

Analisis Geometri Segmen Sianok Berdasarkan Hasil Relokasi Gempabumi

Farrastha Hady¹, Anne Meylani Magdalena Sirait¹, Supriyadi², Suaidi Ahadi²

¹ Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, 16424, Indonesia

² Stasiun Geofisika Kelas I Padang Panjang, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Padang Panjang, Indonesia

*Narahubung: hady.farrastha@gmail.com

Abstrak

Sesar Sianok merupakan salah satu sesar aktif di Sumatra Barat yang berpotensi memicu gempabumi merusak, sehingga pemahaman geometri dan segmentasinya sangat penting untuk kajian bahaya seismik di kawasan ini. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis geometri segmen Sianok berdasarkan hasil relokasi gempabumi, dengan fokus pada parameter arah *strike*, kemiringan (*dip*), panjang, dan kedalaman segmen. Wilayah penelitian terletak di sekitar segmen Sianok, dengan batas koordinat 100 BT–101° BT dan 0,8° LS–0,2° LU. Data yang digunakan berupa waktu tiba gelombang gempa P dan S (*arrival time*) dari BMKG dengan rentang waktu Oktober 2021 hingga April 2025. Relokasi dilakukan menggunakan metode *double-difference* untuk memperoleh lokasi hiposenter yang lebih presisi karena mampu meningkatkan akurasi lokasi hiposenter dengan meminimalkan error waktu tiba relatif antar pasangan gempa. Hasil relokasi menunjukkan peningkatan akurasi posisi gempa, yang divalidasi menggunakan kurva residual, metode *jackknife*, uji *robustness*, serta analisis arah perpindahan episenter gempa melalui diagram rose dan diagram kompas. Berdasarkan hasil analisis, jalur sesar terbagi menjadi lima segmen dengan arah *strike* dominan barat laut–tenggara (NW–SE). Panjang segmen bervariasi antara 4,44 km hingga 13,32 km. Sebagian besar segmen memiliki kemiringan curam (*dip* > 65°), mencerminkan dominasi mekanisme sesar geser. Kedalaman hiposenter berada di kisaran 0–30 km, dengan konsentrasi pada kedalaman 5–15 km. Segmentasi sesar ini bersifat tidak kontinyu, ditunjukkan oleh pemisahan kluster gempa yang membentuk segmen-segmen terpisah, masing-masing dengan potensi kegempaan tersendiri. Temuan ini penting karena memberikan dasar ilmiah untuk pemodelan potensi bahaya gempabumi di sekitar sesar Sianok serta memperkuat pemahaman mengenai dinamika seismotektonik di Sumatra Barat.

Kata Kunci: Sesar Sianok, Geometri Sesar, *Double-difference*, Segmentasi Sesar.

1. Pendahuluan

Pulau Sumatera merupakan wilayah yang sangat aktif secara tektonik karena berada pada zona tumbukan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Aktivitas subduksi di wilayah Sumatra bersifat miring (*oblique subduction*), sehingga selain menghasilkan komponen penunjaman tegak lurus ke palung, juga menimbulkan komponen geser sejajar palung. Komponen geser inilah yang tidak dapat sepenuhnya tersalurkan ke zona subduksi, sehingga dilepaskan melalui pembentukan Sesar Sumatera, suatu sistem patahan besar yang memanjang dari ujung utara hingga selatan pulau, dan terbagi menjadi 19 segmen (Sieh & Natawidjaja, 2000). Kondisi

ini berbeda dengan di Jawa, di mana subduksi terjadi hampir tegak lurus (*orthogonal subduction*), sehingga energi tektonik lebih banyak tersalurkan ke zona *megathrust* dan aktivitas vulkanisme, tanpa membentuk sesar besar yang sejajar dengan busur kepulauan (Koulali et al., 2017). Dari jumlah tersebut, tujuh segmen melewati wilayah Sumatera Barat, yaitu Angkola, Barumon, Sumani, Suliti, Sianok, Siulak, dan Sumpur. Di antara ketujuh segmen tersebut, Segmen Sianok dikenal sebagai salah satu segmen aktif, dengan laju geser (*slip rate*) sebesar 14 mm/tahun (PUSGEN, 2017) dan panjang sekitar 90 km. Segmen ini berpotensi menghasilkan gempa kuat hingga magnitudo 7.3 (Natawidjaja, 2007).

Meskipun berada dalam wilayah yang sama dengan Segmen Sumani dan Sumpur, Segmen Sianok menjadi fokus utama dalam penelitian ini karena menunjukkan tingkat seismisitas yang lebih tinggi. Hal ini terlihat pada katalog BMKG periode 2021–2025, di mana distribusi kejadian gempa di sekitar segmen ini relatif rapat, mencerminkan aktivitas tektonik yang intens dan berkelanjutan. Selain itu, data historis juga mencatat beberapa gempa besar yang bersumber dari segmen ini, seperti gempa Padang Panjang tahun 1926 (M 7.6), gempa besar tahun 1822, dan dua gempa berurutan pada Maret 2007 (M 6.4 dan M 6.3) (BNPB, 2023). Rentetan gempa ini menunjukkan bahwa Segmen Sianok telah aktif selama lebih dari satu abad dan memiliki potensi seismik yang signifikan.

Untuk memahami potensi bahaya gempa secara lebih menyeluruh, diperlukan informasi detail mengenai geometri sesar, seperti arah jurus (*strike*), kemiringan bidang sesar (*dip*), panjang sesar, dan kedalaman patahan. Karakteristik geometris ini berkaitan erat dengan mekanisme deformasi kerak, arah pergerakan sesar, dan pola pelepasan energi seismik. Oleh karena itu, akurasi dalam penentuan lokasi gempa sangat penting agar dapat merekonstruksi geometri sesar secara baik.

Metode *double-difference* (DD) merupakan salah satu teknik relokasi gempa yang efektif karena mampu meningkatkan akurasi lokasi relatif dengan meminimalkan perbedaan waktu tiba antar pasangan gempa berdekatan (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Pendekatan ini menghasilkan resolusi spasial tinggi, sehingga pola sebaran hiposenter dapat terungkap lebih detail. Efektivitas metode ini telah dibuktikan di berbagai studi, seperti pada Patahan Hayward,

California (Waldhauser & Ellsworth, 2000), wilayah Tecomán, Meksiko (Andrews et al., 2010), dan Sumatera Barat (Syafriani et al., 2023). Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa metode ini dapat menghasilkan distribusi hiposenter yang lebih rapat dan terstruktur, mencerminkan geometri sesar aktif yang sebelumnya kurang teridentifikasi. Dengan hasil relokasi gempabumi ini, kajian geometri sesar menjadi lebih baik dan dapat digunakan sebagai dasar dalam pemodelan sumber gempa serta mitigasi bencana.

Penelitian ini bertujuan untuk (1) merelokasi kejadian gempa bumi di sekitar Segmen Sianok dengan metode *double-difference* untuk memperoleh distribusi episenter dan hiposenter yang lebih presisi, (2) menganalisis geometri sesar berdasarkan hasil relokasi tersebut, termasuk arah jurus, kemiringan, panjang, dan kedalamannya, serta (3) mengkaji segmentasi internal dan potensi seismik sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana di wilayah Sumatera Barat. Penelitian ini dibatasi pada wilayah 100° – 101° BT dan 0.8° LS– 0.2° LU, dengan data arrival time yang bersumber dari Stasiun Geofisika Padang Panjang untuk periode September 2021 hingga April 2025.

2. Data dan Metode

Data

Data yang digunakan adalah *arrival time* fase P dari 512 kejadian gempa yang tercatat oleh Stasiun Geofisika BMKG Padang Panjang selama periode Oktober 2021 hingga April 2025. Area studi dibatasi pada koordinat 100° – 101° BT dan 0.8° LS – 0.2° LU, yang mencakup jalur Segmen Sianok. Data arrival time kemudian difilter berdasarkan batas secara spasial agar hanya mencakup kejadian dalam batas wilayah tersebut.

Model Kecepatan

Pada penelitian ini, digunakan dua jenis model kecepatan, yaitu model kecepatan lokal dan global. Model kecepatan lokal yang digunakan merupakan model satu-dimensi (1-D) yang dibuat oleh Sihotang (2024) berdasarkan kejadian gempa bumi dengan magnitudo M_w 6.1 yang terjadi di Pasaman pada tahun 2022.

Tabel 1. Model Kecepatan Seismik Lokal (Sihotang, 2024)

Depth (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0-4	4.2	2.88
4-8	4.43	2.95
8-12	5.4	3.12
12-20	4.49	3.41
20-30	5.86	3.56
30-40	5.86	3.9
40-60	8.03	4.58
60-80	8.71	4.72
80-100	8.75	4.75
>100	8.75	4.75

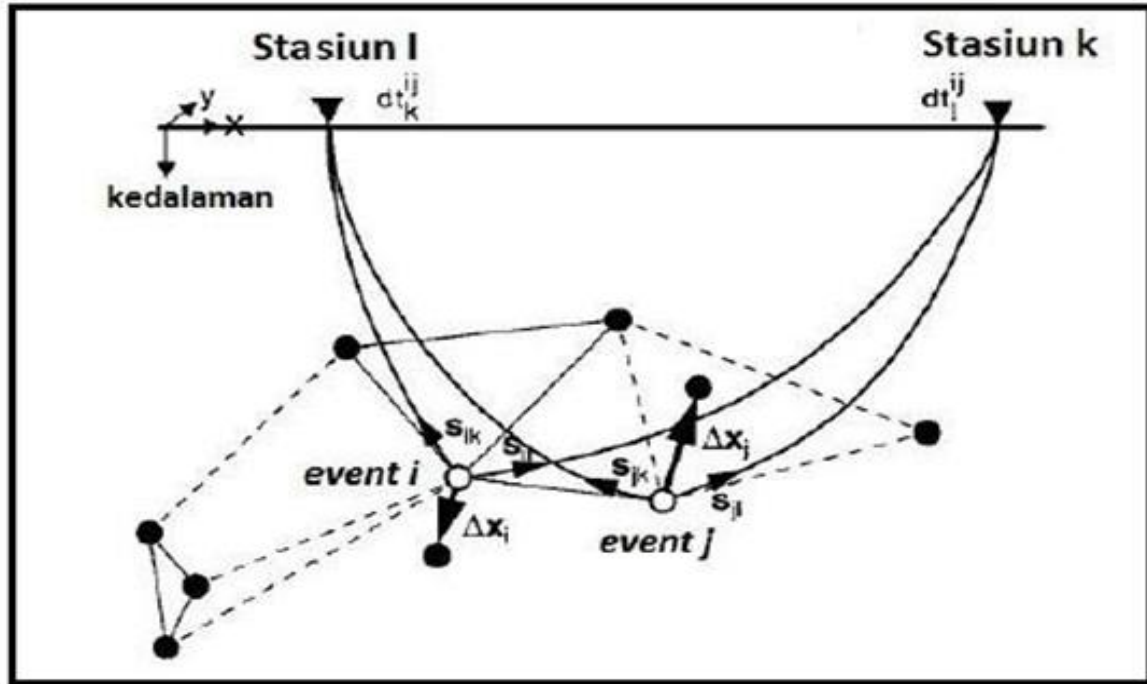
Model kecepatan pada Tabel 1 hanya merepresentasikan struktur kecepatan hingga kedalaman 100 km, sehingga kurang memadai untuk memodelkan gempa-gempa yang berasosiasi dengan zona lebih dalam. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, digunakan model kecepatan global AK135 (Tabel 2) guna menangkap karakteristik gelombang seismik dari gempa-gempa yang terjadi pada kedalaman lebih dari 120 km.

Tabel 2. Model kecepatan AK135 (Kennett, 1995)

Depth (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
120-165	8.05	4.5
165-210	8.175	4.509
210-260	8.3	4.518
260-310	8.483	4.609
310-360	8.665	4.696
360-410	8.847	4.783
410-460	9.03	4.87
460-510	9.528	5.186
510-560	9.696	5.292
560-610	9.864	5.398
610-660	10.032	5.504
660-710	10.2	5.61
710-760	10.923	6.09
>760	11.056	6.209

Metode Double Difference

Metode *double-difference* (DD) merupakan teknik relokasi hiposenter yang mengandalkan perbedaan waktu tiba antar pasangan gempa berdekatan yang tercatat di stasiun yang sama. Metode ini meminimalkan pengaruh ketidakpastian model kecepatan gelombang serta kesalahan sistematik pencatatan waktu tiba, sehingga menghasilkan lokasi gempa dengan presisi spasial lebih tinggi (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Prinsip kerjanya adalah bahwa dua gempa yang lokasinya sangat dekat akan memiliki jalur rambat gelombang yang hampir sama, sehingga selisih waktu tiba terutama mencerminkan perbedaan lokasi hiposenter secara relatif. Metode ini efektif digunakan jika distribusi gempa cukup rapat dan data *arrival time* tersedia dengan baik.



Gambar 1. Ilustrasi dari algoritma metode *Double Difference*. Gempa i dan j direlokasi bersama terhadap stasiun k dan l (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

Residual waktu tempuh relatif antara dua hiposenter yang berdekatan dalam satu kluster dapat dirumuskan sebagai:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (1)$$

i dan j = dua hiposenter yang saling berdekatan

k dan l = dua stasiun yang merekam kedua kejadian gempa tersebut

t_k^i = waktu tempuh dari gempa i yang direkam oleh stasiun k

dr_k^{ij} = waktu tempuh residual antara pasangan gempa i dan j pada stasiun k

t^{obs} = waktu tempuh observasi (yang terekam oleh stasiun penerima)

t^{cal} = waktu tempuh kalkulasi (diperoleh dari perhitungan berdasarkan *ray tracing* pada model kecepatan)

Dari persamaan *time residual* tersebut akan dilanjutkan ke inversi untuk merelokasi gempabumi menggunakan persamaan berikut:

$$WG\mathbf{m} = W\mathbf{d} \quad (2)$$

W = matriks diagonal untuk pembobotan setiap persamaan

G = matriks turunan parsial parameter hiposenter

M = data vektor perturbasi parameter setiap hiposenter pada satu cluster, yaitu $[dx \ dy \ dz \ dt]^T$

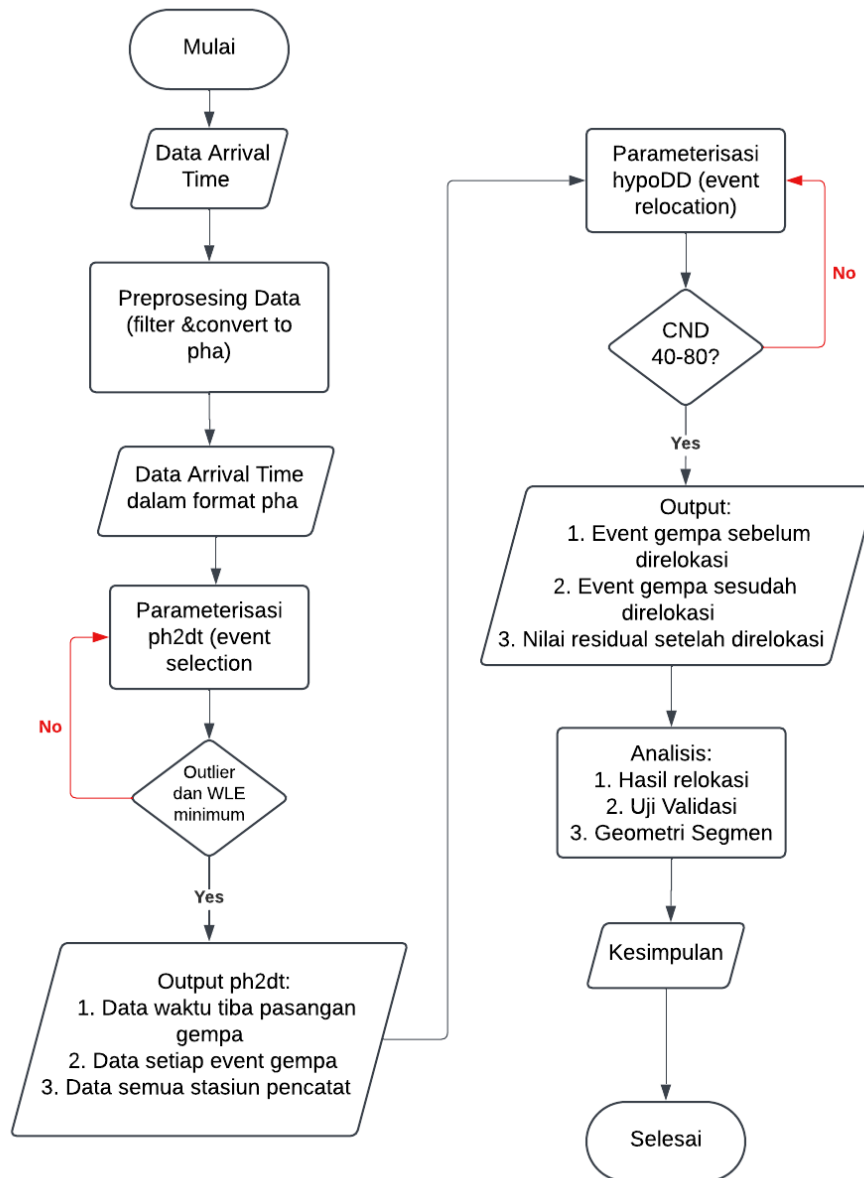
d = data waktu tempuh residual untuk setiap pasangan gempa yang diterima pada stasiun, yaitu $[dr_k^{12} \ dr_k^{13} \ dr_k^{23} \ \dots \ dr_k^{ij}]^T$

Proses inversi dilakukan secara iteratif, di mana posisi hiposenter diperbarui berulang kali hingga diperoleh nilai residual minimum. Jumlah iterasi tidak ditentukan secara kaku, melainkan dilanjutkan sampai residual tidak lagi menunjukkan perubahan signifikan atau telah mencapai nilai terkecil yang mungkin. Pada perangkat lunak HypoDD, jumlah iterasi dapat diatur hingga ribuan, meskipun umumnya konvergensi tercapai dalam puluhan hingga ratusan iterasi (Waldhauser & Ellsworth, 2000).

Alur Penelitian

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data arrival time gempa bumi yang kemudian diproses awal melalui filtering dan konversi ke format .pha. Data tersebut diseleksi menggunakan ph2dt untuk menghilangkan outlier dan memilih event dengan kesalahan minimum, sehingga hanya data berkualitas yang digunakan. Selanjutnya, relokasi hiposenter dilakukan menggunakan HypoDD, dengan pembaruan posisi event secara iteratif.

Hasil relokasi kemudian dievaluasi menggunakan nilai *Condition Number* (CND), di mana hanya iterasi dengan CND 40–80 yang dipertahankan karena kisaran ini menunjukkan solusi yang stabil dan presisi (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Dari data yang diseleksi tersebut diperoleh distribusi episenter dan hiposenter baru, yang selanjutnya dianalisis untuk validasi serta interpretasi geometri segmen Sianok.



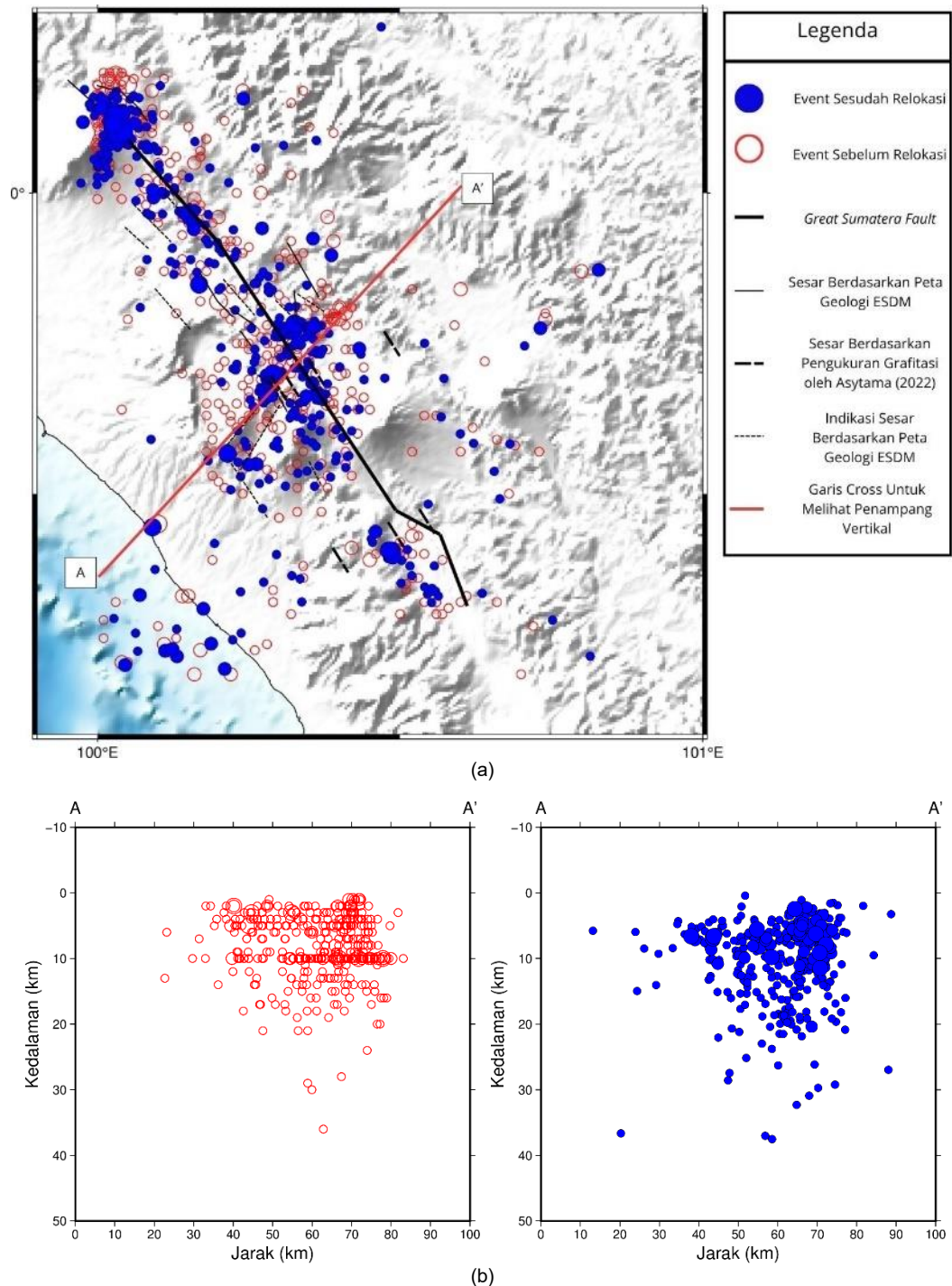
Gambar 2. Diagram Alur Pengolahan Data

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Relokasi

Sebanyak 442 dari 512 kejadian gempa berhasil direlokasi menggunakan metode *double-difference*. Peta distribusi episenter menunjukkan peningkatan presisi lokasi setelah relokasi. Sebelum relokasi, episenter tersebar

secara acak dan tidak menunjukkan keterkaitan spasial yang jelas dengan jalur sesar. Namun, setelah relokasi, episenter membentuk pola linier sejajar arah utara–selatan, yang sesuai dengan jalur Sesar Sianok, memperjelas keterkaitannya dengan struktur geologi aktif di wilayah tersebut



Gambar 3 (a) Distribusi episenter sebelum dan sesudah relokasi, dan (b) penampang vertikal berdasarkan garis A-A'

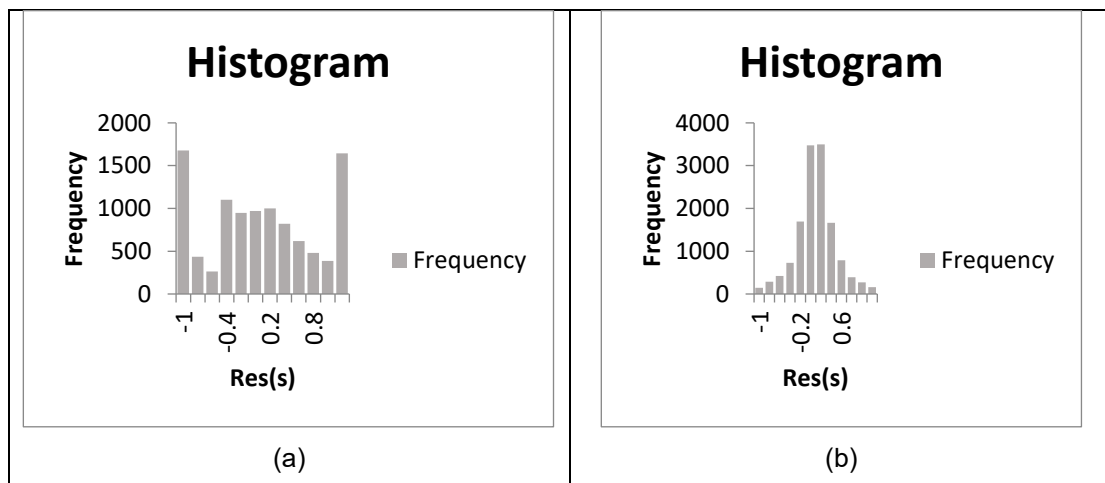
Penampang vertikal A–A' menunjukkan distribusi hiposenter yang lebih menyebar dan realistis setelah relokasi. Hiposenter yang sebelumnya terkonsentrasi pada kedalaman sekitar 10 km kini terlihat lebih tersebar antara 5 hingga 30 km, dengan dominasi pada kisaran 5–15 km. Pola ini menegaskan bahwa relokasi memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai deformasi di kerak atas yang aktif secara tektonik.

Uji Validasi

Uji validasi dilakukan untuk memastikan hasil relokasi benar-benar meningkatkan presisi lokasi hiposenter dibandingkan data awal. Pada penelitian ini, validasi mencakup analisis kurva residual, uji sensitivitas dengan metode *jackknife* dan *robustness*, serta evaluasi arah dominan distribusi gempa menggunakan

diagram rose dan kompas. Pendekatan ini menilai kualitas, kestabilan, dan keandalan hasil relokasi secara menyeluruh.

- Kurva residual pada Gambar 4 menunjukkan peningkatan kualitas hasil relokasi. Sebelum relokasi, nilai residual menyebar lebar (-1 s hingga $+1$ s) dan tidak simetris. Setelah relokasi, distribusi menjadi simetris, terpusat di sekitar 0 s, menandakan kesesuaian lebih baik antara data observasi dan hasil kalkulasi. Residual digunakan sebagai uji validasi karena menunjukkan selisih antara waktu tiba observasi dan hasil perhitungan; semakin kecil dan terdistribusi normal di sekitar nol, semakin baik akurasi model dalam merepresentasikan kondisi sebenarnya (Waldhauser & Ellsworth, 2000).



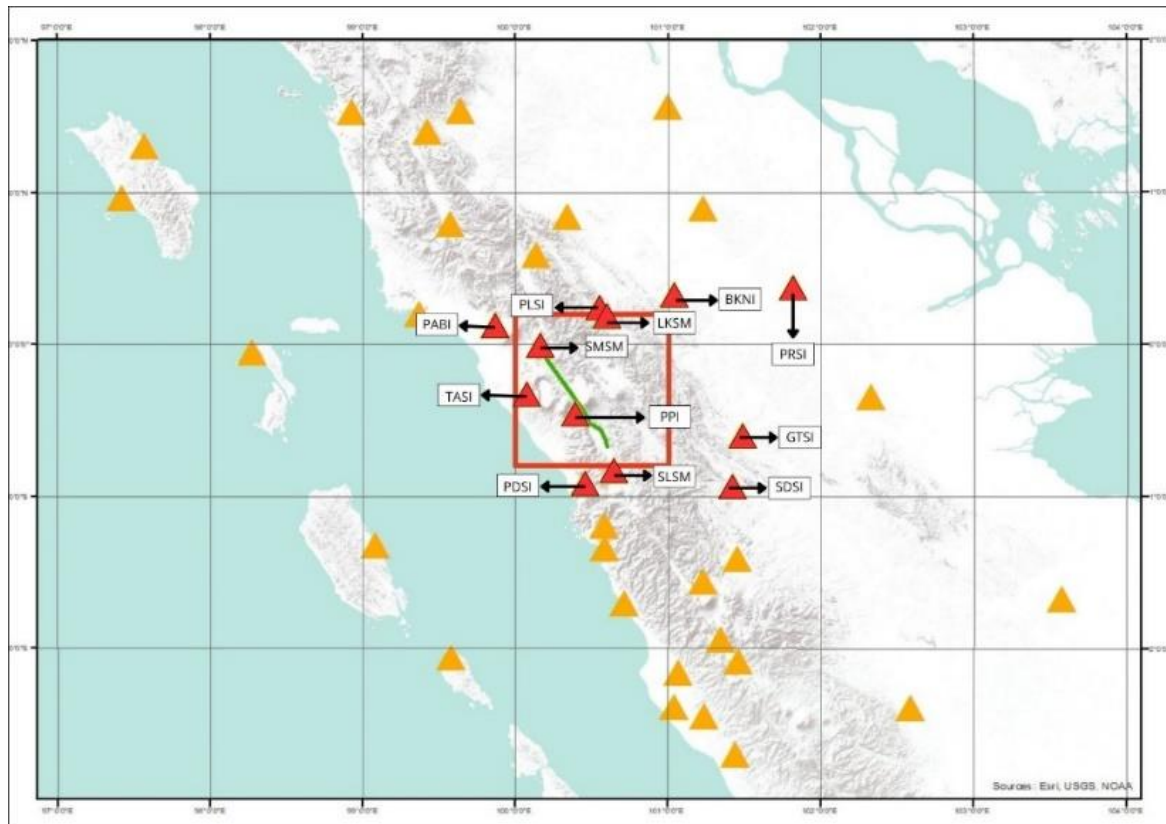
Gambar 4 : (a) Kurva residual sebelum direlokasi, (b) Kurva residual setelah direlokasi

- Uji validasi dengan metode *jackknife* dilakukan untuk menilai kestabilan hasil relokasi terhadap variasi distribusi stasiun, dengan cara menghilangkan satu stasiun utama pada setiap iterasi dan membandingkan hasilnya dengan relokasi awal. Nilai standar deviasi yang diperoleh

sangat kecil pada komponen horizontal (<0.01 km) dan sedikit lebih besar pada kedalaman (0.84 km), namun masih berada dalam batas toleransi yang umum digunakan. Mengacu pada kriteria USGS (≤ 0.1 km horizontal dan ≤ 0.3 km vertikal) serta D'Alessandro et al. (2011) (≤ 1 km

untuk episenter dan ≤ 3.5 km untuk kedalaman), hasil ini menunjukkan bahwa relokasi yang dilakukan cukup stabil dan

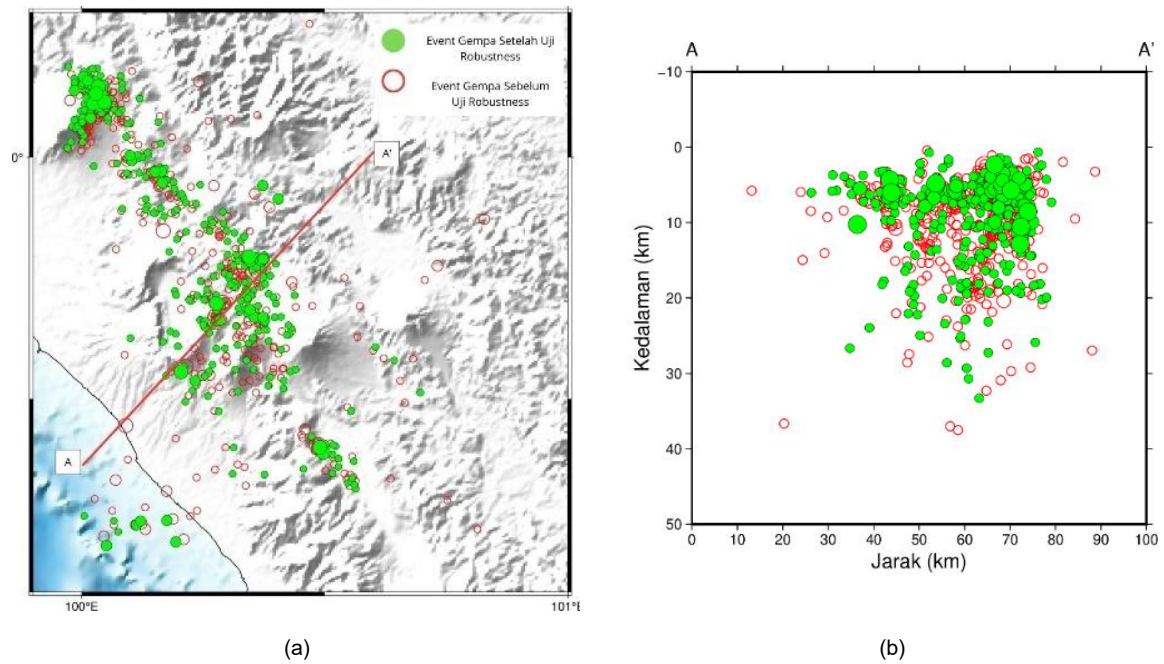
akurat dalam menentukan posisi hiposenter.



Gambar 5. Stasiun-stasiun yang dipilih sebagai stasiun utama (segitiga merah)

- Uji *robustness* dilakukan untuk menilai kestabilan hasil relokasi terhadap variasi jumlah data dengan cara mengurangi sebagian event gempa dari dataset. Setelah event dikurangi, proses relokasi dijalankan kembali menggunakan HypoDD dan hasilnya dibandingkan dengan relokasi awal (Gambar 6). Distribusi episenter sebelum dan sesudah uji *robustness* tampak saling tumpang tindih pada arah horizontal, menunjukkan stabilitas hasil relokasi

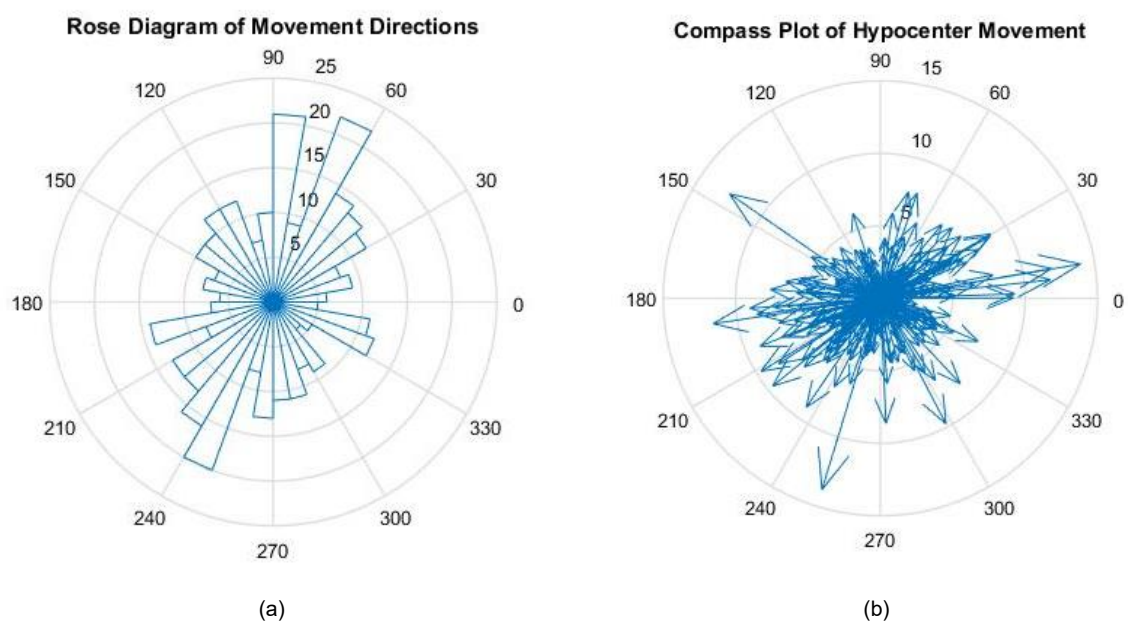
terhadap perubahan input. Pada penampang vertikal terlihat sedikit penyebaran tambahan pada kedalaman, yang wajar karena parameter kedalaman lebih sensitif terhadap distribusi stasiun dan model kecepatan. Secara keseluruhan, uji *robustness* menunjukkan bahwa hasil relokasi cukup stabil, terutama pada dimensi horizontal, meskipun terdapat fluktuasi kecil pada kedalaman.



Gambar 6. Perbandingan distribusi episenter gempa default (bola kosong berwarna merah) dengan episenter gempa setelah uji *robustness* (bola hijau), (a) peta horizontal (b) penampang vertikal.

- Analisis diagram Rose dan kompas (Gambar 7) memperlihatkan bahwa perpindahan episenter setelah relokasi didominasi oleh arah timur laut–barat daya (NE–SW), yang sejalan dengan jurus utama Sesar Sianok. Kesesuaian orientasi ini

menunjukkan bahwa hasil relokasi tidak hanya stabil secara statistik, tetapi juga konsisten dengan struktur geologi yang telah dipetakan sebelumnya (Sieh & Natawidjaja, 2000; Natawidjaja, 2007).



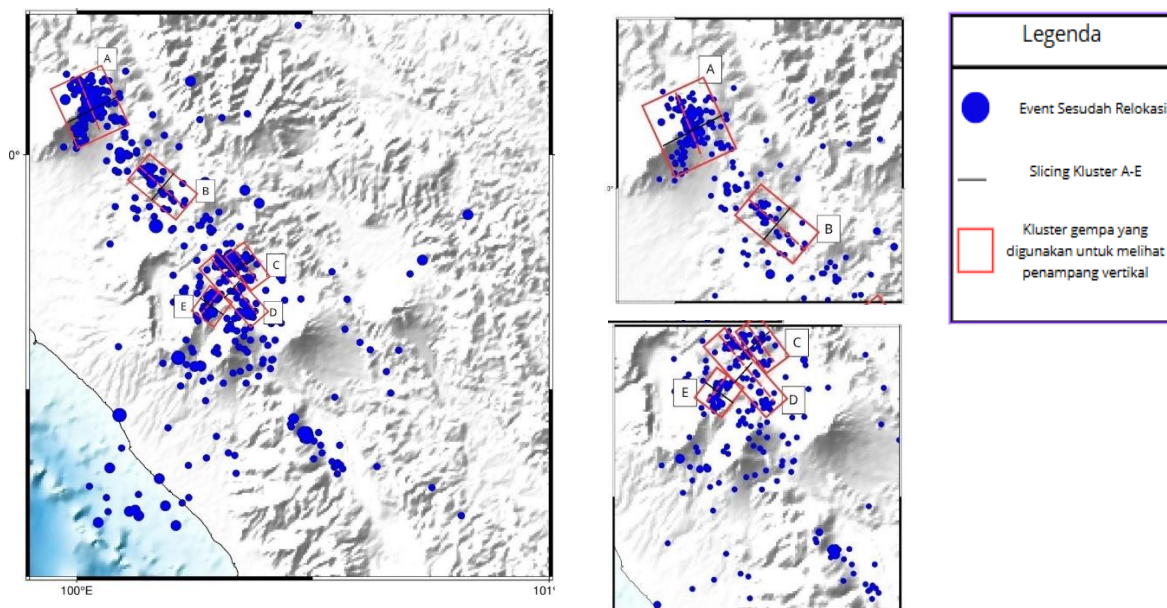
Gambar 7. (a) Diagram Rose (b) Diagram Kompas

Analisis Segmen

Distribusi episenter hasil relokasi menunjukkan pola spasial yang terkluster dengan orientasi searah jalur sesar, sehingga dapat diinterpretasikan sebagai lima segmen aktif (A–E) dari jalur Sesar Sianok. Penentuan segmen ini dilakukan berdasarkan distribusi episenter, arah jurus, dan keberadaan celah

(gap) antar kluster.

Arah jurus dominan segmen A hingga D adalah barat laut–tenggara (NW–SE), sesuai dengan arah umum Sesar Sumatera. Sementara itu, segmen E menunjukkan arah jurus yang menyilang, yaitu barat daya–timur laut (SW–NE), yang kemungkinan mencerminkan struktur transversal atau rekahan lokal.

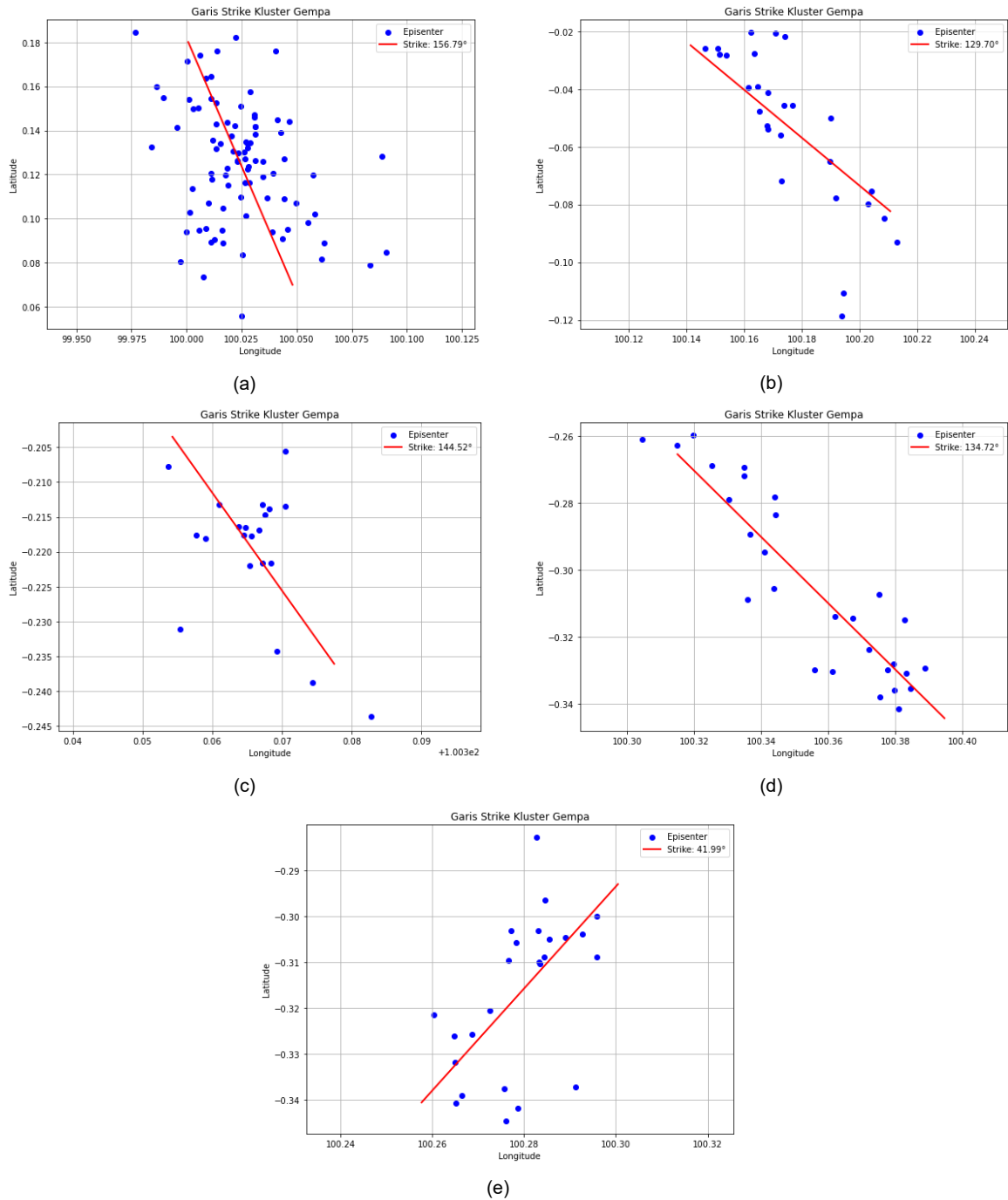


Gambar 8. Kluster gempa dan *cross section*-nya

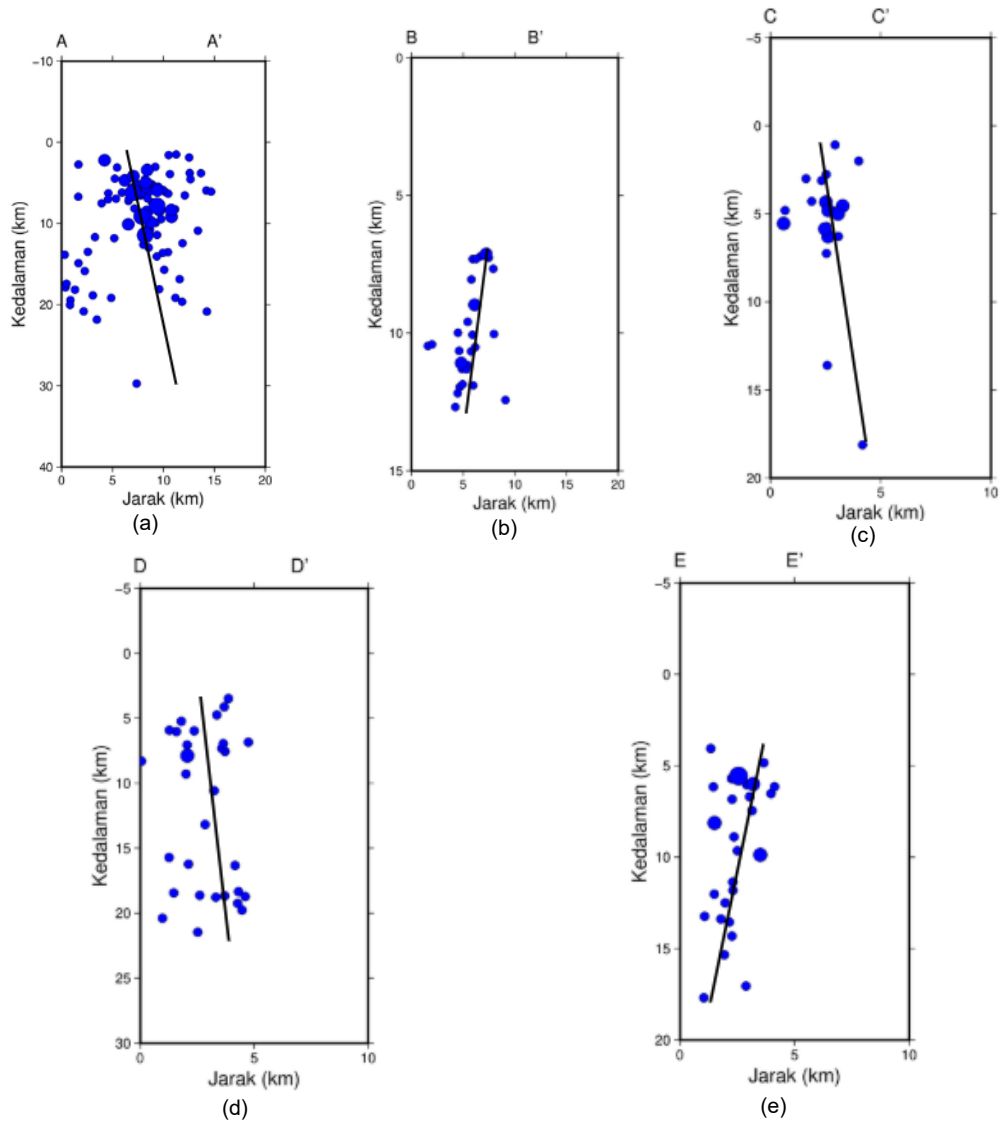
Panjang masing-masing segmen bervariasi, dengan segmen A sebagai yang terpanjang mencapai 13.32 km, disusul segmen D (12.21 km), B (11.10 km), E (6.66 km), dan C sebagai segmen terpendek (4.44 km). Distribusi hiposenter pada penampang vertikal memperlihatkan kemiringan bidang patahan yang curam ($dip > 65^\circ$) di semua segmen. Kemiringan ini konsisten dengan karakteristik sesar geser (*strike-slip fault*) sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian sebelumnya di Sesar Sumatera (Sieh & Natawidjaja, 2000;

Natawidjaja, 2007).

Rentang kedalaman hiposenter juga berbeda antar segmen. Segmen A dan D memiliki distribusi terdalam, yaitu 5–25 km dan 6–28 km, sedangkan segmen B (6–18 km), C (6–15 km), dan E (5–13 km) menunjukkan aktivitas pada kedalaman yang relatif dangkal. Konsentrasi utama hiposenter berada di kedalaman 5–15 km, yang mencerminkan deformasi kerak atas aktif sebagai zona seismogenik.



Gambar 9. Strike segmen sesuai klusternya, (a) Kluster A, (b) Kluster B, (c) Kluster C, (d) Kluster D, (e) Kluster E.



Gambar 10. Cross-section tiap Segmen dari A-E.

Segmentasi dan Potensi Gempa

Segmentasi sesar menunjukkan bahwa jalur Sesar Sianok tidak berupa satu bidang lurus tunggal, melainkan terdiri dari beberapa segmen aktif yang bergerak relatif independen. Masing-masing segmen memiliki panjang dan kedalaman berbeda sehingga memengaruhi potensi seismiknya. Jika dibandingkan dengan segmen lain di jalur Sesar Besar Sumatera, pola serupa juga terlihat, misalnya pada Segmen Renun, Toru, dan Angkola yang dipisahkan oleh patahan kecil atau *step-over*, sehingga masing-masing segmen memiliki

karakteristik seismik yang berbeda (Sieh & Natawidjaja, 2000). Hal ini mengindikasikan bahwa segmentasi merupakan ciri umum dari sistem sesar besar di Sumatera.

Fenomena serupa juga ditemukan pada Patahan San Andreas di California. Hasil relokasi gempabumi dengan metode *double-difference* yang dilakukan oleh Waldhauser & Ellsworth (2002) memperlihatkan struktur patahan yang tersegmentasi dengan jelas, termasuk sub-segmen pada bagian Patahan Parkfield dan Hayward. Studi tersebut menegaskan bahwa gempa kecil yang

terdistribusi rapat dapat digunakan untuk mengidentifikasi geometri sesar dan pembagian segmen yang berperan dalam pengendalian seismisitas regional (Waldhauser & Ellsworth, 2002; Waldhauser & Schaff, 2008).

Tabel 3. Potensi gempa di setiap segmen

Segmen	Panjang	Potensi Gempa (Mw)
A	13.32	6.01
B	11.1	5.89
C	4.44	5.29
D	12.21	5.95
E	6.66	5.56

Secara umum, semakin panjang suatu segmen, semakin besar pula potensi magnitudo gempa yang dapat dihasilkannya. Segmentasi berperan penting dalam memahami akumulasi tegangan serta potensi gempa lokal pada suatu wilayah. Pemahaman ini juga menjadi dasar dalam perencanaan strategi mitigasi risiko bencana.

4. Kesimpulan

Relokasi 442 gempa dengan metode *double-difference* berhasil meningkatkan akurasi lokasi, yang terkonfirmasi melalui uji residual, *jackknife*, dan *robustness*. Distribusi episenter dan hiposenter menunjukkan keterkaitan yang jelas dengan jalur Segmen Sianok, dengan orientasi NE–SW sejalan struktur geologi regional. Analisis geometri mengungkap lima segmen aktif (A–E) dengan jurus dominan NW–SE dan kemiringan curam ($\text{dip} > 65^\circ$), dengan aktivitas gempa terkonsentrasi pada kedalaman 5–15 km. Segmentasi ini menunjukkan bahwa setiap segmen berpotensi menghasilkan gempa sendiri, dengan estimasi magnitudo Mw 5,29–6,01.

Referensi

- Andrews, V., Joann, S., Vazquez, C. A., & Davila, G. R. (2011). Double-difference relocation of the aftershocks of the Tecomán, Colima, Mexico earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 168(10), 1907–1925. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0203-0>
- Asy'tama, H. S. (2022). *Identifikasi sesar Sumatera segmen Sianok menggunakan metode MS-SVD (Multi Scale - Second Vertical Derivative) data gravitasi untuk mitigasi kebencanaan seismik* [Undergraduate thesis, Universitas Indonesia]. Universitas Indonesia Repository.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2023, April 8). *Gempa Padang Panjang 28 Juni 1926 dalam surat kabar kolonial*. Portal Literasi Sejarah Bencana. <https://sejarah.dibi.bnpp.go.id/artikel/gempa-padang-panjang-28-juni-1926-dalam-surat-kabar-kolonial/65>
- D'Alessandro, A., Luzio, D., D'Anna, G., & Mangano, G. (2011). Seismic network evaluation through simulation: An application to the Italian National Seismic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3), 1213–1232. <https://doi.org/10.1785/0120100066>
- Efron, B. (1982). *The jackknife, the bootstrap, and other resampling plans*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (n.d.). *Peta geologi Sumatera Barat* [Geological map]. Geomap. Retrieved October 6, 2025, from <https://geologi.esdm.go.id/geomap/pa/ges/province/13>
- Kennett, B. L. N. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122(1), 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x>
- Koulali, A., McClusky, S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning, P., Meilano, I., Efendi, J., & Wijanarto, A. B. (2017). The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: Implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, 458, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.039>
- Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Academic Press.
- Natawidjaja, D. H. (2007). The Sumatran Fault Zone - From source to hazard. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 1(1), 21–

47. <https://doi.org/10.1142/S1793431107000037>.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Salman, R., Lindsey, E. O., Feng, L., & Bradley, K. (2020). Structural controls on rupture extent of recent Sumatran Fault Zone earthquakes, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(4), e2019JB018101. <https://doi.org/10.1029/2019JB018101>
- Sieh, K., & Natawidjaja, D. (2000). Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28295–28326. <https://doi.org/10.1029/2000JB900120>
- Sihotang, B. (2024). An updated 1-dimensional seismic velocity model for the Mw 6.1 Pasaman earthquake that occurred on February 25, 2022. *Journal of Applied Geospatial Information*, 8(1), 1786–1793. <https://doi.org/10.30871/jagi.v8i1.7593>
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure*. Blackwell Publishing.
- Supendi, P., Nugraha, A. D., Puspito, N. T., Widiyantoro, S., & Daryono, D. (2018). Identification of active faults in West Java, Indonesia, based on earthquake hypocenter determination, relocation, and focal mechanism analysis. *Geoscience Letters*, 5*, 31. <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0130-y>
- Syafriani, S. (2023). Study of seismicity based on the results of hypocenter relocation using double difference (HypoDD) method in West Sumatera and its surrounding. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9*(7), 4855–4862. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i7.3792>
- United States Geological Survey. (2020). *ANSS comprehensive earthquake catalog (ComCat) documentation*. Earthquake Hazards Program. Retrieved October 6, 2025, from <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>
- Waldhauser, F., & Schaff, D. P. (2008). Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8), B08311. <https://doi.org/10.1029/2007JB005479>
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. L. (2002). Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B3), ESE 5-1–ESE 5-15. <https://doi.org/10.1029/2000JB000084>
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- 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>
- Zhang, H., & Thurber, C. H. (2003). Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5), 1875–1889. <https://doi.org/10.1785/0120020190>