

KEAKURATAN *CENTROID MOMENT TENSOR (CMT)* PADA *SOFTWARE* JOKO TINGKIR UNTUK 7 GEMPA BUMI DI WILAYAH KEPULAUAN NUSA TENGGARA

¹⁾ Adinda Rahma Adzda Riyatunnisa, ²⁾ Madlazim, ³⁾ Muhammad Nurul Fahmi

¹⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: Adindarahma.21010@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: Madlazim@unesa.ac.id

³⁾ Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: Muhhammadnurulfahmi@unesa.ac.id

Abstrak

Wilayah Kepulauan Nusa Tenggara merupakan daerah rawan gempa akibat interaksi kompleks antara Lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi keakuratan solusi Centroid Moment Tensor (CMT) yang dihasilkan oleh software Joko Tingkir, sebuah sistem komputasi berbasis algoritma Gisola untuk penentuan solusi CMT secara otomatis dan real-time. Analisis dilakukan terhadap tujuh gempa bermagnitudo ≥ 5 yang terjadi pada tahun 2018–2024. Hasil dari Joko Tingkir dibandingkan dengan data referensi Global CMT menggunakan metode Root Mean Square Error (RMSE) dan sudut Kagan. Nilai RMSE untuk semua parameter berada di bawah batas toleransi (maksimal $13,32^\circ$), sedangkan nilai rata-rata sudut Kagan sebesar $12,25^\circ$, menunjukkan tingkat kesesuaian geometri yang tinggi. Jenis patahan yang dominan adalah sesar naik, sesuai dengan kondisi geotektonik regional. Kesimpulannya, Joko Tingkir mampu memberikan solusi CMT yang akurat dan andal untuk keperluan seismologi regional dan mitigasi bencana di wilayah rawan gempa.

Kata Kunci: Centroid Moment Tensor, Joko Tingkir, RMSE, sudut Kagan, Gisola, Kepulauan Nusa Tenggara, gempa bumi tektonik.

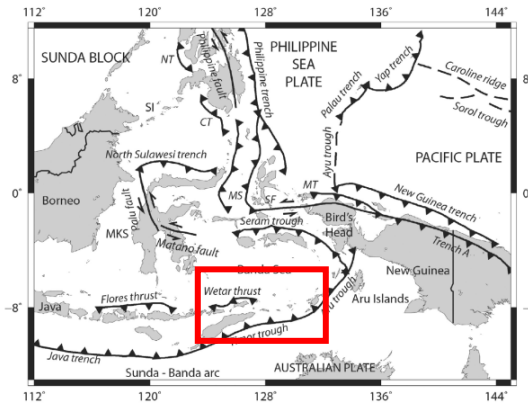
Abstract

The Nusa Tenggara Islands are a seismically active region due to the complex interaction between the Indo-Australian and Eurasian plates. This study aims to evaluate the accuracy of Centroid Moment Tensor (CMT) solutions generated by Joko Tingkir, a computational system based on the Gisola algorithm that provides automated and real-time CMT solutions. The analysis focused on seven earthquake events with magnitudes ≥ 5 that occurred between 2018 and 2024. The results from Joko Tingkir were compared with reference data from Global CMT using the Root Mean Square Error (RMSE) method and Kagan angle analysis. The RMSE values for all parameters remained below the acceptable threshold (maximum 13.32°), while the average Kagan angle of 12.25° indicated a high degree of geometric consistency. The dominant fault type was reverse faulting, aligning with the regional geotectonic conditions. In conclusion, Joko Tingkir is capable of producing accurate and reliable CMT solutions for regional seismological applications and disaster mitigation efforts in earthquake-prone areas.

Keywords: Centroid Moment Tensor, Joko Tingkir, RMSE, Kagan angle, Gisola, Nusa Tenggara Islands, tectonic earthquake.

I. PENDAHULUAN

Secara geografis, Negara Indonesia terletak pada zona pertemuan antara Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik (Atmojo & Muhandis, 2020; Hutchings & Mooney, 2021; Zhao *et al.*, 2023). Ketiga Lempeng tersebut merupakan Lempeng tektonik terbesar di dunia (*Mega Triple Junction*) yang selalu aktif bergerak (Syafitri *et al.*, 2020; Tsani *et al.*, 2023), sehingga interaksi antar Lempeng tersebut menimbulkan zona subduksi dan patahan atau sesar (Widyarta *et al.*, 2020; Murjaya, 2023). Zona subduksi dan sesar tersebut menjadi penyebab tingginya intensitas gempa bumi tektonik di Indonesia (Atmojo & Muhandis, 2019; Hutchings & Mooney, 2021; Baskara *et al.*, 2023).



Gambar 1. Peta tatanan geologis Indonesia bagian timur. Garis merah menunjukkan Kepulauan Nusa Tenggara yang merupakan objek pada penelitian ini (Irwanto, 2015)

Berdasarkan tingginya potensi bencana gempa bumi tektonik di daerah Kepulauan Nusa Tenggara, Masyarakat sekitar perlu memperoleh informasi terkait gempa bumi secara cepat dan akurat sebagai upaya mitigasi. *Centroid Moment Tensor* (CMT) adalah salah satu informasi yang dapat memperkirakan parameter serta mekanisme sumber gempa menggunakan data rekaman gelombang seismik tiga komponen dari beberapa seismograf di sekitar lokasi gempa (Triantafyllis *et al.*, 2021). Solusi CMT memiliki kualitas yang beragam, kualitas data solusi CMT yang baik ditandai dengan *Variance Reduction* (VR) lebih dari 50% (Vackář *et al.*, 2017).

Solusi CMT dapat ditentukan menggunakan metode dan algoritma komputasi yang beragam. Metode penentuan solusi CMT dapat dilakukan secara manual menggunakan algoritma ISOLA (Sokos & Zahradnik, 2008). Sedangkan metode penentuan CMT secara otomatis mulai dikembangkan pada tahun 2016 oleh Triantafyllis *et al.* menggunakan algoritma Scisola yang merupakan *upgraded version* dari ISOLA. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Triantafyllis *et al.* (2016), algoritma Scisola memerlukan waktu hingga 10 menit untuk menghasilkan output. Sehingga pada tahun 2020, Triantafyllis *et al.* kembali mengembangkan algoritma Scisola menjadi Algoritma Gisola yang dapat menentukan solusi CMT secara otomatis dengan waktu penentuan mendekati *real-time* yakni ± 3 menit setelah data *waveform* diterima. Algoritma Gisola telah diterapkan pada *software* Joko Tingkir untuk penentuan solusi CMT *real-time* otomatis di Indonesia menggunakan data input berupa *waveform* regional.

Untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara hasil inversi solusi CMT dari *software* Joko Tingkir dengan data dari Global CMT, digunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) dan sudut Kagan. Metode RMSE digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan antara kedua solusi dengan menghitung selisih kuadrat rata-rata untuk seluruh parameter *moment tensor* yang diperoleh (Mahyudin *et al.*, 2014). Sementara itu, sudut Kagan digunakan untuk menilai perbedaan orientasi antara bidang sesar yang dihasilkan (Kagan, 1991). Semakin kecil nilai RMSE dan sudut Kagan akan menunjukkan semakin tinggi tingkat keakuratan solusi CMT yang dihasilkan oleh *software* Joko Tingkir. Dengan demikian, perbandingan ini menjadi langkah

penting dalam menilai keandalan serta validitas solusi yang dihasilkan oleh *software* Joko Tingkir dalam penentuan CMT pada suatu peristiwa gempa bumi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, justifikasi solusi *Centroid Moment Tensor (CMT)* pada *software* Joko Tingkir dapat dilakukan dengan perbandingan terhadap situs web *Global Centroid Moment Tensor (GlobalCMT)* sebagai sumber yang dipercaya oleh komunitas geofisika (Vallée *et al.*, 2011; Franco *et al.*, 2020; Sawade *et al.*, 2022). Situs web tersebut menyajikan solusi CMT pada kejadian gempa bumi secara global menggunakan input data berupa *waveform* dari stasiun *tele-seismik* (Ekström *et al.*, 2012). Setelah itu dilakukan perhitungan metode *Root Mean Square Error (RMSE)* dan sudut Kagan untuk memperoleh akurasi solusi CMT pada *software* Joko Tingkir.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan data sekunder berupa solusi *Centroid Moment Tensor (CMT)* yang diperoleh melalui *software* Joko Tingkir, yang dapat diakses melalui tautan <https://JokoTingkir.unesa.ac.id/>. Fokus penelitian ini adalah menganalisis solusi CMT untuk tujuh peristiwa gempa bumi yang terjadi di Kepulauan Nusa Tenggara dalam rentang tahun 2018–2024 dengan $M_w \geq 5$. Wilayah kajian dibatasi antara koordinat 115,91°BT–123,14°BT dan 6,73°LS–11,57°LS. Parameter yang dianalisis dalam solusi CMT meliputi *longitude*, *latitude*, *origin time*, momen magnitudo (M_w), *depth*, serta parameter mekanisme sumber seperti *strike*, *dip*, dan *rake*. Solusi CMT ini dihasilkan dari perhitungan komputasi tingkat tinggi menggunakan algoritma Gisola, dengan data input berupa informasi dari stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen yang diperoleh dari basis data *International Federation of Digital Seismograph Network Web Service (FDSNWS)*. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil Joko Tingkir terhadap data dari Global CMT menggunakan metode *Root Mean Square Error (RMSE)* dan sudut Kagan.

B. Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini melibatkan tiga jenis variabel utama: variabel manipulasi, variabel kontrol, dan variabel respon. Variabel manipulasi mencakup Stasiun seismik dan Pita frekuensi *waveform*, variabel kontrol terdiri dari tujuh gempa bumi dengan M_w di atas 5 yang terjadi dalam rentang waktu 2018–2024 di Kepulauan Nusa Tenggara, dengan cakupan wilayah antara 115,91°BT–123,14°BT dan 6,73°LS–11,57°LS. Adapun variabel respon dalam penelitian ini adalah tingkat akurasi hasil perhitungan, yang diukur menggunakan nilai *Root Mean Square Error (RMSE)* dan sudut Kagan. Selain itu, penelitian ini juga mengidentifikasi jenis patahan penyebab gempa berdasarkan analisis peta *beachball* dari data solusi CMT yang ditampilkan melalui *software* Joko Tingkir.

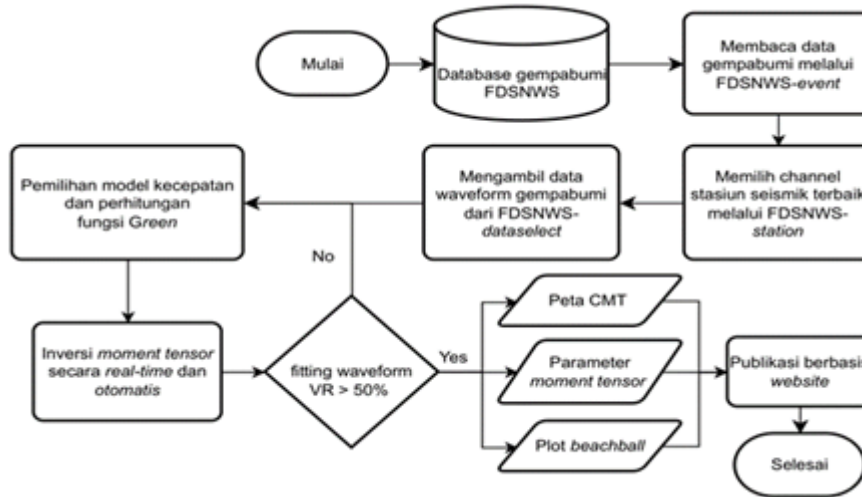
C. Teknik Pengumpulan Data

Dalam proses pengumpulan data, langkah pertama yang dilakukan adalah memperoleh data sekunder berupa solusi CMT yang tersedia dalam *software* Joko Tingkir untuk studi kasus di wilayah Kepulauan Nusa Tenggara. *Software* ini dapat diakses secara gratis melalui tautan: <https://JokoTingkir.unesa.ac.id/>. Data CMT yang digunakan mencakup parameter seperti *longitude*, *latitude*, *origin time*, M_w , *depth*, serta parameter mekanisme sumber seperti *strike*, *dip*, dan *rake*. Data diperoleh menggunakan algoritma Gisola yang mengakses *waveform* tiga komponen dari FDSNWS. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil Joko Tingkir terhadap data dari GlobalCMT menggunakan metode *Root Mean Square Error (RMSE)* dan sudut Kagan.

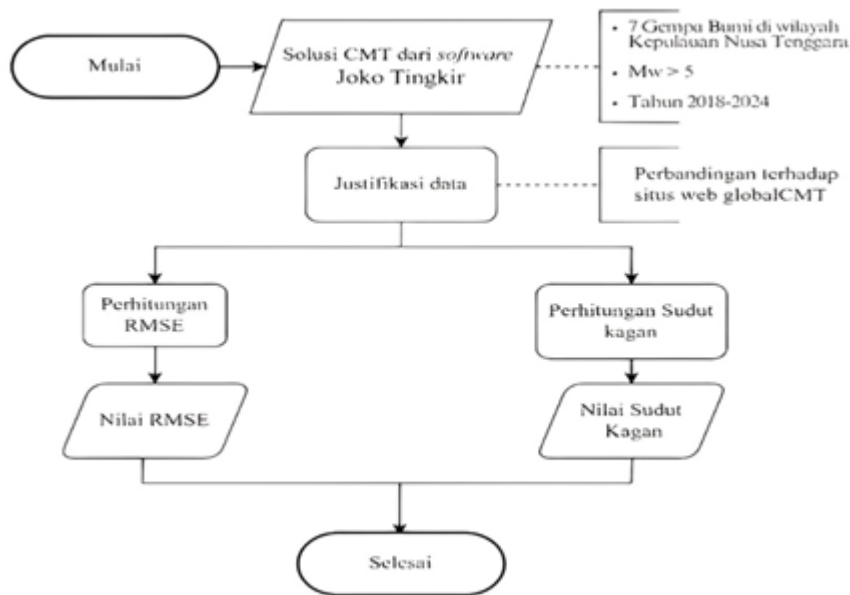
D. Teknik Pengolahan Data

Penentuan solusi CMT pada *Software* Joko Tingkir diperoleh melalui penerapan algoritma Gisola, dengan menggunakan data masukan berupa stasiun seismik serta *waveform* tiga komponen yang bersumber dari database *International Federation of Digital Seismograph Network Web Service (FDSNWS)*. Setelah itu, dilakukan perhitungan fungsi Green sebagai pemodelan ke depan untuk menentukan solusi momen tensor. Langkah berikutnya adalah proses inversi secara komputasi, diikuti

dengan pemetaan hasil inversi dalam bentuk peta CMT, serta visualisasi parameter *strike*, *dip*, *rake*, dan *beachball* (Triantafyllis *et al*, 2021).



Gambar 2 Diagram alir penentuan CMT pada software Joko Tingkir menggunakan algoritma Gisola (Triantafyllis *et al.*, 2021)



Gambar 3. Diagram alir dalam proses justifikasi keakuratan data solusi CMT pada software Joko Tingkir dengan menerapkan metode RMSE serta analisis menggunakan sudut Kagan.

Setelah memperoleh data solusi CMT dari software Joko Tingkir, langkah berikutnya adalah melakukan pengolahan data untuk mengevaluasi tingkat akurasi solusi CMT yang disajikan dalam software tersebut. Proses ini dilakukan dengan membandingkan hasilnya dengan data dari situs web Global CMT. Tahap pertama dimulai dengan menyiapkan parameter CMT yang dihasilkan oleh Joko Tingkir. Selanjutnya, situs web Global CMT dapat diakses melalui tautan <https://www.GlobalCMT.org/CMTsearch.html> sebagai referensi pembandingan.

Langkah berikutnya adalah membandingkan solusi CMT dari Joko Tingkir dengan data dari Global CMT menggunakan dua metode utama, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE) dan sudut Kagan. RMSE digunakan untuk menilai tingkat akurasi suatu model prediksi, di mana semakin kecil nilai RMSE yang diperoleh, semakin tinggi akurasi datanya (Mahyudin *et al.*, 2014). Sementara itu, analisis menggunakan

sudut Kagan bertujuan untuk mengetahui sejauh mana perbedaan parameter CMT antara Joko Tingkir dan Global CMT. Menurut Kagan (1991), jika sudut yang dihasilkan lebih dari 60° , maka data dianggap memiliki tingkat akurasi yang rendah. Sebaliknya, apabila sudut yang diperoleh kurang dari 60° , maka data memiliki akurasi yang lebih tinggi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil



Gambar 4. Peta struktur patahan utama di Kepulauan Nusa Tenggara, termasuk *Flores Back-Arc Thrust*, *Alor Thrust*, dan *Wetar Thrust* (Pranantyo & Cummins, 2019).

Salah satu struktur patahan paling dominan di kawasan ini adalah Flores Thrust (FT), yang membentang dari utara Pulau Lombok hingga ke utara Pulau Flores. Patahan ini merupakan sesar naik yang terbentuk sebagai respons terhadap tekanan dari subduksi lempeng di selatan. Flores Thrust menjadi zona akumulasi energi tektonik dan sangat aktif secara seismik, terbukti dari kejadian gempa-gempa besar seperti gempa Lombok pada tahun 2018 serta gempa Flores Timur pada akhir tahun 2021. Pergeseran dan deformasi yang terjadi di sepanjang zona ini menyebabkan pengangkatan kerak bumi dan dapat mengakibatkan deformasi permukaan yang signifikan. Di sisi selatan, Flores Thrust berbatasan langsung dengan Cekungan Flores, sedangkan di bagian atasnya terdapat jajaran gunung api aktif sebagai bagian dari busur vulkanik Sunda. Interaksi antara struktur-struktur tersebut menunjukkan bahwa dinamika tektonik di wilayah Nusa Tenggara sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu penunjaman lempeng secara oblique (miring), rotasi mikrolempeng seperti blok Sumba dan Timor, serta reaktivasi patahan-patahan lama akibat akumulasi tegangan baru dari proses tektonik aktif. Keberadaan gunung-gunung api aktif yang tersusun sepanjang busur utara menambah bukti bahwa seluruh sistem ini saling berhubungan dan saling mempengaruhi.

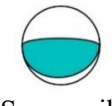
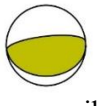
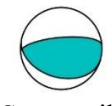
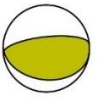


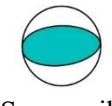
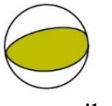
Pada parameter posisi episenter (lintang dan bujur), perbedaan antara Joko Tingkir dan Global CMT umumnya kecil dan masih dalam batas wajar untuk analisis mekanisme sumber gempa regional (Madlazim *et al.*, 2024). Meskipun Joko Tingkir menggunakan pendekatan otomatis dengan jaringan seismik lokal, hasilnya tetap konsisten dengan solusi Global CMT yang berbasis data global. Namun, pada parameter mekanisme sumber seperti *strike*, *dip*, dan *rake*, terdapat selisih yang lebih mencolok. Perbedaan *strike* hingga beberapa derajat mencerminkan variasi interpretasi arah patahan, sedangkan selisih *dip* hingga 22° mengindikasikan perbedaan dalam estimasi kemiringan bidang sesar akibat sensitivitas terhadap data lokal. Parameter *rake* juga menunjukkan variansi yang dapat memengaruhi klasifikasi jenis sesar, sebab perubahan lebih dari $\pm 15^\circ$ dapat menggeser interpretasi dari sesar (Soto & Lopez-Caballero, 2025).







B. Pembahasan

Nilai Penelitian ini menggunakan data solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) untuk gempa bumi dengan magnitudo momen (M_w) di atas 5 yang terjadi antara tahun 2018 hingga 2024 di wilayah Kepulauan Nusa Tenggara. Wilayah penelitian mencakup koordinat geografis antara 15,91°BT–123,14°BT dan 6,73°LS–11,57°LS. Data CMT diperoleh dari perangkat lunak Joko Tingkir, mencakup parameter *longitude*, *latitude*, *Origin time*, M_w , *depth*, *strike*, *dip*, dan *rake*. Terdapat tujuh kejadian gempa yang digunakan sebagai objek kajian.

Setelah data diperoleh, dilakukan perbandingan antara hasil Joko Tingkir dan Global CMT untuk menilai konsistensi dan akurasi. Selanjutnya, parameter *strike*, *dip*, dan *rake* digunakan untuk memplot diagram *beachball* guna memvisualisasikan mekanisme sumber gempa. Hasil visualisasi tersebut membantu dalam menginterpretasikan jenis patahan penyebab tiap gempa. Data perbandingan parameter dari kedua sumber kemudian disajikan dalam **Tabel 1**. sebagai dasar analisis lebih lanjut.

Tabel 1. Data Solusi CMT yang diperoleh dari *Software* Joko Tingkir Jika dibandingkan dengan Solusi CMT dari Global CMT

No	Event	Joko Tingkir				Global CMT			
1	7/28/2018	<i>Origin time</i>	22:47:38.5			<i>Origin time</i>	22:47:41.5		
		M_w	6.5			M_w	6.5		
		<i>Longitude</i>	116.21			<i>Longitude</i>	116.51		
		<i>Latitude</i>	-8.16			<i>Latitude</i>	-8.31		
		<i>Depth</i>	10.7			<i>Depth</i>	13.9		
		<i>Strike</i>	80			<i>Strike</i>	90		
		<i>Dip</i>	17			<i>Dip</i>	21		
		<i>Rake</i>	80			<i>Rake</i>	96		
		Sesar naik				Sesar naik			
2	8/19/2018	<i>Origin time</i>	14:56:32.3			<i>Origin time</i>	14:56:35.6		
		M_w	6.5			M_w	6.5		
		<i>Longitude</i>	116.40			<i>Longitude</i>	116.75		
		<i>Latitude</i>	-8.33			<i>Latitude</i>	-8.40		
		<i>Depth</i>	14.0			<i>Depth</i>	23.5		
		<i>Strike</i>	106			<i>Strike</i>	97		
		<i>Dip</i>	26			<i>Dip</i>	25		
		<i>Rake</i>	109			<i>Rake</i>	102		
		Sesar naik				Sesar naik			
3	12/31/2020	<i>Origin time</i>	10:18:52.8			<i>Origin time</i>	10:18:56.9		
		M_w	5.2			M_w	5.2		
		<i>Longitude</i>	122.25			<i>Longitude</i>	122.38		
		<i>Latitude</i>	-8.78			<i>Latitude</i>	-8.83		
		<i>Depth</i>	137.5			<i>Depth</i>	125.6		
		<i>Strike</i>	265			<i>Strike</i>	268		
		<i>Dip</i>	83			<i>Dip</i>	79		
		<i>Rake</i>	-125			<i>Rake</i>	-130		
		Sesar Oblique				Sesar Oblique			
4	2/23/2022	<i>Origin time</i>	07:35:47.4			<i>Origin time</i>	07:35:49.0		
		M_w	5.5			M_w	5.5		
		<i>Longitude</i>	122.41			<i>Longitude</i>	122.44		
		<i>Latitude</i>	-7.54			<i>Latitude</i>	-7.57		
		<i>Depth</i>	10.0			<i>Depth</i>	14.8		
		<i>Strike</i>	83			<i>Strike</i>	87		
		<i>Dip</i>	46			<i>Dip</i>	37		
		<i>Rake</i>	86			<i>Rake</i>	98		
		Sesar naik				Sesar naik			

No	Event	Joko Tingkir			Global CMT		
5	4/2/2023	Origin time	08:40:54.2		Origin time	08:40:59.0	
		M_W	5.6		M_W	5.6	
		Longitude	118.74		Longitude	118.66	
		Latitude	-7.69		Latitude	-7.77	
		Depth	14.0		Depth	18.7	
		Strike	161		Strike	155	
		Dip	78		Dip	70	
Rake	164	Rake	165				
		Sesar Strike-Slip				Sesar Strike-Slip	
6	8/31/2023	Origin time	10:29:34.4		Origin time	10:29:31.8	
		M_W	5.5		M_W	5.5	
		Longitude	123.69		Longitude	123.98	
		Latitude	-9.48		Latitude	-9.32	
		Depth	56.7		Depth	63.9	
		Strike	105		Strike	75	
		Dip	9		Dip	30	
Rake	-43	Rake	-47				
		Sesar Oblique				Sesar Oblique	
7	1/25/2024	Origin time	12:24:13.6		Origin time	12:24:16.9	
		M_W	5.6		M_W	5.6	
		Longitude	121.13		Longitude	121.18	
		Latitude	-8.12		Latitude	-8.20	
		Depth	15.6		Depth	20.7	
		Strike	268		Strike	258	
		Dip	68		Dip	68	
Rake	81	Rake	78				
		Sesar naik				Sesar naik	

Berdasarkan tujuh gempa bumi yang disajikan pada **Tabel 1**, dapat dilihat bahwa kejadian gempa bumi di Kepulauan Nusa Tenggara terjadi dikarenakan patahan *reverse* (naik), sesar *oblique* dan *strike-slip*. Informasi ini diperoleh melalui analisis mekanisme sumber gempa yang divisualisasikan dalam bentuk plot *beachball*. Plot *beachball* adalah representasi grafis dari orientasi dan arah pergerakan bidang patahan pada gempa bumi, yang menunjukkan pola tekanan dan regangan di sekitar sumber gempa.

Berikut merupakan kejadian gempa bumi pada **Tabel 1** yang dianalisis dalam penelitian di wilayah Kepulauan Nusa Tenggara dan terjadi dalam kurun waktu 2018-2024 :

- Gempa bumi yang terjadi pada tanggal 28 Juli 2018 berlokasi di sekitar wilayah Lombok, tepatnya pada koordinat 116.21°BT dan -8.16°LS . Berdasarkan hasil inversi dari perangkat lunak Joko Tingkir, nilai strike adalah 80° , dip 17° , dan rake 80° , sementara data dari Global CMT mencatat strike 90° , dip 21° , dan rake 96° . Rake dari kedua sumber berada dalam rentang 45° - 135° , yang menandakan bahwa jenis patahan adalah sesar naik. Kedalaman yang dangkal serta nilai dip yang cukup besar memperkuat identifikasi tersebut. Kejadian ini berkaitan dengan aktivitas tektonik di sekitar zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Eurasia yang menyebabkan deformasi kompresif di wilayah Nusa Tenggara Barat (Widiyantoro et al., 2018).
- Kejadian gempa pada 19 Agustus 2018 juga terjadi di kawasan Lombok dengan koordinat 116.40°BT dan -8.33°LS . Berdasarkan data Joko Tingkir, nilai strike sebesar 106° , dip 26° , dan rake 109° , sedangkan Global CMT mencatat strike 97° , dip 25° , dan rake 102° . Kedua model menunjukkan rake di kisaran sesar naik, dan nilai dip yang relatif menengah menunjukkan bidang patahan yang miring namun masih cukup curam. Aktivitas ini kemungkinan dipicu oleh deformasi kerak bumi akibat subduksi aktif di selatan Pulau Lombok (Spendi et al., 2020).

- c. Gempa bumi pada 31 Desember 2020 terjadi di wilayah Nusa Tenggara Timur, sekitar koordinat 122.25°BT dan -8.78°LS dengan kedalaman yang cukup besar, yakni lebih dari 120 km. Parameter dari Joko Tingkir menunjukkan strike 265° , dip 83° , dan rake -125° , sedangkan Global CMT mencatat strike 268° , dip 79° , dan rake -130° . Nilai rake negatif yang signifikan, bersama dengan strike mendekati barat-timur, menunjukkan karakteristik sesar oblique dengan dominasi pergerakan mendatar dan sedikit komponen naik-turun. Gempa ini terjadi di dalam lempeng (intra-slab) yang berkaitan dengan deformasi internal pada lempeng yang tersubduksi (McCaffrey, 2009).
- d. Pada 23 Februari 2022, gempa berkekuatan sedang terjadi di sekitar utara Pulau Flores, dengan koordinat 122.41°BT dan -7.54°LS . Data dari Joko Tingkir menunjukkan strike 83° , dip 46° , dan rake 86° , sedangkan Global CMT mencatat strike 87° , dip 37° , dan rake 98° . Nilai-nilai ini berada dalam klasifikasi sesar naik. Wilayah ini berada dekat zona back-arc thrust di utara busur Sunda Kecil, yang diketahui aktif secara tektonik akibat konvergensi lempeng yang berkelanjutan (Koulali et al., 2016).
- e. Gempa pada 2 April 2023 tercatat di Teluk Bone, Sulawesi Selatan, dengan koordinat 118.74°BT dan -7.69°LS . Berdasarkan Joko Tingkir, nilai strike adalah 161° , dip 78° , dan rake 164° , sementara Global CMT mencatat strike 155° , dip 70° , dan rake 165° . Nilai rake yang mendekati 180° dan dip yang curam menunjukkan bahwa mekanisme gempa ini adalah sesar mendatar (strike-slip). Wilayah ini dikenal dengan kehadiran sesar aktif yang mengarah barat laut-tenggara, seperti Sesar Palu-Koro yang terus menunjukkan aktivitas deformasi lateral (Socquet et al., 2006).
- f. Kejadian gempa pada 31 Agustus 2023 terletak di sebelah selatan Pulau Timor dengan koordinat 123.69°BT dan -9.48°LS . Parameter mekanisme fokus dari Joko Tingkir menunjukkan strike 105° , dip 9° , dan rake -43° , sedangkan Global CMT mencatat strike 75° , dip 30° , dan rake -47° . Nilai rake menunjukkan kombinasi antara pergerakan naik dan mendatar, atau sesar oblique. Selain itu, nilai dip yang rendah dapat mengindikasikan bidang patahan yang landai. Kawasan ini terletak pada zona transisi antara subduksi dan deformasi kompleks di wilayah busur belakang (Harris, 2011).
- g. Gempa terakhir dalam studi ini terjadi pada 25 Januari 2024 di sekitar perairan utara Pulau Flores, tepatnya di koordinat 121.13°BT dan -8.12°LS . Berdasarkan hasil dari Joko Tingkir, nilai strike 268° , dip 68° , dan rake 81° , sementara dari Global CMT adalah strike 258° , dip 68° , dan rake 78° . Rentang rake yang tergolong sesar naik dan nilai dip yang curam menunjukkan pergerakan vertikal kerak bumi. Aktivitas ini sesuai dengan karakteristik sesar naik di zona busur belakang akibat tekanan konvergen dari arah selatan (Widiyantoro et al., 2020).

1. Analisis Keakuratan Solusi CMT dengan Metode Root Mean Square Error (RMSE)

Untuk mengukur tingkat keakuratan parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang dihasilkan oleh perangkat lunak Joko Tingkir dibandingkan dengan referensi dari Global CMT, digunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai RMSE yang kecil menunjukkan bahwa hasil estimasi berada dekat dengan nilai sebenarnya, sehingga metode ini sering digunakan dalam evaluasi performa model geofisika (Liu et al., 2021).

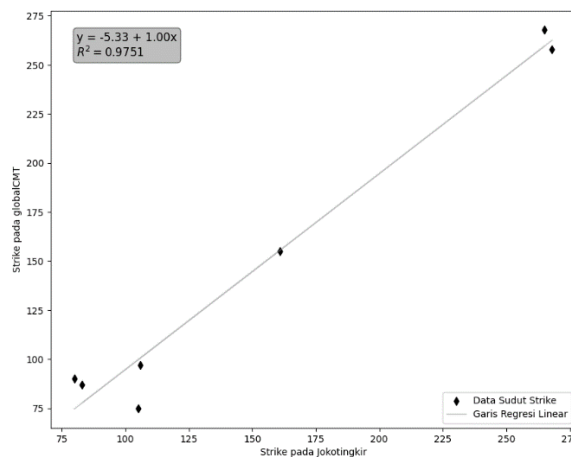
Tabel 2. Tabel Data Hasil Perhitungan Root Mean Square Error (RMSE) Terhadap Masing-Masing Parameter Solusi CMT

Parameter	Nilai RMSE
<i>Longitude</i>	0,21
<i>Latitude</i>	0,09
<i>Origin time</i>	3,37
M_w	0,00
<i>Depth</i>	7,22
<i>Strike</i>	13,32
<i>Dip</i>	9,40
<i>Rake</i>	8,45

Hasil penghitungan RMSE yang disajikan pada **Tabel 2**, menunjukkan bahwa parameter *longitude* memiliki nilai RMSE sebesar 0,21, *latitude* sebesar 0,09, *origin time* sebesar 3,37, *moment magnitude* (M_w) sebesar 0,00, dan *depth* sebesar 7,22. Untuk parameter mekanisme sumber gempa, diperoleh nilai RMSE sebesar 13,32 pada *strike*, 9,40 pada *dip*, dan 8,45 pada *rake*. Seluruh nilai RMSE tersebut berada di bawah ambang batas 20, yang secara umum mengindikasikan bahwa estimasi parameter CMT dari Joko Tingkir cukup akurat dan dapat diandalkan untuk analisis tingkat regional (Rahman *et al.*, 2022). Nilai RMSE yang rendah pada magnitudo momen bahkan menunjukkan kesesuaian sempurna dengan data referensi, menandakan bahwa sistem Joko Tingkir mampu menghasilkan estimasi kekuatan gempa secara presisi.

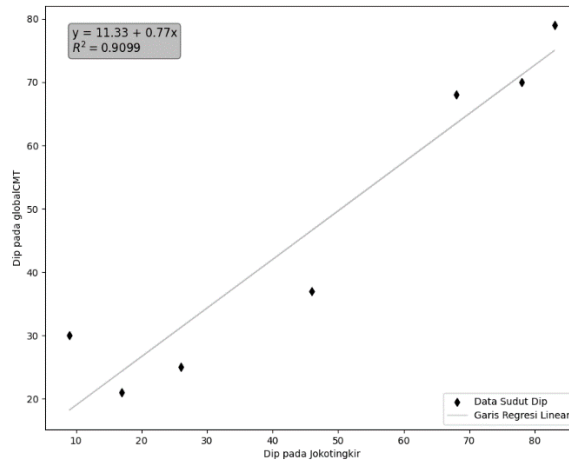
Sebagai pelengkap dari analisis numerik tersebut, dilakukan visualisasi data guna memperjelas hubungan antar parameter dan mendeteksi pola konsistensi atau anomali dalam hasil estimasi. Grafik regresi linier digunakan untuk menggambarkan hubungan antara parameter *strike*, *dip*, *rake*, dan . Keempat grafik tersebut menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi, memperkuat bukti bahwa estimasi parameter oleh Joko Tingkir memiliki hubungan linier yang kuat dengan data Global CMT. Sementara itu, visualisasi berbasis histogram digunakan untuk menunjukkan sebaran selisih data pada parameter *longitude*, *latitude*, *origin time*, dan *depth*. Histogram ini memberikan gambaran distribusi deviasi estimasi terhadap data acuan, dan sangat berguna dalam mengidentifikasi bias sistematis atau penyimpangan lokal yang mungkin terjadi (Chamberlain & Hensch, 2023).

Kombinasi antara analisis RMSE dan visualisasi grafis ini menjadi pendekatan yang komprehensif dalam menilai kinerja dari Joko Tingkir. Pendekatan semacam ini penting untuk menjamin validitas ilmiah, terutama dalam konteks aplikasi kebencanaan dan mitigasi gempa bumi, di mana keakuratan parameter sangat krusial dalam memandu pengambilan keputusan berbasis data (Kong *et al.*, 2021).



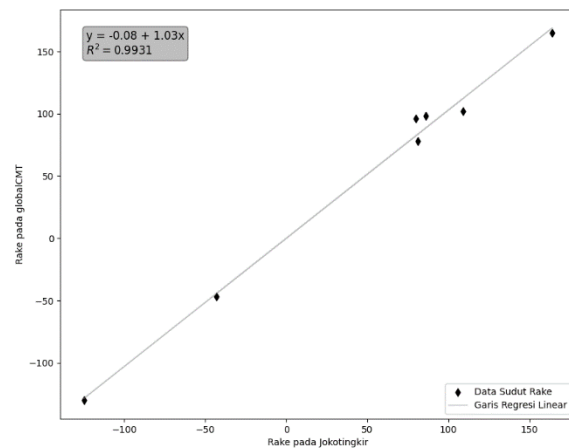
Gambar 5. Grafik Regresi Linear Parameter *Strike*

Gambar 5. menyajikan grafik regresi linear untuk parameter *strike*, di mana sumbu-x menunjukkan nilai *strike* dari *software* Joko Tingkir dan sumbu-y menunjukkan nilai yang sama dari data Global CMT. Titik-titik berwarna hitam pada grafik merepresentasikan pasangan data *strike* dari masing-masing kejadian gempa, sedangkan garis abu-abu menunjukkan garis regresi linear yang menggambarkan pola hubungan antara kedua variabel. Setiap titik pada grafik mewakili hasil perbandingan dari tujuh kejadian gempa bumi yang dianalisis dalam penelitian ini. Garis regresi linear yang ditampilkan menunjukkan hubungan antara kedua set data tersebut, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9751. Nilai R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa terdapat hubungan yang sangat kuat antara data Joko Tingkir dan Global CMT. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa estimasi parameter *strike* dari Joko Tingkir memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan dapat diandalkan dalam merepresentasikan solusi mekanisme sumber gempa.



Gambar 6. Grafik Regresi Linear Parameter *Dip*

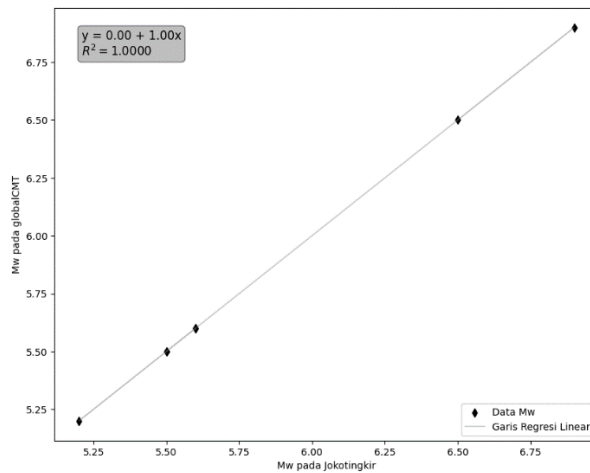
Gambar 6. memperlihatkan grafik regresi linear untuk parameter *dip*, di mana sumbu-x merepresentasikan nilai *dip* dari *software* Joko Tingkir dan sumbu-y menunjukkan nilai *dip* dari solusi Global CMT. Titik-titik berwarna hitam pada grafik merepresentasikan pasangan data *dip* dari masing-masing kejadian gempa, sedangkan garis abu-abu menunjukkan garis regresi linear yang menggambarkan pola hubungan antara kedua variabel. Titik-titik hitam dalam grafik menggambarkan hasil perbandingan dari tujuh kejadian gempa bumi yang menjadi objek penelitian. Garis regresi linear dalam grafik ini menunjukkan kecenderungan hubungan antara kedua set data. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9099 menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat antara nilai *dip* yang dihasilkan oleh Joko Tingkir dan Global CMT. Meskipun tidak sekuat pada parameter *strike*, nilai ini tetap merefleksikan tingkat kesesuaian yang tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa estimasi parameter *dip* oleh Joko Tingkir cukup akurat dan layak dijadikan acuan dalam analisis mekanisme sumber gempa secara regional.



Gambar 7. Grafik Regresi Linear Parameter *Rake*

Gambar 7 menunjukkan grafik regresi linear untuk parameter *rake*, dengan sumbu-x menggambarkan nilai *rake* dari hasil perhitungan *software* Joko Tingkir, sedangkan sumbu-y menunjukkan nilai *rake* dari data Global CMT. Titik-titik berwarna hitam pada grafik merepresentasikan pasangan data *rake* dari masing-masing kejadian gempa, sedangkan garis abu-abu menunjukkan garis regresi linear yang menggambarkan pola hubungan antara kedua variabel. Titik-titik hitam pada grafik merepresentasikan tujuh data kejadian gempa bumi yang dianalisis dalam penelitian ini. Garis regresi linear yang mendekati diagonal menunjukkan adanya kesesuaian yang sangat baik antara kedua sumber data. Hal ini diperkuat dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9931, yang mengindikasikan bahwa nilai *rake* dari Joko Tingkir memiliki tingkat akurasi sangat tinggi terhadap referensi Global CMT. Dengan kata lain, parameter *rake*

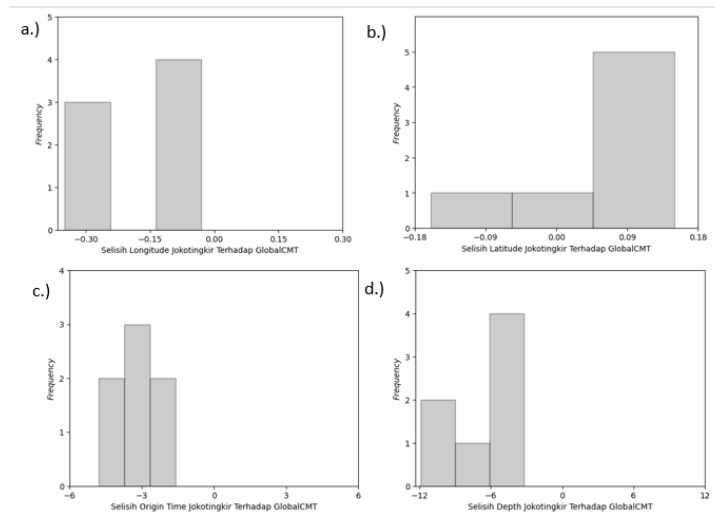
yang dihasilkan oleh Joko Tingkir dapat diandalkan dalam menganalisis mekanisme sumber gempa secara regional.



Gambar 8. Grafik Regresi Linear Parameter M_{l0}

Gambar 8. menggambarkan hubungan regresi linear antara parameter M_w (magnitudo momen) dari *software* Joko Tingkir dan data referensi dari Global CMT. Titik-titik data pada grafik seluruhnya terletak tepat pada garis regresi, yang menunjukkan bahwa hubungan antara kedua dataset bersifat linier sempurna. Hal ini diperkuat dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 1, yang mengindikasikan bahwa variasi nilai M_w dari Joko Tingkir dapat dijelaskan sepenuhnya oleh data Global CMT tanpa adanya penyimpangan. Temuan ini menunjukkan tingkat akurasi dan konsistensi yang sangat tinggi dalam estimasi magnitudo oleh perangkat lunak Joko Tingkir. Akurasi semacam ini sangat penting dalam sistem pemantauan gempa bumi, terutama untuk pengambilan keputusan yang cepat dalam mitigasi bencana dan analisis potensi dampak seismik (Kongko *et al.*, 2023; Ekström *et al.*, 2012).

Keberhasilan dalam pemodelan regresi linear ini dilengkapi dengan analisis statistik tambahan berupa histogram *error*. Histogram digunakan untuk menggambarkan distribusi selisih nilai antara parameter CMT dari *software* Joko Tingkir terhadap referensi Global CMT. Visualisasi ini penting untuk mengidentifikasi kecenderungan penyimpangan (bias) serta sebaran *error* yang terjadi pada masing-masing parameter. Dengan demikian, histogram dapat memberikan gambaran mengenai frekuensi kesalahan prediksi serta membantu mengukur presisi secara menyeluruh pada masing-masing komponen CMT (Bormann, 2020).



Gambar 9. Histogram masing-masing parameter CMT; a.) *longitude*, b.) *latitude*, c.) *origin time*, d.) *depth*.

Gambar 9 menyajikan histogram yang menggambarkan selisih nilai antara parameter hasil estimasi dari perangkat lunak Joko Tingkir terhadap data referensi dari Global CMT. Keempat parameter yang dianalisis meliputi lokasi gempa (*longitude* dan *latitude*), waktu kejadian (*Origin time*), serta kedalaman (*depth*). Secara umum, distribusi nilai selisih menunjukkan bahwa perangkat lunak Joko Tingkir mampu menghasilkan estimasi yang cukup mendekati data referensi, meskipun terdapat deviasi kecil yang masih dalam batas wajar untuk analisis seismologi regional.

Pada parameter *longitude*, nilai selisih yang umumnya berkisar antara -0,3 hingga 0 derajat menunjukkan bahwa sebagian besar estimasi posisi bujur oleh Joko Tingkir cukup akurat. Sementara itu, untuk parameter *latitude*, distribusi histogram memperlihatkan dominasi nilai positif dengan frekuensi tertinggi mendekati nol, yang mengindikasikan adanya deviasi kecil ke arah utara dibandingkan dengan data Global CMT.

Selanjutnya, pada parameter *Origin time*, histogram menunjukkan bahwa sebagian besar perbedaan waktu kejadian gempa berkisar antara -4 hingga 0 detik. Hal ini mengindikasikan bahwa perangkat lunak Joko Tingkir cenderung memberikan estimasi waktu kejadian gempa yang sedikit lebih awal dibandingkan referensi. Deviasi ini dapat disebabkan oleh perbedaan dalam deteksi awal gelombang seismik maupun variasi algoritma pemrosesan waktu kedatangan gelombang (Allen, 1982).

Terakhir, untuk parameter *depth* atau kedalaman gempa, histogram memperlihatkan bahwa sebagian besar nilai selisih berada di kisaran -12 hingga 0 kilometer. Dengan frekuensi tertinggi pada rentang sekitar -6 kilometer, hal ini menunjukkan bahwa Joko Tingkir cenderung mengestimasi kedalaman gempa sedikit lebih dalam daripada Global CMT. Perbedaan ini dimungkinkan karena variasi model kecepatan gelombang yang digunakan dalam proses inversi seismik (Lay & Wallace, 1995).

Secara keseluruhan, keempat histogram menunjukkan bahwa hasil estimasi parameter lokasi dan waktu kejadian gempa dari Joko Tingkir memiliki kedekatan yang tinggi dengan data Global CMT. Evaluasi berbasis histogram ini berperan penting sebagai langkah awal validasi sebelum dilakukan analisis lebih lanjut terhadap parameter mekanisme sumber atau pemodelan struktur bawah permukaan (Shearer, 2009).

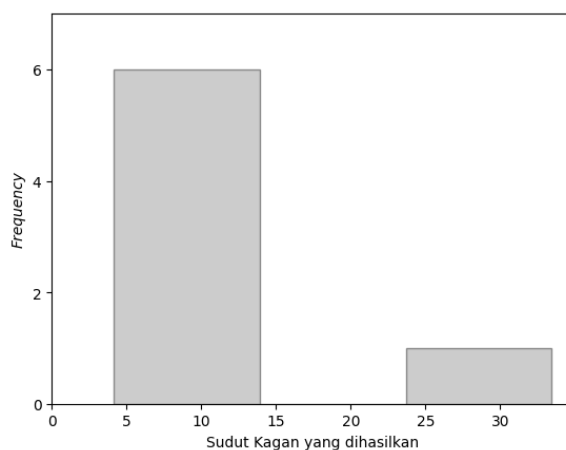
2. Analisis Keakuratan Solusi CMT dengan Metode Sudut Kagan

Perhitungan sudut Kagan dilakukan untuk mengukur sejauh mana perbedaan orientasi parameter strike, dip, dan rake yang dihasilkan oleh perangkat lunak Joko Tingkir jika dibandingkan dengan data referensi dari Global CMT. Metode ini dipilih karena mekanisme sumber gempa, yang umumnya divisualisasikan dalam bentuk diagram beachball, merupakan hasil rotasi tiga dimensi dari ketiga parameter tersebut. Oleh karena itu, untuk membandingkan dua solusi CMT secara menyeluruh, diperlukan pendekatan yang mempertimbangkan rotasi ruang tiga dimensi, bukan hanya perbedaan nilai masing-masing parameter secara terpisah.

Sudut Kagan memberikan nilai tunggal yang mewakili seberapa besar perbedaan orientasi dua bidang sesar dalam ruang, sehingga menjadi alat evaluasi yang efektif dalam menilai kedekatan antar solusi mekanisme sumber. Dengan pendekatan ini, kesesuaian orientasional antara hasil pemodelan Joko Tingkir dan data Global CMT dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

Menurut Kagan (1991), pemodelan mekanisme fokus gempa bumi dalam bentuk *beachball* dapat dianalisis melalui transformasi rotasi tiga dimensi terhadap tiga parameter utama, yaitu *strike*, *dip*, dan *rake*. Dalam konteks perbandingan dua solusi mekanisme fokus, metode sudut Kagan digunakan untuk menentukan seberapa besar rotasi minimum yang diperlukan agar dua solusi tersebut berimpit secara geometris.

Metode ini menghasilkan empat kemungkinan rotasi, dan dipilih rotasi dengan sudut terkecil sebagai representasi perbedaan aktual antara dua solusi. Dalam penelitian ini, sudut Kagan dihitung untuk membandingkan hasil solusi CMT dari perangkat lunak Joko Tingkir terhadap referensi Global CMT.



Gambar 10. Histogram Perhitungan Sudut Kagan dari ke-tujuh Kejadian Gempa Bumi yang digunakan Sebagai Objek Penelitian

Histogram pada **Gambar 10** menyajikan distribusi frekuensi sudut Kagan yang diperoleh. Terlihat bahwa sebagian besar sudut terdistribusi pada rentang nilai kecil, terutama sekitar 5° , yang menunjukkan adanya kecocokan geometri yang kuat antara kedua solusi. Rata-rata sudut Kagan yang diperoleh adalah sebesar $12,25^\circ$, yang berarti keseluruhan solusi CMT yang dihasilkan oleh perangkat lunak Joko Tingkir memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data referensi. Hal ini mengindikasikan bahwa representasi mekanisme patahan dalam *software* tersebut cukup akurat. Menurut batasan yang diberikan oleh Kagan (1991), nilai sudut Kagan yang berada di bawah 60° dapat dianggap sebagai indikasi dari kesesuaian atau akurasi tinggi dalam perbandingan dua solusi mekanisme fokus.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis, perangkat lunak Joko Tingkir mampu menghasilkan parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT) dengan tingkat keakuratan yang tinggi. Hal ini dibuktikan dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk parameter lokasi, waktu, dan mekanisme sumber yang seluruhnya berada di bawah ambang toleransi 20, antara lain longitude (0,21), latitude (0,09), origin time (3,37 detik), magnitudo momen (0,00), depth (7,22 km), strike ($13,32^\circ$), dip ($9,40^\circ$), dan rake ($8,45^\circ$). Akurasi orientasi bidang patahan juga sangat baik, dengan nilai rata-rata sudut Kagan sebesar $12,25^\circ$, jauh di bawah batas toleransi 60° menurut Kagan (1991). Selain itu, interpretasi mekanisme sumber dari tujuh kejadian gempa menunjukkan dominasi sesar naik, yang konsisten dengan kondisi tektonik regional Kepulauan Nusa Tenggara yang berada pada zona subduksi aktif.

B. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Jumlah data gempa yang digunakan masih terbatas, yaitu hanya tujuh kejadian, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi seismisitas secara luas. Selain itu, analisis sangat bergantung pada data referensi Global CMT, sehingga akurasi hasil dipengaruhi oleh kualitas dan kesesuaian data tersebut.

C. Saran

Untuk penelitian selanjutnya dengan topik serupa, disarankan agar pengembangan Jokotingkir terus ditingkatkan, terutama dalam perekaman dan pemrosesan data untuk mengurangi selisih parameter gempa. Penggunaan data seismik dari jaringan stasiun yang lebih luas dapat meningkatkan akurasi solusi CMT. Penelitian juga perlu dilakukan di wilayah lain dengan karakteristik tektonik berbeda untuk menguji konsistensi metode. Perangkat ini berpotensi diintegrasikan dalam sistem peringatan dini gempa, sehingga perlu dikaji lebih lanjut dari segi keandalan dan kecepatan prosesnya dalam mitigasi bencana.

DAFTAR PUSTAKA

- Afif, H., Nugraha, A. D., Muzli, M., Widiyantoro, S., Zulfakriza, Z., Wei, S., ... & Husni, Y. M. (2021). Local earthquake tomography of the source region of the 2018 Lombok earthquake sequence, Indonesia. *Geophysical Journal International*, 226(3), 1814-1823.
- Allen, R. V. (1982). Automatic phase pickers: Their present use and future prospects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(6B), S225-S242.
- Atmojo, S., & Muhandhis, I. (2019). Sistem Informasi Geografis Bencana Gempa Bumi Dengan Pendekatan PGA Untuk Mitigasi Bencana. *Jurnal Ilmiah Edutic: Pendidikan dan Informatika*, 6(1), 10-14.
- Baskara, A. W., Sahara, D. P., Nugraha, A. D., Rusdin, A. A., Zulfakriza, Z., Widiyantoro, S., & Elly, E. (2023). Aftershock study of the 2019 Ambon earthquake using *moment tensor* inversion: identification of fault reactivation in northern Banda, Indonesia. *Earth, Planets & Space*, 75(1), 124.
- Bird, P., Kagan, Y. Y., & Jackson, D. D. (2010). Earthquake patterns and stress orientations on fault planes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B4).
- Bormann, P. (2020). *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. IASPEI.
- Cronin, V. (2010). A primer on focal mechanism solutions for geologists. *Science Education Resource Center, Carleton College*, 14.
- Di Giacomo, D. & Harris, J. (2021). Complementing regional moment magnitudes to GCMT: a perspective from the rebuilt International Seismological Centre Bulletin. *Earth System Science Data*, 13, 1957-1985.
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 200, 1-9.
- Elnashai, A. S., & Sarno, L. Di. (2008). *Fundamentals Of Earthquake Engineering*. Hongkong: Wiley.
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Gadallah, M. R., & Fisher, R. (2008). *Exploration geophysics*. Springer Science & Business Media.
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The seismicity of Indonesia & tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9), e2021GC009812.
- Ichinose, G. A., Anderson, J. G., Smith, K. D., & Zeng, Y. 2003. Source parameters of eastern California & western Nevada earthquakes from regional *moment tensor* inversion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), 61-84.
- Kagan, Y. Y. 1991. 3-D rotation of double-couple earthquake sources. *Geophysical Journal International*, 106(3), 709-716.
- Kongko, W., Idris, H., & Nugroho, S. P. (2023). Real-time earthquake analysis and tsunami early warning using integrated CMT solutions. *Bulletin of Indonesian Natural Hazards*, 9(2), 45-57.
- Irwanto, D. (2015). *Atlantis: The lost city is in Java Sea*. Indonesia Hydro Media.
- Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press.
- Liu, H., Nugroho, S., & Prasetya, A. (2021). Quantitative Analysis of Earthquake Source Models: Application of RMSE in Regional Seismology. *Seismic Modeling and Interpretation*, 19(3), 234-249.
- Mahyudin, M., Suprayogi, I., & Trimaijon, T. (2014). Model Prediksi Liku Kalibrasi Menggunakan Pendekatan Jaringan Saraf Tiruan (Studi Kasus: Sub DAS Siak Hulu). (Doctoral dissertation, Riau University).
- McCaffrey, R. (2009). The tectonic framework of the Sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 345-366.
- Murjaya, J. (2023). Seismotektonik Wilayah Indonesia Timur. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 3(3), 14-22.
- Rahman, M., Kusuma, A., & Nugroho, H. (2022). Visualization Techniques for Earthquake Data Interpretation: A Comparative Study. *Seismological Research Letters*, 93(4), 1889-1902. <https://doi.org/10.1785/0220220012>
- Scholz, C. H. (2019). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting (3rd ed.)*. Cambridge University Press.
- Shearer, P. M. 2009. *Introduction to seismology*. Cambridge: Cambridge university press.

- Siswanto, S., & Saputra, S. F. 2022. Prototype sistem peringatan dini bencana gempa Bumi dan tsunami berbasis internet of things. *Prosisko: Jurnal Pengembangan Riset dan Observasi Sistem Komputer*, 9(1), 60-66.
- Sokos, E. N., & Zahradnik, J. 2008. ISOLA a Fortran code & a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data. *Computers & Geosciences*, 34(8), 967-977.
- Spence, W., Sipkin, S. A., & Choy, G. L. (1989). Measuring the size of an earthquake. *Earthquake Information Bulletin (USGS)*, 21(1), 58-63.
- Syafitri, A. N. (2020). Analisis Centroid Moment Tensor (CMT) Gempa Bumi di Selat Sunda Pada 22 Desember 2018 Sebelum Tsunami Banten. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 9(2), 178-183.
- Taruna, R. M., Octhav, A., Rachman, A. N., Gunawan, M. T., Sulastris, S., Rohadi, S., & Murjaya, J. 2022. Pemilihan ground motion model di Wilayah Jawa menggunakan data percepatan tanah tahun 2010-2021. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 11(1), 29-37.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (2004). *Applied Geophysics* (Second Edition). Cambridge University Press.
- Triantafyllis, N., Sokos, E., Ilias, A., & Zahradník, J. (2016). Scisola: automatic *moment tensor* solution for SeisComp3. *Seismological Research Letters*, 87(1), 157-163.
- Triantafyllis, N., Venetis, I. E., Fountoulakis, I., Pikoulis, E. V., Sokos, E., & Evangelidis, C. P. (2022). Gisola: A high-performance computing application for real-time *moment tensor* inversion. *Seismological Society of America*, 93(2A), 957-966.
- Tsani, E. S., Madlazim, M., & Fahmi, M. N. (2024). Akurasi Perbandingan Solusi Centroid Moment Tensor (CMT) Gempa Bumi Secara Real-Time dan Otomatis Di Wilayah Sumatra Menggunakan Metode Gisola pada Software Jokotingkir. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(1), 34-42.
- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (2007). *Structural Geology* (2nd ed.). W. H. Freeman and Company.
- Umar, E. P. 2016. Mekanisme sumber gempa Bumi (focal mechanism) Manokwari. *Jurnal Geomine*, 4(1), 1-8.
- Pranantyo, I. R., & Cummins, P. R. (2019). Multi-Data-Type Source Estimation for the 1992 Flores Earthquake and Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*.
- Vackář, J., Burjánek, J., Gallovič, F., Zahradník, J., & Clinton, J. (2017). Bayesian ISOLA: new tool for automated Centroid Moment Tensor inversion. *Geophysical Journal International*, 210(2), 693-705.
- Vallée, M., Charléty, J., Ferreira, A. M., Delouis, B., & Vergoz, J. 2011. SCARDEC: a new technique for the rapid determination of seismic moment magnitude, focal mechanism & source time functions for large earthquakes using body-wave deconvolution. *Geophysical Journal International*, 184(1), 338-358.
- Vavryčuk, V., Petružálek, M., Lokajíček, T., & Aminzadeh, A. (2023). Bi-modular properties of sandstone inferred from seismic *moment tensors* of acoustic emissions. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 171, 105576.
- Widyarta, R. M., Setyonegoro, W., & Arifin, J. (2020). Sistem Informasi dan Analisa Gempa bumi Menggunakan Jisview pada Studi Kasus Gempa bumi Tasikmalaya. *JIKA (Jurnal Informatika)*, 4(2), 88-96.
- Zhou, Y., Liu, C., & Wang, F. (2023). Statistical Measures for Model Performance Evaluation in Earth Sciences. *Journal of Geophysical Data Analysis*, 45(2), 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.jgda.2023.01.005>
- Zhao, S., McClusky, S., Cummins, P. R., Miller, M. S., & Nugroho, H. (2023). New insights into crustal deformation of the Indonesia–Australia–New Guinea collision zone from a broad-scale kinematic model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(2), e2022JB024810.