



Klasifikasi Kedalaman Kejadian Gempa Menggunakan Algoritma K-Means Clustering: Studi Kasus Kejadian Gempa Di Sulawesi

Amirin Kusmiran^{1*}, Minarti¹, Muhammad Fawzy Ismullah Massinai², Ahmad Zarkasi³, A. Andira Maharani¹, Rita Desiani⁴

¹*Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar*

²*Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin*

³*Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman*

⁴*Program Studi Metalurgi, Fakultas Teknik Lingkungan dan Mineral, Universitas Teknologi Sumbawa*

Email: amirin.kusmiran@uin-alauddin.ac.id

*Corresponding Author

Abstrak

Sulawesi merupakan suatu wilayah yang mempunyai kondisi geologi yang kompleks, sehingga kerusakan yang diakibatkan oleh gempa dengan magnitudo besar di kedalaman tertentu sering terjadi. Selain magnitudo, hiposenter gempa bumi menjadi salah satu parameter penentu kerusakan. Kedua parameter tersebut diinvestigasi dengan menggunakan Algoritma Klaster K-Means *machine learning* dengan tujuan untuk melokalisasi pola magnitudo gempa bumi berdasarkan kedalaman. Lintang, bujur, magnitudo, dan kedalaman gempa dijadikan atribut masukan untuk mengklaster kejadian gempa bumi pada periode 1970-2022. Optimalisasi jumlah klaster yang dihasilkan dari Metode Elbow divalidasi dengan Metode Davies-Bouldin index (DBI) dengan hasil terdapat tiga klaster kedalaman kejadian gempa bumi. Klaster pertama berada pada kedalaman kurang dari kedalaman dengan 120 km (gempa dangkal), klaster kedua berada pada kedalaman diantara 120 km s.d. 350 km (gempa menengah), dan klaster ketiga berada pada kedalaman lebih dari 350 km (gempa dalam). Berdasarkan visualisasi klaster, gempa dengan magnitudo lebih besar sama dengan 6 SR sering terjadi di kedalaman dangkal. Ini menunjukkan bahwa beberapa provinsi di Sulawesi yang berada pada klaster pertama berpotensi terdampak bahaya gempa bumi, dan kemampuan algoritma klaster K-Means *machine learning* dapat mendeteksi pola kedalaman kejadian gempabumi.

Kata kunci: Algoritma K-Means Clustering, Gempa Bumi, Metode Elbow, Davies-Bouldin Index.

Abstract

Sulawesi is a region that has complex geologic conditions, so disasters caused by the high magnitude of the earthquake occur at any depth. The depth and magnitude of the earthquake causing the disasters had investigated by K-Means Clustering of the machine learning technique. Longitude, latitude, magnitude, and depth attributes used to klaster the earthquake events in the 1970-2022 periods. The klaster number optimized by the Elbow method had validated by the Davies-Bouldin index (DBI). Based on the results, the optimal number of klaster is three klaster, and its Davies-Bouldin index is 0.397. The depth of the first klaster is less than equal to 120 km (shallow earthquake), the second klaster is between 120 km and 350 km (intermediate earthquake), and the

third klaster is more than 350 km (deep earthquake). The klaster visualizations of the earthquakes revealed that shallow earthquakes with above 6 SR is frequently occurrence in shallow depth. These is revealed that some Sulawesi Province in the first klaster is vulnerable to earthquake hazard, and the K-Means clustering algorithm is successfully klasters earthquake depth.

Keywords: Earthquake, Elbow Method, Davies-Bouldin Index, Clustering K-Means Algorithm.

Info Artikel

Status artikel:

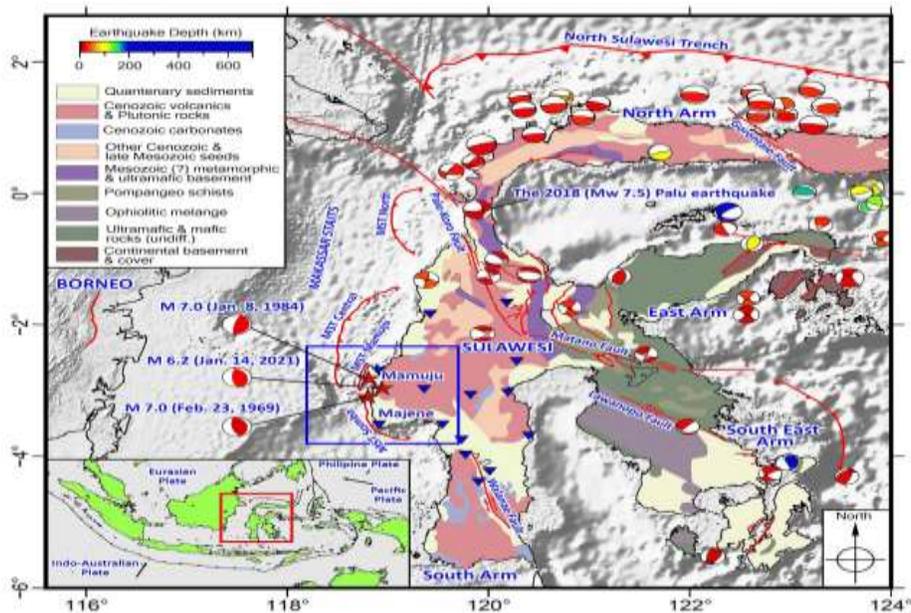
Diterima: 27 Juli 2022

Disetujui: 19 Desember 2022

Tersedia online: 30 Desember 2022

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu kejadian alam yang tidak dapat diprediksi waktu kejadian. Secara umum, kejadian gempa bumi diakibatkan oleh pelepasan energi yang terperangkap di kerak bumi akibat tektonik maupun vulkanik. Hal ini menyebabkan Sulawesi memiliki kondisi geologi yang kompleks, dan sering mengalami kejadian gempa yang bersifat destruktif, seperti kejadian yang terjadi di Palu Sulawesi Tengah pada tahun 2018, serta Majene dan Mamuju Sulawesi Barat pada tahun 2021. Kejadian gempa tersebut diakibatkan oleh adanya aktivitas sesar, seperti sesar Palu-Kuro yang mengakibatkan gempa besar tahun 2018 dan Makassar *Strait Trust segmen Somba-Mamuju-Central* yang memicu gempa swarm di Majene dan Mamuju tahun 2021 [1]–[3]. Selain sesar tersebut, kejadian gempa di Sulawesi disebabkan oleh aktivitas Sesar Palu-Kuro, Penunjaman Sulawesi Utara, Sesar Mantano, dan lain-lain seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Kejadian gempa di masa lalu dan sesar aktif [4].

Kejadian gempa bumi yang terukur di alat seismometer digunakan untuk menganalisis karakteristik gempa, pola kejadian gempa, aktivitas seismik [5], [6], dan prediksi kejadian gempa [7]. Aktivitas seismik atau seismotektonik dikaji dengan menggunakan analisis statistik yang berdasarkan pada pendekatan Gutenberg-Richter seperti pada persamaan 1.

$$\log N = a + bm \quad (1)$$

dengan N menyatakan jumlah kejadian gempa pada periode tertentu, a menyatakan tingkat seismitas, b menyatakan seismotektonik, dan m menyatakan magnitudo gempa. Akan tetapi, analisis statistik belum dapat mengklasifikasi jenis kedalaman dari kejadian gempa. Klasifikasi kedalaman gempa menjadi bagian terpenting untuk menganalisis pola kejadian gempa karena kedalaman gempa dapat menjadi parameter untuk mengetahui tingkat bahaya gempa. Sebelumnya telah dilakukan klasifikasi epicenter kejadian gempa di Provinsi Bengkulu dengan menggunakan Algoritma K-Means Clustering [8]. Oleh karena itu, Algoritma K-Means Clustering yang merupakan salah satu teknik *machine learning* digunakan pada penelitian ini untuk mengklasifikasikan kedalaman kejadian gempa. Optimalisasi kluster kedalaman kejadian gempa dilakukan dengan Metode Elbow dan divalidasi dengan Metode Davies-Bouldin. Selain itu, data kejadian gempa di Sulawesi digunakan pada penelitian ini dikarenakan kompleksitas kondisi geologi. Dengan demikian diharapkan dapat memberikan kedalaman kejadian gempa dari kedalaman dangkal, sedang, dan dalam.

2. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari katalog <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> dengan magnitudo ≥ 4.5 . Periode yang digunakan untuk mengkluster kedalaman kejadian gempa yakni kejadian gempa dari Januari 1970 sampai dengan Mei 2022. Data masukan yang digunakan untuk kluster kedalaman gempa yakni episenter, magnitudo, dan waktu kejadian gempa. Kluster tersebut dilakukan dengan menggunakan Algoritma K-Means Klustering, dan diimplementasikan ke dalam bahasa pemrograman Python. Tahapan-tahapan Algoritma K-Means Clustering, yakni:

1. Data gempa dibagi ke dalam kluster
2. Menentukan titik kejadian gempa yang terdekat dengan rata-rata (centroid) yang ditentukan dengan menggunakan jarak Euclidean. Jika terjadi perubahan kluster, maka perhitungan centroid baru dilakukan. Kluster centroid dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$C_{kj} = \frac{x_{1kj} + x_{2kj} + \dots + x_{akj}}{a}, j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

dengan C_{kj} menyatakan centroid dari kluster- k data kejadian gempa, dan a menyatakan jumlah kluster dari data kejadian gempa.

3. Tahapan 2 terus dilakukan sampai tidak terjadi perubahan kluster yang artinya tidak ada perubahan antar data dalam kluster.

Jarak Eulidean yang digunakan untuk menentukan jarak terdekat antar data kejadian gempa dengan dengan *centroid* merupakan jarak geometrik dalam dimensi ruang. Salah satu keunggulan dari metode ini yakni dapat membedakan pencilon data atau *outlier*, sehingga tidak mengakibatkan perubahan kluster jika terjadi transfer data dari suatu kluster. Persamaan yang digunakan dari jarak Eulidean, $d(x, y)$, yakni:

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad (3)$$

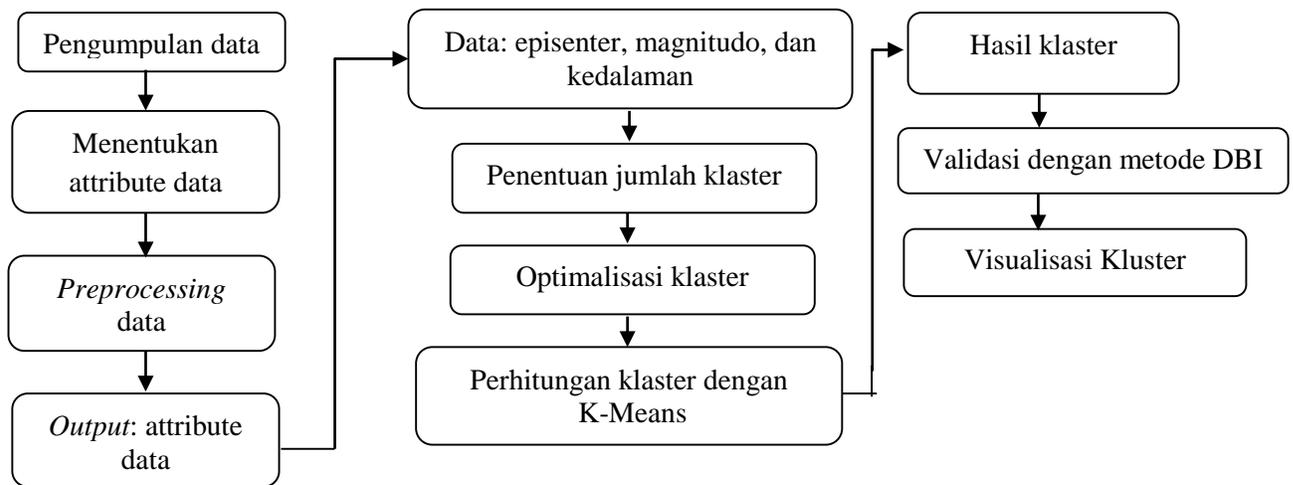
persamaan jarak Eulidean menyatakan jarak dapat menjadi besar jika selisih jarak antara x_n dengan y_n besar, dan sebaliknya. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa jika selisih data kecil maka data tersebut mempunyai karakteristik yang sama sehingga berada pada kluster yang sama. Selanjutnya, Metode Elbow yang digunakan untuk menentukan jumlah kluster kedalaman kejadian gempa merupakan salah satu metode yang dalam penentuan kluster dengan konsep membandingkan hasil perbandingan antara jumlah kluster yang akan membentuk model siku pada suatu kluster. Perbandingan tersebut diperoleh dengan cara menghitung *Sum Square Error* (SSE) dengan persamaan:

$$SSE = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i} |x_i - c_k|^2 \quad (4)$$

dengan K menyatakan kluster ke- K , x_i menyatakan jarak objek data, dan c_k menyatakan pusat kluster dari data. Selanjutnya validasi hasil kluster data kedalam gempa divalidasi dengan menggunakan Metode Davies-Bouldin Index (DBI) yang dihitung dengan persamaan [9]:

$$DBI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max_{j \neq i} \frac{\sigma_i + \sigma_j}{\tau_{i,j}} \quad (5)$$

dengan $\sigma_i + \sigma_j$ menyatakan jarak antar kluster i, j , $\tau_{i,j}$. Alur kerja penelitian di atas diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

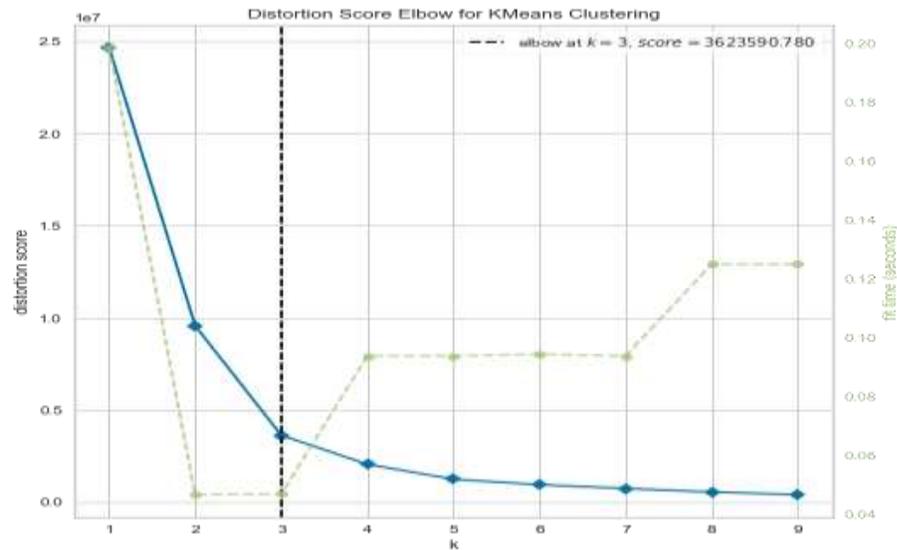
Wilayah Sulawesi yang terbagi ke dalam enam provinsi, yakni Provinsi Sulawesi Utara, Gorontalo, Sulawesi Tengah, Sulawesi Barat, Sulawesi Selatan, dan Sulawesi Tenggara merupakan wilayah dengan geologi kompleks. Oleh karena itu, data kejadian gempa dapat merepresentasikan kedalaman terjadinya gempa sebagaimana yang diungkapkan oleh Fowler [10]. Pertanyaan ini dapat dianalisis dengan menggunakan pendekatan Algoritma K-Means Clustering yang diterapkan pada data kejadian gempa. Algoritma K-Means Clustering yang digunakan untuk mengklasifikasikan kedalaman kejadian gempa merupakan salah satu teknik machine learning. Dengan demikian, penelitian ini menggunakan algoritma ini untuk mengklasifikasi kedalaman kejadian gempa yang terjadi di Wilayah Sulawesi selama periode 1970-2022 dengan data statistik pada tabel 1.

Tabel 1. Statistik kejadian gempa di Sulawesi periode 1970-2022.

	Lintang	Bujur	Kedalaman (km)	Magnitudo
Total data	3198	3198	3198	3198
Rata-rata	-0.259889	122.685572	85.1884631	4.929850
Std	1.429393	1.654505.	87.830036	0.420807
Min	-5.868000	118.566000	0.900000	4.500000
Maks	-2.095000	125.327000	646.800000	7.900000
25%	-0.686750	121.646250	33.000000	4.600000
50%	-0.048650	123.911750	51.000000	4.800000
75%	0.654750	125.327000	115.000000	5.100000

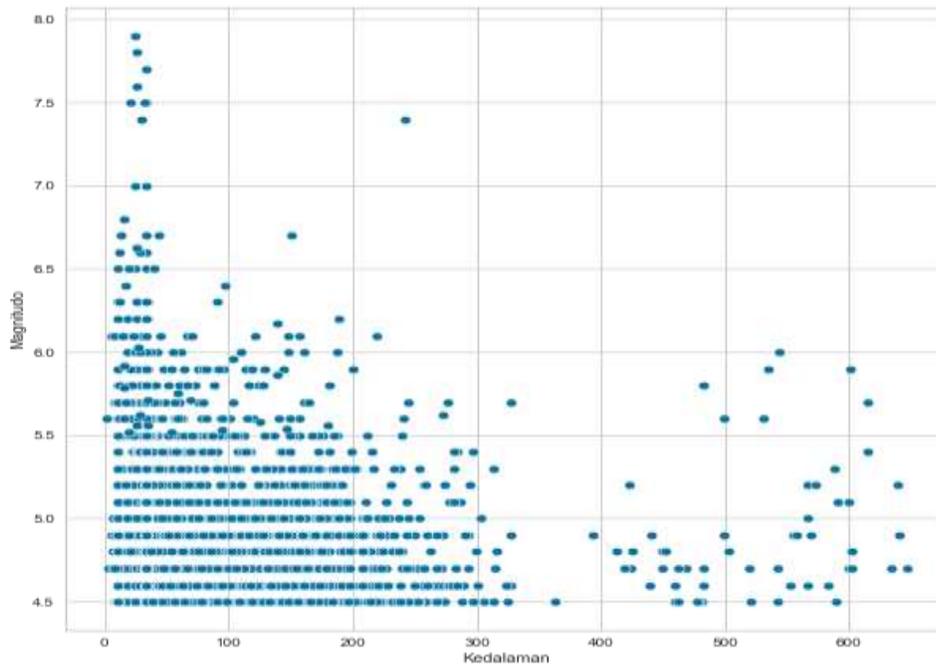
Tabel 1 memberikan informasi statistik dari data kejadian gempa, seperti nilai minimum dan maksimum, rata-rata, kuartil, dan lain-lain. Berdasarkan tabel tersebut, jumlah data yang digunakan sebanyak 3189 data dengan kedalaman minimum dan maksimum dari kejadian gempa secara berurutan 0.9 km dan 646.8 km. Untuk melihat relasi antara magnitudo dengan kedalaman dalam klaster, data kejadian gempa diolah dengan menggunakan Algoritma K-Means Clustering.

Pada penelitian ini, ada sembilan klaster (tabel 2) yang diujikan untuk menentukan kedalaman kejadian gempa. Untuk itu, Metode Elbow digunakan untuk mengidentifikasi klaster dari data kejadian gempa sebagaimana diperlihatkan pada gambar 3 dengan waktu komputasi 0.20 detik. Berdasarkan metode ini, jumlah klaster optimal dari data kejadian gempa selama periode 1970 s.d 2022 sebanyak 3 klaster. Hal ini ditentukan berdasarkan pertemuan antara garis vertikal dengan garis elbow. Visualisasi klaster kedalaman gempa dengan magnitudo memberikan informasi bahaya gempa di Sulawesi sebagaimana terlihat pada gambar 5.



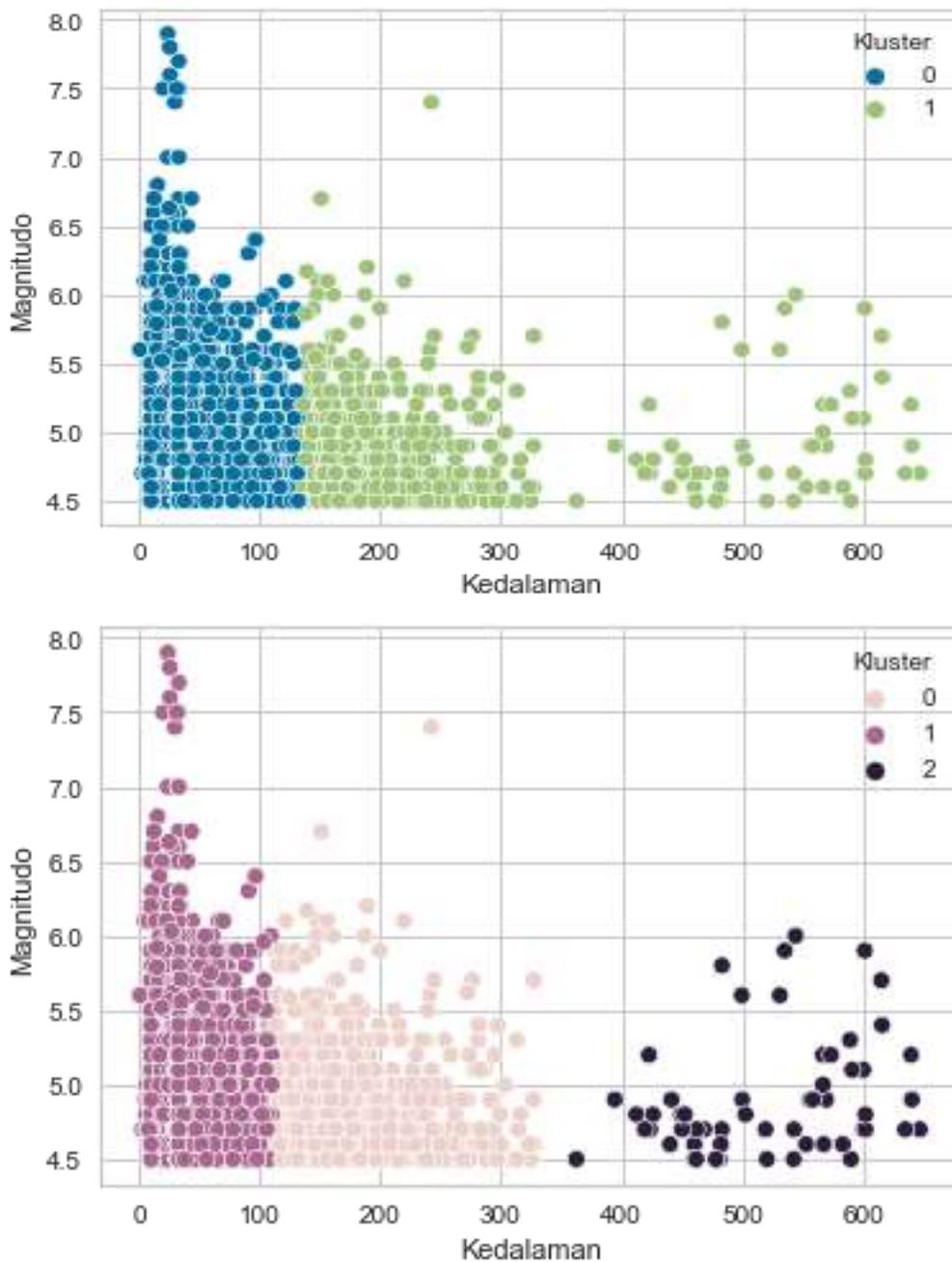
Gambar 3. Optimalisasi kluster dengan Metode Elbow.

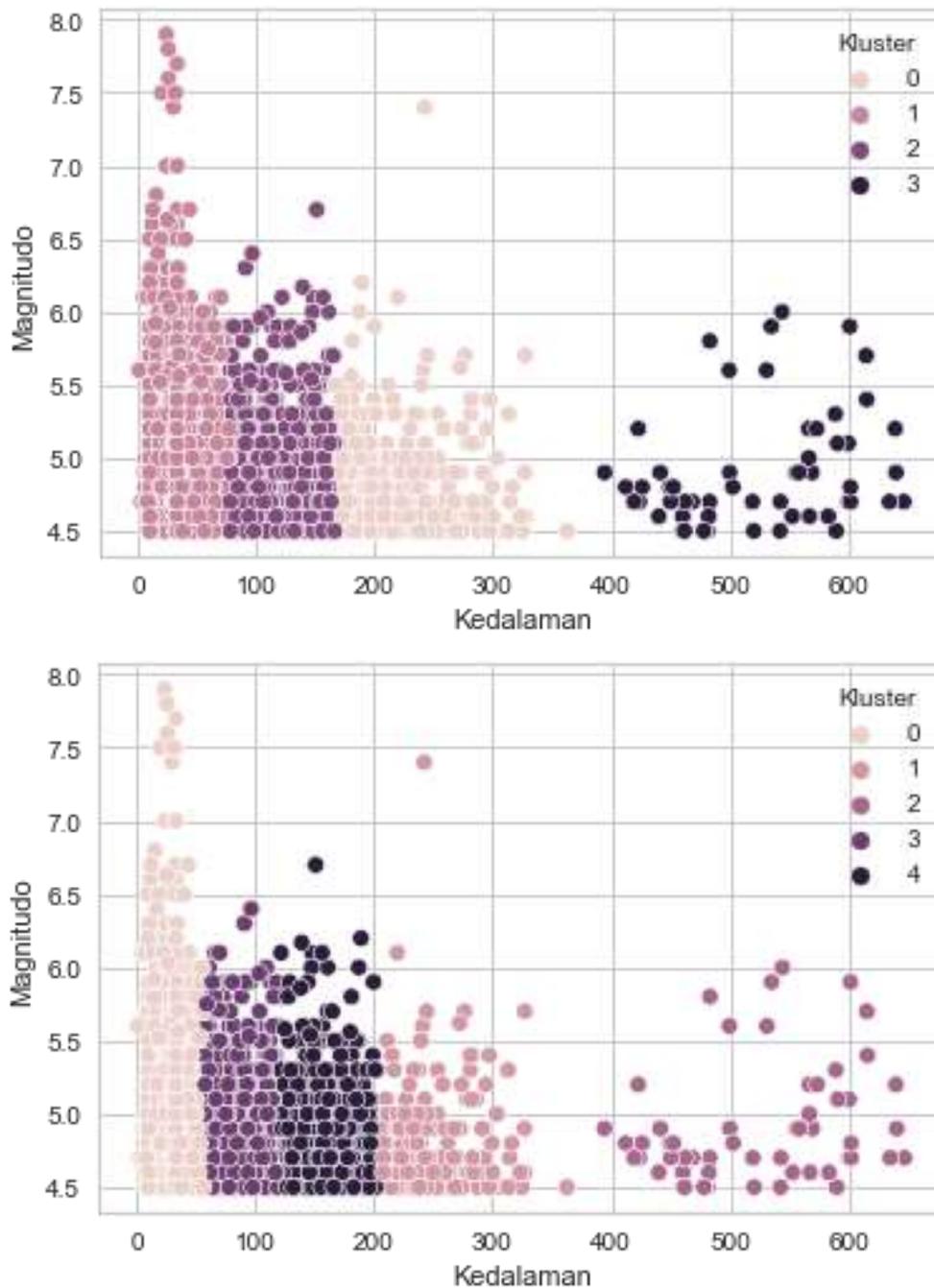
Gambar 4 memperlihatkan kejadian gempa di Wilayah Sulawesi pada umumnya terjadi pada kedalaman $\leq 100 \text{ km}$. Gempa dengan kedalaman $\leq 70 \text{ km}$ dengan skala ≥ 6.0 bersifat destruktif sebagaimana gempa yang terjadi di Palu Provinsi Sulawesi Tengah, di Majene dan Mamuju di Sulawesi Barat [11]. Fowler menyatakan kedalaman ini termasuk ke dalam kluster gempa dangkal, sedangkan kedalaman $\geq 70 \text{ km}$ dan $\geq 300 \text{ km}$ secara berurutan ke dalam kluster kedalaman sedang dan dalam [10].



Gambar 4. Visualisasi magnitudo gempa dengan kedalaman.

Gambar 5c menunjukkan hasil kedalaman hiposentrum mendekati kedalaman, dimana hasil klasifikasi optimal berdasarkan metode K-Means sebanyak 3 kluster kedalaman, yakni kluster pertama berada pada kedalaman ≤ 120 km (*shallow earthquake*), kluster kedua berada pada kedalaman > 120 km s.d ≤ 350 km (*intermediate earthquake*), dan kedalaman > 350 km (*deep earthquake*) [10].





Gambar 5. Klaster kedalaman kejadian gempa periode 1970 sampai 2022 a) 2 klaster, b) 3 klaster, c) 4 klaster, dan d) 5 klaster.

Secara umum, gambar 5 menjelaskan bahwa kejadian di Wilayah Sulawesi dengan magnitudo ≥ 6.0 terjadi pada kedalaman $\leq 80 \text{ km}$ (gambar 5c dan 5d) dimana kedalaman termasuk ke dalam kategori *shallow earthquake* yang bersifat *destructive*. Data kejadian

gempa dalam kluster yang sama menyatakan bahwa data tersebut memiliki jarak paling optimum terhadap titik pusat (*centroid*) [9], [12]–[14]. Validasi masing-masing kluster pada gambar 5 atau kluster 6, 7, 8, 9, dan 10 menggunakan Metode Davies-Bouldin Index [9] sebagaimana terlihat pada tabel 2. Dari jumlah kluster pada tabel 2, kluster terbaik yakni sebanyak 3 kluster. Hal ini dikarenakan Metode Davies-Bouldin Index terkecil dibandingkan dengan kluster yang lain. Semakin kecil DBI menunjukkan jumlah kluster terbaik [15].

Tabel 2. Validasi kluster dengan Metode Davies-Bouldin Index.

No.	Kluster	Davies-Bouldin Index (DBI)
1	2	0.5509
2	3	0.3970
3	4	0.4881
4	5	0.4721
5	6	0.4846
6	7	0.5011
7	8	0.4984
8	9	0.4742
9	10	0.4806

4. SIMPULAN

Hasil dan diskusi penelitian menunjukkan bahwa Algoritma K-Means Clustering dapat digunakan untuk mengklasifikasikan kedalaman kejadian gempa di Sulawesi dengan menggunakan data gempa periode 1970-2022. Berdasarkan hasil optimasi dengan Metode Elbow, Jumlah kluster terbaik untuk data tersebut sebanyak 3 kluster. Hasil ini diperkuat dengan validasi dengan Metode Davies-Bouldin Index (DBI) dengan nilai 0.397, dibandingkan dengan jumlah kluster lainnya. Tiga kluster tersebut berada pada kedalaman yakni kluster pertama berada pada kedalaman ≤ 120 km (*shallow earthquake*), kluster kedua berada pada kedalaman > 120 km s.d ≤ 350 km (*intermediate earthquake*), dan kluster ketiga berada pada kedalaman > 350 km (*deep earthquake*). Secara umum, visualisasi kluster kedalaman terhadap magnitudo menunjukkan bahwa kejadian gempa dengan magnitudo ≥ 6 SR dominan terjadi pada kluster 1 dibandingkan kluster 2 maupun kluster 3. Hasil ini mengidentifikasi bahwa Wilayah Sulawesi rawan terjadi gempa bersifat destruktif, khususnya provinsi-provinsi yang terdapat pada kluster 1. Wilayah-wilayah potensial dapat terpetakan dengan menggunakan Analisis Spatial-Clustering.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. Setiyono *et al.*, *Katalog gempabumi signifikan dan merusak 1821 - 2018*, vol. 1. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2019.
- [2] S. Supartoyo, C. Sulaiman, and D. Junaedi, “Kelas tektonik sesar Palu Koro, Sulawesi Tengah,” *J. Lingkungan. Dan Bencana Geol.*, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Aug. 2014, doi: 10.34126/jlbg.v5i2.68.

- [3] T. Yanuarto, “Pembelajaran Gempa Sulbar, Fenonema dan Dampak Kerusakan Bangunan,” 2021. <https://bnpb.go.id/berita/pembelajaran-gempa-sulbar-fenonema-dan-dampak-kerusakan-bangunan> (accessed Apr. 06, 2022).
- [4] P. Supendi *et al.*, “Foreshock–mainshock–aftershock sequence analysis of the 14 January 2021 (Mw 6.2) Mamuju–Majene (West Sulawesi, Indonesia) earthquake,” *Earth Planets Space*, vol. 73, no. 1, p. 106, May 2021, doi: 10.1186/s40623-021-01436-x.
- [5] P. M. Shearer, “Space-time clustering of seismicity in California and the distance dependence of earthquake triggering,” *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 117, no. B10, 2012, doi: 10.1029/2012JB009471.
- [6] A. Hoque, J. Raj, A. Saha, and P. Bhattacharya, “Earthquake Magnitude Prediction Using Machine Learning Technique,” 2020, pp. 37–53. doi: 10.1007/978-3-030-66763-4_4.
- [7] G. C. Beroza, M. Segou, and S. Mostafa Mousavi, “Machine learning and earthquake forecasting—next steps,” *Nat. Commun.*, vol. 12, no. 1, Art. no. 1, Aug. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-24952-6.
- [8] P. Novinanti, D. Setyorini, and U. Rafflesia, “K-Means klaster analysis in earthquake epicenter clustering,” *Int. J. Adv. Intell. Inform.*, vol. 3, p. 81, Jul. 2017, doi: 10.26555/ijain.v3i2.100.
- [9] D. L. Davies and D. W. Bouldin, “A Klaster Separation Measure,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-1, no. 2, pp. 224–227, Apr. 1979, doi: 10.1109/TPAMI.1979.4766909.
- [10] C. M. R. Fowler, *The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics*, 2nd edition. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2004.
- [11] I. H. Rifa, H. Pratiwi, and R. Respatiwan, “Clustering of Earthquake Risk in Indonesia using K-Medoids and K-Means Algorithms,” *MEDIA Stat.*, vol. 13, no. 2, pp. 194–205, Dec. 2020, doi: 10.14710/medstat.13.2.194-205.
- [12] R. Hidayati, A. Zubair, A. H. Pratama, and L. Indana, “Analisis Silhouette Coefficient pada 6 Perhitungan Jarak K-Means Clustering,” *Techno.Com*, vol. 20, no. 2, Art. no. 2, May 2021, doi: 10.33633/tc.v20i2.4556.
- [13] P. J. Rousseeuw, “Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of klaster analysis,” *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 20, pp. 53–65, Nov. 1987, doi: 10.1016/0377-0427(87)90125-7.
- [14] D. Sculley, “Web-scale k-means clustering,” in *Proceedings of the 19th international conference on World wide web - WWW '10*, Raleigh, North Carolina, USA, 2010, p. 1177. doi: 10.1145/1772690.1772862.
- [15] A. Badruttamam, S. Sudarno, and D. A. I. Maruddani, “Penerapan Analisis Klaster K-Modes dengan Validasi Davies Bouldin Index dalam menentukan Karakteristik Kanal Youtube di Indonesia (Studi Kasus: 250 Kanal YouTube Indonesia Teratas Menurut Socialblade),” *J. Gaussian*, vol. 9, no. 3, Art. no. 3, Aug. 2020, doi: 10.14710/j.gauss.v9i3.2890.