



Research Articles

Analisis Pola Spatio-Temporal Gempa Bumi di Zona Busur Belakang Utara Lombok–Flores Menggunakan Agglomerative Clustering

Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Clustering in the Northern Lombok–Flores Back-Arc Zone Using Agglomerative Clustering

Cipta Ramadhani*, Made Sutha Yadnya, Paniran, Bulkis Kanata, Teti Zubaidah

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Mataram,
Nusa Tenggara Barat, INDONESIA

**corresponding author, email : cipta.ramadhani@unram.ac.id*

Manuscript received: 27-10-2025. Accepted: 21-12-2025

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola kejadian gempa di Zona busur belakang utara Lombok-Flores dengan menggunakan algoritma Agglomerative Clustering. Data set gempa bumi didapatkan dari katalog United States Geological Survey (USGS) pada rentang waktu 1970-2021 dengan menggunakan variabel latitude, longitude, kedalaman, dan magnitudo gempa. Untuk mendapatkan pola temporal aktivitas seismic yang tersembunyi, digunakan Teknik sliding windows yang dapat melihat perubahan pola clustering antar waktu secara lebih sistematis. Hasil penelitian memperlihatkan tiga cluster utama terbentuk untuk seluruh windows yang merepresentasikan perbedaan kedalaman dari masing-masing cluster gempa yang ada. Dari hasil analisis terdapat fluktuasi kejadian gempa magnitudo besar pada beberapa windows yang ada, namun hal itu tidak secara signifikan mempengaruhi struktur clustering yang sudah terbentuk. Temuan ini memberikan informasi bahwa penggunaan algoritma agglomerative clustering dan teknik sliding windows dapat secara efektif mengelompokkan gempa bumi berdasarkan kedalamannya serta gambaran akan dinamika temporal secara deskriptif.

Kata kunci : Agglomerative clustering, sliding windows, aktivitas seismik

ABSTRACT

This study aims to identify earthquake clustering patterns in the Northern Lombok–Flores Back-Arc Zone using the Agglomerative Clustering method. Seismic data were obtained from the United States Geological Survey (USGS) covering the period 1970–2021, using latitude, longitude, depth, and magnitude as clustering variables. A sliding window approach was applied to capture the temporal evolution of seismic activity. The results indicate the formation of three stable clusters that consistently represent different earthquake depth levels across all analyzed time windows. Although fluctuations in the occurrence of large-magnitude earthquakes were observed in several windows, these variations did not significantly affect the clustering structure. This study demonstrates that the combination of Agglomerative Clustering and a sliding window approach is effective for identifying depth-based earthquake clustering patterns and describing their temporal dynamics.

Keywords: Agglomerative clustering, sliding windows, seismic activity.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah dengan jumlah aktivitas seismik yang cukup tinggi. Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari beberapa lempeng tektonik yang kompleks, termasuk Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik. Selain itu pengaruh dari struktur sesar lokal dan zona *back-arc thrust* (zona belakang busur) yang aktif turut memberikan kontribusi akan meningkatnya intensitas serta kualitas gempa (Felix et al., 2022; Supendi et al., 2023; Syaputra et al., 2023; Widiyantoro et al., 2024). Pengaruh dari aktivitas seismik ini mengakibatkan pola gempa yang cukup kompleks baik itu dari sisi dimensi spasial maupun temporal, sehingga menyulitkan proses analisis guna menangkap pola tersembunyi yang dapat digunakan untuk mitigasi resiko dan pemodelan seismik.

Dalam beberapa penelitian terkini, penggunaan machine learning untuk mitigasi bencana terutama gempa bumi semakin populer. termasuk pengelompokan (*clustering*) dan klasifikasi kejadian gempa berdasarkan parameter spasial dan seismik (Handayani, Pratama & Wibowo, 2025). Metode-metode seperti DBSCAN, K-Means, dan Hierarchical Clustering telah diterapkan untuk mengidentifikasi zona seismik aktif, klasifikasi kedalaman gempa, dan pola distribusi kejadian dari katalog gempa regional (Rahman & Wijayanto, 2021; Dwi Mauluda et al., 2025; Selvina, 2025).

Pendekatan *unsupervised learning* untuk penelitian dibidang gempa bumi sangat berguna karena ketidakadaan label atau kategori kejadian gempa yang dapat tersedia secara lengkap. Oleh karena itu teknik *clustering* menjadi cara yang efektif untuk aktivitas seismik dalam ruang fitur multidimensi (mis. koordinat, magnitudo, kedalaman) serta memetakan variabilitas temporalnya (Seydoux et al., 2020). Penelitian tentang *clustering* gempa di Indonesia menunjukkan penerapan berbagai algoritma dengan keberhasilan yang bervariasi dalam mengidentifikasi cluster yang bermakna secara statistik dan seismik (Rahim, Yunus & Hidayah, 2023).

Dalam beberapa penelitian terbaru didapatkan bahwa penggunaan metode *clustering* seperti DBSCAN, k-means dan hierarchial sangat berguna untuk mengelompokkan aktivitas seismik dengan dataset dalam jumlah besar. Lebih lanjut lagi, metode *clustering* dengan menggunakan algoritma *agglomerative* terlihat lebih menjanjikan karena penentuan jumlah cluster tidak ditentukan diawal akan tetapi dilakukan setelah melakukan pengamatan akan keterdekatan antar data pada *hierarchial dendrogram*. Hal ini sangat berguna karena dapat merepresentasikan struktur bertingkat yang berguna bagi data seismik yang heterogen (Arifin, 2023).

Lebih lanjut lagi, analisis temporal pada metode *clustering* menekankan pentingnya pemrosesan data dalam rentang waktu tertentu. Oleh karena itu, pendekatan temporal seperti *sliding window* memungkinkan analisis dinamika evolusi cluster dari waktu ke waktu sehingga dapat menangkap perubahan pola aktivitas seismik yang tidak tampak dalam pendekatan statis (Putri, Utami & Wasono, 2023; Vijay & Singh, 2025). Meskipun demikian, studi yang menggabungkan clustering hierarkis, analisis kedalaman & magnitudo, serta evaluasi temporal dalam skala jangka panjang di wilayah *back-arc* Indonesia masih relatif terbatas.

Penelitian ini bertujuan mengisi gap tersebut dengan menerapkan *Agglomerative Hierarchical Clustering* pada data gempa bumi Indonesia periode 1970–2024 menggunakan pendekatan *sliding window temporal*, serta mengevaluasi pola kedalaman gempa dan magnitudo besar secara terintegrasi dari perspektif *machine learning*.

BAHAN DAN METODE

Pengumpulan dan Pra-Pemrosesan Data

Penelitian ini menggunakan data gempa bumi pada rentang waktu dari tahun 1970-2021 yang terjadi pada daerah Zona Busur Belakang Utara Lombok–Flores yaitu di daerah Indonesia bagian timur yang didapatkan pada situs USGS (USGS, 2024). Data gempa yang didapatkan mencakup informasi lokasi (lintan dan bujur), kedalaman, magnitudo dan waktu kejadian seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Set gempa Bumi

time	latitude	longitude	depth	mag
2019-01-09T03:26:41.160Z	-73.157	1.248.283	449.73	4.3
2019-01-07T03:48:26.250Z	-81.852	1.198.796	10	4.8
2019-01-03T21:09:38.720Z	-76.313	1.194.178	274.63	4.2
2018-12-31T14:20:55.860Z	-75.302	1.230.688	268.33	4.1
2018-12-26T12:22:23.580Z	-83.328	1.167.449	23.16	4.7

Setelah data gempa dikumpulkan, dilakukan pra-pemrosesan data untuk menjaga keseragaman dan kesesuaian skala fitur sebelum proses clustering dilakukan. Attribute waktu akan dieliminasi/tidak dimasukkan dalam proses clustering. Selain itu koordinat lintang dan bujur akan ditransformasi dari system geografis (EPSG:4326) menjadi proyeksi metrik (EPSG:3857) dengan tujuan agar jarak spasial antar lokasi gempa dapat diubah dalam bentuk satuan meter (Bittencourt et al., 2025). Lebih lanjut, nilai magnitudo dilakukan penyesuaian skala untuk mengurangi ketimpangan nilai fitur pada variabel lain yang ada.

Sliding Windows dan Metode Clustering

Untuk menganalisa aktivitas seismik dalam jangka waktu yang Panjang (1970-2021) digunakan Teknik *sliding windows* temporal dengan rentang waktu masing-masing 10 tahun. Dimana pada pada tiap window nya dilakukan pergeseran 5 tahun. Hal ini ditujukan untuk melihat pergeseran pola clustering yang terjadi secara bertahap guna mencegah bias yang terjadi akibat dari pergeseran waktu 10 tahun (Vijay & Nanda, 2023).

Metode *clustering* yang digunakan pada penelitian ini adalah *Agglomerative Clustering* yang merupakan jenis dari unsupervised learning. proses clustering dilakukan secara bertahap berdasarkan kedekatan antar data. Tidak seperti dengan teknik clustering pada algoritma lainnya. Jumlah clustering didapatkan berdasarkan hasil analisis grafik dendrogram yang dihasilkan.

Analisis dilakukan dengan membandingkan karakteristik masing-masing cluster pada setiap windows. Fokus analisis dilakukan dengan melihat rata-rata kedalaman gempa per-cluster dan jumlah kejadian gempa bermagnitudo besar pada setiap jendela waktu yang ada. Hal

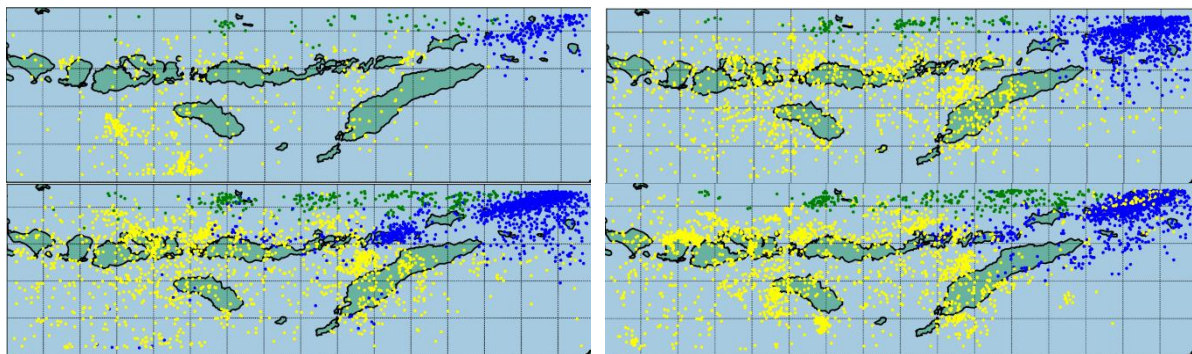
ini dilakukan untuk memahami variasi aktivitas seismik yang teridentifikasi oleh model clusering.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian pembahasan memberikan hasil clustering kejadian gempa di zona back-arc thrust dengan menggunakan algoritma *agglomerative clustering* yang digunakan pada dataset gempa dari tahun 1970 sampai dengan tahun 2021. Teknik *clustering* yang digunakan adalah sliding windows temporal yang saling tumpang tindih.

Hasil Clustering untuk Sliding Windows Temporal

Teknik *agglomerative clustering* digunakan pada 9 (Sembilan) windows secara berurutan dengan jarak 10 tahun antar windows. Dimana dataset windows yang saling berdekatan akan saling tumpang tindih sebanyak 5 tahun. Pada penelitian ini akan digunakan 4 fitur utama yaitu garis lintang, garis bujur, kedalaman dan magnitude gempa. Setelah dilakukan pengamatan pada hasil dendrogram, didapatkan 3 (tiga) jumlah clustering yang cocok untuk semua windows yang ada. Untuk menjaga keterbacaan dan efisiensi dalam penyajian, dari total keseluruhan 9 windows yang ada, hanya ditampilkan 4 windows sebagai representasi pola clustering gempa bumi untuk seluruh periode pengamatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.

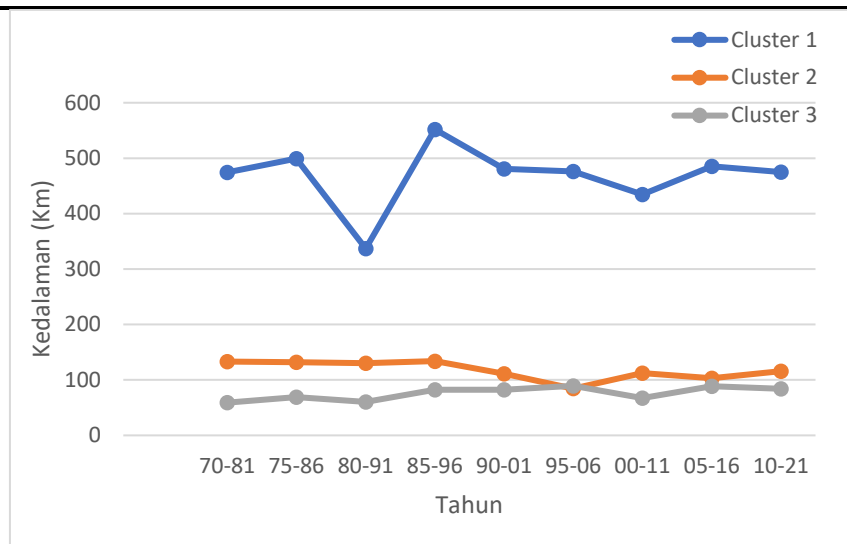


Gambar 1 Sliding Windows untuk 4 representasi clustering Gempa dari tahun 1970 sampai dengan 2021

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa adanya pemisahan yang konsisten pada pola clustering untuk keseluruhan windows dari gempa tahun 1970-2021. Dalam hal ini, algoritma *agglomerative clustering* secara konsisten mengelompokkan kejadian gempa ke dalam tiga kelompok utama berdasarkan 4 variabel yang digunakan.

Karakteristik Kedalaman tiap Cluster.

Dari gambar 1 kita dapat melihat 3 pola cluster yang konsisten yang diwakili oleh 4 sliding windows. Hal ini menggambarkan profil kedalaman yang cenderung stabil untuk tiap cluster gempa yang ada. Gambar 2 memberikan informasi tentang nilai rata-rata kedalaman dari masing-masing cluster gempa untuk 9 (Sembilan) windows yang ada.



Gambar 2 Nilai Rata-rata kedalaman gempa

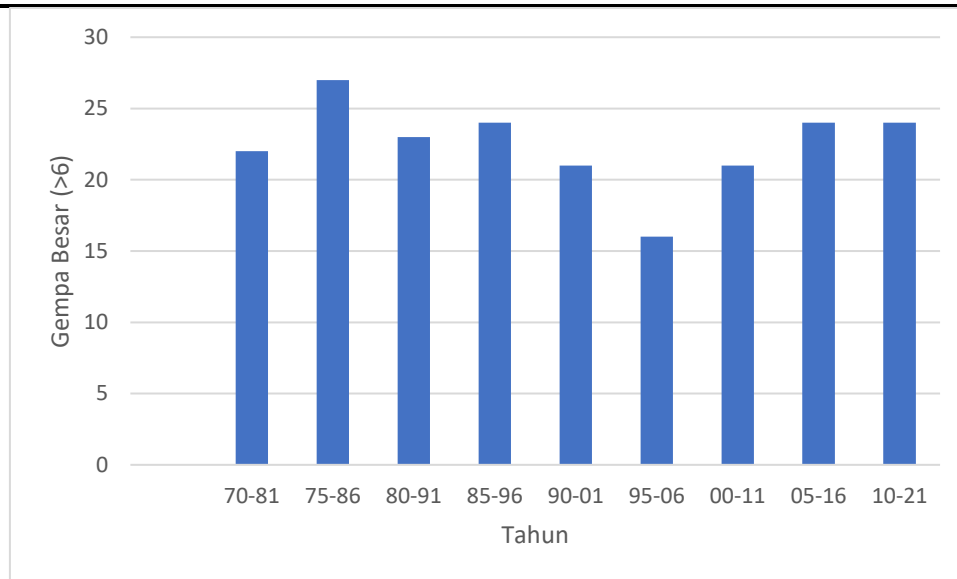
Dari gambar 2 dapat dilihat bahwa untuk keseluruhan windows, Cluster 1 merepresentasikan kejadian gempa dengan kedalaman yang besar (*deep earthquake*). Dimana rentang kedalaman berada pada kisaran 337 km hingga 552 km, tingkat kedalaman ini sangat kontras dengan 2 cluster lainnya. Meskipun terdapat fluktuasi, karakteristik dari gempa dalam tetap stabil sepanjang periode pengamatan.

Sementara itu cluster 2 pada semua sliding windows, terlihat merepresentasikan kejadian gempa dengan kedalaman menengah (*intermediate depth earthquakes*). Kedalaman rata-rata untuk semua windows adalah pada kisaran 84 km hingga 134 km. Dari grafik 4.2 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan rata-rata kedalaman gempa khususnya pada windows dengan rentang waktu tahun 1990-2001. Hal ini mengindikasikan adanya perubahan posisi kejadian gempa untuk tingkat kedalaman menengah.

Berbeda halnya dengan cluster 1 dan cluster 2, pada cluster ke-3 memberikan gambaran untuk kejadian gempa dangkal dengan nilai rata-rata kedalaman dibawah 90 km. dari gambar 2 juga dapat dilihat bahwa untuk cluster 3 tidak menunjukkan perubahan posisi kejadian gempa yang cukup berarti. Dengan kata lain distribusi kedalaman gempa pada tingkat kedalaman yang stabil.

Analisis Kejadian Gempa Dengan magnitudo Besar

Disamping analisis terhadap kedalaman gempa dari masing-masing cluster, pada penelitian ini juga akan dilakukan kajian terhadap kejadian gempa dengan magnitude besar ($M > 6$) untuk melihat tingkat aktivitas gempa pada tiap sliding windows yang ada. Gambar 3 menunjukkan jumlah kejadian gempa besar (> 6) untuk 9 sliding windows yang ada.



Gambar 3 Jumlah gempa Besar (>6) dari tahun 1970 hingga 2021

Dari gambar dapat dilihat bahwa jumlah kejadian gempa besar untuk 9 windows fluktuatif untuk seluruh pengamatan. Namun, rentang tahun 1975 hingga 1986 menempati posisi yang paling tinggi dari semua windows. Hal ini mengindikasikan bahwa intensitas gempa tidak seragam untuk semua cluster yang ada. Selain itu tingkat fluktuasi gempa pada keseluruhan windows tidak memberikan perubahan yang signifikan pada pola clusterin yang ada. Fenomena ini memberikan informasi bahwa pola clustering cenderung dipengaruhi oleh tingkat kedalaman gempa ketimbang intensitas jumlah gempa besar yang terjadi.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil melakukan clustering kejadian gempa di Zona Busur Belakang Utara Lombok–Flores Menggunakan *Agglomerative Clustering*. Data aktivitas gempa didapatkan dari USGS pada rentang tahun 1970 sampai dengan tahun 2021. Dimana variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah garis latitude, garis longitude, kedalaman gempa dan nilai magnitude.

Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa terdapat 3 cluster utama yang merepresentasikan secara jelas terhadap tingkat kedalaman dari masing-masing cluster gempa. Pemisahan cluster ini terlihat stabil untuk keseluruhan sliding windows yang ada. Selain itu, analisis terhadap intensitas gempa besar yang terjadi menunjukkan bahwa adanya fluktuasi pada 9 windows. Akan tetapi, fluktuasi dari intensitas tersebut tidak memberikan pengaruh terhadap pola clustering gempa yang ada.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi *agglomerative clustering* dan pendekatan *sliding window* efektif digunakan untuk mengidentifikasi pola pengelompokan gempa bumi berbasis kedalaman serta menangkap dinamika temporalnya secara deskriptif. Pendekatan ini dapat menjadi dasar untuk analisis lanjutan yang melibatkan metode clustering lainnya atau integrasi dengan model prediktif, khususnya dalam kajian berbasis data dan machine learning pada wilayah seismik kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, A. (2023). Clustering earthquake event points in the Southeast Asia region using agglomerative hierarchical clustering. *Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi*, 12(3), 900–914. <https://doi.org/10.32520/stmsi.v12i3.3150>
- Bittencourt, J.C.N., Costa, D.G., Portugal, P. & Peixoto, M.L.M. (2025). On the spatiotemporal knowledge-driven vulnerability assessment of urban areas: A clustering-based approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 127, 105681. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105681>
- Dwi Mauluda, A., Kusumadewi Kuncoro, A. & Aningsih, S. (2025). Analisis pengelompokan gempa bumi di Sumatra Indonesia menggunakan metode K-Means, DBSCAN, Agglomerative Clustering, dan Mean Shift. *Journal Online of Physics*, 10(3), 75–86. <https://doi.org/10.22437/jop.v10i3.44090>
- Felix, R.P., Hubbard, J.A., Bradley, K.E., Lythgoe, K.H., Li, L. & Switzer, A.D. (2022). Tsunami hazard in Lombok and Bali, Indonesia, due to the Flores back-arc thrust. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), pp.1665–1682. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1665-2022>
- Handayani, W., Pratama, I. & Wibowo, N.B. (2025). Subduction and local fault earthquake analysis using ST-DBSCAN clustering algorithm in the Special Region of Yogyakarta (DIY). *Kaunia: Integration and Interconnection Islam and Science Journal*, 21(1), pp.27–39. <https://doi.org/10.14421/kaunia.5347>
- Putri, N.A., Utami, T.W. & Wasono, R. (2023). Spatial Temporal Density-Based Spatial Clustering Applications With Noise (ST-DBSCAN) untuk pengelompokan titik kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau pada tahun 2021. *Prosiding Seminar Nasional Universitas Muhammadiyah Semarang (UNIMUS)*, 6, pp.436–445, 18 Oktober 2023.
- Rahim, I., Yunus, A.R. & Hidayah, S. (2023). Seismic hazard analysis and zoning using hybrid machine learning approaches: Case study in Indonesia. *Journal of Artificial Intelligence, Electrical and Computer Engineering (JAIEA)*, 4(3), pp.265–275. <https://doi.org/10.59934/jaiea.v4i3.1072>
- Rahman, R.R.A. & Wijayanto, A.W. (2021). Pengelompokan data gempa bumi menggunakan algoritma DBSCAN. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 22(1), pp.31–38. <https://doi.org/10.31172/jmg.v22i1.738>
- Selvina, Y. (2025). Pemetaan dan klasifikasi wilayah rawan gempa di Indonesia dengan metode K-Means dan LightGBM. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3S1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3S1.8152>
- Seydoux, L., Balestriero, R., Poli, P., de Hoop, M., Campillo, M. & Baraniuk, R. (2020). Clustering earthquake signals and background noises in continuous seismic data with unsupervised deep learning. *Nature Communications*, 11, 3972. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17841-x>
- Supendi, P., Widiyantoro, S., Rawlinson, N., Yatimantoro, T., Muhari, A., Hanifa, N.R., Gunawan, E., Ash Shiddiqi, H., Imran, I., Anugrah, S.D., Daryono, D., Prayitno, B.S., Adi, S.P., Karnawati, D., Faizal, L. & 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(1), pp.1315–1328. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05696-y>
- Syaputra, E.W., Refrizon, R. & Zakariya, H. (2023). Identifikasi Sesar Segmen Ketahun Berdasarkan Metode First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD) Data Anomali Gaya Berat GGMplus. *Jurnal Fisika Unand*, 12(4), pp.598–607. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.4.598-607.2023>
- United States Geological Survey (USGS) (2024). Earthquake Catalog. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (Accessed: 24 May 2025)
- Vijay, R.K. & Nanda, S.J. (2023). Earthquake pattern analysis using subsequence time series clustering. *Pattern Analysis and Applications*, 26(1), 19–37. <https://doi.org/10.1007/s10044-022-01092-1>
- Vijay, R.K., Nanda, S.J. & Sharma, A. (2025). A review on clustering algorithms for spatiotemporal seismicity analysis. *Artificial Intelligence Review*, 58(8), pp.1–61. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11229-3>
- Widiyantoro, S., Supendi, P., Rawlinson, N., Daryono, M.R. & Rosalia, S. (2024). A note on the seismicity of Sumatra, western Sunda Arc, Indonesia, in relation to the potential for back-arc thrusting. *Scientific Reports*, 14, 13115. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64076-7>