

**PENGARUH JENIS SESAR
TERHADAP DISTRIBUSI PERUBAHAN TEGANGAN COULOMB STATIS
PADA KASUS GEMPA BUMI DENGAN $M_w \geq 5,9$
DI SUMATERA SELATAN PERIODE 2012-2016**

Anis Sugiarti¹⁾, Madlazim²⁾

¹⁾ Mahasiswa Prodi S1-Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email : anissugiarti01@gmail.com

²⁾ Dosen Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email : madlazim@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas mengenai pengaruh jenis sesar terhadap distribusi perubahan tegangan Coulomb statis pada gempa bumi $M_w \geq 5,9$ di Sumatera Selatan periode 2012-2016. Peningkatan tegangan Coulomb statis di sekitar bidang patahan gempa bumi dapat memicu terjadinya gempa susulan. Data yang digunakan untuk menghasilkan plot perubahan tegangan Coulomb statis pada *software Coulomb 3.3* terdiri atas parameter bidang patahan (*strike, dip, rake*) dan parameter gempa bumi (episenter, magnitudo, kedalaman) yang diambil dari GEOFON. Pada gempa bumi 14 September 2012 M_w 6,1 dengan jenis *thrust fault*, peningkatan tegangan terjadi di daerah yang sejajar bidang patahan. Pada gempa bumi 15 Mei 2015 M_w 5,9 dengan jenis *oblique strike slip fault*, peningkatan tegangan terjadi di daerah yang berada sejajar dan tegak lurus bidang patahan. Sedangkan pada gempa bumi 01 Juni 2016 M_w 6,4 dengan jenis *oblique normal fault*, peningkatan tegangan terjadi di daerah yang berada tegak lurus bidang patahan. Berdasarkan ketiga kasus gempa bumi di atas, gempa bumi 01 Juni 2016 M_w 6,4 merupakan gempa bumi yang memiliki daerah peningkatan tegangan paling luas di antara yang lain. Hal tersebut dipengaruhi oleh arah pergerakan patahan yang searah dengan gravitasi bumi, besar magnitudo dan sudut kemiringan bidang patahan.

Kata Kunci: perubahan tegangan Coulomb statis, bidang patahan.

Abstract

This study discusses about the effect of fault types on the distribution of Coulomb static stress change in the case of $\geq 5,9 M_w$ earthquakes at the Southern of Sumatra for 2012-2016 period. Increasing Coulomb static stress change around the fault plane area might triggered aftershocks. To plot the Coulomb static stress change using *Coulomb 3.3 software*, we used GEOFON data which consists of fault plane focal mechanism (*strike, dip, rake*) and the earthquake parameters (epicenter, magnitude, depth). On September 14, 2012 M_w 6,1 earthquake which has thrust fault type show that increasing stress area occurs in the parallel field of fault plane. On May 15, 2015 has been occurred 5,9 M_w of earthquake which has oblique strike slip fault type which triggered of increasing stress area were located in the parallel and perpendicular of fault plane. Whereas on June 01, 2016 earthquake of M_w 6,4 with oblique normal fault type has been triggered of increasing stress in area that perpendicular of fault plane. Among the three cases of earthquake above, the June 01, 2016 earthquake (M_w 6,4) has wider area of increasing stress. It is caused by the effect of slip orientation which has same direction with earth gravity, magnitude and dip of the fault plane.

Keywords: Coulomb static stress change, fault plane, triggered, aftershocks.

PENDAHULUAN

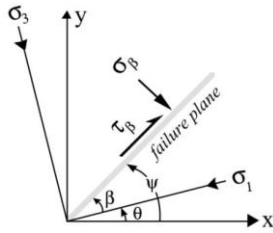
Sumatera Selatan menjadi salah satu wilayah dengan potensi kegempaan terbesar di Indonesia. Hal tersebut disebabkan adanya konvergensi lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia. Akibatnya, terbentuk banyak patahan aktif di sekitar batas konvergensi yang dapat menyebabkan gempa bumi.

Gempa bumi di Sumatera Selatan, baik magnitudo kecil maupun besar terjadi secara berkesinambungan hampir di setiap tahunnya. Gempa bumi besar ($M_w \geq 5,9$) selalu diikuti oleh rentetan gempa susulan di mana

kekuatannya bergantung pada tingkat seismisitas daerah, jenis batuan, dan magnitudo gempa utama (Shcherbakov *et al.*, 2013). Gempa susulan merupakan proses stabilisasi untuk menyeimbangkan tegangan yang lepas pada saat gempa utama.

Gempa bumi memicu terjadinya perubahan tegangan yang dapat menginduksi atau menghambat aktivitas seismik di sekitar patahan. Perubahan tegangan timbul akibat gaya yang bekerja pada pergerakan antar lempeng (Olsen-Kettle *et al.*, 2007). Perubahan tegangan di sekitar bidang patahan dijelaskan dalam konsep Coulomb menggunakan sistem koordinat 2D (gambar 1), di mana

sebuah bidang patahan membentuk sudut kemiringan (ψ) setelah dikenai tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ).



Gambar 1 Sistem koordinat perhitungan perubahan tegangan Coulomb statis (King *et al.*, 1994)

Secara matematis, perubahan tegangan Coulomb statis ($\Delta\sigma_f^{opt}$) dinyatakan dalam :

$$\Delta\sigma_f^{opt} = \Delta\tau - \mu'\Delta\sigma \quad (1)$$

dengan

$$\Delta\sigma = \sigma_{xx}\sin^2\psi - 2\sigma_{xy}\sin\psi\cos\psi + \sigma_{yy}\cos^2\psi \quad (2)$$

$$\Delta\tau = (\sigma_{yy} - \sigma_{xx})\sin 2\psi + \tau_{xy}\cos 2\psi \quad (3)$$

Potensial slip akan meningkat apabila $\Delta\sigma_f > 0$, artinya perubahan tegangan Coulomb statis yang timbul pada patahan pertama dapat mendorong terjadinya patahan kedudi lokasi yang memiliki distribusi tegangan Coulomb statis positif, sehingga memicu terjadinya gempa susulan.

Lay *et al.* (2011) melakukan penelitian pada kasus gempa bumi M_w 9,0 di Tohoku pada 11 Maret 2011 dengan jenis sesar turun (*normal fault*). Orientasi sesar searah dengan zona subduksi Jepang yang mengarah ke timur laut-barat daya. Peningkatan tegangan Coulomb antara 5-10 bar memicu terjadinya lebih dari 50 kejadian gempa susulan dengan $M_w \geq 5,0$ di sekitar patahan gempa utama. Mitsakaki *et al.* (2013) meneliti perubahan tegangan Coulomb statis pada kasus gempa bumi 04 November 1973 M_w 5,8 dengan jenis sesar naik (*thrust fault*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi gempa susulan relatif berada di daerah yang sejajar dengan orientasi sesar dengan peningkatan tegangan Coulomb statis antara 0,1 hingga 1 bar. Penelitian sejenis dilakukan Madlazim (2015) pada kasus gempa bumi Aceh M_w 6,1 dengan jenis sesar *oblique strike slip* pada 21 Januari 2013. Peningkatan tegangan Coulomb statis sekitar 0,01 bar memicu terjadinya dua kejadian gempa susulan pada 02 Juli 2013 dengan M_w 5,2 dan M_w 5,5.

METODE

Setiap gempa bumi memiliki sesar yang berbeda-beda. Dalam penelitian ini, dilakukan variasi jenis sesar yang terdiri atas *thrust fault*, *strike slip fault*, dan *normal fault* untuk melihat pengaruh masing-masing sesar terhadap distribusi tegangan Coulomb statis di sekitar patahan gempa bumi. Data kejadian gempa bumi dengan $M_w \geq 5,9$ dan gempa susulan dengan $M_w \geq 5,0$ di Sumatera Selatan

periode 2012-2016 diambil dari jaringan stasiun seismik GEOFON-BMKG IA (<http://webdc.eu/webdc3>). Untuk menghasilkan plot perubahan tegangan Coulomb statis sebagai *output* dari penelitian ini, digunakan data parameter bidang patahan (*strike, dip, rake*) dan parameter gempa bumi (*episenter, magnitudo, kedalaman*) yang bersumber dari katalog GEOFON (<http://geofon.gfz-potsdam.de>). Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah gempa bumi diasumsikan terjadi pada medium elastis homogen, artinya kecepatan penajalaran gelombang seismik di bawah permukaan tanah adalah sama. Konstanta-konstanta elastisitas medium diasumsikan memiliki nilai rasio Poisson 0,25, modulus Young 8×10^{10} N/m², modulus geser $3,3 \times 10^{10}$ N/m² dan koefisien friksi 0,4 (Toda *et al.*, 2011).

Tabel 4.1 Parameter CMT gempa bumi dengan $M_w \geq 5,9$ di Sumatera Selatan periode 2012-2016

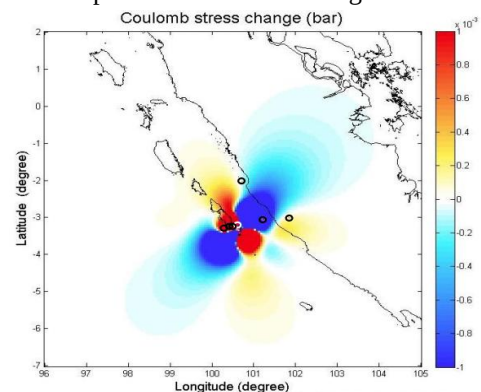
(<http://geofon.gfz-potsdam.de>)

Kejadian	Lat (°)	Lon (°)	Kedalaman (km)	M_w	St (°)	Dp (°)	Rk (°)	Beach ball	Jenis sesar	Jumlah gempa susulan $M_w \geq 5,0$
14/09/2012	-3,32	100,64	33,0	6,1	120	74	71		Thrust fault	6
15/05/2015	-2,63	102,20	143,0	5,9	207	77	36		Oblique Strike Slip fault	2
01/06/2016	-2,13	100,67	56,0	6,4	336	80	-89		Oblique Normal fault	3

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Gempa bumi 14 September 2012

Jenis sesar yang menyebabkan gempa bumi 14 September 2012 M_w 6,1 adalah sesar naik (*thrust fault*). Orientasi bidang patahan sesuai dengan pola subduksi busur Sunda, yaitu mengarah ke tenggara-barat laut. Plot perubahan tegangan Coulomb statis sesuai dengan parameter CMT pada tabel 1 adalah sebagai berikut :



Gambar 2 Plot perubahan tegangan Coulomb statis gempa bumi 14 September 2012 M_w 6,1 (*thrust fault*)

Distribusi perubahan tegangan Coulomb statis terbagi menjadi enam bidang lobus, yaitu tiga bidang lobus positif dan tiga bidang lobus negatif (gambar 2). Bidang lobus positif merupakan daerah berwarna merah menunjukkan

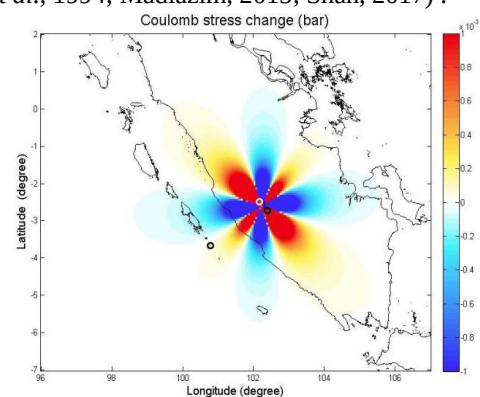
adanya peningkatan tegangan Coulomb statis. Orientasi bidang lobus positif mengarah ke tenggara-barat laut dan timur dari episenter gempa utama M_w 6,1 dengan rentang nilai 0,0001 hingga 0,001 bar. Orientasi tersebut sejajar dengan arah pergerakan patahan pada sesar naik. Bidang lobus negatif yang merupakan daerah berwarna biru menunjukkan daerah dengan penurunan tegangan Coulomb statis yang memiliki orientasi ke arah timur laut-barat daya, dan tenggara dari episenter gempa bumi M_w 6,1 dengan kisaran penurunan tegangan Coulomb statis antara -0,00005 hingga -0,001 bar. Orientasi bidang lobus negatif tersebut tegak lurus dengan arah pergerakan patahan. Pada jenis sesar naik (*thrust fault*), peningkatan tegangan Coulomb statis relatif hanya terjadi di daerah yang sejajar bidang patahan gempa bumi. Adanya peningkatan tegangan Coulomb statis akan mendorong batuan yang ada di sekitar patahan gempa utama untuk bergeser. Ketika tegangan yang diberikan pada batuan melampaui batas elastisitas batuan, maka terjadilah patahan lain yang menyebabkan terjadinya gempa susulan. Empat dari enam kejadian gempa susulan dengan $M_w \geq 5,0$ konsisten terjadi di daerah dengan peningkatan tegangan Coulomb statis. Hasil penelitian ini relevan dengan hasil penelitian (Mitsakaki *et al.*, 2013; Gianniou, 2015; Sboras *et al.*, 2016).

b. Gempa bumi 15 Mei 2015

Berbeda dengan kasus gempa bumi sebelumnya, pada 15 Mei 2015 telah terjadi gempa bumi berkekuatan M_w 5,9 dengan jenis sesar *oblique strike slip fault*, yaitu kombinasi dari patahan geser (*strike slip*) dan patahan vertikal (*dip slip*) di mana pergerakan patahan geser ke arah horizontal lebih mendominasi. Orientasi bidang patahan berada tegak lurus *Sumatran Fault Zone* (SFZ). Hal ini mengindikasikan bahwa penyebab gempa bumi 15 Mei 2015 M_w 5,9 bukan sesar besar SFZ, melainkan sesar lokal atau sesar minor yang ada di sekitar sesar besar SFZ. Terdapat banyak sesar minor dengan berbagai orientasi di sekitar sesar mayor SFZ yang belum memiliki identitas. Pola sesar minor ini terbentuk karena perkembangan dari sesar mayor SFZ. Sesar minor terdapat pada daerah tektonik di sekitar sesar mayor SFZ yang mengalami peningkatan tegangan (kompresi) yang kuat.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa pola perubahan tegangan Coulomb statis yang dihasilkan dari perhitungan menggunakan *software Coulomb 3.3* terbagi menjadi delapan bidang lobus, di mana empat di antaranya adalah bidang lobus positif (daerah berwarna merah) dan empat lainnya adalah bidang lobus negatif (daerah berwarna biru). Bidang lobus positif yang menunjukkan daerah dengan peningkatan tegangan Coulomb statis memiliki orientasi ke barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya.

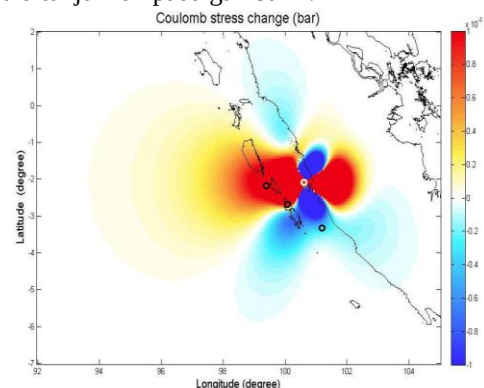
Kisaran peningkatan tegangan di sekitar patahan bernilai 0,0005 bar hingga 0,001 bar. Daerah yang mengalami peningkatan tegangan Coulomb statis ini adalah daerah yang sejajar dan tegak lurus bidang patahan. Bidang lobus negatif yang merupakan daerah yang mengalami penurunan tegangan akibat pergerakan patahan memiliki orientasi ke utara-selatan dan barat-timur dengan rentang nilai penurunan tegangan berkisar antara -0,0005 bar hingga -0,001 bar. Daerah yang mengalami penurunan tegangan Coulomb statis ini adalah daerah yang memiliki orientasi tegak lurus dan sejajar terhadap bidang patahan. Dua kejadian gempa susulan dengan $M_w \geq 5,0$ konsisten terjadi di daerah dengan peningkatan tegangan Coulomb statis. Hasil penelitian ini relevan dengan hasil penelitian (King *et al.*, 1994; Madlazim, 2015; Shan, 2017).



Gambar 3 Plot perubahan tegangan Coulomb statis gempa bumi 15 Mei 2015 M_w 5,9 (*oblique strike slip fault*)

c. Gempa bumi 01 Juni 2016

Hasil analisis plot perubahan tegangan Coulomb statis pada gempa bumi 01 Juni 2016 M_w 6,4 dengan jenis sesar *oblique normal fault* yang memiliki orientasi barat laut-tenggara ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4 Plot perubahan tegangan Coulomb statis gempa bumi 01 Juni 2016 M_w 6,4 (*oblique normal fault*)

Plot perubahan tegangan Coulomb statis pada kasus gempa bumi 01 Juni 2016 M_w 6,4 menunjukkan adanya pembagian beberapa bidang lobus, yaitu dua bidang lobus positif dan empat bidang lobus negatif. Orientasi bidang lobus positif cenderung tegak lurus bidang patahan, yaitu berada pada arah timur-barat. Sedangkan bidang lobus negatif memiliki orientasi yang relatif sejajar dengan

orientasi bidang patahan, yaitu mengarah ke tenggara-barat laut dan barat daya-timur laut. Peningkatan tegangan Coulomb statis berkisar antara 0,0001 hingga 0,001 bar, sedangkan penurunan tegangan Coulomb statis berkisar antara -0,00005 hingga -0,001 bar. Pada sesar turun atau kombinasinya, peningkatan tegangan Coulomb statis didominasi oleh daerah yang berada tegak lurus bidang patahan. Dua dari tiga kejadian gempa susulan konsisten terjadi di daerah dengan peningkatan tegangan Coulomb positif dengan orientasi ke barat terhadap episenter gempa utama. Hasil penelitian ini relevan dengan hasil penelitian (Nostro *et al.*, 2005; Lay *et al.*, 2011; Medina & Cherkaoui, 2017).

PENUTUP

Simpulan

Pada gempa bumi 14 September 2012 M_w 6,1 dengan jenis *thrust fault*, peningkatan tegangan terjadi di daerah yang sejajar bidang patahan. Pada gempa bumi 15 Mei 2015 M_w 5,9 dengan jenis *oblique strike slip fault*, peningkatan tegangan terjadi di daerah yang berada sejajar dan tegak lurus bidang patahan. Sedangkan pada gempa bumi 01 Juni 2016 M_w 6,4 dengan jenis *oblique normal fault*, peningkatan tegangan terjadi di daerah yang berada tegak lurus bidang patahan. Berdasarkan ketiga kasus gempa bumi di atas, gempa bumi 01 Juni 2016 M_w 6,4 merupakan gempa bumi yang memiliki daerah peningkatan tegangan paling luas di antara yang lain. Hal tersebut dipengaruhi oleh arah pergerakan patahan yang searah dengan gravitasi bumi, besar magnitudo dan sudut kemiringan bidang patahan.

Saran

Untuk melakukan perhitungan perubahan tegangan Coulomb statis pada bidang patahan ketika gempa bumi terjadi, akan lebih mudah apabila digunakan *software Coulomb 3.3*, karena dapat diperoleh visualisasi grafis yang memudahkan dalam proses analisis pendistribusian tegangan di sekitar patahan. Berdasarkan plot tersebut, dapat diketahui daerah-daerah yang berpotensi terjadi gempa susulan. Tidak ada kendala teknis yang menghambat dalam pengumpulan dan pengolahan data menggunakan *software Coulomb 3.3*. Pemilihan stasiun seismik sebagai sumber data sekunder parameter bidang patahan dan parameter gempa bumi sebaiknya mempertimbangkan kualitas data. Jaringan stasiun seismik GEOFON BMKG-IA direkomendasikan untuk dijadikan sebagai sumber data sekunder karena telah terkonfirmasi kebenarannya. Penelitian mengenai pengaruh jenis sesar terhadap distribusi perubahan tegangan Coulomb statis dapat diterapkan di semua wilayah rawan bencana gempa bumi, sehingga dapat menjadi acuan untuk antisipasi dini gempa bumi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak dan sumber data yang telah berkontribusi banyak dalam penelitian ini, antara lain kepada lembaga stasiun seismik GEOFON BMKG-IA (<http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/>); Shinji Toda, Ross Stein, Jian Lin, dan Volkan Sivelgen yang telah menciptakan *software Coulomb 3.3* beserta buku pedoman dan video tutorialnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Gianniou, M. (2015). Fault-Slip Source Models for the 2014 M_w 6.9 Samothraki-Gökçeada Earthquake (North Aegean Trough) Combining ..., (December). <https://doi.org/10.1002/2015JB012052>
- King, G. C. P., Stein, R. S., & Lin, J. (1994). Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, (March), 46.
- Lay, T., Ammon, C. J., Kanamori, H., Kim, M. J., & Xue, L. (2011). Outer trench-slope faulting and the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 63(7), 713–718. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.006>
- Madlazim. (2015). Coulomb stress changes due to recent aceh earthquakes. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Aplikasinya*, 5(1), 9–14.
- Medina, F., & Cherkaoui, T. (2017). The South-Western Alboran Earthquake Sequence of January-March 2016 and Its Associated Coulomb Stress Changes, (March 2016), 35–54. <https://doi.org/10.4236/ojer.2017.61002>
- Mitsakaki, C., Rondoyanni, T., Anastasiou, D., Papazissi, K., Marinou, A., & Sakellariou, M. (2013). Static stress changes and fault interactions in Lefkada Island, Western Greece. *Journal of Geodynamics*, 67(January 2012), 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.04.007>
- Nostro, C., Chiaraluce, L., Cocco, M., Baumont, D., & Scotti, O. (2005). Coulomb stress changes caused by repeated normal faulting earthquakes during the 1997 Umbria-Marche (central Italy) seismic sequence, 110, 1–19. <https://doi.org/10.1029/2004JB003386>
- Olsen-Kettle, L. M., Weatherley, D., Gross, L., & Muhlhaus, H. B. (2007). Multicycle Dynamics of Fault Systems and Static and Dynamic Triggering of Earthquakes. *Proceedings of the Australian Earthquake Engineering Society Conference*. Retrieved from <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:124106>
- Sboras, S., Karastathis, V., Papadopoulos, G. A., & Pavlides, S. (2016). EARTHQUAKE TRIGGERING EFFECT SCENARIOS DURING THE 2014 SEQUENCE IN CEPHALONIA AND 2015 ... *Bulletin of the Geological Society of Greece*, L(May).

- Shan, B. (2017). Tectonic implications and seismicity triggering during the 2008 Baluchistan , Pakistan earthquake sequence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45(April), 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.003>
- Shcherbakov, R., Goda, K., Ivanian, A., & Atkinson, G. M. (2013). Aftershock statistics of major subduction earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(6), 3222–3234. <https://doi.org/10.1785/0120120337>
- Toda, S., Stein, R. S., Sevilgen, V., & Lin, J. (2011). *Coulomb 3.3 Graphic-Rich Deformation and Stress Change Software for Earthquake, Tectonic, and Volcano Research and Teaching-User Guide*. U.S.Geological Survey.