

---

## ABSTRACT

*Volcanic activity is inseparable from seismic activities and tectonic conditions in the surrounding area. The aim of this paper is to investigate the relationship between earthquakes and volcanic eruptions. The results indicate that after the Mw9.0 Aceh earthquake in 2004, followed by subsequent large aftershocks, has produced positive Coulomb stress changes in the region. Those changes have triggered the disruption of Mount Sinabung in 2010, which has been inactive for four centuries. The cross section that divided Mount Sinabung before the eruption in 2013 also showed positive changes in the Coulomb stress at the lower part of Mount Sinabung, up to a depth of 85 km with lobes up to  $5 \times 10^{-3}$  bars.*

**Keywords:** *volcanic eruption, earthquake, Coulomb stress change, Mount Sinabung.*

---

## PENDAHULUAN

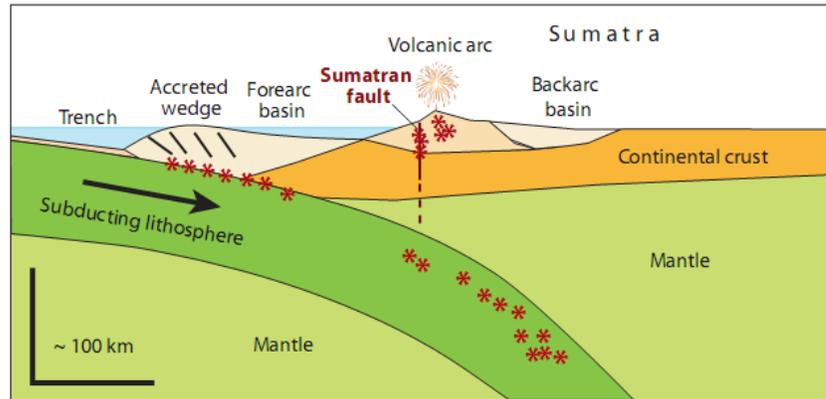
Erupsi Gunung Sinabung pada Agustus 2010 sangat mengejutkan bagi masyarakat yang tinggal di sekitar gunung tersebut. Hal ini dikarenakan gunung tersebut sudah tidak menunjukkan aktivitas kegunungapiannya lagi sejak erupsi terakhir tahun 1600 sehingga masyarakat di sekitar Gunung Sinabung belum memiliki pengalaman dari leluhur mereka yang masih hidup di Dataran Tinggi Karo berkaitan dengan erupsi gunung tersebut. Aktifitas Gunung Sinabung memiliki keunikan apabila ditinjau dari tipenya sehingga menarik untuk diteliti lebih jauh. Sebelumnya, Gunung Sinabung dikategorikan ke dalam tipe B. Tipe gunung ini berubah menjadi tipe A setelah erupsinya pada tahun 2010 (Sutawidjaja et al., 2013).

Gunung Sinabung terletak di Kabupaten Karo, Sumatera bagian utara dengan koordinat  $98,39^{\circ}$  BT dan  $3,17^{\circ}$  LU. Gunung tersebut berjarak 30 km di sebelah timur Segmen Renun dengan panjang sekitar 215 km, yang merupakan bagian dari Sesar Besar Sumatera. Selain itu, di sebelah barat Pulau Sumatera terdapat zona subduksi lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia, yang memiliki tingkat seismisitas tinggi. Aktifitas tektonik yang tinggi setelah kejadian gempabumi Aceh 2004 membuat wilayah disekitarnya menjadi labil sehingga mempengaruhi tatanan tektonik maupun vulkanik wilayah tersebut.

Aktifitas gunungapi merupakan rangkaian dari aktifitas tektonik (Daryono, 2010). Jika aktivitas gempabumi memiliki pengaruh terhadap erupsi gunungapi, maka keaktifan gunungapi tidak terlepas dari kondisi seismisitas dan kondisi tektonik di sekitar daerah tersebut. Namun tidak setiap daerah memiliki potensi yang sama berkaitan dengan hubungan kausal antara gempabumi dengan gunungapi. Posisi gunung terhadap sesar, kondisi tektonik yang aktif, perubahan *Coulomb stress*, serta kecenderungan arah *rupture* dapat menjelaskan sejauh mana hubungan kausal tersebut.

Hubungan yang menyatakan pengaruh antara kejadian gempabumi dengan peningkatan aktifitas erupsi gunungapi telah didiskusikan dalam beberapa kejadian erupsi di beberapa negara pada tahun 1823, 1835, 1840, 1902, dan 1943 (Voight et al., 2000). Jika aktifitas gunungapi merupakan rangkaian dari aktifitas tektonik, apakah terdapat hubungan antara gempabumi besar yang terdapat di Sumatera bagian utara serta gempabumi lokal yang disebabkan oleh aktivitas Sesar Besar Sumatera terhadap erupsi Gunung Sinabung tahun 2010 dan 2013. Bagaimana hubungan tersebut menjelaskan pengaruh yang di timbulkan oleh gempabumi tektonik terhadap erupsi gunung api.

Daerah Sumatera bagian utara berdekatan dengan sistem subduksi lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia. Konvergensi lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia tersebut menghasilkan proses penunjaman miring di sepanjang Pulau Sumatera. Penunjaman tersebut menghasilkan dua struktur utama, yaitu sistem sesar zona subduksi sepanjang palung laut Sumatera dan sistem sesar dekstral Sumatera (Natawidjaja dan Sieh, 1994).



**Gambar 1.** Skematik cross section dari batas lempeng Sumatera. Tanda bintang menunjukkan mayoritas sumber gempa bumi (Mc Caffery, 2009).

Penunjaman tersebut juga menghasilkan rangkaian busur pulau depan (*forearc islands*) yang bersifat non-vulkanik, dan rangkaian pegunungan Bukit Barisan dengan jalur vulkanik di tengahnya (Gambar 1). Selain rawan akibat gempa bumi yang disebabkan tumbukan lempeng, Sumatera bagian utara juga sangat rawan terhadap aktivitas sesar aktif yang terdapat pada sistem Sesar Besar Sumatera.

*Coulomb stress* merupakan penjumlahan *normal stress* dengan *shear stress*. Perubahan *Coulomb stress* yang disebabkan oleh gempa bumi utama (CFF) diberikan oleh persamaan 2.1.

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma + \Delta p) \tag{1}$$

Dimana  $\Delta\tau$  adalah shear stress yang diberikan oleh bidang patahan (positif dalam arah pergeseran),  $\Delta\sigma$  adalah perubahan pada *normal stress* (positif apabila patahan tidak mengalami klem),  $\mu$  adalah koefisien gesek *apparent* yang didapatkan setelah mempertimbangkan efek dari tekanan pori fluida yang biasanya direpresentasikan dengan  $\mu^f$  dan  $\Delta p$  adalah perubahan tekanan pori, umumnya kurang dikenal namun sebanding dengan perubahan normal stress (Ge dan Stover, 2000; Cocco dan Rice, 2002).

Beberapa studi terdahulu pada umumnya menggunakan Persamaan 2 berikut dimana koefisien gesekan *apparent* ( $\mu^f$ ) sudah termasuk dalam  $\Delta p$ .

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu^f \cdot \Delta\sigma \tag{2}$$

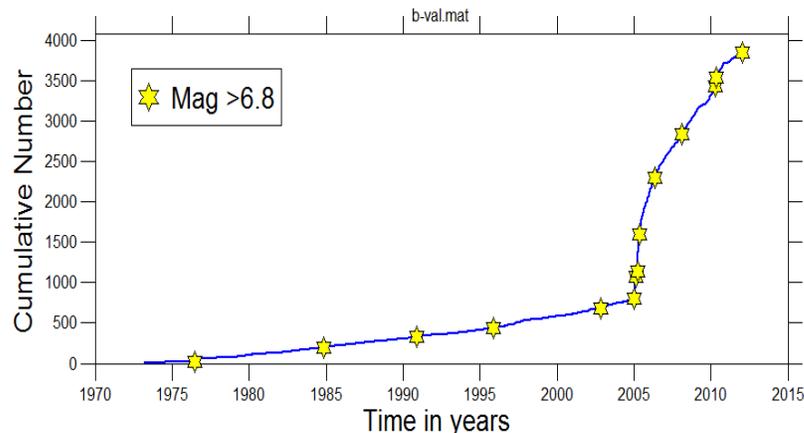
Koefisien gesekan *apparent* ( $\mu^f$ ) biasanya diasumsikan antara 0.4-0.8 untuk patahan yang memiliki akumulasi slip rendah atau cenderung kasar. Sementara itu, untuk patahan yang memiliki akumulasi slip tinggi atau tekanan pori tinggi diasumsikan dalam rentang nilai antara 0.0-0.4. Dalam tulisan ini diasumsikan  $\mu^f$  yang digunakan adalah 0.4 sebagai nilai tengah dari rentang 0.0-0.8, dengan *poisson ratio* = 0.25 dan *shear modulus* =  $3.2 \times 10^5$  bar (King et al, 1994). Terdapat dua pendekatan untuk mendapatkan perubahan *Coulomb stress*, yang pertama dengan mempertimbangkan geometri dan *rake* pada patahan, dan yang kedua dengan terkonsentrasi pada tektonik dan stres regional.

**METODOLOGI**

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data mekanisme fokal dan data seismisitas gempabumi di daerah Sumatera bagian utara. Data mekanisme fokal diunduh dari Global CMT selama periode 2004 – 2010 dan periode bulan April 2010 sampai Agustus 2013 sedangkan untuk data seismisitas gempabumi diunduh dari <http://earthquake.usgs.gov/earthquake/search> untuk periode 2004-2010 dan dari hasil pemantauan jaringan gempabumi Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) untuk periode bulan April 2010 sampai Agustus 2013. Lokasi penelitian terletak pada  $0^{\circ}$  LS -  $18^{\circ}$  LS dan  $86^{\circ}$  BT -  $100^{\circ}$  BT didasarkan pada lokasi episenter gempabumi dengan  $M > 7.0$  SR di Sumatera bagian utara dan lokasi Gunung Sinabung. Penelitian ini meliputi tahap pengambilan (akuisisi) data, pengolahan (processing) data, dan interpretasi terhadap hasil pengolahan data.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

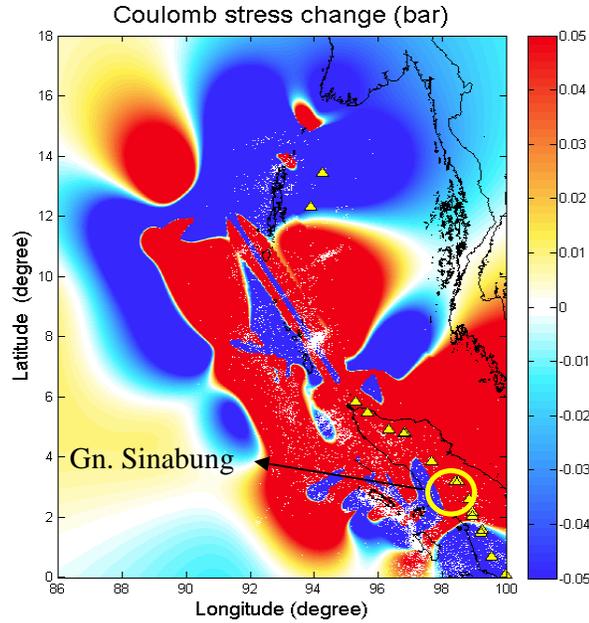
Hubungan gempabumi dengan aktivitas vulkanik gunungapi telah dikaji sebelumnya oleh beberapa studi (misalnya Nakahara *et al.*, 2005). Sebelum letusan Gunung Sinabung terjadi, dua kali gempabumi besar dalam rentang empat bulan, dengan magnitudo 7,1 SR pada 9 Mei 2010 dan 7,6 SR pada 6 April 2010 yang lokasinya berada pada daerah Segmen Renun yang merupakan bagian dari Sesar Besar Sumatera dengan arah Baratlaut-Tenggara. Peningkatan erupsi Sinabung yang didahului aktivitas kumulatif gempabumi tektonik (Gambar 2) ini mirip dengan erupsi serempak Gunungapi Karimsky dan Akademia Nauk (1996) di Semenanjung Kamchatka, Rusia serta erupsi Gunung Merapi (2010).



**Gambar 2.** Plot kumulatif gempabumi (Pratama *et al.*, 2012).

Sebuah gempabumi kuat ( $M_w 7.1$ ) terjadi di Kamchatka di awal Januari 1996 yang lokasinya di jalur zona sesar aktif berarah Baratdaya-Timurlaut. Hanya dalam tempo dua hari pasca gempabumi tersebut, dua gunung api yang berjarak sekitar 10-20 kilometer dari pusat gempabumi sebuah serempak meletus (Walter, 2007). Kasus yang hamper sama juga terjadi di Yogyakarta. Menurut Daryono (2010), serangkaian gempabumi tektonik yang terjadi di Yogyakarta memicu terjadinya letusan Gunung Merapi dalam rentang waktu tiga bulan sejak Agustus 2010 Gempabumi yang mengguncang Daerah Yogyakarta dan sekitarnya adalah gempabumi tanggal 21 Agustus 2010 (5,0 SR) 3 September 2010 (5,0 SR), 11 Oktober 2010 (3,9 SR), 28 Oktober 2010 (4,0 SR), dan 28 Oktober 2010 (3,2 SR).

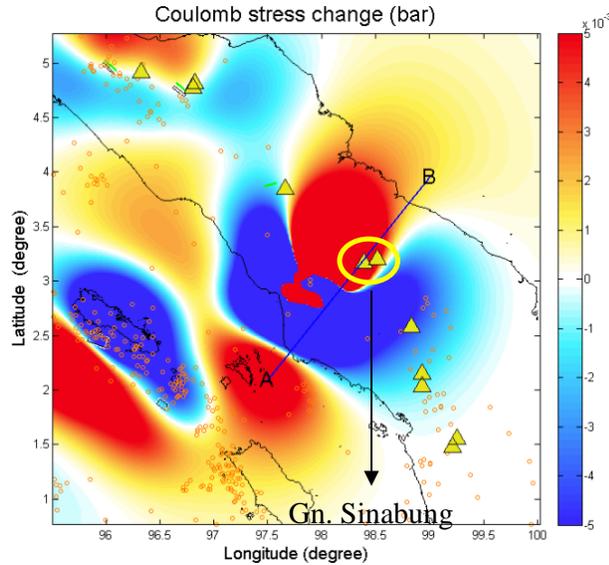
Sementara itu, perubahan *Coulomb stress* sebelum erupsi Gunung Sinabung yang ditimbulkan baik oleh gempabumi Aceh 2004 maupun gempabumi dengan magnitudo di atas 7 SR mengakibatkan beberapa daerah mengalami deformasi statis. Dari plot seismisitas, kebanyakan gempabumi terjadi pada daerah dengan perubahan *Coulomb stress* positif. Nilai *Coulomb stress* positif diduga memicu keaktifan pada daerah tersebut yang diakibatkan oleh gempabumi besar sebelumnya. Perubahan *Coulomb stress* positif juga terjadi pada daerah Gunung Sinabung yang memicu terjadi gangguan pada dapur magma Sinabung yang tertidur selama 400 tahun (Gambar 3).



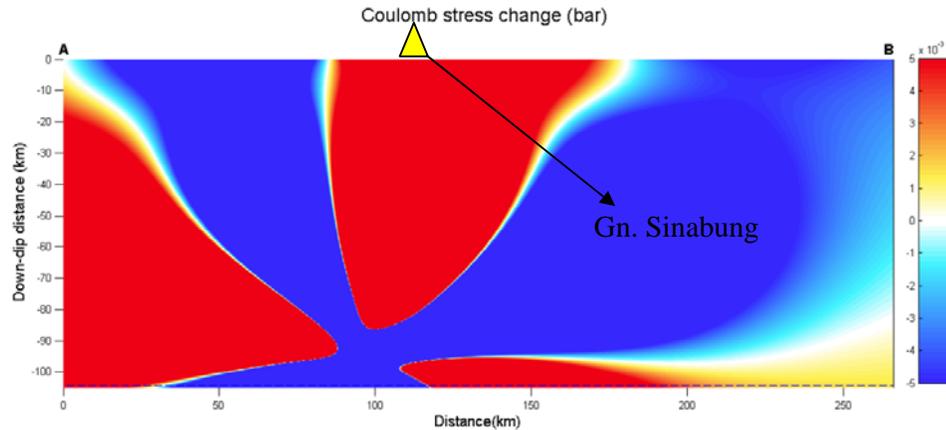
Gambar 3. Perubahan Coulomb stress setelah gempa bumi Aceh dan gempa bumi besar setelahnya.

Setelah Erupsi Tahun 2010

Setelah meletus di 2010, Gunung Sinabung kembali mengalami erupsi pada September 2013. Erupsi tersebut didahului oleh 4 kejadian gempa bumi tektonik dangkal yang diakibatkan oleh aktivitas Sesar Besar Sumatera di sekitar Gunung Sinabung dan 2 kejadian gempa bumi tektonik dengan kedalaman dangkal-menengah yang diakibatkan oleh zona subduksi. Lokasi gempa bumi tersebut relatif dekat dengan Gunung Sinabung dengan  $M_w > 6.0$ . Penujaman subduksi *megathrust* yang landai membuat dapur magma Sinabung berada pada kedalaman dangkal-menengah mengeluarkan erupsi freatik. Hal ini ditunjukkan dengan adanya dua kejadian gempa bumi kedalaman dangkal-menengah tersebut.



Gambar 4. Perubahan Coulomb stress sebelum erupsi Gunung Sinabung tahun 2013.



**Gambar 5.** Irisan melintang perubahan Coulomb stress sebelum erupsi tahun 2013.

Aktivitas tektonik tersebut menghasilkan perubahan stress positif pada daerah disekitar Gunung Sinabung (Gambar 4). Irisan melintang yang membelah Gunung Sinabung (Gambar 5) sepanjang 275 km juga menunjukkan perubahan *Coulomb stress* positif terdapat pada bagian bawah Gunung Sinabung hingga mencapai kedalaman 85 km dengan lobus mencapai  $5 \times 10^{-3}$  bar. Kondisi tekto-vulkanik yang masih labil mengakibatkan ekstrusi magma yang terus menerus mendapat tekanan yang menyebabkan dapur magma penuh dan menimbulkan tekanan naik. Ekstrusi magma baru ke permukaan ini akan memicu lebih banyak lagi magma yang naik ke atas sehingga Sinabung menjadi semakin aktif.

#### *Hubungan Gempabumi Dengan Erupsi Gunungapi*

Menurut Walter dan Amelung (2007), gempabumi tidak hanya dapat menentukan waktu erupsi tetapi juga dapat menentukan mekanisme struktur erupsi. Mekanisme yang menghasilkan magma bertekanan tinggi meliputi intrusi dan pencampuran magma yang dengan magma yang memiliki komposisi berbeda (Spark *et al.*, 1977). Munculnya erupsi freatik pada Gunung Sinabung sesuai dengan penelitian Eichelberger (1980) yang menemukan pelepasan sejumlah gas yang terjebak di dalam reservoir menyebabkan ekspansi volumetrik akibat guncangan oleh gempabumi.

Berkaitan dengan perubahan *Coulomb stress*, gradien warna menunjukkan perbedaan tekanan. Warna merah menunjukkan perubahan *Coulomb stress* positif yang mengindikasikan bahwa gaya tekan mengarah ke daerah tersebut, sedangkan warna biru menunjukkan perubahan stress negatif yang mengindikasikan bahwa di daerah tersebut tidak mengalami gaya tekan.

#### **KESIMPULAN**

Gempabumi Aceh dengan Mw9.0 dan gempabumi dengan Mw>7 yang menghasilkan perubahan *Coulomb stress* positif di daerah Gunung Sinabung dan sekitarnya memicu terjadinya erupsi dahsyat pada 27 Agustus 2010. Perubahan *Coulomb stress* positif juga dihasilkan oleh gempabumi dangkal-menengah dan gempabumi dangkal yang memiliki lokasi pusat gempa relatif dekat dengan Gunung Sinabung sebelum erupsi tahun 2013. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan *Coulomb stress* positif memiliki pengaruh terhadap aktifitas gunungapi.

Peningkatan seismisitas setelah gempabumi Aceh 2004 mengakibatkan kondisi tekto-vulkanik di daerah sekitarnya menjadi labil sehingga menyebabkan Gunung Sinabung aktif kembali setelah tertidur selama lebih dari 400 tahun. Tingginya aktifitas seismik pada daerah yang mengalami perubahan *Coulomb stress* positif mengindikasikan masih tingginya tegangan kerak bumi yang tersimpan di daerah Sumatera bagian utara.

Kondisi seperti ini perlu menjadi perhatian bagi masyarakat di daerah Sumatera bagian utara mengingat masih banyaknya gunungapi aktif. Perlu diwaspadai bahwa beberapa aktifitas seismik dapat membangunkan gunungapi yang tertidur selama ratusan tahun.

## DAFTAR PUSTAKA

- Centroid Moment Tensor. <http://www.globalcmt.org>, diakses pada 27 November 2013.
- Cocco, M., and J. R. Rice. 2002. Pore Pressure and Poroelasticity Effects in Coulomb Stress Analysis of Earthquake Interactions. *J. Geophys. Res.*, 107(B2), 2030, doi:10.1029/2000JB000138.
- Daryono. 2010. Aktivitas Gempabumi Tektonik di Yogyakarta Menjelang Erupsi Merapi 2010. *Prosiding Scientific Journal Club BMKG 2011*.
- Eichelberger, J.C., 1980, Vesiculation of Mafic Magma During Replenishment of Silicic Magma Reservoirs: *Nature*, v. 288, p. 446–450, doi: 10.1038/288446a0.
- Eggert, S., T. R. Walter. 2009. Volcanic Activity Before and After Large Tectonic Earthquakes: Observations and statistical significance, *Tectonophysics xxx (2009) xxx–xxx*
- Ge, S., and S. C. Stover. 2000. Hydrodynamic Response to Strike And Dip Slip Faulting in a Half Space. *J. Geophys. Res.*, 105, 25,513–25,524, doi:10.1029/2000JB900233.
- King, dkk. 1994. Static Stress Changes and The Triggering of Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 84, pp. 935-953.
- Mc Caffrey, R. 2009. The Tectonic Framework of the Sumatran Subduction Zone. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 37: 345-366.
- Miao, M., Shou-Biou, Z. 2012. A Study of the Impact of Static Coulomb Stress Changes of Megathrust Earthquakes Along Subduction Zone on the Following Aftershocks. *Chinese Journal of Geophysics Vol.55, No.5, 2012, Pp: 539–551*.
- Nishimura, dkk. 2005. Temporal Changes in Seismic Velocity of The Crust Around Iwate Volcano, Japan, as Inferred from Analyses of Repeated Active Seismic Experiment Data from 1998 to 2003. *Earth Planets Space*, 57, 491–505, 2005.
- Pratama, I Putu Dedy, dkk. 2012. Studi Analisa Perubahan Nilai-b untuk Prediksi Gempabumi Wilayah Sumatera Bagian Utara. *Prosiding Scientific Journal Club BMKG 2012*.
- Rollins, John C. and Stein, Ross S. 2010. Coulomb Stress Interactions Among  $M \geq 5.9$  Earthquakes in The Gorda Deformation Zone and on The Mendocino Fault Zone, Cascadia Subduction Zone, and Northern San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, b12306, doi:10.1029/2009jb007117, 2010.
- Sieh K, Natawidjaja D. 1994. Neotektonik Sistem Sesar Sumatera. *Prosiding Hasil Penelitian Puslitbang Geotektonik LIPI*.
- Sutawidjaja, I. S. 2013. The August 2010 Pheratic Eruption of Mount Sinabung, North Sumatra. *Indonesian Journal of Geology*, Vol 8 No 1 March 2013: 55-61.
- Sparks, R.S.J., Sigurdsson, H., and Wilson, L. 1977. Magma Mixing; A Mechanism for Triggering Acid Explosive Eruptions: *Nature*, v. 267, p. 315–318, doi: 10.1038/267315a0.
- Toda Shinji, dkk. 2011. Using the 2011  $M=9.0$  Tohoku Earthquake to Test the Coulomb Stress Triggering Hypothesis and to Calculate Faults Brought Closer to Failure. *Earth Planets Space*, 63, 1–6, doi:10.5047/eps.2011.05.010, 2011.
- Ulandari. 2008. Pemodelan Seismotektonik Busur Sunda Wilayah Sumatera Dengan Analisa Coulomb Stress. *Skripsi ITB*.
- USGS. <http://earthquake.usgs.gov/earthquake/search>, diakses pada 28 November 2013
- Voight, B., E. K. Constantine, S. Siswawidjono, and R. Torley. 2000 .Historical eruptions of Merapi volcano, Central Java, Indonesia, 1768–1998. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 100(1– 4), 69– 138.



- Walter, T.R. 2007. How a tectonic earthquake may wake up volcanoes: Stress transfer during the 1996 earthquake–eruption sequence at the Karymsky Volcanic Group, Kamchatka, *Earth and Planetary Science Letters* 264 (2007) 347–359.
- Walter, T.R., Amelung, F., 2007. Volcanic Eruptions Following M9 Megathrust Earthquakes: Implications for the Sumatra–Andaman Volcanoes. *Geology* 35 (6), 539–542.
- Walter, T.R., Wang, M. Zimmer, H. Grosser, B. Luehr, and A. Ratdomopurbo. 2007. Volcanic activity influenced by tectonic earthquakes: Static and dynamic stress triggering at Mt. Merapi, Geoph. *Research Letters*, Vol. 34, L05304.
- Wegler, U., dkk. 2006. Increase of Shear Wave Velocity before 1998 Eruption of Merapi Volcano (Indonesia). *Geophysical Research Letter* vol. 33, L09303, doi:10.1029/2006GL025928, 2006.