
Arah Penyebaran *Stress Coulomb* pada Batuan akibat Gempabumi Kairatu 26 September 2019

Harti Umbu Mala^{*1}, Juliany N. Mohamad²

¹*Jurusan Fisika, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kota Ambon, Maluku
97233, Indonesia*

²*Program Studi Fisika, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui Kupang
85001, Indonesia*

* *Penulis Penanggungjawab. E-mail: hartiumbumala@gmail.com (Harti Umbu Mala),*

Telp: +62-812-3848-1982

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui arah penyebaran *stress* batuan yang diakibatkan oleh gempabumi Kairatu dan diduga memiliki keterkaitan dengan kejadian gempabumi yang terjadi setelahnya. Penelitian ini menggunakan data kejadian gempabumi yang diperoleh dari katalog *United State Geological Survey* (USGS) dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) pada tanggal 26 September 2019 dan setelahnya. Adapun metode yang digunakan adalah metode perubahan *Coulomb stress* menggunakan *software Coulomb 3.3*. Hasil analisis, menunjukkan bahwa gempabumi Kairatu memiliki mekanisme sumber yakni sesar geser sedikit oblique ke arah barat laut, mengalami peningkatan perubahan *stress* batuan positif yang dominan ke empat arah yakni utara, timur, selatan dan barat dengan kisaran harga 0,4 – 1,0 bar. Kondisi dengan nilai perubahan *stress* yang tinggi ini, sangat berpotensi membangkitkan gempabumi susulan dengan kedalaman hiposenter berkisar ≤ 70 km.

Kata Kunci : Gempabumi; Perubahan *Stress Coulomb*; Kairatu.

ABSTRACT

This research aims to study the direction of the coulomb stress change caused by the Kairatu earthquake and its influence with earthquake events that occur afterwards. This research uses earthquake event data obtained from the catalog of the United State Geological Survey (USGS) and Badan Meteorologi, Klimantologi dan Geofisika (BMKG) on September 26, 2019. The method used is the Stress Coulomb Change using Coulomb 3.3 software. The results of the analysis, showed that the Kairatu earthquake had a source of focal mechanism is shear fault oblique to northwestward. It has increasing positive stress changes that dominant to the north, east, south and west directions with the range 0.4 - 1.0 bar. This conditions that have high stress changes are very make possible to triggering earthquake after the main earthquake occurred with the hypocenter ≤ 70 km.

Keywords: Earthquake; Coulomb Stress Change; Kairatu.

1. Pendahuluan

Kepulauan Maluku merupakan wilayah dengan tingkat kegempabumian yang tinggi. BMKG mencatat bahwa setiap tahunnya daerah ini selalu diguncang lebih dari 1.000 kejadian gempabumi. Sepanjang tahun 2018 tercatat sebanyak lebih kurang 1.587 kejadian gempabumi mengguncang wilayah ini. Jumlah ini meningkat dibanding tahun sebelumnya tahun 2017 yang hanya terdapat sekitar 1.397 kejadian gempabumi. Kondisi ini disebabkan letaknya yang dihimpit oleh tiga lempeng tektonik utama dunia yaitu lempeng Pasifik, lempeng Australia dan lempeng Eurasia.

Pada tanggal 26 September 2019, warga kepulauan Maluku (Seram, Ambon, Haruku, Saparua) dan

sekitarnya dikejutkan dengan kejadian gempabumi yang terjadi di Kairatu, tepatnya pada $3,450^{\circ}$ LS dan $128,347^{\circ}$ BT, dengan kedalaman sekitar 18,2 km dengan magnitudo moment (M_w) 6,5 [1]. Berdasarkan laporan BMKG per tanggal 4 Oktober 2019, delapan hari pasca gempabumi utama, telah terjadi sekitar 1000 gempabumi susulan [2], dan kondisi ini masih terus berlanjut hingga kondisi batuan yang terdeformasi mengalami posisi stabil.

Munculnya ribuan gempabumi susulan tidak terlepas dari proses penyebaran dan perubahan *stress* pada batuan yang kemudian terdistribusikan ke segala arah sehingga memberi gangguan pada batuan lain disekitarnya. Ketika batas elastis batuan terlampaui, maka akan

terjadi pelepasan energi dalam bentuk gempa bumi baru akibat batuan sudah tidak mampu lagi menahan *stress*. Salah satu cara untuk melihat sebaran *stress* gempa bumi adalah dengan melihat dan mengkaji arah perubahan *stress Coulomb* [3]. Kajian untuk mempelajari dan menghitung perubahan *stress Coulomb* telah banyak dilakukan oleh para peneliti, antara lain oleh Parsons, dkk [4]; Miao [5]. Mereka mendapatkan bahwa ada keterkaitan antara gempa bumi utama dan gempa bumi susulan berdasarkan kajian perubahan arah *stress coulomb*. Sianturi, *et al* [6] pun pada tahun 2018 mengkaji pengaruh perubahan arah *stress coulomb* terhadap gempa bumi susulan yang terjadi setelahnya di pulau Lombok, dan mendapatkan bahwa gempa bumi susulan ini terjadi pada daerah dengan peningkatan *stress coulomb* berharga positif sekitar $< 1,0$ bar. Oleh karena itu dalam artikel ini akan dibahas mengenai pola penyebaran *stress* batuan akibat gempa bumi Kairatu dan pengaruh pelepasan *stress* gempa bumi utama tersebut terhadap gempa bumi berikutnya.

Menurut teori keruntuhan *Coulomb*, ketika dua blok batuan bergeser dengan arah yang berlawanan, maka tegangan geser akan bekerja sejajar dengan bidang sesar. Selain itu, juga bekerja tegangan yang tegak lurus terhadap bidang sesar. Ketika tegangan geser telah melebihi gaya gesek atau ketika tegangan normal berkurang, maka blok batuan akan bergeser

secara tiba-tiba dan energi akan dilepas sebagai gempa bumi. Kedua komponen tegangan ini apabila dijumlahkan akan diperoleh tegangan *Coulomb*. Berdasarkan hukum kekekalan energy yang menyatakan bahwa energi yang dilepas tidak akan hilang, melainkan akan didistribusikan ke segmen sesar lain yang berada disekitarnya dan dapat menyebabkan segmen sesar tersebut patah [7].

Perubahan *Coulomb stress* juga dapat digunakan untuk mengkaji dan memperhitungkan distribusi *stress* baik yang sudah terlepas atau yang masih tersimpan pada suatu lempengan atau sesar. Hal ini juga dapat digunakan untuk melihat pola arah pergerakan *stress* yang sangat membantu dalam memperkirakan arah persebaran gempa bumi susulan. Rumusan sederhana sederhana pada *Coulomb Failure Stress* [3] dinyatakan dengan persamaan:

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu(\tau_\beta - P) \quad (1)$$

τ_β menyatakan shear stress paralel terhadap arah slip, σ_β adalah normal stress, P tekanan pori fluida (bar) yang dapat merubah normal *stress* sepanjang bidang patahan dan dihubungkan dengan koefisien *Skeptom* (B) dengan nilai bervariasi antara 0 sampai 1 dan μ koefisien friksi (rentang nilai 0,01 – 0,75). Maka, perubahan *stress* Coulomb statik, σ_f (*Coulomb Failure Function*) yang disebabkan oleh sebuah getaran utama dengan asumsi sederhana untuk efek

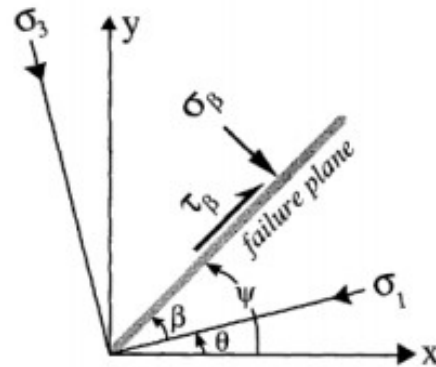
tekanan pori menurut Stein, *et al.* [8] yaitu:

$$\sigma_f = \tau_\beta + \mu' \sigma_\beta \quad (2)$$

Nilai τ_β dalam persamaan ini harus selalu positif, namun proses perhitungan *stress* pada suatu sesar dapat bernilai positif atau negatif tergantung pada arah slip potensial ke kanan atau ke kiri.

Nilai koefisien gesek semu diasumsikan 0,4 yang merupakan nilai rata-rata. Nilai modulus Young dan rasio Poisson masing-masing diasumsikan 8×10^5 bar dan 0,25. Selain itu, untuk menghitung nilai perubahan tegangan *Coulomb* dengan persamaan di atas, maka diasumsikan bahwa tegangan bekerja pada suatu medium elastis setengah bola yang homogen isotropi. Selanjutnya, untuk memperoleh dimensi (panjang dan lebar) rekahan sesar maka digunakan persamaan empiris hubungan magnitudo dan luas bidang sesar yang dikembangkan oleh Wells dan Coppersmith [9]. Sementara itu, konsep kedudukan sesar yang meliputi *strike*, *dip*, dan *rake* mengacu pada konvensi Aki dan Richards [10]. Berdasarkan hasil perhitungan dari persamaan di atas, jika nilai perubahan tegangan *Coulomb* positif maka potensi untuk terjadi pergeseran akan meningkat dan dapat memicu terjadinya gempa bumi susulan di daerah sekitarnya. Sebaliknya, apabila nilai perubahan tegangan *Coulomb* negatif maka daerah tersebut mengalami relaksasi yang akan mengalami

pengurangan tegangan sehingga daerah tersebut dimungkinkan menjadi stabil serta kemungkinan terjadi gempa bumi susulan menjadi kecil.



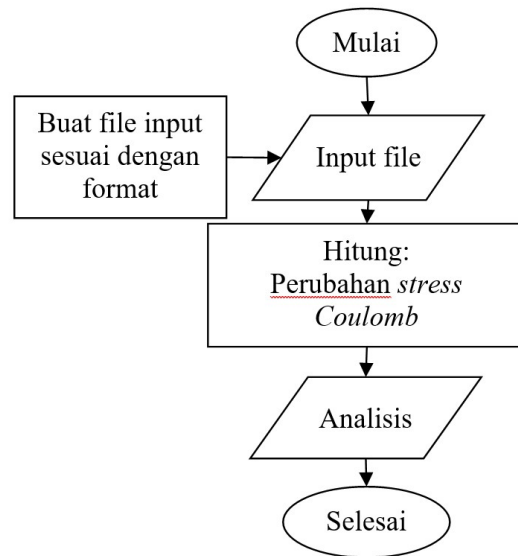
Gambar 1. Sistem koordinat yang digunakan untuk perhitungan *Coulomb stress* pada bidang sesar optimal [3].

Melalui sistem koordinat sumbu *stress* pada Gambar 1 ditunjukkan bidang sesar (*failure plane*) yang dikenakan *normal stress* σ_β . Selanjutnya orientasi bidang sesar dengan sudut β membentuk σ_1 sebagai *stress* utama terbesar dan σ_3 sebagai *stress* utama terkecil, dengan τ_β adalah *shear stress* bidang sesar. Kompresi dan *shear stress* mengarah pada bidang sesar dan berharga positif. Tanda τ_β terbalik dalam perhitungan *Coulomb stress* untuk sesar geser mengindikasikan pada bidang sesar spesifik. Perubahan *Coulomb stress* dalam bidang sesar optimal dapat dihitung sebagai hasil dari slip sesar utama tempat gempa bumi susulan diperkirakan terjadi pada bidang sesar tersebut.

Perubahan tegangan *Coulomb* suatu gempabumi utama merupakan parameter yang mampu menjelaskan sebaran gempabumi susulan yang dipicunya [11]. Bahkan, peningkatan stress coulomb mampu menjelaskan terjadinya gempabumi di sepanjang rekahan yang telah terjadi gempabumi. Perubahan tegangan coulomb ini diyakini mengontrol lokasi gempabumi selanjutnya di suatu wilayah. Perubahan tegangan *Coulomb* tersebut mampu memicu atau bahkan menghambat kejadian suatu gempabumi.

2. Metode

Parameter gempabumi berupa posisi diambil dari USGS pada tanggal 26 September 2019 dengan nilai parameter patahan yakni *strike* 164° , *dip* 78° dan *rake* -165° serta divalidasi dengan data pada sumber-sumber lain termasuk data BMKG. Untuk parameter sesar diambil dari hasil perhitungan USGS kemudian dihitung perubahan *stress* Coulomb dan komponen *strain*nya. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan *software Coulomb* 3.3 Dan menggunakan koefisien *friction* sebesar 0,4.

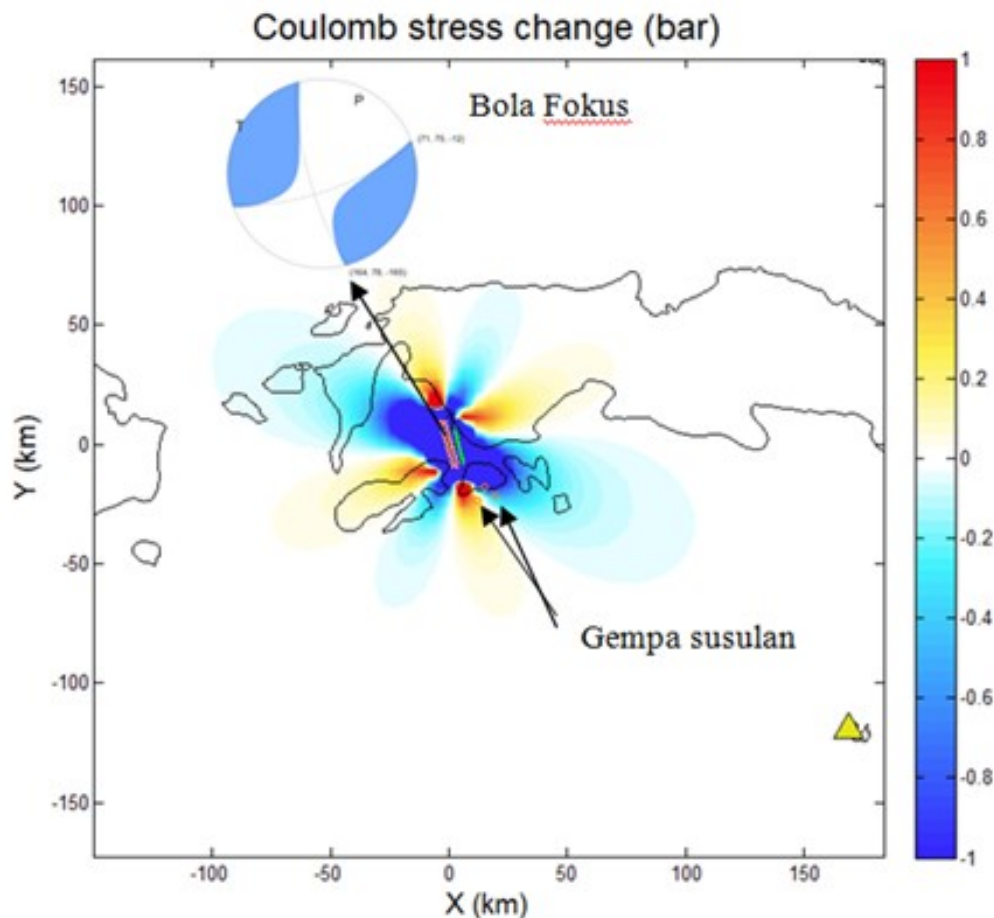


Gambar 2. Alur perhitungan perubahan *stress* Coulomb dengan *Software Coulomb*

3.3

3. Hasil dan Diskusi

Gempabumi Kairatu yang terjadi pada 26 September 2019 dengan Mw 6,5 dibangkitkan oleh sesar geser mengiri atau *sinistral strike slip* berarah cenderung utara dan sedikit ke arah barat laut seperti yang terlihat pada Gambar 3. Sedangkan perubahan *stress* batuan menghasilkan pola perubahan (lobus) yaitu pola perubahan peningkatan stress coulomb (lobus) positif berwarna kuning-merah dan pola perubahan stress coulomb (lobus) negatif berwarna biru seperti. Parameter sesar yang digunakan dalam perhitungan yaitu *strike* 164° , *dip* 78° dan *rake* -165° .



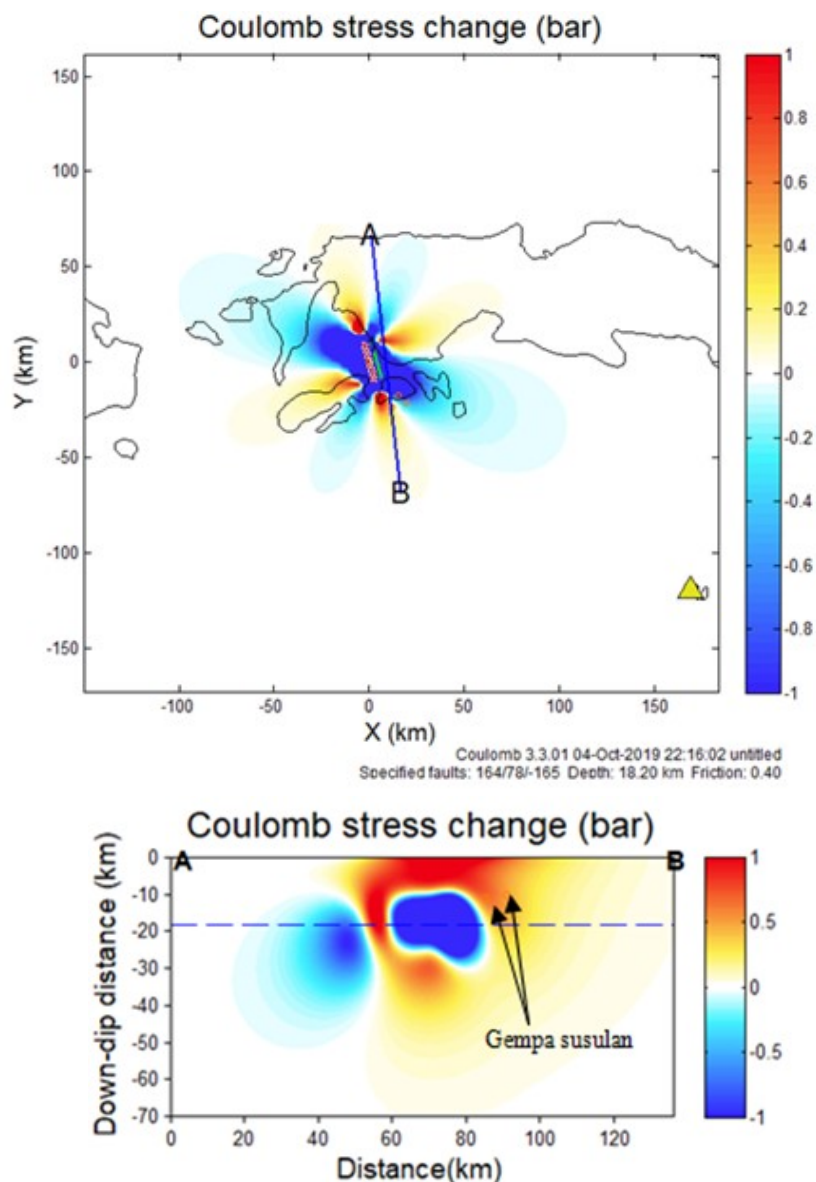
Gambar 3. Mekanisme dan perubahan *stress* batuan gempa bumi Kairatu

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa terjadi perubahan *stress* yang cukup besar dengan perubahan negatif berarah Tenggara – Baratlaut dan Timurlaut – Baratdaya dengan harga sekitar -0,4 sampai -1,0 bar, sedangkan perubahan positif terjadi pada keempat arah yakni Utara, Timur, Selatan dan Barat dengan kisaran harga 0,4 sampai 1,0 bar. Melihat hasil ini, kita mendapatkan gambaran bahwa ada keterkaitan antara gempa bumi yang terjadi di Kairatu dengan besarnya perubahan *stress Coulomb* yang dapat membangkitkan atau mentrigger

gempa bumi susulan. Daerah dengan perubahan *stress coulomb* positif cenderung membangkitkan banyak gempa bumi susulan, sedangkan daerah dengan *stress* negatif merupakan daerah relaksasi yang cenderung memberikan keseimbangan pada daerah yang mengalami *stress* positif. Makin besar nilai *stress* batuan, maka potensi terjadinya gempa bumi susulan makin tinggi dan banyak. Hal ini terkonfirmasi dengan data BMKG yang mencatat lebih dari 2900 gempa bumi susulan yang terjadi pasca gempa bumi utama Kairatu.

Untuk melihat lebih jauh pengaruh penyebaran *stress* batuan secara vertikal, dilakukan *cross section* seperti tampak pada Gambar 4. Pengambilan penampang melintang A-B dilakukan untuk mengakomodir letak episenter gempa bumi utama dan dua gempa bumi susulan berikutnya yang terjadi pada waktu yang berdekatan dengan gempa bumi utama. Hal ini bertujuan untuk melihat keterkaitan antara

gempabumi utama dan gempabumi susulan yang terjadi setelah gempa bumi utama terjadi, serta letak gempa bumi susulan itu terjadi. Dua gempa bumi susulan tersebut adalah gempa bumi dengan magnitudo M_w 4,2 dan kedalaman 10 km, posisi $3,663^\circ$ LS dan $128,455^\circ$ BT serta gempa bumi magnitudo M_w 4,7 dan kedalaman 10 km, posisi $3,643^\circ$ LS dan $128,523^\circ$ BT.



Gambar 4. *Cross section* perubahan *stress* yang terjadi akibat gempa bumi Kairatu.

Gambar 4, merupakan cross section yang menampilkan pola penyebaran perubahan *stress coulomb* batuan secara vertikal berdasarkan kedalaman. Pada gambar terlihat bahwa setelah terjadinya gempa bumi utama pada kedalaman sekitar 18 km berada pada lobus negatif atau dengan kata lain terjadi penurunan stress dengan rentangan harga -1,0 sampai -0,4 bar. Ini berarti bahwa pada lokasi ini telah terjadi proses relaksasi pada batuan sesaat setelah pelepasan energinya. Kemudian setelah itu, *stress* batuan diteruskan dan mengalami peningkatan (warna merah/ bernilai positif) ke segala arah pada kedalaman 0-30 km sehingga dua gempa bumi susulan yang cukup besar pada kedalaman 10 km diduga dibangkitkan oleh gempa bumi utama yang terjadi sebelumnya. Berdasarkan penampang di atas, potensi terjadinya gempa bumi susulan pada daerah dengan *stress* positif pada kedalaman sekitar ≤ 70 km.

Peningkatan *stress* batuan menyebabkan terjadinya gempa bumi susulan yang sangat banyak di area sekitar gempa bumi utama. Gempa bumi susulan yang banyak tersebut terjadi dalam kurun waktu yang relatif singkat dan berlangsung secara kontinu selama kurang lebih 3 bulan berurut-turut. Hal ini mengindikasikan bahwa energi yang dilepaskan cukup besar (sekitar 1,0 bar) sudah cukup mampu untuk membangkitkan gempa bumi susulan dan berdampak pada peningkatan *stress* pada batuan secara meluas. Selain itu, kondisi ini

menggambarkan bahwa batuan disekitar sesar sumber gempa bumi utama cukup rapuh sehingga mudah mengalami pergeseran saat *stress* didistribusikan. Berdasarkan informasi geologis pada peta Geologi Lembar Ambon Maluku, menunjukkan bahwa Pulau Ambon dan sekitarnya berupa formasi batuan gunung api yang terdiri atas batuan *andesit*, *dasit*, *breksi* dan *tuff* [12,13]. Jenis batuan yang hampir seragam ini dan masih tergolong batuan beku yang menuju proses tersedimentasi, maka cukup rentan mengalami guncangan saat dikenai energi yang cukup besar lewat distribusi tegangan pada batuan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, menunjukkan bahwa gempa bumi Kairatu mengalami perubahan *stress* batuan yang cukup besar dengan perubahan negatif dominan berarah Tenggara – Baratlaut dan Timurlaut – Baratdaya dengan harga sekitar -0,4 sampai -1,0 bar, sedangkan perubahan positif terjadi pada keempat arah yakni Utara, Timur, Selatan dan Barat dengan kisaran harga 0,4 sampai 1,0 bar. Kondisi dengan nilai perubahan *stress* ini sudah cukup berpotensi membangkitkan (mentrigger) gempa bumi susulan dengan kedalaman hiposenter berkisar ≤ 70 km. Pengaruhnya pun telah terkonfirmasi dengan terjadinya gempa bumi susulan berkisar 2900 lebih selama kurun waktu 3 bulan.

5. Referensi

1. United State Geological Survey (USGS). (01 Oktober 2019). *Citing Internet sources* URL <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us700051fd/moment-tensor>.
2. Badan Meteorologi, Klimantologi, dan Geofisika (BMKG). (01 Oktober 2019). *Citing Internet sources* URL www.bmkg.go.id
3. G.C.P. King, R.S. Stein, dan J. Lin, "Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 3, 935-953, 1994.
4. T. Parsons, S.Y. Robert, Y. Yuji, and H. Ahmad, Static Stress Change From the 8 October, 2005 M = 7,6 Kashmir Earthquake. *Geophysical Research Letters*, v.33, 2006.
5. M. Miao, and Z. Shou-Biao, 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, pp. 539-551, 2012.
6. Sianturi, H.L., Mohamad, J.N., Mala, H.U., and Tanesib, J.L. (2018). The Identification of Stress Coulomb Changes in Lombok Earthquakes on August 5 and 9, 2018. In *Proceeding The First International Conference and Exhibition on Sciences Technology ICEST 2018*, 174-183. *Labuan Bajo, Indonesia: International Conference and Exhibition on Sciences Technology ICEST. Universitas Nusa Cendana*.
7. Stein, R.S. (2003). Earthquake conversations: *Scientific American*, v. 288, no. 1, p. 72-79.
8. Stein, R. S., King, G. C. P., and Lin, J. (1994). Stress Triggering of The 1994 M = 6.7 Northridge, California, Earthquake by its Predecessors. *Science*, 265 : 1432-1435.
9. Wells, D. L., dan K. J. Coppersmith. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, p. 974-1002.
10. Aki, K. dan P. G. Richards. (1980). *Quantitative Seismology*. New York: W.H. Freeman & Co., 932 pp
11. King, G. C., Stein, R. S., dan Lin, J. (1994). Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of Seismological Society of America*, v. 84 (3), p. 935-953.
12. Tjokrosoetoro, S., Rusmana, E., Chidan, A. 1993. Peta Geologi Lembar Ambon Maluku. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi: Bandung.
13. Prabowo, U. N., Amalia, A. F., & Wiranata, F. E. (2017). Identifikasi Potensi Pergerakan Tanah Pada Lereng Yang Dipicu Gempabumi Berdasarkan Pengukuran Mikro-tremor. *Wahana Fisika*, 2(2), 67-77.