Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat
Volume 20, Nomor 1, Februari 2023
1819-796X (p-ISSN); 2541-1713 (e-ISSN)

Analisis Tingkat Seismisitas dan Perubahan Coulomb Stress di Daerah Sulawesi Tengah Tahun 1996-2022

Lailatul Husna Lubis*), Ratni Sirait, Dhiau Rahman Fikri
Program Studi Fisika, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara Medan

Email korespodensi : dhiau.rahman@uinsu.ac.id

DOI: https://doi.org/ flux.v20i1.14273
Submitted: 27Agustus 2022; Accepted: 08 Februari 2023:

ABSTRAK- Sulawesi Tengah merupakan daerah yang rawan terhadap bencana gempa bumi. Pergerakan Sesar Palu Koro merupakan pemicu sebagian besar kejadian bencana gempa bumi merusak pada wilayah Sulawesi Tengah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat seismisitas berdasarkan parameter seismotektonik b-value dan coulomb stress changes pada rentang tahun 1996 – 2022 di wilayah Sulawesi Tengah. Penelitian ini menggunakan data katalog gempa bumi tahun 1996-2022 dari katalog USGS. Data dari katalog USGS selanjutnya diolah dengan menggunakan Zmap v6 berbasis MATLAB untuk mendapatkan nilai parameter kegempaan b-value dengan metode maximum likelihood. Pengolahan data untuk coulomb stress diolah menggunakan software Coulomb 3.4.2 berbasis MATLAB. Berdasarkan hasil analisis diperoleh b-value pada zona 1 sampai zona 3 adalah sebesar 0,653 – 0,777. Hasil analisis perubahan coulomb stress diperoleh perubahan coulomb stress positif ditunjukkan oleh lobus merah dengan nilai 1 hingga 8 bar dan perubahan coulomb stress negatif ditunjukkan oleh lobus biru dengan nilai -1 hingga -8 bar. Hasil analisis b-value dan coulomb stress menunjukkan b-value yang diperoleh relatif rendah dan berkorelasi dengan tingkat perubahan coulomb stress yang tinggi. Secara umum daerah rawan gempa terletak di bagian barat dan timur Sulawesi Tengah.

KATA KUNCI: seismisitas, b-value, coulomb stress, maximum likelihood

ABSTRACT– Central Sulawesi is an area that is prone to earthquakes. The Palu Koro Fault's movement triggers most of the destructive earthquakes in the Central Sulawesi region. This study aims to analyze seismicity based on the seismotectonic parameter b-value, coulomb stress changes, and the risk of earthquakes in Central Sulawesi in the 1996-2022 range based on the seismicity level. This study uses data from the 1996-2022 earthquake catalog from the USGS catalog. Using the maximum likelihood method, data from the USGS catalog was then processed using Zmap v6 based on MATLAB to obtain the b-value seismicity parameter. Data processing for coulomb stress is processed using MATLAB-based Coulomb 3.4.2 software. Based on the analysis results, the b-value in zone 1 to zone 3 is 0.653 – 0.777. The analysis of changes in coulomb stress obtained positive coulomb stress changes indicated by the red lobe with a value of 1 to 8 bar and negative coulomb stress changes indicated by the blue lobe with a value of -1 to -8 bar. The analysis of the b-value and coulomb stress showed that the b-value obtained was relatively low and correlated with a significant change in coulomb stress. In general, earthquake-prone areas are located in the western and eastern parts of Central Sulawesi..

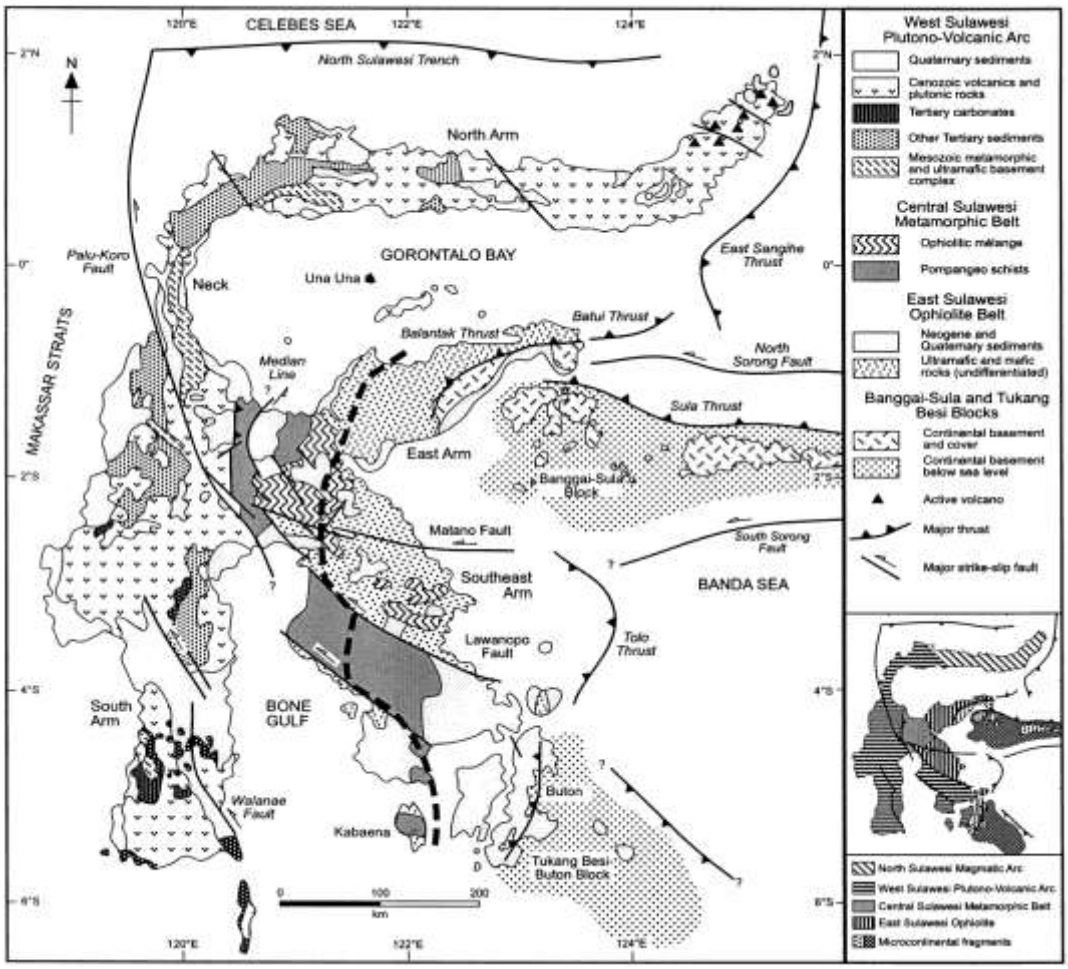
KEYWORDS : seismicity, b-value, coulomb stress, maximum likelihood

PENDAHULUAN

Gempa bumi memiliki dampak yang cukup serius bagi kehidupan manusia terutama bagi mereka yang tinggal di lingkungan yang dekat dengan sesar aktif utama baik di darat maupun di zona subduksi di daerah pantai (Desifatma *et al.* 2021). Gempa bumi terjadi disebabkan karena terjadi peristiwa pelepasan energi secara tiba-tiba dari dalam permukaan bumi, yang menyebar ke segala arah (Simanjuntak and Olymphia 2017). Salah satu faktor penyebab kejadian gempa bumi adalah proses tektonik pada suatu wilayah.

Proses tektonik yang sangat rumit menyebabkan terbentuknya pulau Sulawesi, maka daripada itu bentuk pulau Sulawesi seperti huruf K. Struktur geologi pulau Sulawesi dan aktifnya kembali sesar-sesar yang ada merupakan hasil dari aktivitas tektonik yang terjadi di pulau Sulawesi. Karena proses tersebut menyebabkan proses terangkatnya batuan jenis ofiolit pada bagian timur pulau Sulawesi, terangkatnya batuan pra tersier di bagian barat Sulawesi dan terangkatnya jalur batuan metamorf di Sulawesi bagian tengah seperti pada Gambar 1 (Supartoyo, Surono, *et al.* 2014)

Provinsi Sulawesi Tengah merupakan salah satu daerah rawan bencana gempa bumi. Hal tersebut terjadi diakibatkan lempeng tektonik mikro serta lempeng tektonik utama di wilayah pulau Sulawesi yang dapat mengakibatkan peristiwa manifestasi tektonik juga berdampak di wilayah rawan gempa bumi (Ismullah M *et al.* 2015). Lempeng Filipina merupakan lempeng mikro yang mengakibatkan tingginya tingkat seismisitas Sulawesi. Sedangkan Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Pasifik merupakan lempeng tektonik utama yang mengakibatkan tingginya seismisitas Sulawesi. Lempeng yang menumbuk bagian utara Irian dan juga pulau bagian utara Maluku disertai kecepatan 120 mm/tahun adalah lempeng pasifik, kecepatan lempeng pasifik ini dua kali lebih cepat dari kecepatan penajaman suatu lempeng pada bagian barat serta selatan Indonesia (Natawidjaja and Triyoso 2007). Sementara itu, Lempeng yang bergerak ke arah utara disertai kecepatan 50-70 mm/tahun adalah lempeng samudera Indo-Australia, yang juga melandai pada bawah palung laut di bagian dalam Sumatera – Jawa pada bagian barat pulau Timor NTT (Bock *et al.* 2003)Berdasarkan pada kondisi tektonik, Bencana gempa bumi di Indonesia bagian timur berpotensi dua kali lebih tinggi daripada Indonesia bagian barat



Gambar 1. Peta Geologi Pulau Sulawesi, (Hall and Wilson 2000)

(Natawidjaja and Triyoso 2007). Sehingga Provinsi Sulawesi Tengah termasuk ke dalam daerah rawan bencana gempabumi. Kejadian gempa bumi di Sulawesi Tengah pada umumnya diakibatkan karena pergerakan sesar Palu Koro. Sesar Palu Koro adalah *sinistral strike slip fault* (sesar mendatar mengiri) yang termasuk sesar aktif karena keaktifan gempa bumi dangkal pada sepanjang sesar ini (Supartoyo, Sulaiman, *et al.* 2014).

Menurut katalog gempa USGS, pada jarak 181 km dari Kota Palu, di Provinsi Sulawesi Tengah, pada 1 Januari 1996 terjadi gempa dengan magnitudo besar yaitu 7,9 Mw. Menurut PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Gempa bumi), kabupaten Donggala dan kabupaten Toli-toli di Provinsi Sulawesi Tengah dengan skala MMI VI mengakibatkan 9 orang tewas, juga bencana tsunami yang menyebabkan jalan-jalan tertutup oleh gelondongan kayu. Selanjutnya gempa bumi dengan magnitudo besar kembali terjadi di Provinsi Sulawesi Tengah sehingga menyebabkan bencana tsunami di 28 September 2018 lalu, Menurut Pusat Gempa bumi dan Tsunami BMKG, gempa dengan magnitudo 7,5 Mw dengan Tsunami ini menyebabkan korban tewas sebanyak 2.037 orang (Setiyono *et al.* 2019).

Parameter seismotektonik yang digunakan dalam penelitian ini adalah b-value sebagaimana dipaparkan B. Gutenberg dan C.F. Ritcher dengan hubungan frekuensi dan magnitude sehingga dapat mengetahui aktifitas seismik dan juga kerapuhan batuan pada lokasi penelitian (Gutenberg B. 1945). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara perubahan coulomb stress dengan b-value (tingkat kerapuhan batuan) di lokasi penelitian.

B-value adalah parameter seismotektonik yang distribusinya untuk menentukan daerah yang rawan terhadap bencana gempa bumi merusak agar dapat melakukan mitigasi bencana gempa bumi (Harlianto 2018).

$$b = \frac{\log e}{\overline{M} - M_{min}} \quad (1)$$

Keterangan:

$\log e$ = 0,4343
$\overline{M}$ = Magnitudo rata-rata (M_w)
M_{min} = Magnitudo minimum (M_{min})

Coulomb stress adalah metode yang dapat digunakan untuk melihat distribusi stress baik yang sudah dilepaskan karena gempabumi atau masih tersimpan di dalam sesar. Perubahan coulomb stress merupakan sebuah proses geologi akibat dari perubahan stress pada batuan akibat proses deformasi diskrit lokal yang terjadi di lokasi penelitian (Nuannin *et al.* 2005).

$$\Delta CSC = \Delta\tau + \mu.\Delta\sigma \quad (2)$$

Keterangan:

ΔCSC = Perubahan coulomb stress (bar)
$\Delta\tau$ = Shear stress (bar)
μ = Koefisien friksi (0,4)
$\Delta\sigma$ = Normal stress (bar)

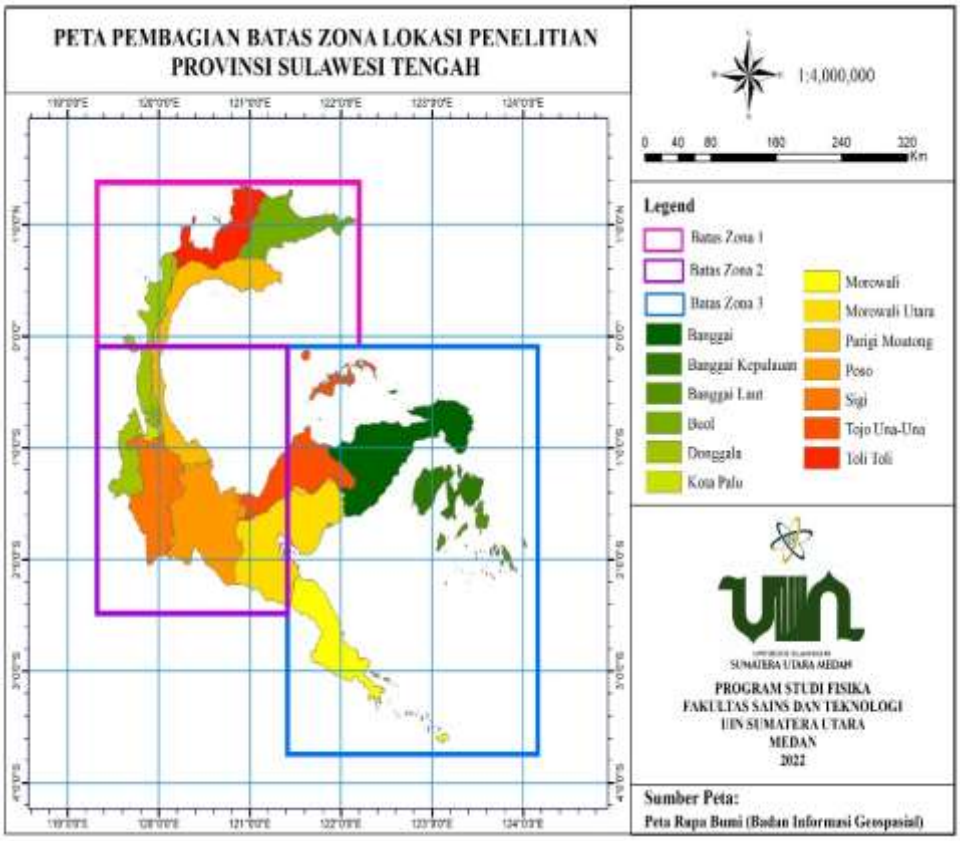
METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

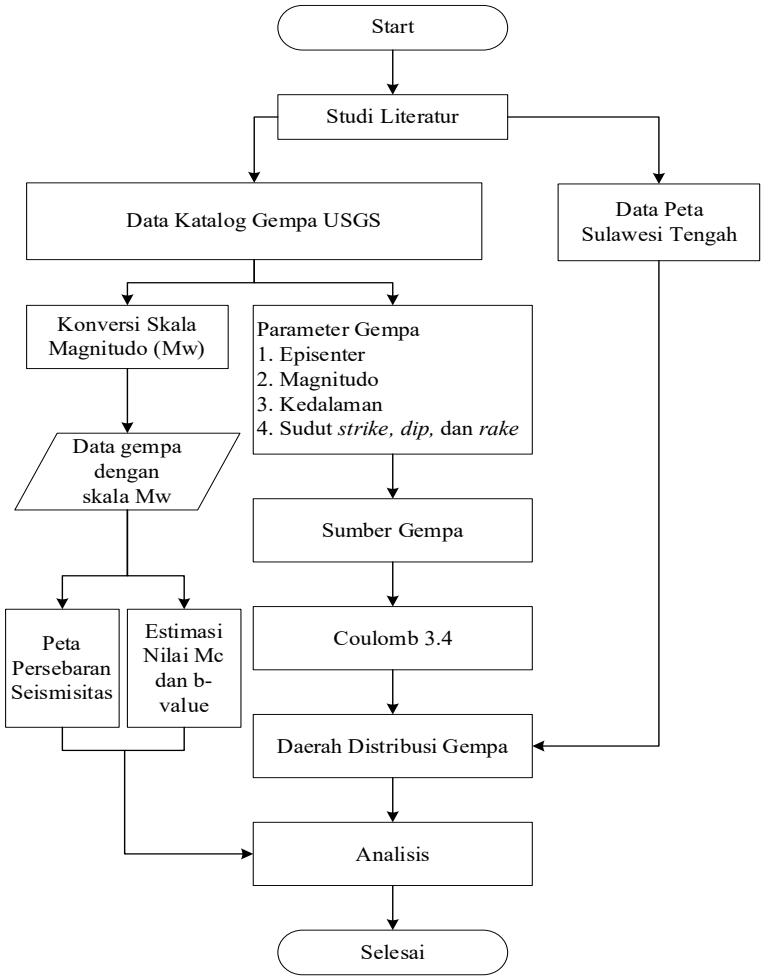
Gambar 2 adalah peta wilayah penelitian skala 1:4.000.000 berdasarkan Peta Rupa Bumi (Badan Informasi Geospasial). Zona 1 dibatasi oleh garis pink magenta, Zona 2 dibatasi oleh garis ungu, dan zona 3 dibatasi oleh garis biru. Sebaran gempa bumi di ketiga zona tersebut selanjutnya dianalisis di Kampus IV UIN Sumatera Utara Medan.

Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder katalog gempa dari United States Geological Survey (USGS 2022). Data katalog gempa USGS diperoleh dengan mencari daerah Sulawesi Tengah, pada posisi geografis secara astronomis adalah 1°24′ LU – 2°30′ LS dan 119°18′ BT – 124°12′ BT. Data yang diperoleh adalah *time, latitude, longitude, depth,* dan *magnitude*. Penelitian ini menggunakan rentang waktu 26 tahun (1996-2022) dan didapat sebanyak 1.182 data gempa bumi di lokasi penelitian Sulawesi Tengah. Untuk sebagai bantuan pada penelitian ini digunakan instrumen peneltian berupa perangkat keras (*hardware)* dan perangkat lunak (*software*)



Gambar 2. Peta Lokasi Penelitian Sulawesi Tengah



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Analisa Data

B-Value

Data gempa yang diunduh dari katalog gempa USGS disimpan dalam file excel kemudian dikonversi satuannya ke Mw. Setelah itu disimpan dalam format .dat atau .txt. Parameter gempa yang digunakan yaitu Lon, Lat, *Year, Month, Day, Mag, Depth, Hour*, dan *Min*. Data diinput dalam *software* Zmap disimpan dalam bentuk file .dat atau .txt, kemudian b-value dianalisis menggunakan hubungan antara besaran gempa dan frekuensi gempa.

Coulomb Stress

Analisis perubahan coulomb stress dilakukan dengan menggunakan data dari katalog gempa USGS. Jumlah data yang relevan dengan Sulawesi Tengah adalah 3 kejadian gempa berdasarkan pembagian 3 batas zona di lokasi penelitian. Data yang dibutuhkan adalah Lat, Lon, *Strike, Slip, Dip*, dan *Rake* yang diinputkan ke dalam *Software* Coulomb 3.4.2.

Diagram Alir Penelitian

Diagram alir ditunjukkan pada Gambar 3.

HASIL DAN PEMBAHASAN

B-Value

Parameter seismotektonik b-value dianalisis dengan hubungan antara frekuensi kejadian gempa dan besaran gempa yang terjadi menggunakan metode maximum likelihood. Data yang dianalisis berjumlah 1182 kejadian gempabumi dari katalog USGS. Gempa bumi pada zona 1 berjumlah 316 kejadian gempa, pada zona 2 berjumlah 425 kejadian gempa, dan pada zona 3 berjumlah 441 kejadian gempa. Magnitudo gempa 4,4 Mw hingga 7,9 Mw dengan *depth* kurang dari 60 km.

Zona 1

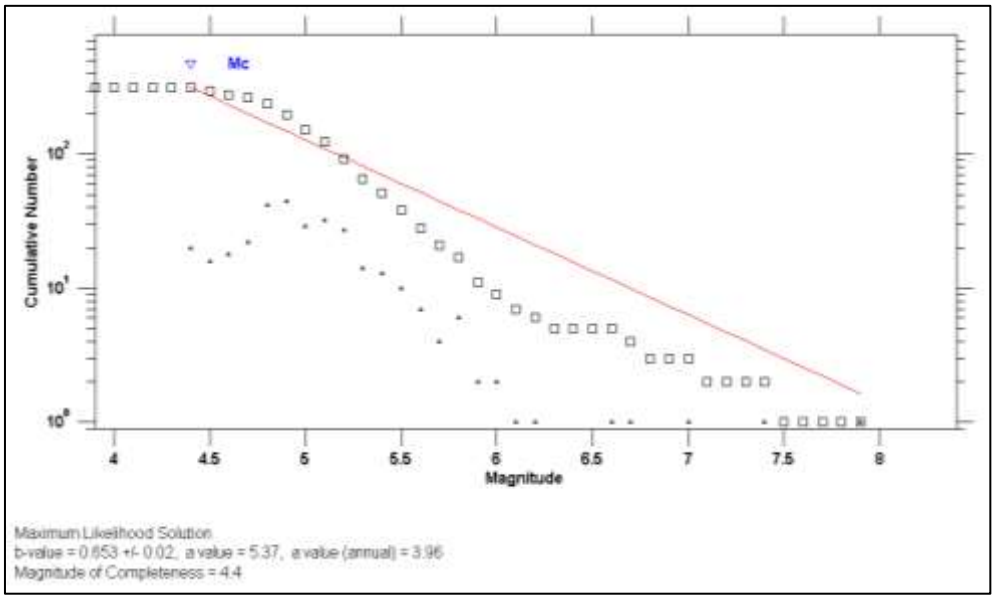
Pada zona 1 meliputi bagian utara provinsi Sulawesi Tengah. Gempa besar tertinggi pada zona 1 terjadi tahun 1996 dengan magnitude sebesar 7.9 Mw. Sesar Palu Koro mempengaruhi sebagian gempabumi di wilayah ini. Zona 1 dengan magnitudo 4,4 Mw hingga 7,9 Mw sehingga didominasi oleh gempa keras/sedang hingga gempa besar. Zona 1 meliputi wilayah Buol, Toli-Toli, Parigi Moutong, dan Donggala. Dengan menggunakan estimasi maksimum likelihood pada grafik yang ditunjukkan Gambar 4 didapatkan hasil dari penelitian distribusi frekuensi-magnitudo, sehingga didapat b-value sebesar 0,653 menggunakan standar error 0,02 dan nilai Mc adalah 4,4. Selaras hal ini menjelaskan nilai Mc 4,4 Mw ialah magnitudo terkecil yang masih memenuhi linearitas akan relasi Frekuensi-Magnitudo. Tingkat kerapuhan batuan digambarkan oleh b-value, kemiringan/slope ditunjukkan garis berwarna merah, frekuensi data dari katalog gempa USGS ditunjukkan oleh lambang △, sementara frekuensi kumulatif ditunjukkan oleh lambang

Zona 2

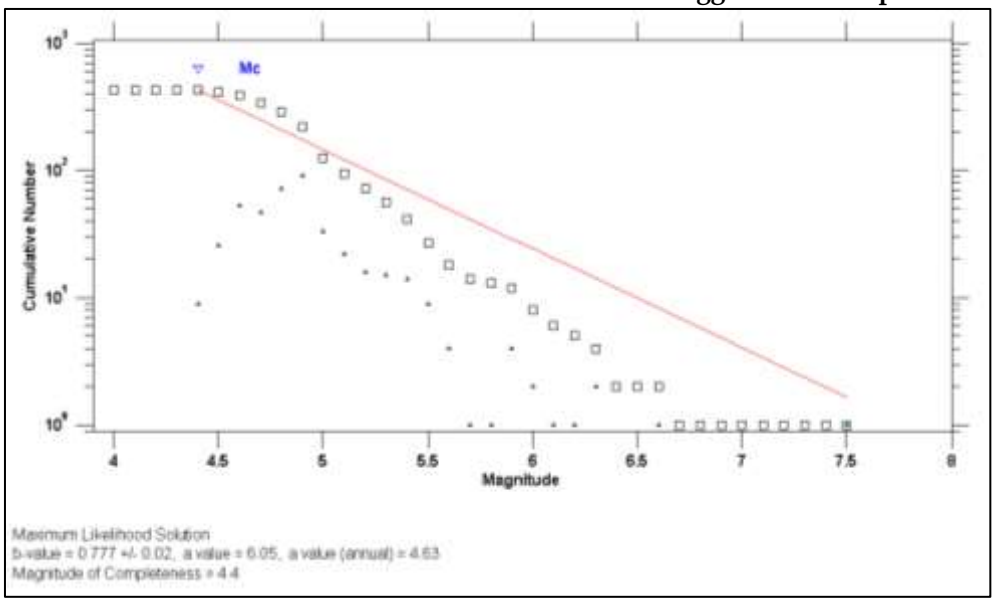
Pada Zona 2 yang ditunjukkan pada Gambar 5 meliputi di wilayah tengah provinsi Sulawesi Tengah. Zona 2 memiliki magnitude 4,4 Mw hingga 7,5 Mw dengan kedalaman < 60 km. Zona 2 meliputi wilayah Donggala, Parigi Moutong, Sigi, Poso, Tojo Unauna, Morowali Utara, dan Palu. Setelah dilakukan analisis menggunakan metode maximum likelihood didapat Zona 2 memiliki B-Value sebesar 0,777 menggunakan standard error 0,02 dan Mc sebesar 4,4 Mw. Sesar palu koro yang mempengaruhi kejadian gempa di wilayah Zona 2.

Zona 3

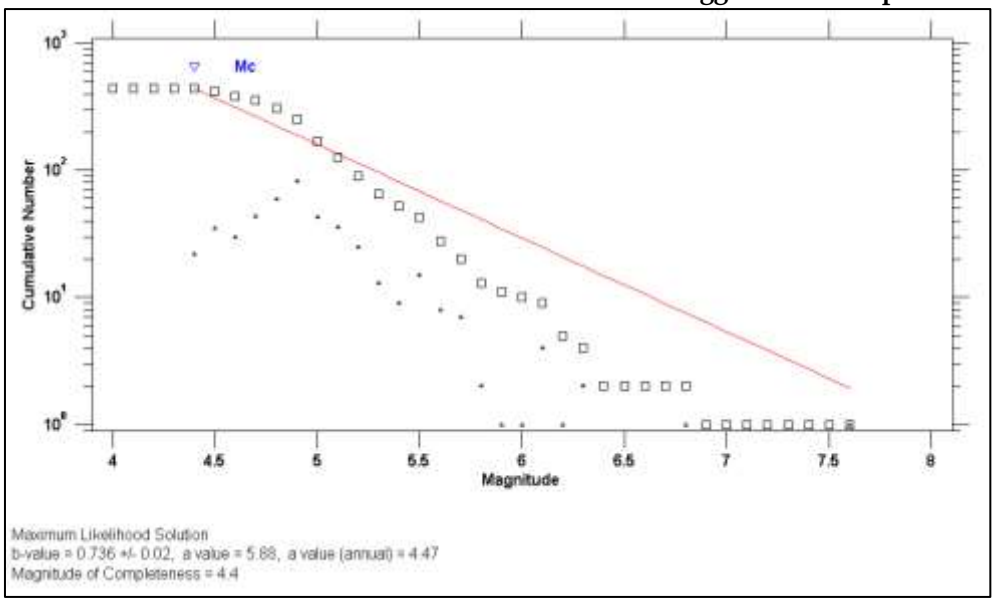
Pada Zona 3 yang ditunjukkan pada Gambar 6 meliputi bagian timur Sulawesi Tengah yaitu Kabupaten Banggai, Tojo Unauna, Banggai Kepulauan, Banggai Laut, Morowali, dan Morowali Utara. Sesar Batui merupakan sesar yang mempengaruhi aktifitas tektonik di wilayah ini. Zona 3 dilingkupi dengan gempa dangkal meliputi kedalaman < 60 km. Zona 3 dilingkupi oleh magnitudo di sebesar 4,4 Mw hingga 7,6 Mw. 441 kejadian gempa merupakan jumlah kejadian gempabumi pada zona 3. Setelah dilakukan analisis menggunakan metode maximum likelihood didapat b-value zona 3 sebesar 0,736 menggunakan standard error 0,02 dan memiliki magnitudo Mc sebesar 4,4 Mw.



Gambar 4. Grafik Hasil analisis B-Value zona 1 menggunakan Zmap v6.



Gambar 5. Grafik Hasil analisis B-Value zona 2 menggunakan Zmap v6



Gambar 6. Grafik Hasil analisis B-Value zona 3 menggunakan Zmap v6

Coulomb Stress

Coulomb 3.4.2 merupakan software yang digunakan untuk menganalisis perubahan. coulomb stress berdasarkan data dari USGS Arah pergerakan stress pasca gempa dapat diketahui dengan melakukan analisis ini. Penelitian Coulomb stress dilakukan dengan merujuk pada kejadian gempa yang terjadi di lokasi penelitian. Telah terjadi 3 kali gempa tertinggi pada masing masing zona yaitu gempa 1 Januari 1996 di Donggala, gempa 28 September 2018 di Palu, dan gempa 4 Mei 2000 di Banggai. Merah menunjukkan daerah yang mengalami peningkatan stres sedangkan biru menunjukkan daerah yang mengalami penurunan stres setelah gempa. Dalam melakukan analisis coulomb stress berdasarkan pada kejadian gempa yang pernah terjadi daerah rawan gempa dibagi menjadi tiga untuk memudahkan dalam analisis perubahan coulomb stress.

Zona 1

Coulomb stress dianalisis pada Zona 1 meliputi Kota Palu, Kabupaten Toli Toli, Buol, Donggala dan Parigi Moutong. Pada 1 Januari tahun 1996 analisis coulomb stress dilakukan selama gempa. Gambar 7(a) menunjukkan coulomb stress pasca gempa meningkat dari 1 menjadi 8 bar, ditunjukkan oleh pola merah, dan tegangan menurun dari -1 menjadi -8 bar, ditunjukkan oleh pola biru. Dilihat secara vertikal yang ditunjukkan pada Gambar 7(b) perubahan coulomb stress menyebar hingga depth > 30 km. Peningkatan tekanan menyebar secara horizontal pada jarak > 50 km. Arah peningkatan tegangan memanjang ke Donggala dan Parigi Moutong dari timur laut menuju barat daya seperti Gambar 7(a). Zona peningkatan stress merupakan sebagian besar keberadaan gempa yang terjadi di Zona 1. Peningkatan stress menuju Kota Palu dan Kabupaten Donggala.

Zona 2

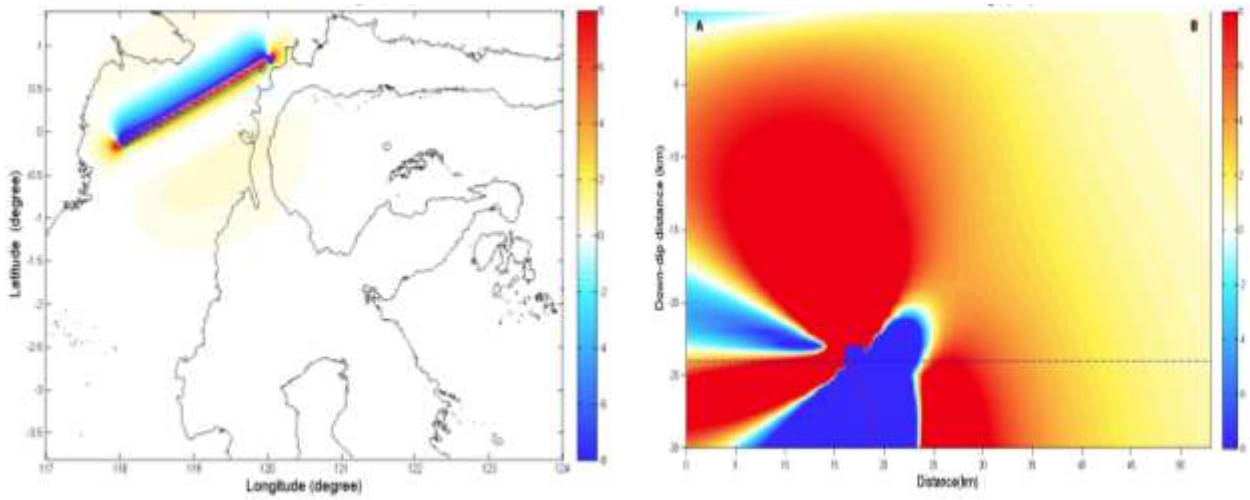
Coulomb stress pada zona 2 meliputi Sigi, Poso, Palu, Donggala, Parigi Moutong, Tojo Una una, dan Morowali Utara. Perubahan coulomb stress dilakukan akibat dari gempa bumi 28 September 2018 yang terjadi di Kota Palu. Kegempaan pada zona 2 dipengaruhi oleh pergerakan sesar Palu Koro yang bergerak dari barat laut sampai tenggara Sulawesi.pada Gambar 8(a) menggambarkan terjadi kenaikan dari 1–8 bar menunjukkan terjadi perubahan coulomb stress positif. Pada zona 2 juga terjadi penurunan stress -1 hingga -8 bar yang terjadi setelah gempa dan memiliki arti perubahan coulomb stress negatif. Pada Gambar 8(b) menggambarkan peningkatan stress pada gempa 28 September 2018 pada depth < 20 km dan pengurangan stress terjadi pada depth > 20 km.

Zona 3

Coulomb stress pada zona 3 meliputi bagian timur Sulawesi Tengah, yaitu meliputi Kabupaten Banggai, Kabupaten Tojo Unauna, Morowali Utara, Kabupaten Morowali, Banggai Kepulauan, dan Banggai Laut. Analisis coulomb stress dilakukan berdasarkan pada gempa bumi 4 Mei 2000 di Kabupaten Banggai. Berdasarkan analisis perubahan coulomb stress pada zona 3 didapat nilai 1 sampai 8 bar yang mengartikan peningkatan stress dan digambarkan oleh warna merah. Kemudian juga terjadi penurunan coulomb stress dengan nilai -1 hingga -8 bar yang digambarkan dengan warna biru ditunjukkan pada Gambar 9(a). Secara vertikal distribusi perubahan coulomb stress menggambarkan peningkatan stress pada kedalaman >5km ditunjukkan pada Gambar 9(b). Peningkatan stress bergerak menuju Kabupaten Banggai dan terjadi penurunan stress yang menuju Kabupaten Banggai Laut.

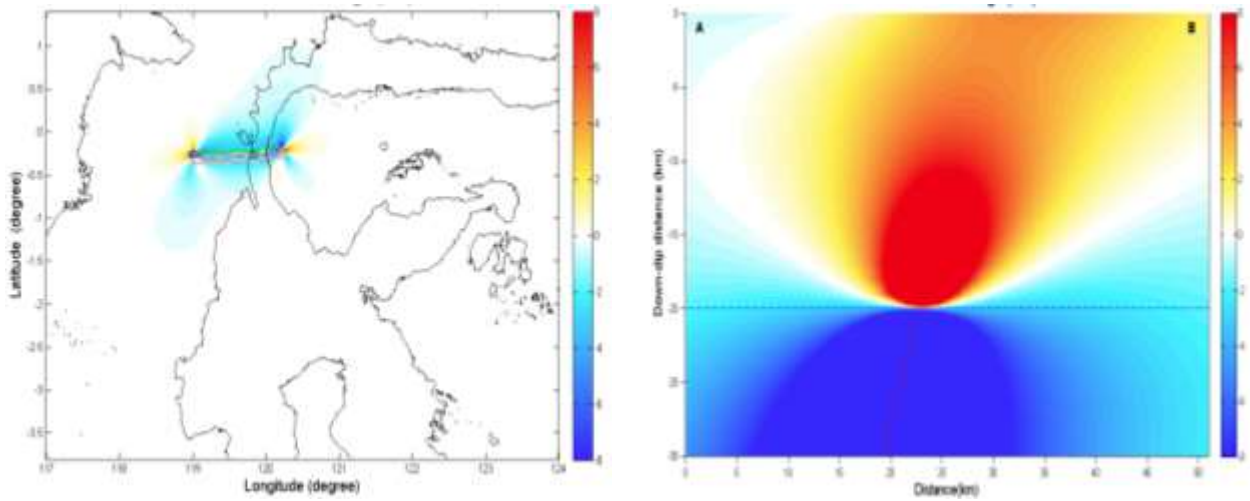
Hubungan B-Value dengan Coulomb Stress

B-value merupakan parameter seismotektonik yang digunakan dalam menentukan tingkat kerapuhan batuan pada suatu wilayah. Coulomb stress merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk melihat sebaran tegangan batuan akibat peristiwa gempabumi. Menurut (Ardiansyah 2014), hasil b-value yang rendah akan berkorelasi dengan tingkat stress yang tinggi



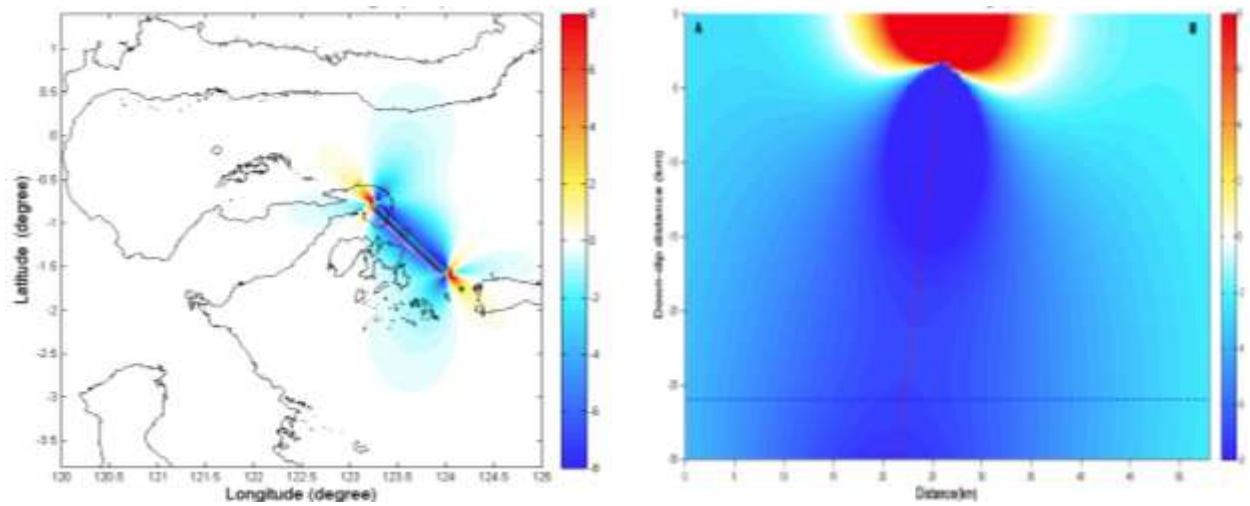
(a) (b)

Gambar 7. (a) Perubahan coulomb stress 1 Jan 1996 secara horizontal (b) Perubahan coulomb stress 1 Jan 1996 secara vertikal



(a) (b)

Gambar 8. (a) Perubahan coulomb stress 28 Sep 2018 secara horizontal (b) Perubahan coulomb stress 28 Sep 2018 secara vertikal



(a) (b)

Gambar 9. (a) Perubahan coulomb stress 4 Mei 2000 secara horizontal (b) Perubahan coulomb stress 4 Mei 2000 secara vertikal

Tabel 1. Hubungan B-Value dengan Coulomb Stress

No	Zona	Batas Zona	b-Value	Coulomb Stress	Lokasi	Sesar Yang Menyebabkan Gempa
1	Zona 1	1°24′ LU – 0°6′ LS dan 119°18′ BT – 122°12′ BT	0,653	5,713 bar	Toli-Toli, Buol, Donggala, dan Parigi Moutong	Sesar Palu Koro
2	Zona 2	0°6′ LS – 2°30′ LS dan 119°18′ BT – 121°24′ BT	0,777	-7,680 bar	Palu, Donggala, Parigi Moutong, Sigi, Poso, Tojo Una Una dan Morowali Utara	Sesar Palu Koro
3	Zona 3	0°12′ LU – 2°18′ LS dan 122°12′ BT – 124°12′ BT	0,736	-6,736 bar	Banggai, Tojo Unauna, Morowali Utara, Morowali, Banggai Kepulauan, dan Banggai Laut	Sesar Batui

Berdasarkan pada Tabel 1, pada zona 1 dengan batas wilayah 1°24′ LU – 0°6′ LS dan 119°18′ BT – 122°12′ BT dari hasil analisis b-value didapatkan tingkat kerapuhan batuan pada zona 1 adalah 0,653. Pada zona 1 ini merupakan b-value terendah dari ketiga zona yang ada di lokasi penelitian. Perubahan coulomb stress yang terjadi di zona 1 adalah perubahan coulomb stress positif yaitu 5,713 bar yang berkorelasi dengan tingkat kerapuhan batuan terendah pada lokasi penelitian.

Pada zona 2 dengan batas wilayah 0°6′ LS – 2°30′ LS dan 119°18′ BT – 121°24′ BT dari hasil analisis b-value didapatkan tingkat kerapuhan batuan pada zona 2 adalah -7,680. Pada zona 2 ini merupakan b-value tertinggi dari ketiga zona yang ada di lokasi penelitian. Perubahan coulomb stress yang terjadi di zona 2 adalah perubahan coulomb stress negatif yaitu -7,680 bar yang berkorelasi dengan tingkat kerapuhan batuan tertinggi pada lokasi penelitian.

Pada zona 3 dengan batas wilayah 0°12′ LU – 2°18′ LS dan 122°12′ BT – 124°12′ BT dari hasil analisis b-value didapatkan tingkat kerapuhan batuan pada zona 3 adalah -6,736. Pada zona 2 ini merupakan b-value tinggi dari ketiga zona yang ada di lokasi penelitian. Perubahan coulomb stress yang terjadi di zona 2 adalah perubahan coulomb stress negatif yaitu -6,736 bar yang berkorelasi dengan tingkat kerapuhan batuan tinggi pada lokasi penelitian.

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan diatas, didapat hasil hubungan b-value dengan coulomb stress adalah hasil b-value yang rendah akan berkorelasi dengan tingkat stress yang tinggi, sehingga semakin rendah nilai b-value maka stress pada batuan akan semakin tinggi dan ketika stress pada batuan rendah maka, b-value pada daerah tersebut akan tinggi.

KESIMPULAN

B-value di wilayah Sulawesi Tengah periode 1996 – 2022 pada penelitian hubungan frekuensi-magnitudo dilakukan dengan persamaan Gutenberg-Ritcher didapat hasil dengan estimasi metode maksimum likelihood sebesar 0.653 sampai 0,777 dengan standar error 0,02 dan nilai magnitude of completeness sebesar 4,4.

Berdasarkan hasil analisis perubahan coulomb stress terhadap seismisitas pada wilayah Sulawesi Tengah periode 1996 - 2022 diperoleh nilai peningkatan coulomb stress yang berkisar antara 1 hingga 8 bar yang ditunjukkan dengan lobus warna merah. Kemudian nilai penurunan coulomb stress berkisar -1 hingga -8 bar yang ditunjukkan dengan lobus warna biru.

Hasil b-value yang rendah berhubungan dengan tingkat stress yang tinggi. Peningkatan

stress bergerak menuju daerah yang memiliki resiko kegempaan tinggi yaitu daerah sekitar Kota Palu, Kabupaten Donggala, dan Kabupaten Banggai. Sedangkan penurunan stress bergerak menuju Kabupaten Banggai Laut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Dekan Fakultas Sains dan Teknologi, Kaprodi dan Sekprodi Fisika UIN Sumatera Utara Medan, serta seluruh pihak yang terlibat dalam melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ardiansyah, S., 2014. Kajian jejak Coulomb static stress change dan lokasi gempa bumi signifikan daerah bengkulu (periode tahun 2000–2007). *Jurnal Ilmu Fisika*, 2 (1).

Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J.F., Stevens, C.W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S.S.O., and Calais, E., 2003. Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108 (B8).

Desifatma, E., Kadir, I.R., Taufik, A., and Pratomo, P.M., 2021. Integrasi Early Warning System untuk Gempabumi. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 19 (1), 22–30.

Gutenberg B., 1945. Frequency of earthquakes in California. *Nature*.

Hall, R. and Wilson, M.E.J., 2000. Neogene sutures in eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18 (6).

Harlianto, B., 2018. Pemetaan B Value Untuk Identifikasi Kerentanan Wilayah Terhadap Gempabumi Dengan Mempertimbangkan Kepadatan Penduduk Di Kabupaten Bengkulu Utara. Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik Universitas Bengkulu, Bengkulu.

Ismullah M, M.F., Lantu, Aswad, S., and Massinai, M.A., 2015. Tectonics earthquake distribution pattern analysis based focal mechanisms (Case study Sulawesi Island, 1993–2012). *In*: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 030013.

Natawidjaja, D.H. and Triyoso, W., 2007. The Sumatran fault zone—From source to hazard. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 1 (01), 21–47.

Nuannin, P., Kulhanek, O., and Persson, L., 2005. Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004. *Geophysical research letters*, 32 (11).

Setiyono, U., Gunawan, I., Priyobudi, Y.T., Imananta, R.T., and Ramdhan, M., 2019. Katalog gempa bumi signifikan dan merusak 1821-2018. *Jakarta: Pusat gempa bumi dan tsunami kedeputian bidang geofisika badan meteorologi klimatologi dan geofisika*.

Simanjuntak, A.V.H. and Olymphia, O., 2017. Perbandingan Energi Gempa Bumi Utama dan Susulan (Studi Kasus: Gempa Subduksi Pulau Sumatera dan Jawa). *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 14 (1), 19–26.

Supartoyo, S., Sulaiman, C., and Junaedi, D., 2014. Kelas Tektonik Sesar Palu Koro, Sulawesi Tengah. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 5 (2), 111–128.

Supartoyo, Surono, and Putranto, E., 2014. Katalog Gempabumi Merusak di Indonesia Tahun 1612-2014, 2014 (57), 151.

USGS, 2022. Data Katalog Gempa [online].