

ANALISIS PERUBAHAN COULOMB STRESS DAN SEISMISITAS KEJADIAN GEMPA BUMI DI WILAYAH MALUKU UTARA 14 NOVEMBER 2019

Khairun Nisa*, Lailatul Husna Br. Lubis , Ratni Sirait

Program studi fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negri Sumatera Utara Medan, Jl. Lap Golf. Kp. Tengah. Pancur Batu, Medan, 20353, Indonesia

*email: khairun17042000@gmail.com

ABSTRAK

Secara tektonik wilayah Maluku Utara dipengaruhi oleh Subduksi Lempeng Filipina di utara hingga ke timur, Sesar Sorong dan Sula di selatan, Thrust Laut Maluku Timur dan Thrust Maluku Barat di barat. Di wilayah ini telah terjadi gempa bumi yang memiliki titik koordinat episenter pada 32,250° LU dan 128,250° BT dengan magnitudo 7.0 Mw pada kedalaman 62 km dan diikuti gempa bumi susulan yang tercatat 2 minggu setelah gempa bumi utama. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai coulomb stress dan titik penyebaran gempa yang terjadi di wilayah Maluku Utara. Penelitian menggunakan data BMKG dan data mekanisme fokus gempa bumi yang di unduh dari Global centeroid moment tensor (Global GMT) Perhitungan perubahan nilai coulomb stress dihitung menggunakan software Coulomb 3.4.2 berbasis MATLAB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gempa bumi pada tahun 2019 dengan magnitudo 7.0 Mb mengalami peningkatan stress yaitu 11,068 bar dan mengarah ke arah Barat Daya.

Kata Kunci: Maluku Utara; Coulomb Stress; Gempa bumi; Global CMT

ABSTRACT

[Title: Analysis Of Coulomb Stress And Seismicity Changes In Earthquake Events In North Maluku Region, November 14, 2019] Tectonically, the North Maluku region is influenced by the subduction of the Philippine Plate in the north to the east, the Sorong and Sula Faults in the south, the East Maluku Sea Thrust and the West Maluku Thrust in the west. In this area, an earthquake has occurred which has epicenter coordinates at 32,250° North Latitude and 128.250° East Longitude with a magnitude of 7.0 Mw at a depth of 62 km followed by aftershocks which were recorded 2 weeks after the main earthquake. This study aims to determine the coulomb stress value and the distribution point of the earthquake that occurred in the North Maluku region. This study uses BMKG data and earthquake focus mechanism data downloaded from the Global centeroid moment tensor (Global GMT). Calculation of changes in the coulomb stress value is calculated using MATLAB-based Coulomb 3.4.2 software. The results showed that the earthquake in 2019 with a magnitude of 7.0 Mb experienced an increase in stress, namely 11,068 bar and headed towards the Southwest.

Keywords: Maluku region; Coulomb Stress; Earthquake; Global

PENDAHULUAN

Pada tanggal 14 November 2019 pukul 16.17 WITA telah terjadi gempa bumi berkekuatan 7,0 magnitudo yang mengguncang salah satu kabupaten atau wilayah Halmahera barat di Maluku Utara. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG, 2019) melaporkan bahwa koordinat gempa bumi ini berada pada 32.250 LU dan 128.250 LS, dengan kedalaman 62 kilometer.



Gambar 1. Peta penelitian

Sumber ini menunjukkan bahwa untuk mengetahui apakah gempa bumi yang mengguncang wilayah Maluku Utara pada tanggal 14 November 2019 meningkatkan tekanan Coulomb, maka perlu dilakukan pelacakan posisi gempa tersebut untuk mengetahui apakah gempa tersebut juga akan mempengaruhi kejadian seismik di masa mendatang. Perairan Indonesia Timur Laut mengelilingi Pulau Seram di selatan, Pulau Sulawesi di barat, dan Samudra Pasifik di utara dan timur membentuk Provinsi Maluku Utara. Provinsi ini terdiri dari sejumlah pulau di Kepulauan Maluku. Pulau Halmahera, Ternate, Tidore, Morotai, Obi, Bacan, Taliabu, dan Sanana adalah pulau-pulau utama yang membentuk Provinsi Maluku Utara. Menurut Tim Revisi Peta Gempa Indonesia (2010), wilayah ini secara tektonik dipengaruhi oleh Subduksi Lempeng Filipina di utara dan timur, Sesar Sorong dan Sula di selatan, Sesar Laut Maluku Timur, dan Sesar Maluku Barat di barat.

Salah satu provinsi di Indonesia yang sering mengalami gempa bumi adalah Maluku Utara. Secara geografis, wilayah ini terletak di dekat titik pertemuan tiga lempeng utama—Pasifik, Indo-Australia, dan Eurasia. Wilayah ini telah mengalami enam belas kali gempa bumi besar dengan intensitas berkisar antara VI hingga VIII MMI sejak tahun 1858, yang mengakibatkan ratusan bangunan runtuh dan 42 korban jiwa (Supartoyo dan Surono, 2008).

Reid, seorang seismolog Amerika (K.E. Bullen, 1965; B. Bolt, 1988), mengemukakan sebuah teori yang menjelaskan mekanisme gempa bumi secara keseluruhan. Teori ini disebut "Teori Pantulan Elastis". Menurut teori ini, gempa bumi terjadi ketika terjadi deformasi. Deformasi batuan terjadi akibat tekanan dan regangan pada lapisan bumi. Daya dukung batuan akhirnya mencapai batas maksimumnya karena tekanan atau tegangan konstan, yang akhirnya mengakibatkan retakan atau patahan tiba-tiba. Gempa bumi akan terjadi akibat pelepasan energi tegangan yang telah terakumulasi ini. Ada tiga kemungkinan hasil ketika dua lempeng bersentuhan pada patahan: mereka dapat bergerak menjauh, saling mendekat, atau menjauh. Pergerakan ini biasanya tercatat 1–10 cm setiap tahun, dan terlalu lambat untuk dirasakan orang. Kadang kala, lempeng tektonik bergerak lambat dan saling terhubung, sehingga energi terus terkumpul. Akhirnya, batuan di lempeng menjadi terlalu lemah untuk menahan pergerakan, sehingga terjadi pelepasan energi secara tiba-tiba yang dikenal sebagai gempa bumi (Oktaviani, 2012).

Ketidakmampuan batuan untuk menahan tekanan menyebabkan energi dilepaskan sebagai gempa bumi ketika batas elastisitasnya terlampaui. Tingkat tegangan batuan di dekat episentrum dan di sekitarnya akan berfluktuasi sebagai akibatnya. Pendekatan perubahan tegangan Coulomb merupakan salah satu cara untuk memvisualisasikan distribusi tegangan batuan yang disebabkan oleh gempa bumi (Weatherley, DK, 2006). Distribusi tegangan yang telah dilepaskan atau masih tersimpan pada lempeng atau patahan dapat dilihat dengan menggunakan teknik tegangan Coulomb. Menurut Nuannin P. K. (2005), perubahan tegangan Coulomb merupakan fenomena geologi yang disebabkan oleh variasi tegangan material sebagai akibat dari deformasi lokal yang tidak berkesinambungan. Salah satu model yang sering digunakan untuk mengkarakterisasi interaksi patahan adalah perubahan tegangan Coulomb, yang dinyatakan oleh (King, 1994).

Berdasarkan Karakteristik bidang sesar yang meliputi strike, dip dan rake menentukan orientasi bidang sesar. Dimana sudut strike terjadi sudut yang ditimbulkan oleh tumbukan sesar ke utara, sedangkan sudut rake sudut yang diciptakan oleh arah geser dan

tumbukan sesar dan sudut dip adalah sudut yang dibentuk bidang sesar dengan bidang mendatar.

Berdasarkan data pengamatan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG, 2019), terjadi 352 kali gempa susulan dalam sepekan pascagempa bumi 14 November 2019 di wilayah Maluku Utara. Gempa terjadi di wilayah tersebut. Rangkaian gempa susulan tersebut memiliki magnitudo rata-rata 3,0 dan magnitudo maksimum 5,1. Magnitudo terendah adalah 2,4. Dalam kajian ini, sebaran perubahan nilai Coulomb stress dan Coulomb stress terhadap lokasi gempa utama dikaji untuk mengetahui keterkaitan pemicu antara gempa utama dengan gempa susulan.

METODE

Tegangan geser akan bekerja sejajar dengan bidang patahan ketika dua blok batuan bergeser ke arah yang berlawanan, menurut hipotesis keruntuhan Coulomb. Lebih jauh lagi, ketika tegangan normal berkurang atau tegangan geser melampaui gaya gesek, tegangan yang tegak lurus terhadap garis patahan menyebabkan blok batuan bergerak tiba-tiba dan melepaskan energi dalam bentuk gempa bumi. Aturan kekekalan energi, yang menyatakan bahwa energi yang dilepaskan tidak akan hilang sampai energi tersebut menyebar ke segmen patahan lain di dekatnya dan dapat menyebabkan segmen patahan tersebut patah, dapat digunakan untuk menghitung tegangan kolom dengan menambahkan kedua komponen tegangan ini. Apakah tegangan telah dilepaskan atau masih disimpan di lempeng atau patahan, perubahan dalam kumpulan tegangan juga dapat digunakan untuk menyelidiki dan menghitung distribusi tegangan. Ini sangat berguna dalam menentukan arah dispersi gempa bumi karena memungkinkan seseorang untuk melihat pola arah pergerakan tegangan. Apakah tegangan telah dilepaskan atau masih disimpan di lempeng atau patahan, perubahan dalam kumpulan tegangan juga dapat digunakan untuk menyelidiki dan menghitung distribusi tegangan. Perbedaan antara tegangan geser (*U*) dan kekuatan gesek (*rf*) adalah tegangan Coulomb, seperti yang ditunjukkan oleh Harris (1998), yang dapat digunakan untuk melihat pola arah pergerakan tegangan yang sangat berguna dalam menghitung arah distribusi gempa susulan.

Kekuatan geser adalah gaya maksimum yang dapat ditahan permukaan sebelum patah, sedangkan tegangan geser adalah tegangan yang sejajar atau menyentuh permukaan. Bidang kontak yang dikenal sebagai bidang patahan atau bidang rekahan terbentuk

ketika dua bagian batuan bergerak ke arah yang berlawanan selama gempa bumi. Tegangan geser pada bidang kontak ini akan terus meningkat seiring waktu. Gempa bumi terjadi ketika batuan patah karena tegangan geser melebihi kekuatan yang terlihat pada permukaan bidang patahan. Pergeseran ini, yang dikenal sebagai perubahan tegangan coulomb, diperkirakan menggunakan perhitungan pada bidang persegi panjang yang dianggap isotropik homogen menggunakan model setengah ruang elastis. (Okada, 1992). Teknik untuk menentukan distribusi tegangan yang telah dilepaskan atau masih ada pada lempeng atau patahan merupakan makna lain dari tegangan Coulomb. Menurut Nuannin P. K. (2005), perubahan tegangan Coulomb merupakan fenomena geologi yang disebabkan oleh perubahan tegangan pada material sebagai akibat dari deformasi diskret lokal.

Konsep perubahan tegangan Coulomb sering digunakan untuk menjelaskan interaksi patahan. Definisi model ini adalah sebagai berikut (King, 1994);

$$\Delta CSC = \Delta \tau + \mu \cdot \Delta \sigma \tag{1}$$

Keterangan :

- ΔCSC = perubahan coulomb stress (bar)
- $\Delta \tau$ = shear stress (bar)
- μ = koefisien friksi
- $\Delta \sigma$ = normal stress (bar)

Dalam hal ini, σ harus memiliki nilai positif; meskipun demikian, prosedur yang selalu diikuti untuk menentukan nilai tegangan pada patahan dapat ditetapkan sebagai nilai positif atau negatif, berdasarkan kemungkinan terjadinya pergeseran ke kiri atau kanan. Pada rute aliran bervariasi jika tegangan batuan berfluktuasi dengan cepat. Tegangan pada batuan, dilambangkan dengan koefisien Skempton's B ($0,0001$ atau 10^{-4}), dapat dikaitkan dengan nilai p. Dalam studi tegangan koseismik, koefisien gesekan efektif ($\mu = 0,4$ rata-rata) berkisar antara 0 hingga 0,75. Menggunakan rumus berikut untuk menghitung tegangan geser (Sinaga, 2016);

$$\Delta \tau = \pm \frac{3(F)}{2(A)} \cos a \sin a \tag{2}$$

Sedangkan, untuk normal stress menggunakan persamaan;

$$\Delta \sigma = \pm \frac{3(F)}{2(A)} \cos a \pm pgh \tag{3}$$

Keterangan :

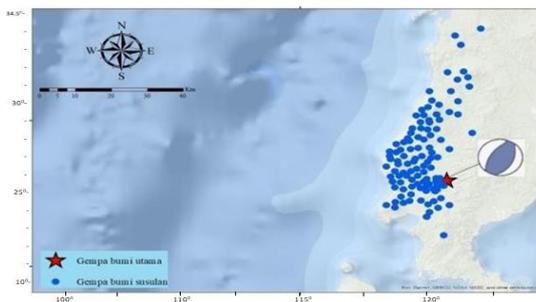
- $\Delta \tau$ = shear stress (bar)

- F = gaya (N)
- A = luas penampang (m²)
- $\Delta\sigma$ = normal stress (bar)
- P = tekanan pori (kg/m³)
- G = percepatan gravitasi (m/s²)

Berdasarkan hasil investigasi jenis patahan dorong, rumus matematika berikut menggambarkan persamaan Hukum Skala yang digunakan dalam penelitian ini (Wells dan Coppersmith, 1994).

$$\begin{aligned} \text{Log } L &= 0,58 M_w - 2,42 && 4 \\ \text{Log } W &= 0,41 M_w - 1,61 && 5 \end{aligned}$$

di mana panjang, lebar, dan magnitudo patahan masing-masing dilambangkan dengan huruf L, W, dan Mw. Daerah penelitian berpusat pada episentrum gempa bumi 14 November 2019 yang terletak pada koordinat 32.250° LU dan 128.250° BT. Selain episentrum, wilayah penelitian diperluas hingga rentang koordinat lintang 1° LU - 34.5° LU dan rentang koordinat bujur 124.70° BT - 129.70° BT untuk mengetahui perubahan tegangan Coulomb akibat gempa bumi ini secara geografis. Peta daerah penelitian dan lokasi episentrum gempa bumi besar serta gempa susulan ditampilkan pada Gambar di bawah ini



Gambar 2. Lokasi episenter gempa bumi utama dan gempabumi susulan.

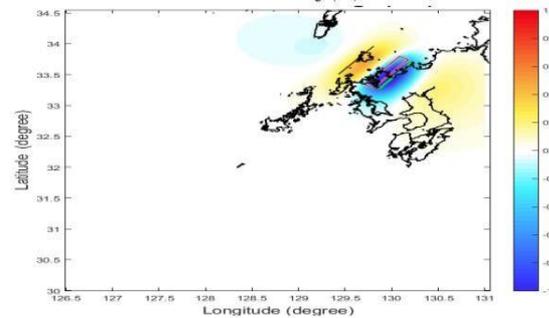
Data masukan untuk pengolahan dan perhitungan nilai tegangan Coulomb dalam kajian ini bersumber dari mekanisme fokus sumber gempa. Teknik sumber yang digunakan untuk memperoleh data ini adalah katalog gempa Global Centroid Moment Tensor (Global CMT) yang dapat diakses melalui <https://www.globalcmt.org/> (Ekström dkk., 2012). Tabel 1 menampilkan data parameter mekanisme sumber yang diperoleh dari Global CMT untuk gempa Maluku Utara yang terjadi pada bulan November 2019. Sementara itu, data parameter gempa susulan diekstraksi dari rekaman seismik (BMKG, 2019). Menggunakan URL <http://repogempa.bmkg.go.id/> melalui internet.

Tabel 1. Parameter mekanisme sumber gempabumi maluku utara 14 November 2019

Parameter bidang sesar				
	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Focal
Nodal 1	215	52	98	
Nodal 2	22	38	80	

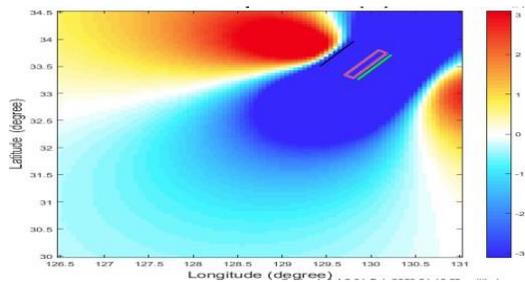
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengolahan data, telah terjadi pergeseran tegangan Coulomb di wilayah Maluku Utara. Gempa bumi primer yang terjadi pada tanggal 14 November 2019 di wilayah Halmahera Barat, Maluku Utara, berkekuatan 7,0 Magnitudo. Kajian ini didasarkan pada skala magnitudo tersebut.



Gambar 3. Perubahan Coulomb Stress gempa bumi Tanggal 14 November 2019.

Variasi tegangan coulomb tampak memiliki empat lobus yang berwarna biru dan kuning yang meluas ke arah bidang patahan, dua di antaranya positif yang di tunjukan pada warna kuning dan dua lainnya negatif ditunjukkan pada warna biru. Gempa bumi primer pada Gambar 3 terletak di lobus negatif dan disertai dengan peningkatan tegangan coulomb, ditunjukkan dengan warna merah. Hal ini menunjukkan bahwa pergerakan patahan yang dominan di lokasi ini menanjak, dengan patahan bergerak ke barat daya atau ke arah kota Jailolo. Tegangan coulomb positif bervariasi antara 0 dan 1 bar sebagai akibat dari gempa susulan gempa bumi utama yang terasa di lobus negatif atau lokasi dengan tegangan coulomb yang biasanya lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kurun waktu 14 November sampai dengan 21 November 2019, getaran gempa bumi 7,0 magnetudo yang mengguncang wilayah Maluku Utara pada 14 November lalu menyebabkan ketegangan meningkat. Coulomb Stress Chage (bar)



Gambar 4. Perubahan Coulomb Stress gempa bumi Tanggal 14 November 2019. Secara vertical

Dengan nilai tegangan Coulomb sebesar 11.068 bar, perubahan tegangan Coulomb positif dari gempa bumi yang terjadi pada tanggal 14 November 2019 meluas secara vertikal hingga kedalaman hampir 62 km. Setelah gempa bumi, terdapat enam lobus dalam distribusi tegangan Coulomb: tiga lobus positif dan tiga lobus negatif. Merah menunjukkan peningkatan tegangan, sedangkan biru menunjukkan penurunan tegangan. Gambar 2 mengilustrasikan pergeseran tegangan Coulomb vertikal. Distribusi tegangan Coulomb gempa bumi tanggal 14 November 2019 bergeser ke arah tegak lurus dengan arah tumbukan. Gempa bumi ini memiliki sudut rake 98° , sudut strike 215° , dan sudut dip 52° . Gambar 3 mengilustrasikan peningkatan tegangan di lokasi ini. Menurut (King dkk., 1994), tegangan meningkat mendekati akhir arah pergerakan patahan akibat perubahan tegangan geser, salah satu komponen perubahan tegangan Coulomb. Menurut King dkk. (1994), faktor perubahan tegangan normal efektif yang tegak lurus terhadap bidang patahan adalah yang menyebabkan dua lobus positif lainnya.

Distribusi gempa susulan terkait erat dengan perubahan tegangan Coulomb. Lokasi gempa bumi primer dan penyebaran lokasi gempa susulan cukup dekat. Pola perubahan tegangan Coulomb diikuti oleh pola distribusi gempa susulan. Gambar 2 menggambarkan distribusi umum episentrum gempa susulan, yang terletak di tenggara bidang patahan. Sebagian besar gempa susulan terlihat berada di bagian perubahan tegangan Coulomb negatif dari sisi ini. Distribusi gempa susulan secara vertikal perlu dievaluasi untuk melihat distribusi yang lebih signifikan. Wilayah tenggara-atas bidang patahan memiliki konsentrasi penyebaran episentrum gempa susulan secara vertikal.

Konsentrasi episentrum gempa susulan terletak

di bagian atas bidang patahan dan dilihat dengan data nodal 1 dan 2 atau bidang sesar yang berada di zona tegangan Coulomb tinggi di wilayah Halmahera Barat

di wilayah tegangan Coulomb yang meningkat, di mana nilainya bervariasi antara 0 dan 0,2 bar. Pada Gambar 4, gambar vertikal ditampilkan. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan gempa susulan dapat dipicu oleh tegangan Coulomb yang meningkat (Pricilia dkk., 2020). Pola perubahan tegangan Coulomb yang diakibatkan oleh gempa bumi Wenchuan dengan $M_s = 8,0$ dan dampaknya terhadap gempa susulan diteliti oleh (Xie et al., 2010). Dengan nilai konsistensi hingga 90%, data yang diperoleh menunjukkan bahwa gempa susulan terjadi di wilayah tegangan Coulomb yang meningkat. (Setiadi dkk., 2017) Selain itu, ditampilkan pula item-item yang sebanding.

Terdapat perubahan tegangan Coulomb positif di wilayah-wilayah yang tercatat mengalami hingga 64 gempa susulan dari gempa utama yang melanda Deli Serdang pada tanggal 16 Januari 2017. Perubahan tegangan Coulomb telah dikaitkan dengan gempa susulan dalam penelitian sebelumnya, tetapi perubahan tersebut berpotensi memicu aktivitas seismik lebih lanjut (Madlazim, 2015).

S. Ardinsyah (2014) menunjukkan bahwa episentrum gempa bumi Bengkulu berkekuatan 8,5 skala Richter pada tanggal 12 September 2007 berada di dekat kenaikan tegangan Coulomb positif akibat gempa bumi berkekuatan 7,9 magnetudo pada tanggal 4 Juni 2000. Penelitian (Madlazim, 2015) juga menemukan hasil serupa, yaitu lokasi gempa bumi berkekuatan 6,1 skala Richter di Aceh pada tanggal 2 Juli 2013 terhubung dengan perubahan tegangan Coulomb akibat gempa bumi berkekuatan yang sama pada tanggal 21 Januari 2013.

KESIMPULAN

Dari uraian penelitian ini yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa hal yaitu Sebaran variasi tegangan Coulomb pasca gempa bumi yang terjadi di wilayah Maluku Utara pada tanggal 14 November 2019, ditunjukkan dengan adanya lobus positif dan lobus negatif sebagai akibat pengaruh mekanisme sumber gempa. Wilayah ini mengalami peningkatan tegangan dengan nilai sebesar 11.068 bar. Dan Sebagian besar episentrum gempa susulan yang tersebar di bagian selatan hingga barat yang dekat dengan Kota Jailolo. Berdasarkan pengamatan terhadap perubahan tegangan Coulomb yang terjadi, dapat diidentifikasi wilayah mana saja

yang rawan terhadap gempa yaitu Halmahera utara, Halmahera barat, Halmahera selatan, kepulauan tidore dan kepulauan murotai. Jika terjadi gempa, diharapkan informasi ini dapat membantu pemerintah dalam meminimalisir kerugian dan kerusakan.

DAFTAR PUSTAKA

- BMKG (2019), Earthquake Repository. Diambil 30 Juni 2019, dari http://repegempa.bmkg.go.id/repo_new/.
- Bolt, B. A. (1988), *Earthquakes* (2nd ed.), San Francisco: W. H. Freeman.
- Bullen, K. E. (1963), *An Introduction to the Theory of Seismology* (3rd ed.), Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Global-CMT, 2016, Global CMT Catalog Search, Global Centroid-Moment Tensor, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>, diakses tanggal 2 Desember 2018.
- Harris, R.A. (1998), "Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implications for Seismic Hazard", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.103, No.B10, hal. 24347–24358. <http://doi.org/https://doi.org/10.129/98JB01576>
- King, G.C.P., Stein, R.S. dan Lin, J. (1994), "Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.84, No.3, hal. 935–953.
- Madlazim, M. (2015), "Coulomb Stress Changes Due To Recent Aceh EarthquakeS", *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, Vol.5, hal.9. <http://doi.org/10.26740/jpfa.v5n1.p914>.
- Nuannin, P., Kulhanek. Spatial And Temporal B Value Anomalies preceding The Devastating Off Coast Of NW Sumatra Earthquake Of December 26, 2004. *Geophys. Res. Lett.* 32(11)L11307
- Oktaviani, 2012, Resiliensi Remaja Aceh yang Mengalami Bencana Tsunami, Skripsi: Fakultas Psikologi, Universitas Indonesia
- Okada, Y. (1992). Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a HalfSpace. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), 1018–1040.
- Siwi Windy Pricilia, Dkk. (2020), Perubahan Coulomb Stress Akibat Gempabumi Laut Maluku 7 Januari 2019, *Jurnal Geosaintek*, Vol. 6 No.3 Tahun 2020. 137-142. P-Issn: 2460- 9072, E-Issn: 2502-3659
- S. Ardinsyah (2014), "Kajian jejak Coulomb static stress change dan lokasi gempa bumi signifikan daerah bengkul (periode tahun 2000 – 2007)", *Jurnal Ilmu Fisika*, Vol.2, No.1.
- Setiadi, T.A.P., Perdana, Y.H. dan Rohadi, S. (2017), "Analisis Coulomb Stress Gempa Bumi Deli Serdang 16 Januari 2017", *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)*, Vol.6, hal. SNF2017-EPA-57–64.
- Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, 2010, Workshop Paparan Tinjauan Teknis Peta Bahaya Gempa Indonesia Terbaru, Bandung.
- Weatherley, D K (2006), "Coulomb stress changes due to Queensland earthquakes and the implications for seismic risk assessment", *Earthquake Engineering in Australia*, Australian Earthquake Engineering Society, Melbourne, Diambil dari [ew/UQ:104987](http://www.earthquakeengineering.org.au/ew/UQ:104987).
- Xie, C., Zhu, Y., Lei, X., Yu, H. dan Hu, X. (2010), "Pattern of Stress Change and Its Effect on Seismicity Rate Caused by Ms8.0 Wenchuan Earthquake", *Science China Earth Sciences*, Vol.53, No.9, hal. 1260–1270.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Medan beserta dosen pembimbing atas dukungan yang sangat berharga dalam membantu penulis menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada BMKG yang telah menyediakan data parameter gempa susulan.