

*Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 13 Nomor 3 Tahun 2024, hal 7- 17*

## ANALISIS KEAKURATAN *CENTROID MOMENT TENSOR* (CMT) PADA SOFTWARE JOKO TINGKIR UNTUK WILAYAH LAUT BANDA MENGUNAKAN METODE RMSE DAN SUDUT KAGAN

<sup>1)</sup>Safirda Adini Rahmatsyah Putri, <sup>2)</sup>Muhammad Nurul Fahmi, <sup>3)</sup>Madlazim

<sup>1)</sup> Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: safirda.20009@mhs.unesa.ac.id

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

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

### Abstrak

Laut Banda memiliki tingkat seismisitas tinggi karena terletak pada zona subduksi yang dikenal sebagai Busur Banda dengan geometri berbentuk cekungan terbuka 180° ke arah barat. Salah satu informasi gempa bumi berupa parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT) *real-time* dan otomatis pada kejadian gempa bumi di Indonesia disajikan oleh *software* Joko Tingkir dengan kualitas data yang tidak dapat dipastikan sehingga perlu dilakukan justifikasi agar dapat dipercaya oleh masyarakat. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis tipe patahan penyebab gempa bumi berdasarkan *beachball* serta justifikasi solusi CMT pada *software* Joko Tingkir dengan perbandingan terhadap *GlobalCMT* menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) dan sudut Kagan. Berdasarkan peta *beachball* di wilayah Laut Banda, dapat diketahui bahwa Laut Banda memiliki patahan tipe oblique berbentuk cekungan terbuka ke arah barat di daerah sekitar Detasemen Banda, patahan tipe reverse di palung Seram, serta gunung api dasar laut di daerah busur dalam. Justifikasi menghasilkan nilai RMSE 0,09 untuk *latitude*; 0,17 untuk *longitude*; 4,20 untuk *origin time*; 0,12 untuk  $M_w$ ; 12,43 untuk *depth*; 5,82 untuk *strike*; 7,32 untuk *dip*; dan 10,90 untuk *rake*. Sedangkan metode sudut Kagan diperoleh nilai rata-rata 11,89° untuk parameter *strike*, *dip*, dan *rake*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa solusi CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir untuk wilayah Laut Banda memiliki tingkat keakuratan yang tinggi.

**Kata Kunci:** *Centroid Moment Tensor* (CMT), *Software* Joko Tingkir, Laut Banda, *Root Mean Square Error* (RMSE), sudut Kagan.

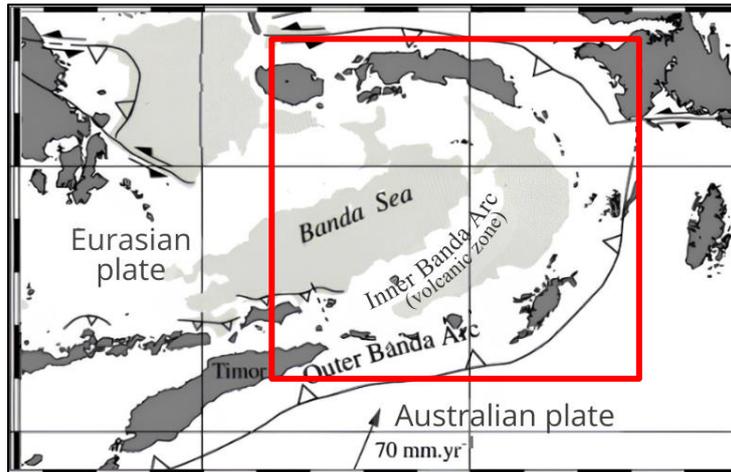
### Abstract

The Banda Sea has a high level of seismicity because it is in a subduction zone known as the Banda Arc with a geometry in the form of a basin open 180° to the west. One of the earthquake types of information in the form of real-time and automatic *Centroid Moment Tensor* (CMT) parameters on earthquake events in Indonesia is presented by Joko Tingkir software with data quality that cannot be ascertained so that it needs to be justified so that it can be trusted by the public. This research was accomplished by analyzing the type of fault that causes earthquakes based on *beachball* and justifying the CMT solution in Joko Tingkir software by comparison with *GlobalCMT* using the *Root Mean Square Error* (RMSE) method and Kagan angle. Based on the *beachball* map in the Banda Sea region, the Banda Sea has oblique-type faults in the form of open basins to the west in the area around the Banda Detachment, reverse-type faults in the Seram trough, and seafloor volcanoes in the deep arc area. Justification resulted in RMSE values of 0.09 for *latitude*; 0.17 for *longitude*; 4.20 for *origin time*; 0.12 for  $M_w$ ; 12.43 for *depth*; 5.82 for *strike*; 7.32 for *dip*; and 10.90 for *rake*. While the Kagan angle method obtained an average value of 11.89° for *strike*, *dip*, and *rake* parameters. So, it can be concluded that the real-time and automatic CMT solution in Joko Tingkir software for the Banda Sea region has a high level of accuracy.

**Keywords:** *Centroid Moment Tensor* (CMT), a *Joko Tingkir Software*, Banda Sea, *Root Mean Square Error* (RMSE), Kagan angle.

## I. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan dengan aktivitas tektonik yang tinggi (Fidia *et al.*, 2018; Hutchings and Mooney, 2021; Taruna *et al.*, 2022; Mahmudah and Supardi, 2023) karena interaksi dari tiga Lempeng tektonik utama di dunia (*mega triple junction*) yang membentuk zona subduksi (Murjaya, 2023). Aktivitas tektonik tersebut didominasi oleh pergerakan relatif dari Lempeng Samudra Pasifik ke arah barat, Lempeng Australia ke arah utara, dan Lempeng Eurasia ke arah tenggara (Wiratama *et al.*, 2020). Interaksi Lempeng Australia dan Lempeng Pasifik terjadi di zona Laut Banda sehingga menyebabkan kompleksitas geologi regional sebagai faktor dominan terhadap kejadian gempa bumi tektonik yang berpotensi tsunami (Harjono, 2017; Patria *et al.*, 2021; Murjaya, 2023).



**Gambar 1.** Peta model seismisitas Laut Banda dengan daerah penelitian yang dibatasi oleh garis berwarna merah (Ngadmanto, 2010).

Daerah Laut Banda memiliki salah satu zona subduksi yang dikenal sebagai Busur Banda dengan geometri berbentuk lintasan menyerupai cekungan terbuka  $180^\circ$  ke arah barat (Patria *et al.*, 2021; Baskara *et al.*, 2023). Busur Banda memiliki dua komponen utama yaitu busur dalam dan busur luar. Rangkaian gunung api aktif bawah laut dan patahan sudut rendah yang dikenal sebagai Detasemen Banda terletak di area busur dalam. Di sekitar Detasemen Banda terdapat tebing bawah laut yang dapat runtuh akibat aktivitas tektonik di sepanjang patahan dan dapat memicu terjadinya bencana tsunami. Sedangkan busur luar terdiri dari Palung Seram, Palung Aru, dan Palung Tanimbar (Cummins *et al.*, 2020; Murjaya, 2023).

Salah satu informasi gempa bumi yang perlu diketahui oleh masyarakat secara cepat dan akurat sebagai upaya mitigasi bencana adalah parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT). Parameter CMT dapat digunakan untuk memperkirakan mekanisme sumber gempa bumi berdasarkan data gelombang seismik yang terekam dari beberapa stasiun seismik di sekitar titik gempa bumi (Triantafyllis *et al.*, 2021). Hasil inversi solusi CMT dapat dikategorikan reliabel jika stasiun seismik yang digunakan terletak pada empat kuadran di sekitar lokasi gempa bumi dan memiliki nilai *Variance Reduction* (VR) lebih dari 50% (Vackář *et al.*, 2017). Solusi CMT dapat diperoleh melalui penentuan inversi secara manual dan otomatis.

Menurut Sokos and Zahradnik (2008), penentuan solusi CMT dapat dilakukan secara manual menggunakan algoritma ISOLA. Pada tahun 2016, Triantafyllis *et al.* mengembangkan algoritma ISOLA menjadi algoritma Scisola untuk penentuan CMT otomatis dengan waktu perhitungan sekitar 5-10 menit bergantung pada kualitas data yang diterima. Kemudian pada tahun 2021, Triantafyllis *et al.* menyatakan bahwa solusi CMT dapat diperoleh secara *real-time* dan otomatis menggunakan algoritma Gisola yang merupakan perkembangan dari Scisola dengan waktu perhitungan lebih cepat yaitu  $\pm 3,5$  menit. Penerapan algoritma Gisola dalam penentuan CMT *real-time* dan otomatis pada kejadian gempa bumi di Indonesia disajikan oleh *software* Joko Tingkir dengan kualitas data yang tidak dapat dipastikan (Madlazim *et al.*, 2024). Oleh karena itu, perlu dilakukan justifikasi agar masyarakat dapat mempercayai *software* Joko Tingkir untuk memperoleh informasi terkait parameter gempa bumi secara cepat dan akurat.

Penelitian terdahulu oleh Franco *et al.* (2020) terkait analisis keakuratan solusi CMT otomatis regional di Mexico menggunakan metode *Time Domain Moment Tensor* dengan membandingkan terhadap data solusi

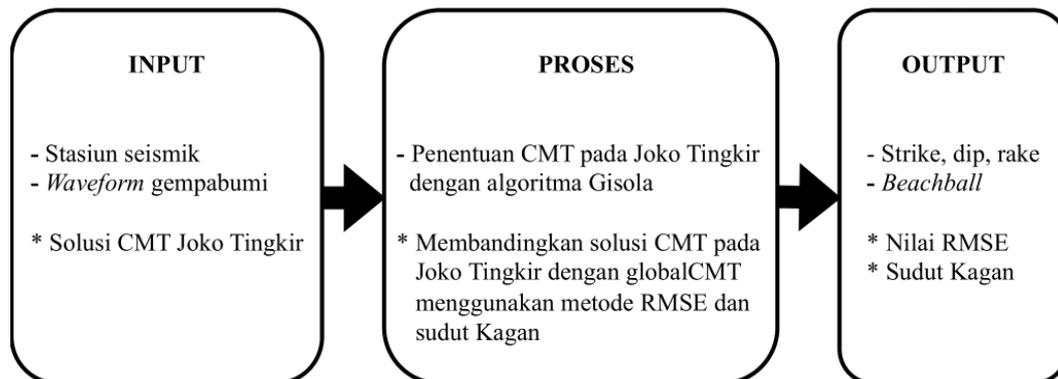
CMT pada situs web GlobalCMT menggunakan metode regresi linear dan sudut Kagan. Berdasarkan penelitian tersebut solusi CMT otomatis yang dihasilkan memiliki akurasi yang cukup tinggi, namun perlu dilakukan filter terhadap data yang digunakan. Regresi linear merupakan salah satu perhitungan statistik yang digunakan untuk memodelkan akurasi data yang dapat didukung dengan perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE) (Vermaysha and Nurmalitasari *et al.*, 2023). Sedangkan metode sudut Kagan digunakan untuk memperoleh sebuah sudut yang merepresentasikan selisih minimum nilai *strike*, *dip*, dan *rake* dari satu solusi moment tensor terhadap solusi moment tensor lain (Kagan, 1991).

Berdasarkan latar belakang tersebut, justifikasi solusi 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 dilakukan menggunakan data sekunder dari *software* Joko Tingkir melalui link <https://joko.tingkir.unesa.ac.id/> berupa parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT) *real-time* dan otomatis dari kejadian gempa bumi di Laut Banda dengan batas wilayah 125,15 °BT-133,48 °BT dan 2,32 °LS-9,49 °LS selama tahun 2019-2023 dengan  $M_w \geq 5$ . Parameter tersebut terdiri dari *longitude*, *latitude*, *origin time*,  $M_w$ , *depth*, *strike*, *dip* dan *rake* yang diperoleh menggunakan algoritma Gisola dengan input data berupa stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen dari basis data *international Federation of Digital Seismograph Network Web Service* (FDSNWS). Solusi CMT dari Joko Tingkir kemudian dilakukan justifikasi dengan perbandingan terhadap data tele-seismik pada GlobalCMT (Ekström *et al.*, 2012) menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) dan sudut Kagan. Hasil dari penelitian ini berupa tingkat keakuratan solusi CMT pada *software* Joko Tingkir yang direpresentasikan dari nilai RMSE dan sudut Kagan yang telah diperoleh dari perhitungan.



**Gambar 2.** Rancangan penelitian analisis keakuratan pada *software* Joko Tingkir untuk wilayah Laut Banda menggunakan metode RMSE dan sudut Kagan.

### B. Instrumen Penelitian

Penelitian ini dibantu dengan beberapa instrumen yang terdiri dari perangkat lunak atau *software*. Perangkat lunak yang digunakan adalah algoritma Gisola yang terimplementasi pada *software* Joko Tingkir. *Software* Joko Tingkir digunakan untuk memperoleh data sekunder terkait solusi CMT *real-time* dan otomatis yang kemudian dilakukan analisis keakuratan melalui perbandingan dengan situs web GlobalCMT. Analisis keakuratan dilakukan menggunakan aplikasi Google collab berbahasa Python untuk metode RMSE, dan *software* MATLAB R2018a untuk metode sudut Kagan.

### C. Variabel Operasional Penelitian

Variabel pada penelitian ini terdiri dari variabel manipulasi, variabel kontrol, dan variabel respon. Penelitian ini menggunakan variabel manipulasi diantaranya adalah stasiun seismik dan pita frekuensi *waveform*. Penelitian ini dilakukan dengan mengeliminasi stasiun seismik dengan *Variance Reduction* (VR) rendah serta mengatur pita frekuensi *waveform* yang sesuai dengan besarnya skala kekuatan gempa bumi. Disamping itu, variabel kontrol pada penelitian ini menggunakan 14 kejadian gempa bumi dengan  $M_w$  di atas 5 yang terjadi pada tahun 2019–2023 di Laut Banda dengan batas wilayah 125,15 °BT–133,48 °BT dan 2,32 °LS–9,49 °LS. Sedangkan variabel respon pada penelitian ini yaitu parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT)

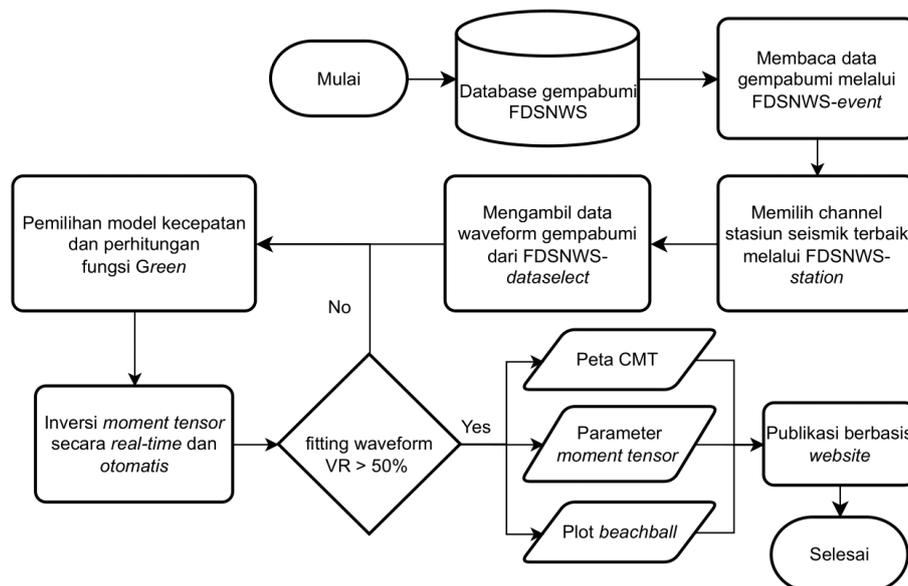
yang terdiri dari *strike*, *dip*, *rake*, dan *beachball*, tipe patahan di wilayah Laut Banda berdasarkan *beachball* yang disajikan pada Joko Tingkir serta keakuratan parameter CMT pada *software* Joko Tingkir berupa nilai RMSE dan sudut Kagan.

#### D. Teknik Pengumpulan Data

Langkah pertama yang dilakukan pada tahap pengumpulan data adalah dengan mengambil data sekunder terkait parameter CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir melalui link: <https://jokotingkir.unesa.ac.id/>. Data parameter CMT yang digunakan terdiri dari *longitude*, *latitude*, *origin time*,  $M_w$ , *depth*, *strike*, *dip* dan *rake* pada kejadian gempa bumi di Laut Banda tahun 2019-2023 dengan  $M_w \geq 5$ . Solusi CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir diperoleh melalui algoritma komputasi tingkat tinggi bernama Gisola dengan input data berupa stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen. Input data tersebut diperoleh dari database *international Federation of Digital Seismograph Network Web Service* (FDSNWS) (Triantafyllis *et al.*, 2021). Data solusi CMT pada *software* Joko Tingkir diperoleh dengan mengatur tahun yang akan ditampilkan, lalu menggeser peta hingga menampilkan wilayah Laut Banda. Apabila terdapat *beachball* pada gambar peta di daerah Laut Banda, maka langkah selanjutnya adalah menekan *beachball* tersebut dan melakukan klik pada bagian '*click here*' untuk menampilkan solusi CMT pada kejadian gempa bumi tersebut sehingga data bisa diambil.

#### E. Teknik Pengolahan Data

Pada penelitian ini, teknik pengolahan data dibagi menjadi dua tahapan. Tahap pertama adalah penentuan solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) pada *software* Joko Tingkir. Selanjutnya adalah tahap kedua yaitu melakukan justifikasi terhadap solusi CMT pada *software* Joko Tingkir. Penentuan solusi CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir diperoleh melalui algoritma Gisola dengan input data berupa stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen yang berasal dari database *international Federation of Digital Seismograph Network Web Service* (FDSNWS). Kemudian dilakukan perhitungan fungsi Green sebagai pemodelan kedepan terhadap solusi moment tensor. Selanjutnya adalah penentuan inversi secara komputasi dan plotting hasil inversi; peta CMT, *strike*, *dip*, *rake*, dan *beachball* (Triantafyllis *et al.*, 2021)

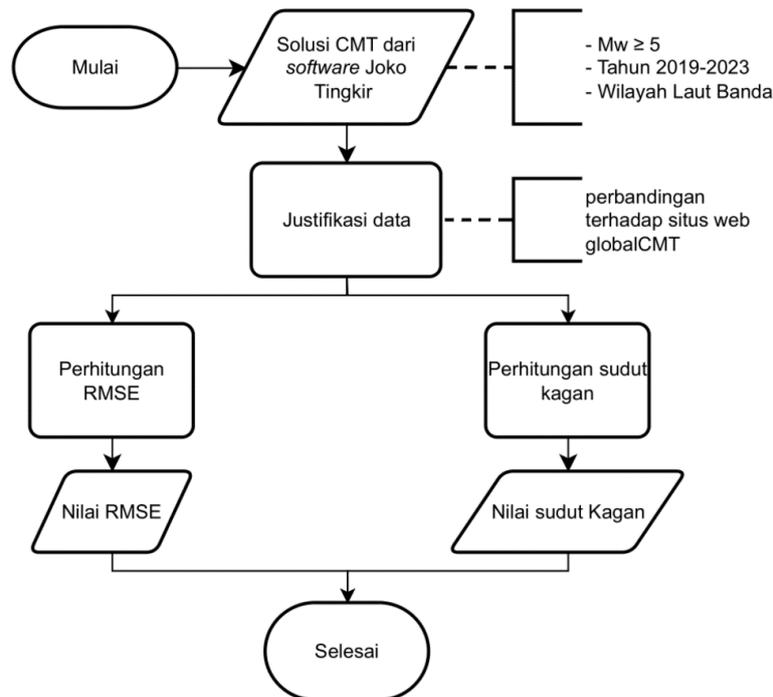


**Gambar 3.** Diagram alir penentuan CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir menggunakan algoritma Gisola (Triantafyllis *et al.*, 2021).

Hasil penentuan solusi CMT dikatakan dapat dipercayai ketika memiliki nilai *Variance Reduction* (VR) lebih dari 50% (Vackář *et al.*, 2017). Solusi CMT dengan VR kurang dari 50% dapat dilakukan revisi untuk memperbaiki kualitas solusi CMT. Perhitungan ulang dilakukan dengan cara mengeliminasi stasiun seismik yang memiliki VR rendah, mengubah pita frekuensi inversi, dan juga memilih model kecepatan yang sesuai (Triantafyllis *et al.*, 2021)

Pada tahap justifikasi data, dilakukan analisis keakuratan solusi CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir melalui perbandingan terhadap situs web GlobalCMT. Langkah pertama dilakukan dengan menyiapkan parameter CMT dari *software* Joko Tingkir. Langkah kedua dilakukan dengan mengakses situs web GlobalCMT melalui link: <https://www.globalCMT.org/CMTsearch.html> yang digunakan sebagai

pembandingan, lalu mengatur rentang tahun 2019-2023 serta batas daerah yaitu 125,15 °BT-133,48 °BT dan 2,32 °LS-9,49 °LS, kemudian klik 'ok'. Langkah selanjutnya adalah membandingkan solusi CMT yang telah diperoleh menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) dan sudut Kagan.



**Gambar 4.** Diagram alir justifikasi data solusi CMT pada *software* Joko Tingkir menggunakan metode RMSE dan sudut Kagan.

Metode RMSE dapat digunakan untuk mengukur akurasi dari solusi CMT *real-time* dan otomatis yang disajikan pada *software* Joko Tingkir dengan menghitung selisih atau nilai *error*. Semakin kecil nilai RMSE yang diperoleh, maka tingkat akurasi data semakin tinggi (Mahyudin *et al.*, 2014). Sedangkan metode sudut Kagan dilakukan dengan melakukan rotasi 3D pada mekanisme fokus dari Joko Tingkir dan GlobalCMT sehingga dapat diperoleh selisih sudut minimum dari kedua mekanisme fokus tersebut. Kagan (1991) menyatakan bahwa apabila hasil penentuan sudut Kagan menghasilkan sudut lebih dari 60°, maka data memiliki keakuratan yang rendah. Sebaliknya, keakuratan tinggi dapat diperoleh jika sudut yang dihasilkan memiliki sudut kurang dari 60°.

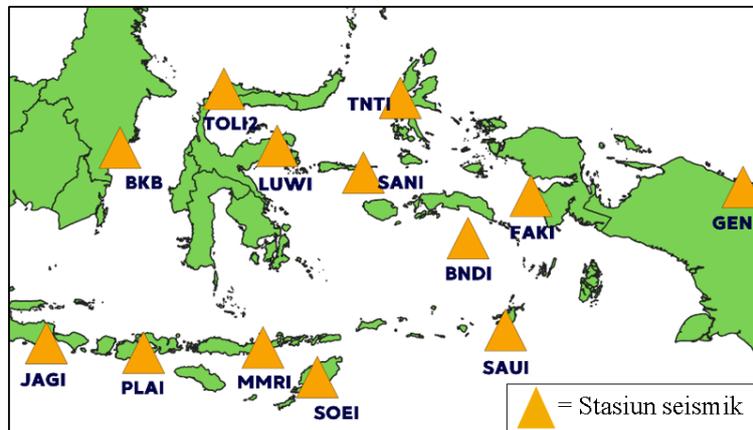
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh informasi terkait tipe patahan di wilayah Laut Banda berdasarkan diagram *beachball* yang disajikan pada *software* Joko Tingkir. Selain itu, tujuan lainnya adalah untuk memperoleh akurasi solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) untuk wilayah Laut Banda pada *software* Joko Tingkir menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) dan Sudut Kagan. Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan parameter CMT *real-time* dan otomatis terhadap 14 kejadian gempa bumi dalam rentang tahun 2019–2023 di Laut Banda dengan  $M_w \geq 5$  yang telah diperoleh dari implementasi algoritma Gisola pada *software* Joko Tingkir. Parameter tersebut terdiri atas *longitude*, *latitude*, *origin time*,  $M_w$ , *depth*, *strike*, *dip* dan *rake*. Solusi CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir disajikan dengan lambang [A] dan berstatus *preliminary* dimana memiliki kualitas data yang tidak dapat dipastikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan justifikasi agar solusi CMT pada *software* Joko Tingkir dapat dipercaya oleh masyarakat sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi.

Kualitas solusi CMT pada *software* Joko Tingkir dilambangkan dengan huruf (A, B, C, dan D) yang diikuti dengan angka (1, 2, 3, dan 4) (Scognamiglio *et al.*, 2009). Semakin besar variabel angka dan huruf menunjukkan kualitas data yang semakin rendah. Dengan demikian dengan lambang A1 memiliki kualitas paling tinggi, sedangkan D4 adalah kualitas paling rendah (Triantafyllis *et al.*, 2021). Kualitas solusi CMT dipengaruhi oleh persentase *Variance Reduction* (VR) dari komponen *waveform* yang terekam pada stasiun seismik, pita frekuensi *waveform*, serta model kecepatan yang digunakan dalam inversi untuk

penentuan solusi CMT. Distribusi stasiun seismik yang berada pada empat kuadran di sekitar lokasi kejadian gempa bumi dapat menghasilkan kualitas solusi CMT yang baik.

Solusi CMT dengan kualitas rendah dan memiliki perbedaan nilai yang signifikan apabila dibandingkan dengan GlobalCMT dapat dilakukan revisi menggunakan algoritma Gisola. Hasil revisi disajikan dengan lambang [M] dan status solusi CMT berubah menjadi *reviewed*. Pada tahap revisi dilakukan perhitungan ulang fungsi Green dengan mengeliminasi stasiun seismik yang memiliki VR rendah serta mengubah pita frekuensi inversi yang sesuai (Triantafyllis *et al.*, 2021). Penentuan CMT pada Joko Tingkir menggunakan input data berupa *waveform* yang terekam oleh stasiun seismik regional milik jaringan GEOFON dari *international Federation of Digital Seismograph Network Web Service* (FDSNWS).

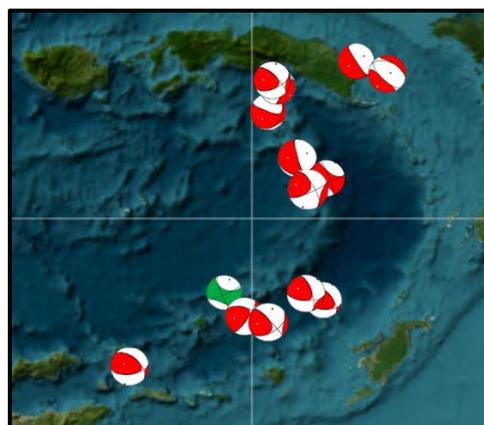


**Gambar 5.** Peta distribusi stasiun seismik yang diimplementasikan dalam penentuan solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir untuk wilayah Laut Banda

Gambar 5 merupakan peta distribusi stasiun seismik yang digunakan dalam penentuan *Centroid Moment Tensor* (CMT) *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir untuk wilayah Laut Banda. Stasiun seismik yang digunakan sudah memenuhi empat kuadran pada daerah penelitian sehingga dapat menghasilkan solusi CMT dengan kualitas yang baik. Stasiun seismik tersebut merekam *waveform* tiga komponen; *North-South* (N), *East-West* (E), dan *Up-Down* (Z).

#### A. Tipe Patahan di Wilayah Laut Banda Berdasarkan Diagram *Beachball*

Diagram *beachball* merupakan permodelan terhadap nilai parameter *strike*, *dip*, dan *rake* yang dihasilkan dari penentuan solusi CMT. Melalui permodelan diagram *beachball*, dapat diketahui tipe patahan di suatu wilayah yang menjadi penyebab dari kejadian gempa bumi di wilayah tersebut. Peta diagram *beachball* pada kejadian gempa bumi di wilayah Laut Banda yang digunakan sebagai objek penelitian disajikan pada gambar 6. Pada peta tersebut, diagram *beachball* berwarna merah-putih merupakan kejadian gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas tektonik dengan nilai *Double Couple* (DC) yang dominan. Sedangkan *beachball* berwarna hijau-putih merupakan kejadian gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas vulkanik dengan nilai *Compensated Linear Vector Dipole* (CLVD) yang dominan.



**Gambar 6.** Peta diagram *beachball* di wilayah Laut Banda

Berdasarkan peta diagram *beachball* yang disajikan pada gambar 6, dapat diketahui bahwa Laut Banda merupakan wilayah perairan dengan kondisi geologi yang kompleks (Jannah *et al.*, 2016). Hal ini ditandai dengan diagram *beachball* yang merepresentasikan tipe patahan beragam dengan pola yang cukup unik pada daerah tersebut. Kejadian gempa bumi di wilayah Laut Banda didominasi oleh tipe patahan *strike-slip* dan *oblique* sebanyak 11 kejadian yang membentuk cekungan terbuka ke arah barat di daerah sekitar Detasemen banda. Selain itu, 3 kejadian gempa bumi disebabkan oleh patahan tipe *reverse* di bagian timur laut Pulau Seram atau lebih tepatnya pada palung Seram yang merupakan bagian dari Busur Luar Banda. Selain kejadian gempa bumi yang diakibatkan oleh aktivitas tektonik, terdapat kejadian gempa bumi yang diakibatkan oleh aktivitas vulkanik di daerah Busur Dalam. Tipe patahan yang dimodelkan pada peta diagram *beachball* di wilayah Laut Banda sesuai dengan penelitian terkait kondisi geologi tektonik di Laut Banda yang dilakukan oleh Pownall *et al.* (2016).

**B. Revisi Parameter Centroid Moment Tensor (CMT) Real-time dan Otomatis pada Software Joko Tingkir untuk Gempa Bumi di Laut Banda**

Berdasarkan kejadian gempa bumi yang digunakan sebagai objek penelitian, solusi CMT dengan perbedaan parameter yang cukup signifikan terdapat pada gempa bumi tanggal 03 Februari 2019 dan 04 November 2021. Kedua kejadian gempa bumi tersebut kemudian dilakukan revisi menggunakan algoritma Gisola dengan menghapus komponen *waveform* yang memiliki *Variance Reduction* (VR) rendah dan juga mengubah pita frekuensi inversi yang sesuai dengan besarnya magnitudo gempa bumi. Setelah tahap inversi untuk merevisi parameter gempa bumi selesai dilakukan, maka seluruh parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT) akan diperbaharui secara otomatis pada *software* Joko Tingkir dengan parameter baru hasil revisi.

Setelah revisi dilakukan pada kejadian gempa bumi tanggal 03 Februari 2019, diperoleh solusi CMT baru dengan peningkatan kualitas yang awalnya B1 menjadi A1 serta peningkatan *Variance Reduction* (VR) yang awalnya 52% menjadi 64%. Berdasarkan solusi CMT baru yang dihasilkan, diperoleh informasi bahwa gempa bumi tersebut disebabkan oleh patahan *reverse*. Hal ini didukung dengan dominasi *Double Couple* (DC) sebesar 95% yang menunjukkan aktivitas tektonik merupakan faktor penyebab dari kejadian gempa bumi tersebut. Selain itu diperoleh informasi bahwa gempa bumi terjadi pada pukul 07:36:50,49 UTC di titik koordinat -3,10 °LS dan 130,76 °BT pada kedalaman 38,0 km serta  $M_w$  sebesar 6,0 dengan nilai *strike* sebesar 327°, *dip* sebesar 89°, dan *rake* sebesar 90°.

Setelah revisi dilakukan pada kejadian gempa bumi tanggal 04 November 2021, diperoleh solusi CMT baru dengan peningkatan *Variance Reduction* (VR) yang awalnya 57% menjadi 58%. Berdasarkan solusi CMT baru yang dihasilkan, diperoleh informasi bahwa gempa bumi tersebut disebabkan oleh patahan *oblique*. Hal ini didukung dengan dominasi *Double Couple* (DC) sebesar 87% yang menunjukkan aktivitas tektonik merupakan faktor penyebab dari kejadian gempa bumi tersebut. Selain itu diperoleh informasi bahwa gempa bumi terjadi pada pukul 02:42:39,52 UTC di titik koordinat -3,09 °LS dan 129,31 °BT pada kedalaman 12,0 km dan  $M_w$  sebesar 5,7 dengan nilai *strike* sebesar 66°, *dip* sebesar 49°, dan *rake* sebesar 32°.

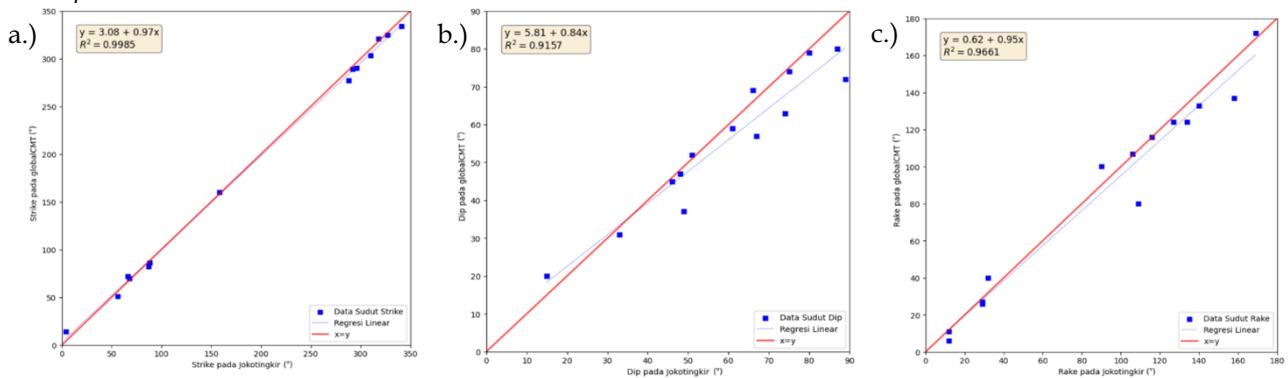
**C. Hasil Perhitungan Metode Root Mean Square Error (RMSE) dan Sudut Kagan**

Perhitungan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) dilakukan untuk memperoleh nilai *error* atau selisih dari seluruh parameter CMT dari *software* Joko Tingkir jika dibandingkan dengan GlobalCMT. Nilai *error* tersebut dapat merepresentasikan tingkat keakuratan dari solusi CMT *real-time* dan otomatis yang disajikan pada *software* Joko Tingkir. Perhitungan metode RMSE dilakukan menggunakan persamaan  $\sqrt{\frac{\sum(x-y)^2}{n}}$  dengan n adalah jumlah keseluruhan data, X adalah data parameter CMT dari GlobalCMT dan Y adalah data parameter CMT dari Joko Tingkir (Mahyudin *et al.*, 2014).

**Tabel 1.** Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk seluruh parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT).

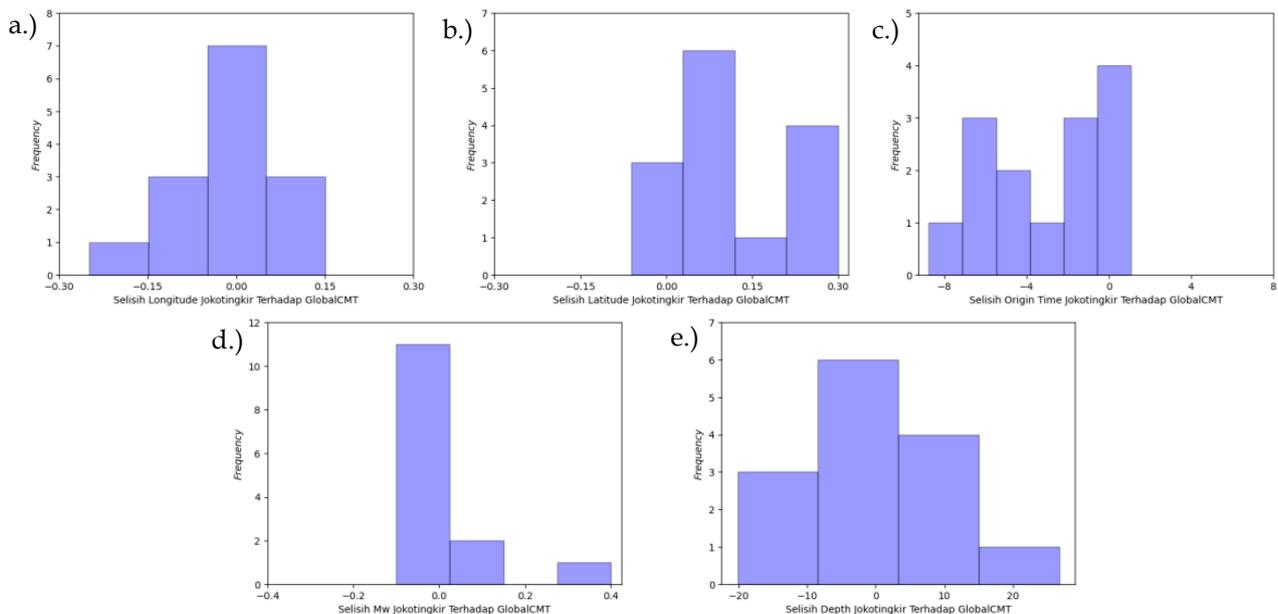
Parameter	Nilai RMSE
<i>Longitude</i>	0,09
<i>Latitude</i>	0,17
<i>Origin time</i>	4,20
$M_w$	0,12
<i>Depth</i>	12,43
<i>Strike</i>	5,82
<i>Dip</i>	7,32
<i>Rake</i>	10,90

Nilai RMSE pada masing-masing parameter disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan tabel 1, *longitude* menghasilkan nilai RMSE 0,09, *latitude* menghasilkan nilai RMSE 0,17, *origin time* menghasilkan nilai RMSE 4,20,  $M_W$  menghasilkan RMSE 0,12, *depth* menghasilkan nilai RMSE 12,43, *strike* menghasilkan nilai RMSE 5,82, *dip* menghasilkan nilai RMSE 7,32, dan *rake* menghasilkan nilai RMSE 10,90. Berdasarkan nilai RMSE yang diperoleh, seluruh parameter CMT menunjukkan tingkat keakuratan tinggi karena memiliki nilai RMSE yang rendah yaitu kurang dari 20 (Hidayanti *et al.*, 2022). Setelah nilai RMSE diperoleh, selanjutnya dilakukan permodelan berupa grafik regresi linear dan histogram. Permodelan grafik regresi linear untuk parameter *strike*, *dip*, *rake*, sedangkan permodelan histogram dilakukan pada parameter *longitude*, *latitude*, *origin time*,  $M_W$ , dan *depth*.



Gambar 7. Grafik regresi linear; a.) *strike*, b.) *dip*, c.) *rake*.

Gambar 7 merupakan grafik regresi linear untuk parameter *strike*, *dip*, dan *rake* dengan sumbu x adalah nilai parameter yang disajikan pada *software* Joko Tingkir dan sumbu y adalah nilai parameter yang disajikan pada GlobalCMT. Grafik regresi linear tersebut terdiri atas 14 titik biru yang merepresentasikan nilai parameter dari 14 kejadian gempa bumi yang digunakan sebagai objek penelitian. Garis merah merupakan acuan keakuratan yang merepresentasikan  $x=y$ , sedangkan garis putus-putus berwarna biru merupakan garis regresi linear dari data yang digunakan. Garis regresi linear tersebut memiliki nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang dapat merepresentasikan persentase keakuratan data melalui persamaan  $R^2 \times 100\%$ . Berdasarkan gambar 7, dapat diperoleh akurasi parameter *strike* sebesar 99,85%, *dip* sebesar 91,57%, dan *rake* sebesar 96,61% sehingga menunjukkan korelasi yang kuat antara nilai *strike*, *dip*, dan *rake* pada Joko Tingkir dan GlobalCMT.



Gambar 8. Histogram dari parameter CMT; a.) *longitude*, b.) *latitude*, c.) *origin time*, d.)  $M_W$ , e.) *depth*.

Gambar 8 merupakan histogram dari parameter *longitude*, *latitude*, *origin time*,  $M_W$ , dan *depth*. Pada gambar tersebut, sumbu x merupakan rentang selisih dari parameter yang disajikan pada *software* Joko Tingkir jika dibandingkan dengan GlobalCMT. Sedangkan sumbu y merupakan frekuensi atau banyaknya data yang terdistribusi pada rentang selisih tertentu. Berdasarkan histogram tersebut menunjukkan bahwa dari

keseluruhan data parameter *longitude*, *latitude*, *origin time*,  $M_w$ , dan *depth* memiliki selisih yang banyak terdistribusi pada angka mendekati nol yang merepresentasikan koreksi minimum, sehingga menunjukkan bahwa ke-lima parameter tersebut memiliki tingkat keakuratan yang tinggi.

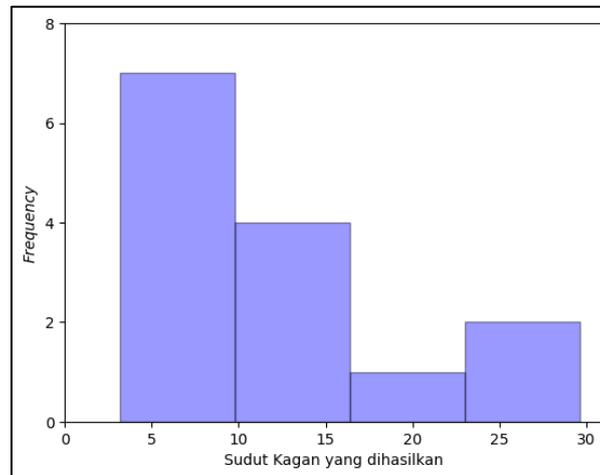
Keakuratan data yang tinggi ditandai dengan nilai RMSE di bawah 20 (Hidayanti *et al.*, 2022), koefisien determinasi ( $R^2$ ) di atas 0,75, nilai  $R^2$  sebesar 0,05-0,075 memiliki tingkat keakuratan sedang, dan nilai  $R^2$  di bawah 0,25 memiliki tingkat keakuratan yang rendah (Hair *et al.*, 2017). Sedangkan histogram dengan frekuensi terbanyak yang terdistribusi pada nilai selisih terkecil atau mendekati nol menunjukkan bahwa mayoritas data memiliki koreksi minimum. Berdasarkan perhitungan metode RMSE serta permodelan dalam grafik regresi linear dan histogram pada seluruh parameter CMT, diperoleh nilai RMSE kurang dari 20, dan nilai  $R^2$  lebih dari 0,75, dan histogram yang menunjukkan bahwa mayoritas data yang dibandingkan memiliki koreksi minimum yaitu mendekati nol. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa solusi CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir memiliki tingkat keakuratan yang tinggi.

Menurut Kagan (1991), *beachball* merupakan permodelan mekanisme fokus dalam rotasi tiga dimensi terdiri atas parameter *strike*, *dip*, dan *rake* dapat diputar dari satu posisi ke posisi lain dengan empat rotasi yang berbeda. Setelah itu dapat dipilih rotasi yang memiliki sudut terkecil diantara keempat rotasi yang diperoleh dari perhitungan. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan berbasis komputasi menggunakan metode sudut Kagan untuk memperoleh sudut dengan selisih minimum terhadap parameter *strike*, *dip*, *rake* yang disajikan pada *software* Joko Tingkir jika dibandingkan dengan GlobalCMT. Hasil perhitungan metode sudut Kagan terhadap masing-masing kejadian gempa bumi yang digunakan sebagai objek penelitian disajikan pada tabel 2.

**Tabel 2.** Nilai sudut Kagan pada setiap kejadian gempa bumi beserta perbandingan diagram *beachball* yang disajikan pada *software* Joko Tingkir dan GlobalCMT.

No.	Tanggal	Joko Tingkir	GlobalCMT	Sudut Kagan (°)
1.	03/02/2019			19,97
2.	26/02/2019			29,63
3.	24/06/2019			4,15
4.	21/09/2019			3,16
5.	15/02/2020			5,55
6.	06/05/2020			7,28
7.	08/09/2020			6,49
8.	01/11/2020			15,82
9.	16/06/2021			14,33
10.	02/11/2021			5,61
11.	04/11/2021			13,16
12.	29/12/2021			5,44
13.	06/07/2023			11,49
14.	11/11/2023			24,42
Rata-rata				11,89

Gambar 9 merupakan histogram dari sudut Kagan dengan sumbu x adalah rentang nilai sudut Kagan dan sumbu y adalah frekuensi data yang terdistribusi pada rentang nilai tertentu. Dapat dilihat pada gambar 9 bahwa mayoritas sudut Kagan yang diperoleh terdistribusi pada koreksi minimum yaitu di sekitar angka lima. Nilai sudut Kagan untuk seluruh data solusi CMT memiliki rata-rata sebesar  $11,89^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa solusi CMT pada *software* Joko Tingkir menghasilkan diagram *beachball* yang terdiri dari parameter *strike*, *dip*, dan *rake* merepresentasikan bentuk dan tipe patahan dengan keakuratan tinggi karena memiliki rata-rata nilai sudut Kagan kurang dari  $60^\circ$  (Kagan, 1991).



Gambar 9. Histogram dari nilai sudut Kagan.

#### IV. PENUTUP

##### A. Simpulan

Berdasarkan peta diagram *beachball* dari kejadian gempa bumi di wilayah Laut Banda, dapat disimpulkan bahwa Laut Banda memiliki tatanan geologi yang kompleks yakni tipe patahan *strike-slip* dan *oblique* berbentuk cekungan terbuka ke arah barat di daerah sekitar Detasemen banda dan patahan tipe *reverse* pada Palung seram. Sedangkan justifikasi solusi CMT *real-time* dan otomatis pada *software* Joko Tingkir menghasilkan nilai RMSE untuk seluruh parameter berada pada angka yang rendah yakni kurang dari 20 (0,09 untuk *latitude*; 0,17 untuk *longitude*; 4,20 untuk *origin time*; 0,12 untuk  $M_w$ ; 12,43 untuk *depth*; 5,82 untuk *strike*; 7,32 untuk *dip*; dan 10,90 untuk *rake*), serta sudut Kagan dengan nilai rata-rata  $11,89^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa solusi CMT *real-time* dan otomatis yang disajikan pada *software* Joko Tingkir untuk wilayah Laut Banda memiliki tingkat keakuratan yang tinggi sehingga dapat dipercaya oleh masyarakat sebagai upaya mitigasi bencana kebumihan.

##### B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya dengan topik serupa, disarankan pada tahap revisi sebaiknya dilakukan eliminasi stasiun seismik yang memiliki *Variance Reduction* (VR) rendah secara menyeluruh dalam satu kali revisi karena dapat berpengaruh pada hasil solusi CMT yang disajikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Fidia, R., Pujiastuti, D., & Sabarani, A. 2018. Korelasi tingkat seismisitas dan periode ulang gempa Bumi di Kepulauan Mentawai dengan menggunakan metode Guttenberg-Richter. *Jurnal Fisika Unand*, 7(1), 84-89.
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. 2021. The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9),
- Taruna, R. M., Othav, A., Rachman, A. N., Gunawan, M. T., Sulastrri, 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.
- Mahmudah, S., & Supardi, Z. A. I. 2023. Analisis parameter kegempaan (nilai-a dan nilai-b) di wilayah Busur Banda. *Jurnal Riset Rumpun Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 2(1), 254-262.

- Murjaya, J. 2023. Seismotektonik wilayah Indonesia Timur. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 3(3), 14-22.
- Harjono, H. 2017. *Seismotektonik Busur Sunda*. Jakarta: LIPI Press
- 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.
- Ngadmanto, D. 2010. Penentuan Potensi Gempa Bumi Merusak Berdasarkan Parameter Kegempaan di Wilayah Busur Banda. *Widyariset*, 13(2), 125-132.
- 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 and Space*, 75(1), 124.
- Cummins, P. R., Pranantyo, I. R., Pownall, J. M., Griffin, J. D., Meilano, I., & Zhao, S. 2020. Earthquakes and tsunamis caused by low-angle normal faulting in the Banda Sea, Indonesia. *Nature Geoscience*, 13(4), 312-318.
- 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 Society of America*, 93(2A), 957-966.
- Triantafyllis, N., Sokos, E., Ilias, A., & Zahradník, J. 2016. Scisola: automatic moment tensor solution for SeisComp3. *Seismological Research Letters*, 87(1), 157-163.
- Vackář, J., Burjáněk, 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.
- 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.
- Madlazim, Fahmi, M. N., Sari, D. P., Meilianda, E., & 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.
- Franco, S. I., Iglesias, A., & Fukuyama, E. 2020. Moment tensor catalog for Mexican earthquakes: almost two decades of seismicity. *Geofísica internacional*, 59(2), 54-80.
- 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.
- Vermaysha, A., & Nurmalitasari, N. 2023. Prediksi Harga Rumah di Kabupaten Karanganyar Menggunakan Metode Regresi Linear. *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis* (pp. 6-11).
- Kagan, Y. Y. 1991. 3-D rotation of double-couple earthquake sources. *Geophysical Journal International*, 106(3), 709-716.
- Mahyudin, M., Suprayogi, I., & Trimajon, T. 2014. Model prediksi liku kalibrasi menggunakan pendekatan jaringan saraf tiruan (JST). *Doctoral dissertation, Riau University*.
- Scognamiglio, L., Tinti, E., & Michelini, A. 2009. Real-time determination of seismic moment tensor for the Italian region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(4), 2223-2242.
- Pownall, J. M., Hall, R., & Lister, G. S. 2016. Rolling open Earth's deepest forearc basin. (11), 947-950.
- Jannah, I. N., Anggono, T., & Yulianto, T. 2016. Aplikasi metode double difference dalam relokasi hiposenter untuk menggambarkan zona transisi antara Busur Banda dan Busur Sunda. *Youngster Physics Journal*, 5(3), 113-122.
- Hidayanti, R. P. 2022. Prediksi Harga Batu Bara Menggunakan Regresi Kuadrat. *Journal of Embedded Systems, Security and Intelligent Systems*, 3(1), 1-10.