

Analisis Variasi Temporal *Magnitude of Completeness* (Mc) dan *b-value* di Wilayah Bali-Nusa Tenggara Tahun 2017-2023

Bunaga, I, G, K, S^{1*}, Anggoro, C, D, R¹., Ariyani, I, M¹., Laily, E, N¹., Nafi, K¹., Nugroho, C¹.

¹Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III Denpasar, Bali, 80361.

DOI: 10.29303/geoscienceed.v63.1215

Article Info

Received: 01 July 2025

Revised: 20 August 2025

Accepted: 30 August 2025

Correspondence:

Phone: +62-85935007744

Abstract: Penelitian ini menganalisis variasi temporal *magnitude of completeness* (Mc) dan *b-value* di wilayah Bali-Nusa Tenggara selama periode 2017-2023. Estimasi Mc dilakukan menggunakan metode Maximum Curvature (MAXC), sedangkan *b-value* dihitung dengan pendekatan Maximum Likelihood Estimation (MLE). Hasil menunjukkan bahwa nilai Mc dan *b-value* berfluktuasi dari tahun ke tahun, seiring dengan peningkatan jumlah dan distribusi sensor seismik. Nilai Mc cenderung menurun setelah 2019, menunjukkan peningkatan sensitivitas sistem pemantauan. Sementara itu, ditemukan pola penurunan *b-value* dalam dua periode yang berbeda sebelum terjadinya Gempa Bumi Lombok 2018 dan Gempa Bumi Laut Flores 2021. Penelitian ini diharapkan berkontribusi pada pengembangan model bahaya gempa bumi dan strategi mitigasi di wilayah Bali - Nusa Tenggara kedepannya.

Keywords: Mc, *b-value*, Bali-Nusa Tenggara, MAXC, MLE, gempabumi

Citation: Bunaga, I. G. K. S., Anggoro, C. D. R., Ariyani, I. M., Nafi, K., Laily, E. N. (2025). Analisis Variasi Temporal *Magnitude of Completeness* (Mc) dan *b-value* di Wilayah Bali-Nusa Tenggara Tahun 2017-2023. *Journal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(3), 1527-1533. <https://doi.org/10.29303/geoscienceed.v63.1215>

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik (Bird, 2003). Interaksi lempeng-lempeng ini membentuk zona subduksi dan sistem sesar aktif yang kompleks, menjadikan wilayah Indonesia rawan terhadap gempa bumi.

Salah satu wilayah yang secara tektonik aktif dan kompleks adalah Bali-Nusa Tenggara, yang berada dalam zona transisi antara busur Sunda dan busur Banda (Hamilton, 1979). Wilayah ini secara berkala mengalami gempa bumi merusak, seperti Gempa Bumi Lombok 2018 (M 7,0) dan Gempa Bumi Laut Flores 2021 (M 7,4) yang mengakibatkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur. Kejadian ini menegaskan pentingnya studi bahaya seismik sebagai dasar untuk mitigasi risiko gempa bumi.

Dua parameter statistik yang penting dalam studi kegempaan adalah *magnitude of completeness* (Mc) dan *b-value*. Nilai Mc menunjukkan batas magnitudo dimana seluruh kejadian gempabumi telah terdeteksi dan terekam secara lengkap dalam katalog gempa, sedangkan *b-value* adalah parameter dari hubungan Gutenberg-Richter yang menunjukkan proporsi antara gempa kecil dan besar atau menggambarkan kondisi tegangan batuan (Scholz, 1968; Tsapanos, 1990). Nilai-nilai ini dapat digunakan dalam analisis bahaya seismik, pemodelan probabilistik, serta penilaian tegangan di kerak bumi (Wulandari et al., 2023).

Berbagai studi menunjukkan pentingnya Mc dan *b value* dalam mengevaluasi seismisitas. Wiemer & Wyss (2000) dan Mignan & Woessner (2012) menekankan pentingnya estimasi Mc untuk menghasilkan parameter seismik yang valid. Schorlemmer & Woessner (2008) menunjukkan bahwa kualitas deteksi gempa sangat memengaruhi *b-value*,

Email: satriabunaga.bmkg@gmail.com

dan Kamer & Hiemer (2015) menggunakan distribusi *b-value* untuk mendeteksi zona akumulasi tegangan di wilayah aktif.

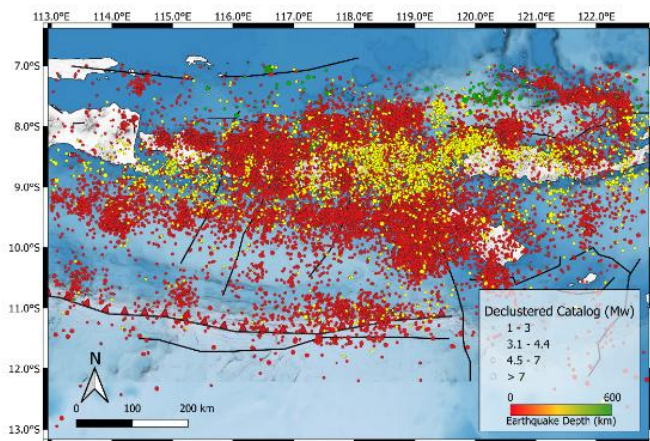
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi temporal nilai M_c dan *b-value* di wilayah Bali-Nusa Tenggara. Dalam studi ini dilakukan proses *declustering* pada katalog gempa yang terekam oleh jaringan seismik guna memisahkan *mainshock* dari *aftershock* sebelum menentukan nilai M_c .

Melalui pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai karakteristik kegempaan di wilayah studi, serta menjadi kontribusi penting dalam pengembangan model bahaya seismik dan strategi mitigasi bencana gempa bumi di Indonesia.

Metode

1. Data

Data gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari katalog Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Pusat Gempa Regional III (BMKG PGR III) Bali periode 2017 – 2023 dengan total 33.951 kejadian gempa bumi (Gambar 1). Cakupan wilayah yang berada di koordinat 7°LS - 13°LS dan 112°BT - 123°BT. Data yang digunakan terdiri atas *latitude*, *longitude*, magnitudo, kedalaman, *origin time*, dan lokasi gempa.



Gambar 1 Peta Seismisitas Wilayah PGR III 2017-2023

2. Konversi Magnitudo

Katalog BMKG mencatat beberapa jenis magnitudo. Untuk keperluan analisis yang konsisten, semua jenis magnitudo dikonversi ke dalam magnitudo *moment* (M_w), yang menjadi standar dalam studi ini.

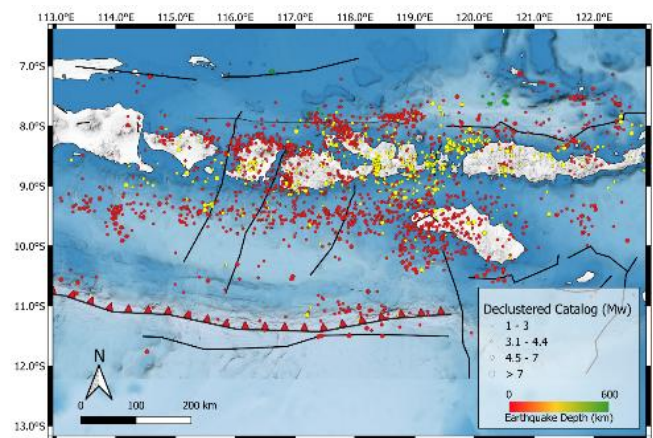
Konversi dilakukan menggunakan persamaan empiris yang bersumber dari Taruna & Pratiwi (2021) untuk jenis magnitudo M_L , M_{L_v} , m_b , dan M_s . Jenis magnitudo m_B , M_w (M_{wp}), M_{wp} , dan $M_w(m_B)$

berdasarkan referensi BMKG, sedangkan Scordilis (2005) untuk konversi M_{jma} .

3. Declustering Gempa

Declustering dilakukan untuk memastikan hanya kejadian gempabumi utama (*mainshock*) yang dianalisis. Proses ini menggunakan metode Gardner & Knopoff (1974) yang mengeliminasi *foreshock* dan *aftershock* berdasarkan jendela (*window*) waktu dan jarak. Parameter *window* ditentukan berdasarkan magnitudo gempa utama, dimana semakin besar magnitudonya maka akan semakin luas jangkauan waktu dan ruang yang dipertimbangkan. Gempa-gempa yang terjadi dalam rentang *window* ini akan dianggap sebagai *aftershock-foreshock* dan dikeluarkan dari analisis tren utama.

Hasil *declustering* menyisakan 2.238 kejadian *mainshock*, yang selanjutnya digunakan dalam estimasi M_c dan *b-value* (Gambar 2). *Declustering* penting agar statistik tidak bias akibat dominasi gempa susulan (Zaliapin & Ben-Zion, 2013).



Gambar 2 Peta Seismisitas Setelah Declustering

4. Estimasi Magnitude of Completeness (M_c)

Magnitude of Completeness (M_c) merupakan nilai magnitudo minimum dimana seluruh kejadian gempabumi telah terdeteksi dan terekam secara lengkap dalam katalog gempa. Beberapa penelitian terkini menunjukkan bahwa nilai M_c bersifat dinamis dan sangat sensitif terhadap perubahan konfigurasi jaringan seismometer (Mignan & Woessner, 2012; Tormann, 2014).

Untuk mengkarakterisasi hubungan tersebut digunakan metode *Maximum Curvature* (MAXC) guna mendapatkan nilai M_c secara objektif berdasarkan titik belok pada kurva frekuensi-magnitudo kumulatif. Hubungan antara frekuensi kejadian gempa dan distribusi magnitudo dapat dimodelkan melalui

persamaan *Frequency Magnitude Distribution* (FMD) atau Hukum Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1944), sebagai berikut:

$$\log N(M) = a - bM \quad (1)$$

Dengan $N(M)$ merupakan jumlah gempa dengan nilai magnitudo $\geq M$, a dan b merupakan konstanta. Konstanta a merupakan parameter aktivitas seismik yang mencerminkan tingkat seismisitas di suatu daerah dalam rentang waktu tertentu. Konstanta b merupakan nilai parameter tektonik.

5. *b*-value

Pada Hukum Gutenberg-Richter disebutkan bahwa *b*-value merupakan parameter yang menggambarkan proporsi relatif antara kejadian gempa besar dan kecil di suatu wilayah. *b*-value yang tinggi (>1.0) menunjukkan dominasi gempa kecil, sedangkan nilai yang rendah (<1.0) menunjukkan dominasi gempa besar. Dalam interpretasi tektonik, fluktuasi *b* value dikaitkan dengan variasi stress di kerak bumi (Scholz, 2015).

Dalam penelitian ini, *b*-value dihitung menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE) yang dikemukakan oleh Utsu (1965), sebagaimana ditampilkan pada persamaan 2. Berdasarkan data *mainshock* hasil *declustering* dan nilai M_c yang telah ditentukan sebelumnya. Perhitungan dilakukan untuk masing-masing tahun dari 2017 hingga 2023, dengan hanya menggunakan kejadian gempa dengan magnitudo $M_w \geq M_c$.

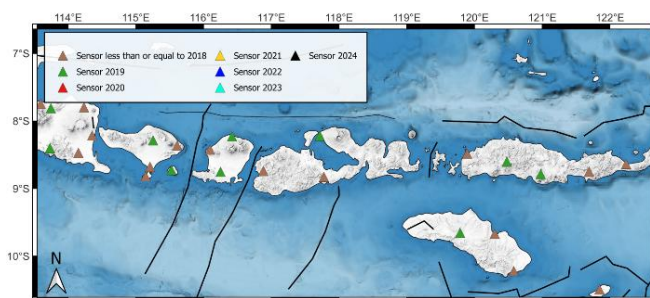
$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_c} \quad (2)$$

di mana:

$\bar{M}$: rata-rata magnitudo gempa dalam periode tertentu,
 M_c : nilai *magnitude of completeness* yang ditentukan berdasarkan MAXC.

6. Distribusi Sebaran Sensor Seismik

Distribusi spasial sensor seismik di wilayah sebagian Jawa Timur, Bali, NTB, dan sebagian NTT berperan penting dalam penentuan akurasi lokasi gempa dan perubahan nilai M_c pada studi ini. Berdasarkan data BMKG, jumlah jaringan sensor seismik mengalami peningkatan sejak tahun 2019, khususnya di wilayah NTB dan NTT (Gambar 3).



Gambar 3. Peta sebaran sensor seismik di wilayah PGR III (BMKG, 2023)

Hasil dan Pembahasan

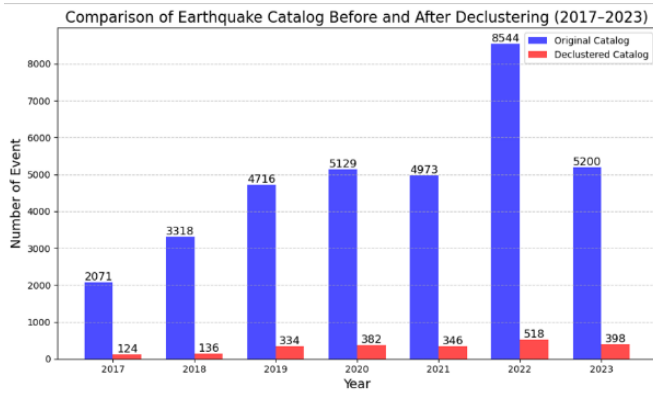
1. Analisis Katalog dan Distribusi Seismisitas

Secara umum, data gempa di wilayah penelitian menunjukkan tren peningkatan jumlah gempa setiap tahunnya selama periode 2017-2023, dengan total 33.951 kejadian (Gambar 4). Faktor yang diduga sebagai penyebab peningkatan ini adalah penambahan sensor seismik di wilayah penelitian dan atau dipengaruhi oleh kejadian *aftershock* gempa - gempa signifikan terdahulu, sebagai contoh Gempa Bumi Lombok 2018 dan Gempa Bumi Laut Flores 2021 (Gambar 3). Kondisi tersebut memungkinkan untuk meningkatkan sensitivitas sistem pemantauan seismik, sehingga gempa bermagnitudo kecil banyak tercatat dalam katalog dan atau disebabkan oleh pelepasan energi gempa yang aktif.

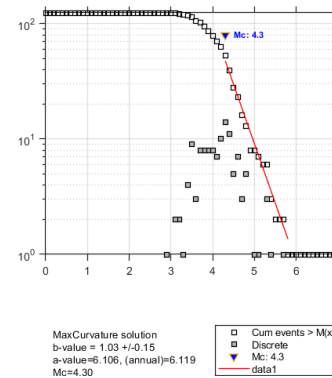
Untuk memastikan perubahan pola seismisitas tersebut, diperlukan proses *declustering*. Berdasarkan Gambar 4-6, tren hasil *declustering* mengalami peningkatan tiap tahunnya, sejumlah 2238 *mainshock* yang didominasi magnitudo (M_w 3,3 - M_w 3,4) dan kedalaman dangkal (10 - 15 km). Dengan kata lain, aktivitas tektonik memang meningkat yang diperkuat dengan peningkatan kemampuan deteksi seismik.

Tahun 2022 tercatat sebagai tahun dengan jumlah gempa tertinggi yaitu 8.544 kejadian gempa hasil *declustering*. Teridentifikasi 518 gempa utama. Lonjakan ini diduga berkaitan dengan dampak jangka panjang Gempa Laut Flores 2021 yang memicu rangkaian kejadian susulan yang intens dan berlangsung hingga tahun berikutnya. Berdasarkan Supendi et al (2022), gempa susulan masih berlangsung hingga bulan Maret 2022 sebanyak 1403 kejadian.

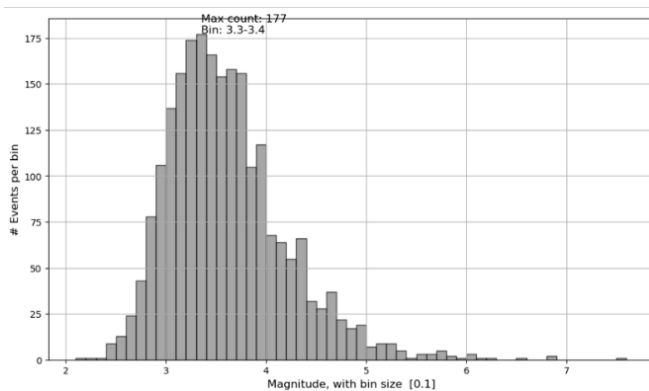
Hasil *declustering* ini kemudian dimanfaatkan untuk penentuan parameter statistik seperti M_c dan *b*-value dihitung dari distribusi kejadian utama yang lebih stabil (Zaliapin & Ben-Zion, 2013).



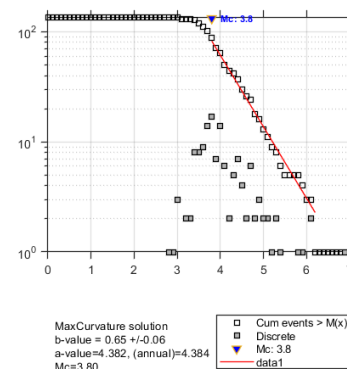
Gambar 4. Grafik Katalog Gempabumi 2017-2023.



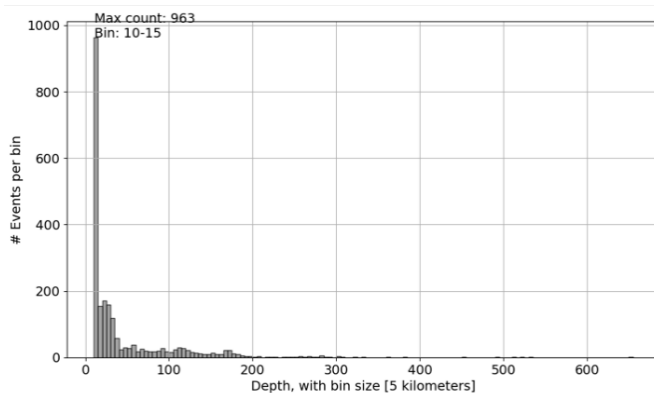
(a)



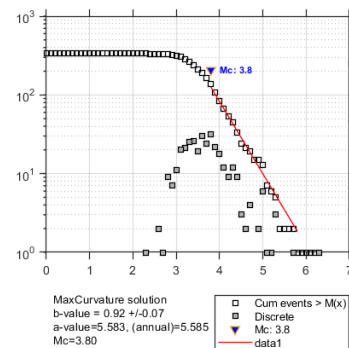
Gambar 5. Histogram Kejadian Gempabumi Terhadap Magnitudo 2017-2023.



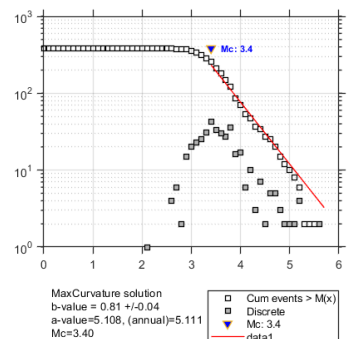
(b)



Gambar 6. Histogram Kejadian Gempabumi Terhadap Kedalaman 2017-2023.

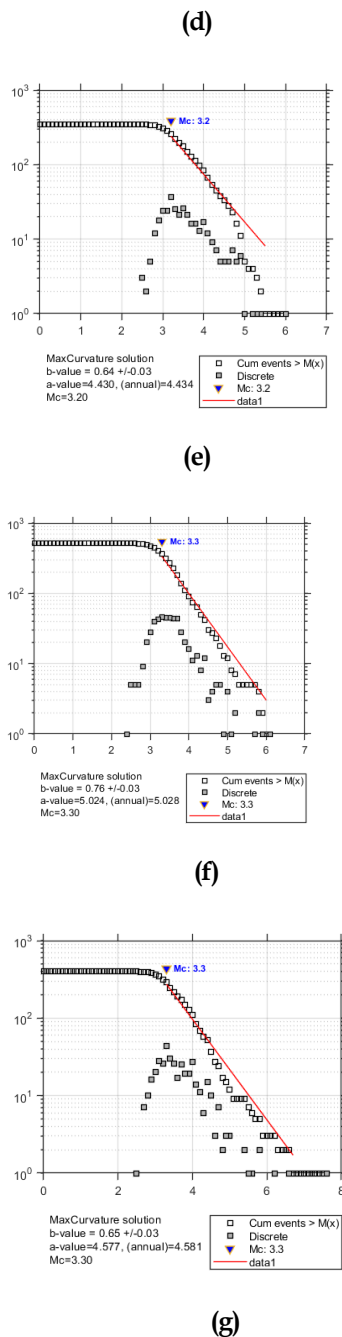


(c)



2. Distribusi Frekuensi-Magnitudo (FMD)

Untuk melihat seberapa lengkap dan stabil distribusi magnitudo gempa setiap tahun, dilakukan juga analisis grafik FMD per tahun. Gambar 7 menunjukkan hubungan antara jumlah kejadian dan magnitudo, yang digunakan untuk mengidentifikasi titik kelengkungan maksimum (Mc) dan memvalidasi estimasi Mc dari MAXC.



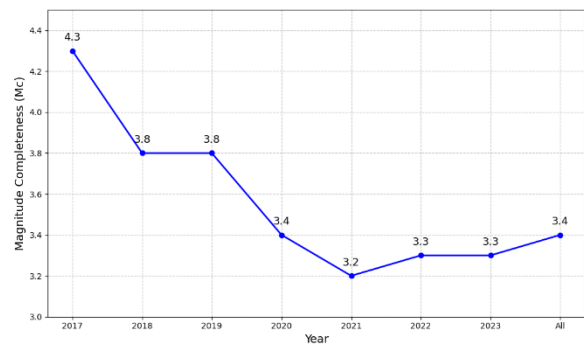
Gambar 7. Grafik FMD tahun 2017–2023. (a) tahun 2017, (b) tahun 2018, (c) tahun 2019, (d) tahun 2020, (e) tahun 2021, (f) tahun 2022, (g) tahun 2023.

Terlihat *slope* kurva berubah tiap tahun, terutama periode tahun 2017–2019 dan tahun 2020–2023 mencerminkan perbedaan tingkat kelengkapan katalog. Tahun 2020–2023 kurva memiliki puncak (MAXC) berkisar antara 3.2 - 3.3 dengan *slope* curam di bagian bawah dan perubahan tajam di titik M_c , mengindikasikan kemampuan sistem dalam mencatat gempa dengan kekuatan tersebut dengan baik. Sementara, nilai M_c 4.3 - 3.8 pada tahun 2017–2019 menunjukkan keterbatasan pencatatan kejadian gempa bermagnitudo yang sama atau lebih kecil dibandingkan

periode 2020–2023. Hal ini sejalan dengan penambahan sensor seismik yang baru dilakukan pada tahun 2019.

3. Magnitude of Completeness (M_c)

Magnitude of Completeness (M_c) adalah magnitudo minimum di mana kejadian gempa dalam katalog dianggap tercatat secara lengkap. Estimasi M_c yang tepat sangat krusial karena menjadi batas bawah dalam perhitungan parameter statistik seperti *b-value*. Dalam penelitian ini, M_c dihitung menggunakan metode Maximum Curvature (MAXC) pada periode 2017 hingga 2023, berdasarkan katalog *mainshock* hasil *declustering* (Gambar 8).



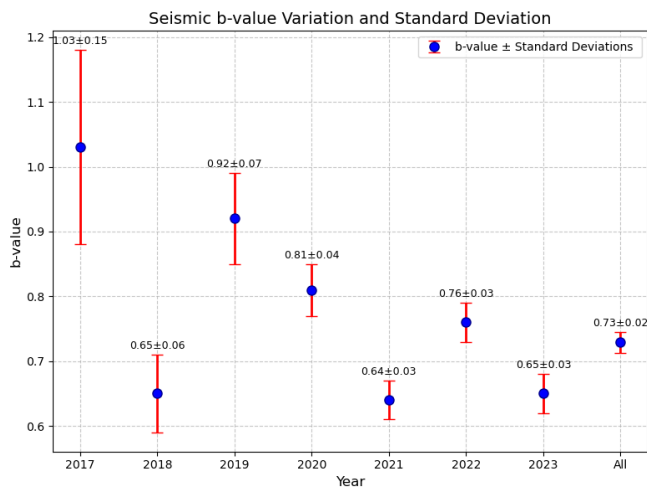
Gambar 8. Grafik Tren Nilai M_c Tahun 2017–2023.

Secara umum, tren nilai M_c mengalami penurunan pada periode 2017 hingga 2023. Rata - rata nilai M_c periode ini adalah 3.4, yang mengindikasikan adanya peningkatan sensitivitas pencatatan gempa di wilayah Bali-Nusa Tenggara, seiring dengan penambahan sensor seismik BMKG sejak tahun 2019. Hal ini memungkinkan sistem untuk mendeteksi gempa bermagnitudo kecil lebih konsisten.

Hasil ini menunjukkan bahwa M_c di wilayah studi tidak bersifat tetap, melainkan sangat bergantung pada waktu, distribusi kejadian, dan performa sistem jaringan sensor seismik. Nilai M_c tahunan ini akan menjadi dasar dalam perhitungan *b value* pada bagian berikutnya.

4. Variasi *b-value* dan Hubungannya dengan M_c serta Aktivitas Seismik

Secara umum, *b-value* mengalami fluktuasi dari tahun ke tahun, yang sebagian besar mencerminkan perubahan nilai M_c dan karakteristik aktivitas seismik pada masing-masing periode. *b-value* tertinggi tercatat pada 2017, sedangkan nilai terendah terjadi pada 2021 (Gambar 9).



Gambar 9. Grafik *b value* serta nilai standar deviasi tiap tahun pada periode 2017–2023.

Tren fluktuasi tersebut terlihat berpola jika dikaitkan dengan kejadian gempa bumi signifikan yang telah terjadi di wilayah penelitian. Sebagai contoh, *b-value* tahun 2017 sebesar 1.03 yang kemudian turun drastis menjadi 0.65 pada tahun 2018. Penurunan tajam ini berkaitan dengan serangkaian Gempabumi Lombok 2018. Pola penurunan ditunjukkan juga pada periode 2019–2021 yang dikaitkan dengan Gempabumi Flores 2021. Menurut Gulia & Wiemer (2019) bahwa nilai *b* cenderung menurun secara signifikan sebelum terjadi gempa besar. Hal ini menjadikannya sebagai indikator peningkatan tegangan *stress* tektonik. Oleh karena itu penurunan *b-value* perlu diwaspadai sebagai sinyal potensi terjadinya gempa besar di masa mendatang.

Kesimpulan

Secara umum, nilai *Mc* mengalami penurunan dari 4.3 menjadi 3.3 pada periode 2017–2023. Tren ini mencerminkan peningkatan sensitivitas dan cakupan jaringan sensor seismik, terutama setelah penambahan jaringan sensor seismik oleh BMKG sejak 2019.

b-value berfluktuasi tiap tahun, dipengaruhi oleh perubahan *Mc* dan aktivitas seismik. Penurunan tajam *b-value*, seperti pada 2017–2018 dan 2019–2021, berkorelasi dengan terjadinya Gempabumi Lombok 2018 dan Gempabumi di Laut Flores 2021.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan model bahaya seismik di Indonesia khususnya wilayah Bali-Nusa Tenggara, serta sebagai masukan penting bagi lembaga terkait dalam mendesain sistem mitigasi gempa bumi yang lebih adaptif.

Acknowledgements

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada BMKG PGR III yang telah memberikan akses terhadap katalog data seismik yang digunakan dalam penelitian

ini. Sebagian besar visualisasi pada makalah ini dibuat menggunakan perangkat lunak QGIS yang tersedia secara gratis, sedangkan data elevasi diperoleh dari situs <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/>. Untuk menyusun beberapa grafik *Mc* dan *b-value*, digunakan perangkat lunak ZMAP (Wyss et al., 2001). Selain itu, berbagai perangkat lunak *open source* dimanfaatkan dalam proses pembuatan grafik lainnya.

Daftar Pustaka

- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Gechemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3). <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367.
- Gulia, L. & Weimer, S. (2019). Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks. *Nature*, 574, 193–199. DOI:[10.1038/s41586-019-1606-4](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1606-4)
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188.
- Hamilton, W.B. (1979). Tectonics of the Indonesian Region. USGS
- Kamer, Y., & Hiemer, S. (2015). Data-driven spatial *b value* estimation with applications to California seismicity: To *b* or not to *b*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(7), 5191–5214. <https://doi.org/10.1002/2014JB011510>
- Mignan, A., & Woessner, J. (2012). Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis (CORSSA)*. <https://www.corssa.org>
- Scholz, C.H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 399–415.
- Scholz, C. H. (2015). On the stress dependence of the earthquake *b value*. *Geophysical Research Letters*, 42(5), 1399–1402.
- Schorlemmer, D., & Woessner, J. (2008). Probability of detecting an earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5), 2103–2117.
- Taruna, D. R., & Pratiwi, M. Y. (2021). Konversi magnitudo empiris untuk wilayah Indonesia timur berdasarkan data katalog BMKG. *Prosiding Seminar Nasional Geofisika Indonesia*, 4(1), 67–74.

- Tsapanos, T. (1990). b-value of two tectonic parts in the circum-Pacific belt. *Pageoph*, 143, 229-242.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula of $\log N=a-bM$ showing the magnitude frequency relation for earthquakes, *Geophys, Bull. Hokkaido Univ.*, 13, 99-103.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), 859-869.
- Wulandari, R., Chan, C.H., & Wibowo, A. (2023). The 2022 M w6.2 Pasaman, Indonesia, earthquake sequence and its implication of seismic hazard in central-west Sumatra. *Geoscience Letters*, 10:25. <https://doi.org/10.1186/s40562-023-00279-6>
- Scordilis, E.M. (2005). Globally Valid Relations Converting Ms, mb, and Mjma to Mw. Workshop on "Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries", Nato Advanced Research, Bulgaria.
- Supendi, P., Rawlinson, N., Prayitno, B.S., Widiyantoro, S., Simanjuntak, A., Palgunadi, K.H., Kurniawan, A., Marliyani, G.I., Nugraha, A.D., Daryono, D., Anugrah, S.D., Fatchurochman, I., Gunawan, M.T., Sadly, M., Adi, S.P., Karnawati, D., Arimuko, A. (2022). The Kalaotoa Fault: A Newly Identified Fault that Generated the Mw 7.3 Flores Sea Earthquake. *The Seismic Record* 2022, 2 (3): 176-185. doi: <https://doi.org/10.1785/0320220015>
- Zaliapin, I., & Ben-Zion, Y. (2013). Earthquake clusters in Southern California II: Classification and relation to physical properties of the crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), 2847-2864. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50178>