

KAJIAN HUBUNGAN ANTARA DISTRIBUSI GEMPA SUSULAN ACEH 26 DESEMBER 2004 TERHADAP DISTRIBUSI PERUBAHAN TEKANAN COULOMB (COULOMB STRESS CHANGE)

Sabar Ardiansyah

ABSTRACT

During the last few years, scientists have been focusing on studying the interaction between the aftershocks distribution and the change of coulomb stress, as well as the interaction between one major earthquake and other earthquake events, which were closely located. The aim of this paper is to examine the distribution of aftershocks of Aceh earthquake on December 2005 from the changes of coulomb stress pattern. The main earthquake data, along with rupture parameters, were treated as the inputs for analyzing the coulomb stress change, with the help from a software package, Coulomb v3.3. The results showed that 49.8% of the aftershocks of the Aceh earthquake on 26 December 2004 is distributed on the areas where positive coulomb stress change were calculated, whereas the rest is located on the negative change.

Keywords: Aceh earthquake, coulomb stress change, aftershocks.

PENDAHULUAN

Beberapa tahun belakangan, banyak peneliti mempelajari atau memfokuskan penelitian terhadap peranan *static coulomb stress change* (ΔCFS) untuk mempelajari hubungan antara gempa utama terhadap distribusi gempa susulan serta interaksi antara gempa besar yang satu dengan gempa lain disekitarnya (Harris *et al.*, 1998; Stein *et al.*, 1999; King *et al.*, 2001; Freed *et al.*, 2005; Toda *et al.*, 2005; Shi *et al.*, 2010). King *et al.* (1994) menghitung ΔCFS yang disebabkan oleh gempabumi Landers tahun 1992 ($M_w = 7,3$) pada bidang patahan optimum dan patahan sekitarnya. Mereka menemukan bahwa sebaran distribusi gempabumi susulan pada area peningkatan stress yang menunjukkan aktivitas zona reduksi. Penelitian lain pada gempabumi Selatan California yang dimodelkan oleh Deng *et al.* (1997) untuk enam gempa bumi dengan kekuatan $7.0 < M < 7.5$ sampai gempabumi dengan kekuatan $M \geq 7.5$ rentang tahun 1812 – 1995. Sekitar 95% lokasi gempabumi untuk kekuatan $M \geq 6.7$ konsisten terletak pada area peningkatan *coulomb stress change* yang ditandai dengan nilai ΔCFS positif. Sedangkan gempabumi berkekuatan $M \geq 5.0$ sekitar 85% terletak pada area peningkatan *coulomb stress change*. Wan *et al.* (2000) mengeksplorasi masalah kompleks antara beberapa event yang saling memicu sejak tahun 1920 di area timur laut Qianghai-Tibet berdasarkan formula Okada. Hasilnya menunjukkan bahwa gempabumi Hoh Xil tahun 2001 merupakan hasil dari perubahan ΔCFS yang disebabkan oleh gempa bumi sebelumnya yaitu gempa Huashixia tahun 1937, gempa Dulan 1963, dan gempa Mani tahun 1973 dan 1997.

Serta masih banyak penelitian para ahli lain untuk melihat hubungan antara *coulomb stress change* baik terhadap distribusi gempabumi susulan maupun interaksi antara gempabumi yang satu dengan gempabumi yang lain. Melalui tulisan ini, penulis mencoba menganalisis hubungan antara pola *coulomb stress change* yang disebabkan oleh gempabumi dahsyat pada tanggal 26 Desember 2006 di Aceh terhadap distribusi gempa susulannya.

METODOLOGI

Data Penelitian

Data yang dipakai pada penulisan paper ini menggunakan data katalog USGS yang diambil dari website USGS (<http://usgs.gov/>). Data input untuk perubahan *Coulomb Stress Shange*

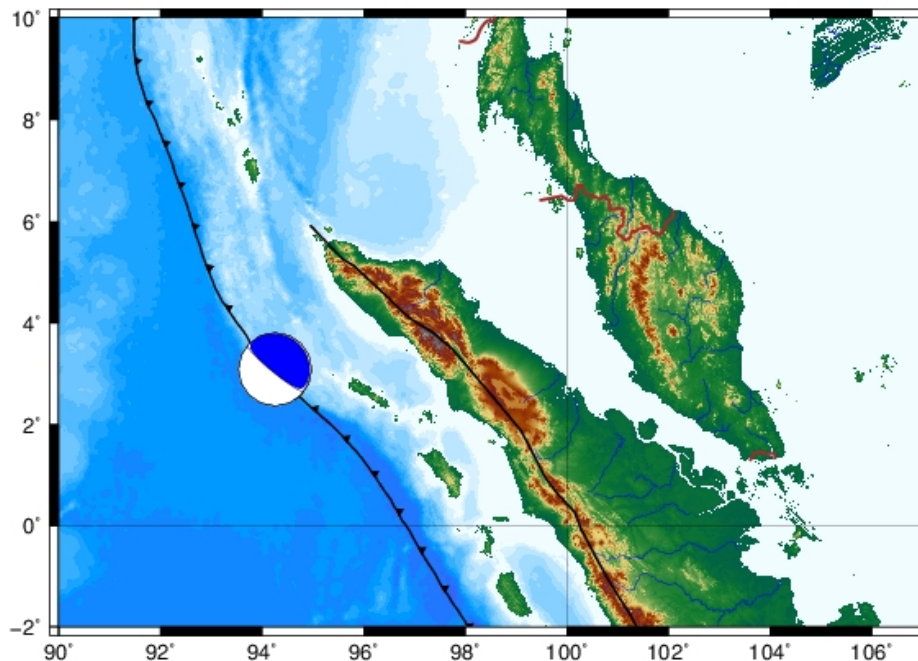
digunakan mekanisme sumber/parameter sesar dari data gempabumi pada tanggal 26 Desember 2004 berkekuatan 9,1 Mw pukul 00:58:53 UTC.

Tabel 1. Data gempa tanggal 26 Desember 2004 (sumber: USGS).

No	Tanggal	OT (UTC)	Lat	Long	Depth (km)	Magnitudo (Mw)
1	26-12-2004	00:58:53	3.09° LU	94.26° BT	28.6	9.1

Tabel 2. Mekanisme sumber gempa tanggal 26 Desember 2004 (sumber: USGS).

NO	Tanggal	Nodal 1			Nodal 2		
		Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake
1	26-12-2004	329°	8°	110°	129°	83°	87°



Gambar 1. Plot focal mekanisme gempabumi Aceh 26 Desember 2004.

Konsep Kriteria Pembebanan Coulomb Stress

Meskipun informasi geometri mengenai gempabumi dan patahan dapat dipecahkan oleh para ahli seismologi, geodesi, dan data geologi, gambaran lengkap mengenai mekanika gempabumi tetap sulit dipahami. Kalkulasi perubahan stress statik oleh gempabumi utama yang mempengaruhi gempabumi berikutnya disajikan pada awal tahun 1970-an, tetapi tidak diadopsi oleh komunitas ilmiah dalam kajian bahaya gempabumi (*assessment seismic hazard*). Perubahan sekitar 0,1 Mpa (1 bar) yang hanya sebagian kecil dari penurunan stress selama gempabumi dianggap tidak signifikan, sedangkan hasil pada saat itu didominasi oleh hasil secara kualitatif. Dalam dua dekade terakhir, banyak penelitian yang dilakukan untuk mempelajari tegangan statik. Model yang banyak digunakan untuk menjelaskan interaksi patahan adalah perubahan tegangan Coulomb (*Coulomb stress change*).

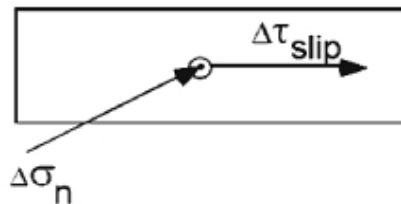
Ketika patahan menghasilkan gempabumi, patahan ini akan mendorong perubahan stress pada patahan di sekitarnya atau patahan di dekatnya. Untuk memperkirakan perubahan ini, yang disebut *Coulomb stress*, digunakan kalkulasi menggunakan model elastik setengah ruang (*elastic half space*) pada bidang persegi yang diasumsikan homogeny isotropi (Okada *et al.*, 1992).

Dengan mengasumsikan model friksi coulomb sederhana (*simple coulomb friction model*) untuk gempabumi, slip potensial akan meningkat atau menurun pada *coulomb failure stress*, (Okada *et al.*, 1992), yang didefinisikan sebagai :

$$\sigma_f = \tau - \mu(\sigma_n + P) \quad (1)$$

Di mana σ_f adalah *Coulomb failure*, τ adalah *shear stress*, σ_n adalah *normal stress*, P adalah tekanan pori (*pore fluid pressure*) dan μ adalah koefisien friksi. Slip potensial mengarah ke kanan atau ke kiri. Nilai dari σ_f dalam hal ini harus selalu positif, namun sebaliknya proses yang berlangsung dalam mencari nilai stress ke patahan dapat diberikan nilai positif maupun negatif bergantung pada *slip potensial* mengarah ke kanan atau ke kiri. Untuk koefisien friksi yang konstan, maka persamaan (1) dapat ditulis :

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n + \Delta P) \quad (2)$$



Nilai P merubah normal stress efektif sepanjang bidang patahan seperti ditunjuk persamaan (1). Ketika stress batuan berubah dengan cepat selanjutnya P berubah dalam aliran jalar. Nilai P dapat dihubungkan dengan koefisien Skemptions B , dimana nilainya bervariasi antara 0 dan 1. Koefisien friksi efektif dalam penelitian stress koseismik bervariasi antara 0,01 hingga 0,75, dengan nilai rata-rata $\mu = 0,4$. Persamaan (1) selanjutnya dapat ditulis dengan asumsi bahwa σ_f mewakili batasan stress seperti normal stress pada bidang. $\Delta\sigma_f$ diselesaikan pada bidang patahan pertama dan dalam arah slip pada bidang patahan kedua atau patahan penerima (*receiver fault*).

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu' \Delta\sigma_n \quad (3)$$

Di mana koefisien friksi efektif dinyatakan dengan $\mu' = \mu(1 - B)$. Selanjutnya jika $\Delta\sigma_f > 0$ *potensial slip* akan meningkat dan jika $\Delta\sigma_f < 0$ *potensial slip* akan berkurang. Kalkulasi $\Delta\sigma_f$ yang disebabkan oleh gempabumi bergantung kepada geometri dan distribusi *slip*, magnitudo, orientasi stress regional serta nilai dari asumsi koefisien friksi. Rasio dari amplitudo stress regional terhadap *stress drop* gempabumi hanya berdampak signifikan di dekat patahan, di mana ketidakpastian $\Delta\sigma_f$ dalam beberapa kejadian selalu didominasi oleh ketidakpastian distribusi *slip*.

ΔCFS (*Coulomb Failure Stress*) didefinisikan sebagai bidang *failure* spesifik atau sering disebut sebagai *receiver fault*, yang menyebabkan terjadinya gempabumi saat $\Delta\sigma_f > 0$. Meskipun perubahan ΔCFS menyebabkan gempa lebih kecil daripada akumulasi stress, banyak aktivitas seismik menunjukkan dengan kenaikan nilai *coulomb stress* lebih dari 0.01 MPa sudah cukup untuk membangkitkan satu kejadian (Harris, 1998; Ziv *et al.*, 2000). Selama penyelidikan interaksi gempabumi yang memicu, bisa kita definisikan orientasi bidang patahan optimal dengan nilai perubahan stress yang lebih besar daripada orientasi patahan pada tempat yang sama jika mekanisme fokal gempabumi susulan belum diketahui.

Ini bisa menjelaskan distribusi gempabumi susulan dan perkiraan spasial sebuah event gempabumi dimasa yang akan datang (King *et al.*, 1994; Stein *et al.*, 1983).

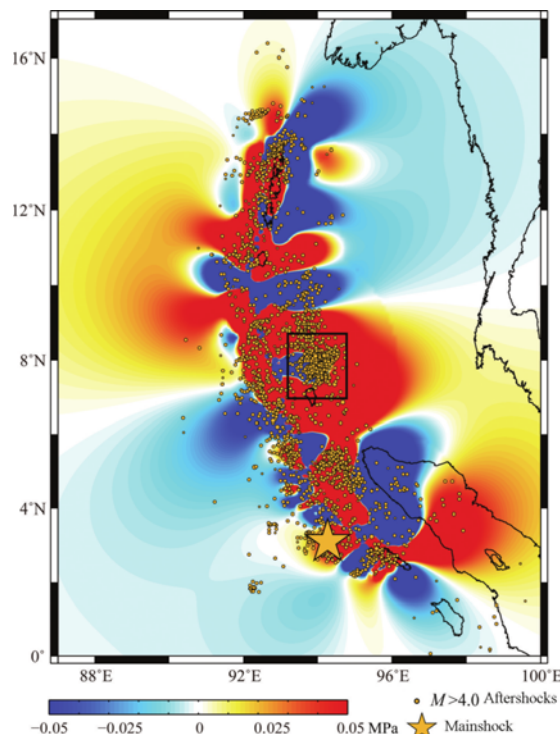
Pada prinsipnya jika $\Delta CFS > 1$ (bernilai positif), artinya patahan pertama dapat mendorong patahan kedua mengalami peningkatan stress, peluang terjadi *failure* pada patahan kedua lebih besar, sedangkan jika $\Delta CFS < 1$ (bernilai negatif), patahan pertama mendorong patahan kedua mengalami relaksasi peluang terjadinya *failure* semakin kecil, daerah ini disebut daerah *stress shadow*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gempabumi dahsyat Aceh 26 Desember 2004 berkekuatan $M_w = 9.1$ terjadi pada pukul 00:58:53 UTC. Gempabumi berpusat pada koordinat 3.09 LU 94.26 BT dengan kedalaman 28.6 km. Gempa ini memiliki solusi bidang sesar dengan *strike* atau arah jurus 329° , *dip* atau kemiringan sesar 8° , serta *rake* atau arah slip 110° . Gempabumi ini merupakan gempabumi terbesar dalam kurun waktu 40 tahun terakhir. Dengan panjang *rupture* mencapai 1200 km.

Pemodelan *dislokasi* yang dipakai berdasarkan publikasi yang pernah dimodelkan oleh Chich *et al.* (2007) yaitu merupakan pemodelan cukup kompleks. Pada perhitungan pemodelan ini slip maksimum mencapai 17 m di sekitar hiposenter dengan tiga sub patahan dengan *strike* masing-masing 5° , 342° , 315° dan *dip* masing-masing sub patahan 17° , 15° , 12° . Ketiga sub patahan ini membujur dari utara ke selatan pada zona patahan palung Andaman. Total slip mencapai 695 yang terdistribusi secara spasial yang tidak simetri serta *rupture* mencapai kedalaman 52.6 km.

Pada perhitungan nilai coulomb stress, asumsi yang dipakai berdasarkan metode elastic setengah ruang (*elastic half-space*), Stein *et al.* (1994) Poisson's ratio 0.25, koefesien friksi efektif 0.4, dan modulus geser 3.3×10^4 MPa. Plotting distribusi gempabumi untuk gempa magnitudo $M > 4.0$ diambil dari website USGS.



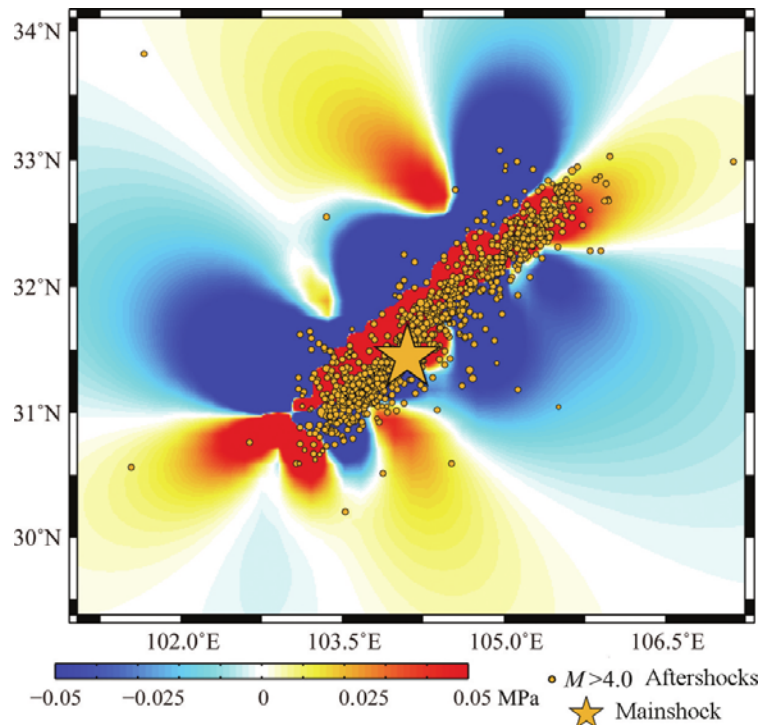
Gambar 2. Coulomb stress change gempa Aceh 26 Desember 2004 dan distribusi gempa susulannya, Miao *et al.* (2012).

Distribusi *Coulomb stress* dapat dilihat pada Gambar 2, secara umum terdistribusi membujur sepanjang arah barat-laut-tenggara mengikuti zona bidang patahan. Pada segmen bagian selatan patahan, dengan nilai ΔCFS berkisar 0.03 MPa, meskipun selama empat tahun terdapat lebih dari lima gempa besar ($M > 7.0$) setelah gempa utama, namun tiga diantara gempa $M > 7.0$ tersebut berada pada wilayah penurunan nilai ΔCFS atau wilayah nilai negatif. Ini menunjukkan bahwa pemodelan elastik setengah ruang tidak terlalu bagus untuk menggambarkan efek pemicu sebuah event (*triggering effect*).

Distribusi gempa susulan sepanjang bidang patahan pada palung Andaman (lihat kotak hitam pada Gambar 2), pada wilayah ini lebih dari 70% *aftershocks* berada pada kedalaman 30 km.

Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara distribusi gempa susulan terhadap spasial nilai ΔCFS . Sekitar 49.8% gempa susulan terdistribusi pada area ΔCFS dengan nilai positif atau wilayah peningkatan stress, dengan 46% nya berada pada zona sumber bidang *failure*. Sedangkan pada area penurunan nilai stress yang ditunjukkan nilai ΔCFS negatif (-1 sampai -0.1 MPa) sekitar 60% gempa susulan terdistribusi pada area ini. Menurut Miao *et al.* (2012) pada wilayah zona mega trusht pemodelan distribusi *aftershocks* terhadap ΔCFS belum bisa menggambarkan hubungan yang baik.

Namun, distribusi gempa susulan masih konsisten berada pada wilayah perubahan ΔCFS positif untuk gempa-gempa pada zona *intraplate*. Seperti yang pernah ditulis oleh Toda *et al.* (2008), distribusi gempa susulan terhadap perubahan ΔCFS untuk gempa *intraplate* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3 untuk gempa *intraplate* Wenchuan tahun 2008 dengan kekuatan 7.9. Lebih dari 85% gempa susulan terdistribusi pada wilayah dengan perubahan ΔCFS positif dan membujur sepanjang patahan.



Gambar 3. *Coulomb stress change* gempa Wenchuan 12 Mei 2008 dan distribusi gempa susulannya (Miao *et al.*, 2012).



KESIMPULAN

Dari analisis di atas dapat disimpulkan bahwa distribusi gempa susulan Aceh 26 Desember 2004 terhadap perubahan ΔCFS hanya 49.8% saja yang berada pada wilayah ΔCFS positif atau area peningkatan stress. Sedangkan pada area penurunan stress, ΔCFS negatif, distribusi gempa susulan mencapai 60%. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan elastik setengah ruang (*elastic half-space*) untuk gempa zona interplate / mega thrust belum bisa menggambarkan hubungan yang baik. Namun, hubungan yang baik untuk perubahan nilai ΔCFS dan distribusi gempa susulan masih konsisten untuk gempa-gempa *intraplate*.

DAFTAR PUSTAKA

- Astra, IMKA. 2011. Coulomb Static Stress Change Dalam Interaksi Gempabumi Doublets 5.8 Mw dan 5.9 Mw 23 Januari 2007 dan Gempabumi 7.0 Mw 16 Juni 2010 di Wilayah Papua. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika* 12 (1), 103-109.
- Chlieh, M. 2007. *Tectonics Observatory at Caltech Slip History database: Sumatra Earthquake, Update 1*. (<http://www.tectonics.caltech.edu/sliphistory/2004sumatra/sumatra.html>).
- Deng, JS and LR Sykes. 1997. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: a 200-year perspective. *J. Geophys. Res.*, 102(B5): 9859-9886.
- Freed, A M. 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33(1): 335-367.
- Harris, RA. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J. Geophys. Res.* 103(B10): 24347-24358.
- King, CPG., RS Stein and J Lin. 1994. Static Stress Change And The Triggering of Earthquakes. *Bulletin Seismological Society America*.
- USGS. 2013. Rectangular Area Earthquake Search. USGS. (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_rect.php), diakses: 30 Oktober 2013.
- Shi, YL and JL Cao. 2010. Some aspects in static stress change calculation—case study on Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* 53(1): 102-110.
- Stein, RS and M Lisowski. 1983. The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: control of aftershocks and postseismic deformation. *J. Geophys. Res.* 88(B8): 6477-6490.
- USGS. 2012. Source Parameter Search. USGS. (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/sopar/>), diakses: 29 September 2012.
- Toda, S, J Lin and M Meghraoui. 2008. 12 May 2008 M = 7.9 Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophys. Res. Lett.* 35(17): L17305.
- Toda, S, RS Stein and K Richards-Dinger. 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *J. Geophys. Res.* 110(B5): B05S16.
- Parsons, T, RS Yeats, Y Yagi and A Hussain. 2006. Static stress change from the 8 October, 2005 M = 7.6 Kashmir Earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 33: L06304.



Wan, YG, ZL Wu and Zhou G W. "Stress triggering" between different rupture events in several earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* 22(6): 568-576.

Ziv, A, AM Rubin. 2000. Static stress transfer and earthquake triggering: No lower threshold in sight? *J. Geophys. Res.* 105(B6): 13631-13642.