

Analisis Seismisitas dan Mekanisme Fokus Sesar Sumatera: Studi Kasus Segmen Semangko dan Selat Sunda

Andri Kurniawan¹, Arsy Nurrochman¹, Ahmad Zaenudin¹, Adhi Wibowo², Ridho Destawan¹, Rahmat Catur Wibowo^{1,*}, dan Irfan Hanif¹

¹ Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

² Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta, Indonesia

*E-mail: rahmat.caturwibowo@eng.unila.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis seismisitas dan mekanisme fokus di wilayah Sesar Semangko dan Sesar Sunda, yang terletak di daerah aktif tektonik Indonesia. Dengan merelokasi 1,464 gempa bumi dari tahun 2010 hingga 2023, kami menemukan pola distribusi gempa yang lebih terfokus, terutama di sekitar Sesar Semangko. Nilai RMSCT rendah dan Conditional Number (CN) dalam rentang 59–80 menunjukkan stabilitas dan akurasi hasil. Dua kluster gempa teridentifikasi, satu di Teluk Semangko dan satu di bagian selatan, yang mendorong analisis lebih lanjut menggunakan inversi momen tensor. Hasil inversi menunjukkan dominasi aktivitas tektonik dengan proporsi 67,2% untuk Double-Couple (DC) dan 32,8% untuk Compensated Linear Vector Dipole (CLVD), serta mengonfirmasi tipe sesar sebagai strike-slip dengan arah 350°, kemiringan 55°, dan rake 179°. Penyelidikan stres prinsipal menunjukkan adanya kesamaan mekanisme antara segmen Semangko dan Sunda, yang memperlihatkan arah regangan yang halus. Temuan ini memperdalam pemahaman mengenai interaksi sesar aktif di Indonesia dan implikasinya terhadap keselamatan masyarakat. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi lebih dalam dinamika seismik di wilayah ini.

Kata kunci: gempabumi, sesar. Mekanisme fokus

1. Pendahuluan

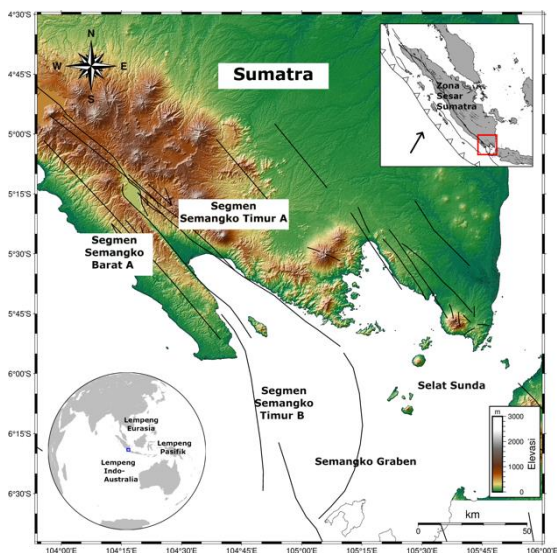
Indonesia terletak di kawasan Cincin Api Pasifik, yang terkenal dengan aktivitas tektonik yang sangat intens. Fenomena ini diakibatkan oleh interaksi antara lempeng-lempeng tektonik yang saling bertabrakan, menghasilkan berbagai gejala geologi, termasuk gempa bumi dan aktivitas vulkanik (Hutchings & Mooney, 2021; Irsyam dkk, 2017). Terdapat empat lempeng aktif, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Samudera Indo-Australia, Lempeng Samudera Pasifik, dan Lempeng Laut Filipina. Akibatnya, terbentuklah sesar-sesar aktif yang tersebar hampir di seluruh kepulauan Indonesia.

Sesar Sumatera merupakan salah satu struktur geologi aktif yang membentang sepanjang pulau Sumatera. Sesar ini terdiri dari 19 segmen, di antaranya Sesar

Semangko dan Sesar Sunda yang terletak di bagian paling selatan (Natawidjaja & Triyoso, 2007). Wilayah Sumatera bagian selatan (Gambar 1) terletak dalam zona transisi yang menunjukkan perubahan dari subduksi oblique lempeng Indo-Australia yang berada di bawah Sumatera menjadi subduksi yang hampir tegak lurus di bawah Jawa (Harjono dkk., 1991). Kontrol struktural di daratan Sumatera didominasi oleh sesar besar Sumatera, yang membentang dari sistem sesar transform Andaman di utara hingga Selat Sunda di selatan.

Segmentasi Sesar Semangko dan Sunda telah terpetakan dengan sangat baik (Fazrul Falah dkk., 2023). Penelitian oleh Sarkowi dkk., (2022) mengidentifikasi secara historis bahwa Sesar Semangko pernah mengalami gempa besar di sepanjang Patahan Semangko, di antaranya:

Komering 1893, Ranau 1903 (7,5 SR), Kotaagung 1908 (6,4 SR), Suoh 1933 (7,5 SR), dan terakhir Liwa 1994 (7 SR) (Widiwijayanti dkk., 1996). Pada tahun 1999, terjadi gempa signifikan di daerah Tampang (6,4 SR) dan pada tahun 2021 di daerah Kotaagung (5,2 SR).



Gambar 1. Peta tektonik wilayah Sumatera bagian selatan

Kegempaan yang terjadi di Segmen Sesar Sunda dan Sesar Semangko memiliki dampak luas, baik terhadap keselamatan masyarakat maupun pengembangan infrastruktur. Penelitian oleh Supendi dkk. (2022) mencatat bahwa sejak 30 Juni 2021 hingga saat ini, ratusan gempa bumi terdeteksi di bawah Teluk Semangko, Sumatera Selatan, dekat Selat Sunda, yang memisahkan pulau Jawa dan Sumatera. Beberapa gempa memiliki magnitudo yang cukup besar sehingga dapat dirasakan oleh penduduk di kota Lampung, yang berjarak sekitar 100 km ke timur. Hal ini menegaskan bahwa Sesar Semangko dan Sunda merupakan salah satu segmen aktif yang harus menjadi perhatian dalam studi seismik.

Pertanyaan yang muncul adalah apakah Sesar Sumatera berlanjut hingga ke Selat Sunda. Beberapa studi menunjukkan

adanya kesinambungan geologis antara kedua sesar ini (Alif dkk., 2021) namun mekanisme yang mendasarinya masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Analisis hubungan seismisitas dan tipe tekanan utama di kedua segmen ini dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai interaksi antara Sesar Sumatera Segmen Semangko dan Segmen Selat Sunda. Penelitian oleh Sahara dkk. (2018) menekankan pentingnya memahami pola tekanan di Sesar Sumatera, dengan memanfaatkan data mekanisme fokus dari kejadian gempa bumi yang pernah terjadi.

2. Metodologi

Data katalog gempa yang digunakan mencakup waktu kedatangan gelombang P dan S dari tahun 2010 hingga 2023, dengan lokasi penelitian terletak pada koordinat 5.7°LU – 6.7°LS dan 103°BT – 106°BT . Setelah proses relokasi, kami melanjutkan pemrosesan data mekanisme fokus dari peristiwa gempa yang terjadi di bagian selatan Sesar Semangko B. Meskipun beberapa data gelombang seismik digunakan, hanya satu peristiwa gempa yang dapat dilakukan inversi Tensor Momen Penuh, disebabkan oleh tingginya tingkat noise pada data lainnya. Data yang dianalisis memiliki magnitudo $\geq M_w 5.3$ dan kedalaman ≤ 28 km, yang terjadi pada 10 Mei 2023. Gelombang seismik dari gempa tersebut diunduh dari stasiun seismik yang dikelola oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Kelas II Lampung Utara. Kami mengadopsi model kecepatan satu dimensi (V_p , V_s) dari CRUST1.0 untuk kedalaman hingga lapisan Moho, serta model AK135 untuk lapisan yang lebih dalam.

Proses metodologi yang dilakukan meliputi: 1) Pengumpulan Data Katalog Gempa; 2) Relokasi Gempa Menggunakan Metode Double-Difference; 3) Pemrosesan

Mekanisme Fokus Melalui Full Moment Tensor Inversion; 4) Inversi Tekanan untuk Menentukan Tekanan Utama; 5) Analisis Hasil dan Validasi. Dalam penelitian ini, relokasi gempa bumi dilakukan melalui metode Double-Difference (Waldhauser, 2001). Metode ini efektif dalam mengurangi kesalahan posisi yang disebabkan oleh variasi kecepatan gelombang (Supendi dkk., 2021, 2022). Parameter kontrol yang digunakan mencakup MAXDIST, MAXSEP, MAXNGH, MINLINK, MINOBS, dan MAXOBS. Keluaran dari ph2dt digunakan sebagai masukan untuk program hypoDD, yang memerlukan penyesuaian parameter seperti tipe data, model kecepatan, dan iterasi.

Selanjutnya, kami memanfaatkan perangkat lunak Isolated Asperities (ISOLA) untuk memperkirakan solusi mekanisme fokus melalui Full Moment Tensor Inversion (Sokos & Zahradnik, 2008). Analisis mekanisme fokus dilakukan dengan meminimalkan perbedaan antara gelombang yang teramati dan yang disintesis melalui metode pencocokan gelombang kuadrat terkecil. Gelombang sintetik dihasilkan dari perhitungan fungsi Green. Solusi tensor momen dioptimalkan dengan melakukan pencarian grid spasi-temporal untuk menemukan korelasi terbaik antara ruang dan waktu (Kusumawati et al., 2023; Prasetyo et al., 2022). Selanjutnya, solusi mekanisme fokus diestimasi dari solusi tensor momen yang diperoleh.

Studi ini melibatkan gelombang dari empat hingga tujuh stasiun untuk setiap peristiwa, dengan batasan pada stasiun yang memiliki gelombang yang jelas. Sebelum proses inversi, gelombang dikoreksi dari respons instrumen, difilter, dan diselaraskan. Proses bandpass gelombang diterapkan lebih lanjut pada tahap inversi. Dalam proses bandpass ini, kami menetapkan frekuensi rendah 0.02 dan frekuensi tinggi

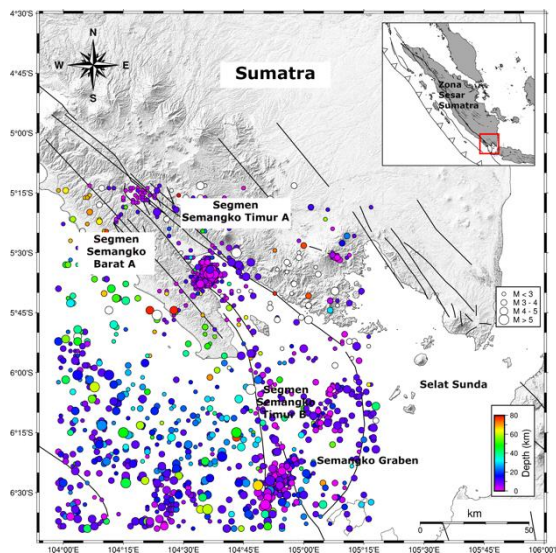
0.06 Hz. Kami mengevaluasi kualitas hasil inversi dengan mengamati pengurangan varians dan angka kondisi pada setiap percobaan, serta melakukan pemeriksaan visual terhadap kecocokan gelombang. Pengurangan varians (VR) berkaitan dengan sisa antara gelombang sintetik dan yang teramati, dan dianggap baik jika angkanya melebihi 0.4.

Akhirnya, penelitian ini mengkaji metode penentuan orientasi stres in-situ berdasarkan mekanisme fokus gempa, dengan asumsi bahwa stres tektonik bersifat uniform, gempa terjadi pada sesar yang ada, dan vektor slip searah dengan stres geser (Rafie dkk., 2021; Zhang dkk., 2022). Tantangan muncul ketika informasi mengenai nodal plane dan sesar tidak tersedia, sehingga pengembangan metode inversi simultan untuk orientasi stres dan sesar diperlukan. Orientasi sesar ditentukan melalui rasio stres geser terhadap stres normal, dan stres dihitung dengan proses iterasi. Teknik ini memungkinkan inversi orientasi stres utama tanpa mengetahui nodal plane yang merupakan sesar. Algoritma inversi stres yang dikembangkan oleh Vavricuk (2014) meliputi beberapa langkah, dimulai dari penerapan metode Michael secara standar hingga identifikasi bidang sesar berdasarkan ketidakstabilan nodal plane, yang diulang hingga konvergensi nilai stres tercapai.

3. Hasil dan Pembahasan

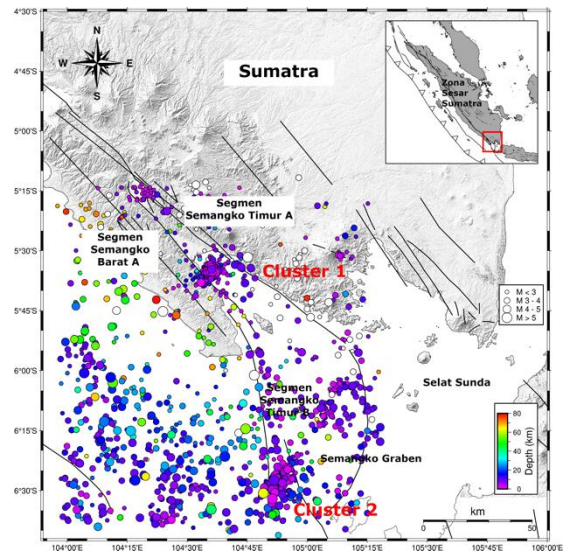
Penelitian ini berhasil merelokasi 1,464 gempa bumi dan menunjukkan bahwa distribusi gempa lebih mengikuti pola sesar aktif. Sebelum proses relokasi (Gambar 2), episenter gempa tersebar di seluruh kawasan, terutama di daerah subduksi dan sepanjang Sesar Semangko. Setelah relokasi (Gambar 3), hiposenter gempa bumi menunjukkan konsentrasi yang lebih terpusat, dengan dominasi gempa dangkal

di sekitar Sesar Semangko dan beberapa gempa menengah yang terkait dengan aktivitas tektonik di daerah subduksi. Hasil relokasi menunjukkan nilai RMSCT yang rendah dan CND dalam rentang 59-80, yang mengindikasikan stabilitas solusi. Validasi dilakukan melalui pemetaan residual, yang menunjukkan bahwa sebagian besar nilai residual mendekati nol, menandakan akurasi relokasi yang memuaskan.



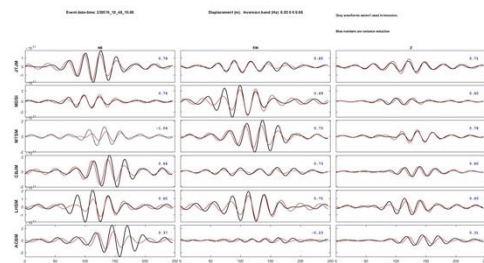
Gambar 2. Peta seismisitas area penelitian sebelum dilakukan relokasi

Hasil relokasi menunjukkan adanya dua kluster gempa yang terjadi di segmen Semangko dan sesar Sunda. Penelitian yang dilakukan oleh Supendi dkk., (2022) berhasil mengidentifikasi kluster pertama di Teluk Semangko, di mana sesar-sesar di area tersebut memiliki sistem graben kecil yang terletak di bawah Teluk Semangko, yang kemungkinan diaktifkan oleh proses perluasan yang berlangsung di Selat Sunda. Sementara itu, kluster kedua terletak di bagian paling selatan, sehingga menarik untuk mengetahui mekanisme sesar di area tersebut (Gambar 3). Oleh karena itu, proses selanjutnya kami melakukan inversi momen tensor untuk memahami tipe-tipe sesar yang terdapat di wilayah tersebut.



Gambar 3. Peta seismisitas area penelitian setelah dilakukan relokasi

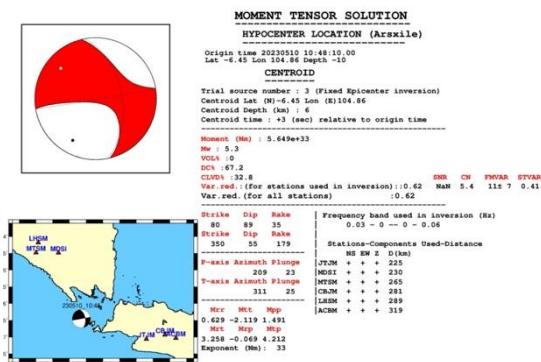
Sebelum dilakukan inversi, proses data preparation sangat penting dilakukan. Waveform tiga komponen diberikan koreksi instrumen dan bandpass filter. Hasil proses ini didapatkan hanya 1 waveform saja yang memenuhi kriteria, sehingga dapat digunakan ke proses selanjutnya. Penentuan bandpas ini dibutuhkan banyak *trial* dan *eror* untuk mendapatkan nilai yang paling fit untuk data waveform. Kami mendapatkan nilai bandpass 0.03 hingga 0.06 Hz.



Gambar 4. Perhitungan waveform sintetik dengan waveform observasi

Pada proses inversi terdapat dua warna gelombang dalam analisis ini. Gelombang berwarna hitam merupakan waveform observasi, sementara gelombang berwarna merah adalah waveform sintetik yang dihasilkan dengan menggunakan fungsi

Green. Angka berwarna biru menunjukkan nilai VR, sedangkan huruf di sebelah kiri mengindikasikan nama stasiun seismik yang digunakan dalam proses inversi. Hasil inversi dianggap baik jika kedua waveform saling tumpang tindih, yang menunjukkan bahwa perhitungan waveform sintetik telah sesuai dengan waveform observasi, atau jika nilai VR melebihi 0,50. Dari hasil inversi yang diperoleh, terlihat bahwa nilai VR berkisar antara 0,31 hingga 0,85, dan terdapat dua waveform yang menunjukkan kecocokan negatif (Gambar 4). Adanya nilai negatif dari waveform ini dapat diakibatkan oleh kualitas data dari komponen stasiun seismik tersebut, pemilihan nilai frekuensi pada saat inversi, ataupun dapat juga dikarenakan kurang baiknya model kecepatan yang digunakan untuk melakukan perhitungan fungsi Green.



Gambar 5. Hasil penentuan mekanisme fokus gempa

Dalam penelitian ini, inversi Deviatoric momen tensor menghasilkan komponen tensor dengan proporsi 67,2% untuk DC (Double-Couple) dan 32,8% untuk CLVD (Compensated Linear Vector Dipole). Gempa bumi dapat dikategorikan sebagai aktivitas tektonik jika nilai DC melebihi 60% dibandingkan dengan CLVD; sebaliknya, jika nilai CLVD lebih tinggi, maka dianggap sebagai aktivitas vulkanik.

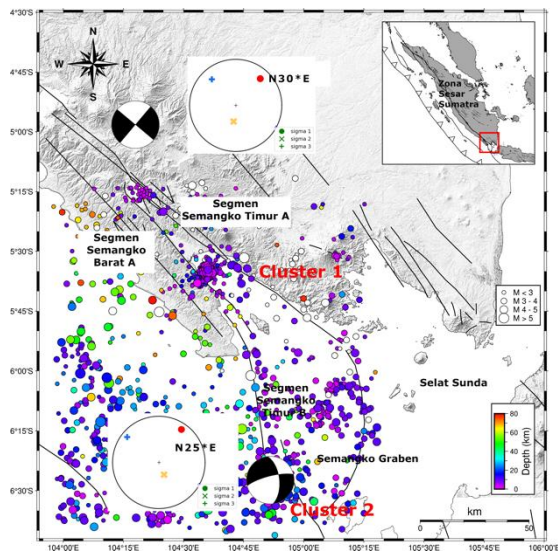
Kualitas hasil inversi waveform dievaluasi menggunakan beberapa indikator,

termasuk Varian Reduction (VR), yang pada penelitian ini mencapai 0.62, menunjukkan kecocokan yang baik dengan waveform observasi. Nilai Conditional Number (CN) yang diperoleh adalah 5.4, menandakan stabilitas hasil inversi, di mana nilai optimal CN adalah <10 (Gambar 5). Selain itu, nilai FMVAR dan STVAR masing-masing adalah 11 dan 0.28, yang menunjukkan akurasi dalam penentuan mekanisme fokus gempa berdasarkan posisi dan waktu centroid. Nilai FMVAR dan STVAR yang baik seharusnya < 30.

Hasil inversi menunjukkan tipe sesar strike-slip dengan arah 350°, kemiringan 55°, dan rake 179°. Tipe sesar ini memiliki kesamaan dengan tipe sesar yang terdapat pada Sesar Semangko dan Sumatera, sehingga dapat diasumsikan bahwa Sesar Sunda merupakan bagian dari Sesar Sumatera. Untuk mengonfirmasi pernyataan ini, kami menghitung inversi stres berdasarkan data mekanisme fokus. Selanjutnya, kami membandingkannya dengan stres prinsipal yang telah diteliti oleh Widiwijayanti dkk., (1996) untuk gempa Liwa yang terjadi di Sesar Semangko pada tahun 1994.

Gambar 6 menunjukkan hasil proses inversi stres prinsipal kluster kedua, yang menghasilkan arah sumbu tegangan horizontal maksimum dan minimum, masing-masing menunjukkan arah N25°E dan N289°E, yang mengindikasikan adanya rezim geser (sesar strike-slip). Sementara itu, penelitian Widiwijayanti dkk., (1996) menghasilkan sumbu tegangan horizontal maksimum dan minimum yang masing-masing menunjukkan arah N30°E dan N294°E. Dari hasil ini, kita dapat menyimpulkan bahwa segmen Semangko dan Sunda kemungkinan merupakan segmen yang sama. Jika kita membandingkan azimuth σ_3 dengan yang ditemukan di Selat Sunda, kita dapat mengasumsikan adanya transisi

yang halus dan progresif dalam arah regangan.



Gambar 6. Hasil inversi stress regime tektonik

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merelokasi 1,464 gempa bumi yang menunjukkan pola distribusi sesar aktif, terutama di Sesar Semangko dan wilayah subduksi. Hasil relokasi menunjukkan konsentrasi gempa yang lebih terfokus, dengan nilai RMSCT rendah dan CND antara 59–80, mengindikasikan stabilitas dan akurasi hasil yang baik. Dua kluster gempa teridentifikasi: satu di Teluk Semangko dan satu di bagian selatan, yang mendorong analisis lebih lanjut menggunakan inversi momen tensor. Hasil inversi menunjukkan dominasi aktivitas tektonik dengan proporsi 67,2% DC dan 32,8% CLVD, serta tipe sesar strike-slip. Selain itu, Penyelidikan stres prinsipal mengonfirmasi kesamaan antara segmen Semangko dan Sunda, menunjukkan arah regangan yang halus. Secara keseluruhan, penelitian ini memperkaya pemahaman tentang dinamika seismik dan mekanisme sesar di daerah tersebut. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami lebih

dalam mengenai interaksi antara sesar-sesar aktif di Indonesia, serta implikasinya terhadap keselamatan masyarakat.

Daftar Pustaka

- Alif, S. M., Fattah, E. I., Kholil, M., & Anggara, O. (2021). Source of the 2019 Mw6.9 Banten Intraslab earthquake modelled with GPS data inversion. *Geodesy and Geodynamics*, 12(4), 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.06.001>
- Fazrul Falah, M., Ma, M., Mukti, ruf, & Helmi, F. (2023). Fault Segmentation of Southern Sumatra (Sianok Segment-Semangko Segment) Based on Active Fault Mapping Through Digital Elevation Model (Dem) And Seismicity. In *Journal of Geological Sciences and Applied Geology* (Vol. 7, Issue 2).
- Harjono, H., Diament, M., Dubois, J., Larue, M., Zen, T., Taufick, M., Seismicity, Z., & Mudaham, F. (1991). Strait: Evidence for crustal extension and volcanological implications. *Tectonics*, 10(1), 17–30. <https://doi.org/10.1029/90TC00285i>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9). <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Irsyam dkk. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Kusumawati, D., Sahara, D. P., Puspito, N. T., Baskara, A. W., Kurniawan, A., Tanihaha, W., Solihin, L. J. J., Pratama, M. D., Patimah, S. H.,

- Sasmi, A. T., Muhammad, H., Muhammad, H., Natafrisca, W. C. C., & Bening, M. A. (2023). Moment tensor inversion implementation in determining focal mechanism solution of Palu-Koro and Matano fault events: Processing strategy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1227(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1227/1/012043>
- Natawidjaja, D. H., & Triyoso, W. (2007). The Sumatran Fault Zone-from Source to Hazard. In *Journal of Earthquake and Tsunami* (Vol. 1, Issue 1).
- Prasetyo, R. A., Rohadi, S., Riama, N. F., Perdana, Y. H., Yuliatmoko, R. S., Ristiyono, L., & Sinambela, M. (2022). Focal mechanism and source determination of the Padang Lawas earthquake april 30, 2020, using moment tensor inversion. *E3S Web of Conferences*, 340. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234001012>
- Rafie, M. T., Cummins, P. R., Sahara, D. P., Widiyantoro, S., Triyoso, W., & Nugraha, A. D. (2021). Variations in Forearc Stress and Changes in Principle Stress Orientations Caused by the 2004–2005 Megathrust Earthquakes in Sumatra, Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.712144>
- Sahara, D. P., Widiyantoro, S., & Irsyam, M. (2018). Stress heterogeneity and its impact on seismicity pattern along the equatorial bifurcation zone of the Great Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.002>
- Sarkowi, M., Wibowo, R. C., Bagus, I., & Yogi, S. (2022). Potensi Gempabumi Di Sepanjang Sesar Semangko Segmen Lampung. *Jurnal Teknologi Dan Inovasi Industri*, 03(02), 27–033. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>
- Sokos, E. N., & Zahradnik, J. (2008). ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data. *Computers & Geosciences*, 34(8), 967–977. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.005>
- 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), 106. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01436-x>
- Supendi, P., Widiyantoro, S., Rawlinson, N., Wibowo, A., Priyobudi, P., Palgunadi, K. H., Nugraha, A. D., Imran, I., Marliyani, G. I., Daryono, D., Prayitno, B. S., Sadly, M., Karnawati, D., Sari, N., & Sugiharto, A. (2022). Analysis of the 2021 Semangko Bay Earthquake Sequence in Southern Sumatra, Indonesia, Using Broadband Seismic Network Data. *Seismological Research Letters*, 93(3), 1373–1381. <https://doi.org/10.1785/0220210304>
- Vavryčuk, V. (2014). Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophysical Journal International*, 199(1), 69–77. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu224>
- Waldhauser, F. (2001). *hypoDD-A Program to Compute Double-*

- Difference Hypocenter Locations.*
<https://doi.org/10.3133/ofr01113>
- Widiwijayanti, C., Déverchère, J., Louat, R., Sébrier, M., Harjono, H., Diamant, M., Hidayat, D., Widiwijayanti •', C., D6verch, J., Re, •, Louat, R., S6brier, M., & Diamenp, M. (1996). Aftershock sequence of the 1994, Mw 6.8, Liwa earthquake (Indonesia): seismic rupture process in a volcanic arc. *Geophysical Research Letters*, 23(21), 3051–3054.
<https://doi.org/10.1029/96GL02048i>
- Zhang, K., Zhou, Y., Liu, Y., & Wang, P. (2022). Mechanism for seismic supershear dynamic rupture based on in-situ stress: a case study of the Palu earthquake in 2018. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 1987–2005.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2104659>