

Studi perulangan gempa di Sumatera Utara berdasarkan b-value data gempa bumi 1926-2023

Study of earthquake recurrence in North Sumatra based on b-value earthquake data 1926-2023

Enjelina Nababan¹, Refrizon^{2*}, dan Arif Ismul Hadi²

Received 11 February 2024
Accepted 28 March 2024
Published April 2024

¹Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu (UNIB), 38371 Indonesia

²Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu (UNIB), 38371 Indonesia

Abstrak. Provinsi Sumatera Utara merupakan salah satu provinsi yang juga sering terjadi gempa bumi, karena wilayahnya terletak pada pertemuan dua lempeng tektonik yaitu lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perulangan gempa yang terjadi di Provinsi Sumatera Utara berdasarkan dari *b-value* serta kaitan *b-value* dengan magnitudo dan frekuensi gempa bumi. Hubungan *b-value* dengan magnitudo dan frekuensi gempa bumi dianalisis dengan metode likelihood. Data gempa bumi diambil dari website USGS, yaitu data dari tahun 1926-2023 yang berjumlah 4242 kejadian gempa bumi dengan menggunakan software Z-map. Data tersebut dilakukan *cluster* sehingga jumlah data menjadi 3033 data dengan magnitudo 3,0 sampai magnitudo 8,0 dan kedalaman 0-300 km pada koordinat episenter 1°- 4° LU dan 95°-105° BT. Berdasarkan data-data tersebut didapatkan *b-value* = 0,0939 $\pm$ 0,02 dan *a-value* = 7,55, *a-value* (annual) = 5,56 serta nilai *Magnitude of Completeness* = 4,45 dapat menggambarkan tingkat *stress* yang sedang terjadi, *b-value* merupakan nilai yang menunjukkan tingkat kerapuhan suatu batuan. Dari data yang dihasilkan pada daerah Sumatera Utara, gempa yang sering terjadi adalah pada magnitudo 5,0 dan magnitudo 6,0 yang hampir meliputi semua daerah Sumatera Utara. Semakin tinggi nilai *b* pada suatu wilayah, maka akan semakin tua dan rapuh batuanannya sehingga aktivitas seismik di wilayah tersebut juga akan semakin besar. Nilai *b* yang rendah itu merupakan daerah yang memiliki tingkat *stress* yang tinggi yang artinya wilayah tersebut memiliki peluang yang tinggi untuk terjadinya gempa-gempa besar.

Abstract. North Sumatra Province is one of the provinces where earthquakes often occur because the region is located at the meeting point of two tectonic plates, namely the Indo-Australian plate and the Eurasian plate. This research aims to determine the recurrence of earthquakes that occur in North Sumatra Province based on the *b-value* and the relationship between the *b-value* and the magnitude and frequency of earthquakes. The relationship between *b-value* and earthquake magnitude and frequency was analyzed using the likelihood method. Earthquake data was taken from the USGS website, namely data from 1926-2023, totaling 4242 earthquake events using Z-map software. The data was clustered so that the total data became 3033 data with a magnitude of 3.0 to 8.0 magnitude and a depth of 0-300 km at epicenter coordinates 1°-4° N and 95°-105° E. Based on these data, *b-value* = 0.0939 $\pm$ 0.02 and *a-value* = 7.55, *a-value* (annual) = 5.56 and *Magnitude of Completeness* = 4.45 can describe the level of stress that is occurring, *b-value* is a value that shows the level of brittleness of a rock. From the data produced in the North Sumatra area, the earthquakes that frequently occur are at magnitude 5.0 and magnitude 6.0 which almost covers all areas of North Sumatra. The higher the *b* value in an area, the older and brittle the rocks will be, so the seismic activity in that area will also be greater. A low *b* value indicates an area that has a high stress level, which means the area has a high chance of large earthquakes occurring.

Keywords: *b-value*, earthquakes, likelihood method, North Sumatra, recurrence.

Pendahuluan

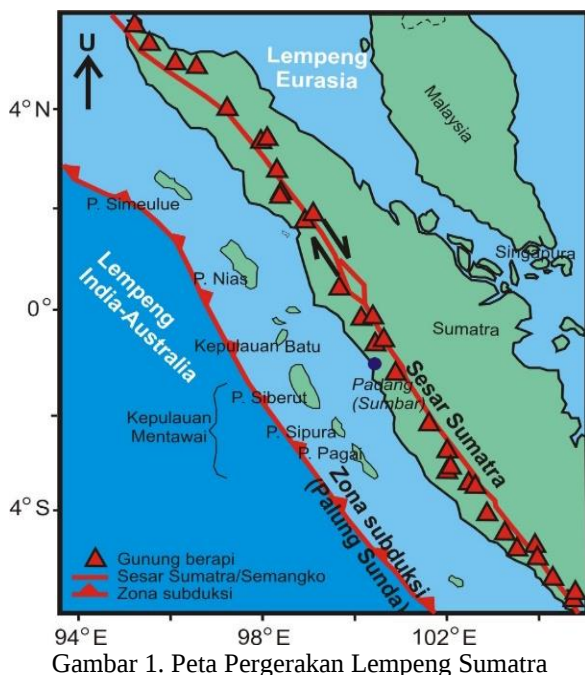
Indonesia merupakan batas pertemuan tiga lempeng tektonik besar di dunia yang aktif bergerak, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng Indo-Australia. Pertemuan tiga lempeng inilah yang menyebabkan

Indonesia menjadi daerah yang rawan terhadap bencana gempa bumi (Septiani & Pujiastuti, 2021).

Salah satu wilayah yang memiliki tatanan tektonik yang cukup unik adalah Sumatra, dimana Sumatra memiliki dua kondisi geologi yang dapat mempengaruhi

aktivitas seismik dan kondisi tektonik-nya Sumatra. Pertama adalah zona subduksi yang merupakan batas antar lempeng Indo-Australia yang menunjam kedalam lempeng Eurasia dan yang kedua adalah zona sesar Sumatra yang dikenal dengan sesar Semangko atau *Sumateran Fault Zone* (SFZ) (Madlazim, 2013).

Salah satu provinsi di Sumatra yang juga sering terjadi gempa bumi adalah Provinsi Sumatera Utara, dimana Sumatera Utara terletak diantara 1° - 4° LU dan 98° - 100° BT merupakan provinsi yang memiliki zona sesar Semangko. Pengaruh energi yang dilepaskan sesar Semangko inilah yang dapat mengakibatkan gempa bumi. Jika gempa bumi dalam magnitudo besar terjadi di dasar laut, maka dapat menimbulkan potensi tsunami (Yustina Kurniawati, 2015).



Gambar 1. Peta Pergerakan Lempeng Sumatra (HandokoExplore, 2012)

Sumatera Utara terdiri dari segmen gempa tektonik aktif yang terletak di segmen Toru, Angkola serta Barumun, dari Kabupaten Tapanuli Utara hingga Padang Lawas serta Madinah. Ruas Toru terletak pada $95^{\circ}55'$ BT- $99^{\circ}30'$ BT dan $1^{\circ}15'$ N- $1^{\circ}15'$ LU dengan panjang ruas 95 km dan kedalaman 20 km. Ruas Angkola secara geografis terletak pada koordinat 99° BT – 100° BT dan $0^{\circ}15'$ N – $1^{\circ}35'$ N dengan panjang segmen 160 km dan kedalaman 20 km dengan potensi gempa maksimum sebesar 7,5 dan kecepatan perpindahan 19 mm/tahun. Sedangkan ruas Barumun terletak di koordinat $99^{\circ}30'$ BT- $100^{\circ}30'$ E serta $0^{\circ}15'$ N dengan panjang ruas 125 km dan kedalaman 20 km, intensitas maksimum sebesar 7,1 dengan kecepatan perpindahan 4 mm/tahun (Panggabean, et al., 2023)



Gambar 2. Peta Patahan Sumatera Utara (Warastri, 2018).

(Lubis et al., 2022), menyatakan bahwa sebagian besar titik gempa di Sumatera Utara berada di darat. Kegempaan yang terjadi diakibatkan karena pergerakan dua lempeng tektonik yaitu lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia, serta pergerakan sesar lokal yang dikenal dengan sesar Toru, Angkola, dan Barumun.

Berdasarkan aktivitas seismik yang terjadi di Sumatera Utara, maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk melihat perulangan gempa di Sumatera Utara berdasarkan *b-value* dengan data gempa periode tahun 1926-2023 dengan mengambil data yang ada di USGS untuk wilayah Sumatera Utara dari magnitudo 3,0 sampai 8,0 yang dirasakan dan tersebar di wilayah Sumatera Utara.

Seismitas di suatu daerah merupakan ukuran untuk membandingkan aktivitas seismik antara satu daerah dengan daerah lain. Parameter-parameter seismitas merupakan harga numerik yang dapat digunakan sebagai ukuran tingkat kegempaan suatu daerah. Parameter seismitas terdiri dari keaktifan seismik (*a-value*) dan tingkat kerapuhan batuan (*b-value*) (Harlianto & Farid, 2018). *B-value* erat sekali kaitannya dengan keadaan tektonik daerah yang sedang diamati, dimana *b-value* bervariasi secara sistematis dan diperkirakan nilainya berkisar sekitar 1,0 (Schorlemmer, & Wyss, 2004).

Setelah adanya informasi mengenai tingkat seismitas di Sumatera Utara, masyarakat maupun pemerintah harus selalu sigap dan waspada apabila bencana kembali melanda. Maka perlu dilakukan upaya mitigasi pra bencana dan setelah bencana gempa bumi terjadi untuk menghindari dampak buruk yang akan terjadi (Amalia & Madlazim, 2016)

Upaya mitigasi bencana gempa bumi yang akan dilakukan adalah dengan mengetahui tingkat *stress* batuan Sumatera Utara serta memprediksi gempa bumi yang akan datang. Dengan melakukan pendekatan statistik menggunakan *b-value* dengan formula dari persamaan Gutenberg-Richter (1994) menggunakan fungsi likelihood dapat dilakukan untuk menganalisis dan memprediksi gempa bumi yang akan datang, sehingga *b-value* dapat digunakan sebagai *precursor* gempa bumi

(Madlazim, 2013) Dengan menggunakan fungsi likelihood sebagai berikut:

$$a = \log N + \log (b \ln 10) + M_0 b \quad (1)$$

Metode untuk menghitung periode ulang gempa bumi adalah dengan menggunakan Metode Least Square, Metode Likelihood dan sebagainya (Yuliza, 2017). Metode Likelihood bertujuan untuk mendapatkan estimasi parameter dengan cara memaksimumkan fungsi likelihood. Dengan metode ini dapat diketahui tingkat keaktifan gempa bumi (*a-value* dan *b-value*) berdasarkan persamaan Gutenberg-Richter, indeks seismitas, tingkat resiko gempa dan probabilitas dan periode ulang gempa untuk periode tertentu pada suatu daerah secara kuantitatif. Kelebihan dari metode ini adalah dalam menghitung secara statistik nilai parameter keaktifan gempa bumi, kelas interval magnitudonya dapat diatur guna untuk menghindari kekosongan magnitudo pada kelas interval tertentu (Budiman, 2011).

Metodologi

Penelitian ini menggunakan data gempa bumi yang diambil dari katalog USGS wilayah Provinsi Sumatera Utara periode 1926-2023, meliputi batas 1°-4° LU dan 98°-100° BT. Data gempa bumi yang diambil dari katalog USGS berjumlah 4272 merupakan data gempa bumi Sumatera Utara dengan magnitudo terkecil 3,0 dan magnitudo terbesar 8,6, dengan kedalaman 10 km – 332,5 km, resolusi 30m x 30m dalam bentuk grid. Setelah dilakukan dekluster katalog jumlahnya menjadi 3033 gempa bumi. *Declustering* perlu dilakukan untuk mendapatkan gempa utama dan mengilangkan pengaruh *aftershok* sehingga didapatkan gempa bumi yang *independent*. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan software matlab Z-map (Wiemer, 2001). Dalam pengolahan data dilakukan dalam beberapa langkah sistematis sebagai berikut:

1. Studi literatur dengan menelaah pustaka yang berhubungan dan mendukung penelitian ini.
2. Mengumpulkan data kejadian gempa dengan jumlah data gempa bumi keseluruhan yang terjadi di Sumatera Utara pada tahun 1926-2023 yang diambil dari katalog USGS.
3. Melakukan seleksi data dan penyeragaman magnitudo (M_w) dan dekluster katalog dengan persamaan berikut:

$$M_w = 1,0107m_b + 0,0801 \quad (2)$$

Untuk rentang magnitudo $3,7 \leq m_b \leq 8,2$

$$M_w = 0,6016M_s + 2,476 \quad (3)$$

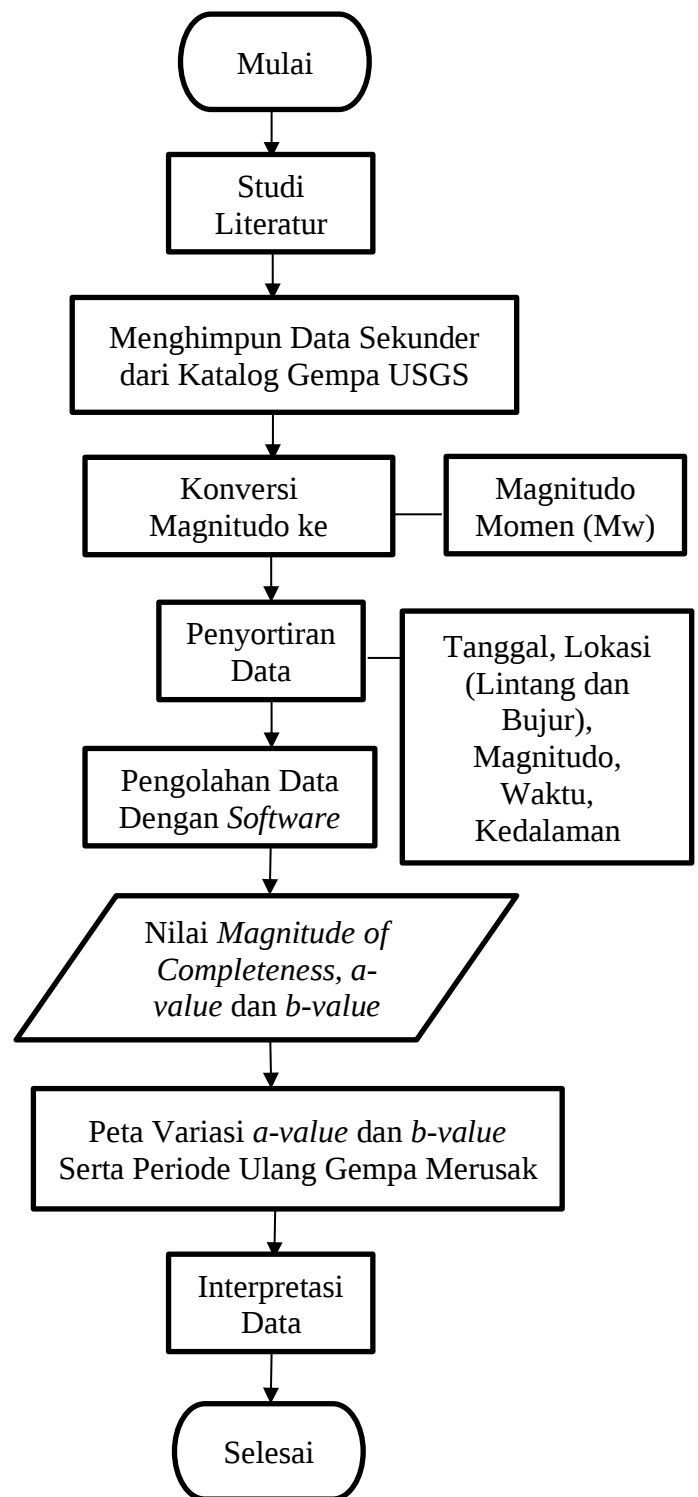
Untuk rentang magnitudo $2,8 \leq M_s \leq 6,1$

$$M_w = 0,9239M_s + 0,5671 \quad (4)$$

Untuk rentang magnitudo $6,2 \leq M_s \leq 8,7$ (Pusgen, 2017)

4. Perhitungan *a-value* dan *b-value*, periode ulang menggunakan software Zmap 6.0 (Wiemer, 2001).

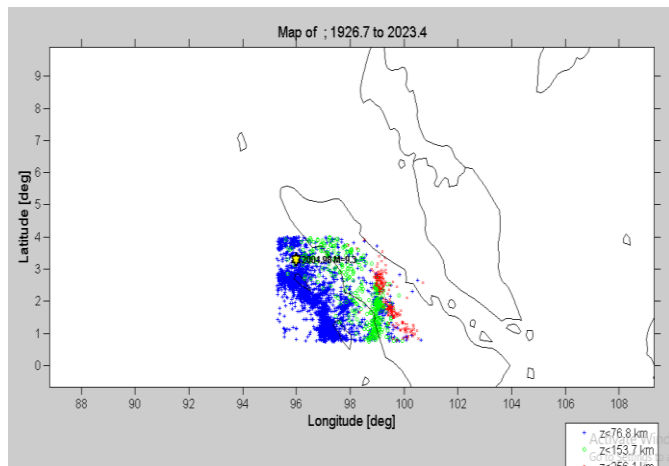
Tahapan pengolahan data secara garis besar seperti Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir pengolahan data gempa

Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil olahan data melalui software ZMAP 6,0 dengan memetakan sebaran gempa bumi dan perulangannya berdasarkan *b-value* dari tahun 1926-2023 wilayah Sumatera Utara dapat dilihat pada Gambar 4.

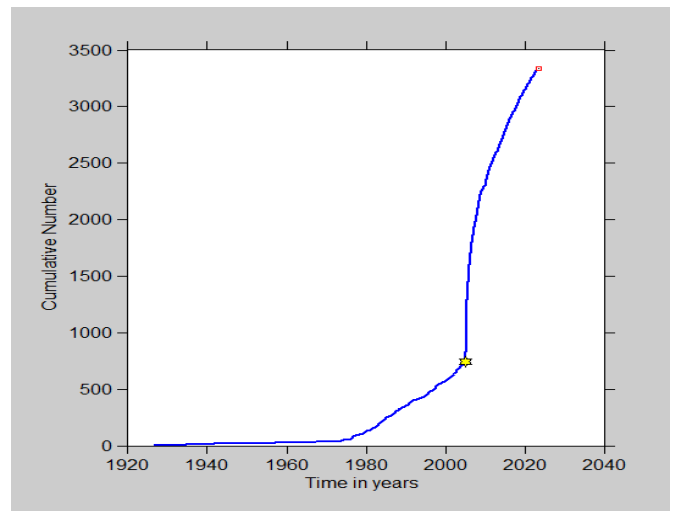


Gambar 4. Mapping Sebaran Gempa di Sumatera Utara 1926-2023.

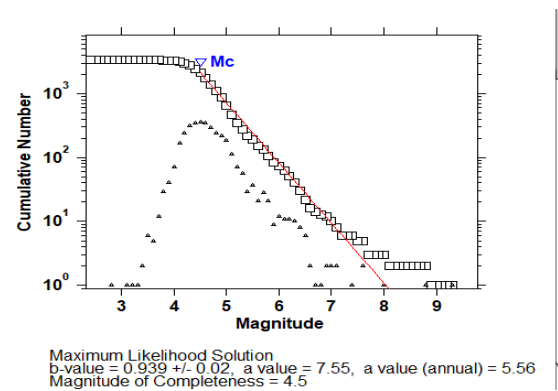
Gambar 4 merupakan hasil dari peta sebaran gempa bumi di Sumatera Utara setelah di *clusters* sehingga didapatkan gempa utama saja dari 4272 sebaran gempa yang terjadi namun, setelah dihilangkan gempa awal dan susulan sehingga didapatkan gempa utama (*clusters*) sebaran gempa yang terjadi menjadi 3033 gempa. Gambar 4 menunjukkan bahwa provinsi Sumatera Utara telah terjadi gempa bumi hingga ribuan kali yang tersebar merata diseluruh wilayah Sumatera Utara baik dari gempa kecil, sedang, hingga besar yang memicu kerusakan dengan variasi kedalaman dan magnitudo yang berbeda-beda.

Kenaikan total keseluruhan gempa bumi selama beberapa periode ditunjukkan oleh Gambar 5. Dengan melihat hasil dari grafik yang ada pada Gambar 5 perkembangan jumlah episenter dari periode ke periode dapat ditentukan analisis kecenderungan kejadian gempa bumi. Dapat dilihat bahwa kejadian gempa bumi dari tahun ke tahun semakin meningkat. Pada tahun 1980 gempa bumi mengalami kenaikan yang sangat drastis sampai ke tahun 2023 dibandingkan pada tahun sebelumnya. Hal ini diduga disebabkan akibat proses pencapaian keseimbangan *stress* yang dialami oleh lempeng dibawah permukaan, sehingga terus menerus terjadi gempa bumi susulan hingga terjadi kesetimbangan *stress* batuan.

Distribusi katalog gempa bumi mengenai hubungan magnitudo dengan jumlah gempa yang terjadi dalam rentang waktu yang ditentukan menggambarkan distribusi frekuensi-magnitudo. Untuk menentukan nilai *a-value* dan *b-value* dibutuhkan parameter *magnitude completeness* (Mc). Dapat dilihat pada Gambar 6 diketahui nilai Mc dari katalog adalah 4.6 MLv. Hal ini menunjukkan bahwa katalog yang digunakan merekam dengan sangat baik kejadian gempa yang terjadi dengan magnitudo terkecil 4.6 MLv di wilayah Sumatera Utara. Dari distribusi frekuensi-magnitudo diperoleh nilai parameter kegempaan secara umum, nilai *a-value* yaitu 7,55 dengan *a-value* (annual) yaitu 5,56, sedangkan *b-value* yaitu 0,939 +/- 0,02.

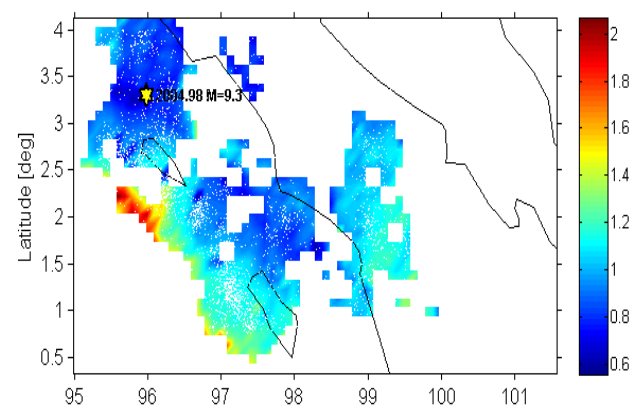


Gambar 5. Frekuensi kumulatif kejadian gempa bumi dari tahun 1926-2023.

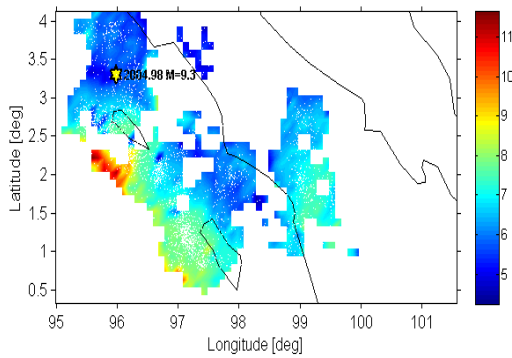


Gambar 6. Distribusi kegempaan frekuensi-magnitudo provinsi Sumatera Utara

Dari Gambar 6 dengan menggunakan metode maximum likelihood diperoleh parameter seismitas dapat kita lihat bahwa *b-value* 0,939 +/- 0,02, *a-value* 7,55 dengan nilai rata-rata tahunan 5,56 dan nilai Mc 4,5. *A-value* menunjukkan tingkat keaktifan seismik, dan *b-value* menunjukkan kemiringan atau gradien dari persamaan linear hubungan frekuensi kejadian gempa bumi dan magnitudo. *A-value* yaitu 7,55 yang berarti wilayah Sumatera Utara memiliki tingkat keaktifan gempa bumi yang tinggi.



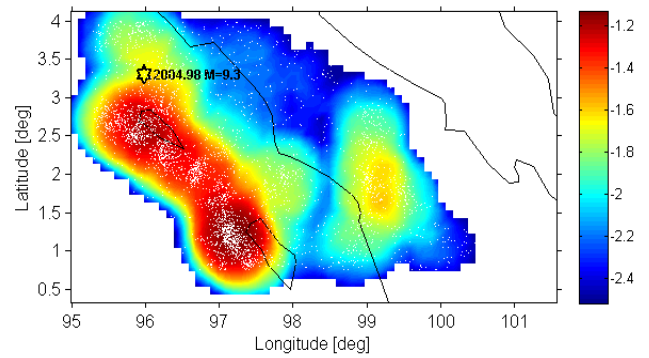
Gambar 7. Mapping distribusi *b-value* wilayah Sumatera Utara

Gambar 8. Mapping distribusi *a-value* wilayah Sumatera Utara

(Pangestika, *et al.*, 2018), *b-value* merupakan nilai yang menunjukkan tingkat kerapuhan suatu batuan. Semakin tinggi *b-value* pada suatu wilayah, maka akan semakin tua dan rapuh batuanannya sehingga aktivitas seismik di wilayah tersebut juga akan semakin besar.

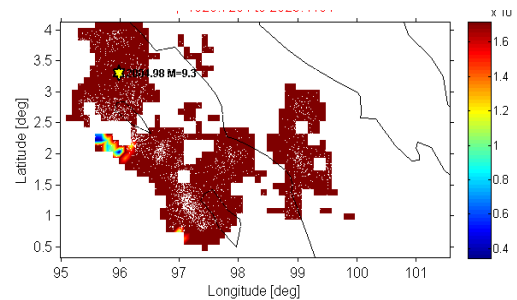
Dari Gambar 7, memiliki *b-value* bervariasi yaitu 0,6-2,0 dengan gradiasi warna biru tua hingga merah tua. Dengan *b-value* terendah pada rentang 0,6-1,4 dengan gradiasi warna biru tua hingga hijau, yang dipengaruhi oleh aktivitas sesar Semangko serta cekungan Sumatra yang memiliki struktur penyusun batuan dengan tingkat kerapuhan yang rendah. Sedangkan daerah dengan tingkat keaktifan seismik sedang hingga tinggi berada pada rentang nilai 1,5-2,0 dengan gradiasi warna kuning sampai merah tua, yang berada dekat dengan pantai. Dengan variasi *b-value* >1 menyatakan bahwa Provinsi Sumatera Utara merupakan wilayah yang memiliki tingkat seismitas yang tinggi. *B-value* yang rendah itu merupakan daerah yang memiliki tingkat *stress* yang tinggi yang artinya wilayah tersebut memiliki peluang yang tinggi untuk terjadinya gempa-gempa besar.

Pada Gambar 8, sebaran *a-value* tampak mirip dengan sebaran pada *b-value*. Variasi *a-value* berkisar antara 5,0-11,0 dengan gradiasi warna biru tua sampai merah tua. Daerah dengan tingkat keadaan seismik (*a-value* annual) rendah hingga sedang berada pada rentang nilai 5,0-8,0 dengan gradiasi warna biru tua hingga hijau, yang berada dekat dengan sesar Semangko. Sedangkan daerah dengan tingkat keaktifan seismik sedang hingga tinggi berada pada rentang nilai 8,0-11,0 dengan gradiasi warna kuning sampai merah tua, yang merupakan wilayah yang dekat dengan pantai. Dengan variasi *a-value* >10 menandakan bahwa tingkat aktivitas gempa bumi atau wilayah dengan tingkat seismitas yang tinggi (Arimuko, 2022), *a-value* adalah interpretasi dari logaritmik basis 10 dari jumlah kejadian gempa bumi di wilayah tersebut. Sedangkan *b-value* adalah gradien dari grafik hubungan antara jumlah gempa bumi terhadap magnitudonya. Semakin kecil *b-value* nya maka di wilayah tersebut jarang gempa bumi.

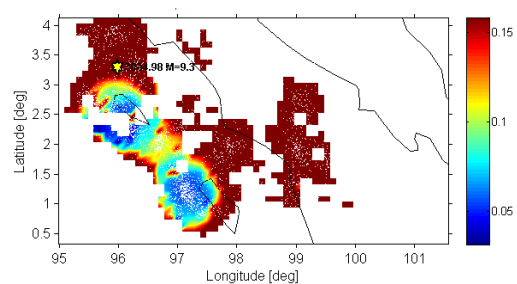


Gambar 9. Mapping distribusi densitas gempa daerah Provinsi Sumatera Utara

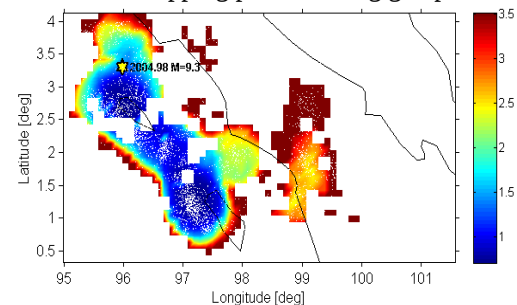
Gambar 9, menjelaskan bahwa hasil pemetaan densitas gempa bumi daerah Sumatera Utara secara kualitatif berkisar antara -2,4 s/d -1,2 log (N/km²) dimana N adalah jumlah gempa yang terjadi. Daerah di sekitar Aceh sampai Nias yang berwarna merah memiliki tingkat kerapatan gempa bumi yang relatif lebih besar dibandingkan daerah lainnya.



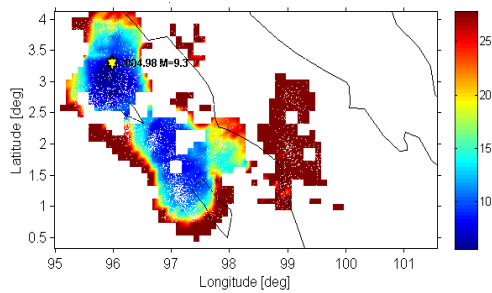
Gambar 10. Mapping periode ulang gempa bermagnitudo 3



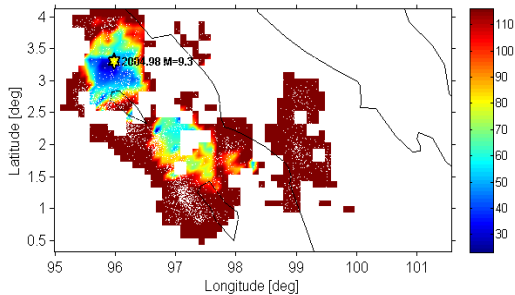
Gambar 11. Mapping periode ulang gempa bermagnitudo 4



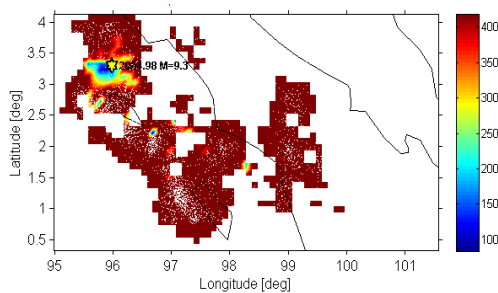
Gambar 12. Mapping periode ulang gempa bermagnitudo 5



Gambar 13. Mapping periode ulang gempa bermagnitudo 6



Gambar 14. Mapping periode ulang gempa bermagnitudo 7



Gambar 15. Mapping periode ulang gempa bermagnitudo 8

Pada Gambar 10, menunjukkan bahwa periode ulang gempa dengan magnitudo 3,0 memiliki periode ulang pendek dengan gradiasi warna biru muda hingga hijau muda saja dengan rentang periode ulang 0,8-1,0 tahun dengan periode pendek untuk seluruh wilayah provinsi Sumatera Utara. Kemungkinan terjadinya gempa kembali pada periode pendek sangat berpengaruh terhadap *a-b value* yang tinggi.

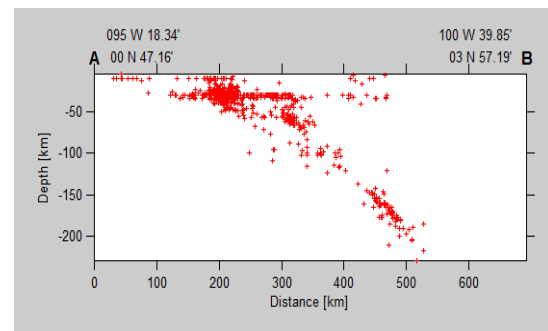
Pada Gambar 11, menunjukkan bahwa periode ulang gempa dengan magnitudo 4,0 memiliki periode ulang dengan gradiasi warna biru tua hingga kuning pada rentang periode 0,05-0,1 tahun yang termasuk kedalam wilayah dengan periode menengah.

Pada Gambar 12, menunjukkan bahwa periode ulang gempa dengan magnitudo 5,0 memiliki periode ulang dengan gradiasi warna biru tua hingga orange. Dengan sebagian wilayah timur ditutupi gradiasi warna kuning dan sedikit merah, pada rentang periode 1-3 tahun yang termasuk kedalam wilayah dengan periode panjang, karna magnitudo 5,0 hampir menutupi seluruh wilayah Provinsi Sumatera Utara, namun lebih banyak di gradiasi warna biru dan warna kuning.

Pada Gambar 13, menunjukkan bahwa periode ulang gempa dengan magnitudo 6,0 memiliki periode ulang dengan gradasi warna biru tua hingga merah tua pada rentang periode 10-25 tahun yang termasuk kedalam wilayah dengan periode panjang, sama halnya dengan magnitudo 5,0, magnitudo 6,0 ini juga hampir menutupi seluruh wilayah Provinsi Sumatera Utara, namun lebih banyak di gradiasi warna biru tua dan hijau muda.

Pada Gambar 14, menunjukkan bahwa periode ulang gempa dengan magnitudo 7,0 memiliki periode ulang dengan gradiasi biru tua hingga coklat pada rentang periode 30-110 tahun yang termasuk kedalam wilayah periode menengah yang menutupi sebagian wilayah Provinsi Sumatera Utara,

Pada Gambar 15, menunjukkan bahwa periode ulang gempa magnitudo 8,0 memiliki periode ulang dengan gradiasi warna biru tua sampe coklat, namun hanya menutupi sedikit wilayah Provinsi Sumatera Utara, sehingga termasuk kedalam wilayah periode pendek dengan rentang periode 100-400 tahun. Jika dibandingkan dengan periode ulang untuk magnitudo yang sama di wilayah yang lebih cepat. Cepat atau lambatnya periode ulang gempa di suatu wilayah dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya struktur batuan penyusun serta *b-value* wilayah tersebut.



Gambar 16. Sebaran hiposenter gempa

Pada Gambar 16, menunjukkan sebaran hiposenter gempa bumi, jika dilihat dari peta sebaran hiposenter banyak berada pada kedalaman -50 km. Hal ini disebabkan oleh otomatis penentuan kedalaman gempa bumi oleh perangkat lunak Seiscomp3 yang digunakan BMKG. Apabila hasil analisis kedalaman tidak terpusat dengan baik, maka perangkat Seiscomp3 tersebut secara otomatis akan membuat kedalaman gempa bumi tersebut pada kedalaman -50 km atau sering disebut sebagai *fix depth*.

Kesimpulan

Daerah Provinsi Sumatera Utara memiliki tingkat keaktifan gempa bumi yang tinggi ditinjau dari *b-value* yaitu sebesar 0,939 dan *a-value* sebesar 7,55 yang menunjukkan korelasi cukup tinggi dengan terjadinya gempa besar sehingga dapat diidentifikasi bahwa wilayah Provinsi Sumatera Utara memiliki aktivitas tektonik yang relatif tinggi. Frekuensi gempa bumi tergolong rendah, sedangkan magnitudo cukup besar, maka *b-value* nya

tidak terlalu besar. Sumatera Utara memiliki *b-value* seperti ini menunjukkan bahwa batuan di wilayah Sumatera Utara termasuk tua dan rapuh.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih kepada seluruh Tim Geofisika dan USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) yang telah menyediakan akses data gempa bumi.

Referensi

- Arimuko, A. (2022) 'Seismotektonik Bagian Barat Sumatra ditinjau dari Nilai-b dan Nilai-a yang didapatkan melalui Inversi Matriks dan Regresi Linier', *DIFFRACTION: Journal for Physics Education and Applied Physics*, 4(2), pp. 42–51.
- Budiman, A. (2011) 'Analisis Periode Ulang Dan Aktivitas Kegempaan Pada Daerah Sumatera Barat Dan Sekitarnya', *Jurnal Ilmu Fisika | Universitas Andalas*, 3(2), pp. 55–61. Available at: <https://doi.org/10.25077/jif.3.2.55-61.2011>.
- HandokoExplore 2012 (no date) (<https://handokoseto.blogspot.com/2012/04/geologi-sumatera.html>).
- Harlianto, B. & Farid, M. (2018) 'Pemetaan b Value Untuk Identifikasi Kerentanan Wilayah Terhadap Gempabumi dengan Mempertimbangkan Kepadatan Penduduk di Kabupaten Bengkulu Utara', p. 23.
- Ikhlasul, A. & Madlazim (2016) 'Kaitan B Value Dengan Magnitudo Dan Frekuensi Gempa Bumi Menggunakan Metode Gutenberg-Richter Di Sumatera Utara Tahun 2002-2012', 03, pp. 1–23.
- Lubis, L.H., Ayundita, A.A., Sari, N. & Wardono, W. (2022) 'Aktivitas Seismisitas Di Wilayah Sumatera Bagian Utara Menggunakan Arc-Gis Periode 2020-2021', *Jurnal Kumparan Fisika*, 5(2), pp. 91–98. Available at: <https://doi.org/10.33369/jkf.5.2.91-98>.
- Madlazim (2013) 'Kajian Awal Tentang b Value Gempa Bumi Di Sumatera Tahun 1964-2013', 3(1), pp. 41–46. Available at: <http://earthquake>.
- Pangestika, S.W., Yudistira, T. & Fattah, E.I. (2018) 'Analisis Variasi Spasial B-Value Menggunakan Lokasi Gempa Presisi Tinggi Wilayah Selat Sunda Tahun 2009 – 2018', *Respository Itera*, pp. 1–9.
- Panggabean, D.Y., Tarigan, P. & Halawa, E. (2023) 'EINSTEIN (e-Journal) Sebaran Aktivitas Seismik di Sumatera Utara Periode Tahun 2022', pp. 20–25. Available at: <http://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/einstene-issn:2407-747x,p-issn2338-1981>.
- Pusgen (2017) 'Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017. Pusat Penelitian Dan Pengembangan Perumahan Dan Permukiman Badan Penelitian Dan Pengembangan Kementerian PUPR'.
- Schorlemmer, D. and Wiemer, S. (2004) 'Earthquake statistics at Parkfield: 1. Stationarity of b values', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(12), pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.1029/2004JB003234>.
- Septiani, I. and Pujiastuti, D. (2021) 'Analisis Seismisitas Wilayah Kepulauan Maluku Periode 1970-2019 dengan Menggunakan Metode Likelihood', *Jurnal Fisika Unand*, 10(4), pp. 461–466. Available at: <https://doi.org/10.25077/jfu.10.4.461-466.2021>.
- Warastri, A.W. (2018) (<https://www.kompas.id/baca/nusantara/2018/02/24/patahan-renun-kembali-bergerak-goncang-tapanuli-utara>).
- Wiemer, S. (2001) 'A Software Package To Analyze Seismicity: Zmap Stefan Wiemer', *Seismological Research Letters*, 72(2).
- Yuliza, N. (2017) 'Analisis Periode Ulang Gempa Bumi Daerah Kepulauan Nias Dan Sekitarnya Dengan Menggunakan Metode Likelihood', *Skripsi Universitas Andalas* [Preprint].
- Yustina Kurniawati, D.W.I. (2015) 'Korelasi Periode Dominan (Td) Dengan Magnitudo Momen (Mw) Untuk Gempa Bumi Loksl Di Wilayah Sumatera Utara', *Inovasi Fisika Indonesia*, 4(2), pp. 5–9.