

MICRO FAULT SEGMENTATION OF THE PALU-KORO FAULT THROUGH COMPARATIVE EVALUATION OF DBSCAN AND OPTICS WITH THREE DIMENSIONAL HYPOCENTER RECONSTRUCTION

SEGMENTASI MIKRO SESAR PALU-KORO MELALUI EVALUASI KOMPARATIF DBSCAN DAN OPTICS DENGAN REKONSTRUKSI GEOMETRI HIPOSENTER TIGA DIMENSI

Abdullah Zeith Alfarizy¹, Fatima Azzahra^{2‡}, Muthi'ah Iffa Karimah^{3‡}, Muhammad Fadhil Hakim^{4‡}, Fachry Wirayuda Alindri^{5‡}, and Cici Suhaeni^{6‡}

^{1,2,3,4,5,6}Study Program of Statistics and Data Science, School of Data Science, Mathematics and Informatics, IPB University, Indonesia

[‡]corresponding author: 2357fatima@apps.ipb.ac.id

Copyright © 2026 Abdullah Zeith Alfarizy, Fatima Azzahra, Muthi'ah Iffa Karimah, Muhammad Fadhil Hakim, dan Fachry Wirayuda Alindri. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

The Palu-Koro Fault is one of the major active faults on Sulawesi Island and plays an important role in regional seismic activity due to the complex interaction of the Eurasian, Indo-Australian, and Philippine Plates. Fault segmentation is essential for seismic hazard mitigation because it enables detailed identification of active rupture zones. This study aims to determine the best density-adaptive clustering framework through a comparative evaluation of DBSCAN and OPTICS for micro-fault segmentation based on three-dimensional hypocenter distributions. The data were obtained from the United States Geological Survey for the 2000–2026 period. The analysis includes magnitude of completeness estimation, Hopkins statistical testing, coordinate transformation into three-dimensional space, segmentation using DBSCAN and OPTICS, and fault geometry reconstruction through Principal Component Analysis. The best result was obtained using OPTICS with a Density-Based Clustering Validation score of 0.6461 compared to DBSCAN with -0.038 . The segmentation identified nine micro-fault segments, with eight segments exhibiting high planarity, while the largest segment showed a maximum seismic potential of Mw

7.34. These results indicate that OPTICS effectively reveals latent fault structures for seismic hazard mitigation.

Keywords: 3D Hypocenter, DBSCAN, Fault Segmentation, OPTICS, Palu-Koro Fault.

Abstrak

Sesar Palu-Koro merupakan salah satu sesar aktif utama di Pulau Sulawesi yang berperan penting terhadap aktivitas seismik akibat interaksi kompleks Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Filipina. Segmentasi sesar penting dilakukan sebagai dasar mitigasi bahaya gempa karena memungkinkan identifikasi zona patahan aktif secara rinci. Penelitian ini bertujuan menentukan kerangka kerja klasterisasi berbasis kepadatan adaptif terbaik melalui evaluasi komparatif DBSCAN dan OPTICS untuk segmentasi mikro-sesar berdasarkan distribusi hiposenter tiga dimensi. Data yang digunakan bersumber dari United States Geological Survey periode 2000–2026. Analisis meliputi estimasi *magnitude of completeness*, pengujian statistik Hopkins, transformasi koordinat ke ruang tiga dimensi, segmentasi menggunakan DBSCAN dan OPTICS, serta rekonstruksi geometri sesar melalui *Principal Component Analysis*. Hasil terbaik diperoleh menggunakan OPTICS dengan skor validasi klasterisasi berbasis kepadatan sebesar 0,6461 dibandingkan DBSCAN sebesar -0,038. Segmentasi menghasilkan sembilan mikro-segmen dengan delapan segmen memiliki *planarity* tinggi, sedangkan segmen terbesar menunjukkan potensi magnitudo maksimum Mw 7,34. Hasil ini menunjukkan bahwa OPTICS efektif mengidentifikasi struktur laten sebagai dasar mitigasi bahaya seismik.

Kata Kunci: DBSCAN, Hiposenter 3D, OPTICS, Segmentasi Sesar, Sesar Palu-Koro.

1. Pendahuluan

Indonesia memiliki aktivitas seismik yang cukup tinggi karena letak geografisnya yang menjadi pertemuan lempeng Indo-Australia, Eurasia, Pasifik, dan Filipina. Salah satu struktur aktif utama di Indonesia adalah Sesar Palu-Koro yaitu sesar geser mengiri (*left-lateral strike-slip*) yang berperan besar terhadap aktivitas kegempaan di Sulawesi bagian tengah (Supendi et al., 2021). Aktivitas sesar tersebut memicu gempa destruktif pada tahun 2018 yang menyebabkan tsunami, likuefaksi, dan kerusakan infrastruktur berskala besar (Nurdin et al., 2022).

Pemetaan segmentasi sesar aktif berdasarkan distribusi spasial gempa bumi penting dilakukan untuk mengidentifikasi zona patahan laten dan mendukung mitigasi bencana (Tampubolon et al., 2022). Namun,

kompleksitas pola spasial hiposenter dengan kepadatan tidak seragam menyebabkan metode konvensional belum optimal, sehingga diperlukan pendekatan *machine learning* berbasis klusterisasi untuk mengidentifikasi struktur laten secara lebih adaptif (Gobres dan Felosopo, 2026).

Salah satu metode populer adalah *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN), metode klusterisasi berbasis densitas yang mampu mendeteksi kluster dan mengidentifikasi *noise* menggunakan parameter ϵ (epsilon) dan minPts (*minimum points*) (Ma et al., 2023). Meskipun efektif dalam mengenali kluster berbentuk arbitrer, DBSCAN memiliki keterbatasan pada data dengan variasi kepadatan lokal karena bergantung pada satu parameter radius global (Ma et al., 2023). Permasalahan ini dapat diatasi menggunakan *Ordering Points To Identify the Clustering Structure* (OPTICS), yaitu pengembangan DBSCAN yang lebih adaptif terhadap heterogenitas kepadatan data melalui konsep *core distance* dan *reachability distance* (Gobres & Felosopo, 2026). Pendekatan ini memungkinkan identifikasi segmentasi mikro-sesar secara lebih realistis.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode klusterisasi untuk analisis seismisitas. Gobres (2026) menggunakan OPTICS untuk analisis data seismik, sedangkan Mustakim et al. (2021) menunjukkan bahwa reduksi dimensi menggunakan PCA dapat meningkatkan efisiensi DBSCAN. Piegari et al. (2024) juga membuktikan bahwa PCA pascaklusterisasi efektif untuk mengekstraksi orientasi bidang sesar. Namun, integrasi segmentasi adaptif berbasis densitas dan rekonstruksi geometri hiposenter tiga dimensi pada Sesar Palu-Koro masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan kerangka kerja segmentasi sesar menggunakan klusterisasi berbasis densitas untuk mengidentifikasi mikro-segmen berdasarkan distribusi hiposenter, kemudian menerapkan PCA untuk merekonstruksi geometri bidang sesar serta mengestimasi potensi magnitudo tiap segmen guna mendukung mitigasi bahaya gempa bumi.

2. Metodologi

2.1 Data

Penelitian ini menggunakan data kejadian gempa bumi di wilayah Sesar Palu-Koro yang diperoleh dari *United States Geological Survey* (USGS). Data yang digunakan merupakan katalog gempa periode tahun 2000–2026 dengan total 1.208 kejadian gempa bumi yang telah melalui proses seleksi berdasarkan batas spasial penelitian. Data meliputi koordinat hiposenter (lintang, bujur dan kedalaman), magnitudo dan nilai *Root Mean Square* (RMS) yang digunakan sebagai dasar dalam proses segmentasi spasial dan rekonstruksi geometri bidang sesar secara tiga dimensi.

2.2 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam enam tahapan, yaitu:

1. Pra-pemrosesan dan eksplorasi data hiposenter
 - a) Membersihkan data gempa dengan menghapus baris yang memiliki *missing value* pada peubah kritis, nilai RMS lebih dari 1,5 detik, serta baris duplikasi.
 - b) Menentukan *Region of Interest* (ROI) Sesar Palu-Koro dengan batas koordinat lintang $(-2.497^{\circ}-1.495^{\circ})$ dan bujur $(119.501^{\circ}-122.496)$ untuk memfokuskan analisis pada zona aktif tektonik.
 - c) Mengestimasi *Magnitude of Completeness* (M_c) menggunakan metode *Maximum Curvature* (MAXC), kemudian menghitung parameter Hukum Gutenberg-Richter berupa *a-value* dan *b-value*. Tahap ini memastikan katalog gempa cukup lengkap sehingga analisis segmentasi tidak bias akibat *under-reporting* pada gempa bermagnitudo kecil (Chasanah dan Handoyo, 2021).
 - d) Menguji kecenderungan pembentukan kluster menggunakan Statistik Hopkins untuk mengetahui pola pengelompokan spasial pada data gempa.
2. Transformasi ruang geometris tiga dimensi terhadap data hiposenter
 - a) Mengonversi koordinat geografis hiposenter dari sistem WGS84 ke sistem proyeksi UTM zona 51S sehingga diperoleh koordinat linear pada sumbu X dan Y dalam satuan kilometer.
 - b) Mengintegrasikan informasi kedalaman sebagai sumbu Z bernilai negatif untuk merepresentasikan posisi hiposenter di bawah permukaan bumi dan membentuk ruang Euclidean tiga dimensi (Piegari et al., 2024).
3. Penerapan DBSCAN untuk makro-klasterisasi dan *noise filter*
 - a) Menentukan parameter global DBSCAN melalui analisis *k-nearest neighbor distance plot* untuk memperoleh estimasi nilai ε optimal. Selanjutnya dilakukan pengujian beberapa kombinasi parameter ε dengan nilai *min_samples* tetap, untuk memilih konfigurasi terbaik berdasarkan jumlah kluster dan *noise* yang terbentuk.
 - b) Mengevaluasi kualitas hasil kluster DBSCAN menggunakan indeks *Density-Based Clustering Validation* (DBCV) pada Persamaan (1):

$$DBCV = \sum_{i=1}^k \frac{|C_i|}{|O|} \left(\frac{DSPC(C_i) - DSC(C_i)}{\max(DSPC(C_i), DSC(C_i))} \right) \quad (1)$$

nilai k menyatakan jumlah kluster, $|C_i|$ adalah jumlah data pada kluster ke- i , dan $|O|$ merupakan total seluruh data. Nilai $DSPC(C_i)$ menunjukkan tingkat pemisahan kluster ke- i terhadap kluster lain, sedangkan $DSC(C_i)$ menyatakan tingkat kepadatan internal kluster. Nilai DBCV berada pada rentang -1 hingga 1 , di mana semakin mendekati 1 , maka kualitas klasterisasi semakin baik (Moulavi et al., 2014).
 - c) Mengeksekusi DBSCAN sebagai *noise filter* dengan menghilangkan seismisitas latar sehingga data yang tersisa dapat digunakan sebagai input OPTICS untuk mendeteksi segmentasi struktural

secara lebih jelas.

4. Penerapan OPTICS

- a) Melakukan uji sensitivitas parameter menggunakan beberapa kombinasi nilai ξ dan *min_samples* untuk memperoleh hasil segmentasi paling optimal.
- b) Membentuk *reachability plot* dan mengekstraksi lembah secara otomatis menggunakan pendekatan ξ -steep untuk selanjutnya mengidentifikasi kluster mikro-sesar beserta karakteristik spasialnya secara deskriptif dan visual.
- c) Mengevaluasi kualitas segmentasi OPTICS menggunakan indeks DBCV.

5. Ekstraksi dan pemodelan geometri sesar

- a) PCA diterapkan pada setiap kluster hasil OPTICS untuk merekonstruksi orientasi bidang sesar berdasarkan distribusi spasial hiposenter. Nilai *eigen* λ_1 , λ_2 , dan λ_3 merepresentasikan variansi data pada masing-masing sumbu utama. Suatu kluster diinterpretasikan membentuk bidang planar apabila memenuhi kondisi $\lambda_3 \ll \lambda_1, \lambda_2$ (Piegari et al., 2024), melalui Persamaan (2):

$$Planarity = 1 - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \right) \quad (2)$$

nilai *planarity* mendekati 1 menunjukkan distribusi hiposenter cenderung membentuk bidang sesar planar. Lalu, komponen utama dengan variansi terkecil diinterpretasikan sebagai vektor normal bidang sesar (n_1, n_2, n_3). Berdasarkan vektor normal tersebut, *strike* dan *dip* dihitung menggunakan Persamaan (2) dan (3) (Piegari et al., 2024):

$$Strike = \tan^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (3)$$

$$Dip = \cos^{-1}(n_3) \quad (4)$$

nilai *strike* merepresentasikan arah orientasi sesar terhadap utara, sedangkan *dip* menunjukkan sudut kemiringan bidang sesar terhadap bidang horizontal.

- b) Menghitung luas area proyeksi bidang sesar dengan *Convex Hull* tiga dimensi dan memvisualisasikan hasilnya (Sawaki et al., 2025).
- c) Mengestimasi potensi magnitudo maksimum tiap segmen sesar menggunakan persamaan empiris Wells dan Coppersmith (1994) yang mencakup regresi antara magnitudo (M) dan log dari luas area rekahan dalam km^2 (RA):

$$M = 3,98 + 1,02 \times \log(RA) \quad (5)$$

persamaan ini dipilih karena dapat menghasilkan estimasi yang stabil dan merepresentasikan tipe bidang Sesar Palu-Koro yaitu *strike-slip*.

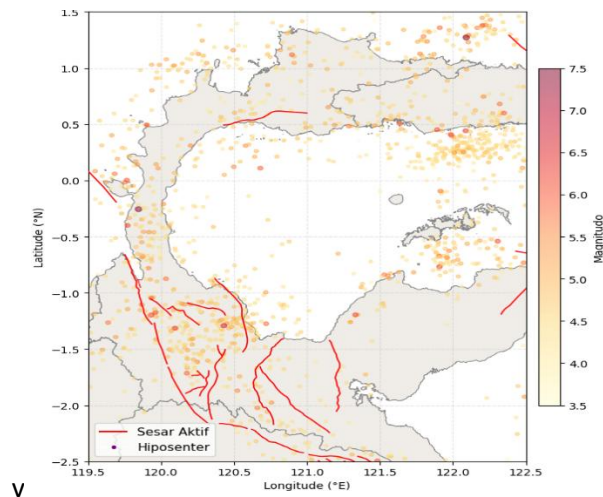
6. Validasi geologis hasil segmentasi

Melakukan validasi hasil orientasi sesar terhadap data *focal mechanism* BMKG dan *Global Centroid Moment Tensor* (Global CMT) serta menginterpretasikan keterkaitan segmentasi yang diperoleh dengan data patahan aktif dari GEM *Global Active Faults*.

3. Hasil dan Pembahasan

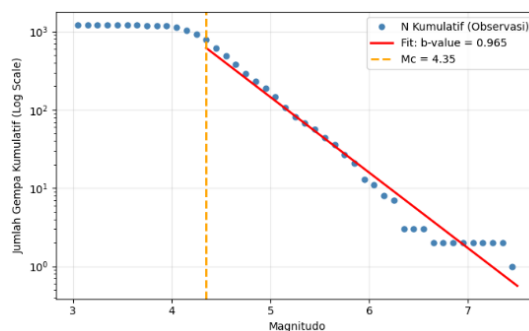
3.1 Karakteristik Seismisitas dan Tendensi Klaster

Penerapan *bounding box* pada *Region of Interest* (ROI) Sesar Palu-Koro menghasilkan 1.208 kejadian gempa valid dengan rentang kedalaman 3,4–646,8 km dan magnitudo 3,5–7,5 M. Distribusi ini menunjukkan tingginya heterogenitas seismisitas dalam ruang tiga dimensi, yang mencerminkan kompleksitas sistem deformasi pada zona tektonik aktif.



Gambar 1: ROI Sesar Palu-Koro dan distribusi episenter gempa.

Evaluasi kelengkapan katalog dilakukan menggunakan analisis Gutenberg-Richter untuk menilai keandalan distribusi frekuensi-magnitudo. Hasil estimasi menunjukkan nilai *magnitude of completeness* (M_c) sebesar 4,35, dengan *b-value* $0,965 \pm 0,04$ dan *a-value* 6,990. Nilai *b-value* yang mendekati satu menunjukkan bahwa gempa kecil lebih dominan dibandingkan gempa besar, sesuai karakteristik wilayah tektonik aktif. Hasil ini menandakan katalog memiliki konsistensi statistik yang baik pada magnitudo menengah hingga besar. Dalam penelitian ini, M_c digunakan sebagai indikator kelengkapan katalog, bukan sebagai batas penyaringan data, sehingga seluruh analisis tetap menggunakan katalog penuh.



Gambar 2: Regresi kumulatif Gutenberg-Richter.

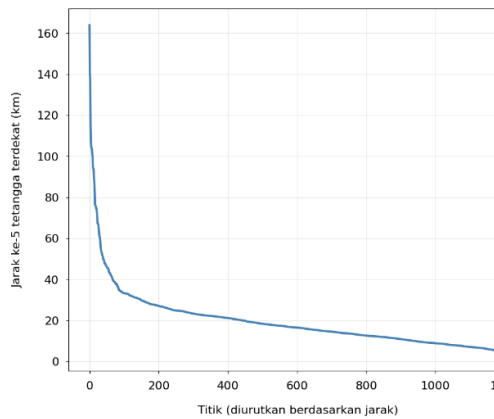
Evaluasi kecenderungan klaster menggunakan statistik Hopkins menghasilkan nilai 0,7152, yang menunjukkan distribusi hiposenter tiga dimensi bersifat non-acak dan memiliki struktur klaster. Hasil ini mendukung penggunaan klasterisasi berbasis densitas. Namun, tingginya variasi kepadatan lokal dapat menurunkan stabilitas segmentasi jika hanya menggunakan densitas global tunggal. Oleh karena itu, DBSCAN digunakan sebagai pembanding awal sebelum optimasi segmentasi adaptif dengan OPTICS.

3.2 Evaluasi Segmentasi DBSCAN dan Kinerja OPTICS

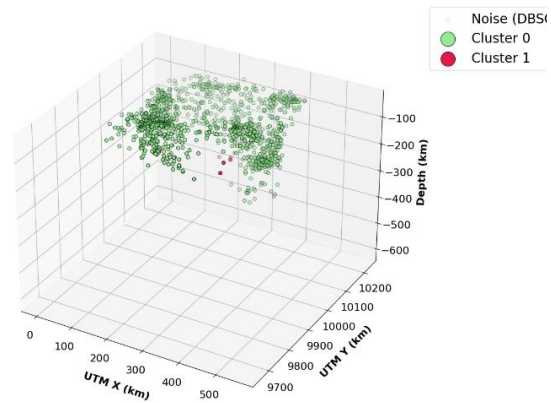
Penentuan parameter ε pada DBSCAN diawali melalui analisis *k-nearest neighbor distance plot* menggunakan $k = 5$ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3a. Nilai k tersebut sekaligus digunakan sebagai parameter *min_samples* pada DBSCAN. Kurva memperlihatkan perubahan gradien yang jelas pada rentang jarak sekitar 35–40 km, yang mengindikasikan titik transisi antara kepadatan lokal klaster dan distribusi titik *noise*. Berdasarkan pola tersebut, beberapa nilai ε di sekitar titik belok dievaluasi untuk menguji sensitivitas segmentasi terhadap perubahan parameter kepadatan.

Hasil segmentasi menunjukkan bahwa DBSCAN belum mampu menghasilkan struktur klaster yang stabil pada seluruh konfigurasi parameter yang diuji sebagaimana terlihat pada Gambar 3.3b. Konfigurasi terbaik diperoleh pada $\varepsilon = 40$ km dengan skor DBCV sebesar $-0,038$. Nilai DBCV yang bernilai negatif mengindikasikan bahwa struktur klaster yang dihasilkan tidak memiliki separasi densitas yang jelas, melainkan didominasi oleh overlap antar wilayah kepadatan. Kondisi ini terjadi ketika DBSCAN mengasumsikan satu skala densitas global, sementara distribusi hiposenter menunjukkan variasi densitas multi-skala. Akibatnya, batas klaster menjadi tidak stabil dan sejumlah titik yang secara geologis berbeda terpaksa tergabung dalam satu komponen yang tidak terdefinisi dengan baik. Dengan demikian, variasi kepadatan lokal pada sistem sesar Palu-Koro memerlukan pendekatan segmentasi yang lebih adaptif terhadap perubahan struktur densitas spasial.

Meskipun demikian, DBSCAN tetap efektif dalam mengidentifikasi kejadian gempa yang berada di luar struktur kepadatan dominan, sehingga metode ini masih bermanfaat sebagai penyaring *noise* awal pada katalog seismisitas. Temuan ini menunjukkan bahwa distribusi hiposenter pada wilayah penelitian memiliki heterogenitas kepadatan spasial yang sulit direpresentasikan menggunakan asumsi densitas global tunggal.

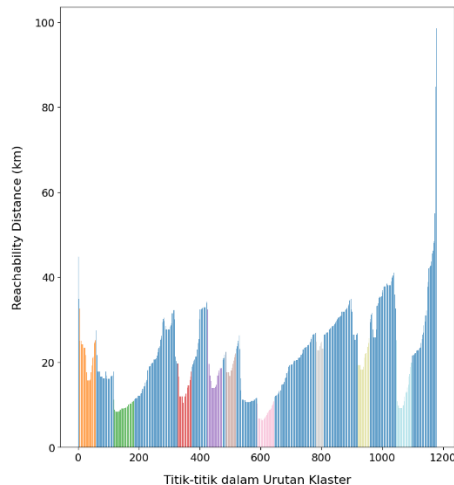


Gambar 3a: *k*-nearest neighbor distance ($k=5$), yang menunjukkan perubahan gradien tajam pada rentang 35–40 km sebagai indikasi transisi kepadatan yang digunakan untuk estimasi ϵ DBSCAN.

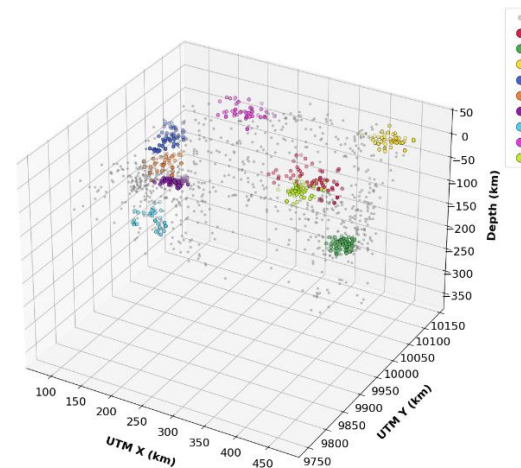


Gambar 3b: Hasil klasterisasi DBSCAN yang masih menunjukkan overlap spasial antar klaster pada ϵ optimal, mengindikasikan keterbatasan pemisahan pada distribusi densitas heterogeny.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, analisis dilanjutkan menggunakan OPTICS yang lebih adaptif terhadap variasi kepadatan lokal. Penentuan parameter dilakukan melalui sensitivity analysis terhadap nilai *min_samples* dan ξ untuk mengevaluasi perubahan jumlah segmen, proporsi *noise*, dan konsistensi struktur segmentasi. Berdasarkan evaluasi tersebut, konfigurasi optimal diperoleh pada *min_samples* = 15, ξ = 0,03, dan *min_cluster_size* = 0,02. Penerapan metode ini menghasilkan sembilan segmen dengan skor DBCV sebesar 0,6461, meningkat sebesar 0,684 poin dibandingkan hasil terbaik DBSCAN. Visualisasi segmen pada Gambar 3.4a dan distribusi spasial hasil segmentasi pada Gambar 3.4b memperlihatkan pemisahan yang konsisten antara segmen aktif dan seismisitas latar. Struktur lembah pada reachability plot yang memperlihatkan struktur lembah hierarkis sebagai indikasi variasi kepadatan lokal antarsegmen hiposenter. Hasil ini menunjukkan bahwa OPTICS lebih mampu menangkap kompleksitas struktur spasial hiposenter, sehingga segmentasi yang dihasilkan layak digunakan sebagai dasar rekonstruksi geometri bidang sesar pada tahap analisis berikutnya.



Gambar 4a: *Reachability plot* OPTICS yang memperlihatkan struktur lembah sebagai representasi segmentasi hierarkis berbasis densitas.



Gambar 4b: Hasil segmentasi OPTICS. Warna klaster menunjukkan pemisahan segmen aktif yang lebih konsisten dibanding DBSCAN, dengan *noise* merepresentasikan zona transisi atau seismic background.

3.3 Rekonstruksi Geometri Segmen dan Estimasi Magnitudo Potensial

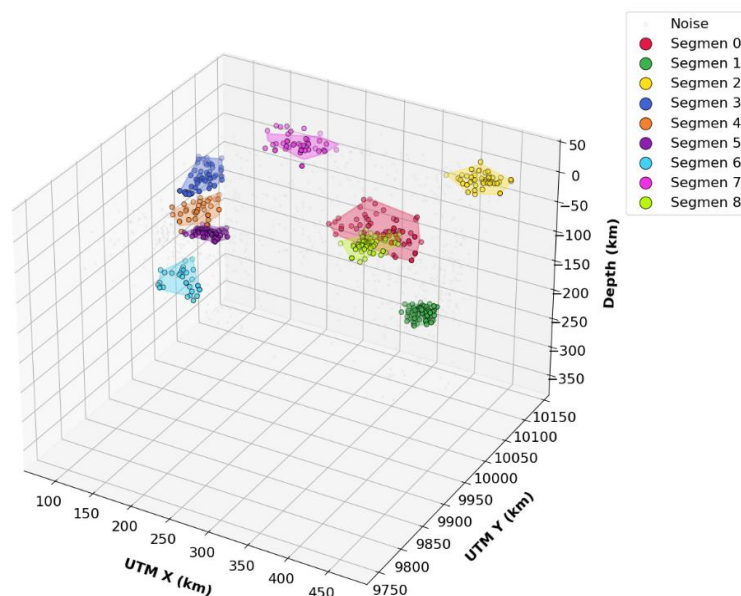
Sembilan segmen hasil klasterisasi OPTICS direkonstruksi menggunakan PCA tiga dimensi untuk mengevaluasi konsistensi geometrinya terhadap representasi bidang sesar fisik. Rekonstruksi PCA dilakukan dengan asumsi bahwa klaster hiposenter dapat merepresentasikan bidang deformasi utama. Oleh karena itu, estimasi geometri yang dihasilkan bersifat pendekatan dan dapat dipengaruhi oleh keberadaan kejadian gempa yang tidak berhubungan langsung dengan proses rekahan utama. Parameter geometri hasil rekonstruksi, meliputi orientasi *strike*, *dip*, nilai *planarity*, luas bidang, dan estimasi magnitudo potensial disajikan pada Tabel 3.2. Analisis ini memanfaatkan struktur *eigenvalue* untuk menilai kualitas representasi bidang, dengan nilai komponen minor yang relatif kecil menunjukkan bahwa distribusi hiposenter tersusun secara planar dan memiliki konsistensi geometrik yang baik.

Planarity index dihitung berdasarkan rasio kontribusi *eigenvalue* minor terhadap total variansi spasial hasil PCA tiga dimensi, dengan nilai mendekati 1 menunjukkan distribusi hiposenter yang semakin planar dan terorganisasi secara geometrik. Area proyeksi tiap segmen dihitung menggunakan *Convex Hull* dua dimensi pada distribusi hiposenter terproyeksi, kemudian digunakan sebagai pendekatan empiris untuk estimasi magnitudo potensial berdasarkan relasi Wells dan Coppersmith.

Tabel 1: Geometri bidang sesar (PCA 3D) dan estimasi potensi. magnitudo.

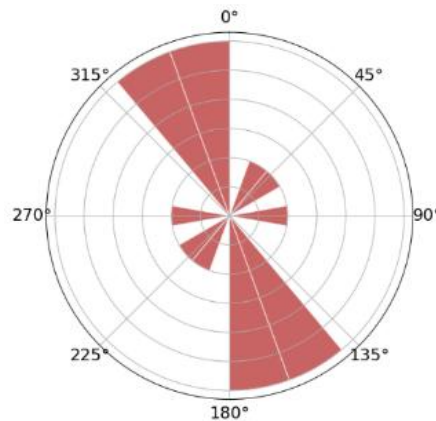
Seg.	N	Strike (°)	Dip (°)	Planarity Index	Area Proyeksi (km ²)	Estimasi Mw	Rank
0	54	161,8	47,6	0,955	5.355,79	7,78	1
1	68	178,6	69,3	0,849	952,97	7,02	9
2	44	156,1	43,5	0,912	1.925,21	7,33	5
3	50	48,0	1,0	0,996	2.799,03	7,50	3
4	32	151,1	19,3	0,873	1.777,68	7,29	7
5	57	350,2	0,9	0,981	1.184,39	7,11	8
6	27	148,5	20,5	0,861	1.778,83	7,30	6
7	40	35,2	14,0	0,862	3.747,27	7,63	2
8	51	268,6	6,5	0,864	2.479,54	7,63	4

Hasil rekonstruksi menunjukkan bahwa sembilan segmen memiliki nilai *planarity index* di atas 0,845, yang mengindikasikan distribusi hiposenter relatif planar dengan orientasi yang bervariasi antarsegmen. Variasi orientasi *strike* pada Gambar 3.5 menunjukkan adanya heterogenitas geometri struktur sesar. Perbandingan dengan solusi *focal mechanism* Global CMT Gempa Palu 2018 menunjukkan bahwa beberapa segmen memiliki kesesuaian parsial terhadap orientasi bidang referensi (*strike* 350° dan *dip* 67°), sedangkan segmen lain memperlihatkan deviasi orientasi yang kemungkinan berkaitan dengan struktur sekunder atau kompleksitas deformasi lokal. Temuan ini menunjukkan bahwa segmentasi berbasis densitas mampu menangkap pola organisasi spasial hiposenter yang konsisten dengan kompleksitas geometrik sistem Sesar Palu-Koro.



Gambar 5: Rekonstruksi geometri bidang sesar berbasis PCA 3D. Variasi orientasi *strike* dan *dip* menunjukkan heterogenitas struktur sesar Palu-Koro yang terdiri dari beberapa subsegmen deformasi.

Estimasi area proyeksi menggunakan *Convex Hull* menghasilkan potensi magnitudo pada kisaran M_w 7,02–7,78. Estimasi magnitudo potensial merupakan pendekatan tingkat pertama (*first-order approximation*) yang diturunkan dari luas area proyeksi. Nilai ini tidak dimaksudkan sebagai prediksi deterministik kejadian gempa, melainkan sebagai indikasi relatif potensi seismik masing-masing segmen. Segmen 0 memiliki kapasitas terbesar dengan estimasi M_w 7,78, yang sebanding dengan magnitudo Gempa Palu 2018 (M_w 7,5). Perbedaan kapasitas antarsegmen tidak selalu sebanding dengan jumlah kejadian gempa historis pada masing-masing segmen, yang menunjukkan bahwa frekuensi observasi bukan satu-satunya indikator potensi rekahan. Distribusi orientasi *strike* pada Gambar 3.6 menunjukkan dominasi arah utara-barat laut hingga selatan-tenggara (NNW–SSE) yang konsisten dengan tren regional Sesar Palu-Koro. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur spasial hasil segmentasi OPTICS memiliki konsistensi geometrik yang memadai untuk digunakan dalam validasi eksternal dan evaluasi awal potensi bahaya seismik.



Gambar 6: Distribusi orientasi *strike* sembilan segmen. Konsentrasi arah NNW–SSE mengindikasikan kesesuaian dengan tren regional Sesar Palu-Koro, dengan variasi minor mencerminkan struktur sekunder.

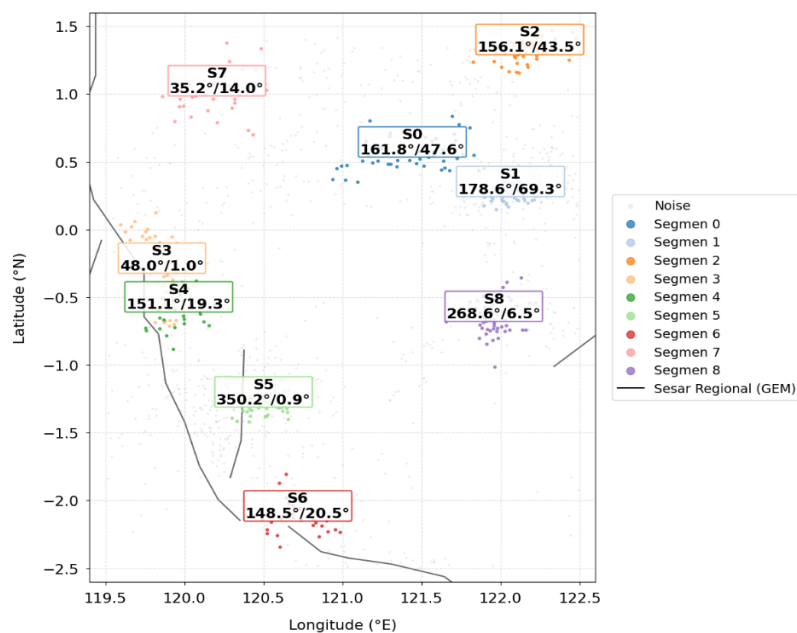
3.4 Validasi Geometrik dan Implikasi Bahaya Seismik

Validasi eksternal dilakukan dengan membandingkan orientasi bidang hasil rekonstruksi terhadap solusi Global CMT Gempa Palu 2018. Referensi mekanisme sumber menunjukkan orientasi bidang utama dengan *strike* 350° dan *dip* 67° sebagai acuan perbandingan.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa segmen 0 dan segmen 1 memiliki kesesuaian orientasi terbaik terhadap bidang referensi, dengan deviasi *strike* masing-masing sebesar $8,2^\circ$ dan $8,6^\circ$. Tingkat kesesuaian ini mengindikasikan bahwa rekonstruksi geometri berbasis distribusi hiposenter dan PCA mampu merepresentasikan bidang sesar utama secara konsisten pada skala regional. Sebaliknya, segmen lainnya memperlihatkan deviasi orientasi yang lebih besar terhadap bidang referensi. Pola ini menunjukkan bahwa tidak seluruh struktur yang teridentifikasi dapat direduksi menjadi representasi bidang sesar utama,

melainkan mencerminkan variasi geometrik lokal atau kemungkinan keberadaan struktur sekunder.

Interpretasi ini diperkuat oleh hasil overlay antara segmentasi OPTICS hasil rekonstruksi PCA dengan jejak sesar aktif global pada Gambar 3.7. Pada visualisasi tersebut, sebagian segmen menunjukkan kesesuaian spasial dengan garis sesar yang telah teridentifikasi, sementara sebagian lainnya berada pada zona yang belum terdokumentasi sebagai struktur aktif. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan berbasis distribusi hiposenter berpotensi menangkap indikasi struktur sesar laten yang belum terekam dalam basis data pemetaan sesar permukaan.



Gambar 7: Overlay segmentasi OPTICS hasil rekonstruksi PCA terhadap garis GEM *Global Active Faults*.

Dari sisi implikasi seismik, hasil estimasi pada Tabel 3.2 menunjukkan variasi kapasitas magnitudo antarsegmen dengan rentang M_w 7,02–7,78. Segmen dengan nilai tertinggi tidak selalu berasosiasi dengan dominasi kejadian gempa historis, yang menunjukkan bahwa frekuensi seismisitas bukan proksi langsung terhadap kapasitas akumulasi energi pada sistem sesar.

Secara keseluruhan, Gambar 3.7 bersama dengan hasil rekonstruksi geometri menunjukkan bahwa sistem Sesar Palu-Koro memiliki heterogenitas struktural yang signifikan, baik dalam orientasi maupun potensi seismogenik. Pendekatan berbasis segmentasi densitas dan rekonstruksi PCA tiga dimensi memberikan kerangka alternatif untuk mengidentifikasi sumber gempa laten pada sistem tektonik kompleks dengan keterbatasan pemetaan struktur permukaan.

4. Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian, algoritma OPTICS menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan DBSCAN dalam memetakan kepadatan spasial hiposenter Sesar Palu-Koro, yang ditandai dengan peningkatan nilai DBCV dari $-0,038$ menjadi $0,6461$. Identifikasi sembilan segmen mikro-sesar ini dilakukan menggunakan katalog gempa penuh tanpa penyaringan magnitudo minimum (M_c). Pendekatan tersebut dipilih untuk menjaga resolusi spasial agar struktur seismik aktif dapat dipisahkan dari seismisitas latar, dengan konsekuensi bahwa model turut merekam kejadian berskala sangat kecil. Oleh karena itu, klaster yang dihasilkan secara spesifik merepresentasikan kepadatan aktivitas seismik kontemporer dan berfungsi sebagai informasi pelengkap bagi pemetaan batas geologi sesar di permukaan.

Melalui rekonstruksi PCA tiga dimensi, sebagian besar segmen tersebut teridentifikasi memiliki struktur planar dengan orientasi yang bervariasi. Berdasarkan perhitungan luas area proyeksinya, segmen terbesar (Segmen 0) menunjukkan estimasi potensi magnitudo maksimum hingga $M_w 7,78$. Penggunaan asumsi planar pada PCA dan estimasi magnitudo ini diterapkan sebagai perhitungan pendekatan awal (*first-order approximation*) untuk mengevaluasi indikasi kapasitas seismogenik tiap subsegmen secara umum. Secara keseluruhan, pemodelan ini tidak bertujuan untuk memberikan prediksi deterministik terkait kejadian gempa, melainkan menyajikan kerangka inferensi eksploratif berbasis data guna mendukung upaya mitigasi bahaya seismik.

Daftar Pustaka

- Chasanah, U., & Handoyo, E. (2021). Determination the Magnitude of Completeness, b-Value and a-Value for Seismicity Analysis in East Java, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1805(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1805/1/012009>.
- Gobres, A. C. R., & Felosopo, H. J. F. (2026). Spatial Clustering and Analysis of Microearthquakes in Tiwi Geothermal Field through OPTICS Algorithm.
- Ma, B., Yang, C., Li, A., Chi, Y., & Chen, L. (2023). A Faster DBSCAN Algorithm Based on Self-Adaptive Determination of Parameters. *Procedia Computer Science*, 221, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.07.017>.
- Moulavi, D., Jaskowiak, P. A., Campello, R. J. G. B., Zimek, A., & Sander, J. (2014). *Density-based clustering validation*. *Proceedings of the 2014 SIAM International Conference on Data Mining. Society for Industrial and Applied Mathematics*, 839–847. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973440.96>.

- Mustakim, Rahmi, E., Mundzir, M. R., Rizaldi, S. T., Okfalisa, & Maita, I. (2021, July 4). Comparison of DBSCAN and PCA-DBSCAN Algorithm for Grouping Earthquake Area. 2021 *International Congress of Advanced Technology and Engineering, ICOTEN 2021*. <https://doi.org/10.1109/ICOTEN52080.2021.9493497>.
- Nurdin, N., Pujiastuti, D., & Marzuki, M. (2022). Analisis Kecepatan Pergeseran Seismik Sesar Palu Koro Akibat Gempa Palu 2018 Menggunakan Data Global Navigation Satellite System. *Jurnal Fisika Unand*, 11(4), 428–434. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.4.428-434.2022>
- Piegari, E., Camanni, G., Mercurio, M., & Marzocchi, W. (2024). Illuminating the Hierarchical Segmentation of Faults Through an Unsupervised Learning Approach Applied to Clouds of Earthquake Hypocenters. *Earth and Space Science*, 11(10). <https://doi.org/10.1029/2023EA003267>.
- Supendi, P., Ramdhan, M., Priyobudi, Sianipar, D., Wibowo, A., Gunawan, M. T., Rohadi, S., Riama, N. F., Daryono, Prayitno, B. S., Murjaya, J., Karnawati, D., Meilano, I., Rawlinson, N., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Marliyani, G. I., Palgunadi, K. H., & Elsera, E. M. (2021). Foreshock–mainshock–aftershock sequence analysis of the 14 January 2021 (Mw 6.2) Mamuju–Majene (West Sulawesi, Indonesia) earthquake. *Earth, Planets and Space*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01436-x>.
- Tampubolon, S. P., Sarasantika, I. P. E., & Suarjana, I. W. G. (2022). Analisis Kerusakan Struktur Bangunan dan Manajemen Bencana Akibat Gempa Bumi, Tsunami, dan Likuifaksi di Palu. *Bentang : Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 10(2), 169–186. <https://doi.org/10.33558/bentang.v10i2.3263>.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>.