

Pengelompokan Resiko Potensial Gempa Bumi Menggunakan Pengaplikasian *Density-Based Spatial Clustering* dengan Noise dan *K-Medoids*

Ahmad Husain¹⁾

¹⁾ Program Studi Sains Data, Institusi Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie, Parepare,
husainahmad@ith.ac.id

Abstract

As a country located in the Pacific Ring of Fire (Ring of Fire), Indonesia cannot be separated from the threat of earthquakes. The National Disaster Management Agency (BNPB) estimates that in 2021 there will be an average of 500 earthquakes in Indonesia every month. Especially Sulawesi-Maluku Region is one of the most earthquake-prone areas. This area is the meeting place of three main plates that have a very complex and diverse geological impact. The three major plates are the Pacific plate, which is moving westward, the Eurasian plate, which is moving south-southeast, and the smaller plate is the Philippine plate. The occurrence of an earthquake can be influenced by several factors, namely the distance of the earthquake to the fault, subduction, and the nearest volcano. In this paper, we implement DBSCAN and K-Medoids method for clustering earthquake events in the Sulawesi-Maluku area which involve geological covariates (Distance to the nearest subduction zone, fault zone and volcano zone) and internal data of earthquake events (The depth of the earthquake and the magnitude of the earthquake). The clustering performance using the DBSCAN is better than the K-Medoids method, it is based on a higher Silhouette coefficient value of 0.513 in DBSCAN. Learning from the experience of the earthquake and tsunami in Palu and other areas that have resulted in the victims of hundreds of thousands of lives and significant property losses, by using the cluster approach, it is hoped that it will help mitigation efforts both at the government and community levels are urgently needed to reduce the risk due to the earthquake and tsunami disaster..

Keywords: Clusters; DBSCAN; Earthquakes; K-Medoids; Silhouette.

Abstrak

Sebagai negara yang terletak di Cincin Api Pasifik (*Ring of Fire*), Indonesia tidak dapat dipisahkan dari ancaman gempa bumi. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) memperkirakan bahwa pada tahun 2021 akan terjadi rata-rata 500 gempa bumi di Indonesia setiap bulan. Khususnya Wilayah Sulawesi-Maluku merupakan salah satu wilayah yang paling rawan gempa bumi. Wilayah ini merupakan tempat bertemunya tiga lempeng utama yang memiliki dampak geologis yang sangat kompleks dan beragam. Tiga lempeng utama tersebut adalah lempeng Pasifik, yang bergerak ke arah barat, lempeng Eurasia, yang bergerak ke arah selatan-tenggara, dan lempeng yang lebih kecil yaitu lempeng Filipina. Terjadinya gempa bumi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu jarak gempa bumi ke patahan, subduksi, dan gunung berapi terdekat. Dalam makalah ini, kami mengimplementasikan metode DBSCAN dan K-Medoids untuk mengelompokkan kejadian gempa bumi di wilayah Sulawesi-Maluku yang melibatkan kovariat geologi (Jarak ke zona subduksi terdekat, zona patahan dan zona gunung berapi) dan data internal kejadian gempa bumi (Kedalaman gempa bumi dan magnitudo gempa bumi). Performa pengelompokan menggunakan DBSCAN lebih baik daripada metode K-Medoids, hal ini didasarkan pada nilai koefisien *Silhouette* yang lebih tinggi, yaitu 0,513, pada DBSCAN. Belajar dari pengalaman gempa bumi dan tsunami di Palu dan daerah lain yang telah mengakibatkan ratusan ribu korban jiwa dan kerugian harta benda yang signifikan, penggunaan pendekatan pengelompokan ini diharapkan dapat membantu upaya mitigasi, baik di tingkat pemerintah maupun masyarakat, yang sangat dibutuhkan untuk mengurangi risiko akibat bencana gempa bumi dan tsunami.

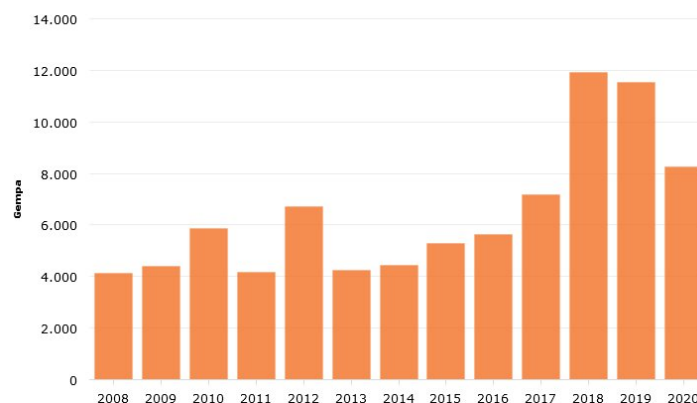
Kata kunci: DBSCAN; Gempa Bumi; K-Medoids; Klustering; *Silhouette*.

PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang tidak dapat dihindari atau tidak dapat dicegah. Terjadinya peristiwa gempa bumi sulit diprediksi secara akurat. Di Indonesia, gempa bumi sebagai salah satu bencana terbesar karena risiko yang dapat ditimbulkan. Seluruh wilayah Indonesia terletak di Cincin Api Pasifik, yang merupakan wilayah yang paling banyak mengalami gempa bumi. Indonesia selalu dihadapkan pada ancaman guncangan karena pergerakan lempeng teatakonik.

Guncangan ini dapat terjadi setidaknya hampir setiap hari dengan kekuatan sekitar magnitudo lima atau enam (Nasional, 2017). Sulawesi-Maluku merupakan wilayah di Indonesia dengan tingkat risiko gempa bumi tertinggi. Hal ini disebabkan oleh tatanan tektonik yang kompleks dan letak Sulawesi-Maluku yang sangat dekat dengan zona pertemuan antar lempeng. Selain dikelilingi oleh lempeng tektonik, Sulawesi juga merupakan jalur Cincin Api Pasifik, yang merupakan jalur serangkaian gunung berapi aktif di dunia. Indonesia memiliki sekitar 240 gunung berapi, yang hampir 70 masih aktif dan sebagian besar berada di wilayah Timur (Sabua, 2011). Berdasarkan data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), kejadian gempa bumi dari tahun 2008 hingga 2020 terus meningkat dari tahun ke tahun.

Puncaknya terjadi pada tahun 2018. Indonesia mengalami 11.920 gempa bumi. Namun, dalam dua tahun terakhir, kejadian gempa bumi menunjukkan penurunan dari 11.515 gempa bumi pada tahun 2019 menjadi 8.264 gempa bumi pada tahun 2020, dengan frekuensi menurun sebesar 28,2%. Bahasa Indonesia: Pada tahun 2021 dari bulan Januari sampai dengan Juni 2021 telah terjadi 4.701 kali gempa bumi dalam 5 periode 5 tahun terakhir telah terjadi 4 kali gempa bumi dengan skala di atas 7,0 SR dan menimbulkan kerusakan yang sangat besar, 2 diantaranya terjadi di wilayah Sulawesi dan Maluku yaitu gempa bumi Palu tahun 2018 dengan magnitudo 7,5 yang kedua adalah gempa bumi Halmahera bulan Juli 2019 dengan magnitudo 7,2 (Nasional, 2017). Gempa bumi Palu terjadi pada tanggal 28 September 2018. Gempa bumi tersebut berkekuatan 7,4 SR dan mengakibatkan tsunami serta likuifaksi di sekitar kota Palu dan Donggala. Berdasarkan data BNPB, terdapat 4.320 korban jiwa, banyak bangunan dan fasilitas yang rusak, serta 934 desa terdampak gempa bumi dan tsunami.



Sumber: BMKG, 2025 (data diolah).

Gambar 1. Jumlah Kejadian Gempa Bumi di Indonesia 2008-2020

Terjadinya gempa bumi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu jarak gempa bumi terhadap patahan, subduksi, dan gunung api terdekat. Hasil analisis data eksplorasi menggunakan uji Chi-kuadrat dan plot fungsi-K menunjukkan bahwa sebaran gempa bumi cenderung membentuk kluster dan tidak homogen yang dimungkinkan karena adanya proses alami gempa bumi utama dan gempa susulan serta pengaruhnya (Choiruddin et al., 2024). Besarnya kekuatan (magnitudo) gempa bumi yang terjadi berbanding terbalik dengan tingkat kerapuhan batuan suatu daerah. Daerah dengan aktivitas kegempaan tinggi akan berkorelasi dengan kerapuhan batuan yang tinggi, sedangkan pada wilayah ini kekuatan gempa (magnitudo) yang akan dilepaskan relatif kecil, begitu pula sebaliknya.

Gempa bumi yang terjadi di Pulau Sulawesi dari tahun 2000-2014 berdasarkan kedalaman didominasi oleh gempa bumi dangkal dengan kedalaman kurang dari 70 km dengan jumlah gempa bumi sebanyak 1939 kali. Gempa bumi dengan kedalaman 750 km dan termasuk dalam Kategori gempa bumi dalam terletak pada koordinat -6.82° Lintang Selatan dan 125.61° Bujur Timur. Gempa bumi yang terjadi di Pulau Sulawesi dari tahun 2000-2014 berdasarkan kekuatan didominasi oleh gempa bumi kecil dengan skala 4.0-4.9 SR, jumlah gempa bumi adalah 2728 kali dengan magnitudo

7.6 SR dan termasuk gempa bumi besar Sebagian besar gempa bumi yang terjadi di Sulawesi terjadi di bagian utara Laut Sulawesi dan Laut Maluku (Saputra & Arsyad, 2014). Berdasarkan terjadinya fenomena alam ini penting untuk mengambil tindakan pencegahan untuk pengurangan risiko. Salah satu tindakan mitigasi untuk mengurangi risiko bencana adalah dengan mengelompokkan daerah potensial gempa bumi berdasarkan variabel yang dijelaskan sebelumnya dalam bentuk titik vulkanik, jalur lempeng patahan (subduksi), dan patahan. Di sisi lain untuk Mengetahui metode cluster terbaik antara DBSCAN dan K-Medoids.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Gempa Bumi

Gempa bumi adalah guncangan dahsyat yang menjalar ke permukaan bumi yang disebabkan oleh gangguan pada litosfer (kerak bumi). Gangguan ini terjadi karena di dalam kerak bumi dengan ketebalan 100 km terjadi akumulasi energi karena adanya pergeseran kerak bumi itu sendiri. Saat itulah terjadi gempa bumi, yang energinya memancar ke berbagai arah. Gempa bumi biasanya terjadi di batas lempeng tektonik tersebut. Gempa bumi dengan pusat yang dalam kemungkinan besar terjadi karena material litosfer yang terhimpit ke dalam mengalami transisi fase pada kedalaman lebih dari 600 km (Timor et al., 2016).

Kekuatan atau kelemahan gempa bumi dapat diketahui dengan melihat tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa tersebut. Kekuatan atau kelemahan gempa bumi dapat diukur menggunakan 3 jenis skala, yaitu Skala Richter, Skala Modified Mercalli Intensity (MMI), dan Skala Peak Ground Acceleration (PGA). Terdapat 3 macam ukuran gempa yang umum digunakan untuk menyatakan besarnya gempa, yaitu Magnitudo, Energi yang dilepaskan dan Intensitas.

Menurut penyebab terjadinya, gempa bumi dibagi menjadi 3 jenis, yaitu gempa bumi vulkanik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh letusan gunung berapi, gempa bumi tektonik adalah gempa bumi yang terjadi akibat pergeseran kerak bumi akibat pelepasan energi pada zona subduksi dan runtuh, atau gempa bumi runtuh adalah gempa bumi yang disebabkan oleh tanah longsor, gua yang runtuh.

Kemudian gempa bumi dapat dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan kedalamannya yang terdiri dari gempa bumi dalam, yaitu gempa bumi yang episentrumnya lebih dari 300 km di bawah permukaan bumi (di dalam kerak bumi). Gempa bumi dalam umumnya tidak terlalu berbahaya. Gempa bumi sedang adalah gempa bumi yang hiposentrumnya berada di tengah-tengah 60 km hingga 300 km di bawah permukaan bumi. Gempa bumi sedang umumnya menimbulkan kerusakan kecil, dan getarannya lebih terasa. Yang terakhir adalah gempa bumi dangkal, yaitu gempa bumi yang hiposentrumnya berada kurang dari 60 km dari permukaan bumi. Gempa bumi ini biasanya menyebabkan kerusakan besar. Parameter gempa bumi meliputi waktu (Origin Time - OT), pusat lokasi (Episentrum), kedalaman (Depth), dan kekuatan Gempa (Magnitudo).

B. DBSCAN Klustering

Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) (DBSCAN) adalah kelompok titik-titik dengan lingkungan padat ke dalam beberapa kluster. Sebuah titik akan dianggap ramai jika memiliki banyak titik tetangga lain di dekatnya. DBSCAN menemukan hotspot ini dan menempatkan mereka dan tetangga mereka dalam sebuah kluster. Konsep kepadatan menghasilkan tiga jenis status untuk setiap data, yaitu inti, batas, dan derau. Data inti adalah data yang jumlah datanya dalam radius ϵ lebih dari $\minPts$, data derau adalah data yang jumlah datanya dalam radius ϵ kurang dari $\minPts$, dan data batas adalah data di mana jumlah datanya dalam radius ϵ kurang dari $\minPts$ tetapi membuat data tetangganya menjadi data inti (Ashari & Othniel, 2019). Metode pengelompokan ini dapat menentukan kluster dari bentuk data yang tidak teratur dan dapat menangani derau secara efektif dan DBSCAN memiliki kelebihan, metode DBSCAN secara signifikan lebih efektif dalam

menemukan kluster dengan berbagai bentuk dan juga dapat menemukan kluster yang memiliki bentuk yang sama tidak pasti. Untuk kluster non-bola, kinerja algoritma DBSCAN lebih baik daripada algoritma lainnya. Hasil ini masuk akal karena DBSCAN dapat mengelompokkan titik-titik data ke dalam kluster dengan bentuk yang berubah-ubah, berdasarkan kepadatan, koneksi, dan jarak (Harianto, 2025).

Algoritma DBSCAN membutuhkan dua parameter penting, yaitu parameter radius (*Eps*) dan jumlah titik minimum untuk membentuk suatu grup (*minPts*). Algoritma DBSCAN adalah sebagai berikut:

1. Mendefinisikan parameter *minPts* dan *Eps*
2. Pilih *p* titik secara acak
3. Hitung jumlah *p* secara spesifik berdasarkan parameter radius (*Eps*). Jika jumlahnya mencukupi, data akan ditandai sebagai titik inti
4. Hitung jarak dari titik inti ke titik lain menggunakan jarak Euclidean. Berikut adalah rumus jarak Euclidean yang dibahas dalam persamaan:

$$d_{ip} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ji} - y_{jp})^2}, \dots\dots\dots (1)$$

dimana,

d_{ip} : Jarak euclidean titik *p* ke inti

x_{ij} : Frekuensi *j*-th di titik *i*-th

y_{jp} : Frekuensi *j*-th di titik pusat *p*-th

m : Jumlah kejadian

5. Membuat kluster baru dengan memasukan titik *p* ke dalam kluster
6. Identifikasi data yang ditandai sebagai titik inti
7. Lanjutkan sampai semua titik telah dipores
8. Jika ada titik yang tidak termasuk dalam cluster mana pun, maka titik tersebut akan ditandai sebagai noise

DBSCAN mencari kluster dengan memeriksa parameter radius (*Eps*) setiap titik dalam dataset. Jika *Eps* pada titik *p* berisi lebih dari *minPts*, kluster baru dengan *p* sebagai titik inti akan terbentuk (Putri et al., 2019).

C. Klustering K-Medoids

Algoritma PAM (Portioning Around Medoids) atau yang juga dikenal sebagai algoritma k-medoids, merupakan algoritma yang direpresentasikan oleh kluster yang berupa medoid. K-medoids menggunakan objek sebagai representasi (medoid) pusat kluster untuk setiap kluster (Kamila et al., 2019). Metode k-medoids merupakan metode pengelompokan yang berfungsi untuk memecah dataset menjadi beberapa kelompok. Keuntungan dari metode ini adalah dapat mengurangi efek sensitivitas terhadap outlier. Keuntungan lain dari metode ini adalah hasil proses pengelompokan tidak bergantung pada urutan dataset yang dimasukkan (Kamila et al., 2019).

Tahapan algoritma K-Medoids adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi: pilih secara acak *k* objek yang akan berfungsi sebagai medoid.
2. Kaitkan setiap titik data dengan medoid yang paling mirip dengan menggunakan ukuran jarak dan hitung biaya.
3. Pilih secara acak *k* objek baru yang akan berfungsi sebagai medoid dan simpan salinan dari himpunan aslinya.
4. Gunakan himpunan medoid yang baru untuk menghitung ulang biaya.
5. Jika biaya baru lebih besar dari biaya lama, hentikan algoritma.
6. Ulangi langkah dua hingga lima hingga tidak ada perubahan pada medoid. (Iskandar et al., 2018)

D. Koefisien Silhouette

Mengevaluasi hasil pengelompokan menggunakan validasi kluster. Validasi kluster dilakukan untuk mengukur seberapa baik hasil pengelompokan yang diperoleh. Dalam penelitian ini digunakan salah satu indeks validasi internal yaitu koefisien Silhouette. Langkah-langkah untuk menghitung koefisien Silhouette diberikan sebagai berikut (Paembonan & Abduh, 2021):

1. Hitung $a(i)$ sebagai jarak rata-rata titik tersebut dari semua titik lain dalam kluster yang sama,

$$a(i) = \frac{\sum_{j \in C_i, j \neq i} \text{dist}(i, j)}{|C_i| - 1}, \dots\dots\dots (2)$$

dimana,

C_i : jumlah observasi di kluster ke- i

j : observasi lain di kluster ke- i

2. Hitung $b(i)$ sebagai jarak rata-rata titik tersebut dari semua titik dalam kluster yang paling dekat dengan klusternya.

$$b(i) = \min_{C_l: 1 \leq l \leq k, l \neq i} \left\{ \frac{1}{|C_l|} \sum_{j \in C_l} \text{dist}(i, j) \right\}, \dots\dots\dots (3)$$

where,

l : observasi lain pada kluster berbeda

3. Hitung koefisien Silhouette mengikuti formula berikut:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{b(i) - a(i)\}}, \dots\dots\dots (4)$$

Dimana Koefisien Silhouette diperoleh dari nilai terbesar dari masing-masing nilai silhouette dan berikut adalah Tabel 1 (Ashari & Otniel, 2019).

Tabel 1. Interpretasi koefisien Silhouette

Koefisien Silhouette	Interpretasi
<0.25	Tidak dapat disebut kluster
0.26-0.50	Kluster lemah
0.51-0.70	Kluster layak atau sesuai
0.71-1.00	Kluster kuat

METODOLOGI DAN DATA

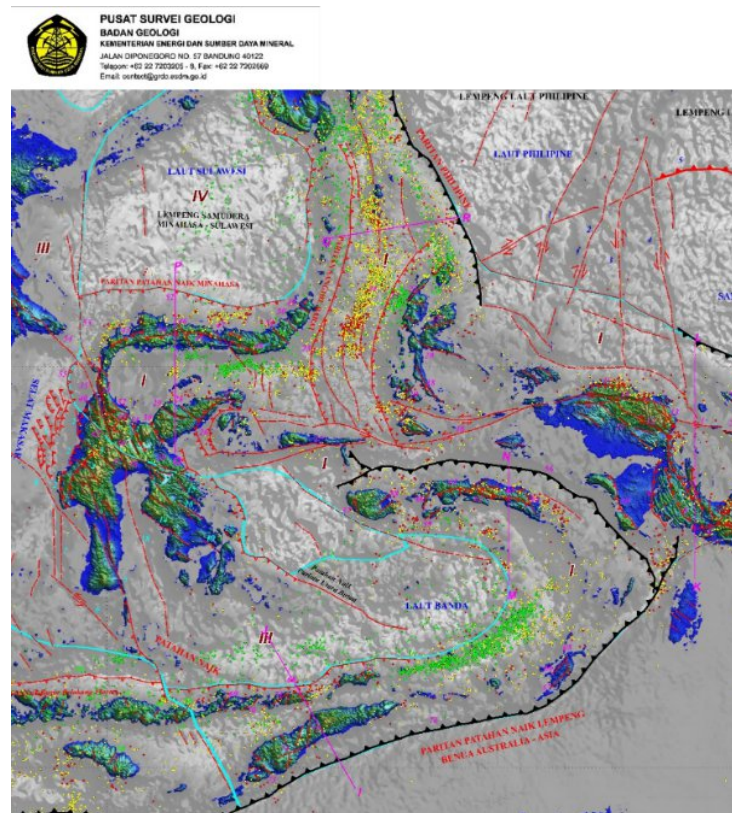
Gambar 2 merupakan sebaran historis gempa bumi, zona subduksi, dan daerah patahan yang terletak di wilayah Sulawesi-Maluku. Sebaran gempa bumi yang terjadi jelas mengikuti pola garis zona subduksi dan patahan. Zona subduksi yang terletak di Laut Maluku Utara merupakan daerah dengan kejadian gempa bumi terbanyak. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh kedekatan zona subduksi terhadap potensi kejadian gempa bumi (Choiruddin et al., 2021). Begitu pula dengan patahan yang terjadi di perairan Banda, terdapat irisan antara kejadian gempa bumi dengan letak patahan (Choiruddin et al., 2021).

Data sebaran gempa bumi Sulawesi-Maluku yang digunakan bersumber dari Badan Klimatologi dan Geofisika Indonesia periode 2008-2018. Pada data sebaran tersebut, dianalisis kedalaman kejadian gempa bumi dan kekuatan gempa bumi dengan 5 magnitudo. Selain itu, pola gempa bumi yang terbentuk juga diduga dipengaruhi oleh letusan gunung berapi (Eggert & Walter, 2009). Dengan demikian, variabel yang digunakan dalam penelitian ini diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variabel analisis

Variabel	Deskripsi	Unit	Sumber
X1	Jarak ke zona subduksi terdekat	100 km	Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
X2	Jarak ke zona patahan terdekat	100 km	

X3	Jarak ke gunung berapi terdekat	100 km	(BMKG)
X4	Kedalaman gempa bumi	Km	
X5	Magnitudo gempa bumi	magnitude	



Sumber: BMKG, 2025

Gambar 2. Lokasi kejadian gempa bumi di Sulawesi-Maluku (titik), zona subduksi (garis merah), dan patahan (garis biru muda dan garis grid)

Dalam penelitian ini, definisi operasional variabel didefinisikan sebagai berikut:

1. Jarak ke zona subduksi terdekat

Ukuran yang digunakan adalah jarak dari titik gempa bumi ke zona subduksi terdekat. Subduksi merupakan proses geologi di kerak bumi yang membentuk batas antara dua lempeng tektonik litosfer.

2. Jarak ke zona sesar terdekat

Sesar geologi merupakan daerah rekahan yang disertai pergeseran relatif satu blok terhadap blok batuan lainnya. Pada setiap titik gempa bumi, jarak dari sesar terdekat diukur.

3. Jarak ke gunung berapi terdekat

Ukuran variabel gunung berapi sama dengan definisi sesar dan subduksi, yaitu menggunakan jarak antara gempa bumi dan gunung berapi. Gunung berapi adalah suatu tempat di atas permukaan bumi tempat keluarnya material pijar atau gas dari permukaan bumi ke permukaan.

4. Kedalaman Gempa Bumi

Kedalaman gempa bumi adalah jarak dari permukaan gempa ke permukaan bumi. Semakin dalam jaraknya, semakin jauh gempa dari permukaan. Satuan yang digunakan adalah kilometer.

5. Magnitudo Gempa Bumi

Magnitudo adalah kekuatan gempa bumi yang menggambarkan besarnya energi seismik dari sumber gempa. Dalam penelitian ini, kejadian gempa bumi diamati dengan magnitudo ≥ 5 .

Variabel X1, X2, dan X3 diperoleh dengan menggunakan fungsi `disfunc` pada paket `spatstat` di R. Sedangkan variabel X4 dan X5 merupakan bagian dari hasil pengukuran seismograf yang diperoleh dari BMKG. Variabel pada Tabel 2 memiliki satuan yang berbeda. Oleh karena itu, analisis data menggunakan pembelajaran tanpa pengawasan dilakukan dengan melakukan standarisasi data terlebih dahulu. Rangkaian analisis mengikuti langkah-langkah berikut:

1. Pengelompokan titik-titik kejadian gempa bumi Sulawesi-Maluku menggunakan DBSCAN dan k-medoid.
 - a. Pada DBSCAN, lakukan validasi silang untuk minimal titik < 5 berdasarkan nilai Silhouette dan visualisasikan kluster yang optimal.
 - b. Validasi hasil pengelompokan DBSCAN menggunakan metode pengelompokan k-medoid berdasarkan jumlah kluster optimal pada DBSCAN.
2. Bandingkan kinerja kedua metode berdasarkan nilai koefisien Silhouette
3. Eksplorasi variabel-variabel yang diduga memengaruhi kejadian gempa bumi Sulawesi-Maluku
4. Buat kesimpulan.

HASIL DAN DISKUSI

A. Statistika Deskriptif

Gambar 2 menunjukkan distribusi kejadian gempa bumi di Sulawesi-Maluku. Karena karakteristik gempa bumi ditunjukkan pada Gambar 2, kami menyelidiki karakteristik masing-masing variabel yang digunakan.

Tabel 3. Analisis Deksriptif setiap Variabel

Variabel	Rata-rata	Minimum	Maksimum
Jarak ke zona subduksi terdekat	1.411	0.005	5.114
Jarak ke zona patahan terdekat	0.977	0	4.375
Jarak ke gunung berapi terdekat	1.858	0.029	7.924
Kedalaman gempa bumi	85.2	2	750
Magnitudo gempa bumi	5.32	5	7.92

Berdasarkan Gambar 2 dan Tabel 3, gempa bumi dengan patahan terdekat dalam radius 0,005 x 100 km, berlokasi di Maluku, dan subduksi serta gunung api terdekat terletak di Laut Banda bagian barat. Kedalaman gempa terendah adalah 2 km, berlokasi di wilayah Sorong, Papua Barat. Semakin dekat kedalamannya, gempa bumi semakin mendekati permukaan. Gempa bumi dengan magnitudo tertinggi 7,92 terjadi di sekitar kota Sorong, Papua Barat.

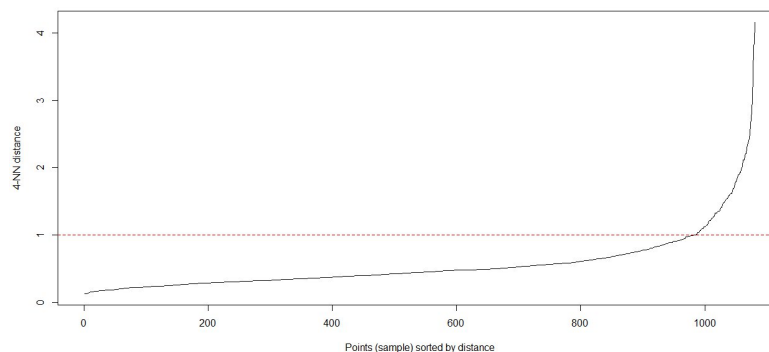
B. Klusterisasi Lokasi Gempa Menggunakan DBSCAN

Langkah awal algoritma clustering dengan metode DBSCAN adalah memperoleh jumlah cluster yang optimal dengan menggunakan koefisien Silhouette berdasarkan gabungan dua parameter yaitu epsilon (ϵ) dan minPts (Mansori, 2024). Sebelum menentukan jumlah ϵ yang akan digunakan untuk percobaan DBSCAN, terlebih dahulu menghitung jarak ke tetangga terdekat k (kNNdist) (Albayrak, 2020) yang merupakan perhitungan cepat jarak ke tetangga terdekat k pada dot matrix. Plot kNNdist dapat digunakan untuk membantu mencari nilai ϵ (Starczewski et al., 2020) yang tepat untuk DBSCAN. Plot kNNdist akan mencari nilai "knee" karena menampilkan nilai ϵ yang optimal. Berikut ini adalah gambar plot jarak k-NN dengan $k = 4$ (Ester) untuk dataset yang digunakan dalam penelitian ini. Penentuan nilai $k = 4$ didasarkan pada simpulan Ester (1996) yang menunjukkan bahwa

nilai k yang merepresentasikan minPts tidak memberikan hasil yang berbeda secara signifikan ketika nilai $k > 4$.

Dari Gambar 3, diperkirakan $knee$ berada di kisaran angka 0,5-1, yang menunjukkan potensi titik optimal antara titik ini dan uji minPts 1 hingga 4 [20], sehingga eksperimen ini menentukan beberapa eps dan minPts. Hasil eksperimen yang menerapkan skenario eksperimen dapat dilihat pada Tabel 4.

Hasil kluster terbaik berdasarkan hasil eksperimen adalah gabungan input Eps = 1 dan minPts = 4 dengan rata-rata koefisien siluet mendekati nilai maksimum sebesar 0,5123. Hasil ini menunjukkan bahwa objek-objek pada dataset terkelompok dengan baik karena memiliki jarak antar kluster (jarak antara satu kluster dengan kluster lainnya) yang tinggi dan jarak intra kluster (jarak antara objek dengan objek lain dalam kluster yang sama) yang rendah. Artinya, setiap kluster cukup berjauhan dengan kluster lainnya, sedangkan setiap anggota kluster memiliki kerapatan yang tinggi dengan objek lain dalam kluster yang sama. Hasil visualisasi kluster menggunakan DBSCAN terhadap jumlah kluster yang optimal disajikan pada Gambar 4 berikut. Berdasarkan visualisasi tersebut jumlah titik gempa yang menjadi anggota kluster 1 adalah 1005 titik gempa, dan jumlah titik gempa pada kluster 2 adalah delapan titik gempa, sedangkan yang termasuk dalam data derau adalah 68 titik gempa.



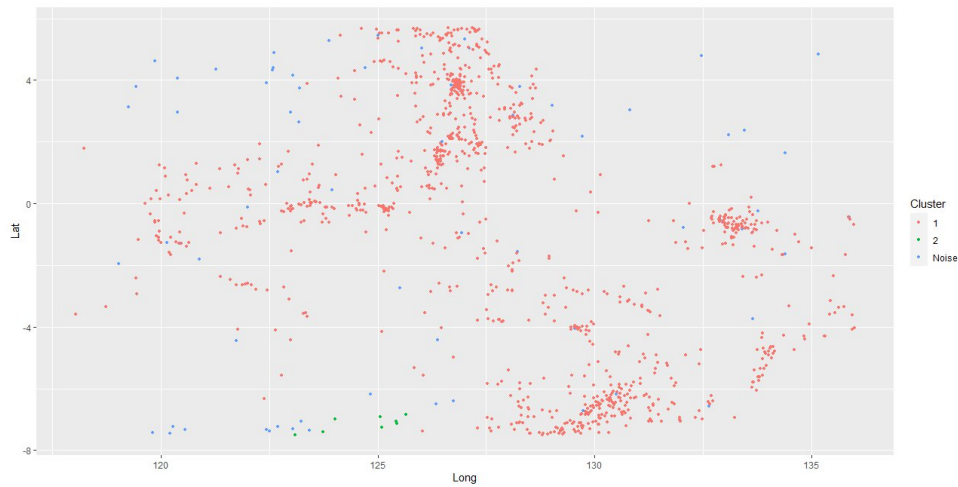
Sumber: Data diolah, 2025

Gambar 3. Jarak k -NN untuk $k = 4$

Tabel 4. Hasil Eksperimen Penentuan Jumlah Cluster Optimal Metode DBSCAN

Eps	MinPts	Koefisien Silhouette	Jumlah Kluster	Jumlah Noise
0.65	1	-0.759	119	0
0.65	2	-0.646	24	95
1	3	0.438	4	60
1	4	0.512	2*	68

Note: *) kluster optimal

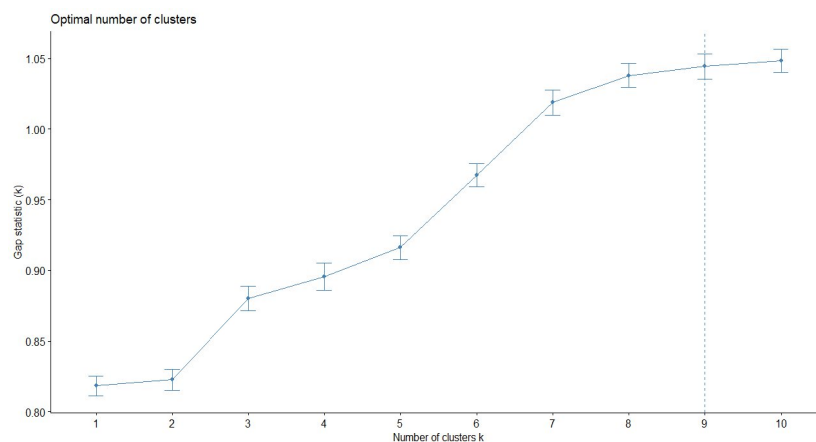


Sumber: Data diolah, 2025

Gambar 4. Visualisasi Kluster menggunakan DBSCAN

C. Klusterisasi Lokasi Gempa Menggunakan K-Medoids

Klusterisasi K-medoid bekerja dengan mempartisi data menggunakan objek awalan yang disebut medoid. Statistik gap digunakan untuk menemukan jumlah kluster yang optimal. Tujuan deviasi statistik adalah untuk menentukan jumlah kluster atau menentukan nilai k yang optimal. Kriteria jumlah kluster yang optimal ditentukan oleh nilai deviasi statistik (k) yang tertinggi, atau yang pertama menunjukkan peningkatan minimum deviasi jika deviasi masih meningkat. Hasil validasi ditunjukkan pada Gambar 5.



Sumber: Data diolah, 2025

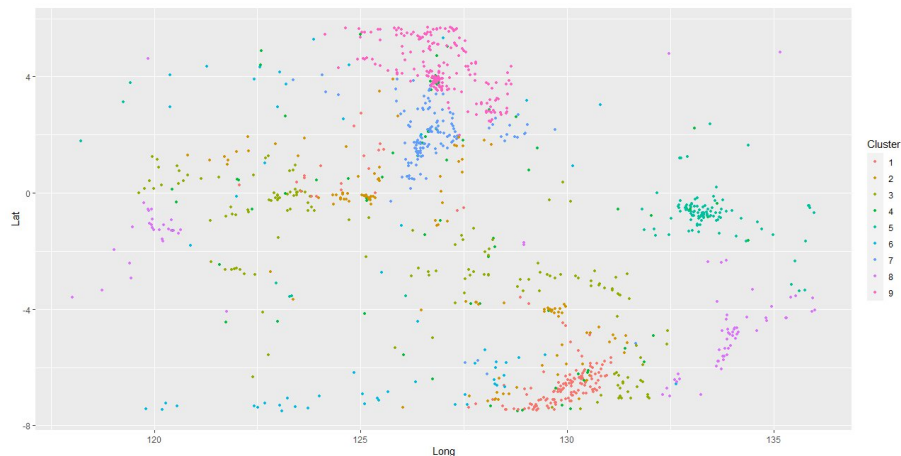
Gambar 5. Visualisasi Kluster menggunakan DBSCAN

Gambar 5 merupakan aplikasi untuk mencari k optimal dengan pendekatan gap statistik. Rekomendasi k optimal adalah ketika k = 9, ditunjukkan oleh grafik pada k = 9 yang memiliki nilai gap statistik tertinggi dibandingkan titik kluster lainnya, sehingga jumlah kluster optimal untuk metode k-medoid adalah 9. Berikut visualisasi hasil kluster menggunakan metode k-medoid. Jumlah titik gempa di setiap kluster disajikan pada Tabel 5. Hasil visualisasi himpunan lokasi gempa di Kepulauan Sulawesi-Maluku ditunjukkan pada Gambar 6.

Tabel 5. Jumlah Gempa di setiap Kluster

Kluster	Jumlah Gempa	Kluster	Jumlah Gempa	Kluster	Jumlah Gempa
1	114	4	74	7	132
2	118	5	109	8	84

3	157	6	58	9	205
---	-----	---	----	---	-----



Sumber: Data diolah, 2025

Gambar 6. Visualisasi Kluster K-Medoids

D. Perbandingan Hasil DBSCAN dan K-Medoids

Berdasarkan hasil clustering menggunakan metode DBSCAN dan K-medoids, langkah selanjutnya adalah memilih metode terbaik. Pemilihan metode terbaik diantara kedua metode yang digunakan adalah dengan menggunakan nilai koefisien Silhouette. Performa kedua metode dapat dilihat dari nilai koefisien Silhouette. Koefisien ini menggambarkan kualitas dan kekuatan cluster yang merupakan gabungan antara metode separation dan cohesion. Berikut hasil perbandingan yang disajikan pada Tabel 6.

Berdasarkan Tabel 6, performa clustering menggunakan metode DBSCAN lebih baik dibandingkan dengan metode K-Medoids, hal ini didasarkan pada nilai koefisien Silhouette yang lebih tinggi yaitu 0,513, nilai ini termasuk dalam kategori cluster yang tepat atau sesuai (Tabel 1). Metode K-medoids kurang optimal karena proses inialisasi cluster dilakukan secara acak pada saat pembangkitan cluster awal dan metode ini sangat robust terhadap data noise, tidak seperti DBSCAN yang sangat sensitif terhadap data noise.

Tabel 6. Perbandingan Koefisien Silhouette dan Jumlah Kluster

Metode	Koefisien Silhouette	Jumlah Kluster
DBSCAN	0.513	2
K-Medoids	0.242	9

E. Analisis Potensi Resiko Gempa Bumi

Sebelumnya, pengelompokan titik gempa bumi menggunakan metode DBSCAN telah terbukti memberikan kinerja yang lebih baik. Dapat disimpulkan bahwa algoritma DBSCAN dapat mengklasifikasikan area terdampak gempa bumi dengan tepat berdasarkan karakteristik potensi risiko yang ditimbulkan. Hal ini terlihat dari nilai koefisien Silhouette yang tinggi pada hasil dataset gempa bumi. Hasil terbaik diperoleh dengan menggabungkan nilai Eps 1 dan minPts 4 pada 2 kluster. Hasil kedua kluster dalam penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan karakteristik antar kluster. Analisis identifikasinya adalah sebagai berikut.

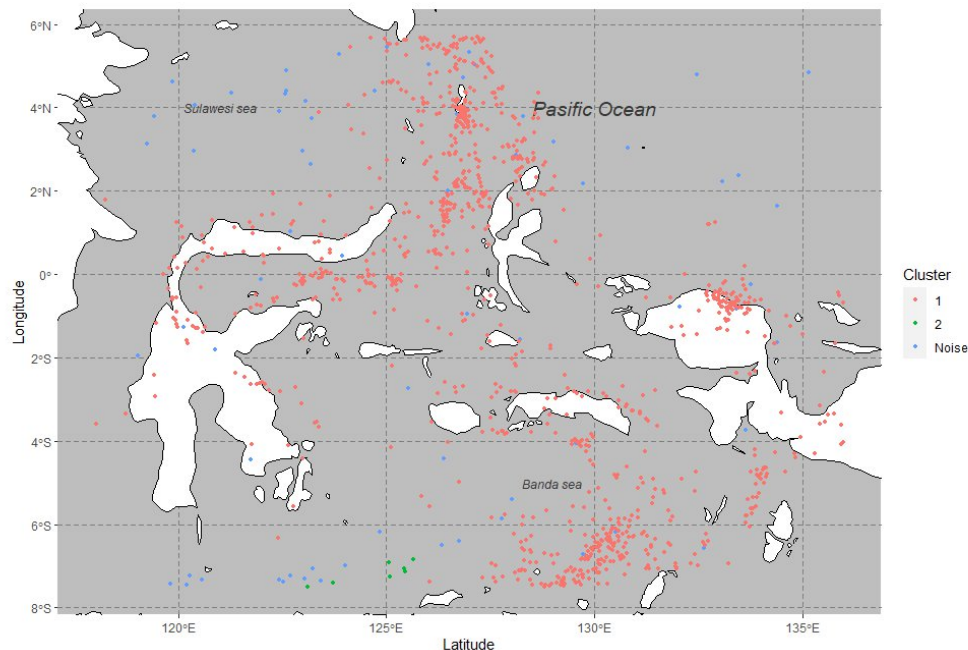
Tabel 7. Identifikasi Karakteristik Setiap Kluster

Kluster	Kluster 1	Kluster 2	Noise
Jumlah Gempa Bumi	1005	8	68

Karakteristik (Rata-rata)	Jarak ke zona subduksi terdekat	1.37	1.63	1.89
	Jarak ke zona patahan terdekat	0.96	0.30	1.35
	Jarak ke gunung berapi terdekat	1.80	0.86	2.83
	Kedalaman gempa bumi	67.18	535.70	298.50
	Magnitudo gempa bumi	5.27	5.29	5.95

Proses selanjutnya adalah memberi label pada kluster berdasarkan karakteristik data masing-masing kluster untuk menentukan tingkat potensi risiko gempa bumi. Sehingga dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan atau kebijakan terkait manajemen atau mitigasi bencana gempa bumi. Selain itu, selanjutnya dapat dilakukan dengan memetakan potensi risiko gempa bumi untuk setiap wilayah terdampak gempa bumi berdasarkan karakteristik objek dalam suatu kelompok, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 di bawah ini.

Menurut Tabel 7, terdapat tiga wilayah berbeda (yang digambarkan sebagai kluster dan noise) tergantung pada karakteristik potensi risiko gempa bumi yang ditimbulkan. Kita perhatikan pada kluster 2, karena kejadian minoritas hanya delapan titik, yang sebagian besar terletak di tepi barat Laut Banda, memiliki karakteristik jarak terdekat dengan subduksi dan gunung api, yang kecil dibandingkan dengan kluster 1 dan noise. Sementara itu, kedalaman menunjukkan bahwa kejadian gempa bumi pada kluster 2 hampir 10 kali lebih dalam daripada kluster 1.



Sumber: Data diolah, 2025
Gambar 7. Klusterisasi Gempa Bumi Berdasarkan DBSCAN

Berdasarkan Tabel 7, terdapat tiga area berbeda (yang digambarkan sebagai klaster dan kebisingan) tergantung pada karakteristik potensi risiko gempa bumi yang ditimbulkan. Berikut adalah karakteristik masing-masing klaster.

a. Karakteristik titik lokasi gempa bumi pada klaster 1

Klaster 1 merupakan klaster dengan lokasi gempa bumi terbanyak di wilayah Sulawesi-Kepulauan Maluku, Indonesia, dengan 1.005 lokasi gempa bumi selama periode 2008-2018. Perairan Sulawesi yang berbatasan dengan Filipina merupakan titik lokasi gempa bumi pada jarak dari zona subduksi terdekat, yaitu 0,000274445 km. Sementara itu, lokasi gempa bumi yang paling dekat dengan gunung berapi tersebut adalah gempa bumi yang terjadi pada tahun 2011 tepatnya di Laut Banda bagian selatan, laut yang terletak di Kepulauan Maluku di Indonesia.

b. Karakteristik titik lokasi gempa bumi di klaster 2

Klaster 2 merupakan kumpulan lokasi gempa bumi, yang mayoritas berada di pesisir barat Laut Banda, dekat Pulau Selayar, Kepulauan Wakatobi di Sulawesi Tenggara, dan utara Provinsi Nusa Tenggara Timur. Meskipun hanya ada delapan lokasi gempa bumi yang tergabung dalam klaster 2, magnitudo gempa bumi rata-rata di klaster ini lebih besar daripada di klaster 1 (Tabel 6). Demikian pula dengan kedalaman gempa bumi, gempa bumi yang terjadi di klaster 2 memiliki kedalaman rata-rata 535,70 km, lebih dalam daripada rata-rata gempa bumi yang terjadi di klaster 1. Gempa bumi yang terjadi di pesisir barat Laut Banda dekat Kepulauan Wakatobi menjadi gempa bumi dengan kedalaman terdalam, yaitu 622,3 km. Sementara itu, di klaster 1, gempa bumi terdalam terjadi di bagian selatan Pulau Buru, Maluku, yaitu 413,6 km. Kami memperhatikan klaster 2, karena kejadian minoritas hanya delapan titik, yang sebagian besar terletak di tepi barat Laut Banda, memiliki karakteristik jarak terdekat dengan subduksi dan gunung berapi, yang kecil dibandingkan dengan klaster 1 dan kebisingan. Sementara itu, kedalaman menunjukkan bahwa kejadian gempa bumi di klaster 2 hampir 10 kali lebih dalam daripada klaster 1.

c. Karakteristik titik lokasi gempa bumi dalam klaster kebisingan

Delapan puluh lima lokasi gempa bumi tidak dikelompokkan, dengan kata lain, mereka menjadi data kebisingan dalam penelitian ini. Namun, secara karakteristik, titik lokasi gempa bumi dalam kelompok ini memiliki magnitudo rata-rata gempa bumi tertinggi dibandingkan dengan yang ada di klaster 1 dan klaster 2. Magnitudo rata-rata gempa bumi dalam klaster kebisingan ini adalah 5,947 magnitudo. Gempa bumi terbesar terjadi di Pulau Waigeo, Papua Barat, di mana di wilayah ini, ada dua gempa bumi skala besar, yaitu 7,92 dan 7,52 magnitudo.

KESIMPULAN

Dalam studi ini, kami mengimplementasikan metode DBSCAN dan K-Medoids untuk mengklasifikasikan kejadian gempa bumi di wilayah Sulawesi-Maluku yang melibatkan kovariat geologi dan data seismik internal. Kami mempelajari klaster yang terbentuk berdasarkan DBSCAN dan membandingkannya dengan K-Medoid. Berdasarkan Silhouette, koefisien Silhouette metode DBSCAN lebih tinggi daripada K-Medoid dengan dua klaster optimal. Selama periode 2008-2018, 10 gempa bumi terpenting terjadi pada lokasi seismik yang termasuk dalam kelompok kebisingan, yang berarti bahwa titik lokasi gempa bumi ini biasanya berbeda dari titik lokasi Gempa Bumi di klaster 1 dan 2. Outlier ini dapat diidentifikasi sebanyak mungkin menggunakan metode DBSCAN. Karakteristik gempa bumi klaster 2 sering terjadi di tepi barat laut Banda, jarak terdekat dengan gunung berapi. Dalam studi ini, kami tidak mempertimbangkan korelasi antar variabel dalam proses pengelompokan. Meskipun tidak ada penelitian lebih lanjut, untuk meningkatkan akurasi proses pengelompokan, multikolinearitas harus dipertimbangkan.

DAFTAR PUSTAKA

Albayrak, M. (2020). *Standart Dı Ş I De Ğ Erlerin Tespitinde DBSCAN Algoritması İle Seri Ve Paralel*

- Programlama Performansinin Karşılaştırılması Comparison Of Serial And Parallel Programming Performance In.* 7(1), 129–140. <https://doi.org/10.35193/Bseufbd.649539>
- Ashari, B. S., & Otniel, S. C. (2019). *Seri Sains Dan Teknologi Perbandingan Kinerja K-Means Dengan DBSCAN Seri Sains Dan Teknologi P-ISSN 2477-3891 E-ISSN 2615-4765.* 5(2), 64–67.
- Choiruddin, A., Aisah, Trisnisa, F., & Iriawan, N. (2021). Quantifying The Effect Of Geological Factors On Distribution Of Earthquake Occurrences By Inhomogeneous Cox Processes. *Pure And Applied Geophysics*, 178(5), 1579–1592. <https://doi.org/10.1007/S00024-021-02713-2>
- Choiruddin, A., Yuni Susanto, T., Husain, A., & Mega Kartikasari, Y. (2024). Kppmenet: Combining The Kppm And Elastic Net Regularization For Inhomogeneous Cox Point Process With Correlated Covariates. *Journal Of Applied Statistics*, 51(5), 993–1006. <https://doi.org/10.1080/02664763.2023.2207786>
- Eggert, S., & Walter, T. R. (2009). Tectonophysics Volcanic Activity Before And After Large Tectonic Earthquakes : Observations And Statistical Significance. *Tectonophysics*, 471(1–2), 14–26. <https://doi.org/10.1016/J.Tecto.2008.10.003>
- Hariato. (2025). *Sidrap Panen Raya! Bukti Nyata Lumbung Padi Sulsel Makin Kuat.* <https://katasulsel.com/2025/03/04/Sidrap-Panen-Raya-Bukti-Nyata-Lumbung-Padi-Sulsel-Makin-Kuat?amp>
- Iskandar, I. D., Pertiwi, M. W., Kusmira, M., & Amirulloh, I. (2018). *Komparasi Algoritma Clustering Data Media Online.* 2(4), 1–8.
- Kamila, I., Khairunnisa, U., Studi, P., Informasi, S., Sains, F., Sultan, U. I. N., & Kasim, S. (2019). *Perbandingan Algoritma K-Means Dan K-Medoids Untuk Pengelompokan Data Transaksi Bongkar Muat Di Provinsi Riau.* 5(1), 119–125.
- Mansori, H. A. (2024). *Using Partitioned-Based Method For Optimal Epsilon Parameter Extraction On Density-Based Clustering.* January. <https://doi.org/10.1109/MI-STA52233.2021.9464517>
- Nasional, T. P. S. G. (2017). *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017.* Kementerian PUPR.
- Paembonan, S., & Abduh, H. (2021). Penerapan Metode Silhouette Coefficient Untuk Evaluasi Clustering Obat. 6(2), 48–54.
- Putri, D., Statistika, D., Matematika, F., & Data, S. (2019). *Text Clustering Pada Akun TWITTER Layanan Ekspedisi JNE , J & T , Dan Pos Indonesia Menggunakan Metode Density-Based Spatial Clustering Of Applications With Noise (DBSCAN).* 8(2), 2–9.
- Sabua. (2011). *Pemahaman Tentang Kawasan Rawan Bencana Dan Tinjauan Terhadap Kebijakan Dan Peraturan Terkait Linda Tondobala.* 3(1), 58–63.
- Saputra, H., & Arsyad, M. (2014). *Studi Analisis Parameter Gempa Dan Pola Sebaranya Berdasarkan Data Multi-Stasiun (Studi Kasus Kejadian Gempa Pulau Sulawesi Tahun 2000-2014).* 83–87.
- Starczewski, A., Goetzen, P., & Er, M. J. (2020). A New Method For Automatic Determining Of. 10(3), 209–221.
- Timor, A. R., Andre, H., Elektro, J. T., Teknik, F., & Andalas, U. (2016). *Yang Ditimbulkan Oleh Gejala Gempa.* 3.