

ANALISIS KEAKURATAN HASIL *CENTROID MOMENT TENSOR* (CMT) JOKO TINGKIR SECARA OTOMATIS DAN *REAL-TIME* UNTUK GEMPA BUMI SEDANG DAN BESAR DI INDONESIA

¹⁾Rachma Dwi Oktaviani, ²⁾Muhammad Nurul Fahmi, ³⁾Madlazim

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: rachma.20053@mhs.unesa.ac.id

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

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

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang rawan akan terjadinya gempa bumi. Hal tersebut disebabkan oleh letak Indonesia yang termasuk dalam jalur Ring of Fire dan dilewati oleh lempeng tektonik besar (*macro plate*) dan lempeng tektonik kecil (*micro plate*). Lempeng-lempeng tersebut saling bertumbukan sehingga membentuk zona subduksi dan menjadikan Indonesia termasuk dalam zona tektonik yang aktif dan sering terjadi gempa bumi. Informasi terkait gempa bumi dapat diperoleh melalui *software* Joko Tingkir. Akan tetapi solusi yang diberikan *software* Joko Tingkir tersebut belum dapat dipastikan keakuratannya. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil perbandingan *Centroid Moment Tensor* (CMT) gempa bumi dari Joko Tingkir dengan Global CMT dan menganalisis keakuratan hasil *Centroid Moment Tensor* (CMT) gempa bumi. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan parameter gempa dari Joko Tingkir dengan Global CMT, kemudian juga dilakukan justifikasi dari data tersebut menggunakan Metode RMSE dan sudut Kagan. Digunakan sebanyak 17 data gempa bumi sedang dengan magnitudo $6 \leq M_w < 7$ dan gempa bumi besar dengan magnitudo $M_w \geq 7$. Berdasarkan perbandingan parameter dari kedua *software* tersebut didapatkan hasil peta beachball dengan karakteristik yang sama dan data parameter yang tidak jauh berbeda dengan Global CMT. Justifikasi yang telah dilakukan didapatkan nilai RMSE dibawah ambang batas 20 dan nilai sudut Kagan yang kurang dari 60° . Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa solusi yang dihasilkan Joko Tingkir dapat dikatakan *reliable* atau dapat dipercaya oleh masyarakat sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi.

Kata Kunci: *Centroid Moment Tensor*, gempa bumi besar, gempa bumi sedang, *Root Mean Squared Error*, dan sudut Kagan

Abstract

Indonesia is a country prone to earthquakes. This is due to Indonesia's location within the Ring of Fire, which is traversed by major tectonic plates (*macro plates*) and minor tectonic plates (*micro plates*). These plates collide, forming subduction zones, making Indonesia an active tectonic region where earthquakes frequently occur. Information about earthquakes can be obtained through the Joko Tingkir software. However, the accuracy of the solutions provided by the Joko Tingkir software cannot be guaranteed. Therefore, this research aims to analyze the comparison results of the *Centroid Moment Tensor* (CMT) of earthquakes from Joko Tingkir with Global CMT and to assess the accuracy of the earthquake *Centroid Moment Tensor* (CMT) results. This research was conducted by comparing earthquake parameters from Joko Tingkir with Global CMT, followed by the validation of the data using the RMSE method and Kagan angle. A total of 17 moderate earthquakes with magnitudes of $6 \leq M_w < 7$ and major earthquakes with magnitudes $M_w \geq 7$ were

used. Based on the comparison of parameters from both software, beachball maps with similar characteristics and parameter data not significantly different from the Global CMT were obtained. The validation revealed RMSE values below the threshold of 20 and Kagan angle values less than 60° . Thus, it can be concluded that the solutions provided by Joko Tingkir can be considered reliable or trustworthy by the public as part of earthquake disaster mitigation efforts.

Keywords: Centroid Moment Tensor, Moderate Earthquake, Major Earthquake, Root Mean Squared Error and Kagan angle.

I. PENDAHULUAN

Indonesia termasuk dalam negara dengan tingkat kerentanan bencana yang tinggi, hal tersebut dibuktikan dari data World Risk Report (2023) yang menempatkan Indonesia sebagai negara dengan risiko bencana tertinggi nomor 2 di dunia. Secara geografis, Indonesia berada dalam zona Ring of Fire (Cincin Api Pasifik) yang mengelilingi Samudra Pasifik dengan deretan gunung api aktif. Lintasan ini menjadikan Indonesia memiliki sumber daya alam yang beragam dan sangat rentan terhadap aktivitas seismik. Selain itu, Indonesia juga dilewati oleh beberapa lempeng tektonik besar seperti Lempeng Pasifik, Indo-Australia, dan Eurasia, serta lempeng tektonik kecil seperti Lempeng Filipina, Caroline, dan Sunda. Banyaknya lempeng tektonik yang melintasi Indonesia menjadikan Indonesia termasuk dalam jalur zona tektonik yang sangat aktif. Lempeng-lempeng tersebut saling bergerak dan bertumbukan antara satu dengan yang lain sehingga menyebabkan terbentuknya zona subduksi dan zona transform fault.

Centroid Moment Tensor (CMT) merupakan metode seismologi yang digunakan dalam mengestimasi titik gempa dan memberikan data serta karakteristik sumber gempa bumi. Dalam perhitungannya CMT dapat memberikan hasil berupa seberapa kuat magnitudonya berupa ML, mb, mB, Ms, Mw, Mo serta mekanisme fokalnya. Pada skala lokal dan regional moment tensor dapat digunakan dalam menggambarkan geometri sesar yang kompleks (Vavrycuk *et al.*, 2021; Sawade *et al.*, 2022). Berdasarkan perkembangannya, metode CMT saat ini sudah bisa diterapkan secara manual maupun otomatis atau real-time.

Solusi *moment tensor* otomatis menjadi aplikasi penting dalam seismologi dengan menggunakan metode GISOLA. Metode ini menggunakan kualitas gelombang yang dihasilkan untuk dihasilkannya solusi *moment tensor* otomatis. Metode GISOLA menggunakan algoritma komputasi tingkat tinggi yang mampu memberikan solusi CMT dalam waktu sekitar 3,5 menit (Triantafyllis *et al.*, 2021). Metode ini juga mendukung berbagai desain *software*, dalam hal ini telah diimplementasi oleh Madlazim pada *software* Joko Tingkir. Namun, akurasi solusi dari *software* Joko Tingkir belum dapat dipastikan, sehingga validasi data sangat penting untuk memastikan data yang dihasilkan dapat digunakan dan disebarluaskan sebagai langkah mitigasi bencana gempa bumi.

Dengan demikian diperlukan penelitian lebih lanjut terkait analisis keakuratan hasil *Centroid Moment Tensor* (CMT) pada *software* Joko Tingkir untuk gempa bumi sedang (*moderate event*) dan gempa bumi besar (*large event*) yang terjadi di Indonesia. Hasil penelitian ini nantinya juga akan dibandingkan dengan hasil dari Global CMT dan dianalisis kembali menggunakan pendekatan statistik RMSE dan sudut Kagan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan evaluasi terhadap hasil CMT gempa bumi khususnya untuk gempa bumi sedang (*moderate event*) ($6 \leq Mw < 7$) dan gempa bumi besar (*large event*) ($Mw \geq 7$) agar hasil dari *software* Joko Tingkir dapat lebih akurat dan dipercaya oleh masyarakat.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari situs FDSNWS (<https://www.fdsn.org/webservices/>) yang diunduh melalui *software* Joko Tingkir (<https://jokotingkir.unesa.ac.id/>), mencakup parameter Centroid Moment Tensor (CMT) seperti *longitude*, *latitude*, *origin time*, *magnitudo*, *centroid depth*, *strike*, *dip*, dan *rake*. Data parameter tersebut dapat diperbaiki secara manual selama tanpa harus mengulang seluruh proses komputasi yang telah dilakukan (Triantafyllis *et al.*, 2016). Data yang digunakan dalam penelitian akan dibandingkan dengan data solusi *moment tensor* dari situs Global CMT (<https://www.globalcmt.org/>), kemudian diolah dengan pendekatan statistik menggunakan metode RMSE dan sudut Kagan untuk menentukan tingkat keakuratan dari solusi *moment tensor* yang dihasilkan.

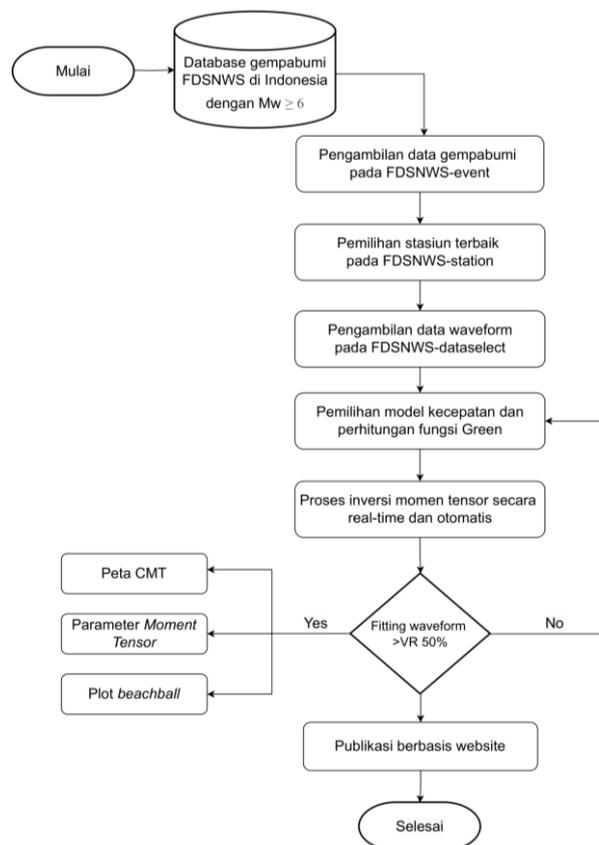
B. Variabel Operasional Penelitian

Terdapat tiga macam variabel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu variabel kontrol, variabel manipulasi, dan variabel respon. Adapun variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah data kejadian gempa bumi untuk gempa bumi sedang (*moderate event*) dan gempa bumi besar (*large event*) yang terjadi di wilayah Indonesia dengan waktu kejadian dari tahun 2018 hingga 2024. Sedangkan untuk variabel manipulasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah stasiun seismik yang memenuhi empat kuadran yang letaknya dekat dengan episenter dan juga model kecepatan *waveform*. Kemudian untuk variabel respon dari penelitian ini adalah grafik keakuratan hasil parameter gempa bumi pada *software* Joko Tingkir yang telah dibandingkan dengan parameter pada *website* Global CMT (*strike, dip, rake, dan Mw*) serta nilai RMSE dan sudut Kagan.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang didapatkan dari *website* FDSNWS yang dapat diakses melalui laman <https://www.fdsn.org/webservices/> dan di unduh secara langsung dengan *software* Joko Tingkir yang dapat diakses melalui laman <https://jokotingkir.unesa.ac.id/>. *Event* yang digunakan adalah kejadian gempa bumi yang terjadi di Indonesia dengan magnitudo $6 \leq M_w < 7$ untuk gempa bumi sedang (*moderate event*) dan $M_w \geq 7$ untuk gempa bumi besar (*large event*) dengan data yang didapatkan berupa data parameter gempa bumi yang terdiri dari *origin time, latitude, longitude, magnitude, centroid depth, strike, dip, dan rake*.

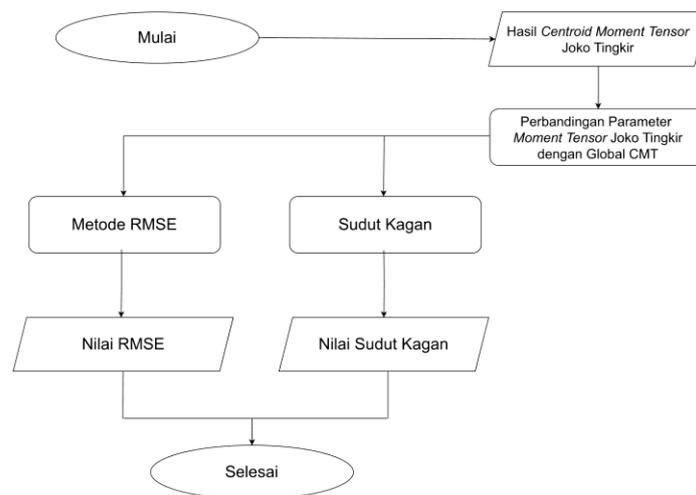
D. Teknik Pengolahan Data



Gambar 1. Alur pengambilan data

Data yang telah didapatkan dari *software* Joko Tingkir tersebut akan dilakukan pengolahan menggunakan metode Gisola. Dimana pada metode Gisola ini terdapat 6 tahap (Triantafyllis *et al.*, 2021). Tahap yang pertama adalah dengan membaca data gempa bumi pada International Federation of Digital Seismograph Networks Web Services (FDSNWS)-*event*. Tahapan yang kedua adalah memilih stasiun yang paling baik pada FDSNWS-*station*. Kemudian tahap yang ketiga dilakukan pengambilan data waveform pada FDSNWS-*dataselect*. Tahapan yang keempat dapat dilakukan perhitungan fungsi Green dari seluruh data yang telah diperoleh dan dilanjut dengan menginversi *moment tensor* secara *real-time* dan otomatis. Untuk tahapan

yang terakhir adalah plotting hasil inversi yang telah dilakukan agar mendapatkan hasil peta *Centroid Moment Tensor* (CMT), *beachball*, dan parameter *moment tensor* (MT).

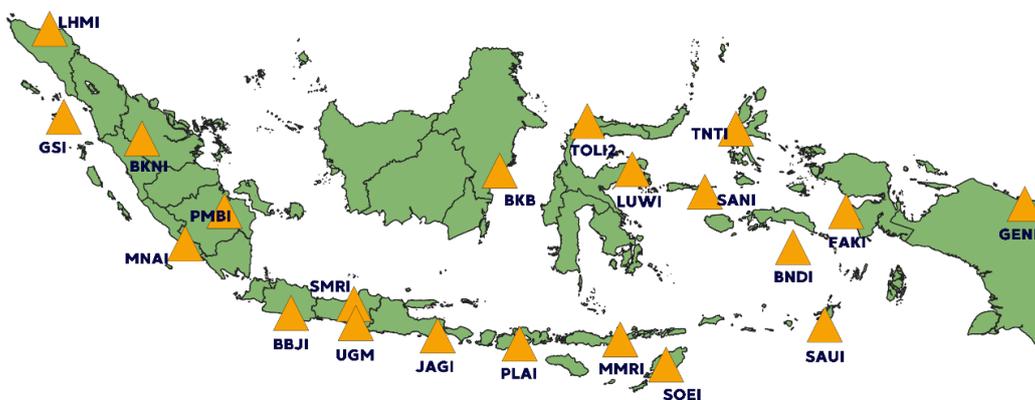


Gambar 2. Alur justifikasi hasil

Tahapan yang kedua dari proses pengolahan data adalah justifikasi hasil. Dari tahapan yang sebelumnya telah didapatkan hasil peta *Centroid Moment Tensor* (CMT), *beachball*, dan parameter *moment tensor*. Data tersebut selanjutnya diolah dengan membandingkannya menggunakan data yang diperoleh dari *website* Global CMT yang dapat diakses pada laman <https://www.globalcmt.org/>. Hasil dari perbandingan keduanya akan diperoleh grafik keakuratan dari kedua data tersebut. Selain itu data yang didapatkan dari tahap sebelumnya juga diolah dengan pendekatan statistik menggunakan metode RMSE dan Sudut Kagan yang dibantu dengan software MATLAB dalam proses pengolahannya, sehingga tingkat keakuratannya dapat dilihat dari nilai RMSE dan sudut Kagan yang diperoleh.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil



Gambar 3. Peta Stasiun Seismik yang merekam *event* gempa bumi di Indonesia

Data gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 17 *event*, dimana 4 diantaranya merupakan gempa bumi besar (*large event*) dan 13 lainnya termasuk gempa bumi sedang (*moderate event*) yang terjadi pada tahun 2018-2023. Data parameter yang akan digunakan, antara lain *origin time*, *latitude*, *longitude*, *centroid depth*, *magnitude*, dan orientasi bidang sesar yang terdiri dari *strike*, *dip*, dan *rake*. Seluruh data yang didapatkan dari *software* Joko Tingkir merupakan data gempa yang berstatus *preliminary* atau data yang didapatkan dengan cepat sesaat setelah terjadinya gempa bumi. Data yang berstatus *preliminary* ini biasanya

digunakan dalam estimasi awal terjadinya gempa dan seringkali masih bisa dilakukan revisi setelah dilakukan analisis lebih lanjut. Revisi tersebut bisa saja dilakukan dengan merevisi stasiun dan mengubah model kecepatan dari event gempa yang dihasilkan.

Joko Tingkir juga memberikan data stasiun seismik yang merekam gempa bumi. Pada penelitian ini digunakan 21 stasiun yang ada di Indonesia seperti pada Gambar 1. Stasiun yang digunakan merupakan stasiun GEOFON dimana hal tersebut selaras dengan *software* Joko Tingkir yang dapat memberikan informasi parameter gempa bumi secara *real-time*. Dalam penelitian ini juga dilakukan revisi pada *event* yang masih memiliki selisih yang signifikan dengan *website* pembanding atau Global CMT. Adapun *event* tersebut yakni pada 14 Juli 2019 dengan magnitudo 7.1 Mw.

Station	N	E	Z	Distance (km)
SANI	0.76	0.2	0.57	290
BNDI	0.85	0.73	0.85	484
TOLI2	-	-	-0.36	836
SOEI	-	-	0.85	1106
MMRI	-0.25	0.02	0.04	1108
PLAI	-	-0.25	-0.01	1468

(a)

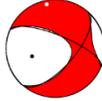


Station	N	E	Z	Distance (km)
SANI	0.88	0.79	0.92	290
BNDI	0.92	0.88	0.97	484
TOLI2	-	-	0.19	836
SOEI	-	-	0.46	1106
MMRI	0.62	0.6	0.4	1108
PLAI	-	0.18	0.05	1468

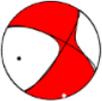
(b)

Gambar 4. (a) data stasiun seismik sebelum direvisi, (b) data stasiun seismik setelah direvisi pada 14 Juli 2019

Langkah pertama yang dapat dilakukan dalam merevisi adalah dengan menghapus stasiun seismik yang bernilai negatif disebabkan karena adanya noise atau gangguan. Dari Gambar 4. diatas, dapat diketahui bahwasanya *event* tersebut direkam oleh 6 stasiun seismik. Adapun stasiun seismik yang merekam yaitu SANI, BNDI, TOLI2, SOEI, MMRI, dan PLAI. Dapat dilihat terdapat 3 stasiun yang memiliki nilai negatif dan akan dihapus antara lain, TOLI2, MMRI, dan PLAI. Selain menghapus nilai stasiun, juga dilakukan fitting gelombang seismik dengan menggunakan nilai frekuensi sebesar 0.005-0.02 Hz.

Quality Metrics						
	Correlation:	0.80	Variance Reduction:	0.63	Quality:	A2
	DC (%):	74.60	CLVD (%):	25.40	ISO (%):	0.00
	Min Singular:	2.489e-16	Condition Number:	3.91	STVAR:	0.04
	Max Singular:	9.746e-16	FMVAR:	31.71		

↓

Quality Metrics						
	Correlation:	0.91	Variance Reduction:	0.83	Quality:	A1
	DC (%):	87.00	CLVD (%):	13.00	ISO (%):	0.00
	Min Singular:	9.607e-17	Condition Number:	6.31	STVAR:	0.21
	Max Singular:	6.059e-16	FMVAR:	nan		

Gambar 5. Hasil Quatlity Metrics pada software Joko Tingkir sebelum direvisi (atas) dan setelah direvisi (bawah)

Setelah merevisi dengan menghapus stasiun seismik yang bernilai negatif dan fitting gelombang, dapat dilihat kualitas matriks yang dihasilkan semakin meningkat dari A2 menjadi A1. Nilai VR juga semakin meningkat dari 0.63 atau 63% menjadi 0.83 atau 83%, hal tersebut menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik dan reliable atau dapat dipercaya. Selain nilai VR, nilai DC dan juga CLVD juga mengalami perubahan. Dengan nilai DC sebesar 74.6 menjadi 87 dan nilai CLVD sebesar 25.4 menjadi 13.0. Nilai DC yang lebih besar daripada nilai CLVD menunjukkan bahwa gempa bumi tersebut diakibatkan oleh aktivitas tektonik.

Tabel 1. menampilkan data parameter *Centroid Moment Tensor* Joko Tingkir sebelum direvisi, setelah dilakukannya revisi, dan parameter yang bersumber dari Global CMT yang digunakan sebagai pembanding keakuratan data dari Joko Tingkir. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwasanya nilai seluruh parameter dan gambar *beachball* yang dihasilkan semakin mirip dengan Global CMT. Selain itu juga dilakukan perhitungan sudut Kagan agar lebih diketahui keakuratan data yang dihasilkan Joko Tingkir, dan didapatkan nilai sudut Kagan yang semakin rendah sebesar 46.49 sebelum direvisi dan 26.84 setelah dilakukannya revisi.

Tabel 1. Perbandingan antara solusi CMT dari *website* Global CMT, *software* Joko Tingkir secara *real-time* dan otomatis, dan hasil revisi dari *software* Joko Tingkir secara *real-time* dan otomatis pada gempa 14 Juli 2019

Focal Mechanism		GCMT	Joko Tingkir <i>real-time</i> dan otomatis	Joko Tingkir hasil revisi
Beach Ball				
Mw		7.2	7.1	7.2
Centroid Time		09:11:04.06	09:11:00.68	09:11:01.43
Latitude		-0.72	-0.80	-0.53
Longitude		128.13	128.11	127.84
Centroid Depth		12	8	8
Nodal Plane 1	Strike	124	292	296
	Dip	84	65	65
	Rake	0	-40	-18
Nodal Plane 2	Strike	34	42	34
	Dip	90	53	72
	Rake	174	-149	-154
Karakteristik		Strike slip	Oblique	Strike slip

B. Pembahasan

Tabel 2. Nilai RMSE *strike*, *dip*, dan *rake* Joko Tingkir dan Global CMT (a) Gempa bumi sedang (*moderate event*), (b) Gempa bumi besar (*large event*)

No.	Parameter	Nilai RMSE
1.	<i>Origin time</i>	4.83
2.	<i>Magnitude</i>	0.04
3.	<i>Centroid depth</i>	10.41
4.	<i>Latitude</i>	0.16
5.	<i>Longitude</i>	0.13
6.	<i>Strike</i>	3.97
7.	<i>Dip</i>	6.81
8.	<i>Rake</i>	12.83

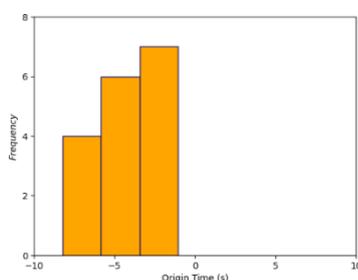
(a)

No.	Parameter	Nilai RMSE
1.	<i>Origin time</i>	4.92
2.	<i>Magnitude</i>	0.09
3.	<i>Centroid depth</i>	5.65
4.	<i>Latitude</i>	0.16
5.	<i>Longitude</i>	0.17
6.	<i>Strike</i>	4.15
7.	<i>Dip</i>	11.71
8.	<i>Rake</i>	13.81

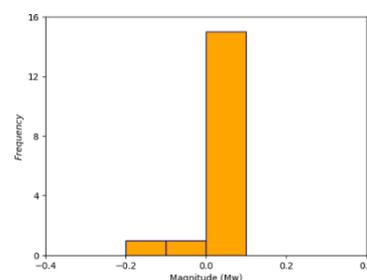
(b)

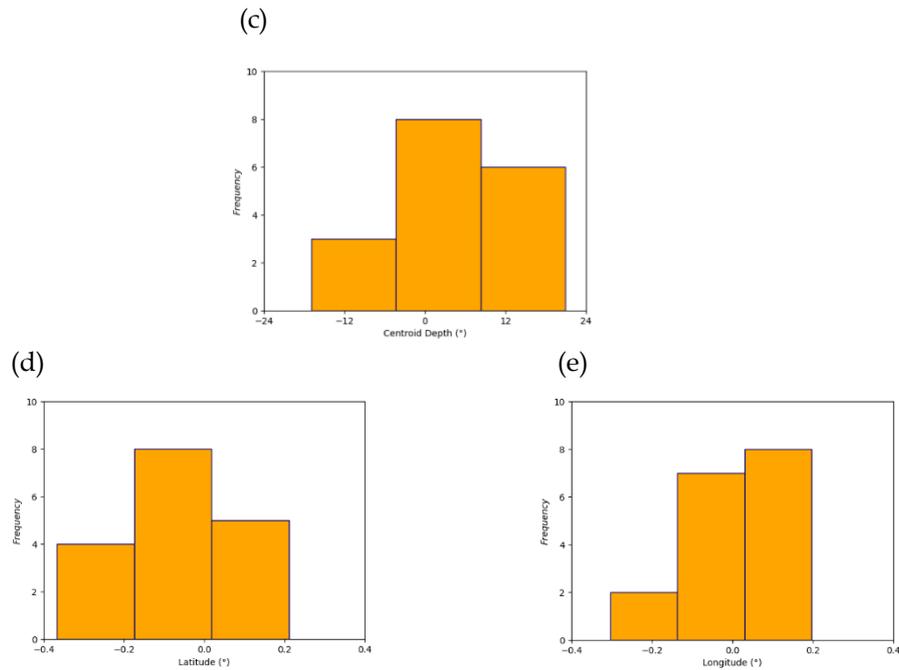
Tabel 2.(a) menunjukkan nilai RMSE untuk parameter gempa bumi sedang, dengan nilai 4.83 untuk *origin time*, 0.04 untuk *magnitudo*, 10.41 untuk *centroid depth*, dan masing-masing 0.16 dan 0.13 untuk *latitude* dan *longitude*. Nilai RMSE untuk sudut *strike*, *dip*, dan *rake* adalah 3.97, 6.81, dan 12.83. Tabel 2.(b) menunjukkan nilai RMSE untuk gempa bumi besar, dengan nilai 4.92 untuk *origin time*, 0.09 untuk *magnitudo*, 5.65 untuk *centroid depth*, dan masing-masing 0.16 dan 0.17 untuk *latitude* dan *longitude*. Nilai RMSE untuk sudut *strike*, *dip*, dan *rake* adalah 4.15, 11.71, dan 13.81. Menurut Hidayanti et al. (2022), data dianggap akurat jika nilai RMSE rendah, di bawah ambang batas 20, menunjukkan perbedaan kecil antara nilai prediksi dan aktual (Hidayanti et al., 2022). Berdasarkan nilai RMSE yang dihasilkan, data dari *software* Joko Tingkir menghasilkan prediksi yang akurat.

(a)



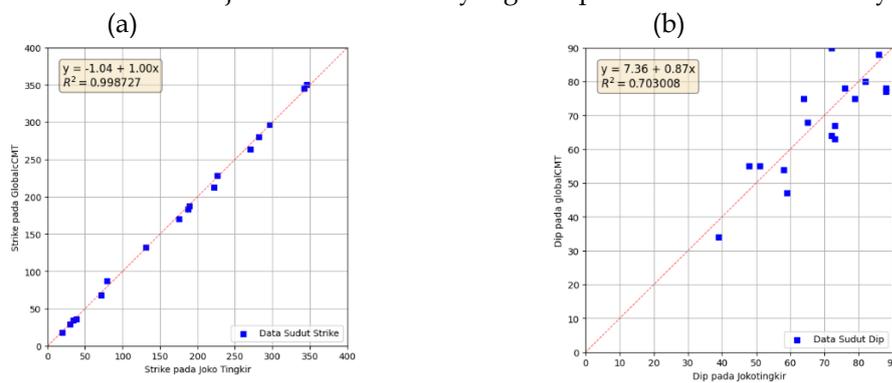
(b)

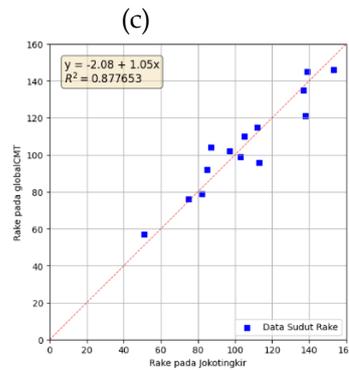




Gambar 6. Histogram Selisih Parameter (a) *Origin Time*; (b) *Magnitude*; (c) *Centroid Depth*; (d) *Latitude*; (e) *Longitude*

Gambar 6 merupakan gambar histogram selisih parameter gempa bumi. Dimana sumbu x menunjukkan rentang selisih parameter dari Joko Tingkir dan Global CMT dan sumbu y menunjukkan frekuensi atau jumlah data yang berada dalam rentang tersebut. Histogram (a) menunjukkan data *origin time*, selisih *origin time* terdistribusi diantara -8 hingga -1. Parameter yang kedua yakni magnitudo, selisih *magnitude* banyak terdistribusi pada -0.2 hingga 0.1. Parameter yang ketiga yakni *centroid depth*, dengan selisih *centroid depth* yang terdistribusi pada -16 hingga 20. Kemudian parameter yang terakhir yakni nilai *latitude* dan *longitude* titik terjadinya gempa bumi. Selisih nilai *latitude* dan *longitude* yang dihasilkan Joko Tingkir dan Global CMT terdistribusi antara -0.2 sampai 0.2 untuk nilai *latitude* dan -0.3 sampai 0.2 untuk nilai *longitude*. Dari keseluruhan parameter tersebut menunjukkan bahwa pada setiap parameter memiliki selisih yang kecil atau mendekati nol. Hal tersebut menunjukkan bahwa data yang didapatkan memiliki akurasi yang tinggi.

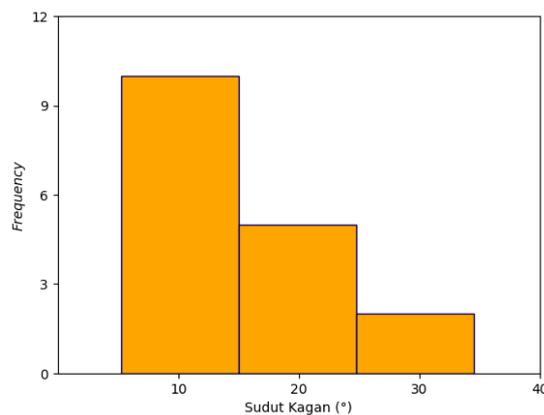




Gambar 7 Grafik Perbandingan Joko Tingkir dengan Global CMT gempa bumi (a) sudut *strike*; (b) sudut *dip*; (c) sudut *rake*

Pada Gambar 7 merupakan grafik perbandingan nilai sudut *strike*, *dip*, dan *rake* dari Joko Tingkir dan Global CMT. Berdasarkan gambar X grafik diatas, didapatkan nilai sebagai berikut; (a) grafik perbandingan sudut *strike* diperoleh nilai $R^2 = 0,998$ dan $y = -1.04 + 1.00x$; (b) grafik perbandingan sudut *dip* diperoleh nilai $R^2 = 0.703$ dan $y = 7.36 + 0.87x$; dan (c) grafik perbandingan sudut *rake* diperoleh nilai $R^2 = 0.877$ dan $y = -2.08 + 1.05x$. Dari seluruh data tersebut didapatkan nilai koefisien determinasi (R^2) diatas 0.75 yang menunjukkan akurasi yang tinggi (Hair *et al.*, 2017).

Selain nilai RMSE, *R-squared* dan histogram selisih dari kedua parameter, untuk membandingkan seberapa akuratnya parameter yang dihasilkan *software* Joko Tingkir dan Global CMT, dilakukan juga perhitungan sudut Kagan. Sudut Kagan merupakan sudut yang digunakan dalam membandingkan orientasi sumber gempa bumi yang diamati dengan yang diprediksi. Dalam seismologi sudut Kagan biasanya digunakan dalam mengevaluasi seberapa baiknya parameter CMT dengan data observasi. Menurut (Kagan, 1991) sudut Kagan yang baik adalah yang memiliki sudut kurang dari 60° .



Gambar 8. Histogram Sudut Kagan

Seluruh *event* yang digunakan baik gempa bumi sedang maupun gempa bumi besar didapatkan nilai sudut Kagan yang kurang dari 60° seperti pada Gambar 8. Dimana nilai tertinggi yang didapatkan dalam penelitian ini adalah 34.5 untuk gempa bumi sedang dan 26.8 untuk gempa bumi besar. Hal tersebut juga telah dibuktikan dari peta *beachball* yang dihasilkan, seluruhnya juga sudah sesuai dengan *beachball* yang dihasilkan Global CMT. Maka dapat dikatakan bahwasanya parameter yang dihasilkan Joko Tingkir dapat menggambarkan mekanisme gempa yang baik dengan akurasi yang tinggi.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Parameter CMT yang didapatkan pada penelitian ini adalah *origin time*, *magnitude*, *centroid depth*, *latitude*, *longitude*, *strike*, *dip*, dan *rake*. Dari keseluruhan event yang digunakan menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh dari *website* Global CMT. Keakuratan hasil parameter juga didapatkan dari Justifikasi *software*

Joko Tingkir dengan Global CMT menggunakan nilai RMSE dan sudut Kagan. Didapatkan seluruh parameter memiliki nilai RMSE dibawah 20 dan sudut Kagan dari tiap *event* yang tidak kurang dari 60°, hal tersebut menunjukkan bahwa parameter yang dihasilkan Joko Tingkir dapat dikatakan akurat dan *reliable* sehingga dapat digunakan sebagai upaya mitigasi oleh masyarakat luas.

B. Saran

Adapun saran yang diberikan penulis yaitu dapat dilakukan juga perbandingan keakuratan parameter CMT Joko Tingkir dan Global CMT untuk gempa bumi kecil agar dapat terlihat dan lebih dimengerti perbedaan yang didapatkan dari parameter yang dihasilkan Joko Tingkir dan Global CMT, mengingat Indonesia juga merupakan negara dengan seismisitas yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aagaard, B. T., Hall, J. F., & Heaton, T. H. (2004). Earthquake. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 94, Issue 1).
- Abdulnaby, W. (2013). Seismotectonics Of the Northeastern Margin Of The Arabian Plate In Iraq.
- Airlangga, G. (2024). Analysis Of Machine Learning Algorithms for Seismic Anomaly Detection In Indonesia: Unveiling Patterns In The Pacific Ring Of Fire Analysis Of Machine Learning Algorithms For Seismic Anomaly Detection In Indonesia: Unveiling Patterns In The Pacific Ring Of Fire Gregorius Airlangga. 5(1), 37-48.
- Duboeuf, L. (2018). Injections De Fluide Dans Une Zone De Faille (Lsbb, Rustrel) : Sismicité Induite Et Déformation Asismique.
- 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 and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9.
- Funning, G. J., & Garcia, A. (2019). A Systematic Study Of Earthquake Detectability Using Sentinel-1 Interferometric Wide-Swath Data. *Geophysical Journal International*, 216(1), 332-349.
- Hair, J., Hollingsworth, C. L., Randolph, A. B., & Chong, A. Y. L. (2017). An updated and expanded assessment of PLS-SEM in information systems research. *Industrial Management & Data Systems*, 117(3), 442-458.
- Hamidbeygi, M., Vasyura-Bathke, H., Dettmer, J., Eaton, D. W., & Dosso, S. E. (2023). Bayesian Estimation of Non-Linear Centroid Moment Tensors Using Multiple Seismic Data Sets. *Geophysical Journal International*, 235(3), 2948-2961.
- Hodson, T. O. (2022). Root-Mean-Square Error (Rmse) Or Mean Absolute Error (Mae): When to Use Them or Not. In *Geoscientific Model Development* (Vol. 15, Issue 14, Pp. 5481-5487). Copernicus Gmbh.
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9).
- Ichinose, G. A., Thio, H. K., Somerville, P. G., Sato, T., & Ishii, T. (2003). Rupture Process of the 1944 Tonankai Earthquake (Ms 8.1) From the Inversion of Teleseismic and Regional Seismograms. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10).
- Letort, J., Guilbert, J., Cotton, F., Bondár, I., Cano, Y., & Vergoz, J. (2015). A New, Improved and Fully Automatic Method for Teleseismic *Depth* Estimation of Moderate Earthquakes ($4.5 < M < 5.5$): Application to The Guerrero Subduction Zone (Mexico). *Geophysical Journal International*, 201(3), 1834-1848.
- Madlazim, Fahmi, M. N., Sari, D. P., Meilianda, E., and Koesuma, S. (2024). Implementing and evaluating an automatic centroid moment tensor procedure for the Indonesia region and surrounding areas. *Earth Planet. Phys.*, 8(4), 609-620.
- Pasau, G., & Tanauma, A. (2011). Pemodelan Sumber Gempa Di Wilayah Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempa bumi
- 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.
- Sokos, E. N., & Zahrádnik, J. (2008). Isola A Fortran Code and A Matlab Gui to Perform Multiple-Point Source Inversion Of Seismic Data. *Computers And Geosciences*, 34(8), 967-977.

- Sunarjo, Et. Al. (2012). Gempa bumi Indonesia. Badan Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika.
- 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. (2021). Gisola: A High-Performance Computing Application for Real-Time Moment Tensor Inversion. *Seismological Research Letters*, 93(2a), 957–966.
- Vavryčuk, V., Adamová, P., Doubravová, J., & Ren, Y. (2021). Mapping stress and fluids on faults by nonshear earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB021287.
- Vackáář, J., Burjáánek, 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.