

ANALISIS CENTROID MOMENT TENSOR (CMT) DENGAN METODE TIME DOMAIN MOMENT TENSOR (TDMT) GEMPA BUMI DI SEKITAR LAUT FLORES

¹⁾Nur Rizqika Ghina Salsabila, ²⁾Madlazim, ³⁾Muhammad Nurul Fahmi

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nurrizqika.20031@mhs.unesa.ac.id

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

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

Abstrak

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis solusi CMT menggunakan metode *Time Domain Moment Tensor* (TDMT) dan menentukan tipe patahan gempa bumi di sekitar Laut Flores pada tanggal 27 Februari 2015 dengan M_w 7.0 dan yang terjadi pada tanggal 23 Agustus 2016 dengan M_w 6.0. Data sekunder yang diperoleh melalui SAGE Wilber diolah menggunakan metode inversi *waveform* tiga komponen dan fungsi Green yang terdapat pada *software* MTINV untuk mengestimasi parameter gempa bumi yang terjadi di sekitar Laut Flores. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kedua gempa bumi terjadi karena aktivitas tektonik, bukan akibat adanya ledakan. Hal itu dibuktikan dengan hasil presentase nilai DC lebih besar daripada nilai CLVD, dengan VR yaitu sebesar 51.67% pada gempa bumi 27 Februari 2015 dan sebesar 63.35% pada gempa bumi 23 Agustus 2016. Berdasarkan nilai Variance Reduction (VR), maka hasil yang diperoleh dalam penelitian ini dikatakan akurat karena telah memenuhi syarat. Dari bentuk beachball dapat diketahui tipe patahan yang menyebabkan kedua gempa bumi tersebut yaitu sesar miring.

Kata Kunci: waveform, CMT, Sesar, Beachball, dan Fungsi Green

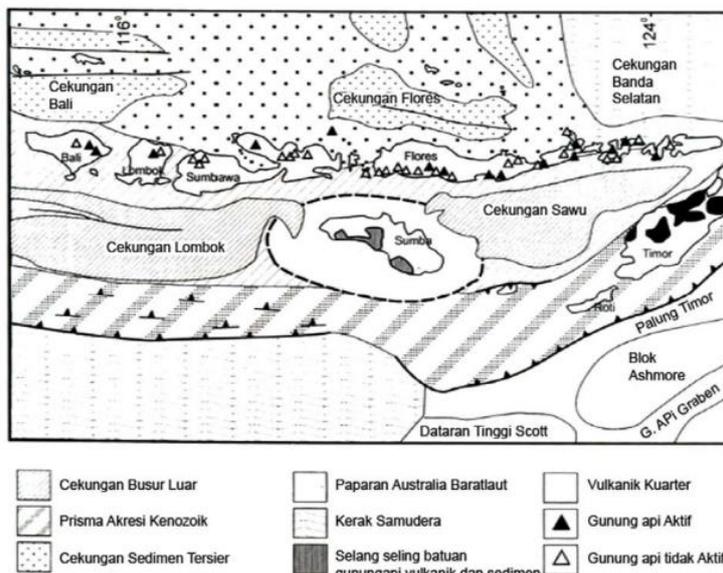
Abstract

This study was conducted with the aim of analyzing the CMT solution using the *Time Domain Moment Tensor* (TDMT) method and determining the fault type of the earthquake around the Flores Sea on February 27, 2015 with M_w 7.0 and that occurred on August 23, 2016 with M_w 6.0. Secondary data obtained through SAGE Wilber were processed using the three-component *waveform* inversion method and Green's function contained in the MTINV software to estimate the parameters of the earthquake that occurred around the Flores Sea. The calculation results show that both earthquakes occurred due to tectonic activity, not due to an explosion. This is evidenced by the results of the percentage of DC values greater than CLVD values, with a VR of 51.67% in the February 27, 2015 earthquake and 63.35% in the August 23, 2016 earthquake. Based on the Variance Reduction (VR) value, the results obtained in this study are said to be accurate because they have met the requirements. From the beachball shape, it can be seen that the type of fault that caused the two earthquakes was an oblique fault.

Keywords: waveform, CMT, Fault, Beachball, and Green's Function

I. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan di mana tiga lempeng tektonik dunia masih bergerak satu sama lain. Lempeng Indo-Australia berada di samudra dan bergerak 6-7 cm per tahun di bawah lempeng Eurasia. Lempeng ini telah menyebabkan beberapa gempa bumi yang dahsyat dalam beberapa abad terakhir (Koulali *et al.*, 2017; Pasari *et al.*, 2021). Akibatnya, Indonesia dianggap sebagai wilayah tektonik aktif dengan tingkat seismisitas yang tinggi (Taruna *et al.*, 2022).



Gambar 1. Setting tektonik masa kini menunjukkan kerangka mega tektonik (Darman dan Sidi, 2000).

Kepulauan NTT dan sekitarnya merupakan bagian dari sistem tektonik Indonesia dan berada di jalur gunung api aktif dekat dengan zona tumbukan lempeng. Di bagian utara Nusa Tenggara sepanjang 450 km dari timur Pulau Lombok hingga Flores membentang Zona Subduksi aktif yaitu Flores Back Arc Thrust (Silver *et al.*, 1983; Kuolali *et al.*, 2016; Sunardi *et al.*, 2017; Supendi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020; Felix *et al.*, 2021). Daerah Nusa Tenggara sangat rentan terhadap bahaya gempa tektonik dan tsunami, seperti yang ditunjukkan oleh ancaman seismik dari Flores Back Arc Thrust (Supendi *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020; Felix *et al.*, 2021) serta gempa besar dengan magnitudo 7,3 di Laut Flores (Supendi *et al.*, 2022) yang memicu tsunami kecil.

Pada tanggal 27 Februari 2015 pukul 21:45 WITA, Laut Flores diguncang gempa bumi dengan magnitudo 7.0 pada koordinat latitude -7.35° S dan longitude 122.49° E, serta kedalaman 559.1 km. Kemudian pada 23 Agustus 2016 pukul 03:39 WITA, terjadi lagi gempa bumi dengan magnitudo 6.0 pada latitude -7.28° S dan longitude 122.42° E, dengan kedalaman 532.4 km. Gempa magnitudo 7.0 dirasakan di beberapa wilayah di timur Flores Timur bagian utara dengan intensitas IV-V MMI; gempa juga dirasakan dengan intensitas sedang di Sikka dan Kupang, serta guncangan lemah di Kabupaten Flores Timur, Kota Mataram, dan sebagian Bali, tanpa menyebabkan peringatan dini tsunami karena pusat gempa sangat dalam. Sedangkan gempa magnitudo 6.0 berpusat 105 km barat laut Flores Timur dan tidak menimbulkan peringatan dini tsunami.

Penelitian ini menggunakan metode *Time Domain Moment Tensor* (TDMT) untuk menentukan mekanisme sumber gempa bumi dengan mengetahui jenis patahan yang menyebabkan gempa bumi tersebut dengan menghitung *moment tensor* yang menggambarkan distribusi gaya di sumber gempa bumi dan menghasilkan output berupa informasi tentang orientasi dan jenis patahan, serta besar momen seismik. Metode ini berbeda dengan metode inversi seismik yang dimana metode ini digunakan untuk memperoleh gambaran tentang struktur bawah permukaan bumi dengan cara memodelkan data seismik dan output yang diperoleh berupa kecepatan gelombang, impedansi akustik dan densitas.

Solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) adalah solusi untuk mengidentifikasi sumber gempa bumi dengan menggunakan moment tensor yang dihitung dari data 5 gelombang seismik yang terdiri dari domain waktu dan tiga komponen untuk menghitung parameter sumber, yaitu mekanisme fokal, momen seismik total, dan kedalaman sumber. Formulasi matematis yang didefinisikan dalam (Minson dan Dreger, 2008) untuk memungkinkan perhitungan tensor momen penuh dan rincian langkah-langkah yang dijelaskan dalam

tulisan sebelumnya, seperti Dreger (2003) dan Chiang *et al.*, (2016), adalah dasar dari inovasi ini. Selain itu, solusi CMT juga bisa memberikan informasi kepada masyarakat agar mereka dapat memahami sumber dan karakteristik gempa bumi.

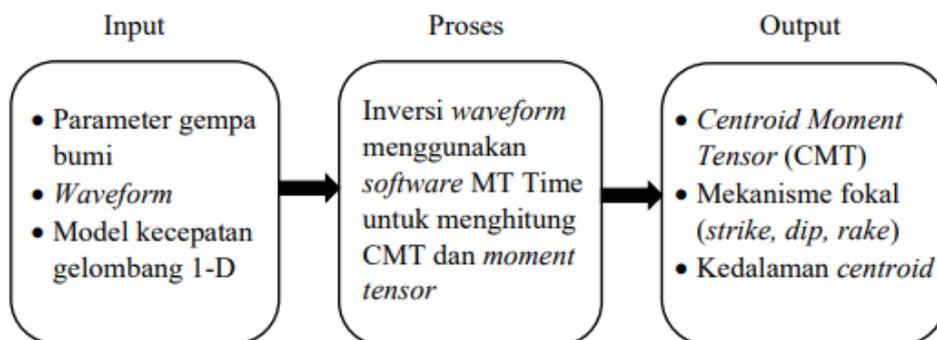
Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Chiang *et al.* (2021) dengan membandingkan magnitudo momen (M_w) dengan metode coda envelopes diketahui bahwa di sepanjang Perisai Arab bagian barat semuanya memiliki mekanisme normal dan strike-slip dengan sedikit komponen isometrik yang menghasilkan solusi moment tensor yang lebih baik. Ezgi *et al.* (2023) melakukan penelitian moment tensor dilakukan dengan mengevaluasi dua gempa bumi yang terjadi di Turki pada tahun 2023 dan menggunakan inversi moment tensor untuk mempelajari hubungan yang kompleks antara gempa bumi dan sesar. Penelitian ini memberikan wawasan penting tentang bagaimana gempa bumi berasal dan dinamika sesar.

Untuk mengurangi dampak kerugian material dan kerusakan di sekitar Laut Flores, maka diperlukan studi terkait tipe patahan dari gempa bumi yang terjadi di sekitar Laut Flores. Penentuan CMT ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Time Domain Moment Tensor* (TDMT), seperti pada penelitian Chiang *et al.*, (2016) keunggulan dari metode ini adalah dapat diproses cukup cepat dibandingkan dengan solusi moment tensor berbasis frekuensi domain.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian yang dilakukan oleh penulis merupakan jenis penelitian berbasis komputasi menggunakan metode inversi *moment tensor*. Pada penelitian ini menggunakan data sekunder yang didapatkan dari SAGE Wilber. Solusi *moment tensor* yang diselesaikan dengan metode *Time Domain Moment Tensor* (TDMT) menggunakan *software* MT Time untuk mengidentifikasi karakteristik tipe sesar gempa bumi yang terjadi di Laut Flores. Data event gempa bumi dapat diakses melalui <https://ds.iris.edu/wilber3/findevent> secara gratis. Dalam melakukan estimasi CMT, diperlukan fungsi Green untuk melakukan inversi waveform tiga komponen yang selanjutnya hasil inversi tersebut diolah menggunakan *software* MT Time untuk memperoleh beachball yang bertujuan mengidentifikasi karakteristik dari patahan gempa bumi. Berikut adalah skema rancangan penelitian:



Gambar 2. Rancangan Penelitian Analisis Centroid Moment Tensor (CMT) dengan Metode Time Domain Moment Tensor (TDMT) Gempa Bumi Di Sekitar Laut Flores.

B. Instrumen Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik tipe patahan gempa bumi yang terjadi di Laut Flores. Dalam menentukan solusi *Centroid Moment Tensor* hal pertama yang dilakukan adalah pengumpulan data gempa bumi menggunakan Obspy yang dilakukan secara otomatis. Kemudian, *software* yang digunakan dalam pengolahan data yang telah didapatkan menggunakan *software* MT Time, dimana *software* ini merupakan alat *Time Domain Moment Tensor* berbasis bahasa python.

C. Variabel Operasional Penelitian

Dalam penelitian ini, terdapat tiga jenis variabel, variabel kontrol berupa, dua gempa bumi yang terjadi di Laut Flores yang terjadi pada 27 Februari 2015 dengan M_w 7.0 yang berada pada latitude -7.35° S, longitude 122.49° E, dan kedalaman 559.1 km dan gempa bumi pada tanggal 23 Agustus 2016 dengan M_w 6.0 yang berada pada latitude -7.28° S, longitude 122.42° E, dan kedalaman 532.4 km. Variabel manipulasi berupa, stasiun seismik, model kecepatan 1-D, dan rentang filter frekuensi fungsi Green. Penelitian ini juga menghasilkan *output* atau variabel respon berupa mekanisme focal (*strike, dip rake*), *beachball*, dan peta gempa bumi.

D. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan dua data sekunder gempa bumi yang didapatkan dari <https://ds.iris.edu/wilber3/findevent> secara gratis. Data tersebut yaitu kejadian gempa bumi Laut Flores pada tanggal 27 Februari 2015 pukul 21:45 WITA dengan M_w 7.0 yang berada pada *latitude* -7.35° S, *longitude* 122.49° E, dan kedalaman 559.1 km dan gempa bumi pada tanggal 23 Agustus 2016 pukul 03:39 WITA dengan M_w 6.0 yang berada pada *latitude* -7.28° S, *longitude* 122.42° E, dan kedalaman 532.4 km. Kedua data tersebut dipilih karena memiliki $M_w > 6$ SR karena memiliki sinyal yang lebih jelas dan terekam oleh banyak stasiun.

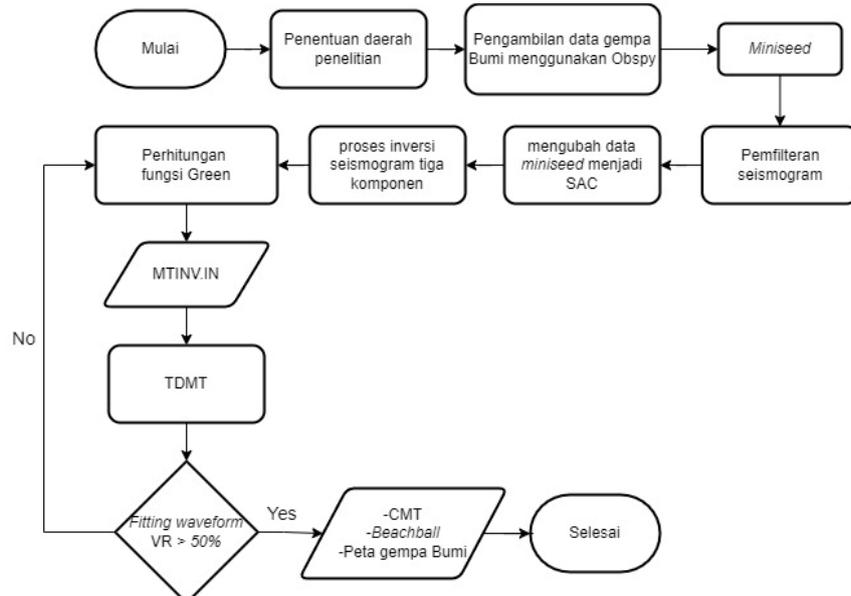
E. Teknik Pengolahan Data

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis CMT yang diperoleh dari data gelombang seismik tiga komponen untuk mengidentifikasi karakteristik gempa bumi. Estimasi CMT menghasilkan parameter CMT, seperti strike, dip, rake dan kedalaman centroid. Parameter ini dapat digunakan untuk mengetahui tipe patahan gempa bumi di Laut Flores.

Langkah awal yang dilakukan adalah menentukan daerah penelitian yang tercatat oleh stasiun jaringan GEOFON (GE) di sekitar epicenter gempa bumi menggunakan inversi time domain. Inversi ini didasarkan pada formulasi matematis yang memungkinkan perhitungan moment tensor penuh (Minson dan Dreger, 2008). Setelah menentukan daerah penelitian, dilakukan pengambilan data gempa bumi secara otomatis menggunakan Obspy. Selanjutnya, seismogram difilter dan respons dari stasiun dihilangkan untuk mengurangi noise yang terekam dan mendapatkan sinyal yang lebih baik. Langkah berikutnya adalah mengubah data SAC yang diubah dari miniseed, dan data SAC ini digunakan bersama dengan fungsi Green. Inversi dimulai pada tahap ini dengan menghitung fungsi Green untuk menghasilkan gelombang sintetik, yang kemudian dibandingkan dengan gelombang yang dicatat oleh stasiun.

Inversi tiga komponen merupakan tahap berikutnya, yang juga terlibat dalam perhitungan fungsi Green. Setelah menyelesaikan tahap ini, akan mendapatkan *mtinv.in* dan memulai input MTINV, MTINV merupakan algoritma yang digunakan untuk representasi matematis dari sumber gempa bumi, setelah tahap tersebut dilanjutkan dengan proses TDMT. Setelah proses TDMT dan didapatkan nilai VR > 50% maka proses perhitungan tersebut dianggap reliable karena menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang cukup baik untuk mempresentasikan data seismik yang diamati, jika nilai VR tidak > 50% tidak memenuhi proses tersebut dapat dilakukan mulai dari proses perhitungan fungsi Green.

Penelitian ini menghasilkan output berupa beachball yang terdiri dari teks, file, dan CMT serta peta gempa bumi. Hasil ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi tipe patahan gempa bumi di sekitar Laut Flores. Berikut adalah diagram alir yang menunjukkan seluruh proses pengolahan data yang dilakukan:



Gambar 3. Diagram alir Analisis Centroid Moment Tensor (CMT) berbasis Time Domain Moment Tensor (TDMT).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berbasis komputasi dengan inversi *moment tensor*. Solusi *moment tensor* diperoleh menggunakan metode *Time Domain Moment Tensor* (TDMT) dengan menggunakan *software* MT Time untuk

mengidentifikasi karakteristik tipe sesar gempa bumi yang terjadi di Laut Flores. Metode ini memanfaatkan model kecepatan gelombang seismik satu dimensi, yang merupakan komponen penting dalam menentukan lokasi gempa bumi yang tepat baik dalam skala lokal maupun regional (Sianipar dan Furqon, 2015).

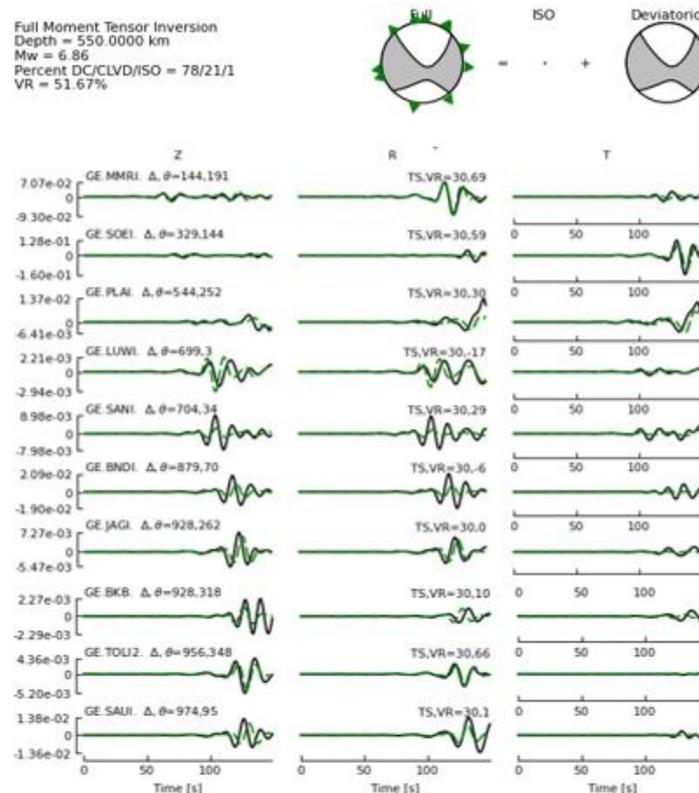
Data *event* gempa bumi dapat diakses secara gratis melalui https://ds.iris.edu/wilber3/find_event. Penelitian ini menggunakan dua *event* gempa bumi yang terjadi di Laut Flores, yaitu pada tanggal 27 Februari 2015 dengan M_w 7.0 yang berada pada *latitude* -7.35° S, *longitude* 122.49° E, dan kedalaman 559.1 km dan untuk *event* gempa bumi pada tanggal 23 Agustus 2016 dengan M_w 6.0 yang berada pada *latitude* -7.28° S, *longitude* 122.42° E, dan kedalaman 532.4 km.

Analisis data dalam penelitian ini menggunakan waveform tiga komponen dan model kecepatan 1-D dalam perhitungan time domain karena lebih mudah diimplementasikan dan lebih efisien. Proses inversi ini mencocokkan data observasi dan data sintetik hasil perhitungan. Penyebab gempa bumi yang terjadi di sekitar Laut Flores dapat diketahui dengan menghitung nilai VR, CLVD, DC, serta ISO menggunakan *software* MTINV.

Dalam penelitian ini, analisis gempa bumi dilakukan dengan inversi Full MT. Inversi Full MT menggambarkan gempa bumi dengan komponen *Variance Reduction* VR), DC, CLVD, dan ISO. Sebaliknya, inversi Deviatoric MT menggambarkan gempa bumi menggunakan komponen VR, DC, dan CLVD tanpa komponen ISO (Vavryčuk, 2001; Suparman *et al.*, 2011). Selain itu, hasil data yang diperoleh melalui *software* MTINV akan dibandingkan dengan hasil data dari Global CMT, sehingga meningkatkan akurasi hasil penelitian.

A. Gempa bumi 27 Februari 2015

Hasil penelitian dengan menggunakan tipe inversi Full MT ditampilkan dalam Gambar 4 berupa grafik. Grafik tersebut menunjukkan beberapa stasiun seismik dengan 3 komponen lokal data yang diamati. Gelombang berwarna hijau mewakili data yang diamati, sedangkan gelombang berwarna hitam mewakili data sintetik, dengan nilai *Variance Reduction* (VR) sebesar 51,67%. Persentase komponen DC adalah 78%, CLVD sebesar 21%, dan ISO sebesar 1%, dengan kedalaman *centroid* mencapai 550 km.



Gambar 4. Hasil inversi *waveform* gempa bumi tanggal 27 Februari 2015.

Dalam penelitian ini diketahui bahwa nilai *Double Couple* (DC) diperoleh lebih tinggi dibandingkan nilai CLVD, yang menunjukkan bahwa gempa bumi di Laut Flores pada 27 Februari 2015 disebabkan oleh aktivitas tektonik. Meskipun ada nilai komponen ISO dalam tipe inversi Full MT, persentase ISO lebih rendah daripada DC, sehingga gempa bumi ini tidak memiliki sumber ledakan.

Hasil Solusi CMT		GCMT	
<i>Strike</i>	139	<i>Strike</i>	137
<i>Dip</i>	81	<i>Dip</i>	79
<i>Rake</i>	-148	<i>Rake</i>	-141
<i>Beachball</i>		<i>Beachball</i>	
Tipe Sesar	<i>Normal right – lateral oblique</i>		<i>Normal right – lateral oblique</i>

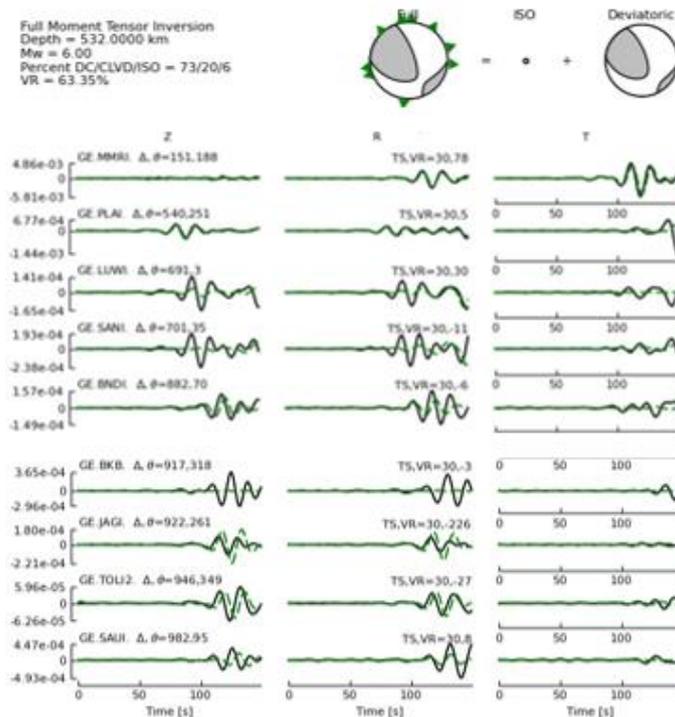
Tabel 1. Perbandingan hasil solusi CMT dan Global CMT gempa bumi tanggal 27 Februari 2015.

Tabel 1 menunjukkan hasil solusi CMT yang menghasilkan nilai nodal plane dengan strike 139, dip 81, dan rake -148. Hasil dari solusi CMT dan Global CMT untuk gempa bumi pada 27 Februari 2015 di sekitar Laut Flores menghasilkan *beachball* yang menggambarkan bentuk *Oblique Fault* atau Sesar Miring (Supendi *et al.*, 2022).

Untuk menentukan tingkat keakuratan solusi CMT yang dihasilkan, diperlukan justifikasi melalui perbandingan terhadap Global CMT dan perhitungan sudut Kagan. Perhitungan sudut Kagan digunakan untuk mendapatkan selisih minimum nilai sudut dari *Strike*, *Dip*, dan *Rake*. Pada gempa bumi tanggal 27 Februari 2015 menunjukkan nilai sudut Kagan sebesar 7.8646° , menunjukkan bahwa nilai sudut Kagan kurang dari 60° memiliki tingkat keakuratan yang lebih tinggi, sedangkan nilai sudut Kagan yang lebih dari 60° menunjukkan perbedaan orientasi yang lebih besar sehingga tingkat keakuratan yang rendah (Kagan, 1991).

B. Gempa bumi 23 Agustus 2016

Gambar 5 menunjukkan hasil penelitian dengan menggunakan tipe inversi Full MT. Grafik ini menunjukkan beberapa stasiun seismik dengan tiga komponen lokal data. Gelombang berwarna hijau mewakili data yang diamati, sementara gelombang berwarna hitam mewakili data sintetik, dengan nilai Variance Reduction (VR) sebesar 63,35%. Persentase komponen DC adalah 73%, CLVD sebesar 20%, dan nilai ISO sebesar 6%, dengan kedalaman centroid mencapai 532 km.



Gambar 5. Hasil inversi *waveform* gempa bumi tanggal 23 Agustus 2016.

Dalam penelitian ini diketahui bahwa nilai *Double Couple* (DC) lebih tinggi dibandingkan dengan nilai CLVD, yang menunjukkan bahwa gempa bumi di Laut Flores pada 23 Agustus 2016 disebabkan oleh aktivitas tektonik. Meskipun terdapat komponen ISO dalam tipe inversi Full MT, persentase ISO lebih rendah daripada persentase DC, sehingga gempa ini tidak memiliki sumber ledakan.

Hasil Solusi CMT		GCMT	
Strike	340	Strike	343
Dip	74	Dip	82
Rake	118	Rake	139
Beachball			
Jenis Sesar	<i>Reverse right – lateral oblique</i>		<i>Reverse right – lateral oblique</i>

Tabel 2. Perbandingan hasil solusi CMT dan Global CMT gempa bumi tanggal 27 Februari 2015.

Tabel 2 menunjukkan hasil solusi CMT menghasilkan nilai *nodal plane* yang memiliki nilai *strike* 340, nilai *dip* 74, nilai *rake* 118. Hasil dari solusi CMT dan Global CMT pada gempa bumi tanggal 23 Agustus 2016 di sekitar Laut Flores menghasilkan *beachball* yang medeskripsikan bentuk *Oblique Fault* / Sesar miring (Supendi *et al.*, 2022).

Gempa bumi tanggal 23 Agustus 2016 menunjukkan nilai sudut Kagan sebesar 22.0670°, menunjukkan bahwa nilai sudut Kagan kurang dari 60° memiliki tingkat keakuratan yang lebih tinggi, sedangkan nilai sudut Kagan yang lebih dari 60° menunjukkan perbedaan orientasi yang lebih besar sehingga tingkat keakuratan yang rendah (Kagan, 1991).

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Hasil solusi Centroid Moment Tensor (CMT) menggunakan metode Time Domain Moment Tensor (TDMT) gempa bumi di sekitar Laut Flores menggunakan Full MT yang menghasilkan nilai presentase VR sebesar lebih dari 50%, dengan nilai presentase DC yang paling dominan dari kedua gempa bumi tersebut, dari presentase DC yang dominan diketahui bahwa gempa bumi yang terjadi akibat aktivitas tektonik. Hasil dari solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT) juga dibandingkan dengan Global CMT dan perhitungan sudut Kagan. Dan Tipe patahan gempa bumi yang terjadi di sekitar Laut Flores keduanya memiliki tipe patahan yang sama, yaitu sesar miring / *oblique fault*.

B. Saran

Dalam penelitian ini perlu memperhatikan hasil data dari stasiun seismik yang merekam gempa bumi tersebut meliputi empat kuadran penuh untuk mendapatkan hasil inversi dan nilai VR yang baik pada kedalaman yang sesuai dengan Global CMT, serta melakukan perhitungan sudut Kagan untuk mendapatkan kecocokan selisih sudut *strike*, *dip*, dan *rake*.

DAFTAR PUSTAKA

- Chiang, A., Dreger, D. S., Ford, S. R., Walter, W. R., & Yoo, S. H. (2016). Moment tensor analysis of very shallow sources. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(6), 2436-2449.
- Chiang, A., Gök, R., Tarabulsi, Y. M., El-Hadidy, S. Y., Raddadi, W. W., & Mousa, A. D. (2021). Seismic source characterization of the Arabian Peninsula and Zagros Mountains from regional moment tensor and coda envelopes. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-17.
- Darman, H. (2000). An outline of the geology of Indonesia. Lereng Nusantara.
- Dreger, D. S. (2003). 85.11 TDMT_INV: Time domain seismic moment tensor inversion. *International geophysics*, 1627.
- Ezgi Güvercin, S. (2024). 2023 Earthquake Doublet in Türkiye Reveals the Complexities of the East Anatolian Fault Zone: Insights from Aftershock Patterns and Moment Tensor Solutions. *Seismological Research Letters*, 95(2A), 664-679.

- Felix, R., Hubbard, J., Bradley, K., Lythgoe, K., Li, L., & Switzer, A. (2021). Tsunami hazard in Lombok & Bali, Indonesia, due to the Flores backarc thrust. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2021, 1-26.
- Kagan, Y. Y. (1991). 3-D Rotation of Double-Couple Earthquake Sources. *Geophys. J. Int.* 106, 709 – 716.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., & Syafi'i, M. A. (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- Koulali, A., McClusky, S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning, P., & Wijanarto, A. B. (2017). The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: Implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, 458, 69-79.
- Pasari, S., Simanjuntak, A. V., Mehta, A., Neha, & Sharma, Y. (2021). The current state of earthquake potential on Java Island, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 2789-2806.
- Sianipar, D. S. J and Raharjo F. D., Model Kecepatan Lokal Gelombang P Satu Dimensi Wilayah Toba, Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Andalas (SNFUA), 2015, pp. 110-116.
- Silver, E. A., Reed, D., McCaffrey, R., & Joyodiwiryo, Y. (1983). Back arc thrusting in the eastern Sunda arc, Indonesia: A consequence of arc-continent collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B9), 7429-7448.
- Sunardi, B., & Istikomah, M. Sulastrri (2017). "Analisis Seismotektonik dan Periode Ulang Gempa bumi Wilayah Nusa Tenggara Barat, Tahun 1973-2015". *Jurnal Riset Geofisika Indonesia*, 1(1), 23-28.
- Suparman, Y., Kriswati, E., & Pamitro, Y. E. (2011). Mechanism of High Frequency Shallow Earthquake Source in Mount Soputan, North Sulawesi. *Indonesian Journal on Geoscience*, 6(3), 135-144.
- Supendi, P., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Abdullah, C. I., Rawlinson, N., Cummins, P. R., & Miller, M. S. (2020). Fate of Forearc lithosphere at arc-continent collision zones: Evidence from local earthquake tomography of the Sunda-Banda Arc Transition, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 47(6), e2019GL086472.
- Supendi, P., Rawlinson, N., Prayitno, B. S., Widiyantoro, S., Simanjuntak, A., Palgunadi, K. H., & Arimuko, A. (2022). The Kalaotoa Fault: A newly identified fault that generated the M w 7.3 Flores Sea earthquake. *The Seismic Record*, 2(3), 176-185.
- Taruna, R. M., Octhav, 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. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 11(1), 29-37.
- Vavryčuk, V. (2001). Inversion for parameters of tensile earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B8), 16339-16355.
- Yang, X., Singh, S. C., & Tripathi, A. (2020). Did the Flores backarc thrust rupture offshore during the 2018 Lombok earthquake sequence in Indonesia. *Geophysical Journal International*, 221(2), 758-768.