



Analisis Variasi Temporal *b-Value* Provinsi Bengkulu Menggunakan Metode *Maximum Likelihood* (Studi Kasus 2012-2022)

Elmi Permata Sari, Tri Kusmita*, Widodo Budi Kurniawan

Program Studi Fisika, Universitas Bangka Belitung

Kampus Terpadu Balunijuk, Universitas Bangka Belitung, Bangka, Bangka Belitung, Indonesia 33172

*E-mail korespondensi: trikusmita@ubb.ac.id

Info Artikel:

Dikirim:
30 Agustus 2023

Revisi:
22 Desember 2023

Diterima:
22 Desember 2025

Kata Kunci:

b-Value;
seismisitas;
seismotektonik;
bengkulu;
Maximum
Likelihood

Abstract

Bengkulu Province is a region of high seismicity influenced by the complex interaction between the offshore subduction zone along the western margin of Sumatra and active strike-slip fault systems on land. This study investigates the temporal variation of earthquake *b*-values in Bengkulu Province during the period 2012–2022 using the Maximum Likelihood approach. The analysis focuses on temporal changes in the frequency–magnitude distribution and the evolving characteristics of regional seismicity. The results show clear temporal variations in *b*-values, indicating changes in the frequency–magnitude distribution of earthquakes over time. Variations in the *a*- and *b*-values reflect shifts in the seismicity characteristics within the framework of Bengkulu’s active tectonic setting, particularly the interaction between the Indo-Australian–Eurasian subduction system and onshore active faults. Overall, the results demonstrate that temporal changes in *b*-values represent the dynamics of regional seismicity in Bengkulu within an active subduction–fault tectonic framework.

PENDAHULUAN

Provinsi Bengkulu terletak pada zona tektonik aktif di sepanjang margin barat Pulau Sumatra, yang dikontrol oleh interaksi antara subduksi Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia dan keberadaan sistem Sesar Sumatra yang memanjang sejajar Pegunungan Bukit Barisan[1]. Secara geologi, wilayah Bengkulu tersusun oleh satuan batuan berumur Tersier hingga Kuartar yang didominasi oleh endapan vulkanik, sedimen laut dangkal hingga dalam, serta batuan intrusi, yang mencerminkan evolusi tektonik dan magmatik yang kompleks. Struktur geologi utama berarah baratlaut–tenggara berasosiasi dengan aktivitas sesar geser dan deformasi kerak yang intens, baik di daratan maupun lepas pantai[2,3]. Kondisi geologi dan struktur tersebut berperan sebagai pengontrol utama lokasi, kedalaman, dan karakter gempa bumi yang terjadi di wilayah Bengkulu. Kondisi geologi dan tektonik tersebut menjadikan Bengkulu sebagai wilayah dengan tingkat seismisitas tinggi dan karakter seismotektonik yang kompleks, sehingga analisis variasi temporal parameter seismisitas, khususnya *b*-value, menjadi

jangka panjang untuk wilayah Bengkulu. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan analisis variasi temporal b-value dengan metode Maximum Likelihood pada katalog gempa bumi Provinsi Bengkulu periode 2012–2022 untuk menggambarkan perubahan karakter seismisitas regional dari waktu ke waktu. Hasil penelitian diharapkan dapat menggambarkan perubahan karakter seismisitas regional Bengkulu dalam kerangka sistem tektonik aktif subduksi–sesar.

METODE PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder berupa parameter gempa bumi di wilayah Provinsi Bengkulu. Data parameter gempa bumi meliputi waktu kejadian (origin time), lokasi episenter (lintang dan bujur), magnitudo, serta kedalaman hiposenter. Katalog gempa bumi diperoleh dari *United States Geological Survey (USGS)* untuk periode 1 Januari 2012 hingga 31 Desember 2022. Wilayah penelitian dibatasi oleh koordinat geografis 5°40′–2°00′ LS dan 100°40′–104°00′ BT, yang merepresentasikan wilayah Provinsi Bengkulu dan sekitarnya. Data yang digunakan dibatasi pada kejadian gempa bumi dengan magnitudo ≥ 3 dan kedalaman 0–100 km, dengan jumlah total kejadian sebanyak 371 gempa bumi. Data Data gempa bumi tercatat dalam beberapa jenis magnitudo, yaitu M_b , M_w , dan M_s . Untuk menjaga konsistensi dalam analisis, seluruh magnitudo dikonversi ke dalam satu skala magnitudo yang seragam, yaitu magnitudo permukaan (M_s), menggunakan hubungan empiris yang telah banyak digunakan dalam kajian bahaya seismik (Persamaan 1 dan 2).

$$M_s = 1,59 M_b - 3,97 \dots \dots \dots (1)$$

$$M_w = 0,143 M_s^2 - 1,051 M_s + 7,285 \dots \dots \dots (2)$$

Penentuan nilai b dilakukan berdasarkan hubungan frekuensi–magnitudo gempa bumi sebagaimana dirumuskan dalam hukum Gutenberg–Richter. Dari hubungan antara magnitudo dan jumlah kejadian kumulatif ditentukan *magnitude of completeness* (M_c) sebagai batas magnitudo minimum di mana distribusi gempa bumi masih mengikuti hubungan Gutenberg–Richter secara statistik. Dalam penelitian ini, nilai M_c ditentukan menggunakan pendekatan *Maximum Curvature (MAXC)*, yaitu sebagai magnitudo dengan frekuensi kejadian maksimum pada distribusi magnitudo, yang secara matematis dinyatakan sebagai persamaan 3, di mana M_{mode} adalah magnitudo dengan frekuensi kejadian maksimum pada histogram distribusi magnitudo. Pendekatan ini umum digunakan dalam analisis seismisitas karena bersifat sederhana, konsisten, dan efektif untuk katalog gempa bumi regional.

$$M_c = M_{mode} \dots \dots \dots (3)$$

Nilai M_c selanjutnya digunakan sebagai batas bawah analisis, sehingga hanya kejadian dengan magnitudo $M \geq M_c$ yang dipertimbangkan. Magnitudo rata-rata (\bar{M}) dihitung dari seluruh kejadian tersebut, dan nilai b diestimasi menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE) dengan persamaan Nilai b dapat dihitung dengan metode *maximum likelihood* seperti pada Persamaan (4).

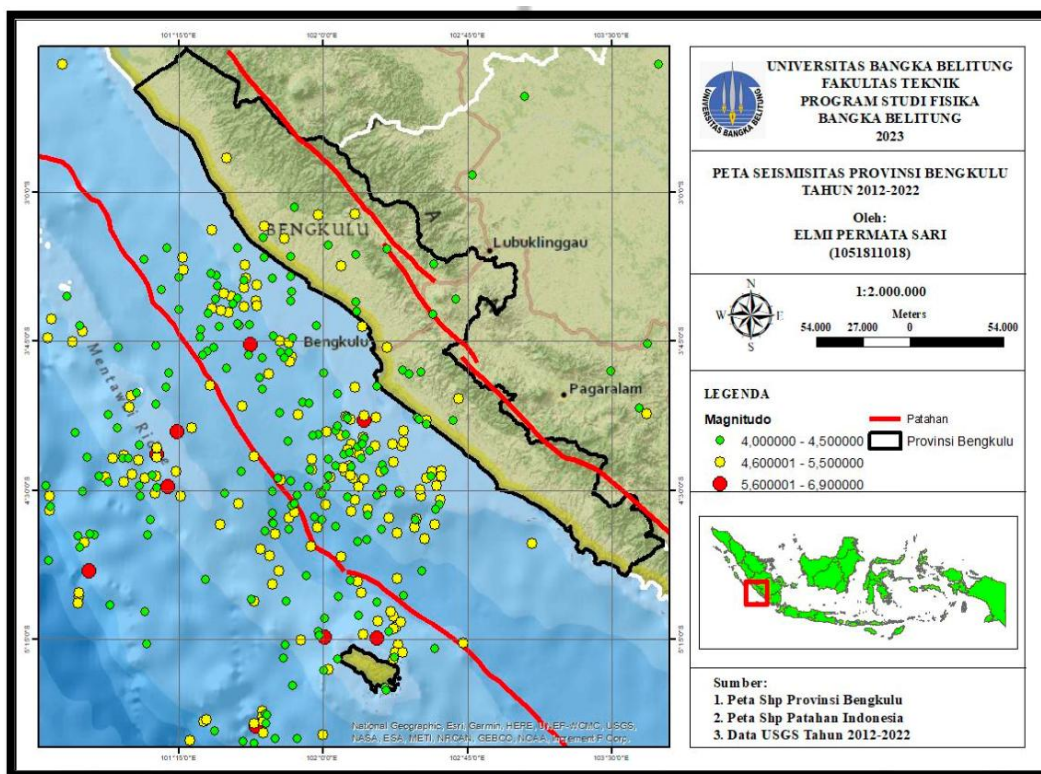
$$b = \frac{1}{\bar{M} - M_c} \log e \dots \dots \dots (4)$$

Dimana \bar{M} Magnitudo rata-rata dari data gempa bumi dengan $M \geq M_c$. Untuk analisis variasi temporal, estimasi b-value dilakukan secara terpisah pada setiap interval waktu tahunan menggunakan prosedur yang sama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

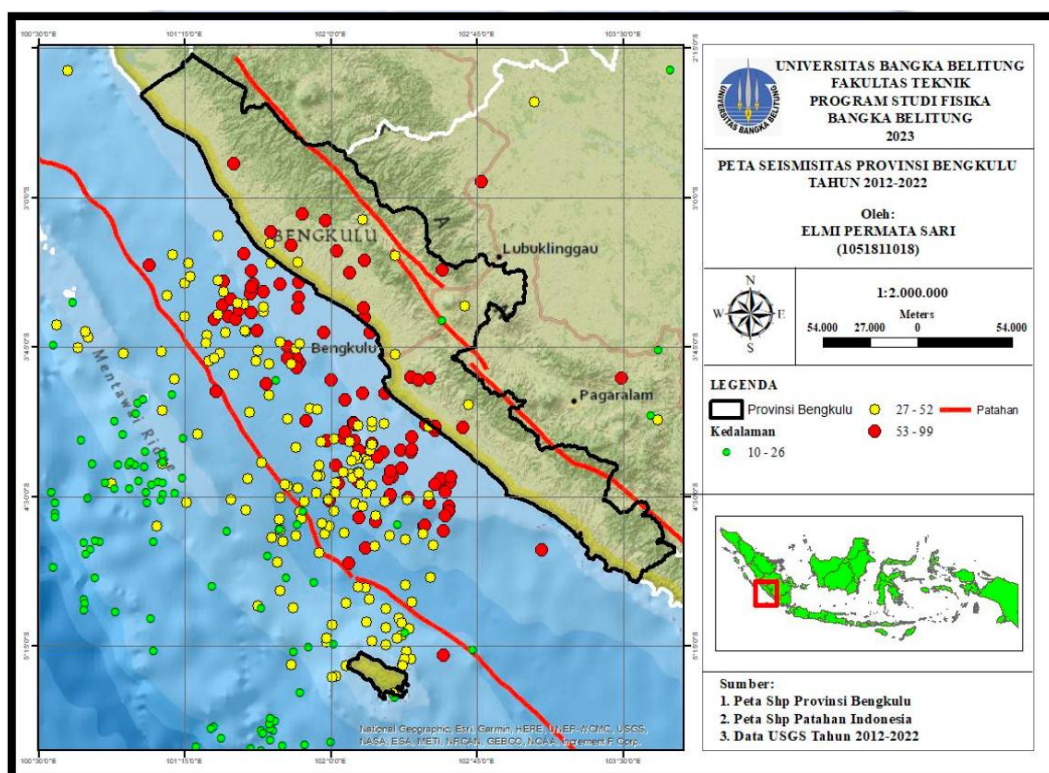
Berdasarkan peta seismisitas Provinsi Bengkulu periode 2012–2022, terlihat bahwa aktivitas gempa bumi tersebar dominan di wilayah lepas pantai barat Bengkulu dan mengikuti pola memanjang sejajar garis pantai. Pola ini menunjukkan keterkaitan kuat antara seismisitas

Bengkulu dengan keberadaan zona subduksi di Samudera Hindia, tempat Lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah Lempeng Eurasia. Konsentrasi episenter di laut mengindikasikan bahwa mekanisme utama pembangkit gempa di wilayah ini dikontrol oleh proses penunjaman lempeng yang masih aktif hingga saat ini [14]. Distribusi magnitudo gempabumi menunjukkan bahwa sebagian besar kejadian berada pada kisaran magnitudo menengah (M_w 4,0–5,5), dengan beberapa gempa bermagnitudo lebih besar ($M_w > 5,6$) yang umumnya berlokasi di lepas pantai. Gempa dengan magnitudo relatif besar ini mengindikasikan adanya akumulasi energi elastik yang signifikan pada bidang kontak antarlempeng sebelum akhirnya dilepaskan dalam bentuk gempa. Sementara itu, gempa bermagnitudo kecil hingga menengah yang tersebar di daratan Bengkulu kemungkinan berasosiasi dengan aktivitas Sesar Sumatra dan struktur turunan di Pegunungan Barisan yang berperan sebagai zona pelepasan regangan kerak [1].



Gambar 1. Sebaran seismisitas gempabumi periode 2012-2022 berdasarkan magnitudo gempabumi

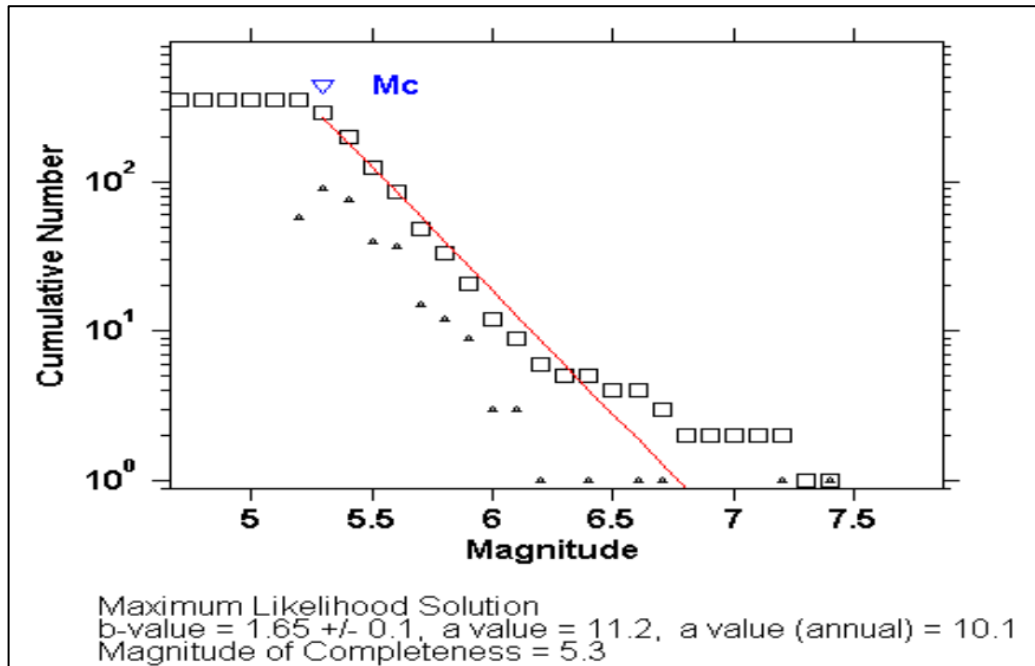
Ditinjau dari kedalaman hiposenter (Gambar 2), gempa dangkal hingga menengah (sekitar 10–52 km) mendominasi wilayah pesisir dan lepas pantai Bengkulu, sedangkan gempa dengan kedalaman lebih besar (hingga ~99 km) cenderung terdistribusi lebih jauh ke arah laut. Hal ini mencerminkan geometri slab subduksi yang semakin menekuk ke bawah ke arah barat daya. Gempa dangkal umumnya berkaitan dengan deformasi kerak atas dan aktivitas sesar lokal, sementara gempa menengah–dalam merepresentasikan deformasi internal lempeng yang tersubduksi akibat peningkatan tekanan dan suhu pada kedalaman tertentu [4]. Fenomena ini umum dijumpai pada zona subduksi aktif di sepanjang busur Sunda.



Gambar 2. Sebaran seismisitas gempabumi periode 2012-2022 berdasarkan kedalaman gempabumi

Korelasi antara sebaran gempa dan jalur patahan utama memperkuat interpretasi bahwa sistem tektonik Bengkulu dikontrol oleh dua sumber gempa utama, yaitu zona subduksi di lepas pantai dan sistem sesar geser di daratan. Sesar Sumatra berperan dalam menghasilkan gempa dangkal yang berpotensi merusak karena kedekatannya dengan permukiman, sedangkan zona subduksi berkontribusi terhadap gempa menengah–besar yang berpotensi memicu tsunami apabila mekanisme sumbernya melibatkan pergeseran vertikal dasar laut[15]. Oleh karena itu, meskipun sebagian besar episenter berada di laut, dampak gempabumi tetap signifikan terhadap wilayah daratan Bengkulu. Secara keseluruhan, pola seismisitas Bengkulu selama periode 2012–2022 mencerminkan karakteristik wilayah tektonik aktif dengan tingkat bahaya gempabumi yang tinggi. Dominasi gempa di lepas pantai menunjukkan peran utama subduksi Indo-Australia–Eurasia, sementara keberadaan gempa dangkal di daratan menegaskan pentingnya pengaruh sesar aktif[16].

Distribusi hubungan antara magnitudo dan frekuensi kumulatif gempabumi di wilayah Bengkulu selama periode 2012–2022 menunjukkan hubungan linier antara magnitudo dan logaritmik jumlah kejadian gempabumi dalam rentang magnitudo tertentu. Pola ini mengindikasikan bahwa seismisitas regional mengikuti hukum Gutenberg–Richter, yang secara empiris menggambarkan hubungan statistik antara frekuensi kejadian gempabumi dan magnitudo [6]. Hubungan linier tersebut menunjukkan bahwa mekanisme pelepasan energi seismik di wilayah Bengkulu dikontrol oleh proses tektonik yang relatif stabil secara statistik selama periode pengamatan[13].

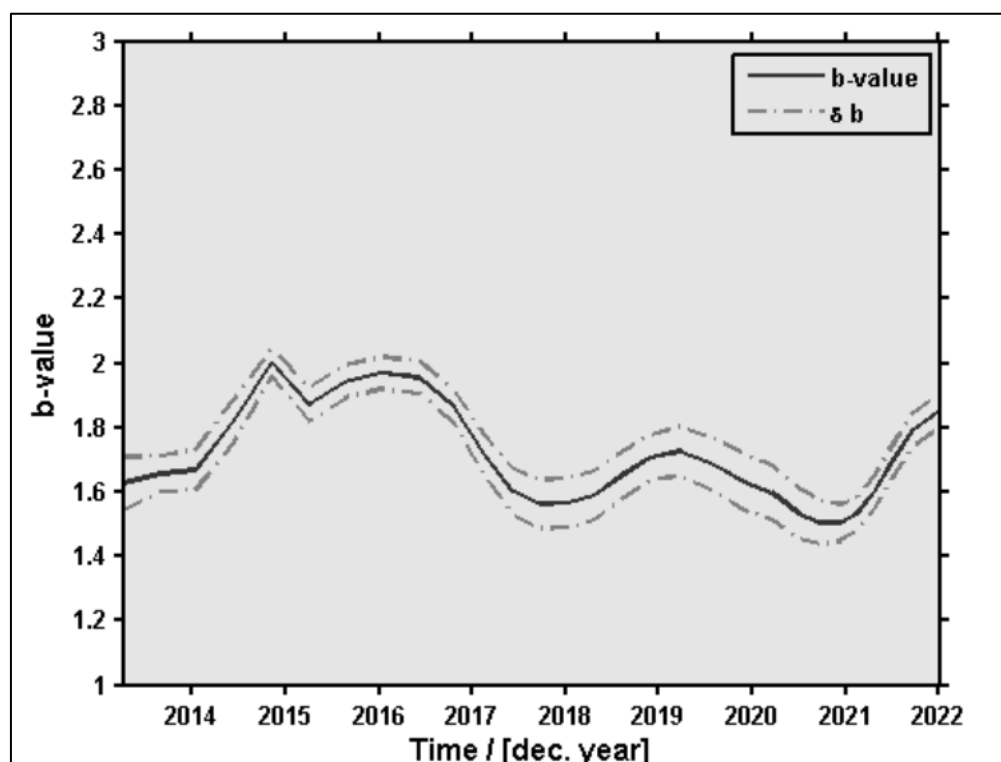


Gambar 3. hubungan antara magnitudo dan frekuensi kumulatif gempabumi di wilayah Bengkulu selama periode 2012–2022

Nilai magnitude of completeness (M_c) sebesar 5,3 menunjukkan magnitudo minimum di mana pola distribusi gempabumi di wilayah Bengkulu masih mencerminkan proses pelepasan energi seismik yang digambarkan oleh hubungan Gutenberg–Richter [17]. Pada magnitudo yang lebih kecil, jumlah kejadian gempabumi yang teramati menurun dan tidak lagi mengikuti pola tersebut, sehingga tidak merepresentasikan karakter seismotektonik regional secara utuh. Oleh karena itu, penggunaan data di bawah M_c dapat mengaburkan interpretasi parameter b-value. Estimasi b-value menggunakan metode Maximum Likelihood menghasilkan nilai b sebesar $1,65 \pm 0,1$, yang relatif lebih tinggi dibandingkan nilai b referensi global yang umumnya berada di sekitar 1,0, sebagaimana dilaporkan pada berbagai katalog gempabumi tektonik [6,18]. Dalam kerangka seismologi fisik, nilai b yang tinggi sering dikaitkan dengan tingkat heterogenitas medium yang tinggi, kondisi tegangan diferensial yang relatif rendah, serta dominasi aktivitas gempabumi bermagnitudo kecil hingga menengah. Interpretasi ini sejalan dengan karakter tektonik wilayah Bengkulu yang dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara zona subduksi Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Eurasia dan sistem sesar aktif Sumatra [1]. Selain itu, nilai b yang relatif tinggi juga dapat mencerminkan pengaruh fluida pada zona patahan dan bidang subduksi. Keberadaan fluida bertekanan tinggi berpotensi menurunkan tegangan efektif batuan, sehingga memicu peningkatan frekuensi kejadian gempabumi bermagnitudo kecil [18]. Fenomena ini banyak dilaporkan pada zona subduksi aktif dengan tingkat deformasi yang tinggi, termasuk pada busur Sunda bagian barat. Dengan demikian, nilai b yang diperoleh tidak hanya merepresentasikan karakter statistik seismisitas, tetapi juga memberikan indikasi terhadap kondisi fisik dan mekanik kerak serta slab subduksi di wilayah Bengkulu [3].

Nilai a sebesar 11,2, dengan nilai a tahunan sebesar 10,1, menunjukkan tingkat produktivitas seismik yang tinggi di wilayah Bengkulu selama periode 2012-2022. Parameter a menggambarkan tingkat aktivitas seismik secara keseluruhan, sehingga nilai yang besar mengindikasikan frekuensi kejadian gempabumi yang tinggi. Kombinasi nilai a yang tinggi dan nilai b yang besar menunjukkan bahwa seismisitas wilayah studi didominasi oleh gempabumi bermagnitudo kecil hingga menengah, sementara kejadian gempabumi bermagnitudo besar relatif lebih jarang, meskipun tetap berpotensi terjadi akibat akumulasi tegangan jangka panjang

pada zona subduksi utama[6]. Secara keseluruhan, hubungan magnitudo–frekuensi berbasis metode Maximum Likelihood menunjukkan bahwa seismisitas Provinsi Bengkulu selama periode 2012–2022 dikontrol oleh sistem tektonik yang aktif dan kompleks. Nilai b yang relatif tinggi mengindikasikan karakter seismisitas yang didominasi oleh kejadian gempa bumi bermagnitudo kecil hingga menengah, yang umumnya berkaitan dengan heterogenitas medium kerak dan distribusi tegangan yang tidak seragam[13].



Gambar 4. Variasi temporal b-value gempa bumi di wilayah Bengkulu selama periode 2012–2022

Variasi temporal b-value di Provinsi Bengkulu selama periode 2012–2022 (Gambar 3) menunjukkan fluktuasi yang signifikan dari tahun ke tahun, yang mencerminkan dinamika perubahan kondisi tegangan dan karakteristik mekanik kerak di wilayah Bengkulu. Nilai b tahunan yang diperoleh melalui metode Maximum Likelihood berkisar antara 1,09 hingga 2,93, sedangkan nilai a berkisar antara 7,18 hingga 16,8 menegaskan bahwa perubahan seismisitas Bengkulu tidak hanya ditandai oleh fluktuasi jumlah kejadian, tetapi juga oleh perubahan distribusi relatif antara gempa bumi kecil dan gempa bumi yang lebih besar. Nilai b tahunan diperoleh melalui estimasi Maximum Likelihood, sedangkan batas ketidakpastian ($\pm\sigma b$) merepresentasikan ketidakpastian estimasi b-value pada setiap interval waktu.

Pada tahun 2012–2015, nilai b yang sangat tinggi dan mencapai maksimum pada tahun 2015 ($b = 2,93$), bersamaan dengan nilai a tertinggi ($a = 16,8$), menunjukkan fase seismisitas yang didominasi oleh kejadian bermagnitudo kecil hingga menengah dengan tingkat produktivitas yang tinggi. Dalam konteks seismologi, kombinasi nilai a dan b yang tinggi mengindikasikan bahwa pelepasan energi seismik pada periode ini berlangsung melalui banyak kejadian berskala kecil, yang secara statistik sering diasosiasikan dengan medium yang heterogen dan pelepasan energi yang tersebar pada sistem patahan dan zona subduksi [7]. Periode 2016–2019, Sebaliknya, pada periode 2016–2019, penurunan nilai b ke kisaran 1,42–1,95 yang disertai dengan penurunan nilai a menunjukkan perubahan mendasar dalam karakter seismisitas, yaitu meningkatnya kontribusi relatif kejadian bermagnitudo menengah hingga besar. Kontras ini mengindikasikan bahwa seismisitas Bengkulu pada periode tersebut menjadi lebih terfokus pada

sumber-sumber tertentu, suatu kondisi yang dalam kajian seismologi sering dikaitkan dengan meningkatnya konsentrasi tegangan pada segmen patahan atau bidang subduksi [18]. Pada 2020–2022, nilai b terus menurun hingga mencapai minimum pada tahun 2022 ($b = 1,09$), bersamaan dengan nilai a terendah ($a = 7,18$). Nilai b yang mendekati 1,0 secara klasik merepresentasikan kondisi seismisitas di mana proporsi kejadian bermagnitudo lebih besar meningkat relatif terhadap gempa kecil, yang dalam berbagai studi sering diasosiasikan dengan medium yang lebih homogen dan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi [6]. Secara keseluruhan, variasi temporal nilai a dan b menunjukkan pergeseran karakter seismisitas Bengkulu yang merefleksikan respons statistik sistem tektonik regional terhadap interaksi antara zona subduksi dan sistem sesar aktif, sebagaimana tercermin pada perubahan distribusi frekuensi–magnitudo gempabumi.

Interpretasi ini sejalan dengan kajian seismologi statistik yang menunjukkan bahwa perubahan b -value dapat berhubungan dengan variasi relatif kondisi tegangan dan sifat mekanik medium batuan, meskipun b -value tidak merepresentasikan pengukuran langsung medan tegangan[7]. Dalam konteks wilayah Bengkulu, variasi temporal b -value dipahami sebagai ekspresi statistik seismisitas regional yang dipengaruhi oleh tatanan tektonik yang kompleks, khususnya interaksi antara zona subduksi di lepas pantai barat Sumatra dan sistem sesar aktif di daratan. Secara konseptual, nilai b menggambarkan hubungan frekuensi–magnitudo gempabumi, yaitu perbandingan relatif antara kejadian bermagnitudo kecil dan kejadian bermagnitudo lebih besar. Oleh karena itu, variasi spasial maupun temporal b -value mencerminkan perubahan karakter distribusi ukuran kejadian gempabumi, yang dalam berbagai studi internasional telah dikaitkan dengan heterogenitas struktur geologi dan evolusi zona patahan pada sistem tektonik aktif[12]. Dengan demikian, variasi temporal b -value di Bengkulu memberikan indikasi statistik mengenai dinamika seismisitas regional yang berlangsung dalam kerangka tektonik subduksi–sesar aktif, tanpa mengasumsikan mekanisme sumber atau kondisi tegangan secara deterministik. Variasi Temporal dalam b -value wilayah Bengkulu disajikan dalam bentuk Tabel 1

Tabel 1. Variasi Temporal Tahun 2012-2022

No.	Tahun	Nilai b
1	2012	2.21
2	2013	1.63
3	2014	2.07
4	2015	2.93
5	2016	1.95
6	2017	1.42
7	2018	2.44
8	2019	1.52
9	2020	1.64
10	2021	1.77
11	2022	1.09

KESIMPULAN

Analisis variasi temporal b -value gempabumi di Provinsi Bengkulu selama periode 2012–2022 menggunakan metode Maximum Likelihood menunjukkan bahwa karakter seismisitas regional tidak bersifat konstan dari waktu ke waktu. Variasi temporal nilai a dan b merepresentasikan perubahan karakter seismisitas yang terekam dalam distribusi frekuensi–

magnitudo gempa bumi, dan berlangsung dalam konteks tatanan tektonik aktif Bengkulu. Perubahan tersebut dipahami sebagai ekspresi statistik seismisitas regional yang dipengaruhi oleh interaksi antara zona subduksi Indo-Australia–Eurasia di lepas pantai dan sistem sesar aktif di daratan. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa analisis b-value berbasis metode Maximum Likelihood dapat digunakan sebagai pendekatan statistik yang efektif untuk mengkaji dinamika seismisitas regional dalam kerangka seismotektonik Provinsi Bengkulu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Natawidjaja D H 2007 *The Sumatran Fault Zone-from Source to Hazard* vol 1
- [2] Gafoer S, Amin T C, Pardede R and dan Pengembangan Geologi P P 1992 Geologi lembar Bengkulu, Sumatera = The geology of the Bengkulu quadrangle, Sumatera
- [3] Delfebriyadi 2023 Seismic hazard assessment of Bengkulu City using probabilistic method *E3S Web of Conferences* 464 01008
- [4] Beall A, Fagereng Å, Davies J H, Garel F and Davies D R 2021 Influence of Subduction Zone Dynamics on Interface Shear Stress and Potential Relationship With Seismogenic Behavior *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22
- [5] Woessner J 2005 Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty *Bulletin of the Seismological Society of America* 95 684–98
- [6] Gutenberg B and Richter C F *FREQUENCY OF EARTHQUAKES IN CALIFORNIA**
- [7] Ito R and Kaneko Y 2023 Physical Mechanism for a Temporal Decrease of the Gutenberg-Richter *b* -Value Prior to a Large Earthquake *J Geophys Res Solid Earth* 128
- [8] Chrapkiewicz K, Wilde-Piórko M, Polkowski M and Grad M 2020 Reliable workflow for inversion of seismic receiver function and surface wave dispersion data: a “13 BB Star” case study *J Seismol* 24 101–20
- [9] Bhat G R, Iqbal V, Yousuf M and Wani S 2021 Seismotectonics and Spatio-temporal Variations in Seismicity Rates along Andaman Trench *Journal of the Geological Society of India* 97 249–54
- [10] Hadi A I, Farid M and Fauzi Y 2012 *Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum dan Kerentanan Seismik Akibat Gempa Bumi untuk Mendukung Rencana Tata Ruang dan Wilayah (RTRW) Kota Bengkulu* vol 1
- [11] Puteri D M, Affandi A K, Sailah S, Hidayat N and Zawawi M K 2019 Analysis of peak ground acceleration (PGA) using the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) method for Bengkulu earthquake of 1900 – 2017 period *J Phys Conf Ser* 1282 012054
- [12] Iwata D and Nanjo K Z 2024 Adaptive estimation of the Gutenberg–Richter *b* value using a state space model and particle filtering *Sci Rep* 14
- [13] Maulinda R, Kusmita T, Aldila H and Triani T 2024 Analisis b-value Gempabumi Menggunakan Metode Gutenberg-Richter Berdasarkan Estimasi Maximum Likelihood Di Daerah Sulawesi Utara *Jurnal Riset Fisika Indonesia* 4 75–82
- [14] Natawidjaja D H 2018 Updating active fault maps and slip rates along the Sumatran Fault Zone, Indonesia *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 118 012001
- [15] Supendi P, Widiyantoro S, Rawlinson N, Yatimantoro T, Muhari A, Hanifa N R, Gunawan E, Shiddiqi H A, Imran I, Anugrah S D, Daryono D, Prayitno B S, Adi S P, Karnawati D, Faizal L and Damanik R 2023 On the potential for megathrust earthquakes and tsunamis off the southern coast of West Java and southeast Sumatra, Indonesia *Natural Hazards* 116 1315–28

- [16] Meilano I, Susilo S, Gunawan E and Parjanto B *GEODETTIC SLIP RATE ESTIMATES FOR THE KUMERING AND SEMANGKO SEGMENTS OF THE SUMATERA FAULT*
- [17] Woessner J 2005 Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty *Bulletin of the Seismological Society of America* 95 684–98
- [18] Scholz C H 2015 On the stress dependence of the earthquake *b* value *Geophys Res Lett* 42 1399–402