

ANALISIS KEAKURATAN SOLUSI *CENTROID MOMENT-TENSOR* (CMT) PADA JOKO TINGKIR MENGGUNAKAN METODE *MEAN ABSOLUTE ERROR* (MAE) DAN SUDUT KAGAN DI WILAYAH JAWA TIMUR

¹⁾Muhammad Ramdhani Novalianto, ²⁾Madlazim, ³⁾Arie Realita

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadramdhani.21042@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

Wilayah Jawa Timur merupakan kawasan aktif secara tektonik yang rawan terjadi gempa bumi. Untuk menunjang mitigasi bencana, diperlukan pemahaman yang akurat terhadap mekanisme sumber gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas solusi *Centroid Moment-Tensor* (CMT) dari sistem Joko Tingkir dengan membandingkannya terhadap solusi dari GlobalCMT. Metode yang digunakan mencakup *Mean Absolute Error* (MAE) untuk menilai selisih absolut parameter mekanisme sumber (*strike*, *dip*, *rake*) dan sudut Kagan untuk mengukur kesesuaian orientasi bidang patahan. Hasil menunjukkan bahwa nilai MAE masing-masing adalah $64,5^\circ$ (*strike*), $14,00^\circ$ (*dip*), dan $27,17^\circ$ (*rake*). Sementara itu, sudut Kagan berada dalam rentang $2,066^\circ$ hingga $22,814^\circ$, yang masih di bawah ambang batas toleransi 60° . Temuan ini menunjukkan bahwa solusi CMT dari Joko Tingkir cukup konsisten dengan GlobalCMT dan dapat dijadikan referensi awal dalam analisis mekanisme gempa bumi di Jawa Timur.

Kata Kunci: *Centroid Moment-Tensor*, Joko Tingkir, GlobalCMT, MAE, Sudut Kagan

Abstract

East Java is one of Indonesia's tectonically active regions with high seismic risk. To support disaster mitigation, accurate understanding of earthquake source mechanisms is essential. This study aims to assess the accuracy of *Centroid Moment Tensor* (CMT) solutions generated by Joko Tingkir software by comparing them with GlobalCMT solutions. The *Mean Absolute Error* (MAE) method was employed to evaluate absolute differences in *strike*, *dip*, and *rake* parameters, while Kagan angle was used to assess the consistency of fault plane orientation. The results show MAE values of 64.5° for *strike*, 14.00° for *dip*, and 27.17° for *rake*. The Kagan angles ranged from 2.066° to 22.814° , well below the 60° tolerance threshold. These findings indicate that Joko Tingkir's CMT solutions are sufficiently accurate and consistent with GlobalCMT data for preliminary earthquake source mechanism estimation in East Java.

Keywords: *Centroid Moment-Tensor*, Joko Tingkir, GlobalCMT, MAE, Kagan angle

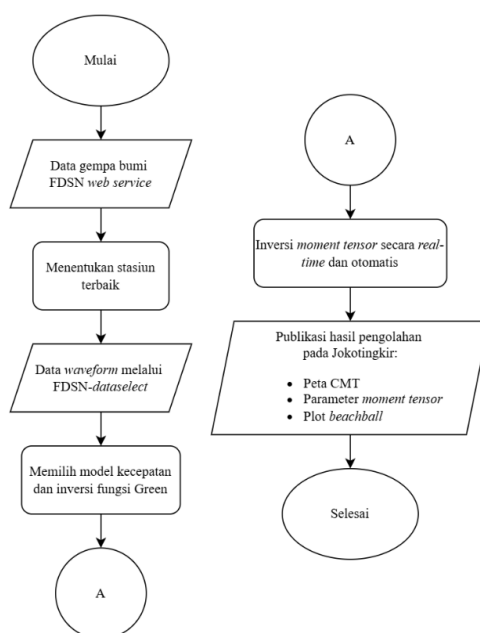
I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada zona konvergensi tiga lempeng utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik (Hutchings & Mooney, 2021). Kondisi ini menyebabkan tingginya frekuensi gempa bumi di berbagai wilayah, termasuk Jawa Timur yang menjadi salah satu kawasan paling aktif secara seismik (Irsyam *et al.*, 2020). Aktivitas ini umumnya dipicu oleh pergerakan lempeng subduksi dan keberadaan sistem sesar aktif di daratan maupun laut. Berdasarkan data Seismic Analysis Group for Education (SAGE) dari National Science Foundation, dari tahun 2019 hingga 2024 tercatat lebih dari 300 kejadian gempa bumi di Jawa Timur, termasuk kejadian merusak seperti gempa 10 April 2021 di selatan Malang yang menyebabkan kerusakan bangunan dan korban jiwa (Praja *et al.*, 2021).

Pemahaman terhadap karakteristik sumber gempa merupakan aspek krusial dalam upaya mitigasi bencana. Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis mekanisme sumber gempa adalah *Centroid Moment-Tensor* (CMT), representasi matematis dari distribusi gaya di sekitar sumber gempa yang diperoleh melalui inversi data gelombang seismik tiga komponen (Nakano *et al.*, 2008). CMT memungkinkan peneliti mengetahui jenis (*strike-slip*, *normal*, atau *reverse*) serta orientasi bidang sesar dan arah pergerakan patahan, yang bisa digunakan dalam kajian *tectonic stress field* dan seismotektonik suatu wilayah (Madlazim *et al.*, 2024).

Solusi CMT telah dikembangkan dalam berbagai sistem, salah satunya oleh GlobalCMT sebagai acuan global. Di sisi lain, perangkat lunak Joko Tingkir yang dikembangkan dengan menggunakan algoritma Gisola, hadir sebagai alternatif berbasis nasional dengan keunggulan pada efisiensi dan kecepatan pemrosesan data secara *real-time* melalui teknologi pemrograman paralel (Triantafyllis *et al.*, 2021). Meskipun demikian, validasi terhadap akurasi hasil CMT dari Joko Tingkir masih diperlukan, terutama untuk memastikan kesesuaian hasilnya dengan standar global seperti yang disediakan oleh GlobalCMT.

Pengolahan data gempa bumi pada Joko Tingkir diawali dengan pengambilan informasi melalui FDSN *Web Service*. Lalu, dilakukan pemilihan stasiun seismik yang paling representatif dalam merekam peristiwa gempa. Data *waveform* diperoleh menggunakan layanan FDSN-*dataslect*, kemudian dipilih model kecepatan seismik untuk menghitung fungsi Green. Tahap berikutnya adalah inversi *moment-tensor* yang dijalankan secara otomatis dan *real-time*. Hasil analisis ini disajikan melalui Joko Tingkir, yang menampilkan peta CMT, parameter moment tensor, serta ilustrasi *beachball*. Alur proses secara lengkap ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Proses pengolahan data pada Joko Tingkir (CMT).

Penelitian terkait mekanisme sumber gempa bumi sebelumnya telah dilakukan oleh (Submawati, 2014) dengan topik mengenai estimasi momen tensor, pola bidang sesar, dan mekanisme fokus gempa menggunakan program Isola. Namun, program Isola memiliki beberapa kekurangan, di antaranya proses pengolahan data yang cenderung lebih lambat karena masih menggunakan pemrosesan berbasis CPU secara serial serta keterbatasan dalam integrasi langsung dengan layanan data seismik secara *real-time* (Sokos & Zahradnik, 2008). Pengembangan dari Isola menghadirkan perangkat lunak Scisola yang membawa peningkatan dari segi kestabilan perhitungan dan beberapa perbaikan pada antarmuka pengguna, meskipun performanya dalam pemrosesan data masih terbatas karena belum memanfaatkan teknologi komputasi paralel secara optimal (Triantafyllis *et al.*, 2016). Seiring perkembangan teknologi, program Gisola hadir sebagai versi yang lebih baik dibandingkan Isola karena memiliki kemampuan pengolahan data yang lebih cepat dan efisien melalui pemanfaatan teknologi multiprocessing, dukungan GPU, serta integrasi dengan layanan data seismik FDSN *Web Services* secara *real-time* (Triantafyllis *et al.*, 2021).

Penelitian terkait analisis keakuratan solusi CMT juga telah dilakukan sebelumnya oleh Putri *et al.* (2024) dengan menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) sebagai pendekatan evaluasi kualitas data. Metode RMSE memiliki kekurangan, yaitu lebih sensitif terhadap nilai-nilai error yang besar, sehingga kesalahan yang ekstrem akan memberikan pengaruh lebih besar terhadap hasil akhir (Hodson, 2022).

Evaluasi terhadap kualitas solusi CMT dapat dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif, di antaranya metode *Mean Absolute Error* (MAE) dan sudut Kagan. MAE digunakan untuk menghitung rata-rata selisih absolut antara parameter mekanisme sumber (*strike*, *dip*, *rake*) dari dua solusi yang dibandingkan tanpa mempertimbangkan arah deviasi (Hodson, 2022). Sedangkan, sudut Kagan mengukur perbedaan orientasi bidang patahan secara geometrik berdasarkan rotasi tiga dimensi antara dua momen tensor dan menjadi indikator penting dalam mengukur kesesuaian model mekanisme fokus gempa (Kagan, 1991).

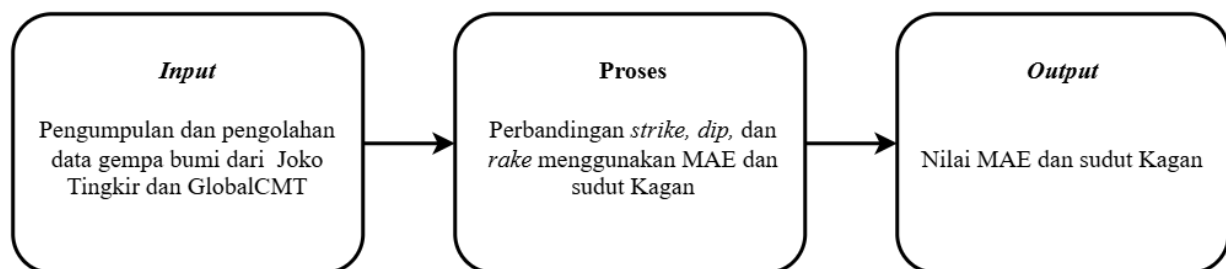
Berdasarkan pendahuluan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis akurasi solusi CMT dari Joko Tingkir dengan membandingkannya terhadap GlobalCMT menggunakan metode MAE dan sudut Kagan. Studi ini difokuskan pada gempa bumi yang terjadi di Jawa Timur pada periode 2021 hingga 2023 dengan magnitudo $\geq 4,5$. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap validasi sistem analisis gempa nasional dan memperkuat upaya mitigasi bencana berbasis data seismologis yang andal dan terverifikasi.

II. METODE

Penelitian ini merupakan studi berbasis komputasi yang melibatkan pengambilan dan pengolahan data sekunder menggunakan pendekatan komputasional. Analisis data dilakukan dengan memanfaatkan metode Gisola sebagai alat bantu utama dalam pengolahan informasi seismik.

A. Rancangan Penelitian

Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Skema penelitian analisis keakuratan solusi *centroid moment-tensor* (CMT).

Rancangan penelitian ini disusun dalam tiga tahapan utama yang saling terintegrasi, yaitu tahap input, proses, dan output. Pada tahap input, data gempa bumi dikumpulkan dari dua sumber berbeda, yaitu Joko Tingkir dan GlobalCMT. Data yang diambil meliputi parameter mekanisme sumber gempa seperti *strike*, *dip*,

dan *rake* dari beberapa kejadian gempa yang terjadi di wilayah Jawa Timur dalam rentang waktu tertentu. Tahap selanjutnya adalah proses analisis, yaitu tahap penting di mana data yang telah diperoleh sebelumnya diolah, diinterpretasikan, serta dibandingkan secara sistematis. Perbandingan tersebut dilakukan dengan menerapkan dua pendekatan kuantitatif. Pertama, metode mean absolute error (MAE) digunakan untuk mengukur rata-rata selisih absolut antara parameter seismik yang diperoleh dari kedua sumber data, sehingga dapat menggambarkan tingkat kedekatan hasil secara numerik. Kedua, analisis sudut Kagan diterapkan untuk mengevaluasi sejauh mana perbedaan orientasi bidang patahan secara geometris antara solusi yang dihasilkan oleh Joko Tingkir dengan solusi pembanding dari GlobalCMT. Hasil penghitungan dari kedua metode tersebut, yakni nilai MAE dan sudut Kagan, kemudian dipakai sebagai indikator utama dalam tahap output untuk menilai tingkat keakuratan sekaligus konsistensi solusi CMT yang diproduksi oleh Joko Tingkir apabila dibandingkan dengan data standar global.

B. Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan tiga kategori variabel utama yang berperan penting dalam analisis, yaitu variabel kontrol, variabel manipulasi, dan variabel respon. Variabel kontrol pada studi ini meliputi aspek spasial dan temporal, yakni wilayah geografis penelitian yang difokuskan di Provinsi Jawa Timur dengan cakupan koordinat antara 5,08° hingga 11,19° LS dan 110,00° hingga 114,58° BB. Selain itu, kontrol juga ditentukan berdasarkan rentang waktu kejadian gempa, yaitu antara tahun 2021 hingga 2023, dengan magnitudo minimal sebesar $\geq 4,5$ Mw sehingga hanya peristiwa dengan kekuatan signifikan yang dianalisis. Variabel manipulasi dalam penelitian ini berupa penggunaan stasiun seismik serta penerapan bandpass filter yang diintegrasikan dalam proses pengolahan data menggunakan perangkat lunak Gisola, sehingga memungkinkan peningkatan akurasi hasil interpretasi. Adapun variabel respon merujuk pada parameter-parameter gempa bumi yang dihasilkan dari analisis, khususnya meliputi nilai strike, dip, serta rake yang merepresentasikan karakteristik mekanisme sumber gempa.

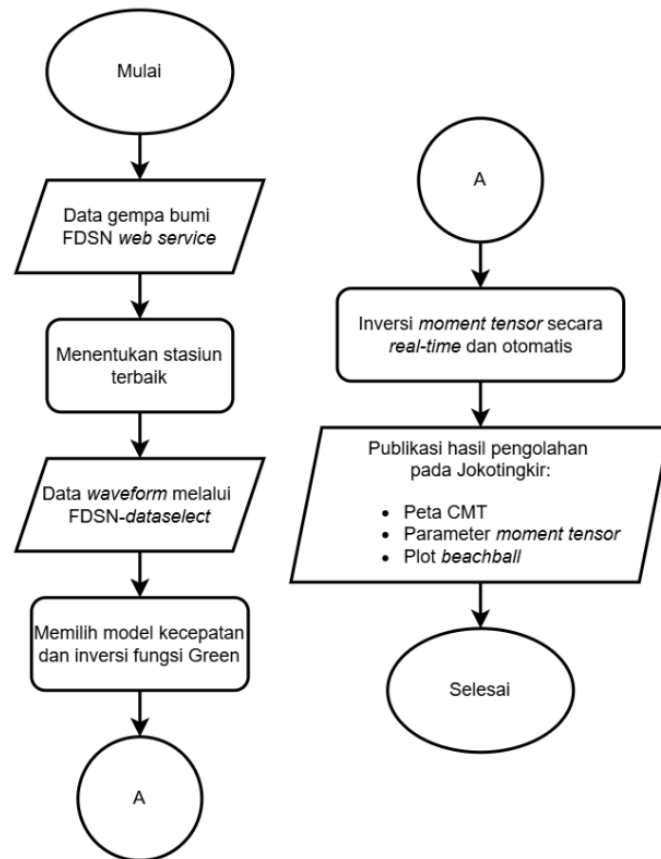
C. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dibagi ke dalam tiga kategori utama, yaitu data sekunder, data input, dan data output dari sistem Joko Tingkir. Data sekunder diperoleh dari dua sumber rujukan yang relevan dan kredibel, yakni laman Joko Tingkir (<https://jokotingkir.unesa.ac.id>) serta Global Centroid Moment Tensor (<https://www.globalcmt.org/>). Melalui portal Joko Tingkir, peneliti mengakses katalog gempa yang secara khusus memuat peristiwa seismik di wilayah Jawa Timur pada periode tahun 2021 hingga 2023 dengan kriteria magnitudo $\geq$ Mw 4,5. Dari katalog tersebut kemudian dicatat sejumlah parameter penting, antara lain waktu kejadian, lokasi episenter, kedalaman hiposenter, nilai magnitudo, serta komponen mekanisme sumber gempa berupa strike, dip, dan rake. Prosedur yang serupa juga diterapkan pada basis data GlobalCMT, dengan cara memasukkan batasan wilayah dan rentang waktu yang sesuai, sehingga memungkinkan diperoleh data pembanding yang konsisten serta dapat meningkatkan keandalan analisis.

D. Teknik Pengolahan Data

Proses pengolahan data gempa bumi dalam penelitian ini diawali dengan tahap pengambilan data melalui FDSN Web Service yang menyediakan informasi kejadian seismik secara daring. Setelah data gempa berhasil diakses, langkah selanjutnya adalah melakukan pemilihan stasiun seismik terbaik yang memiliki rekaman paling representatif terhadap peristiwa gempa yang dianalisis, sehingga kualitas data tetap terjaga. Data waveform dari stasiun tersebut kemudian diunduh menggunakan layanan FDSN-dataselect untuk memastikan ketersediaan sinyal mentah yang dapat diolah lebih lanjut. Tahap berikutnya adalah memilih model kecepatan seismik yang sesuai dengan kondisi geologi wilayah, yang kemudian digunakan dalam perhitungan fungsi Green sebagai dasar pemodelan respons bumi terhadap gelombang seismik. Sesudah itu dilakukan proses inversi moment-tensor secara otomatis dan real-time guna memperoleh parameter sumber gempa dengan tingkat keakuratan yang memadai. Hasil akhir dari keseluruhan proses pengolahan data ini dipublikasikan secara terbuka melalui platform Joko Tingkir, yang menyajikan informasi berupa peta CMT, parameter moment-tensor, serta plot beachball yang menggambarkan mekanisme sumber gempa.

Diagram pengolahan data Gisola pada Joko Tingkir disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart pengolahan data Joko Tingkir.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan data parameter mekanisme sumber gempa bumi berdasarkan solusi Centroid Moment-Tensor (CMT) untuk kejadian-kejadian yang berlangsung antara tahun 2021 hingga 2023 dengan magnitudo momen (M_w) minimal 4,5. Lokasi kejadian gempa berada di wilayah Provinsi Jawa Timur, mencakup koordinat geografis dari 5,08° hingga 11,19° LS dan dari 110,00° hingga 114,58° BB. Wilayah ini meliputi sebagian besar wilayah daratan dan perairan pesisir Jawa Timur dengan konsentrasi aktivitas dominan pada bagian selatan yang merupakan zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia yang dikenal sebagai kawasan dengan tingkat seismisitas tinggi (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Kondisi tersebut menuntut adanya distribusi jaringan stasiun seismik yang merata untuk mendeteksi dan merekam peristiwa gempa secara optimal di wilayah tersebut.



Gambar 3. Distribusi peta stasiun seismik di Indonesia.

Gambar 3 menampilkan sebaran 21 stasiun seismik yang digunakan oleh sistem Joko Tingkir dalam proses akuisisi data (Madlazim, 2015). Jaringan stasiun ini tersebar luas di berbagai wilayah Indonesia, mencakup pulau-pulau besar seperti Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Data yang dikumpulkan dari masing-masing stasiun dimanfaatkan dalam perhitungan mekanisme sumber gempa dengan menggunakan metode inversi CMT. Perhitungan ini dilakukan berdasarkan tiga komponen utama gelombang seismik, yakni BHN (arah utara-selatan), BHE (arah timur-barat), dan BHZ (komponen vertikal), yang memberikan informasi lengkap mengenai karakteristik perambatan gelombang dari sumber gempa ke permukaan (Maulidah, 2016).

A. Hasil Perhitungan Sudut Kagan

Analisis sudut Kagan digunakan dalam penelitian ini sebagai pendekatan kuantitatif untuk menilai tingkat kesesuaian orientasi tensor momen antara data yang dihasilkan oleh Joko Tingkir dan GlobalCMT. Melalui metode ini, dapat diukur seberapa besar perbedaan arah bidang sesar yang terbentuk dari dua sistem, yang sekaligus menjadi indikator untuk mengevaluasi akurasi hasil inversi Centroid Moment Tensor (CMT). Enam kejadian gempa bumi di wilayah Jawa Timur yang terjadi antara tahun 2021 hingga 2023 dipilih sebagai sampel, dan parameter mekanisme sumber masing-masing dianalisis untuk mendapatkan nilai sudut Kagan serta pola perbedaan orientasi antar solusi.

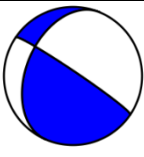
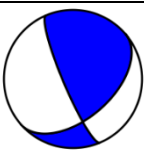
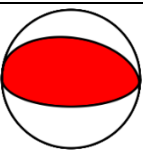
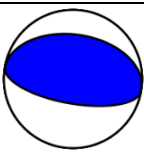
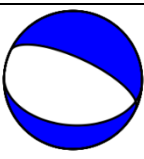
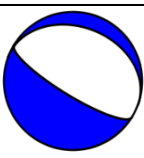
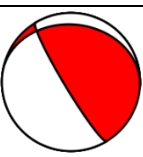
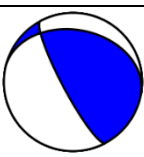
Pada kejadian gempa 10 April 2021, ditemukan selisih mencolok pada parameter strike antara dua sistem, yakni 119° dari Joko Tingkir dan 304° dari GlobalCMT. Meskipun secara numerik menunjukkan perbedaan hampir 185° , nilai sudut Kagan yang hanya sekitar $10,354^\circ$ mengindikasikan bahwa orientasi tensor momen secara keseluruhan masih sangat mirip. Hal ini didukung pula oleh perbedaan *rake* yang berlawanan tanda, yaitu -63° dan 62° yang mencerminkan bahwa salah satu sistem mungkin merujuk pada bidang sesar utama, sementara yang lain menggunakan bidang bantu (*auxiliary plane*). Fenomena ini sejalan dengan teori simetri *double-couple* dalam mekanisme sumber gempa, di mana dua bidang tersebut dapat menghasilkan tensor yang identik secara matematis meskipun berbeda secara geometris (Kagan, 1991).

Pada gempa tanggal 14 April 2023, ditemukan kesesuaian parameter yang sangat tinggi antara dua solusi dengan *strike* dan *dip* hampir identik dan *rake* menunjukkan mekanisme sesar normal. Hal ini diperkuat oleh sudut Kagan yang sangat kecil, yakni hanya $2,065^\circ$, serta visualisasi *beachball* yang menunjukkan pola dilatasi. Sebaliknya pada kejadian 6 Agustus 2023, perbedaan parameter cukup mencolok, terutama pada *strike* dan *dip* yang berkontribusi terhadap nilai sudut Kagan tertinggi dalam penelitian ini, yaitu $22,81^\circ$. Ketidakesesuaian tersebut kemungkinan disebabkan oleh kompleksitas struktur lokal dan gangguan data pada saat perekaman di stasiun seismik (Oktaviani *et al.*, 2024). Meski demikian, secara umum mekanisme sumber yang dihasilkan tetap konsisten sebagai sesar *oblique-reverse*.

Perbedaan orientasi seperti ini pada umumnya terjadi karena proses inversi parameter gempa dilakukan secara tidak langsung, sehingga hasilnya sangat bergantung pada kualitas data masukan yang tersedia serta model kecepatan gelombang yang dipilih dalam perhitungan. Selain faktor utama tersebut, ketidakpastian juga dapat muncul dari berbagai aspek teknis dalam metode pengukuran, misalnya keterbatasan resolusi data seismik yang terekam, distribusi maupun posisi stasiun pengamat yang tidak selalu ideal, serta variasi pendekatan algoritmik yang diterapkan dalam proses analisis. Semua faktor tersebut secara bersama-sama dapat memengaruhi keakuratan hasil estimasi parameter mekanisme sumber, khususnya nilai *strike*, *dip*, dan *rake* yang merepresentasikan orientasi bidang patahan (Quinn & Ehlmann, 2019).

Secara keseluruhan, sebagian besar nilai sudut Kagan dari enam kejadian gempa yang dianalisis berada di bawah ambang batas 60° yang menunjukkan bahwa orientasi momen tensor dari Joko Tingkir dan GlobalCMT tergolong searah dan konsisten. Meskipun terdapat variasi pada beberapa parameter individual seperti *strike* dan *rake*, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa solusi dari Joko Tingkir cukup dapat diandalkan dalam menggambarkan orientasi umum sumber gempa bumi. Hasil ini juga sejalan dengan temuan pada studi lain, seperti (Gonzalez *et al.*, 2017) yang menunjukkan pentingnya verifikasi hasil inversi terhadap data referensi dalam rangka meningkatkan akurasi dan kepercayaan terhadap informasi mekanisme gempa yang dihasilkan.

Tabel 1. Diagram *beachball* beserta nilai sudut Kagan untuk setiap kejadian gempa bumi.

No	Tanggal	Joko Tingkir	GlobalCMT	Sudut Kagan
1	10/04/2021			10,354°
2	21/05/2021			8,364°
3	09/01/2023			9,207°
4	14/04/2023			2,065°
5	06/08/2023			22,814°
6	07/06/2023			7,279°

B. Hasil Perhitungan Metode Mean Absolute Error (MAE)

Tingkat keakuratan solusi centroid moment-tensor (CMT) yang dihasilkan perangkat lunak Joko Tingkir dievaluasi menggunakan pendekatan kuantitatif berupa perhitungan Mean Absolute Error (MAE). Metode ini mengukur selisih absolut rata-rata antara parameter mekanisme sumber (strike, dip, dan rake) dari Joko Tingkir terhadap data pembandingan GlobalCMT.

Tabel 2. Nilai MAE untuk parameter *strike*, *dip*, dan *rake*.

No	Origin Time	Strike		Dip		Rake	
		Joko Tingkir	GlobalCMT	Joko Tingkir	GlobalCMT	Joko Tingkir	GlobalCMT
1	10/04/2021 07.00	119	304	87	84	-63	62
2	21/05/2021 12.09	160	157	74	77	63	55
3	09/01/2023 12.26	90	100	54	58	85	91
4	14/04/2023 09.55	95	94	29	31	-107	-108
5	06/08/2023 19.40	105	290	86	19	-83	-101
6	07/06/2023 17.04	149	152	81	76	102	107
Mean Absolute Error		64.5		14.00		27.17	

Nilai MAE memberikan gambaran seberapa besar deviasi numerik antara dua sistem dalam menghasilkan parameter yang sama. Rumus MAE dinyatakan dengan persamaan: $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$, Di

mana n adalah jumlah data, y_i merupakan nilai parameter CMT dari GlobalCMT dan $\hat{y}_i$ adalah nilai parameter yang diperoleh dari Joko Tingkir. Hasil perhitungan MAE digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana solusi otomatis dan *real-time* dari Joko Tingkir mendekati referensi GlobalCMT, serta menilai keandalannya.

Hasil perbandingan nilai *strike*, *dip*, dan *rake* antara solusi Joko Tingkir dan GlobalCMT menunjukkan adanya variasi tingkat kesesuaian antarparameter. Di antara ketiganya, parameter *strike* menunjukkan selisih paling besar dengan nilai MAE mencapai $64,5^\circ$ yang mengindikasikan bahwa orientasi bidang sesar hasil inversi dari Joko Tingkir cenderung berbeda secara signifikan dibandingkan dengan GlobalCMT. Selisih besar ini terutama disebabkan oleh dua kejadian gempa, yaitu pada 10 April 2021 dan 6 Agustus 2023. Pada kejadian pertama, nilai *strike* berbeda hingga 185° antara dua sumber, begitu pula pada kejadian kedua dengan selisih yang sama besar. Perbedaan tersebut menunjukkan kemungkinan adanya ketidaksesuaian dalam penentuan bidang nodal utama atau dipengaruhi oleh metode inversi serta model kecepatan gelombang seismik yang digunakan masing-masing sistem (Madlazim, 2015); Sawade et al., 2022).

Selain faktor inversi dan model kecepatan, sumber data yang digunakan juga memengaruhi hasil. Sistem Joko Tingkir mengandalkan data dari jaringan seismik regional yang cenderung memiliki resolusi spasial lebih tinggi, namun keakuratan hasil sangat dipengaruhi oleh distribusi dan jarak antar stasiun (Grigoli et al., 2021). Perlu dicatat bahwa data dari Joko Tingkir bersifat *preliminary*, yaitu hasil awal yang dihasilkan segera setelah gempa terjadi (Madlazim & Hariyono, 2014). Data jenis ini umumnya digunakan untuk estimasi cepat dalam konteks tanggap darurat, sehingga masih terbuka kemungkinan untuk dilakukan revisi di tahap selanjutnya, baik melalui pemilihan stasiun yang lebih optimal maupun pemutakhiran model kecepatan seismik yang lebih representatif terhadap kondisi lokal.

Sementara itu, pada nilai MAE untuk *strike* yang melebihi 60° mengindikasikan adanya perbedaan orientasi bidang sesar yang signifikan yang dapat disebabkan oleh perbedaan dalam penentuan *nodal plane* utama atau model kecepatan yang digunakan dalam proses inversi. Hal ini juga dipengaruhi karena *strike* memiliki cakupan sudut 0° hingga 360° , maka deviasi yang besar masih dapat dianggap relevan secara geometri jika *rake* dan *dip* tetap konsisten. Secara umum hasil evaluasi menunjukkan bahwa data CMT dari Joko Tingkir masih layak digunakan sebagai referensi dalam studi seismotektonik.

Pada parameter *dip* memiliki MAE paling rendah, yaitu sebesar $14,00^\circ$. Hal ini mengindikasikan bahwa kemiringan bidang sesar antara kedua sumber relatif lebih konsisten. Kesesuaian nilai *dip* ini menunjukkan bahwa kedalaman bidang geser yang terbentuk pada setiap peristiwa gempa dapat direpresentasikan dengan cukup baik oleh Joko Tingkir.

Sedangkan untuk parameter *rake*, hasil perhitungan MAE menunjukkan nilai sebesar $27,17^\circ$. Secara umum, parameter *rake* yang diperoleh dari Joko Tingkir memiliki konsistensi cukup baik dengan data GlobalCMT kecuali pada satu outlier yaitu 10 April 2021 dengan perbedaan polaritas pada nilainya. Meskipun terdapat selisih yang cukup mencolok dibandingkan dengan parameter *dip*, nilai MAE ini masih berada dalam rentang yang dapat diterima dalam konteks analisis orientasi sumber gempa karena masih di bawah 30° (Kilb, 2006).

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis terhadap parameter *centroid moment-tensor* (CMT) gempa bumi yang mencakup *strike*, *dip*, dan *rake* dapat disimpulkan bahwa sistem Joko Tingkir menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik dengan perbandingan data dari GlobalCMT. Nilai *Mean Absolute Error* (MAE) untuk parameter *dip* dan *rake* masing-masing sebesar $14,00^\circ$ dan $27,17^\circ$ masih berada dalam batas toleransi deviasi di bawah 30° sebagaimana disarankan oleh Kilb (2006), sedangkan parameter *strike* menunjukkan deviasi lebih besar dengan MAE sebesar $64,5^\circ$ yang dapat ditoleransi karena pengaruh sudut rotasi penuh sebesar 360° serta kemungkinan perbedaan metode inversi dan model kecepatan. Selain itu, evaluasi menggunakan metode sudut Kagan menunjukkan bahwa seluruh kejadian gempa memiliki nilai sudut di bawah 60° dengan rentang antara $2,07^\circ$ hingga $22,81^\circ$ yang mengindikasikan kesesuaian orientasi mekanisme sumber gempa antara solusi Joko Tingkir dan GlobalCMT (Kagan, 1991). Pernyataan ini memperkuat bahwa solusi CMT dari

Joko Tingkir memiliki akurasi dan reliabilitas yang memadai untuk digunakan dalam analisis awal sumber gempa di wilayah Jawa Timur.

B. Saran

Disarankan agar pengembangan sistem Joko Tingkir terus ditingkatkan, terutama dalam aspek akurasi perekaman dan pemrosesan data seismik. Pemanfaatan jaringan stasiun yang lebih luas serta pengujian di wilayah tektonik lain juga penting untuk menguji konsistensi metode. Mengingat potensi Joko Tingkir untuk mendukung sistem peringatan dini gempa, evaluasi lebih lanjut terhadap keandalan dan kecepatan pemrosesannya diperlukan dalam mitigasi bencana gempa bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Gonzalez, O., Clouard, V., & Zahradnik, J. (2017). Moment tensor solutions along the central Lesser Antilles using regional broadband stations. *Tectonophysics*, 717, 214–225.
- Grigoli, F., Ellsworth, W. L., Zhang, M., Mousavi, M., Cesca, S., Satriano, C., Beroza, G. C., & Wiemer, S. (2021). Relative earthquake location procedure for clustered seismicity with a single station. *Geophysical Journal International*, 225(1), 608–626. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa607>
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9), e2021GC009812. <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R., & Syahbana, A. J. (2020). Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl), 112–136. <https://doi.org/10.1177/8755293020951206>
- Kagan, Y. Y. (1991). 3-D rotation of double-couple earthquake sources. *Geophysical Journal International*, 106(3), 709–716. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06343.x>
- Kilb, D. (2006). Fault Parameter Constraints Using Relocated Earthquakes: A Validation of First-Motion Focal-Mechanism Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 1140–1158. <https://doi.org/10.1785/0120040239>
- Madlazim, & Hariyono, E. (2014). Joko Tingkir program for estimating tsunami potential rapidly. *AIP Conference Proceedings*, 1617(1), 57–59.
- Madlazim, M. (2015). Validation of Joko Tingkir software using tsunami. *Journal of Tsunami Society International*, 34(3), 189–198.
- Madlazim, Nurul Fahmi, M., Permata Sari, D., Meilianda, E., & Koesuma, S. (2024). Implementing and evaluating an automatic centroid moment tensor procedure for the Indonesia region and surrounding areas. *Earth and Planetary Physics*, 8(4), 609–620. <https://doi.org/10.26464/epp2024039>
- Maulidah, D. F. (2016). *Analisis Persebaran Seismisitas Wilayah Sumatera Selatan Periode 2010-2015 Dengan Menggunakan Metode Double Difference*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Nakano, M., Kumagai, H., & Inoue, H. (2008). Waveform inversion in the frequency domain for the simultaneous determination of earthquake source mechanism and moment function. *Geophysical Journal International*, 173(3), 1000–1011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03783.x>
- Oktaviani, R. D., Madlazim, M., & Fahmi, M. N. (2024). Analisis Keakuratan Hasil Centroid Moment-Tensor (CMT) Joko Tingkir Secara Otomatis dan Real-Time Untuk Gempa Bumi Sedang dan Besar Di Indonesia. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(3), 40–49.
- Praja, N. K., Supartoyo, & Omang, A. (2021). GEMPA BUMI MERUSAK JAWA TIMUR SELATAN 10 APRIL 2021. *JURNAL GEOMINERBA (JURNAL GEOLOGI, MINERAL DAN BATUBARA)*, 6(2), 136–149. <https://doi.org/10.58522/ppsdms22.v6i2.50>
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. In *Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Jakarta*.
- Putri, S. A. R., Fahmi, M. N., & Madlazim, M. (2024). Analisis Keakuratan Centroid Moment Tensor (CMT) pada Software Joko Tingkir untuk Wilayah Laut Banda Menggunakan Metode RMSE dan Sudut Kagan. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(3), 7–17.

- Quinn, D. P., & Ehlmann, B. L. (2019). A PCA-Based Framework for Determining Remotely Sensed Geological Surface Orientations and Their Statistical Quality. *Earth and Space Science*, 6(8), 1378–1408. <https://doi.org/10.1029/2018EA000416>
- 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. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac280>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.005>
- Submawati, D. M. (2014). *Estimasi Momen Tensor, Pola Bidang Sesar Dan Mekanisme Fokus Gempa Tohoku-Okii Jepang Pada Tahun 2011 Dengan Memanfaatkan Inversi Waveform Tiga Komponen Menggunakan Program Isola*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Triantafyllis, N., Sokos, E., Ilias, A., & Zahradnik, J. (2016). Scisola: Automatic Moment Tensor Solution for SeisComp3. *Seismological Research Letters*, 87(1), 157–163. <https://doi.org/10.1785/0220150065>
- Triantafyllis, N., Venetis, I., Fountoulakis, I., Pikoulis, E.-V., Sokos, E., & Evangelidis, C. (2021). Gisola: {Real-Time} Moment Tensor computation optimized for multicore and manycore architectures. *{EGU} General Assembly Conference Abstracts*, EGU21--15888.
- Triantafyllis, N., Venetis, I., Fountoulakis, I., Pikoulis, E., Sokos, E., & Evangelidis, C. (2021b). *Gisola: Real-Time Moment Tensor computation optimized for multicore and manycore architectures* (Issue March, pp. 4–5). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15888>