

ANALISIS KEAKURATAN SOLUSI CENTROID MOMENT-TENSOR (CMT) GEMPA BUMI DI WILAYAH JAWA TENGAH MENGGUNAKAN METODE GISOLA, SUDUT KAGAN DAN MEAN ABSOLUTE PERCENTAGE ERROR (MAPE) PADA SOFTWARE JOKOTINGKIR

¹⁾Fairhiza Firman Arjangga, ²⁾Madlazim, ³⁾Arie Realita

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: fairhizafirman.21021@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: madlazim@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menganalisis keakuratan solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) gempa bumi di wilayah Jawa Tengah menggunakan *software* Jokotingkir yang mengimplementasikan algoritma GISOLA, dengan pembandingan data dari GlobalCMT melalui metode Sudut Kagan dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Dari 10 kejadian gempa dengan magnitudo $\geq 5,0$ pada tahun 2020–2024, hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar parameter *strike* dan *dip* memiliki kesesuaian cukup baik dengan nilai MAPE masing-masing sebesar 22,99% (dapat diterima) dan 12,39% (baik), sementara *rake* menunjukkan hasil paling bervariasi dengan MAPE sebesar 49,44% karena sensitivitasnya terhadap arah slip. Analisis Sudut Kagan juga mengindikasikan bahwa sebagian besar solusi CMT menunjukkan kesesuaian sedang hingga tinggi, meskipun beberapa gempa menunjukkan ketidaksesuaian signifikan. Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar pengembangan difokuskan pada peningkatan akurasi estimasi *rake* melalui penyempurnaan algoritma inversi, perbaikan kualitas data *waveform*, perluasan cakupan stasiun seismik lokal, dan penerapan model kecepatan 3D regional yang lebih representatif.

Kata Kunci: *Centroid Moment Tensor*, GISOLA, Jokotingkir, Sudut Kagan, *Mean Absolute Percentage Error*, Jawa Tengah.

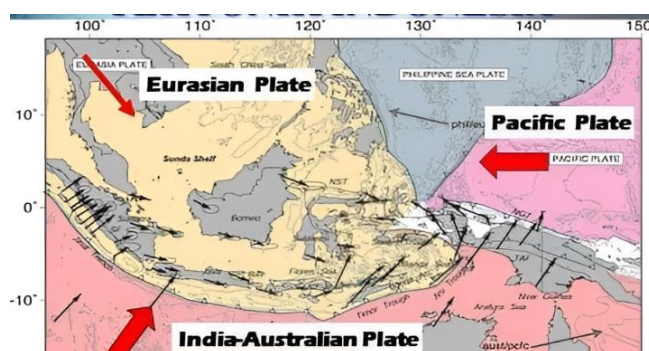
Abstract

This study analyzes the accuracy of *Centroid Moment Tensor* (CMT) earthquake solutions in Central Java using the Jokotingkir software, which implements the GISOLA algorithm, by comparing the results with data from GlobalCMT through the Kagan Angle and *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) methods. Based on 10 earthquake events with magnitudes ≥ 5.0 between 2020 and 2024, the analysis shows that most strike and dip parameters are reasonably consistent, with MAPE values of 22.99% (acceptable) and 12.39% (good), respectively, while rake exhibits the highest variation with a MAPE of 49.44% due to its sensitivity to slip direction. The Kagan Angle analysis also indicates that most CMT solutions demonstrate moderate to high similarity, although several events reveal significant discrepancies. These findings suggest that further development should prioritize improving rake estimation accuracy by refining the inversion algorithm, enhancing waveform quality, expanding the coverage of local seismic stations, and applying more representative 3D regional velocity models.

Keywords: *Centroid Moment Tensor*, GISOLA, Jokotingkir, Kagan Angle, *Mean Absolute Percentage Error*, Central Java

I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak di kawasan yang sangat aktif secara geologis, yaitu di pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik. Akibat pertemuan lempeng sebagian besar wilayah Indonesia masuk dalam zona subduksi yang ditandai dengan sering terjadinya gempa tektonik dan gempa vulkanik dan Indonesia masuk dalam *ring of fire*. Sebagian besar wilayah Indonesia rawan terjadinya gempa tektonik, gempa vulkanik dan gempa akibat pergerakan sesar. Pulau Jawa memiliki risiko gempa bumi yang cukup tinggi karena adanya zona subduksi di sepanjang wilayah selatannya (Trisnisa et al., 2019). Zona subduksi adalah area di mana lempeng tektonik bumi, baik lempeng samudra maupun lempeng benua, bertemu atau saling bertumbukan. Di wilayah Pulau Jawa, lempeng yang saling berbenturan adalah Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Proses tumbukan ini juga memicu terbentuknya gunung api di sepanjang zona subduksi yang sering disebut sebagai wilayah volcanic arc (Muliawati, 2023).



Gambar 1. Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik (Sumber: <https://kabar24.bisnis.com/read/20220122/15/1492162/waspada-ini-dampak-buruk-pergerakan-pulau-jawa-dan-sumatra>)

Kondisi geologi Jawa Tengah terdiri dari berbagai jenis batuan, termasuk endapan aluvial, batuan gunung api muda, serta batuan sedimen tersier seperti batu pasir, batu lempung, batu lanau, dan batu gamping. Beberapa batuan ini telah mengalami pelapukan dan bersifat lepas, lunak, serta belum kompak, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap guncangan gempa bumi. Wilayah dengan morfologi perbukitan yang tersusun atas batuan lapuk juga memiliki potensi terjadinya gerakan tanah saat terjadi gempa kuat atau curah hujan tinggi. Sebagai contoh, gempa bumi yang terjadi pada 30 Juni 2023 di perairan selatan Provinsi DIY dan Jawa Tengah dengan kekuatan gempa sebesar 6,4 Mw disebabkan oleh aktivitas sesar naik pada zona prismatik akresi di atas megathrust. Guncangan gempa ini menyebabkan kerusakan bangunan di beberapa wilayah, seperti Kecamatan Kasihan di Bantul, Pleret di Kabupaten Bantul, dan Semanu di Kabupaten Gunungkidul (PVMBG, 2023).



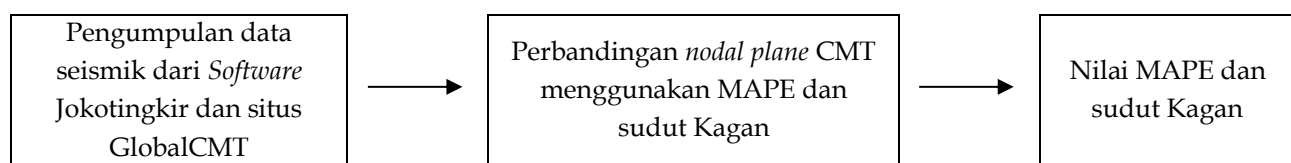
Gambar 2. Dampak Gempa di Kabupaten Bantul pada 30 Juni 2023 (Sumber: <https://news.detik.com/berita/d-6800633/9-fakta-terkini-gempa-yogyakarta-30-juni-2023-kekuatan-hingga-dampak>)

Mekanisme sumber gempa bumi dapat dijelaskan menggunakan parameter CMT *Solutions* (Tape, 2012). Salah satu cara untuk memperoleh solusi CMT adalah dengan melakukan inversi waveform tiga komponen. Metode ini telah digunakan dalam algoritma Gisola yang merupakan versi terbaru dari perangkat lunak Scisola yang telah dioptimalkan (Triantafyllis et al., 2021) dan diimplementasikan pada software Jokotingkir. Hasil perbandingan antara data Jokotingkir dan GlobalCMT dievaluasi secara kuantitatif untuk menilai keandalan dan keakuratannya. Penelitian yang telah dilakukan oleh Robiyansyah, 2024 menggunakan algoritma *K-Means Clustering* untuk mengklasifikasikan data berdasarkan karakteristik yang mirip untuk pengelompokan daerah rawan bencana di Jawa Tengah. Oleh karena itu dengan banyaknya bencana di Jawa Tengah seperti gempa bumi maka dilakukan penelitian dengan metode sudut kagan dan MAPE agar memberikan hasil yang lebih akurat untuk analisis solusi CMT pada Software Jokotingkir.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan berbasis komputasi, di mana data diolah sesuai dengan variabel yang diperlukan dalam program yang digunakan. Data yang dianalisis dalam penelitian ini berupa data sekunder yang mencakup parameter gempa bumi dan *moment-tensor*, yang diperoleh dari *Software* Jokotingkir serta situs GlobalCMT. Terdapat tiga tahapan utama dalam penelitian ini, yaitu tahap input, proses, dan output. Pada tahap pertama, data gempa bumi dikumpulkan dari *Software* Jokotingkir dan situs GlobalCMT sebagai input. Selanjutnya, data yang telah dikumpulkan dianalisis dengan membandingkan *nodal plane centroid moment tensor* menggunakan metode sudut Kagan. Metode ini berfungsi untuk menentukan nilai numerik yang menggambarkan tingkat kemiripan atau perbedaan antara solusi CMT yang dihasilkan oleh *Software* Jokotingkir dan data dari \situs GlobalCMT. Semakin kecil nilai sudut Kagan, semakin tinggi tingkat kesamaan antara kedua solusi tersebut, yang menunjukkan bahwa metode dan data yang digunakan memiliki akurasi yang baik (Kagan, 1991). Setelah itu data nilai yang telah didapatkan menggunakan metode GISOLA dan metode sudut kagan diproses menggunakan metode MAPE untuk mengukur keakuratan datanya. Output dari penelitian ini adalah nilai sudut Kagan dan persentase keakuratan parameter gempa bumi yang diteliti untuk menilai perbedaan atau kesesuaian antara data dari *software* Jokotingkir dan data yang diperoleh dari GlobalCMT.



Gambar 3. Skema penelitian analisis keakuratan solusi CMT gempa bumi di wilayah Jawa Tengah

B. Instrumen Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan berbagai alat dan perangkat lunak yang mendukung proses pengumpulan serta analisis data seismik. Data gempa bumi diperoleh dari *Software* Jokotingkir dan situs GlobalCMT, yang menyediakan informasi lengkap mengenai parameter gempa. Instrumen yang digunakan mencakup algoritma untuk menghitung inversi *waveform* tiga komponen serta fungsi *Green* yang berperan dalam estimasi parameter *nodal plane*. Selain itu, metode sudut Kagan digunakan untuk membandingkan solusi CMT dari berbagai sumber data. Metode MAPE juga berperan penting untuk mengukur keakuratan dari data yang telah diambil. Dengan mengintegrasikan berbagai alat dan metode tersebut, penelitian ini dapat melakukan analisis yang menyeluruh dan menghasilkan informasi yang akurat terkait keakuratan solusi CMT di wilayah studi.

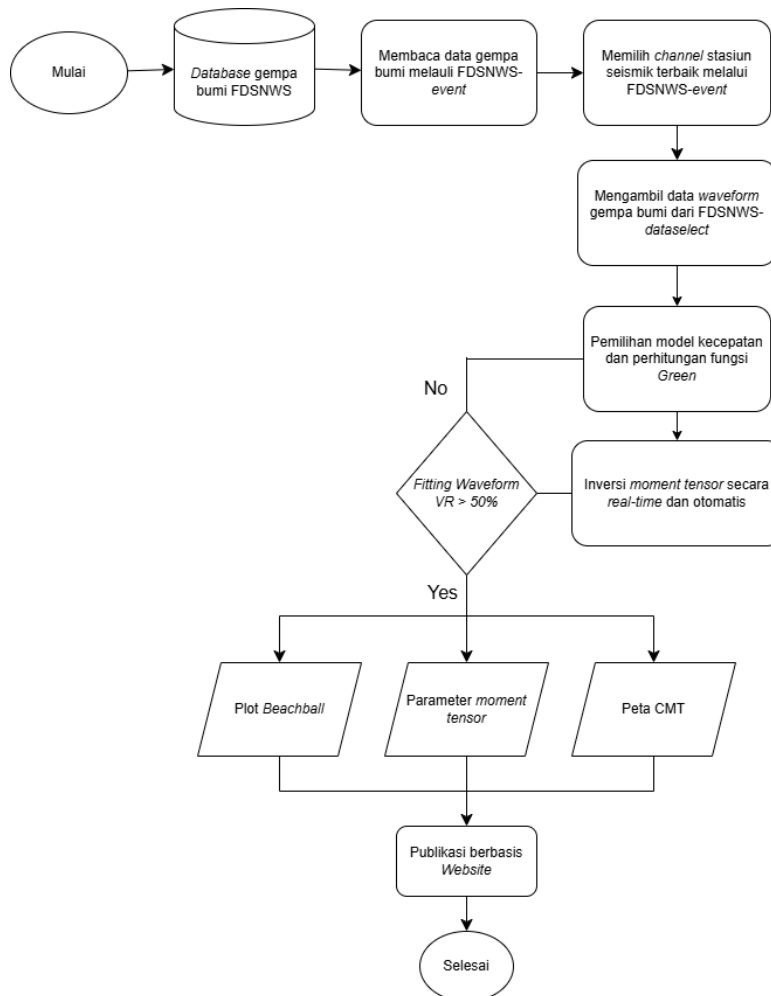
C. Variabel Operasional Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian adalah variabel kontrol, variabel manipulasi, dan variabel respon. Di mana variabel kontrolnya adalah wilayah gempa bumi yaitu dengan koordinat antara 6.10° hingga

8.70° LS (Lintang Selatan) dan 108.00° hingga 111.20° BT (Bujur Timur), kekuatan gempa ≥ 5 Mw, rentang waktu dari tahun 2020 hingga 2024, situs GlobalCMT serta *software* Jokotingkir. Sedangkan untuk variabel manipulasi menggunakan *Bandpass Filter*. Sementara itu, variabel responnya yaitu *strike*, *dip*, dan *rake*.

D. Teknik Pengolahan Data

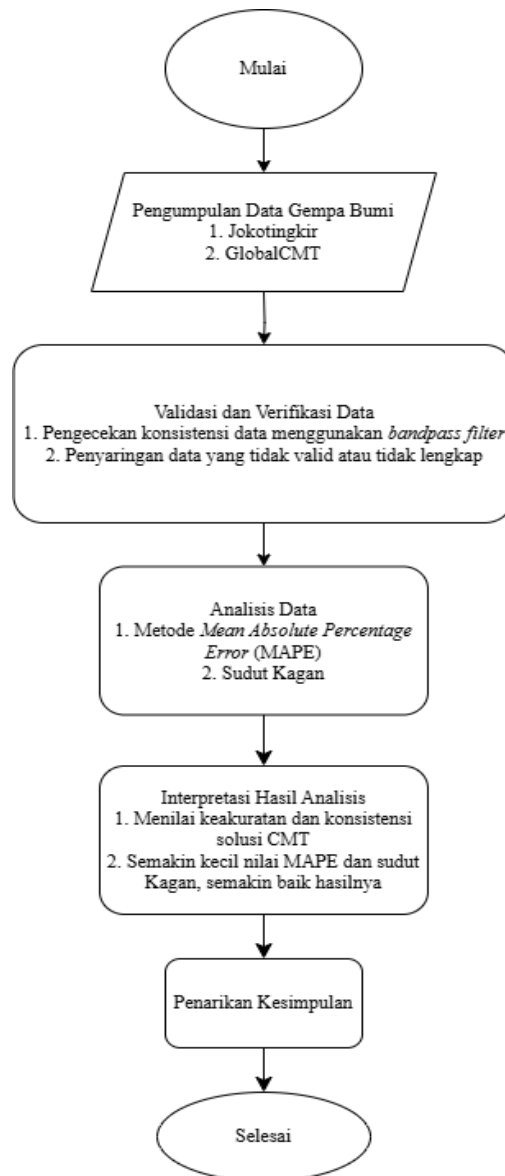
Teknik pengolahan data dilakukan dengan menentukan solusi CMT pada *software* Jokotingkir yang selanjutnya melakukan justifikasi terhadap solusi CMT pada *software* Jokotingkir. Penentuan solusi CMT secara *real-time* pada *software* Jokotingkir didapatkan melalui algoritma GISOLA dengan input dari beberapa stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen yang selanjutnya dilakukan perhitungan fungsi *green* dan penentuan inversi.



Gambar 4. Diagram Alir Penentuan CMT real-time pada *software* Jokotingkir menggunakan algoritma Gisola.

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data gempa bumi dari *software* Jokotingkir dan situs GlobalCMT. Selanjutnya, data divalidasi dan diverifikasi untuk memastikan konsistensi serta menyaring data yang tidak valid sebelum tahap analisis. Langkah berikutnya adalah analisis data menggunakan metode sudut Kagan dan MAPE untuk membandingkan dan mengukur keakuratan *nodal plane* centroid moment-tensor yang diperoleh dari *software* Jokotingkir dan situs GlobalCMT. Proses ini melibatkan perhitungan sudut Kagan menggunakan *software* Matlab untuk mengukur tingkat perbedaan atau kesamaan antara dua solusi CMT dari suatu gempa bumi. Nilai sudut ini dihitung berdasarkan perbedaan orientasi *nodal plane* antara dua solusi CMT yang dibandingkan. Setelah itu, data yang telah diambil diproses untuk mengukur keakuratannya

dengan metode MAPE. Data yang telah dianalisis kemudian diinterpretasikan untuk menentukan keakuratan dan konsistensi solusi CMT yang dihasilkan oleh kedua sumber.



Gambar 5. Diagram Alir Teknik Pengolahan Data

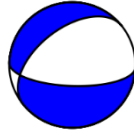
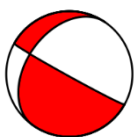
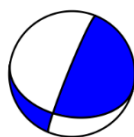
III.HASIL DAN PEMBAHASAN

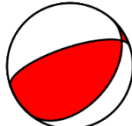
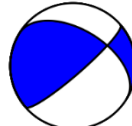
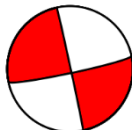
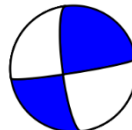
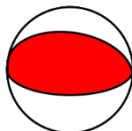
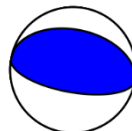
A. Hasil Solusi CMT di Wilayah Jawa Tengah Tahun 2020 – 2024

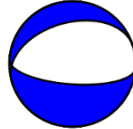
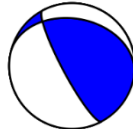
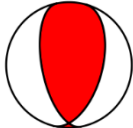
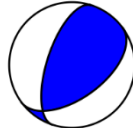
Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis keakuratan solusi CMT gempa bumi di wilayah Jawa Tengah menggunakan metode Gisola pada *software* Jokotingkir. Serta menganalisis hasil perbandingan data antara Jokotingkir dan GlobalCMT menggunakan metode sudut kagan dan MAPE. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah parameter CMT *real-time* dan otomatis terhadap 10 kejadian gempa bumi dalam rentang tahun 2020–2024 di wilayah provinsi Jawa Tengah dengan batas koordinat antara 6.10° hingga 8.70° LS (Lintang Selatan) dan 108.00° hingga 111.20° BT (Bujur Timur) dengan $M_w \geq 5,0$ yang telah diperoleh dari implementasi algoritma Gisola pada *software* Jokotingkir dan GlobalCMT. Parameter tersebut terdiri atas *longitude*, *latitude*, *origin time*, M_w , *depth*, *strike*, *dip* dan *rake*. Penentuan CMT pada Jokotingkir menggunakan input data berupa *waveform* yang terekam oleh stasiun seismik regional milik jaringan GEOFON dari *international Federation of Digital Seismograph Network Web Service* (FDSNWS). Stasiun seismik yang digunakan di koordinat antara 6.10° hingga 8.70° LS dan 108.00° hingga 111.20° BT adalah

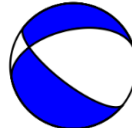
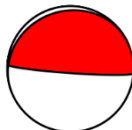
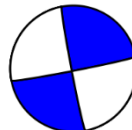
sebanyak 6 stasiun seismik. Diantaranya adalah Semarang (SMR), Yogyakarta (YOG), Banjarnegara (BNJ), Cilacap (CLC), Purwokerto (PWK) dan Solo (SLT). Solusi CMT yang dibandingkan terdiri dari *longitude*, *latitude*, *M_w*, *depth*, *strike*, *dip* dan *rake*.

Tabel 1. Perbandingan Parameter CMT di wilayah Jawa Tengah Pada *Software* Jokotingkir dan GlobalCMT

No	Origin Time	Joko Tingkir			Global CMT		
1	06/07/2020 22:54:00	<i>M_w</i>	6,5		<i>M_w</i>	6,7	
		<i>Longitude</i>	110,63		<i>Longitude</i>	110,55	
		<i>Latitude</i>	-5,65		<i>Latitude</i>	-5,59	
		<i>Depth</i>	514		<i>Depth</i>	535	
		<i>Strike</i>	131	Normal Fault	<i>Strike</i>	92	Normal Fault
		<i>Dip</i>	68		<i>Dip</i>	60	
		<i>Rake</i>	-88		<i>Rake</i>	-67	
		Sudut Kagan 52,2248°					
2	10/04/2021 07:00:00	<i>M_w</i>	6		<i>M_w</i>	6	
		<i>Longitude</i>	112,48		<i>Longitude</i>	112,52	
		<i>Latitude</i>	-8,85		<i>Latitude</i>	-8,85	
		<i>Depth</i>	67		<i>Depth</i>	83,2	
		<i>Strike</i>	119	Normal Fault	<i>Strike</i>	202	Reverse Fault
		<i>Dip</i>	87		<i>Dip</i>	84	
		<i>Rake</i>	-63		<i>Rake</i>	62	
		Sudut Kagan 78,9909°					
3	21/05/2021 12:09:00	<i>M_w</i>	5,8		<i>M_w</i>	5,8	
		<i>Longitude</i>	112,36		<i>Longitude</i>	112,28	
		<i>Latitude</i>	-8,37		<i>Latitude</i>	-8,55	
		<i>Depth</i>	110		<i>Depth</i>	119,1	
		<i>Strike</i>	41		<i>Strike</i>	49	
		<i>Dip</i>	30		<i>Dip</i>	77	

		Rake	63	Reverse Fault 	Rake	55	Reverse Fault 
		Sudut Kagan 49,0712					
4	21/11/2022 06:21:00	M _w	5,5		M _w	5,6	
		Longitud e	107,04		Longitude	107,08	
		Latitude	-6,89		Latitude	-6,84	
		Depth	12		Depth	15	
		Strike	78	Strike-Slip Fault 	Strike	81	Reverse Fault 
		Dip	84		Dip	84	
		Rake	1	Rake	164		
		Sudut Kagan 88,3746					
5	09/01/2023 12:26:00	M _w	5,4		M _w	5,4	
		Longitud e	111,16		Longitude	111,21	
		Latitude	-8,82		Latitude	-9,14	
		Depth	54		Depth	53,5	
		Strike	90	Reverse Fault 	Strike	100	Reverse Fault 
		Dip	54		Dip	58	
		Rake	85	Rake	89		
		Sudut Kagan 9,337					
6	14/04/2023 09:55:00	M _w	6,9		M _w	7,1	
		Longitud e	112,02		Longitude	112,16	
		Latitude	-6,05		Latitude	-6,19	
		Depth	584		Depth	606,8	
		Strike	95		Strike	94	
		Dip	61		Dip	61	

		Rake	-80	Normal Fault 	Rake	-80	Normal Fault 
		Sudut Kagan 1					
7	07/06/2023 17:05:00	M_w	5,7		M_w	5,7	
		Longitude	110,75		Longitude	110,73	
		Latitude	-8,94		Latitude	-9,15	
		Depth	16		Depth	29,3	
		Strike	149	Reverse Fault 	Strike	152	Reverse Fault 
		Dip	81		Dip	76	
		Rake	102		Rake	107	
		Sudut Kagan 7,2794					
8	30/06/2023 12:57:00	M_w	5,9		M_w	5,9	
		Longitude	110,05		Longitude	110,05	
		Latitude	-8,48		Latitude	-8,59	
		Depth	76		Depth	74,5	
		Strike	169	Reverse Fault 	Strike	198	Reverse Fault 
		Dip	51		Dip	54	
		Rake	73		Rake	67	
		Sudut Kagan 33,1238					
9	04/08/2023 00:31:00	M_w	5,6		M_w	5,6	
		Longitude	113,124		Longitude	113,02	
		Latitude	-6,22		Latitude	-6,13	
		Depth	554		Depth	586,7	
		Strike	230		Strike	128	
		Dip	79		Dip	64	

		Rake	-11	Strike-Slip Fault 	Rake	-61	Normal Fault 
		Sudut Kagan 95,9133					
10	22/03/2024 08:53:00	M_w	6,7		M_w	6,4	
		Longitud e	112,386		Longitude	112,41	
		Latitude	-5,8		Latitude	-5,78	
		Depth	2		Depth	12	
		Strike	94	Reverse Fault 	Strike	79	Reverse Fault 
		Dip	84		Dip	87	
		Rake	93		Rake	177	
		Sudut Kagan 86,2805					

Pada **tabel 1** terdapat 10 kejadian gempa di wilayah Jawa Tengah mulai tahun 2020 hingga 2024. Pada parameter *depth* terdapat perbedaan yang kecil pada *event* 21 November 2022 yang hanya berbeda 3 km dan pada *event* 9 Januari 2023 yang hanya berbeda 0,5 km, serta pada *event* 30 Juni 2023 yang berbeda 1,5 km. Namun, ada juga yang memiliki selisih yang berbeda signifikan seperti pada *event* 6 Juli 2020 yang berbeda 21 km, *event* 10 April 2021 yang memiliki selisih 16,2 km, *event* 21 Mei 2021 yang berbeda 9,1 km, *event* 14 April 2023 berbeda 22,8 km, *event* 7 Juni 2023 yang memiliki selisih 13,3 km dan *event* 4 Agustus 2023 yang berbeda 32,7 km, serta *event* 22 Maret 2024 yang memiliki selisih 10 km. Hal ini dikarenakan GlobalCMT menggunakan data teleseismik dan pengolahannya dilakukan secara anual oleh seismolog selama prosesnya (Sawade et al., 2022). Sedangkan pada *software* Jokotingkir memanfaatkan data dari jaringan seismik regional dan lokal secara *real-time* dengan dukungan komputasi melalui metode Gisola, Stasiun seismik bekerja dengan merekam gelombang seismik (P, S, dan gelombang permukaan) yang merambat dari sumber gempa ke permukaan bumi. Perbandingan magnitudo juga menunjukkan kesesuaian antara kedua sumber. Perbedaan magnitudo dapat dipengaruhi oleh perbedaan cakupan data seismik yang digunakan di mana GlobalCMT menggabungkan lebih banyak data dari jaringan internasional sehingga hasilnya cenderung lebih stabil untuk perhitungan magnitudo momen (Das et al., 2019). Sedangkan pada Jokotingkir mengandalkan data dari stasiun lokal/regional, seperti BMKG. Stasiun yang lebih dekat akan merekam sinyal dengan kualitas berbeda dibanding stasiun yang lebih jauh. Data lokal dapat memiliki resolusi tinggi tetapi terbatas cakupan spasialnya, sementara data global lebih luas tapi bisa lebih *noisy*. Seperti pada *event* 6 Juli 2020, 21 November 2022, 14 April 2023 dan *event* 22 Maret 2024.

B. Analisis Perbandingan Solusi CMT di Wilayah Jawa Tengah Menggunakan Sudut Kagan

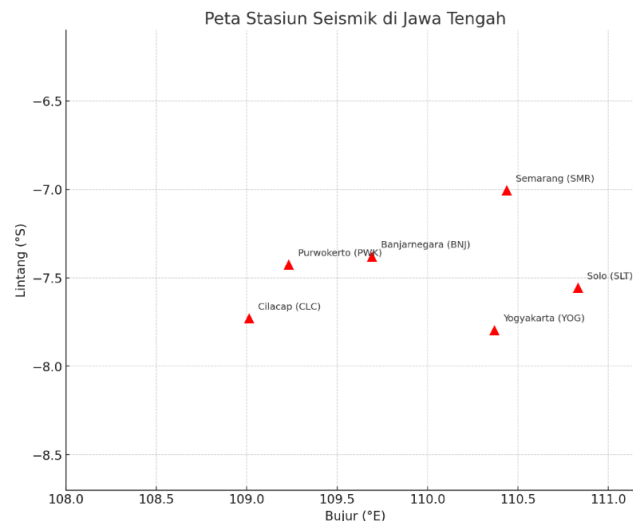
Sudut Kagan merupakan ukuran perbedaan orientasi antara dua mekanisme gempa yang digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian orientasi bidang sesar berdasarkan hasil inversi *moment-tensor* yang dihasilkan oleh program Jokotingkir dan referensi GlobalCMT. Studi ini menganalisis 10 kejadian gempa bumi di Jawa Tengah selama tahun 2020–2024, dan menunjukkan variasi nilai sudut Kagan yang

mencerminkan tingkat ketidaksesuaian orientasi mekanisme sumber gempa, yang telah dirangkum pada tabel 1. Menurut Pondrelli dan Kagan, sudut Kagan dapat diklasifikasikan sebagai (Pondrelli et al., 2006; Kagan, 1991): sangat konsisten (0° – 20°), cukup konsisten (20° – 40°), tidak konsisten (40° – 60°), dan sangat tidak konsisten ($>60^{\circ}$). Klasifikasi ini menjadi dasar evaluasi orientasi spasial solusi mekanisme sumber gempa. Dengan demikian, besar kecilnya sudut Kagan dapat mencerminkan keberhasilan atau kelemahan dari proses inversi *moment-tensor* pada *software* seperti Jokotingkir dibandingkan dengan referensi GlobalCMT.

Dari 10 *event* yang dianalisis, tiga kejadian menunjukkan sudut Kagan $< 10^{\circ}$, yaitu 9 Januari 2023, 14 April 2023, dan 7 Juni 2023 dihasilkan sudut kagan berturut-turut sebesar 9° , 1° , dan 7° yang tergolong sangat konsisten dan menunjukkan bahwa hasil inversi dari Jokotingkir hampir identik dengan GlobalCMT. Hal ini didukung oleh selisih *strike*, *dip*, dan *rake* yang sangat kecil $< 10^{\circ}$ yang menandakan akurasi tinggi dalam menangkap orientasi sesar. Sedangkan *event* seperti 6 Juli 2020, 21 Mei 2021, dan 30 Juni 2023 dengan sudut kagan berturut-turut sebesar 52° , 49° , dan 33° yang menunjukkan perbedaan signifikan karena selisih *strike* dan *rake* yang cukup besar, namun belum menyebabkan perubahan tipe sesar secara fundamental. Lebih lanjut, terdapat empat *event* dengan sudut Kagan ekstrem $> 60^{\circ}$, antara lain *event* 10 April 2021, 21 November 2022, 4 Agustus 2023, dan 22 Maret 2024 dengan nilai sudut kagan berturut-turut sekitar 79° , 88° , 96° , dan 86° . Nilai yang melebihi 60° menurut Pondrelli dan Kagan dikategorikan sebagai tidak konsisten dan menunjukkan bahwa solusi *moment-tensor* dari kedua sumber tidak bisa dianggap setara secara fisik (Pondrelli et al., 2006; Kagan, 1991). Kasus-kasus tersebut umumnya disebabkan oleh perbedaan *rake* ekstrem hingga lebih dari 80° atau bahkan berlawanan arah slipnya misalnya dari normal ke *reverse fault*, yang secara drastis mengubah klasifikasi mekanisme sumber. Meski nilai *strike* dan *dip* pada beberapa kasus ini cukup serupa, *rake* yang sangat berbeda menjadi kontributor utama dalam menghasilkan sudut Kagan yang besar. Perbedaan orientasi spasial ini menjadi indikasi adanya ketidaksesuaian dalam hasil inversi, yang bisa diakibatkan oleh ketidakakuratan data atau keterbatasan sistem observasi.

Rake dinyatakan sebagai parameter yang paling berpengaruh terhadap besarnya sudut Kagan karena berkaitan langsung dengan arah slip pada bidang sesar, kemudian diikuti oleh *strike* dan *dip*. Perbedaan nilai *rake* lebih dari 60° sering kali mencerminkan perubahan jenis sesar, misalnya dari sesar naik menjadi sesar turun, seperti pada *event* 10 April 2021 (*rake*: -63° vs $+62^{\circ}$) dan 21 November 2022 (*rake*: $+84^{\circ}$ vs -79°). Perubahan ini menghasilkan perbedaan arah gerakan massa batuan yang signifikan dalam ruang tiga dimensi sehingga berdampak langsung pada peningkatan sudut Kagan. Selain itu, *strike* memengaruhi orientasi horizontal bidang sesar, di mana selisih di atas 30° dapat berkontribusi besar terhadap kenaikan sudut Kagan. Hal ini tercermin pada *event* 6 Juli 2020 (selisih *strike* 41° , sudut Kagan 52°) dan 4 Agustus 2023 (selisih 102° , sudut Kagan 96°). Sementara itu, *dip* relatif lebih sedikit memengaruhi nilai Kagan, kecuali bila terjadi perubahan drastis dari sudut curam ke landai atau sebaliknya. Secara umum, kombinasi ketiga parameter tersebut menentukan besarnya rotasi antara dua solusi *moment-tensor*, dan apabila ketiganya memiliki selisih yang besar, sudut Kagan dapat menjadi indikator kuat bahwa solusi tidak konsisten secara spasial.

Selain faktor parameter mekanisme, distribusi stasiun seismik juga berperan dalam kualitas inversi CMT. Pada penelitian ini, distribusi stasiun di Jawa Tengah yang divisualisasikan pada gambar 6, relatif terbatas hanya enam stasiun utama (SMR, YOG, BNJ, CLC, PWK, SLT), yang tidak tersebar merata di berbagai arah terhadap pusat gempa. Hal ini berpotensi menimbulkan bias dalam perekaman gelombang seismik, terutama jika sinyal dari sisi tertentu tidak terekam optimal. Jika distribusi stasiun hanya dari satu sisi atau berjauhan dari pusat gempa, maka hasil inversi seperti *strike*, *dip*, dan *rake* bisa menyimpang dari kondisi sebenarnya. Ketidakseimbangan ini dapat menjelaskan kasus-kasus seperti *event* 21 November 2022 dan 4 Agustus 2023, yang memiliki sudut Kagan sangat tinggi dan kemungkinan besar disebabkan oleh distribusi stasiun yang buruk. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kualitas hasil inversi dari *software* seperti Jokotingkir, dibutuhkan penambahan dan penyebaran stasiun yang merata serta lebih dekat dengan pusat-pusat gempa di kawasan rawan seperti selatan Jawa Tengah.



Gambar 6. Grafik Distribusi Stasiun Seismik koordinat antara 6.10° - 8.70° LS dan 108.00° - 111.20° BT

C. Analisis Perbandingan Solusi CMT Menggunakan MAPE

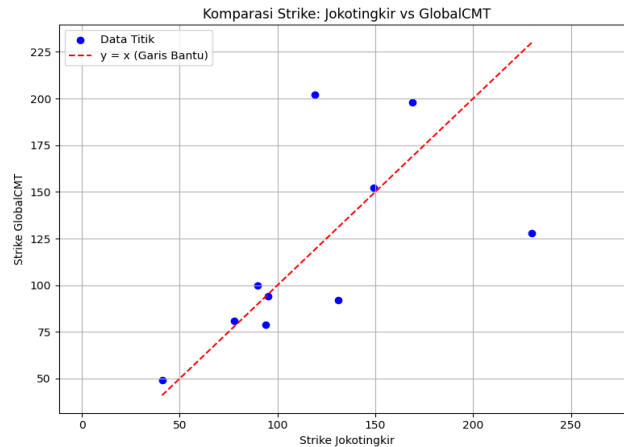
MAPE adalah salah satu metode pengukuran kesalahan yang digunakan untuk mengukur seberapa besar perbedaan antara nilai prediksi dan nilai aktual dalam bentuk persentase. Dalam hal ini digunakan untuk mengukur seberapa besar kesalahan relatif dalam persen antara nilai parameter dari dua sumber, yakni antara *software* Jokotingkir dengan GlobalCMT. Berdasarkan data gempa di Wilayah Jawa Tengah tahun 2020 hingga 2024 menghasilkan *strike*, *dip* dan *rake* yang beragam. Hubungan antara *strike*, *dip*, dan *rake* dengan MAPE sangat penting dalam menilai validitas solusi mekanisme sumber gempa. Nilai MAPE yang tinggi menunjukkan bahwa orientasi bidang patahan atau arah slip berbeda secara signifikan antara dua model. Oleh karena itu, MAPE merupakan indikator kuantitatif yang efektif untuk melengkapi analisis geometri patahan seperti sudut Kagan. Hasil MAPE dari data gempa di wilayah Jawa Tengah tahun 2020 hingga 2024 dapat diketahui melalui Tabel 4.2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan MAPE

No	Origin Time	Strike		Dip		Rake	
		Jokotingkir	GlobalCMT	Jokotingkir	GlobalCMT	Jokotingkir	GlobalCMT
1	06/07/2020 22:54:00	131	92	68	60	-88	-67
2	10/04/2021 07:00:00	119	202	87	84	-63	62
3	21/05/2021 12:09:00	41	49	30	77	67	55
4	21/11/2022 06:21:00	78	81	84	84	1	164
5	09/01/2023 12:26:00	90	100	54	58	85	89
6	14/04/2023 09:55:00	95	94	61	61	-80	-80
7	07/06/2023 17:05:00	149	152	81	76	102	107
8	30/06/2023 12:57:00	169	198	51	54	73	67
9	04/08/2023 00:31:00	230	128	79	64	-11	-61
10	22/03/2024 08:53:00	94	79	84	87	93	177
MAPE (%)		22,9869468		12,38605535		49,44392286	

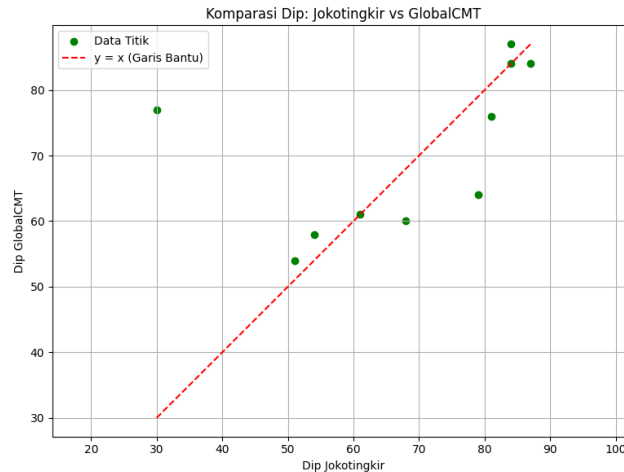
Berdasarkan tabel 2 dapat diketahui bahwasanya hasil MAPE strike 22,98% menunjukkan bahwa nilai ini berada dalam kategori dapat diterima menurut klasifikasi Lewis (1982). Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat selisih antara arah bidang sesar versi Jokotingkir dengan referensi GlobalCMT yang dapat dilihat

pada gambar 7 yang terdapat data *strike* yang menyimpang, yakni titik *event* 4 Agustus 2023, 30 Juli 2023 dan 10 April 2021 yang menyebabkan hasil MAPE sebesar 22,98%. Perbedaan ini disebabkan oleh jenis data yang digunakan Jokotingkir adalah data dari jaringan regional yang umumnya memiliki resolusi lebih tinggi, sedangkan jarak stasiun yang digunakan dapat memengaruhi hasil (Grigoli et al., 2021). Serta seluruh data dari Joko Tingkir bersifat preliminary, yaitu data awal yang diperoleh segera setelah kejadian gempa (Madlazim dan Hariyono, 2014).



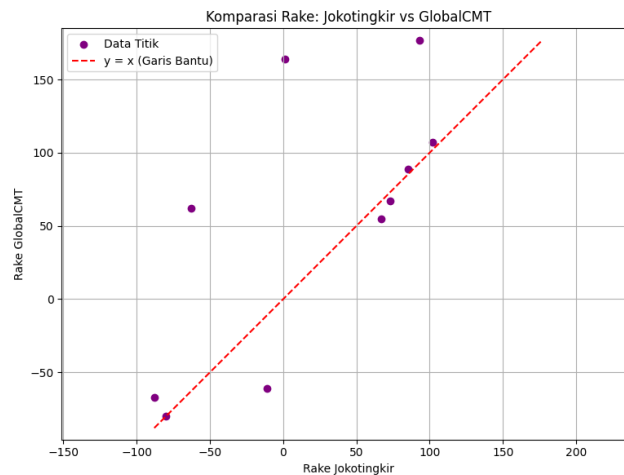
Gambar 7. Grafik Komparasi *Strike* Jokotingkir Dengan GlobalCMT

Hasil MAPE *dip* pada Tabel 4.2 menunjukkan 12,38% yang termasuk dalam kategori baik. Ini menunjukkan bahwa kemiringan bidang sesar dari Jokotingkir relatif konsisten dengan GlobalCMT yang dapat diketahui melalui gambar 8 yang menunjukkan data *dip* yang konsisten meskipun terdapat satu data yang menyimpang, yakni pada *event* 21 Mei 2021. Perbedaan ini bisa disebabkan oleh variasi model kecepatan lokal.



Gambar 8. Grafik Komparasi *Dip* Jokotingkir Dengan GlobalCMT

Sedangkan untuk MAPE *rake* pada tabel 2 menunjukkan hasil 49,44% yang memiliki nilai yang tinggi dan dikategorikan dapat diterima. Pada MAPE *rake* merupakan parameter paling sensitif, karena menentukan arah slip. Hasil MAPE yang tinggi tersebut bisa disebabkan oleh Gisola yang mungkin menggunakan model kecepatan lokal yang berbeda dengan yang digunakan oleh GlobalCMT dan kualitas inversi *waveform* yang rendah serta distribusi stasiun seismik yang tidak merata yang menyebabkan data *rake* yang tinggi dan tidak konsisten seperti pada gambar 9 yang terdapat beberapa titik yang menjauhi garis linear sehingga membuat perbedaan nilai *rake* pada Jokotingkir dengan GlobalCMT berbeda signifikan.



Gambar 9. Grafik Komparasi Rake Jokotingkir Dengan GlobalCMT

Secara keseluruhan hasil analisis MAPE menunjukkan bahwa nilai dari *strike*, *dip* dan *rake* sangat berpengaruh terhadap hasil MAPE yang dimana bertujuan untuk mengukur seberapa besar kesalahan relatif dalam persen antara nilai parameter dari dua sumber, yakni antara *software* Jokotingkir dengan GlobalCMT. Melalui hasil analisis MAPE dapat diketahui bahwasanya hasil perbandingan dikategorikan dapat diterima untuk hasil MAPE *strike* dan *rake*. Serta dikategorikan baik untuk hasil MAPE *dip*.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan analisis terhadap 10 kejadian gempa bumi di Jawa Tengah dengan $M_w \geq 5,0$ selama 2020–2024 menggunakan *software* Jokotingkir dan membandingkannya dengan data GlobalCMT, diperoleh bahwa keakuratan solusi CMT dari Jokotingkir menunjukkan variasi yang cukup besar antar kejadian, dengan hanya 4 dari 10 event menunjukkan konsistensi baik terhadap referensi dengan sudut Kagan $< 40^\circ$. Evaluasi menggunakan MAPE mengindikasikan bahwa parameter *dip* (12,39%) dan *strike* (22,99%) berada dalam kategori baik hingga dapat diterima, namun estimasi *rake* memiliki tingkat kesalahan tinggi (49,44%), mencerminkan inkonsistensi signifikan terutama pada arah *slip* dan klasifikasi tipe patahan. Penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan *software* Jokotingkir melalui evaluasi kuantitatif kinerja solusi Centroid Moment Tensor (CMT) menggunakan Sudut Kagan dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dengan acuan GlobalCMT. Hasil menunjukkan bahwa implementasi algoritma GISOLA dalam Jokotingkir telah menghasilkan estimasi *strike* dan *dip* yang konsisten dan andal, namun masih menunjukkan kelemahan sistematis pada estimasi *rake* yang sensitif terhadap kualitas data, distribusi stasiun, dan model kecepatan. Temuan ini menyediakan dasar evaluasi objektif bagi pengembangan lanjutan Jokotingkir, khususnya dalam penyempurnaan algoritma inversi dan integrasi model kecepatan regional, guna meningkatkan akurasi dan stabilitas solusi CMT regional.

B. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang didapatkan, disarankan agar pengembangan lebih lanjut pada penelitian sejenis memfokuskan upaya pada peningkatan akurasi estimasi parameter *rake* di *software* Jokotingkir, yang dapat dilakukan melalui perbaikan algoritma inversi, peningkatan kualitas data *waveform*, serta pemanfaatan data dari lebih banyak stasiun seismik lokal untuk memperbaiki representasi arah *slip*. Selain itu, penerapan model kecepatan 3D regional yang lebih realistis juga direkomendasikan untuk meningkatkan keandalan estimasi CMT, khususnya pada parameter yang sensitif seperti *rake*. Penghapusan stasiun seismik dengan nilai Variance Reduction (VR) rendah secara menyeluruh dalam satu tahapan revisi turut disarankan agar tidak mengganggu integritas hasil solusi mekanisme sumber yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z., et al. (2009). *Deformation of the Opak Fault Zone in Indonesia as Detected by GPS and DInSAR Observations*. Geological Society of America.
- Aki, K., dan Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology*. University Science Books.
- Armstrong, J. S., dan Collopy, F. (1992). Error measures for generalizing about forecasting methods: *Empirical comparisons*. *International Journal of Forecasting*, 8(1), 69-80.
- Artale Harris, P., Scognamiglio, L., Magnoni, F., Casarotti, E., and Tinti, E. (2022). *Centroid Moment Tensor Catalog With 3D Lithospheric Wave Speed Model: The 2016–2017 Central Apennines Sequence*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(4), e2021JB023068.
- Chen, C., Du, P., dan Jiang, Y. (2017). *Comparison of different methods for variable selection in short-term load forecasting models*. *Energy*, 128, 22-30.
- Das, A., et al. (2019). *GPS-based slip models of one Mw 7.2 and twenty moderate earthquakes along the Sumatran plate boundary*, *Geoscience Letters*, 6
- De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., dan Rossi, F. (2016). *Mean absolute percentage error for regression models*. *Neurocomputing*, 192, 38-48.
- Diedrich, L. et al. (2017). *Tectonic Strain and Faults in Subduction Zones*. *Earth and Planetary Science Letters*, 485(3), 167-179.
- Frohlich, C., & Davis, S. D. (1999). *How well constrained are well-constrained T, B, and P axes in moment tensor catalogs?* *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B3), 4901-4910.
- Gomberg, J., et al. (1990). "Inverse problem of seismic source identification using moment tensors." *Journal of Geophysical Research*, 95(B10), 17993-18002.
- Gunawan I dan Subarjo, 2005. *Pengantar Seismologi*. Badan Meteorologi dan Geofisika: Jakarta
- Gutscher, M. A. et al. (2000). *The Subduction Zone of the Chile Triple Junction*. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12), 28737–28756.
- Harris, R. A., Cocco, M., dan Mansinha, L. (2009). *The spatial distribution of aftershock locations in the Kagan method*. *Journal of Seismology*, 13(2), 113-124.
- <https://geologi.esdm.go.id/media-center/analisis-geologi-kejadian-gempa-bumi-merusak-di-perairan-selatan-provinsi-daerah-istimewa-yogyakarta-dan-jawa-tengah-tanggal-30-juni-2023-2> diakses pada 11 Februari 2025
- Hyndman, R. J., dan Koehler, A. B. (2006). *Another look at measures of forecast accuracy*. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679-688.
- Kagan, Y. Y. (1991). "3-D rotation of double-couple earthquake sources." *Geophysical Journal International*, 106(3), 709–716.
- Kagan, Y. Y. (1991). *Some statistical characteristics of earthquake focal mechanisms*. *Geophysical Journal International*, 106(1), 89-96.
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods*.
- Makridakis, S., dan Hibon, M. (2000). *The M3-Competition: Results, conclusions, and implications*. *International Journal of Forecasting*, 16(4), 451-476.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., dan Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley & Sons.
- Muliawati dan Harbowo, D. G. "A Statistical review of the dates and patterns of volcanic activity of Lewotolo Volcano, East Nusa Tenggara, Indonesia," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1245, no. 1, p. 012006, 2023
- National Observatory of Athens. (2023). *GISOLA: High-Performance Seismic Inversion Software*. Retrieved from <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/>

- Pondrelli, E., *et al.* (2006), "The Italian CMT dataset from 1977 to the present"
- Sawade, L., Beller, S., Lei, W., & Tromp, J. (2022). *Global centroid moment tensor solutions in a heterogeneous earth: the CMT3D catalogue*. *Geophysical Journal International*, 231(3), 1727–1738
- Scognamiglio, L., Tinti, E., & Michelini, A. 2009. Real-time determination of seismic moment tensor for the Italian region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(4), 2223–2242.
- Shearer, P. M. (2019). *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press.
- Stein, S., dan Wysession, M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing.
- Sumarti, D., dan Saptaji, A. (2011). *Geologi Daerah Jawa Tengah*. Jakarta: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Tape, W., dan Tape, C. (2012). A geometric setting for moment tensors. *Geophysical Journal International*, 190(1), 476–498.
- Triantafyllis, N., *et al.* (2022). "GISOLA: A High-Performance Computing Application for Real-Time Seismic Moment Tensor Determination." *Seismological Research Letters*, 93(2A), 957–970. doi:10.1785/0220210345
- Triantafyllis, N., Venetis, I., Fountoulakis, I., Pikoulis, E.-V., Sokos, E., dan Evangelidis, C. (2021). *Gisola: {Real-Time} Moment Tensor computation optimized for multicore and manycore architectures*. {EGU} General Assembly Conference Abstracts, EGU21–15888.
- Trisnisa, R. Metrikasari, R. Rabbanie, K. Sakdiyah dan A. Choiruddin, "Model Inhomogeneous Spatial Cox Processes Untuk Pemetaan Risiko Gempabumi di Pulau Jawa," *INFERENSI* Vol. 2 (2), pp. 107–111, 2019.
- Watkinson, I.M., dan Hall, R. (2017). *Fault systems of the eastern Indonesia collision complex*. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76, 389–403.
- Yamazaki, Y., Kubo, H., dan Sato, T. (2012). Tectonic implications of earthquake focal mechanisms: A case study of the Japan subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B6), B06301.