

ARTIKEL RISET

Perubahan Stress Statis Gempa Utama dan Asosiasi Distribusi Gempa Susulan: Studi Kasus Gempa Palu Mw 7,5 28 September 2018

Ade Anggraini* and Elvira Mardhatillah

Received: 17 Jan., 2020 | Accepted: 30 Jan., 2020 | Published: 16 June, 2020 | DOI: 10.22146/jfi.v24i1.53533

Ringkasan

Stress coulomb merupakan deskripsi kuantitatif perubahan stress statis oleh gempa utama yang dirasakan oleh patahan lain di sekitarnya. Dalam penelitian ini, perubahan stress statis yang disebabkan oleh gempa Palu Mw 7,5 2018 dan pengaruhnya terhadap patahan lain yang mempunyai orientasi bidang patah sejajar dengan gempa utama akan diselidiki. Metode perhitungan yang dipakai adalah perhitungan stress statis yang dirasakan oleh patahan dengan orientasi tertentu, di mana perhitungan ini tidak dipengaruhi oleh besar dan arah sumbu stress regional namun tergantung pada lokasi patahan, mekanisme bidang patah, dan besarnya slip oleh gempa utama. Dari metode ini akan diperoleh sebaran nilai stress coulomb yang selanjutnya akan dipakai untuk meninjau korelasi peningkatan maupun penurunan stress dengan lokasi gempa susulan. Perhitungan stress coulomb dilakukan pada kedalaman yang berbeda lalu dibandingkan dengan distribusi gempa susulan. Hasil perhitungan stress coulomb menunjukkan bahwa sebagian besar gempa susulan terletak pada area di mana terjadi peningkatan stress. Hal ini mengindikasikan; gempa susulan tersebut terletak pada bidang patah gempa utama dan merupakan bagian dari fase ko-seismik, memiliki orientasi, dan mekanisme gerakan seperti bidang patah gempa utama.

Kata Kunci : stress static Coulomb, gempa susulan, gempa Palu 2018.

Abstract

The Coulomb Failure Stress (CFS) quantitatively describes static stress changes in secondary faults near the source fault of an earthquake. In this paper we present the calculation of static Coulomb Failure Stress changes associated from the Palu 2018 earthquake on faults parallel to the main shock fault. The Coulomb stress change calculation on a preferably oriented fault is independent of regional stress but depends on the fault location, sense of slip, and the coefficient of friction. We use this method to derive Coulomb Failure Stress pattern, and assess correlations between stress increases and aftershock locations. The Coulomb stress calculation is performed in different depth and compared to aftershock distribution. The coulomb stress perturbation cross section shows that most of the aftershocks located on the increasing coulomb stress area at depth 10-20 km. In the coulomb stress horizontal map, most of aftershocks forms a lineament on the M 7.5 mainshock fault plane and located within increasing coulomb stress are. These results indicate that the aftershocks are located on the mainshock rupture plane, they belong to co-seismic rupture activity, and possess same fault orientation as the mainshock.

Keywords: static Coulomb stress; aftershock; Palu earthquake 2018.

1 PENDAHULUAN

Bencana gempa bumi yang terjadi di daerah padat penduduk semakin meningkat secara global dan menjadi masalah yang sangat serius khususnya

untuk negara berkembang seperti Indonesia. Jika kemampuan pemantauan gempa bumi dan identifikasi bahaya gempa bumi tidak ditingkatkan maka gempa utama gempa susulan dapat menimbulkan bencana sosial dan konsekuensi ekonomi yang besar [1].

Pulau Sulawesi terletak pada zona kompleks hasil interaksi lempeng Australia, lempeng Pasifik, lempeng Filipina, dan lempeng Eurasia di mana

*Correspondence: ade.anggraini@ugm.ac.id

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

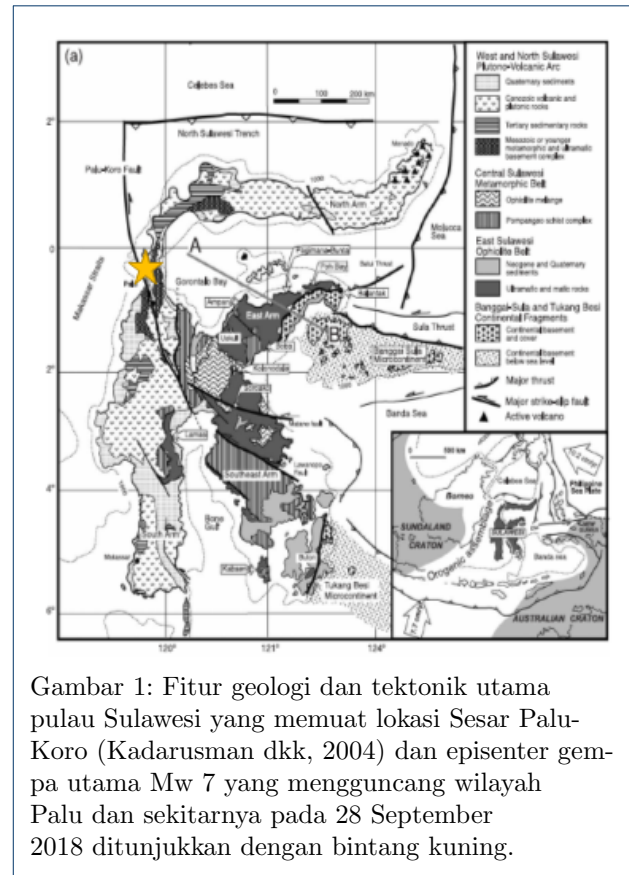
†Equal contributor

banyak lempeng mikro terbentuk. Struktur tektonik utama di daratan Sulawesi terletak di bagian barat pulau berupa sesar geser kiri Palu-Koro yang mempunyai arah strike Utara Barat Laut - Selatan Tenggara (UBL-STg). Pergeseran rata-rata di patahan Palu-Koro berkisar 30-40 *mm* per tahun [2]. Adapun di sekitar kota Palu yang merupakan ibukota provinsi Sulawesi Tengah terdapat beberapa patahan sejajar yang menandai batas *pull-apart basin*, di mana masing-masing patahan ini mengakomodir pergeseran rata-rata dari sebagian segmen Palu-Koro. Beberapa gempa besar yang terjadi sejak tahun 1900 di sekitar zona ini diasosiasikan dengan aktifitas Palu-Koro. Palu-Koro disinyalir merupakan salah satu patahan dengan resiko bahaya gempa yang sangat besar di Indonesia bagian timur. Hal ini tentunya merupakan hal yang harus dipertimbangkan dengan serius dalam perencanaan tata ruang dan pengembangan wilayah Palu dan sekitarnya.

Pada 28 September 2018 gempa bumi berkekuatan Mw 7,5 yang menghantam kota Palu dan sekitarnya dan menyebabkan lebih dari 2000 orang meninggal. Mekanisme sumber gempa ini didominasi oleh gerakan geser dengan pusat gempa berada pada patahan Palu-Koro yang membelah pulau Sulawesi. Gempa utama diikuti oleh serangkaian gempa susulan di mana 14 diantaranya mempunyai kekuatan $M \geq 5$ dan muncul hanya dalam waktu 24 jam. Episenter gempa susulan tersebut konsisten dengan letak dan orientasi sesar Palu-Koro dengan panjang distribusi episenter gempa hingga 150 *km*. Citra satelit sebelum dan sesudah gempa bumi mengungkapkan bahwa pergerakan patahan akibat gempa Palu ini mencapai 4 *m*.

Dalam beberapa tahun terakhir, para ahli seismologi di seluruh dunia telah memfokuskan diri dalam meneliti *coulomb stress triggering* and korelasi antara gempa utama dengan gempa susulan yang terjadi dalam suatu sekuens gempa tertentu. Beberapa riset pada sekuens gempa besar mengonfirmasi bahwa perubahan stress oleh gempa utama memengaruhi lokasi munculnya gempa susulan [3]. Gempa susulan dapat terpicu jika stress coulomb di bidang patah meningkat sebesar 0,1 *bar* [4].

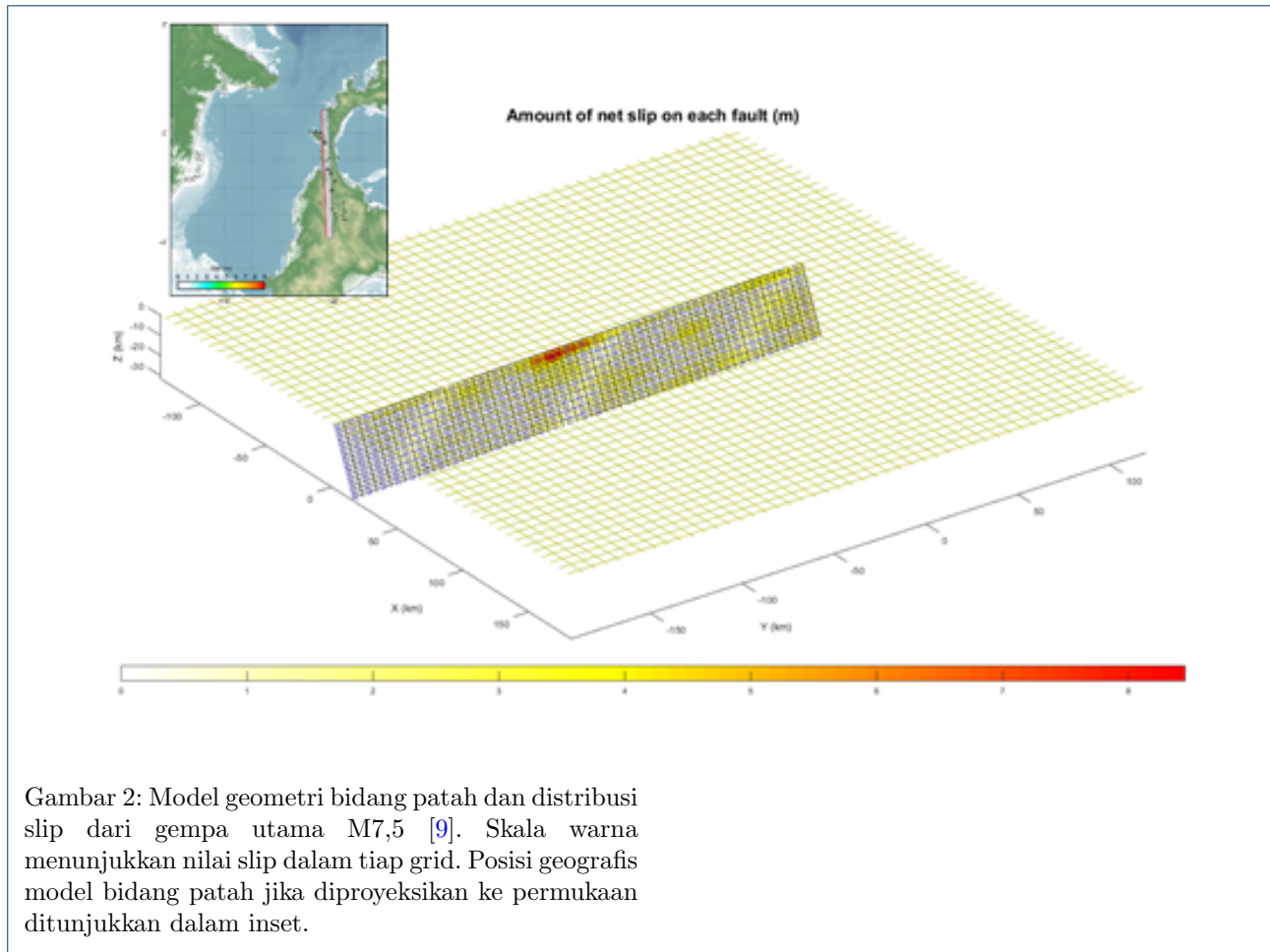
Dalam tulisan ini diinvestigasi perubahan stress Coulomb oleh gempa utama yang menjalar ke daerah sekitarnya dan kaitannya dengan kehadiran gempa susulan. Beberapa penelitian di kasus gempa yang lain menunjukkan area dengan stress Coulomb yang meningkat adalah daerah kondusif terhadap kemunculan gempa susulan, adapun daerah di mana stress Coulomb turun akan berlaku sebaliknya [5]. Dalam kaitannya dengan bahaya akibat guncangan gempa, seismisitas gempa susulan yang tinggi



Gambar 1: Fitur geologi dan tektonik utama pulau Sulawesi yang memuat lokasi Sesar Palu-Koro (Kadarusman dkk, 2004) dan episenter gempa utama Mw 7 yang mengguncang wilayah Palu dan sekitarnya pada 28 September 2018 ditunjukkan dengan bintang kuning.

dikombinasikan dengan menurunnya kapasitas struktural bangunan oleh guncangan gempa utama akan menghasilkan risiko bahaya gempa yang tinggi pula.

Tujuan dari dilakukannya penelitian picuan stress untuk kasus gempa Palu ini adalah melakukan perhitungan perubahan coulomb stress static yang disebabkan oleh model sumber gempa utama Mw 7,4 dan menelaah efek picuan tersebut terhadap kehadiran gempa susulan. Telaah dilakukan dengan membandingkan stress Coulomb dan distribusi episenter gempa susulan secara kualitatif. Gempa susulan yang dipakai dalam studi ini adalah gempa susulan berkekuatan $M > 3$ yang tercatat dalam katalog gempa milik BMKG (www.repo.bmkg.go.id). Perhitungan stress coulomb akan dilakukan menggunakan perangkat lunak Coulomb 3.4 berbasis Matlab. Pemahaman mengenai hubungan meningkat atau menurunnya stress coulomb terhadap kemunculan gempa susulan dapat membantu memetakan daerah mana saja yang meningkat risiko bahaya gempanya sehingga dapat diterapkan tindakan antisipasi mitigasi bencana yang tepat.



1.1 Palu-Koro Fault

Sesar geser Palu-Koro adalah struktur aktif utama di Sulawesi: sesar ini seakan membelah Sulawesi dan terhubung ke Palung Minahassa, tempat subduksi terjadi. Zona patahan Palu-Koro bergerak dengan kecepatan 42 mm / tahun dan menunjukkan perilaku transtensif yang cukup kompleks. Deformasi ini kemungkinan besar disebabkan oleh adanya struktur lokal *pull-apart* di sekitar wilayah kota Palu [6].

1.2 Perubahan Stress Coulomb

Untuk suatu bidang patah dengan geometri dan besar pergeseran yang kita ketahui, perubahan stress dapat dikuantifikasi sebagai perubahan *Coulomb Stress Failure* (ΔCFS)

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p) \quad (1)$$

di mana $\Delta\tau$ adalah stress geser (*shear stress*) pada arah slip, $\Delta\sigma_n$ adalah stress normal (*normal stress*) di mana tanda positif berarti untuk unclamping, μ adalah koefisien gesek (*friction*

coefficient) dan Δp adalah tekanan pori (*pore pressure change*) [7]. Persamaan (1) di atas dipakai untuk menghitung perubahan tekanan pori koseismik, untuk membedakannya dengan gesekan semu konstan dari model isotrop poroelastis [8]. Menurut model pertama, perubahan tekanan pori bergantung pada perubahan stress normal $\Delta p = -B\Delta\sigma_n$, di mana B adalah koefisien Skempton yang nilainya antara 0 and 1 [8]. Dengan menggunakan model ini, persamaan (1) dapat dituliskan sebagai

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu_0\Delta\sigma_n \quad (2)$$

di mana $\mu_0 = \mu(1 - B)$ seringkali disebut koefisien gesek efektif.

Walaupun Coulomb stress banyak dipakai untuk menjelaskan interaksi antara gempa utama dan gempa susulan dalam konteks kegempaan global maupun regional di tempat lain, namun pembahasan mengenai hal ini belum banyak dipakai dalam kasus-kasus gempa di Indonesia. Gempa Palu 2018 yang diikuti rangkaian

gempa susulan dengan jumlah yang cukup banyak merupakan bahan yang menarik untuk menguji teori stress coulomb ini dalam kasus gempa kuat yang diakibatkan oleh sesar geser dangkal di darat dan interaksinya dengan rangkaian gempa susulan. Sebagai awalan studi Coulomb stress dalam penelitian ini hanya akan dikaji dari model yang ditunjukkan pada persamaan (1) saja.

2 METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini stress statis coulomb (ΔCFS) akan dihitung berdasarkan pergeseran (slip) yang disebabkan oleh gempa utama. Model patahan dan distribusi slip gempa utama yang digunakan merujuk pada model yang dipublikasikan oleh USGS [9]. Perhitungan stress statis coulomb dilakukan menggunakan perangkat lunak Coulomb 3.4 yang berbasis Matlab [10].

Untuk menghitung ΔCFS , digunakan parameter input yang mewakili gempa utama, yaitu lokasi dan geometri bidang patah, solusi bidang patah (arah strike, dip dan rake), besarnya slip pada bidang patah, modulus Young's (E), rasio Poisson's (ν), and koefisien gesek (μ') yang diaplikasikan pada model yang terbagi dalam grid tertentu. Adapun distribusi slipnya mengacu pada model M 7,5 Palu 2018 oleh USGS [9] seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

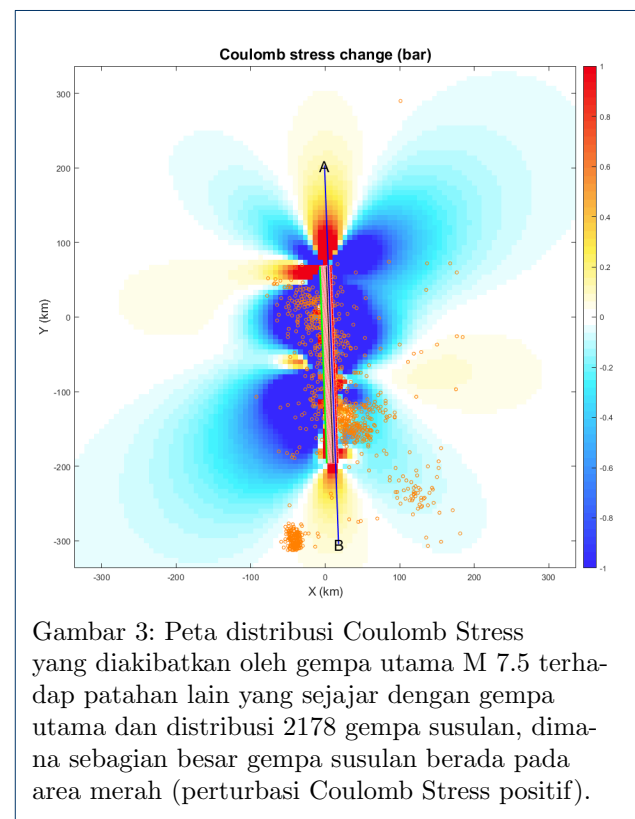
Katalog gempa susulan BMKG yang dipakai dalam penelitian ini adalah gempa susulan yang terjadi sesaat setelah gempa utama 28 September 2018 hingga 27 Februari 2019 (4 bulan setelah gempa utama). Batasan lokasi gempa susulan adalah gempa-gempa yang terjadi dalam area yang dibatasi oleh 3 LS hingga 0,5 LU dan 119 BT - 121,5 BT. Jumlah gempa yang tercakup dalam kurun waktu dan area tersebut adalah 2178 gempa susulan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Kalkulasi Coulomb Stress dan Komparasi dengan Distribusi Gempa Susulan

Karakteristik patahan Palu sebagai sumber gempa utama adalah sub-vertikal untuk itu perhitungan stress coulomb dilakukan dengan satu orientasi bidang patah saja. Karena dalam perhitungan kali ini dipakai opsi perubahan stress coulomb yang tidak tergantung pada stress regional, maka masukan yang diperlukan adalah geometri patahan sumber dan patahan penerima, sense pergerakan dari patahan sumber, dan koefisien gesek. Perhitungan menggunakan nilai strike 358° , dip 66° , and rake -3° yang merepresentasikan mekanisme patahan geser kiri seperti yang dicantumkan dalam peta geologi (Kadarusman dkk.,2004). Kedalaman kalkulasi adalah

5 km, 10 km, 19 km, dan 25 km. Untuk simplifikasi tampilan hasil, artikel ini hanya mencantumkan peta distribusi stress coulomb di kedalaman 19 km yang mewakili posisi kedalaman sumber gempa utama (Gambar 3) dan penampang vertical sepanjang strike pada kedalaman 0-25 km. (Gambar 4). Peta distribusi stress memperlihatkan terdapatnya peningkatan stress coulomb di ujung selatan dan ujung utara bidang patah. Adapun area di sisi barat dan timur bidang patah didominasi oleh warna biru yang merupakan daerah dengan penurunan stress coulomb.

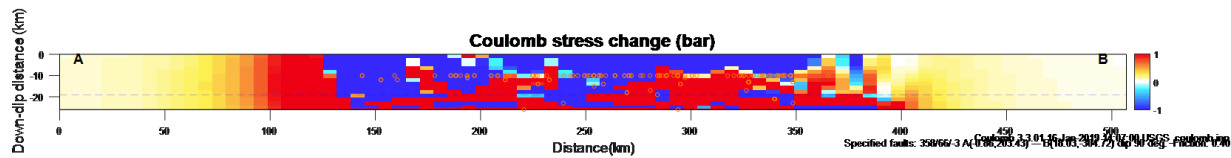


Gambar 3: Peta distribusi Coulomb Stress yang diakibatkan oleh gempa utama M 7.5 terhadap patahan lain yang sejajar dengan gempa utama dan distribusi 2178 gempa susulan, dimana sebagian besar gempa susulan berada pada area merah (perturbasi Coulomb Stress positif).

Gempa susulan yang diplot pada peta distribusi stress irisan horizontal (Gambar 3) menunjukkan bahwa sebagian besar gempa terdistribusi pada dan di sekitar bidang patah dan berada pada area yang memiliki peningkatan nilai stress coulomb. Jika dilihat pada *cross section* (Gambar 4) maka gempa susulan mendominasi kedalaman 10-20 km dan sebagian besar menempati area berwarna merah.

4 KESIMPULAN

Hasil perhitungan stress coulomb menunjukkan bahwa sebagian besar gempa susulan terletak pada area di mana terjadi peningkatan stress. Hal ini mengindikasikan; gempa susulan tersebut terletak pada bidang patah gempa utama dan merupakan



Gambar 4: Penampang melintang (*cross section*) sepanjang strike dari stress coulomb akibat model patahan gempa utama (Gambar 2) yang dihitung dengan orientasi patahan penerima strike 358° , dip 66° , and rake -3° .

bagian dari fase ko-seismik, memiliki orientasi, dan mekanisme gerakan seperti bidang patah gempa utama.

Model yang dipakai dalam penelitian ini merupakan model patahan sederhana karena hanya mengakomodir satu bidang patah dengan slip yang bervariasi. Walaupun dengan model ini keberadaan sebagian besar gempa susulan bisa diasosiasikan dengan area peningkatan stress coulomb, namun mengingat dimensi bidang patah yang cukup besar perlu dilakukan perhitungan dengan menggunakan model bidang patah yang lebih kompleks.

PENULIS

1 Ade Anggraini

Dari :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada

2 Elvira Mardhatillah

Dari :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada

Pustaka

1. Van Dissen R, Barrell D, Litchfield N, Villamor P, Quigley M, King A, et al. Surface rupture displacement on the Greendale Fault during the

Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake, New Zealand, and its impact on man-made structures. 2011;.

2. Kadarusman A, Miyashita S, Maruyama S, Parkinson CD, Ishikawa A. Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia. *Tectonophysics*. 2004;392(1-4):55–83.
3. Steacy S, Jiménez A, Holden C. Stress triggering and the Canterbury earthquake sequence. *Geophysical Journal International*. 2014;196(1):473–480.
4. Stein RS. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*. 1999;402(6762):605–609.
5. Anggraini A. The 26 May 2006 Yogyakarta Earthquake: Aftershocks and Interaction [PhD Thesis]. Universität Potsdam, Germany; 2006.
6. Socquet A, Simons W, Vigny C, McCaffrey R, Subarya C, Sarsito D, et al. Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006;111(B8).
7. Harris RA. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998;103(B10):24347–24358.
8. Cocco M, Rice JR. Pore pressure and poroelasticity effects in Coulomb stress analysis of earthquake interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002;107(B2):ESE–2.
9. USGS. M 7.5 - 70km N of Palu, Indonesia - Finite Fault; 2018. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/finite-fault>.
10. Toda S, Stein RS, Richards-Dinger K, Bozkurt SB. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2005;110(B5).