



Analisis Seismisitas Sumatera Barat menggunakan *Space-Time-Depth-Magnitude*

Adi Mulyono¹, Mufliha Dzahabiyah², Ika Apriliana Putri³, Wulan Anggraeni⁴

Universitas Indraprasta PGRI

¹am.adimulyono@gmail.com, ²muflihadzaha@gmail.com,

³ikaapriliana321@gmail.com, ⁴wulan.anggraeni@unindra.ac.id

Abstract:

West Sumatra is an earthquake-prone area because it is located on the India-Australia tectonic plate with the Eurasian plate, the Mentawai Fault System (MFS) and the Sumatra Fault System (SFS) or the Sumatran fault. Therefore, there is a need for seismic studies to describe seismic characteristics. The aim of this research is to obtain the characteristics of the West Sumatra earthquake through Space-Time-Depth-Magnitude. The research flow consists of 7 stages, namely, data mining, data preprocessing, calculating the b value in the Gutenberg Richter equation, fractals, haversine distance, STDM, interpretation of results. The data used is data on earthquake events for the period 2009 to 2023 sourced from the Meteorology, Geophysics and Climatology Agency (BMKG) by dividing it into 3 periods, namely period 1 on 30 September 2009 to 24 October 2010, period 2 on 25 October 2010 to 10 April 2012, period 3 from 11 April 2012 to 24 April 2023. The results obtained are that a decrease in the STDM distance in a period indicates that the destructive earthquake that will occur will have a smaller strength than the previous earthquake, while an increase in the STDM indicates that the destructive earthquake that will occur will have a greater strength than previous damaging earthquakes. It is hoped that the research results can contribute to describing the seismic conditions of West Sumatra so that casualties can be anticipated.

Keywords: seismic, gutenberg richter, fractal, haversine distance, stdm

Abstrak

Sumatera Barat merupakan wilayah rawan gempa karena terletak pada lempeng tektonik India-Australia dengan lempeng Eurasia, *Mentawai Fault System* (MFS) dan *Sumatera Fault System* (SFS) atau sesar Sumatera. Oleh karena itu, perlu adanya kajian seismik untuk menggambarkan karakteristik kegempaan. Tujuan penelitian ini adalah memperoleh karakteristik gempa Sumatera Barat melalui *Space-Time-Depth-Magnitude*. Alur penelitian terdiri atas 7 tahap yaitu, penambangan data, *preprocessing* data, perhitungan nilai b pada persamaan *Gutenberg Richter*, fraktal, jarak *haversine*, STDM, interpretasi hasil. Data yang dipergunakan adalah data kejadian gempa periode 2009 hingga 2023 bersumber dari Badan Meteorologi, Geofisika, dan Klimatologi (BMKG) dengan membaginya menjadi 3 periode yaitu periode 1 pada 30 September 2009 hingga 24 Oktober 2010, periode 2 pada 25 Oktober 2010 hingga 10 April 2012, periode 3 pada 11 April 2012 hingga 24 April 2023. Hasil yang diperoleh adalah penurunan jarak STDM pada suatu periode mengisyaratkan gempa merusak yang akan terjadi memiliki kekuatan lebih kecil dari gempa sebelumnya, sedangkan peningkatan STDM mengisyaratkan gempa merusak yang akan terjadi memiliki kekuatan lebih besar dari gempa merusak sebelumnya. Hasil penelitian diharapkan dapat berkontribusi dalam menggambarkan keadaan seismik Sumatera Barat sehingga dapat mengantisipasi terjadinya korban jiwa.

Kata Kunci: seismik, gutenberg richter, fraktal, jarak haversine, stdm

PENDAHULUAN

Sumatera Barat merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang rawan gempa, dikarenakan terletak pada lempeng tektonik India-Australia dengan lempeng Eurasia (Kurniawan et al, 2016), MFS dan SFS atau Sesar Sumatera (Puteri et al, 2022). Selain itu memiliki 4 segmen patahan yang termasuk ke Sesar Sumatera dan 3 segmen patahan berada pada perbatasan Sumatera Barat yaitu Angkola, Barumon, dan Siulak (Dahlia et al, 2022).

Catatan gempa Sumatera Barat merusak pada kerangka waktu 2009 hingga 2023 yaitu pada 30 September 2009 berkekuatan 7,9 SR di kedalaman 71 km; 25 Oktober 2010 berkekuatan 7,7 SR; 11 April 2012 berkekuatan 5,8 SR; dan 25 April 2023 berkekuatan 7,3 SR. Keadaan seismik suatu wilayah dianalisa menggunakan *Space-Time-Depth-Magnitude* (STDM) yang dapat menggambarkan karakteristik gempa pada ruang dan waktu di setiap zona seismogenik dengan tujuan mengetahui

aktivitas gempa bumi, meminimalisir dampaknya, dan mengurangi kerugian pada pembangunan sosial ekonomi.

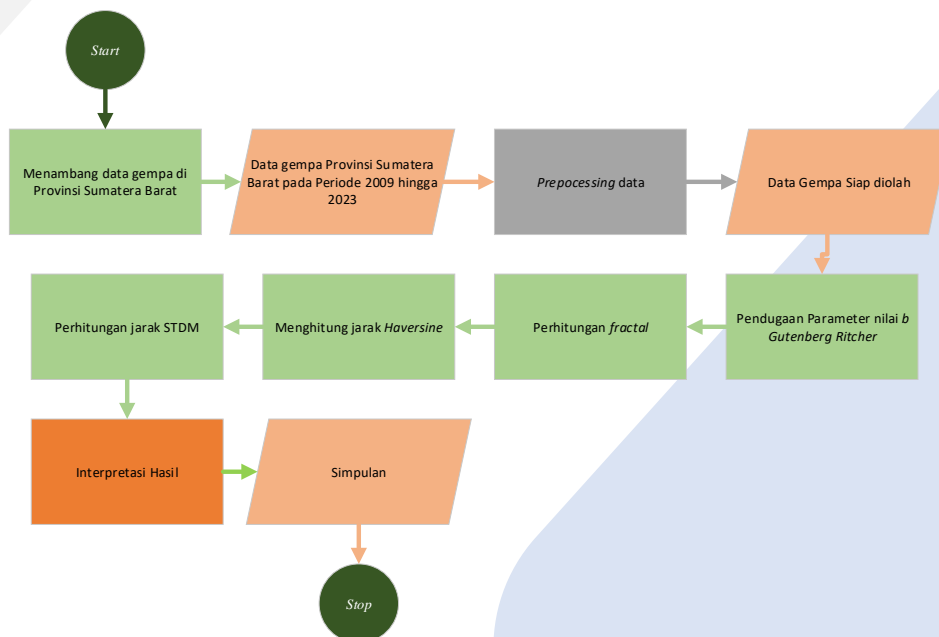
Penelitian terkait analisis seismik berdasarkan ruang, waktu, kedalaman dan kekuatan gempa akan dijelaskan dalam paragraf ini. Telesca, Lapenna, dan Macchiato (Telesca et al, 2004) menganalisa multi-fraktal dengan perolehan hasil adanya perbedaan di antara deret gempa. Parameter spektrum multi-fraktal. Baiesi dan Paczuski (Baiesi & Paczuski, 2004) mengembangkan kerangka kerja untuk menganalisa pengelompokkan gempa dengan mengasumsikan jumlah total peristiwa dalam *domain Space-Time-Magnitude* (STM). Selanjutnya Zaliapin, Gabrielov, Borok, dan Wong (Zaliapin, 2008) menggunakan STM untuk mendeteksi kejadian gempa di California Selatan. Ansari dan Bae (Ansari & Bae, 2021) mengembangkan pengelompokkan kegempaan dalam *domain* STDm untuk kasus gempa Kumamoto 2016 dengan perolehan hasil distribusi dari STDm adalah *bimodal*. Anggraeni, Supian, Sukono, dan Halim menganalisa keadaan seismik Jawa Barat pada periode 2009 hingga 2021 menggunakan STDm dengan perolehan hasil bahwa STDm terendah terjadi di Kabupaten Tasikmalaya dan tertinggi di Kabupaten Ciamis (Anggraeni et al, 2023).

Pada penelitian sebelumnya belum ada yang meneliti STDm di Sumatera Barat pada periode 2009 hingga 2023 dan membaginya menjadi 3 periode. Untuk itu, tujuan dari penelitian adalah memperoleh keadaan seismik Sumatera Barat. Analisa dilakukan dalam 3 periode yaitu periode 1 pada 30 September 2009 hingga 24 Oktober 2010, periode 2 pada 25 Oktober 2010 hingga 10 April 2012, periode 3 pada 11 April 2012 hingga 24 April 2023. Pemilihan periode diharapkan dapat menggambarkan keadaan seismik Sumatera Barat sebelum kejadian gempa merusak.

METODE

Penelitian kuantitatif deskriptif bertujuan untuk mendeskripsikan peristiwa yang terjadi dan dilakukan secara sistematis (Winarto, 2018). Oleh karena itu jenis penelitian yang dilakukan adalah kuantitatif dengan teknik analisa deskriptif, bertujuan menggambarkan STDm di Sumatera Barat.

Objek dari penelitian ini adalah data gempa bumi di Sumatera Barat pada periode 2009 hingga 2023 yang bersumber dari BMKG. Alur penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

Gambar 1, menunjukkan 7 tahap dalam alur penelitian, tahap pertama adalah penambangan data gempa bumi di Sumatera Barat pada periode 2009 hingga 2023 yang bersumber dari www.bmkg.go.id, tahap kedua *preprocessing* dengan menghilangkan data ganda, memplot data menggunakan *Google My Map* sehingga mengetahui data yang tidak termasuk dalam kejadian gempa

di Sumatera Barat, memilih data gempa berkekuatan di atas 3 SR, serta membagi data menjadi 3 periode, tahap ketiga menduga parameter b pada persamaan *Gutenberg Richter* (GR), tahap keempat perhitungan nilai fraktal, tahap kelima perhitungan jarak *Haversine*, tahap keenam perhitungan jarak STDM, tahap ketujuh interpretasi hasil. Pengolahan data dilakukan menggunakan *Excel* untuk perhitungan STDM, rata-rata, dan *skewness* sedangkan visualisasi gambar menggunakan RStudio. Adapun rumus yang dipergunakan sebagai berikut:

1. Nilai b pada persamaan *Gutenberg Richter*

Distribusi kejadian gempa bumi dari suatu wilayah yang dikembangkan oleh Gutenberg dan Richter (1965) diformulasikan pada persamaan (1) berikut ini:

$$\log_{10} N(M \geq M_0) = a - bM_0 \quad (1)$$

Dimana N adalah jumlah kumulatif dari kejadian gempa yang lebih dari M , a adalah ukuran seismisitas, M_0 adalah ambang batas kekuatan gempa yang diamati, dan b adalah gradien dari model *Gutenberg Richter* (GR) (Beitr, 1945). Pendugaan parameter b pada persamaan (1) didefinisikan pada persamaan (2) berikut ini:

$$\hat{b} = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_0} \quad (2)$$

2. Nilai fraktal

Fraktal merupakan kata yang berasal dari bahasa latin yaitu *fractus*, memiliki arti patah atau rusak atau tidak teratur. Fraktal memiliki ciri khas yaitu dimensi dengan notasi k , mengukur geometri dari distribusi dan kemungkinan variasinya sebagai fungsi ruang dan waktu (Sunardi, 2009). Aki (1981) menyatakan hubungan antara nilai b pada GR dengan dimensi fraktal (k) yang dituliskan pada persamaan (3) berikut ini:

$$k = \frac{3b}{c} \quad (3)$$

Dimana nilai $c \approx 1.5$, menyatakan kemiringan antara log moment dengan kekuatan gempa.

3. Jarak *Haversine*

Suatu wilayah di bumi memiliki koordinat yang terdiri atas *latitude* dan *longitude*. Untuk mengetahui jarak antara dua titik di bumi tanpa mengabaikan lengkungannya menggunakan model *Haversine* yang dinotasikan pada persamaan (4) berikut ini:

$$r_{ij} = 2r \arcsin \sqrt{\left(\frac{1 - \cos(\theta_j - \theta_i)}{2}\right) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \left(\frac{1 - \cos(\lambda_j - \lambda_i)}{2}\right)} \quad (4)$$

Dimana r adalah radius bumi 6371 Kilo meter (Km), θ adalah *latitude*, λ adalah *longitude* dan $1^\circ = 0,017453292$.

4. *Space-Time-Depth- Magnitude*

Suatu model penentuan jarak antara kejadian gempa ke- i dan gempa ke- j menggunakan variabel waktu, ruang, kedalaman dan besarnya magnitudo disebut STDM (Ansari & Bae, 2021) yang dinotasikan dalam persamaan (5) berikut ini:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} c\tau_{ij}r_{ij}^k \frac{1}{\varepsilon_i} 10^{-\frac{b(M_i - M_0)}{2}} & \tau_{ij} \geq 0 \\ \infty & \tau_{ij} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Keterangan pada persamaan (5) adalah c merupakan konstanta, τ_{ij} adalah selisih waktu antara 2 gempa bumi $\tau_{ij} = \tau_j - \tau_i$, r_{ij} adalah jarak lokasi dua gempa bumi yang dihitung menggunakan persamaan (4), b adalah parameter GR yang dihitung menggunakan persamaan (2), dan k menyatakan dimensi fraktal yang dihitung menggunakan persamaan (3). ε_i dan m_i menyatakan kedalaman dan besarnya gempa ke- i . m_0 adalah nilai batas ambang besarnya gempa, selanjutnya, dilakukan substitusi konstan c sebesar 1, dan melakukan enskalaan untuk waktu, lokasi, dan kedalaman yang diformulasikan pada persamaan (6) berikut ini:

$$\begin{aligned} T_{ij} &= \tau_{ij} 10^{-\frac{b(M_i - M_0)}{2}}, \\ R_{ij} &= r_{ij}^k 10^{-\frac{b(M_i - M_0)}{2}}, \\ E_i &= \varepsilon_i 10^{-\frac{b(M_i - M_0)}{2}} \end{aligned} \quad (6)$$

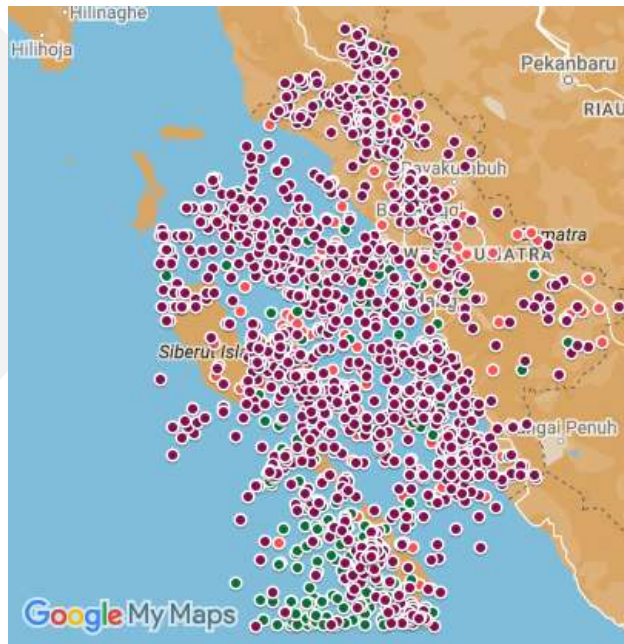
Berdasarkan persamaan (6), persamaan (5) menjadi persamaan (7) berikut ini:

$$\log_{10}\eta_{ij} = \begin{cases} \log_{10}T_{ij} + \log_{10}R_{ij} - \log_{10}E_i & \tau_{ij} \geq 0 \\ \infty & \tau_{ij} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Hubungan empiris jarak tetangga terdekat (η) yang memiliki fungsi gabungan bersama pada (T, R, E)

HASIL DAN PEMBAHASAN

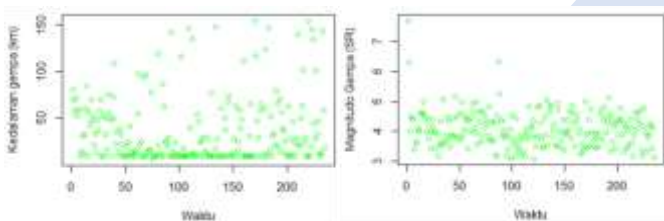
Hasil penambangan data gempa di Sumatera Barat menghasilkan 3.078 kejadian gempa. Setelah dilakukan tahap *preprocessing* tidak ada data ganda, pemetaan menggunakan *Google My Map* diperoleh 750 data berada di luar batas Sumatera Barat, dan 490 data kurang dari 3 SR, sehingga data yang dipergunakan adalah 1.838 data, selanjutnya data dibagi menjadi 3 periode, 235 data pada periode



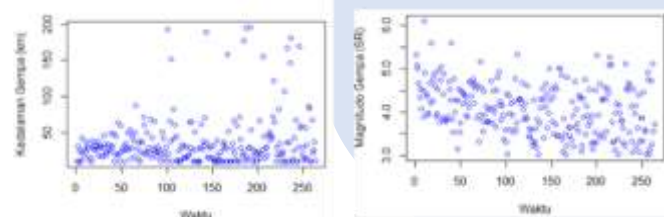
pertama, 264 data pada periode kedua, dan 1.339 data pada periode ketiga.

Gambar 2. Peta Gempa Sumatera Barat

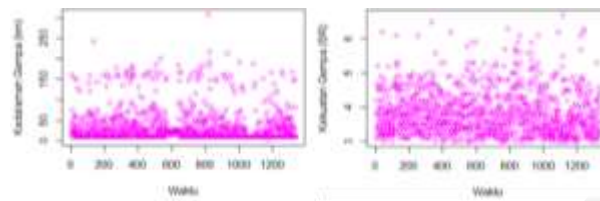
Warna pada Gambar 2, menunjukkan sebaran gempa pada setiap periode, warna merah menunjukkan periode 1, warna hijau periode 2, dan warna ungu periode 3. *Plot* kedalaman dan kekuatan gempa setiap periode disajikan pada Gambar 3 hingga 5.



Gambar 3. *Plot* Kedalaman dan Magnitudo Gempa periode 1



Gambar 4. *Plot* Kedalaman dan Magnitudo Gempa periode 2



Gambar 5. Plot Kedalaman dan Magnitudo Gempa periode 3

Gambar 3, 4 dan 5, menunjukkan gempa di Sumatera Barat pada periode 2009 hingga 2023 didominasi pada kedalaman dangkal yang ditunjukkan oleh mengumpulnya lingkaran kecil berwarna hijau, biru dan ungu di bagian bawah. Sementara itu, kekuatan gempa didominasi kurang dari 5 SR.

Nilai b yang tinggi menunjukkan heterogenitas material dan tegangan tinggi dapat ditahan. Sebaliknya, nilai b rendah mencerminkan kekakuan yang tinggi, sehingga area tersebut dapat mengakumulasi tegangan yang lebih tinggi dan melepaskannya secara tiba-tiba. Selain itu nilai b yang rendah mencerminkan bahwa di wilayah tersebut pernah terjadi gempa dengan kekuatan besar (Srivastava et al, 2015). Perhitungan nilai b di Sumatera Barat meningkat setiap periodenya, pada periode 1 adalah 0,369913749, periode 2 sebesar 0,370928, sedangkan pada periode 3 adalah 0,468949916. Nilai b mencerminkan bahwa Sumatera Barat pernah terjadi kekuatan gempa besar yaitu pada 30 September 2009 berkekuatan 7,9 SR di kedalaman 71 km; 25 Oktober 2010 berkekuatan 7,7 SR; 11 April 2012 berkekuatan 5,8 SR; dan 25 April 2023 berkekuatan 7,3 SR. Selain itu setelah kejadian gempa merusak kerapuhan batu dan elastisitas tinggi sehingga mampu menahan stress (Kurniawan et al 2016).

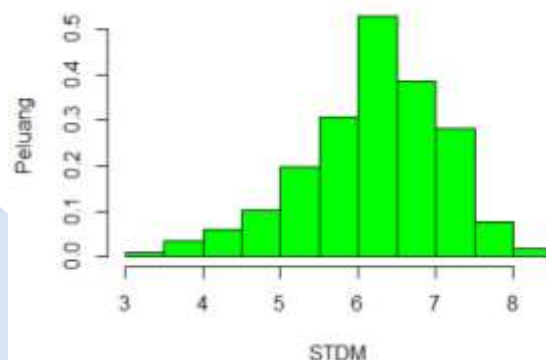
Dimensi fraktal adalah indikator langsung dari heterogenitas dan kekuatan material yang dapat digunakan untuk estimasi bahaya seismic (Ozer & Ceylan, 2012). Rentang dimensi fraktal antara 0 hingga 2, dimana 0 menyiratkan bahwa pusat gempa berkerumun menjadi satu titik, sedangkan bernilai 2 menyiratkan bahwa pusat gempa terdistribusi secara homogen (Tosi, 2021). Hasil perhitungan nilai k pada periode 1 adalah 0,739827497, pada periode 2 adalah 0,741855, dan pada periode 3 adalah 0,937899831. Nilai k yang diperoleh menunjukkan bahwa gempa yang terjadi di Sumatera Barat cenderung berkerumun disatu titik.

Transformasi $\log_{10}(R_{ij})$ pada periode 1 adalah 2,947 km, periode 2 adalah 2,953 km, dan pada periode 3 adalah 3,79 km. Rangkuman STDM nilai minimum, rata-rata dan maksimum disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Minimum, Rata-rata, dan Maksimum STDM Sumatera Barat

Periode	Minimum	Rata-rata	Maksimum
1	3,278946	6,202522	8,1278946
2	3,3981977	6,1435937	8,10001561
3	1,3700638	7,2848897	10,9810438

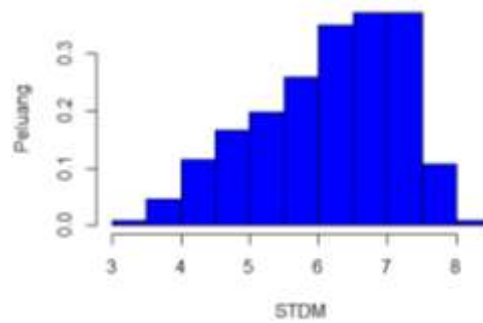
Tabel 1, menunjukkan STDM terendah terjadi di periode 3 bila nilai minimumnya dibandingkan, sedangkan tertinggi pada periode 3 bila nilai maksimumnya dibandingkan. Rata-rata STDM tertinggi



terjadi pada periode 3. Histogram STDM pada setiap periode disajikan pada Gambar 6 hingga 8.

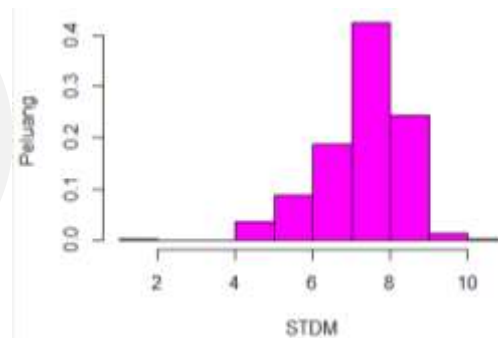
Gambar 6. Histogram STDM Periode 1

Gambar 6, menunjukkan jarak STDM pada rentang 6 hingga 6,5 memiliki frekuensi terbanyak.



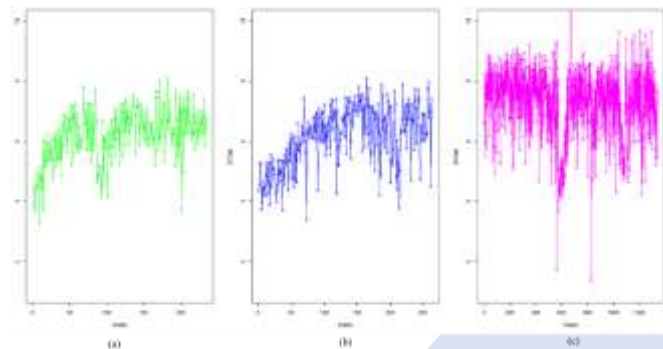
Gambar 7. Histogram STDM Periode 2

Gambar 7, menunjukkan STDM pada rentang 6,5 hingga 7 dan 7 hingga 7,5 memiliki frekuensi tertinggi.



Gambar 8. Histogram STDM Periode 3

Gambar 8 menunjukkan STDM pada rentang 7 hingga 8 memiliki frekuensi tertinggi. Jika dilihat dari bentuk histogram Gambar 6 hingga 8 disimpulkan data menceng ke kiri dengan nilai *skewness* untuk setiap periode adalah -0,61227; -0,44532; dan -0,89298, sehingga disimpulkan STDM cenderung mengelompok disebelah kanan, rata-rata hitung lebih kecil dari median, dan median lebih kecil dari modus.



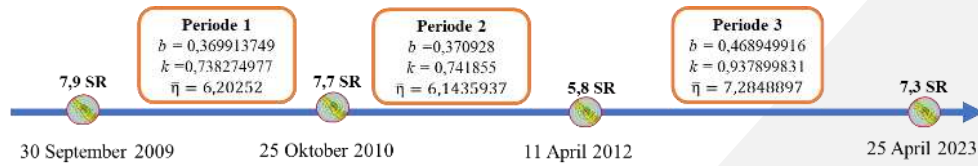
Grafik STDM pada setiap periode disajikan pada Gambar (9).

Gambar 9. STDM (a) Periode 1, (b) Periode 2, (c) Periode 3

Gambar 9, menunjukkan STDM pada setiap periode (a) periode 1, (b) periode (2), dan (c) periode 3. Rentang STDM periode 3 paling lebar dibandingkan periode lainnya, sedangkan periode 1 paling kecil dibandingkan periode lainnya.

PENUTUP

Periode 1 menggambarkan aktivitas seismik Sumatera Barat setelah gempa 30 September 2009 dan sebelum gempa 25 Oktober 2010, periode 2 setelah gempa 25 Oktober 2010 dan sebelum gempa 11 April 2012, sedangkan periode 3 setelah gempa 11 April 2012 dan sebelum gempa 25 April 2023. Rangkuman perhitungan nilai b , k , dan $\bar{\eta}$ setiap periode disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Rangkuman nilai b , k , dan $\bar{\eta}$

Gambar 10, menunjukkan perubahan seismik sebelum dan sesudah peristiwa gempa. STDM periode 2 lebih rendah dibandingkan periode lainnya, sedangkan periode 3 tertinggi. Penurunan STDM pada suatu periode mengisyaratkan gempa merusak yang terjadi memiliki kekuatan lebih kecil daripada gempa sebelumnya, sedangkan nilai STDM melebihi periode sebelumnya mengisyaratkan kekuatan lebih besar daripada gempa sebelumnya. Untuk itu, pemerintah perlu melakukan perhitungan jarak STDM secara berkala, agar dapat memprediksi kekuatan gempa yang akan terjadi pada waktu mendatang sehingga mengantisipasi terjadinya korban jiwa.

DAFTAR PUSTAKA

- B. Dahlia *et al.*, “Relokasi Hiposenter Gempabumi Dengan Menggunakan Metode Double Difference Serta Implikasinya Terhadap Seismotektonik Di Wilayah Sumatera Barat,” *J. Tek. Kebumihan*, vol. 7, no. 2, pp. 18–25, 2022.
- B. Sunardi, “Analisa Fraktal Dan Rasio Slip Daerah Bali-Ntb Berdasarkan Pemetaan Variasi Parameter Tektonik,” *J. Meteorol. dan Geofis.*, vol. 10, no. 1, 2009, doi: 10.31172/jmg.v10i1.33.
- G. Beitr, “Frequency of earthquakes in California,” *Nature*, vol. 156, no. 3960, p. 371, 1945, doi: 10.1038/156371a0.
- I. Zaliapin, “Clustering Analysis of Seismicity and Aftershock Identification,” *Physica Rev. Lett.*, vol. 018501, no. July, pp. 4–7, 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.101.018501.
- K. Aki, “A Probabilistic Synthesis of Precursory Phenomena Earthquake Prediction,” *Am. Geophys. Union*, vol. 4, pp. 566–574, 1981.
- K. Ansari and T. S. Bae, “Clustering analysis of seismicity in the space–time–depth–magnitude domain preceding the 2016 Kumamoto earthquake, Southwestern Japan,” *Int. J. Earth Sci.*, vol. 110, no. 1, pp. 253–261, 2021, doi: 10.1007/s00531-020-01950-5.
- K. Srivastava, S. Rani, and D. Srinagesh, “A review of b-value imaging and fractal dimension studies in the Andaman Sumatra subduction,” *Nat. Hazards*, vol. 77, pp. S97–S107, 2015, doi: 10.1007/s11069-014-1143-2.
- L. Telesca, V. Lapenna, and M. Macchiato, “Mono- and multi-fractal investigation of scaling properties in temporal patterns of seismic sequences,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 19, no. 1, pp. 1–15, 2004, doi: 10.1016/S0960-0779(03)00188-7.
- M. Baiesi and M. Paczuski, “Scale-free networks of earthquakes and aftershocks,” *Phys. Rev. E - Stat. Physics, Plasmas, Fluids, Relat. Interdiscip. Top.*, vol. 69, no. 6, p. 8, 2004, doi: 10.1103/PhysRevE.69.066106.
- M. E. Winarto, “*Buku Metodologi Penelitian*,” Univ. Negeri Malang: UM Press. 2018.
- N. Ozer and S. Ceylan, “Fractal properties and simulation of micro-seismicity for seismic hazard analysis: a comparison of North Anatolian and San Andreas Fault Zones,” *Res. Geophys.*, vol. 2, no. 1, p. 1, 2012, doi: 10.4081/rg.2012.e1.
- P. Tosi, “Seismogenic structure behaviour revealed by spatial clustering of seismicity in the Umbria-Marche Region (Central Italy),” *Annals of Geophysics*, vol. 41, no. 2. 2021. doi: 10.4401/ag-4331.
- T. Kurniawan, R. Rasmid, R. Yogi, and W. Setyonegoro, “Tingkat Aktivitas Seismik dan Kerapuhan Batuan 19 Segmentasi di Bawah Daratan Sumatera,” *Bul. Meteorol. Klimatologi dan Geofis. Balai Besar Wil. II BMKG*, vol.6 no.3, pp. 5–13, 2016.

- T. U. Puteri, I. K. Dewi, and L. Marlinda, "Penentuan Zonasi Bencana Tsunami di Kabupaten dan Kota Pesisir Provinsi Sumatera Barat," *SPEJ*, vol. 5, no. 2, 2022.
- W. Anggraeni, S. Supian, and N. A. Halim, "Single Earthquake Bond Pricing Framework with Double Trigger Parameters Based on Multi Regional Seismic Information," *Mathematics*, vol. 11, p. 689, 2023.