

STUDI AKURASI CENTROID MOMENT TENSOR (CMT) PADA SOFTWARE JOKO TINGKIR DI WILAYAH KEPULAUAN MALUKU DENGAN PENDEKATAN SUDUT KAGAN DAN STATISTIKA INFERENSIAL

¹⁾ Jihan Nurrahma Wardani, ²⁾ Muhammad Nurul Fahmi, ³⁾ Madlazim

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: jihannurrahma.21028@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

Penentuan parameter mekanisme sumber gempa yang akurat sangat penting dalam kajian seismotektonik dan mitigasi bencana. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan hasil inversi *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang dihasilkan oleh perangkat lunak Joko Tingkir menggunakan pendekatan sudut Kagan dan analisis statistik inferensial, serta untuk mengkaji karakteristik sesar di wilayah Kepulauan Maluku. Penelitian dibatasi pada 25 kejadian gempa dengan magnitudo moment ($M_w > 5$) yang terjadi selama periode 2020 hingga 2024. Hasil perhitungan sudut Kagan menunjukkan bahwa seluruh data memiliki nilai dalam rentang 5° hingga 37° , berada jauh di bawah batas kritis 60° yang mengindikasikan tingkat kesesuaian tinggi antara Joko Tingkir dan katalog GCMT. Uji statistik parametrik menghasilkan nilai t untuk masing-masing parameter: *strike* (-0,431), *dip* (-0,164), *rake* (-0,991), *latitude* (-1,003), *longitude* (-0,205), dan *depth* (1,109), semuanya masih dalam rentang toleransi ($\pm 2,06$). Nilai z -score untuk parameter M_w juga berada dalam batas wajar yaitu -1,883, tidak melampaui nilai kritis $\pm 1,96$. Dengan demikian, tidak ditemukan perbedaan signifikan secara statistik maupun visual antara kedua dataset. Selain itu, hasil inversi mengungkapkan bahwa wilayah Kepulauan Maluku didominasi oleh tiga tipe mekanisme patahan yaitu *strike-slip*, *thrust*, dan *oblique reverse* yang masing-masing berasosiasi dengan struktur aktif seperti Sesar Kawa, Banda *Detachment*, Snellius Ridge, dan Morotai Trough. Temuan ini mencerminkan dinamika tektonik yang kompleks akibat interaksi antara lempeng utama dan mikrolempeng di kawasan tersebut.

Kata Kunci: Centroid Moment Tensor, Kepulauan Maluku, Sudut Kagan, Statistika Inferensial

Abstract

Accurate determination of earthquake focal mechanism parameters is crucial for seismotectonic analysis and disaster mitigation. This study aims to evaluate the accuracy of Centroid Moment Tensor (CMT) inversion results generated by the Joko Tingkir software using the Kagan angle approach and inferential statistical methods, as well as to examine fault characteristics in the Maluku Islands region. The research is restricted to 25 earthquake events with a moment magnitude ($M_w > 5$) that occurred between 2020 and 2024. Kagan angle calculations indicate that all data pairs have values ranging from 5° to 37° , well below the critical threshold of 60° , suggesting a high level of similarity between Joko Tingkir and the GCMT catalogue. Parametric statistical tests yielded t -values for each parameter as follows: *strike* (-0.431), *dip* (-0.164), *rake* (-0.991), *latitude* (-1.003), *longitude* (-0.205), and *depth* (1.109), all within the acceptable range of ± 2.06 . The Z -score for the M_w parameter was -1.883, also within the critical range of ± 1.96 . These results indicate no statistically or visually significant differences between the two datasets. Furthermore, the inversion results reveal that the Maluku region is dominated by three faulting types: *strike-slip*, *thrust*, and *oblique reverse*, each associated with major active structures such as the Kawa Fault, Banda *Detachment*, Snellius Ridge, and Morotai Trough. These findings reflect the region's complex tectonic dynamics resulting from interactions between major tectonic plates and microplates.

Keywords: Centroid Moment Tensor, Maluku Islands, Kagan Angle, Inferential Statistics

I. PENDAHULUAN

Kepulauan Maluku merupakan wilayah Indonesia bagian timur yang berada pada zona tektonik aktif dan memiliki tatanan tektonik kompleks akibat konvergensi tiga lempeng utama dunia (*mega triple junction*) yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik-Filipina (Murjaya, 2023). Pada wilayah bagian utara Kepulauan Maluku terdapat zona subduksi ganda di mana Lempeng Eurasia mengalami subduksi ke arah timur di bawah busur Sangihe, sementara Lempeng Pasifik-Filipina mengalami subduksi ke arah barat di bawah busur Halmahera yang menghasilkan *ridge* atau punggung bawah laut (Yuliatmoko & Kurniawan, 2019). Kompleksitas geologi tersebut menyebabkan Kepulauan Maluku memiliki tingkat resiko bencana kebumihan yang tinggi, terutama gempa bumi dengan potensi membangkitkan gelombang tsunami. Oleh karena itu, sebagai salah satu bentuk upaya mitigasi bencana diperlukan ketersediaan informasi akurat mengenai karakteristik sumber gempa.

Informasi mengenai mekanisme sumber gempa dapat ditinjau pada solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang diperoleh melalui inversi gelombang seismik tiga komponen. Solusi ini mencakup waktu kejadian gempa, lokasi episentrum, kedalaman centroid, dan orientasi bidang patahan seperti parameter *strike*, *dip*, dan *rake* (Sawade *et al.*, 2022). Kredibilitas solusi CMT ditentukan oleh distribusi stasiun seismik yang merata pada empat kuadran di sekitar lokasi gempa dan nilai *variance reduction* yang tinggi (Vackáář *et al.*, 2017).

Seiring dengan perkembangan teknologi, metode perhitungan solusi CMT telah berkembang mulai dari algoritma manual ISOLA menuju sistem otomatis seperti Scisola, AutoBATS, dan *real-time* Gisola (Sokos & Zahradnik, 2008; Jian *et al.*, 2018; Triantafyllis *et al.*, 2016, 2021). Algoritma Gisola yang diterapkan dalam *platform* Joko Tingkir, memungkinkan penentuan solusi CMT secara otomatis serta *real-time* dalam waktu kurang dari lima menit sehingga cocok untuk diterapkan dalam sistem peringatan dini gempa (*Earthquake Early Warning System*).

Solusi CMT yang dihasilkan oleh algoritma Gisola bersifat *preliminary*, di mana data dapat diperoleh dengan cepat, namun hanya bersifat sementara dan perlu validasi serta justifikasi lebih lanjut untuk mendapatkan informasi lebih akurat. Pada studi terdahulu yang dilakukan oleh Oktaviani *et al* (2024) evaluasi solusi CMT menerapkan pendekatan metode RMSE (*Root Mean Square Error*) sebagai ukuran kesalahan rata-rata antar data. Namun, metode RMSE memiliki keterbatasan karena cenderung sensitif terhadap nilai error yang ekstrem dan tidak memberikan gambaran mengenai signifikansi perbedaan antar katalog data gempa (Hodson, 2022). Oleh karena itu, pendekatan yang memadukan analisis geometris seperti sudut kagan dan statistika inferensial dapat menjadi alternatif untuk mereduksi pengaruh nilai-nilai ekstrem serta memberikan verifikasi kuantitatif yang lebih komprehensif terhadap reliabilitas solusi CMT.

Sudut Kagan digunakan untuk mengukur perbedaan dua solusi CMT berdasarkan rotasi tensor momen seismik atau orientasi bidang patahan secara geometri (Kagan, 1991). Semakin kecil nilai sudut Kagan yang dihasilkan, semakin akurat kedua solusi CMT tersebut. Apabila nilai sudut Kagan yang diperoleh berada di bawah ambang batas 60° maka solusi CMT dianggap akurat (Pondrelli *et al.*, 2006).

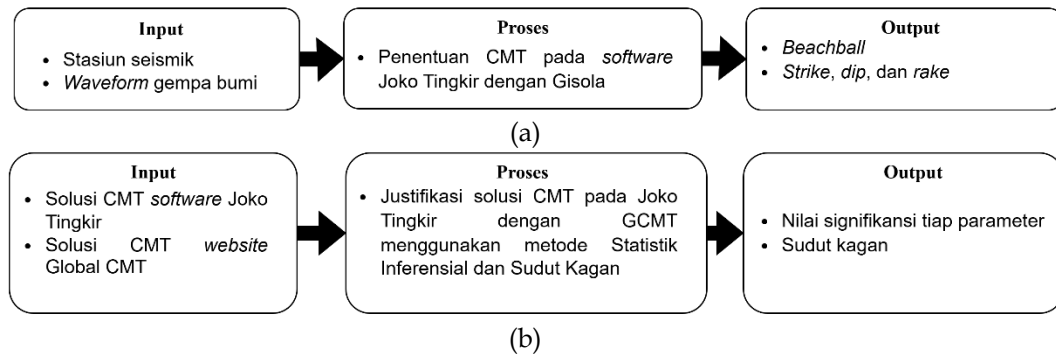
Pendekatan statistika inferensial seperti *Paired Sample T-Test* dan *Wilcoxon Signed Rank Test* mengevaluasi dua solusi CMT berdasarkan pola distribusi dan memberikan gambaran tentang signifikansi perbedaan antara kedua *dataset* serta membantu mengurangi pengaruh variabilitas data (Gio & Suyanto, 2017; Mishra *et al.*, 2019).

Berdasarkan pendahuluan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan solusi CMT dari *platform* Joko Tingkir di wilayah Kepulauan Maluku. Perbandingan hasil dengan *Global CMT* dilakukan menggunakan pendekatan statistik dan analisis geometri sudut Kagan untuk mendapatkan pemahaman komprehensif mengenai karakteristik sesar dan mekanisme gempa baik secara kualitatif dan kuantitatif.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif berbasis statistik dan komputasi, menggunakan data sekunder parameter CMT dari *software* Joko Tingkir untuk gempa dengan $M_w \geq 5$ di Kepulauan Maluku ($3,07^\circ\text{LU}$ – $8,44^\circ\text{LS}$ dan $125,93^\circ\text{BT}$ – $132,04^\circ\text{BT}$) selama 2020–2024. Solusi CMT diperoleh melalui *inversi waveform* tiga komponen menggunakan algoritma *Gisola* dengan input dari *database* FDSNWS. Data Joko Tingkir kemudian dibandingkan dengan *Global CMT* yang dijadikan acuan karena keandalannya secara internasional. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan statistik inferensial dan perhitungan sudut Kagan untuk menilai tingkat akurasi solusi CMT.



Gambar 1. Diagram alir rancangan penelitian (a) tahap satu. (b) tahap dua.

B. Instrumen Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen yang terdiri dari perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*hardware*). Perangkat lunak meliputi algoritma *Gisola* dalam *software* Joko Tingkir untuk memperoleh data CMT real-time, yang kemudian dibandingkan dengan data dari *Global CMT*. Analisis dilakukan menggunakan *Jupyter Notebook* dan *Visual Studio Code* berbasis Python untuk statistika inferensial, serta *MATLAB Online* untuk perhitungan sudut Kagan. Perangkat keras yang digunakan adalah laptop atau PC.

C. Variabel Operasional Penelitian

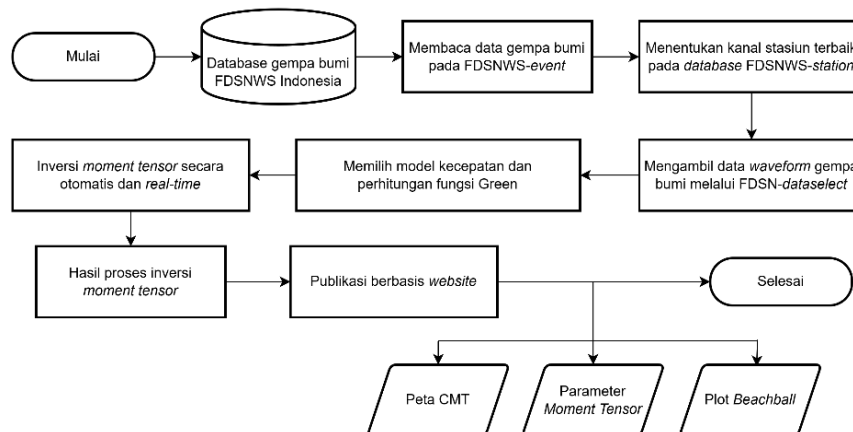
Penelitian ini melibatkan variabel manipulasi, variabel kontrol, dan variabel respon. Variabel manipulasi mencakup pemilihan empat stasiun seismik terdekat di empat kuadran sekitar episenter dan model kecepatan gelombang yang sesuai dengan geologi wilayah. Variabel kontrol terdiri dari kejadian gempa $M_w \geq 5$ di Kepulauan Maluku ($3,07^\circ\text{LU}$ – $8,44^\circ\text{LS}$ dan $125,93^\circ\text{BT}$ – $132,04^\circ\text{BT}$) selama periode 2020–2024. Adapun variabel respon mencakup hasil solusi CMT dari Joko Tingkir (*strike*, *dip*, *rake*, lokasi, magnitudo, kedalaman, dan *beachball*), nilai signifikansi statistik tiap parameter, serta nilai sudut Kagan dari perbandingan dengan data *Global CMT*.

D. Teknik Pengumpulan Data

Data sekunder parameter CMT real-time diambil dari *software* Joko Tingkir (<https://jokotingkir.unesa.ac.id>) untuk gempa $M_w \geq 5$ di Kepulauan Maluku periode 2020–2024. Parameter yang digunakan mencakup lokasi (longitude dan latitude), origin time, magnitudo, kedalaman centroid, serta mekanisme fokus (*strike*, *dip*, dan *rake*). Mekanisme gempa tersebut diperoleh melalui algoritma *Gisola* dengan input waveform tiga komponen dari *database* FDSNWS. Proses pengambilan dilakukan dengan menyaring data berdasarkan tahun, menyesuaikan tampilan peta wilayah, lalu memilih ikon *beachball* untuk mengakses detail solusi CMT. Data pembanding diambil dari katalog gempa *Global CMT* (<https://www.globalCMT.org/CMTsearch.html>) dikumpulkan dengan menetapkan wilayah $3,07^\circ\text{LU}$ – $8,44^\circ\text{LS}$ dan $125,93^\circ\text{BT}$ – $132,04^\circ\text{BT}$ serta periode yang sama, lalu mengunduh hasil dalam bentuk keluaran *full format*.

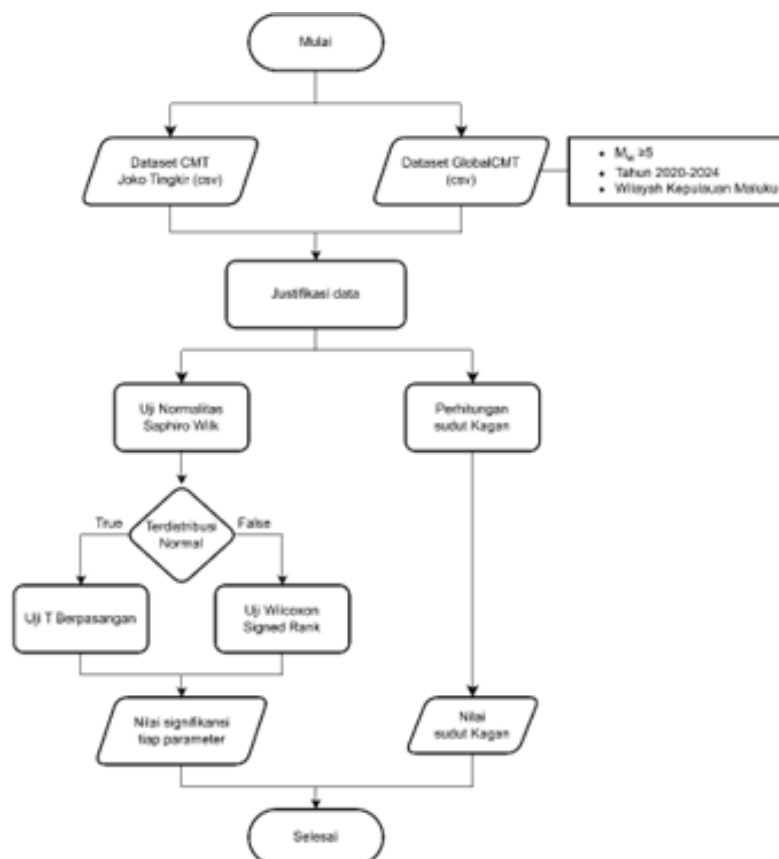
E. Teknik Pengolahan Data

Dalam penelitian ini, proses pengolahan data terbagi menjadi dua tahap. Tahap awal adalah menghasilkan solusi Centroid Moment Tensor (CMT) menggunakan *software* Joko Tingkir. Tahap selanjutnya melakukan evaluasi terhadap keakuratan katalog solusi CMT yang dihasilkan oleh *software* Joko Tingkir.



Gambar 2. Diagram alir penentuan CMT *real-time* pada *software* Joko Tingkir menggunakan algoritma Gisola

Penentuan solusi CMT *real-time* pada *software* Joko Tingkir menggunakan algoritma Gisola. Algoritma ini dapat menghitung solusi CMT dengan menggunakan data dari stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen yang diambil dari basis data *Federation of Digital Seismograph Network Web Service* (FDSNWS) internasional. Setelah mendapatkan input data, dilakukan pemodelan menggunakan fungsi Green untuk menghasilkan solusi *moment tensor*. Selanjutnya, dilakukan proses inversi secara komputasi dan *plotting* hasil inversi, termasuk peta CMT, *strike*, *dip*, *rake*, dan *beachball*.



Gambar 3. Diagram alir justifikasi solusi CMT

Evaluasi akurasi solusi CMT Joko Tingkir dilakukan melalui komparasi dengan Global CMT menggunakan sudut Kagan dan statistika inferensial. Sudut Kagan menilai perbedaan orientasi mekanisme gempa; nilai $< 60^\circ$ menunjukkan kesesuaian tinggi, sedangkan $> 60^\circ$ menunjukkan akurasi rendah. Analisis statistik menggunakan Paired Sample T-test untuk membandingkan rata-rata parameter CMT dengan asumsi distribusi normal. Jika asumsi tidak terpenuhi atau terdapat outlier, digunakan Wilcoxon Signed Rank Test sebagai alternatif non-parametrik. Uji ini menilai perbedaan pasangan data berdasarkan urutan dan arah selisihnya. P-value $< \alpha$ menunjukkan perbedaan signifikan antara solusi Joko Tingkir dan Global CMT.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan sudut Kagan dilakukan secara komputasi dengan MATLAB online dan script R untuk memperoleh deviasi orientasi antara dua solusi mekanisme gempa. Visualisasi beachball menunjukkan orientasi mekanisme gempa dalam empat kemungkinan rotasi, dan sudut rotasi terkecil dipakai sebagai indikator kesamaan. Nilai sudut Kagan tiap kejadian gempa ditampilkan pada **Tabel 1**.

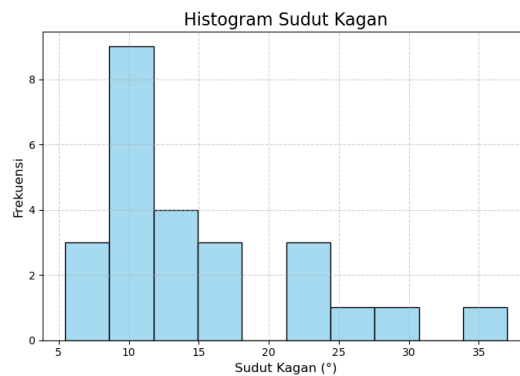
Tabel 1. Perbandingan diagram beachball setiap event gempa bumi yang diperoleh dari software Joko Tingkir dan GCMT beserta sudut kagan

No.	Tanggal	Joko Tingkir	GCMT	Lokasi	Tipe Patahan	Sudut Kagan ($^\circ$)
1.	04/12/2021			Maluku Utara	<i>Oblique Reverse</i>	5,44
2.	14/10/2021			Maluku Utara	<i>Thrust Fault</i>	5,61
3.	06/09/2020			Maluku Utara	<i>Thrust Fault</i>	6,06
4.	02/08/2021			Maluku Utara	<i>Oblique Reverse</i>	8,70
5.	04/06/2020			Maluku Utara	<i>Strike Slip</i>	8,84
6.	14/08/2022			Maluku Utara	<i>Thrust Fault</i>	11,49
7.	05/04/2022			Maluku Utara	<i>Strike Slip</i>	11,71
8.	05/04/2020			Maluku Utara	<i>Thrust Fault</i>	14,64
9.	11/10/2021			Maluku Utara	<i>Thrust Fault</i>	16,40
10.	15/04/2020			Maluku Utara	<i>Strike Slip</i>	22,36

11.	10/07/2021			Maluku Utara	<i>Thrust Fault</i>	24,87
12.	06/05/2020			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	8,60
13.	09/06/2020			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	8,60
14.	05/05/2024			Maluku Selatan	<i>Thrust Fault</i>	8,60
15.	26/02/2020			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	8,86
16.	04/11/2021			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	9,44
17.	16/06/2021			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	11,97
18.	02/11/2021			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	12,96
19.	01/11/2020			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	14,33
20.	14/11/2023			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	15,72
21.	17/09/2020			Maluku Selatan	<i>Oblique Reverse</i>	16,43
22.	29/12/2021			Maluku Selatan	<i>Thrust Fault</i>	22,85
23.	08/09/2020			Maluku Selatan	<i>Oblique Reverse</i>	23,25
24.	08/11/2023			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	30,25
25.	10/11/2023			Maluku Selatan	<i>Strike Slip</i>	37,03

Merujuk pada Tabel 1, wilayah penelitian diklasifikasikan menjadi dua zona utama untuk mempermudah analisis lanjutan, yaitu Kepulauan Maluku bagian utara dan selatan. Data dalam masing-

masing wilayah diurutkan berdasarkan nilai sudut Kagan dari yang terkecil hingga terbesar. Pada zona utara, tercatat 11 kejadian gempa bumi dengan nilai sudut Kagan berkisar antara $5,44^\circ$ hingga $24,87^\circ$. Sementara itu, zona selatan mencatat 13 kejadian gempa dengan rentang sudut Kagan yang lebih lebar yaitu antara $8,60^\circ$ hingga $37,03^\circ$.



Gambar 4. Histogram Sudut Kagan

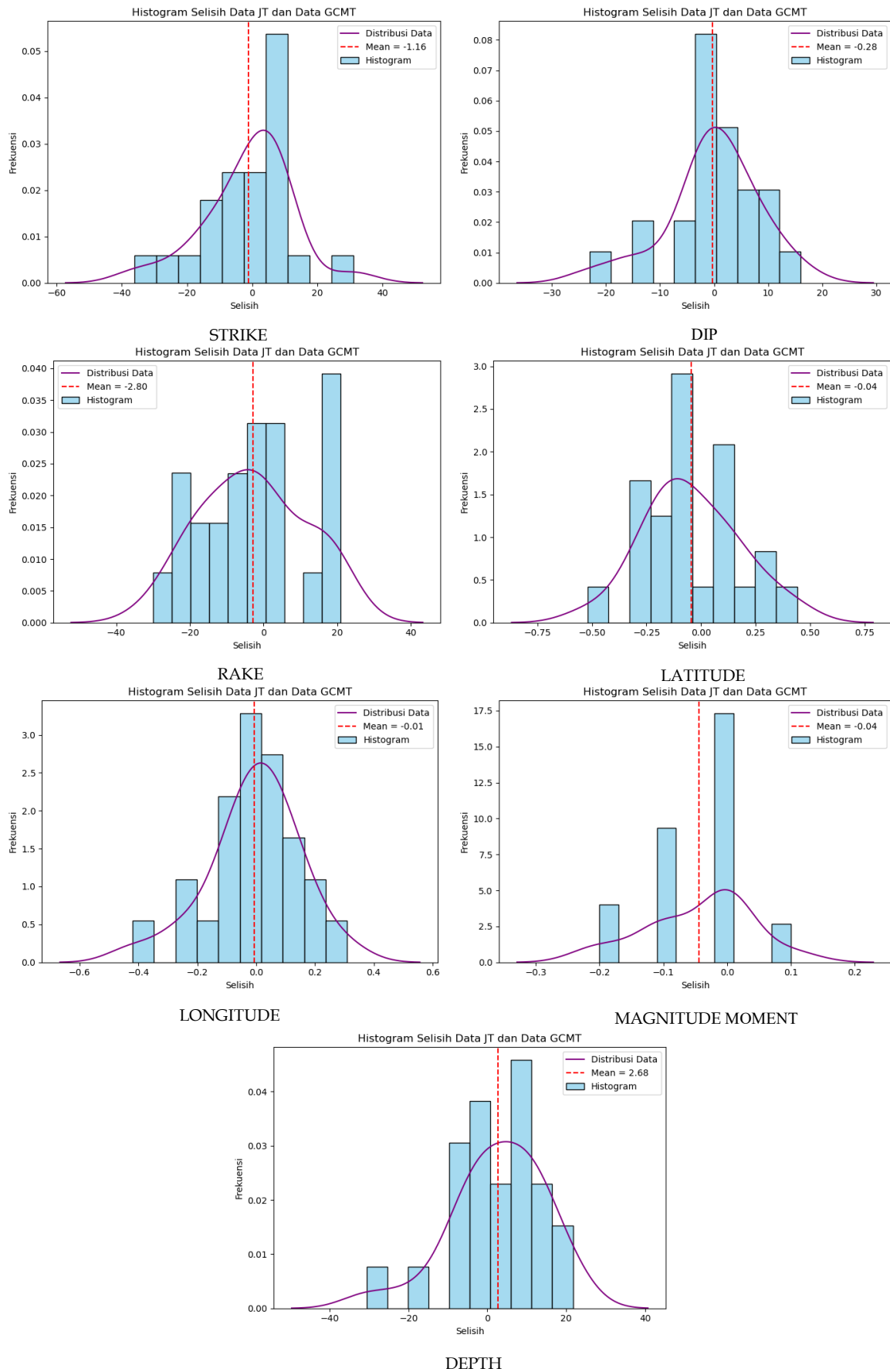
Histogram pada **Gambar 4.** menunjukkan bahwa nilai sudut Kagan sebagian besar terdistribusi pada rentang $5,5^\circ$ – $16,5^\circ$ dengan puncak frekuensi antara $8,5^\circ$ – 13° yang mencakup sekitar 64% data. Rentang ini mencerminkan kesesuaian orientasi mekanisme fokal yang sangat baik antara solusi CMT *Joko Tingkir* dan GCMT. Sementara itu, sekitar 36% data memiliki sudut Kagan antara 22° – $37,5^\circ$, dikategorikan sebagai kualitas cukup baik, yang menunjukkan adanya deviasi orientasi pada beberapa kejadian gempa. Perbedaan ini dipengaruhi oleh karakteristik sumber data: *Joko Tingkir* menggunakan data regional dengan resolusi spasial tinggi namun sensitif terhadap struktur geologi lokal, sedangkan GCMT berbasis teleseismik yang lebih stabil terhadap gangguan lokal namun kurang sensitif terhadap gempa kecil. Faktor lain seperti distribusi stasiun dan dominasi jenis gelombang juga memengaruhi hasil inversi. Meski terdapat nilai sudut yang relatif besar, seluruh data tetap berada di bawah ambang 60° sehingga solusi dari *Joko Tingkir* tetap valid dan secara umum selaras dengan data GCMT (Pondrelli *et al.*, 2006).

Distribusi residual parameter CMT antara data *Joko Tingkir* dan GCMT divisualisasikan menggunakan histogram yang dilengkapi kurva KDE untuk menilai tingkat kesesuaian pola persebaran keduanya secara lebih detail. Parameter orientasi sesar – strike, dip, dan rake – umumnya menunjukkan selisih rata-rata yang rendah, meskipun rake tampak memiliki variasi yang sedikit lebih besar dibanding dua parameter lainnya. Parameter lokasi (latitude–longitude) memperlihatkan deviasi yang sangat kecil dan relatif stabil, sedangkan magnitudo momen tetap konsisten dengan perbedaan rata-rata yang minimal. Pada parameter kedalaman, terlihat adanya bias kecil menuju nilai yang lebih besar pada data JT, disertai beberapa outlier yang memengaruhi bentuk distribusinya dan membuatnya sedikit lebih menyebar. Meskipun demikian, secara keseluruhan pola distribusi residual dari seluruh parameter menunjukkan tingkat kecocokan yang baik antara data JT dan GCMT, dengan selisih yang umumnya kecil dan masih berada dalam batas toleransi ilmiah yang dapat diterima.

Untuk evaluasi lebih lanjut dari analisis visual tersebut, dilakukan perhitungan statistik dengan uji Saphiro-Wilk. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i X_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

dengan x_i terdiri dari data yang diurutkan dari nilai terkecil hingga terbesar, a_i merupakan konstanta dari matriks kovarians distribusi normal dan $\bar{x}$ mewakili rata-rata sampel. Hasil perhitungan uji normalitas disajikan dalam **Tabel 2**:



Gambar 5. Histogram Selisih data JT dan GCMT Setiap Parameter CMT

Tabel 2. Nilai signifikansi Saphiro-Wilk untuk tiap parameter Centroid Moment Tensor (CMT) beserta tipe distribusi data

Parameter	<i>P-value</i> Normalitas ($\alpha = 0,05$)	Distribusi	Uji Lanjutan
<i>Strike</i>	0,091	Normal	Parametrik
<i>Dip</i>	0,181	Normal	Parametrik
<i>Rake</i>	0,356	Normal	Parametrik
<i>Latitude</i>	0,962	Normal	Parametrik
<i>Longitude</i>	0,601	Normal	Parametrik
M_w	0,001	Tidak Normal	Non-Parametrik
<i>Depth</i>	0,310	Normal	Parametrik

Berdasarkan Tabel 2, hasil uji Shapiro-Wilk menunjukkan bahwa enam parameter CMT meliputi *Strike*, *Dip*, *Rake*, *Latitude*, *Longitude* dan *Depth* memiliki *p-value* > 0,05 sehingga dianggap berdistribusi normal. Dengan demikian, analisis lanjutan terhadap parameter-parameter ini dapat menggunakan metode parametrik seperti *paired sample t-test*. Sebaliknya, parameter Magnitudo (M_w) memiliki *p-value* jauh di bawah batas 0,05 yang menandakan penyimpangan dari distribusi normal. Oleh karena itu, analisis untuk M_w dilakukan menggunakan metode non-parametrik *Wilcoxon Signed-Rank Test* yang tidak mensyaratkan distribusi normal.

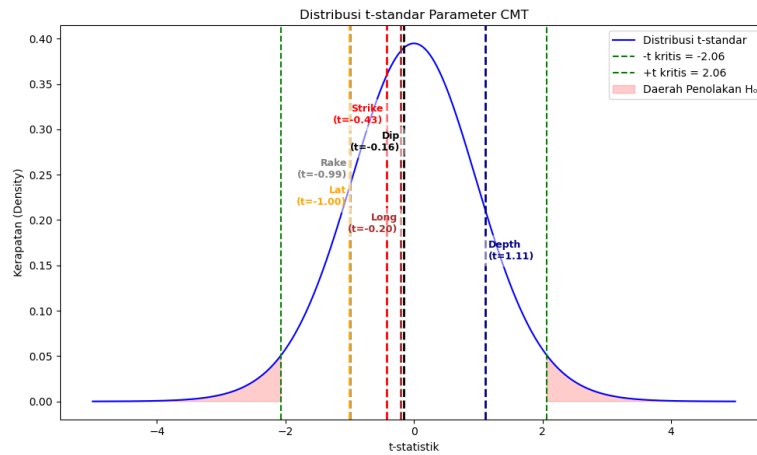
Setelah diperoleh hasil uji normalitas, analisis dilanjutkan dengan perhitungan nilai t-statistik terhadap parameter-parameter yang menunjukkan distribusi normal melalui penerapan uji parametrik: *paired sample t-test*. Hasil perhitungan uji parametrik: *paired sample t-test* disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 3. Nilai t-statistik dan *p-value* tiap parameter Centroid Moment Tensor (CMT) beserta kategori hipotesis

Parameter	T-stat	<i>P-value</i> ($\alpha = 0,05$)	Kesimpulan
<i>Strike</i>	-0,431	0,679	H_0
<i>Dip</i>	-0,164	0,871	H_0
<i>Rake</i>	-0,991	0,331	H_0
<i>Latitude</i>	-1,003	0,326	H_0
<i>Longitude</i>	-0,205	0,840	H_0
<i>Depth</i>	1,109	0,278	H_0

Berdasarkan hasil uji *paired sample t-test*, keenam parameter CMT menunjukkan nilai *p-value* yang berada di atas tingkat signifikansi 0,05 atau 5% . Oleh karena itu, hipotesis nol (H_0) diterima yang menyatakan bahwa kedua kelompok data memiliki rata-rata yang setara. Selanjutnya, nilai *t-statistik* yang dihasilkan dari masing-masing parameter dipetakan ke dalam grafik distribusi *t* untuk memvisualisasikan posisi relatifnya terhadap kurva distribusi dan mendukung interpretasi hasil analisis.

Ditinjau dari Gambar 6, dengan derajat kebebasan sebesar $df = 24$ seluruh nilai t-statistik untuk keenam parameter berada di dalam rentang non-signifikan yaitu antara -2,06 hingga 2,06. Nilai t-statistik tertinggi dimiliki oleh parameter *depth* ($t = 1,11$), diikuti oleh *latitude* ($t = -1,00$) dan *rake* ($t = -0,99$). Parameter *strike* ($t = -0,43$), *dip* ($t = -0,16$), dan *longitude* ($t = -0,20$) menunjukkan nilai *t* yang mendekati nilai nol, hal ini berarti rata-rata perbedaan antara data JT dan GCMT untuk parameter-parameter tersebut sangat kecil dan tidak signifikan secara statistik. Secara keseluruhan, tidak ada satu pun parameter CMT yang memasuki wilayah penolakan hipotesis nol, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara data JT dan GCMT pada semua parameter yang diuji. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua sumber data memberikan hasil yang sangat konsisten dan homogen dalam estimasi parameter mekanisme sumber gempa.



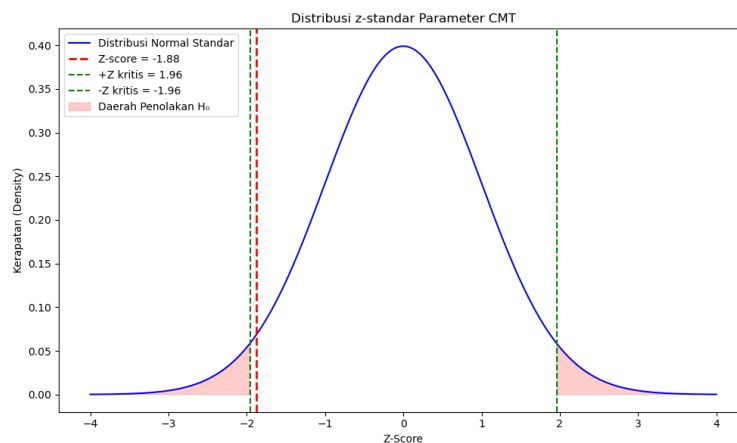
Gambar 6. Grafik Distribusi t-standar Parameter CMT

Tahapan lanjutan terhadap parameter yang tidak berdistribusi normal, dilakukan dengan perhitungan nilai w-statistik menggunakan uji non-parametrik: *Wilcoxon signed rank test* guna mengevaluasi perbedaan pasangan data secara lebih tepat tanpa mengandalkan asumsi normalitas. Hasil perhitungan uji non-parametrik disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4. Nilai w-statistik, z-score dan p-value tiap parameter Centroid Moment Tensor (CMT) beserta kategori hipotesis

Parameter	W-stat	Z-score	P-value ($\alpha = 0,05$)	Kesimpulan
M_w	15,000	-1,883	0,064	H_0

Hasil uji *Wilcoxon Signed-Rank Test* terhadap parameter M_w menunjukkan p-value sebesar 0,064 yang lebih tinggi dari tingkat signifikansi 5%. Dengan demikian, tidak ada cukup bukti untuk menolak hipotesis nol (H_0) sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua kelompok data. Nilai z-score yang diperoleh kemudian dipetakan ke dalam kurva distribusi normal (z-standar) untuk menggambarkan letak relatif hasil uji dalam konteks distribusi dan memperkuat pemahaman terhadap hasil analisis.

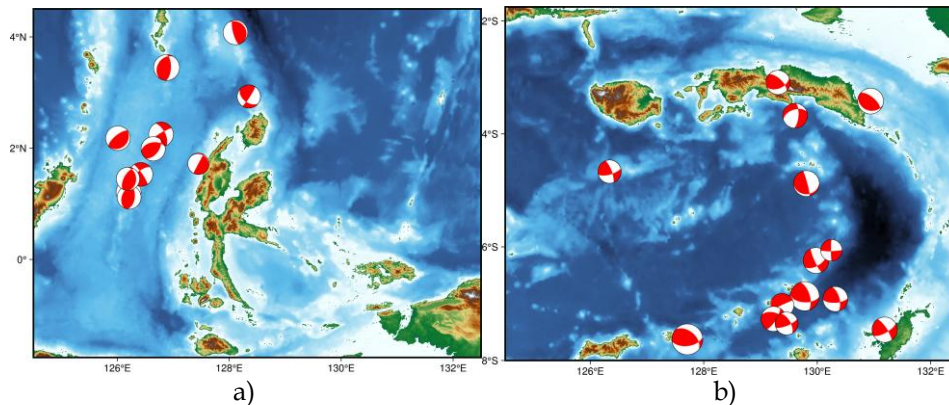


Gambar 7. Grafik Distribusi z-standar Parameter CMT

Gambar 7 menampilkan distribusi z-standar untuk parameter M_w dengan batas kritis $\pm 1,96$ ($\alpha = 0,05$). z-score hasil uji sebesar -1,88 masih berada dalam rentang wilayah penerimaan hipotesis nol (H_0) diterima yang berarti tidak terdapat perbedaan signifikan antara estimasi M_w dari Joko Tingkir dan GCMT. Meskipun

z-score memiliki nilai negatif dan mengindikasikan bahwa rata-rata M_w JT sedikit lebih kecil, deviasi ini sangat kecil dan tidak signifikan secara statistik maupun praktis. Hasil ini konsisten dengan histogram yang menunjukkan kesesuaian tinggi antara kedua sumber data.

Analisis jenis patahan di Kepulauan Maluku dilakukan melalui interpretasi simbol *beachball* dari data mekanisme sumber gempa, yang merepresentasikan tiga tipe utama: thrust, normal, dan strike-slip. Berikut menunjukkan distribusi *beachball* di dua zona utama: Kepulauan Maluku bagian utara dan selatan.



Gambar 8. Peta Diagram beachball di wilayah Kepulauan Maluku a) bagian Utara b) bagian Selatan

Pada bagian utara, mayoritas gempa menunjukkan mekanisme *thrust* (6 kejadian) yang disebabkan oleh interaksi kompleks antara busur Sangihe dan Halmahera (Katili, 1975; Yuliatmoko & Kurniawan, 2019). Tiga gempa lainnya memiliki karakteristik *strike-slip* dan berkaitan dengan struktur aktif seperti zona transfer Morotai Through dan Snellius Ridge (Masinu *et al.*, 2018; Patria, 2022). Selain itu, terdapat dua gempa *oblique reverse* yang mencerminkan konvergensi miring antara Lempeng Laut Filipina dan Eurasia (Fan & Zhao, 2018; Chen *et al.*, 2020). Sementara itu, wilayah Maluku bagian selatan didominasi oleh mekanisme *strike-slip* (10 kejadian), yang terkait dengan sistem sesar aktif seperti Kawa dan Banda *Detachment* (Pownall *et al.*, 2016; Baillie *et al.*, 2020). Banda Detasemen sendiri merupakan sesar normal yang memfasilitasi ekstensi akibat *rollback slab* Banda. Namun, dua gempa *oblique reverse* di sekitar zona ini mengindikasikan deformasi campuran akibat pengaruh konvergensi dan pergeseran lateral (Patria & Hall, 2018). Selain itu, dua gempa dengan mekanisme *thrust* tercatat di sekitar Pulau Seram, menandakan masih aktifnya proses penunjaman Lempeng Banda di zona *Outer Banda Arc* (Patria *et al.*, 2021). Mekanisme ini menunjukkan bahwa gaya kompresi dari konvergensi Lempeng Australia dan Eurasia tetap dominan di zona transisi busur-benua. Secara keseluruhan, keberagaman mekanisme gempa mencerminkan kompleksitas tektonik Maluku yang dikontrol oleh interaksi sesar aktif, mikroblok, dan batas lempeng yang saling berkonvergensi.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Seluruh 25 pasangan data antara hasil inversi Joko Tingkir dan GCMT menunjukkan nilai sudut Kagan $< 60^\circ$ (5° – $37,5^\circ$), menandakan kesamaan orientasi bidang sesar dan tingkat akurasi tinggi dari solusi Joko Tingkir. Hal ini diperkuat oleh uji statistik inferensial, termasuk uji normalitas, *paired sample t-test*, dan *Wilcoxon signed rank test* yang secara keseluruhan menunjukkan distribusi residual yang simetris, selisih rata-rata kecil, serta tidak adanya perbedaan signifikan antara kedua solusi. Visualisasi *beachball* menunjukkan variasi mekanisme gempa yang kompleks di Kepulauan Maluku. Di utara, dominasi sesar naik mencerminkan konvergensi busur Sangihe–Halmahera, sedangkan di selatan dominan sesar mendatar akibat pengaruh Banda *Detachment* dan Sesar Kawa. Mekanisme *oblique* dan *thrust* di beberapa lokasi seperti Pulau Seram dan *Outer Banda Arc* menunjukkan deformasi gabungan antara gaya ekstensi, kompresi, dan geser mengindikasikan kompleksitas tektonik tinggi akibat interaksi multipel lempeng dan struktur aktif di wilayah ini.

B. Saran

Disarankan agar pengembangan *software* Joko Tingkir terus dilanjutkan, terutama dalam peningkatan akurasi algoritma inversi dan visualisasi hasil mekanisme sumber gempa. Perluasan cakupan data uji dari berbagai zona tektonik juga sangat dianjurkan untuk memperkuat validitas dan generalisasi performa perangkat lunak, mengingat masih terdapat gempa dalam katalog GCMT yang belum terakomodasi. Penambahan data dari wilayah tektonik yang beragam akan memperkaya proses validasi serta memberikan representasi yang lebih komprehensif terhadap kapabilitas perangkat lunak dalam menangani variasi karakteristik sumber gempa.

DAFTAR PUSTAKA

- Baillie, P., Keep, M., Martinez Duran, P., Carrillo, E., & Duval, G. (2020). Broadband seismic imaging around the Banda Arc: Changes in the anatomy of offshore fold-and-thrust belts. *Geological Society Special Publication*, 490(1), 351–360. Geological Society of London.
- Chen, P. F., Chien, M., Bina, C. R., Yen, H. Y., & Antonio Olavere, E. (2020). Evidence of an east-dipping slab beneath the southern end of the Philippine Trench (1°N–6°N) as revealed by ISC-EHB. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 4, 100034.
- Fan, J., & Zhao, D. (2018). Evolution of the southern segment of the Philippine Trench: Constraints from seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(11), 4612–4627.
- Gio, P. U., & Suyanto. (2017). *Statistika nonparametrik dengan SPSS, Minitab, dan R*. USU Press.
- 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>
- Jian, P. R., Tseng, T. L., Liang, W. T., & Huang, P. H. (2018). A new automatic full-waveform regional moment tensor inversion: Algorithm and its applications in the Taiwan area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 573–587.
- 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>
- Katili, J. A. (1975). Volcanism and plate tectonics in the Indonesian island arcs. *Tectonophysics*, 26, 165–188.
- Masinu, A. La, Yustesia, A., & Suwardi, S. (2018). Sistem tektonik dan implikasinya terhadap gempa bumi di Pulau Halmahera. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 23(1), 20–29.
- Mishra, P., Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P., & Pandey, G. (2019). Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407–411.
- Murjaya, J. (2023). *Seismotektonik wilayah Indonesia timur: The seismotectonic of Eastern Indonesia region* (Vol. 4, Issue 3).
- 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.
- Patria, A. (2022). *Earthquake geology of the large left-lateral strike-slip fault system at the Pacific and Australian plate margin, Eastern Indonesia*.
- Patria, A., & Hall, R. (2018). Oblique intraplate convergence of the Seram Trough, Indonesia (Konvergensi intra-lempeng miring Palung Seram Indonesia). *Bulletin of the Marine Geology*, 33(1).
- Patria, A., Tsutsumi, H., & Natawidjaja, D. H. (2021). Active fault mapping in the onshore northern Banda Arc, Indonesia: Implications for active tectonics and seismic potential. *Journal of Asian Earth Sciences*, 218, 104881.
- Pondrelli, S., Salimbeni, S., Ekström, G., Morelli, A., Gasperini, P., & Vannucci, G. (2006). The Italian CMT dataset from 1977 to the present. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159(3–4), 286–303.
- Pownall, J. M., Hall, R., & Lister, G. S. (2016). Rolling open Earth's deepest forearc basin. *Geology*, 44(11), 947–950.
- 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., & 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.
- Triantafyllis, N., Sokos, E., Ilias, A., & Zahradnik, J. (2016). Scisola: Automatic moment tensor solution for SeisComp3. *Seismological Research Letters*, 87(1), 157–163.
- 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 2021*.
- 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.
- Yuliatmoko, R. S., & Kurniawan, T. (2019). Analysis of stress drop variations in fault and subduction zones of Maluku and Halmahera earthquakes in 2019. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 9(2), 132–142.