, D.E., Lawrence, M.B., Moore, G.F., Curray, J.R., 1980. Structural framework of the fore-arc basin, N.W. Sumatra. *Journal of the Geological Society*, London, 137, 77 - 91.

- Karig, D.E., Suparka, S., Moore, G.F., Hehanussa, P.E., 1979. Structure and Cenozoic Evolution of the Sunda Arc in the Central Sumatra region, Dalam: Watkins, J.S., Montadert, L., Dickinson, P.W. (Eds.), *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins, AAPG Memoir 29*. American Association of Petroleum Geologist, h. 223 – 227.
- Kataria, N. P., Shrikhande, M., dan Das, J. D., 2013. Deterministic Seismic Hazard Analysis of Andaman and Nicobar Islands. *Journal of Earthquake and Tsunami, 07(04)*, 1350035:1–19. <http://doi.org/10.1142/S1793431113500358>.
- Kopp, H., Weinrebe, W., Ladage, S., Barckhausen, U., Klaeschen, D., Flueh, E.R., Gaedicke, C., Djajadihardja, Y., Grevemeyer, I., Krabbenhoef, a., Papenberg, C., Zillmer, M., 2008. Lower slope morphology of the Sumatra trench system. *Basin Res. 20*, 519–529. doi:10.1111/j.1365-2117.2008.00381.x
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C., Nettles, M., Ward, S., Aster, R., Beck, S., Bilek, S., Brudzinski, M., Butler, R., DeShon, H., Ekström, G., Satake, K., Sipkin, S., 2005. The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004. *Science*, 308, 1127–1133, doi:10.1126/science.1112250.
- Malod, J. A. dan Kemal, B. M., 1996. The Sumatra margin: oblique subduction and lateral displacement of the accretionary prism. Geological Society, London, Special Publications 1996, 106, 19-28, doi:10.1144/GSL.SP.1996.106.01.03.
- McCaffrey, R. 1992). Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. *Journ. of Geoph. Res.*, 97 (B6), 8905-8915.
- McGuire, R. K., 2001. Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21(5)*, 377–384. [http://doi.org/10.1016/S0267-7261\(01\)00019-7](http://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00019-7)
- Mourabit, T., Abou Elenean, K. M., Ayadi, a., Benouar, D., Ben Suleman, a., Bezzeghoud, M., Zuccolo, E., 2013. Neo-deterministic seismic hazard assessment in North Africa. *Journal of Seismology, 18(2)*, 301–318. <http://doi.org/10.1007/s10950-013-9375-2>
- Mukti, M., Singh, S. C., Deighton, I., Hananto, N. D., Moeremans, R., dan Permana, H., 2012. Structural evolution of backthrusting in the Mentawai Fault Zone, offshore Sumatran forearc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 13(12)*. doi: 10.1029/2012GC004199.
- Romeo, R. dan Prestininzi, A., 2000. Probabilistic versus deterministic seismic hazard analysis: An integrated approach for siting problems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20(1-4)*, 75–84. [http://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00039-7](http://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00039-7)
- Santoso, E., Widiyantoro, S., dan Sukanta, I. N., 2011. Studi hazard seismik dan hubungannya dengan intensitas seismik di Pulau Sumatera dan sekitarnya. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika, 12(2)*, 129–136.
- Schluter, H.U., Gaedicke, C., Roeser, H. A., Schreckenberger, B., Meyer, H., Reichert, C., Djajadihardja, Y., Prexl, A., 2002. Tectonic features of the southern Sumatra-western Java forearc of Indonesia. *Tectonics 21*, 11–1–11–15. doi:10.1029/2001TC901048.
- Singh, S.C., Hananto, N., Mukti, M., Permana, H., Djajadiharja, Y., dan Harjono, H., 2011. Seismic images of the megathrust rupture during the 25th October 2010 Pagai earthquake, SW Sumatra: Frontal rupture and large tsunami. *Geophysical Research Letters 38*, L16313, doi:10.1029/2011GL048935.
- Stein, S., Geller, R.J., dan Liu, M., 2012. Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it. *Tectonophysics 562-563*, 1-25, doi:10.1016/j.tecto.2012.06.047.
- Wills, C.J., Petersen, M., Bryant, W.A., Reichle, M., Saucedo, G.J., Tan, S., Taylor, G., dan Treiman, J., 2000. A site conditions map for California based on geology and shear wave velocity. *Bull. Seism. Soc. Am. 90*, S187-S208.