



Analisis Momen Tensor dan Mekanisme Fokus Gempa di Sumatera Barat Menggunakan Metode Inversi *Waveform*

Zakiah Putri¹, Syafriani^{1*}, Akmam¹, Letmi Dwiridal¹

¹*Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang*

Email: syafri@fmipa.unp.ac.id

*Corresponding Author

Abstrak

Analisis momen tensor dan mekanisme fokus gempa bertujuan untuk mengetahui nilai momen tensor yang merepresentasikan arah gaya penyebab gempabumi dan mekanisme fokus yang menggambarkan karakteristik gerak sesar penyebab gempabumi. Analisis momen tensor dan mekanisme fokus dilakukan dengan metode inversi *waveform*. Metode inversi *waveform* merupakan metode inversi dengan memanfaatkan waktu tiba gelombang P yang kemudian diestimasi menggunakan fungsi Green dan melibatkan tiga komponen seismogram. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sepuluh data gempabumi di wilayah Sumatera Barat pada tahun 2007-2022 yang sumber gempanya berada pada zona sesar Sumatera dengan kekuatan gempa $\geq 4,9$ Magnitudo. Hasil dari penelitian ini didapat rentang nilai momen tensor yaitu $M_{11} = -2,595$ hingga $-4,555$, $M_{22} = 1,743$ hingga $4,476$, $M_{33} = 0,853$ hingga $0,079$, $M_{12} = 6,258$ hingga $-4,814$, $M_{31} = 1,241$ hingga $0,719$, $M_{32} = 0,530$ hingga $-1,436$, dan hasil mekanisme fokus yang didapat adalah pola *strike-slip*.

Kata kunci: Inversi *Waveform*, Mekanisme Fokus, Momen Tensor

Abstract

Analysis of the tensor moment and focal mechanism of an earthquake aims to determine the value of tensor moment that represents the direction of the force that causes the earthquake and the focal mechanism that describes the characteristics of the fault motion that causes the earthquake. Analysis of the tensor moment and focal mechanism is carried out using the waveform inversion method. The waveform inversion method is an inversion method that utilizes the arrival time of the P-wave which is then estimated using the Green's function and involves three seismogram components. The data used in this study are ten earthquake data in the West Sumatra region in 2007-2022 whose earthquake sources are in the Sumatra fault zone with earthquake strength ≥ 4.9 Magnitude. The results of this study obtained a range of tensor moment values, namely $M_{11} = -2.595$ to -4.555 , $M_{22} = 1.743$ to 4.476 , $M_{33} = 0.853$ to 0.079 , $M_{12} = 6.258$ to -4.814 , $M_{31} = 1.241$ to 0.719 , $M_{32} = 0.530$ to -1.436 , and the results of the focus mechanism obtained are strike-slip patterns.

Keywords: Focal Mechanism, Moment Tensor, Waveform Inversion

1. PENDAHULUAN

Sumatera Barat merupakan salah satu wilayah di pulau Sumatera yang memiliki tingkat kerawanan gempa bumi yang cukup tinggi. Pada wilayah Sumatera Barat terdapat zona sesar Sumatera yang terbentuk akibat tumbukan lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia di bagian barat pulau Sumatera secara miring, sehingga menimbulkan tekanan dan mengakibatkan terbentuknya sesar Sumatera [1]. Sesar Sumatera adalah sesar yang sebagian besar memiliki komponen lateral kanan yang dihasilkan dari konveksitas miring lempeng Indo-Australia di bawah lempeng Sunda. Zona sesar Sumatera membentang lebih dari 1700 km di sepanjang sumbu pulau Sumatera dengan 20 segmen utama yang telah terdefinisi [2,3].

Sesar Sumatera adalah salah satu sesar yang aktif bergerak dan pergerakannya terus meningkat setiap tahunnya. Sudah banyak kejadian gempa bumi di wilayah Sumatera Barat yang diakibatkan oleh aktifitas sesar Sumatera salah satunya adalah gempa bumi Pasaman pada tahun 2022. Gempa bumi merupakan suatu peristiwa pelepasan energi gelombang seismik yang terjadi secara mendadak karena adanya deformasi pada lempeng tektonik pada kerak bumi yang kemudian menghasilkan getaran sampai ke permukaan bumi [4]. Wilayah Sumatera Barat merupakan salah satu wilayah yang dilalui oleh sesar Sumatera, oleh karena itu bahaya gempa bumi akan selalu mengintai wilayah ini. Gempa bumi yang diakibatkan oleh sesar Sumatera pada umumnya termasuk dalam gempa yang berskala cukup besar dengan kedalaman yang dangkal sehingga dampak akibat gempa bumi di permukaan juga besar. Telah banyak terjadi gempa besar dan dangkal pada zona sesar Sumatera sejak tahun 1892 dengan rata-rata kejadian gempa setiap lima tahun sekali [5].

Gempa bumi tektonik terjadi karena adanya pergerakan sesar di wilayah sumber gempa. Oleh karena itu, diperlukannya penelitian untuk mengetahui mekanisme pergerakan dari sesar penyebab gempa bumi salah satunya adalah dengan melakukan analisis momen tensor dan mekanisme fokus gempa. Analisis momen tensor dan mekanisme fokus bertujuan untuk mengetahui nilai momen tensor yang merepresentasikan arah gaya penyebab gempa bumi dan mekanisme fokus yang menggambarkan karakteristik gerak sesar penyebab gempa bumi.

Momen tensor dideskripsikan sebagai pasangan ganda (*double couple*) yang memiliki sembilan komponen momen tensor dan merupakan representasi matematis dari gelombang seismik hasil pergerakan sesar, yang kemudian nilainya dapat dijadikan untuk merepresentasi arah gaya penyebab gempa bumi [6]. Nilai momen tensor yang didapat kemudian diinterpretasi untuk mendapatkan mekanisme fokus yang menghasilkan nilai *strike*, *dip*, dan *rake* sebagai parameter karakteristik bidang sesar.

Mekanisme fokus merupakan istilah yang digunakan untuk menunjukkan sifat penyaluran energi gempa bumi pada hiposenter gempa bumi yang dianalisa secara komputasi [7]. Mekanisme fokus secara manual ditentukan dengan menganalisa waktu tiba gelombang P merupakan proses yang memakan waktu dan rumit untuk dilakukan jika menggunakan banyak data gempa bumi, oleh karena itu teknik pengolahan secara otomatis dikembangkan untuk mengurangi waktu pemrosesan [8].

Mekanisme fokus adalah solusi bidang sesar yang digambarkan oleh sistem koordinat. Mekanisme fokus dapat merepresentasikan orientasi sesar dan slip pada sesar yang berfungsi sebagai parameter untuk menentukan geometri sesar seperti gaya sesar. Jika dianalisa secara langsung sesar gempa merupakan suatu kajian yang rumit, akan tetapi dengan analisa komputasi mekanisme fokus maka sebagian besar aktifitas pada bidang sesar dapat digambarkan dengan mengasumsikan gerakan yang menyebabkan gempa dengan orientasi sesar yaitu *strike*, *dip*, dan *rake* [9,10]. Hasil analisis komputasi mekanisme fokus diinterpretasikan dengan gambar pola pada bola fokus atau biasa disebut *beach ball*, dimana pola-pola pada *beach ball* mengindikasikan jenis sesar yang menjadi penyebab gempabumi [11].

Penelitian ini menggunakan metode inversi *waveform* dimana metode ini memanfaatkan waktu tiba gelombang P yang kemudian diestimasi menggunakan fungsi Green [12]. Proses inversi *waveform* dilakukan dengan menggunakan bantuan sebuah perangkat lunak yaitu ISOLA GUI. ISOLA GUI merupakan *software* berbentuk *Graphic User Interface* (GUI) berbasis Matlab yang dikembangkan oleh Efthimios Sokos dan Jiri Zahradnik sejak tahun 2003 yang didasarkan pada kode Fortran untuk melakukan inversi *waveform* sehingga parameter sumber gempa dapat ditentukan. Penentuan momen tensor pada ISOLA diperoleh melalui inversi kuadrat terkecil (*least square*), sedangkan mekanisme fokus gempabumi diperoleh secara *grid* [13].

ISOLA GUI adalah perangkat lunak yang memiliki beberapa menu atau paket alat untuk mempermudah proses inversi *waveform* secara komputasi sehingga dapat menentukan mekanisme sumber gempa dengan hasil yang lebih akurat dan cepat. ISOLA GUI diperkenalkan pertama kali pada tahun 2003 dan hingga saat ini sudah banyak penelitian yang menggunakan ISOLA GUI terutama yang berkaitan dengan mekanisme sumber gempa dan identifikasi sesar. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Qadariyah, dkk dalam penelitiannya menganalisis mekanisme fokal menggunakan inversi *waveform* dengan studi kasus gempabumi Pidie Jaya tanggal 7 Desember 2016. Penelitian ini menggunakan program ISOLA GUI untuk memodelkan mekanisme fokus gempabumi dari proses inversi momen tensor, sehingga mendapatkan hasil mekanisme sesarnya adalah sesar geser atau sesar mendatar [14].

Penelitian mengenai mekanisme sumber gempabumi di Sumatera Barat pernah dilakukan oleh Hasan dan Santosa menggunakan data gempa tahun 2013. Penelitian tersebut bertujuan untuk menganalisa pola bidang sesar pada zona subduksi di wilayah Sumatera Barat dengan menentukan momen tensor dan mekanisme fokus yang diakibatkan oleh pergerakan sesar Mentawai di zona subduksi [15]. Pada penelitian oleh Hasan dan Santosa hanya berfokus pada pola gerak sesar yang diakibatkan oleh sesar Mentawai dan belum ada pembahasan mengenai pola gerak sesar di wilayah Sumatera Barat yang berada pada zona sesar Sumatera, oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pola gerak sesar di wilayah Sumatera Barat yang diakibatkan oleh pergerakan sesar Sumatera.

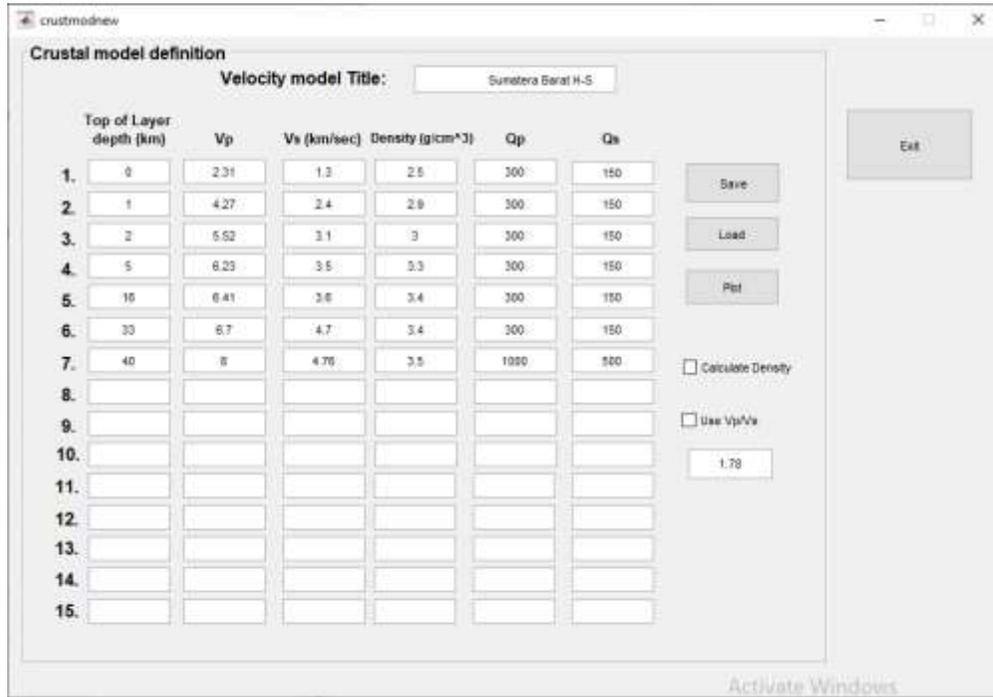
Gempabumi yang terjadi di wilayah Sumatera Barat yang sumber gempanya berada pada zona sesar Sumatera sebagian besar merupakan gempabumi dengan kekuatan gempa yang besar dan kedalaman yang dangkal. Berdasarkan dari permasalahan tersebut

penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan karakteristik gerak sesar penyebab gempabumi di wilayah Sumatera Barat dengan menggunakan data kejadian gempabumi pada tahun 2007 hingga tahun 2022 dengan kekuatan gempa $\geq 4,9$ Magnitudo yang memiliki sumber gempa di wilayah Sumatera Barat terkhusus pada zona sesar Sumatera.

2. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sepuluh data gempabumi di wilayah Sumatera Barat pada tahun 2007-2022 yang sumber gempanya berada pada zona sesar Sumatera. Data tersebut diunduh dari katalog gempa IRIS: Wilber 3 dengan langkah *request* data. Data yang diunduh berupa gelombang *waveform* dengan format SAC (*Seismic Analytic Code*) dari beberapa stasiun terdekat dengan posisi sumber gempa dan data parameter dari masing-masing *event* gempa yaitu *date*, *origin time*, *magnitude*, *depth*, *latitude*, dan *longitude*.

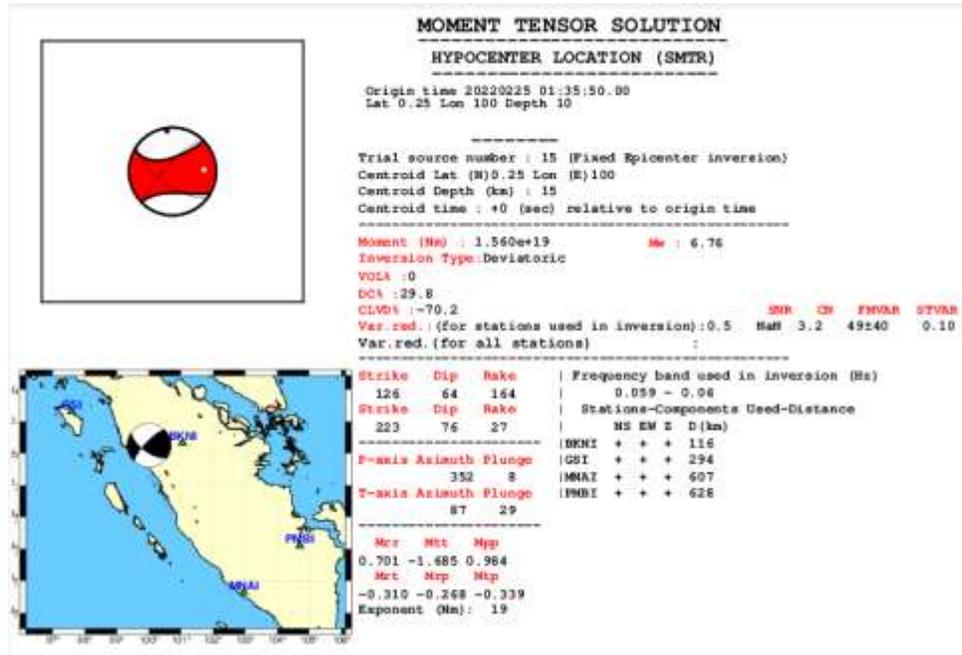
Pada proses pengolahan data, hal pertama yang dilakukan adalah memasukkan data yang telah diunduh dalam format SAC kemudian dimasukkan ke *software* ISOLA GUI dengan memilih menu *import* data. Data yang dimasukkan berupa data *waveform* yang terdiri dari tiga komponen seismogram yaitu BHN, BHE, dan BHZ. Selanjutnya, memasukkan model kerak (*crustal model*) yang tepat untuk daerah penelitian. Model kerak yang digunakan dalam penelitian ini adalah model kerak kombinasi dari Haslinger dan Santosa untuk wilayah Sumatera Barat seperti yang digunakan oleh Hasan dan Santosa dalam penelitiannya pada tahun 2014 menganalisa pola bidang sesar pada zona subduksi di wilayah Sumatera Barat menggunakan data gempa tahun 2013. Tampilan tahap *crustal model* pada ISOLA seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Tampilan *crustal model* pada ISOLA

Kemudian memilih stasiun yang digunakan dari data dalam format Stasiun.stn yang dibuat dengan menggunakan *notepad* yang terdiri dari nama stasiun, *latitude*, *longitude*, dan *network*. Stasiun yang digunakan minimal tiga stasiun untuk keakuratan hasil yang didapat. Koreksi instrumen yang berkaitan dengan rekaman *waveform* dari stasiun yang digunakan merupakan hal yang selanjutnya dilakukan, sehingga menghasilkan data yang bersih dari *noise* dan siap untuk diinversi.

Melalui perhitungan fungsi Green yang dilakukan dengan bantuan *software* ISOLA GUI dan dipantau melalui *command window system*, akan menghasilkan salinan file yang digunakan untuk proses inversi. Tahap akhir dari pengolahan data adalah proses inversi *waveform* yang menentukan hasil inversi dan solusi momen tensor dari data sebuah data gempa melalui *waveform* yang digunakan. Hasil dari inversi *waveform* terdapat pada *plot result* yang menghasilkan solusi momen tensor yang berisi nilai-nilai dari enam komponen momen tensor, nilai-nilai dari *centroid*, dan nilai parameter sesar yaitu *strike*, *dip*, dan *rake*. Hasil dari *plot result* terlihat seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Waveform inversion pada ISOLA

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengolahan data *waveform event* gempa menggunakan ISOLA GUI didapatkan nilai momen tensor dari masing-masing *event* gempa yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai komponen momen tensor

No	Event	M_{11}	M_{22}	M_{33}	M_{12}	M_{31}	M_{32}
1.	2007-03-06 / 03:49:39	-2,595	1,743	0,853	6,258	1,241	0,530
2.	2007-03-06 / 05:49:28	-3,382	1,727	1,655	1,113	0,190	-0,917
3.	2007-03-06 / 12:53:10	-0,474	1,341	-0,867	0,901	-1,047	-0,681
4.	2007-05-06 / 05:36:47	-5,202	6,977	-1,776	5,238	0,979	-0,116
5.	2016-07-10 / 09:31:56	-1,128	1,395	-0,267	2,499	-0,492	0,848
6.	2018-07-21 / 07:58:15	-7,013	4,025	2,987	3,134	-4,288	0,687
7.	2022-02-25 / 01:35:50	-1,685	0,984	0,701	-0,339	-0,310	-0,268
8.	2022-02-25 / 01:39:26	-0,984	1,258	-0,275	-0,000	0,068	-0,453
9.	2022-02-25 / 01:42:59	-7,715	5,485	2,229	0,002	-1,529	-0,938
10.	2022-02-25 / 04:06:36	-4,555	4,476	0,079	-4,814	0,719	-1,436

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa terdapat nilai dari enam komponen momen tensor dari pasangan ganda yaitu M_{11} , M_{22} , M_{33} , M_{12} , M_{31} , dan M_{32} . Pasangan ganda momen tensor merupakan pasangan gaya yang besarnya sama tapi berlawanan arah. Hal tersebut menunjukkan arah gaya yang bergerak ke arah sumbu koordinat dan gaya yang bekerja pada bidang normal terhadap sumbu koordinat.

Momen tensor dapat menjadi gambaran arah gaya penyebab gempa bumi. Nilai momen tensor merupakan besaran vektor yang berarti besaran yang memiliki nilai dan arah. Oleh karena itu, nilai momen tensor seperti yang terlihat pada Tabel 1 terdapat beberapa nilai positif dan negatif dari masing-masing komponen momen tensor hasil pengolahan data *event* gempa yang menunjukkan arah gaya dari komponen momen tensor. Nilai komponen momen tensor yang positif menunjukkan bahwa arah gayanya sejajar dengan arah sumbu koordinat, sedangkan nilai komponen momen tensor yang negatif menunjukkan bahwa arah gayanya berlawanan arah dengan sumbu koordinat.

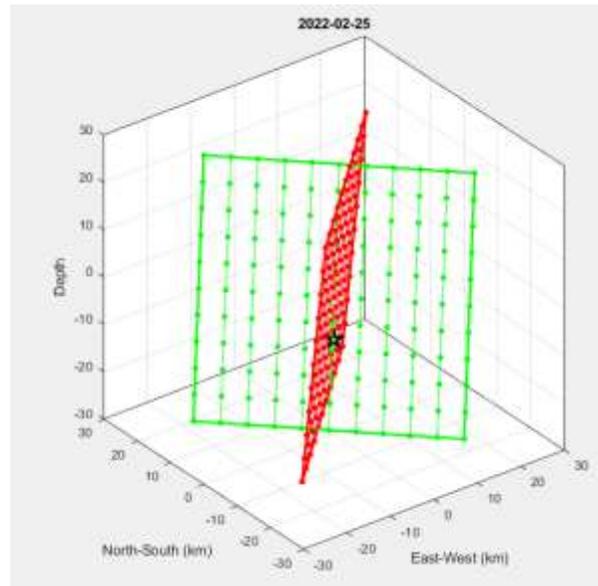
Nilai komponen momen tensor saja tidak cukup untuk mendapatkan informasi karakteristik gerak sesar penyebab gempa bumi, oleh karena itu diperlukannya hasil mekanisme fokus yang berisi nilai parameter sesar penyebab gempa bumi. Setelah diketahui nilai momen tensor dari *event* gempa, maka akan memudahkan untuk mendapatkan mekanisme fokus. Penyelesaian inversi untuk menemukan parameter sesar dapat lebih mudah dilakukan jika menuliskan seismogram sebagai fungsi linier dari komponen-komponen momen tensor.

Hasil mekanisme fokus yang didapat adalah nilai parameter sesar yaitu berupa nilai *strike*, *dip*, dan *rake*. Nilai parameter sesar tersebut kemudian digambarkan dengan pola dari bola fokus atau biasa disebut *beach ball*. Pola dari *beach ball* menunjukkan jenis dari gerakan sesarnya serta arah gerak sesarnya. Nilai parameter sesar yang didapat dari hasil pengolahan data tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai parameter sesar

No	Event	Nodal Plane I			Nodal Plane II		
		Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
1.	2007-03-06 / 03:49:39	350	78	175	81	85	12
2.	2007-03-06 / 05:49:28	139	66	146	244	59	28
3.	2007-03-06 / 12:53:10	53	73	-55	166	38	-152
4.	2007-05-06 / 05:36:47	336	82	-174	245	84	-8
5.	2016-07-10 / 09:31:56	168	83	-161	76	71	-7
6.	2018-07-21 / 07:58:15	152	53	170	248	82	37
7.	2022-02-25 / 01:35:50	126	64	164	223	76	27
8.	2022-02-25 / 01:39:26	135	84	165	226	75	7
9.	2022-02-25 / 01:42:59	135	73	175	226	85	17
10.	2022-02-25 / 04:06:36	111	81	170	202	80	9

Berdasarkan Tabel 2, terlihat nilai parameter sesar yaitu *strike*, *dip*, dan *rake* dari dua *nodal plane*. Salah satu dari dua *nodal plane* tersebut merupakan bidang sesar, dan yang lainnya adalah bidang bantu atau *auxiliary plane* seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Dua *nodal plane*

Solusi bidang sesar ditentukan oleh tiga parameter sesar yaitu *strike*, *dip*, dan *rake*. Sudut *strike* diukur searah jarum jam dari utara, *rake* diukur pada bidang sesar berlawanan arah jarum jam dari arah *strike*, dan *dip* merupakan kemiringan bidang sesar. Nilai parameter sesar kemudian digambarkan dengan pola *beach ball* yang memberikan gambaran secara jelas mengenai pola gerak sesar penyebab gempa bumi. Berikut gambaran *beach ball* pada masing-masing *event* yang tertera pada Gambar 4.

hasil dua *nodal plane* pada Gambar 3, hal inilah yang menyebabkan aktifitas gempa di sepanjang wilayah sesar Sumatera terutama daerah Sumatera Barat menjadi tinggi [18].

4. SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai momen tensor dari sepuluh *event* gempa di wilayah Sumatera Barat yang berada pada zona sesar Sumatera dari tahun 2007 hingga tahun 2022 yang memiliki rentang nilai masing-masing komponen momen tensor yaitu $M_{11} = -2,595$ hingga $-4,555$, $M_{22} = 1,743$ hingga $4,476$, $M_{33} = 0,853$ hingga $0,079$, $M_{12} = 6,258$ hingga $-4,814$, $M_{31} = 1,241$ hingga $0,719$, $M_{32} = 0,530$ hingga $-1,436$. Hasil mekanisme fokus yang didapat adalah pola *strike-slip*.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada IRIS: Wilber 3 sebagai sumber data dalam penelitian ini, kepada Prof. Efthimios Sokos dan Prof. Jiri Zahradnik untuk *software* ISOLA beserta petunjuk dan tutorialnya yang telah melancarkan proses penelitian ini, dan pihak lain yang telah membantu penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Natawidjaja. (2018). Updating Active Fault Maps and Sliprates Along the Sumatran Fault Zone, Indonesia. *IOP. Conf Series*, vol. 118. DOI: 10.1088/1755-1315/118/1/012001.
- [2] Mukti, M. M., Ilham Arisbaya, and Haryadi Permana. (2020). Termination of a Trench-Linked Strike-Slip Fault Zone in the Sumatra-Java Forearc Basin and Accretionary Wedge Complex. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 21(4). <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v21i4.492>.
- [3] Rafie, M. T., David P. Sahara, dkk. (2022). Stress Accumulation and Earthquake Activity on the Great Sumatran Fault, Indonesia. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, vol. 116. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1195020/v1>.
- [4] Hartuti, E. R. (2009). *Buku Pintar Gempa: Mengenal Seluk Beluk Gempa, Jenis-Jenisnya, Penyebab-Penyebabnya, dan Dampak-Dampaknya*. Yogyakarta: Diva Press.
- [5] Bening, M. A., David P. Sahara, dkk. (2022). Modeling the Impact of the Viscoelastic Layer Thickness and the Frictional Strength to the Lithosphere Deformation In a Strike-Slip Fault: Insight to the Seismicity Pattern Along the Great Sumatran Fault. *GeoHazards*, 3(4). <https://doi.org/10.3390/geohazards3040023>.
- [6] Stein, Seth, and Michael Wysession. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- [7] Kiswiranti, D. (2019). *Seismologi (Dasar-Dasar Seismologi dan Aplikasinya)*. Yogyakarta: Institut Sains dan Teknologi AKPRIND.

- [8] Uchide, T., Takahiro Shiina, and Kazutoshi Imanishi. (2022). Stress Map of Japan: Detailed Nationwide Crustal Stress Field Inferred From Focal Mechanism Solutions of Numerous Microearthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(6). DOI: 10.1029/2022JB024036.
- [9] Sultan, R., Mohammad R. Sule, dkk. (2019). Analysis of Focal Mechanism for Determine Fault Plane Orientation Using The Moment Tensor Inversion Case Study: West Java Geothermal Field. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences*, vol. 318. DOI: 10.1088/1755-1315/318/1/012036.
- [10] Havskov, J., and Lars Ottemoller. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Bergen: Springer.
- [11] Shearer, P. M. (2009). *Introduction to Seismology Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- [12] Sokos, E., and Jiri Zahradnik. (2008). ISOLA a Fortran Code and Matlab GUI to Perform Multiple-Point Source Inversion of Seismic Data. *Computers and Geosciences*, 34(8). <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.005>.
- [13] Sokos, E., and Jiri Zahradnik. (2013). Evaluating Centroid Moment Tensor Uncertainty in the New Version of ISOLA Software. *Seismological Research Letters*, 84(4). <https://doi.org/10.1785/0220130002>.
- [14] Qadariyah, Andean V. H. Simanjuntak, dan Muksin Umar. (2018). Analisis Mekanisme Fokal Menggunakan Inversi Waveform; Studi Kasus Gempa Bumi Pidie Jaya 7 Desember 2016. *J. Aceh Phys. Soc*, 7(3), e-ISSN: 2355-8229. <https://jurnal.usk.ac.id/JAcPS/article/download/11173/9399>.
- [15] Hasan, M. M., dan Bagus J. Santosa. (2014). Analisa Pola Bidang Sesar Pada Zona Subduksi di Wilayah Sumatera Barat dari Event Gempa Pada Tahun 2013. *Jurnal Sains dan Seni POMITS*, 3(1), e-ISSN: 2337-3520. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://media.neliti.com/media/publications/15385-ID-analisa-pola-bidang-sesar-pada-zona-subduksi-di-wilayah-sumatera-barat-dari-even.pdf&ved=2ahUKEwiZoePavv-GAXXbcWwGHcxTCioQFnoECBMQAQ&usq=AOvVaw0MiN_FDP7HsU7qnkYmBogN.
- [16] Kasmolan, M., Bagus J. Santosa, dkk. (2010). Earthquake Source Parameters at the Sumatran Fault Zone: Identification of the Activated Fault Plane. *Central European Journal of Geosciences*, 2(4). DOI: 10.2478/v10085-010-0016-5.
- [17] Supendi, P., Nicholas Rawlinson, dkk. (2023). A Previously Unidentified Fault Revealed by the February 25, 2022 (Mw 6.1) Pasaman Earthquake, West Sumatra, Indonesia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 334. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106973>.
- [18] Kusnanto, A. R. (2015). *Struktur Sesar Mendatar Semangko Pulau Sumatra*. Bandung: Universitas Padjajaran.