

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 13 Nomor 1 Tahun 2023, hal 49-61

PENENTUAN AKURASI CENTROID MOMENT TENSOR (CMT) GEMPABUMI SECARA *REAL-TIME* DAN OTOMATIS DI SULAWESI DENGAN METODE GISOLA PADA SOFTWARE JOKO TINGKIR

¹⁾Ruhi Asandi, ²⁾Muhammad Nurul Fahmi ³⁾Madlazim

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: ruhi.19042@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

Gempabumi tektonik reaktif sering terjadi di Indonesia, gempabumi tektonik merupakan gempa yang dipicu karena adanya pergerakan pada lempeng tektonik. Sulawesi merupakan salah satu daerah relatif rawan terhadap gempabumi di Kepulauan Indonesia. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis akurasi *Centroid Momen Tensor* (CMT) hasil penentuan *real-time* dan otomatis serta untuk mengetahui cara merevisi dari hasil penentuan CMT gempabumi *real-time* dan otomatis menggunakan metode Gisola dalam *software* Joko Tingkir pada gempabumi di Sulawesi. Penelitian ini berbasis komputasi dengan menggunakan metode Gisola, dengan variabel manipulasi yaitu sample frekuensi waveform, stasiun seismik, dan model kecepatan. Variabel kontrolnya yaitu Sulawesi sebagai daerah penelitian dan tahun kejadian gempabumi 2018-2022. Kemudian variabel responnya yaitu parameter CMT gempabumi yaitu *centroid time*, *magnitude*, *latitude*, *longitude*, *depth* dan *beachball*. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dengan melakukan analisis parameter CMT seperti membandingkan nilai *strike*, *dip* dan *rake* diperoleh hasil bahwa nilai *R-square strike* 87.92 %; *R-square dip* 94.28%; *R-square rake* 90.76%, nilai tersebut identik dengan *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT). Gempabumi terkenal di Sulawesi yang terjadi pada tanggal 28 September 2018 memiliki mekanisme *strike-slip*. Revisi dari hasil CMT gempabumi *real-time* dan otomatis menggunakan metode Gisola dalam *software* Joko Tingkir pada gempa di Sulawesi dilakukan dengan cara penyesuaian stasiun seismik yang merekam, sample frekuensi data waveform yang digunakan, serta model kecepatan yang digunakan.

Kata Kunci: Gempabumi, *Centroid Momen Tensor* (CMT), Gisola, Joko Tingkir, *Strike*, *dip*, dan *rake*

Abstract

Tectonic earthquakes are relatively common in Indonesia, tectonic earthquakes are earthquakes that are triggered due to movement in the tectonic plates. Sulawesi is one of the areas relatively prone to earthquakes in the Indonesian Archipelago. This research aims to analyze the accuracy of the *Centroid Moment Tensor* (CMT) results from *real-time* and automatic determinations and to find out how to revise the results from *real-time* and automatic CMT determinations for earthquakes using the Gisola method in Joko Tingkir software for earthquakes in Sulawesi. This research is computationally based using the Gisola method, with manipulated variables, namely waveform frequency samples,

seismic stations, and velocity models. The control variables are Sulawesi as the research area and the year the earthquake occurred 2018-2022. Then the response variables are the earthquake CMT parameters, namely centroid time, magnitude, latitude, longitude, depth and beachball. Based on the analysis that has been carried out by analyzing CMT parameters such as comparing strike, dip and rake values, the results show that the R-square strike value is 87.92%; R-square dip 94.28%; R-square rake is 90.76%, this value is identical to the Global Centroid Moment Tensor (GCMT). The famous earthquake in Sulawesi that occurred on September 28 2018 had a strike-slip mechanism. Revision of real-time and automatic earthquake CMT results using the Gisola method in Joko Tingkir software for the earthquake in Sulawesi was carried out by adjusting the seismic station that recorded it, the frequency sample of the waveform data used, and the velocity model used.

Keywords: Earthquake, Centroid Moment Tensor (CMT), Gisola, Joko Tingkir, Strike, dip, and rake

I. PENDAHULUAN

Gempabumi tektonik realtif sering terjadi di Indonesia, gempabumi tektonik merupakan gempa yang dipicu karena adanya pergerakan pada lempeng tektonik. Pergerakan pada perbatasan lempeng atau patahan menjadikan energi akan terakumulasi dan jika lapisan batuan tidak mampu menahan energi tersebut, maka energi akan terlepas menyebabkan terjadinya patahan pada lapisan kerak Bumi dan patahan di bagian atas kerak Bumi (Shao et al., 2022). Sulawesi merupakan salah satu daerah relatif rawan terhadap gempabumi di Kepulauan Indonesia. Daerah Sulawesi memiliki koordinat $0^{\circ}12'-8^{\circ}$ LS dan $116^{\circ}48'-122^{\circ}36'$ BT dan terletak di antara dua benua yaitu Benua Asia dan Benua Australia (Zhang et al., 2019). Tumbukan pada LempengwPasifik, BenuawAsia, dan Benua Australia mengakibatkan pada bagian timur Pulau Sulawesi menjadi satu. Tumbukanwini juga membentuk gunung api pada MandalawGeologiwsulawesi Barat, patahanwPalu-Koro, Patahan Walane di bagian barat. Kemudian patahan Matano dan patahan Lawanopo pada bagian timur, dan patahan Gorontalo pada Sulawesi bagian utara (Fajriani, 2021).

Centroid Moment Tensor (CMT) merupakan salahsatu metode yang dapat digunakan dalam ilmu seismologi untuk menganalisis mekanisme sumber gempabumi dengan memanfaatkan datawgelombang seismik. Metode ini didasarkan dengan anggapan bahwa gempabumi terjadi ketika batuan di bawah permukaan bumi mengalami tekanan yang cukup besar sehingga terjadi retakan dan pelepasan energi seismik (Vasyura-Bathke et al., 2021). CMT digunakan untuk memperkirakan mekanisme sumber gempabumi berdasarkan data seismik yang terukur dari beberapa stasiun seismik di sekitar gempabumi.

Geographic Information System (GIS) atau disebut dengan GIS-based Improved Source Location Algorithm (GISOLA). GISOLA melakukan integrasi terhadap data seismik dan hidroakustik dengan data geografis dan oseanografi, sehingga menghasilkan perkiraan yang lebih akurat tentang mekanisme sumber gempa bumi yang terjadi di bawah laut bahkan dengan memperhitungkan kondisi lingkungan laut (Triantafyllis et al., 2021). Penentuan momen tensor (MT) otomatis sangat penting untuk aplikasi seismologi *real-time* (Takemura et al., 2020).

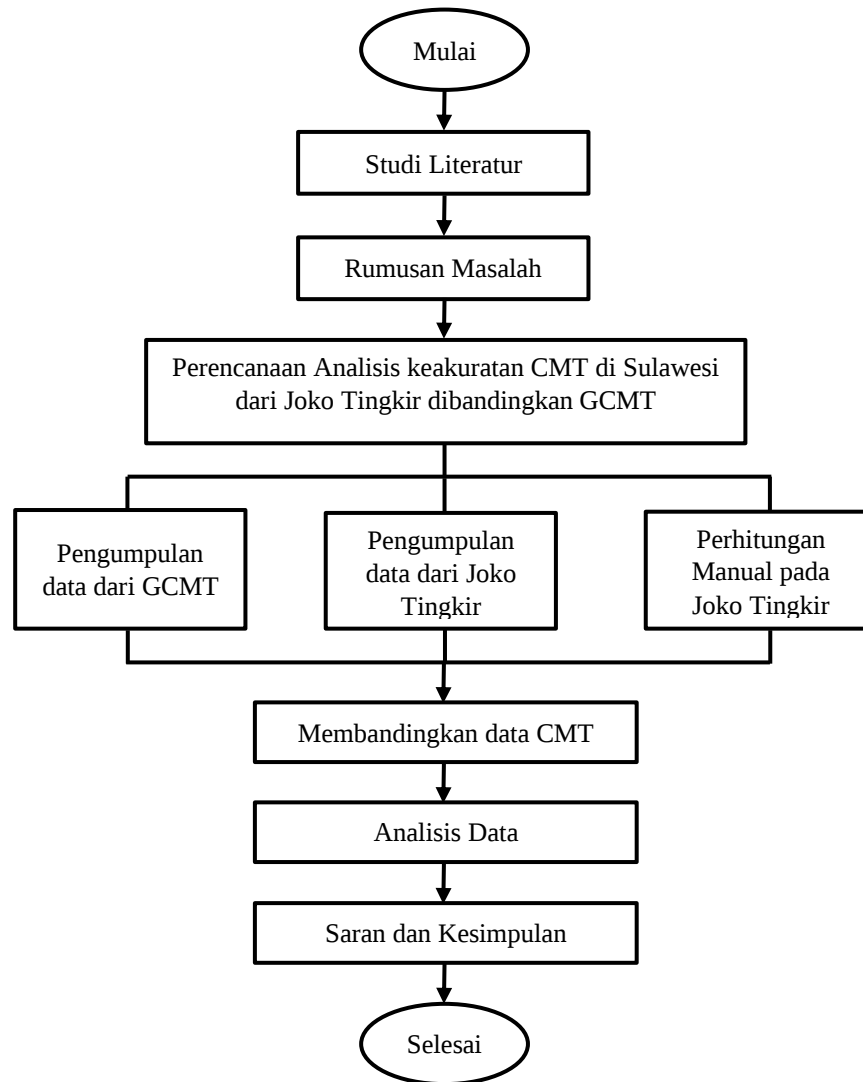
Penelitian dengan topik “Penentuan Akurasi Centroid Momen Tensor (CMT) Gempabumi Secara *Real-time* dan Otomatis di Sulawesi dengan Metode Gisola pada Software Joko Tingkir” perlu untuk dilakukan sebagai penentuan keakuratan dan efektivitas CMT dari software Joko Tingkir untuk memberikan peringatan dini bencana gempabumi dan sebagai bahan pertimbangan penelitian selanjutnya.

II. METODE

Penelitian yang akan dilakukan yaitu penelitian berbasis komputasi. Mekanisme penelitiannya meliputi kegiatan mengambil data, mengolah data sekunder yang berbasis komputasi, yang data tersebut di analisis dengan metode Gisola.

A. Rancangan Penelitian

Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Dari diagram alir penelitian di atas dapat dijelaskan yang pertama dilakukan yaitu studi literatur mengenai permasalahan terkait penentuan CMT secara *real-time* dan otomatis, selanjutnya merumuskan masalah yang akan diteliti, selanjutnya studi literatur mengenai metode dan teknik pengolahan data sesuai dengan rumusan masalah. Selanjutnya perencanaan perencanaan analisis keakuratan CMT di Sulawesi dari Joko Tingkir dibandingkan GCMT, dengan melakukan pengumpulan data dari Joko Tingkir, GCMT, dan melakukan perhitungan manual data Joko Tingkir. Selanjutnya membandingkan data *real-time* dan otomatis Joko Tingkir dengan CMT dan membandingkan juga data hasil revisi Joko Tingkir dengan GCMT. Apabila hasilnya sudah sesuai maka dapat diperoleh kesimpulan dan Penelitian selesai.

B. Variabel Penelitian

Variabel Penelitian ini terdiri dari variabel manipulasi, variabel kontrol, dan variabel respon. Variabel manipulasi dari penelitian ini yaitu sample frekuensi waveform, stasiun seismik, dan model kecepatan. Variabel kontrol dari Penelitian ini yaitu Daerah Sulawesi sebagai daerah penelitian dengan koordinat $0^{\circ}12' - 8^{\circ}$ LS dan $116^{\circ}48' - 122^{\circ}36'$ BT, tahun kejadian gempa tahun 2018-2022, data dari GCMT. Kemudian variabel

responya yaitu Parameter CMT gempabumi yaitu centroid time, magnitude, latitude, longitude, depth dan beachball.

C. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan tiga jenis pengambilan data, yaitu pengambilan data sekunder, data input, dan data output Joko Tingkir. Berikut adalah penjelasan dari teknik pengambilan datanya. Proses pengumpulan data dari *software* Joko Tingkir yaitu dengan mengunduh data gempabumi yang berstatus preliminary melalui website Joko Tingkir yang di akses melalui situs <http://jokotingkir.unesa.ac.id/> kemudian pilih wilayah Sulawesi pada tahun 2018-2022 dengan besar magnitude gempa $M_w > 5.5$. Kemudian proses pengambilan data dari GCMT yang dapat diakses melalui link <https://www.Globalcmt.org/>. Pengolahan data pada penelitian ini menggunakan metode Gisola dan perhitungan manual pada *software* Joko Tingkir. Pada metode Gisola terbagi menjadi 6 tahapan yaitu pertama membaca data gempa bumi dari International Federation of Digital Seismograph Networks Web Services (FDSNWS)-event, kemudian tahap kedua memilih stasiun terbaik dari meta data base FDSNSW-station. Tahap ketiga yaitu mengambil data waveform gempabumi dari FDSN-dataset. Tahap ke empat yaitu melakukan perhitungan fungsi Green sebagai pemodelan kedepan moment tensor. Tahap kelima proses inversi moment tensor (MT) secara *real-time* dan otomatis. Kemudian yang terakhir adalah plot hasil proses inversi MT menjadi produk peta centroid moment tensor (CMT), parameter MT, dan plot beachball.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan parameter moment tensor (MT) dari Joko Tingkir dengan hasil dari Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Data dari GCMT gempabumi di Wilayah Sulawesi pada tahun 2018-2023 dengan skala $> 5.5 M_w$ dikumpulkan untuk selanjutnya digunakan sebagai pembanding dari hasil estimasi Centroid Moment Tensor (CMT) Joko Tingkir. Pencarian data di GCMT dilakukan dengan menginputkan rentang tahun dari 2018-2023, dengan latitude -10o sampai 10o, longitude 90o sampai 145o, dan magnitude lebih besar dari 5.5 M_w . Setelah data dari GCMT diperoleh kemudian dimasukan ke tabel. Selanjutnya mencari data pada Joko Tingkir dilakukan dengan memilih gempabumi yang memiliki magnitude $> 5.5 M_w$ dengan status preliminary artinya data masih bersifat *real-time* dan otomatis belum direvisi secara manual.

Solusi MT *real-time* dan otomatis atau preliminary ditandai dengan [A], kemudian dicatat secara otomatis oleh perangkat lunak Gisola. Solusi CMT ini belum direvisi oleh para seismolog dan dapat berisi informasi dengan kualitas yang tidak pasti, sedangkan yang sudah ditinjau atau data hasil revisi ditandai dengan [M]. Kualitas solusi ditulis dengan nilai A, B, C, D dikombinasikan dengan 1,2,3,4, dengan A1 menunjukkan solusi gempabumi dengan kualitas yang paling bagus, sedangkan D4 menunjukkan solusi gempa bumi paling buruk atau tidak bisa dipercaya (Triantafyllis et al., 2021). Semakin besar variable angkanya atau hurufnya maka kualitasnya semakin buruk.

Stasiun seismik yang digunakan adalah milik Federation of Digital Seismograph Networks Web Services (FDSNWS) dengan network GSN, GE, dan PS. Stasiun seismik merekam gempabumi memiliki tiga komponen lokal yang teramati dan disimbolkan dengan N untuk komponen tangensial, E untuk komponen Radial, dan Z untuk komponen vertikal. Joko Tingkir juga dapat memberikan inversi MT yang lengkap secara *real-time* dan otomatis meliputi nilai persentase Variance Reduction (VR), Double Couple (DC), Compensated Linier Vector Dipole (CLVD) dan Isotropic (ISO).

Pada GCMT menggunakan data teleseismik, yaitu data gelombang gempa yang menjalar jauh dengan jarak lebih dari 2000 km, sehingga data yang dimunculkan oleh GCMT biasanya cenderung lebih lama mencapai 2-4 hari (Shuler et al., 2013). Sedangkan data dari Joko Tingkir menggunakan data regional dan lokal dengan pengolahan data berbasis komputasi tinggi dengan metode Gisola, sehingga data bisa diproses secara *real-time* dan otomatis dengan waktu kurang dari 15 menit (Triantafyllis et al., 2021). Beberapa data otomatis

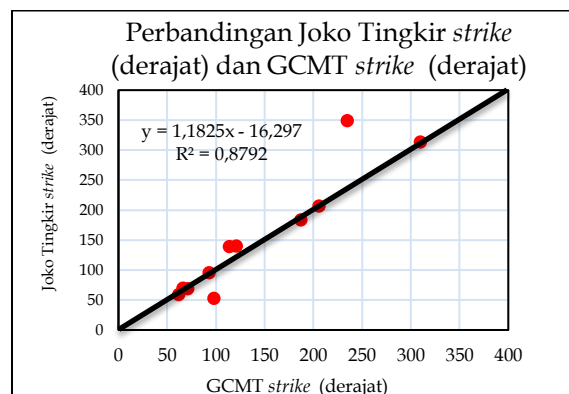
yang dihasilkan dapat disesuaikan kembali atau di revisi secara manual apabila terdapat perbedaan yang signifikan terhadap GCMT.



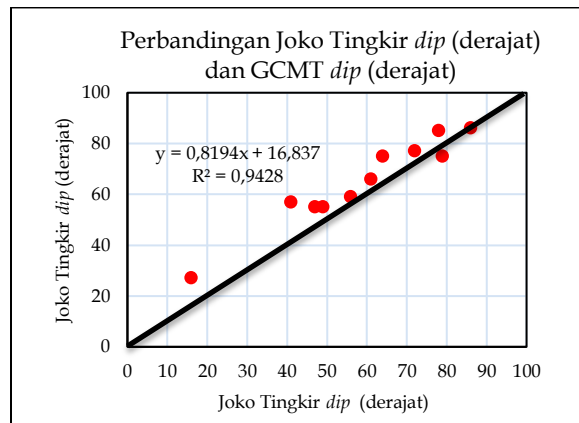
Gambar 1. Stasiun seismik yang digunakan merekam *event* gempabumi dari FDSNWS dengan *network* GSN, GE, dan PS

Berdasarkan persebaran stasiun seismik tersebut dapat diketahui bahwa *event* gempabumi mayoritas *event* gempabumi memenuhi 4 kaudran sehingga memiliki kualitas gempabumi A. Gempabumi pada tanggal 28 September 2018 pukul 10.02 terjadi pada *latitude* -0.51° dan *longitude* 119.86° tidak memenuhi 4 kuadran karena pada kuadran I tidak terdapat stasiun seismik yang merekam, sehingga kualitasnya menjadi B4. Kemudian *event* gempabumi pada tanggal 24 Oktober 2019 pukul 13.38 terjadi pada *latitude* 1.2° dan *longitude* 124° pada posisi tersebut juga dibagian kuadran I dan IV tidak terdapat stasiun seismik yang merekam sehingga kualitas *event* tersebut menjadi B1. Selain stasiun seismik yang merekam data gempabumi, *noise* juga berpengaruh terhadap kualitas gempabumi. Kualitas gempabumi masih bisa ditingkatkan dengan cara mengeleminasi *noise* pada masing masing komponen yang terdapat *noise* di stasiun seismik (Madlazim *et al.*, 2015).

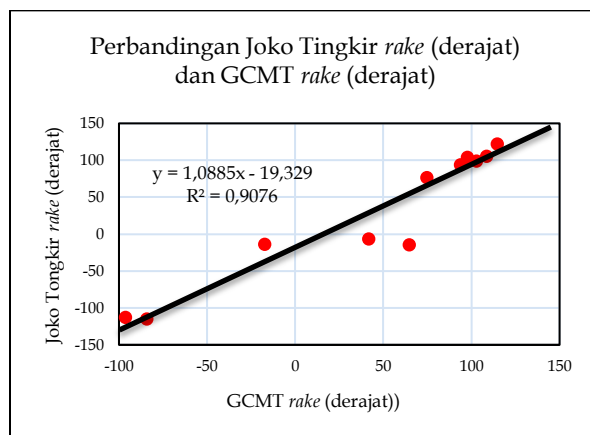
Nilai *strike*, *dip* dan *rake* merupakan nilai yang menunjukkan karakteristik patahan yang menentukan orientasi patahan normal dan komponen tangensial vektor dislokasi sepanjang patahan (Vavryčuk, 2011). Hasil *strike*, *dip*, dan *rake* dapat digunakan untuk membuat *beachball* yang menggambarkan mekanisme patahan. Perbandingan nilai *strike*, *dip* dan *rake* Joko Tingkir dibandingkan dengan GCMT berdasarkan tabel 4.1 dapat ditunjukan oleh grafik sebagai berikut.



Gambar 2 Grafik perbandingan *strike* Joko Tingkir dengan GCMT



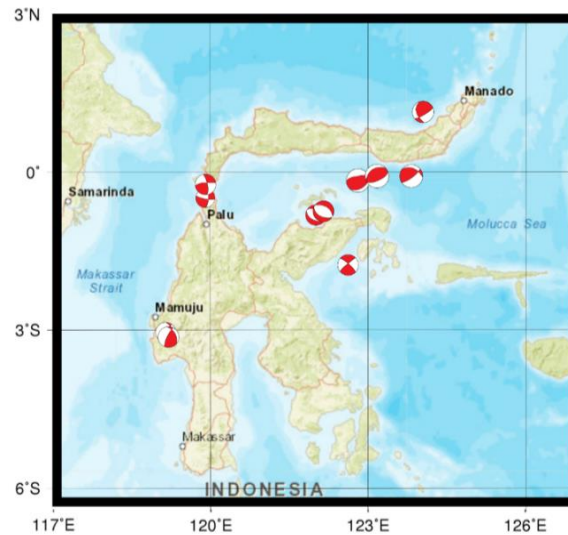
Gambar 3 Grafik perbandingan *dip* Joko Tingkir dengan GCMT



Gambar 4 Grafik perbandingan *rake* Joko Tingkir dengan GCMT

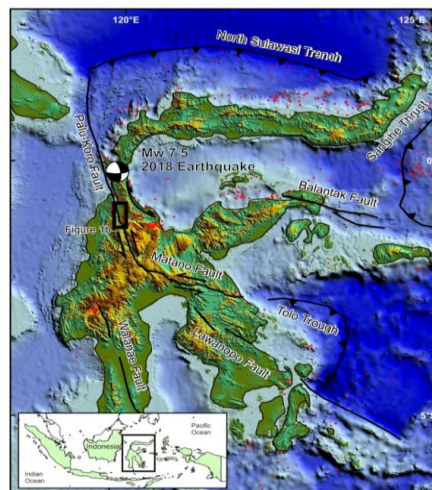
Perbandingan nilai *strike*, *dip* dan *rake* antara Joko Tingkir dengan GCMT pada gambar 2, 3, dan 4 pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa perbandingan menghasilkan garis yang linier sehingga dapat dikatakan nilainya berdekatan, dengan melihat letak titik-titik dalam grafik berada di sekitar garis yang menunjukkan bentuk garis linieritas atau kelurusan, sehingga bentuk regresi pada data penelitian ini yaitu berupa regresi linier (Uyanik *et al.*, 2013). Berdasarkan ketiga grafik tersebut dapat diperoleh nilai sebagaiberikut; pada gambar 4.2 nilai $R^2 = 0.8792$ dan $y = 1.1825x - 16.297$; pada gambar 4.3 nilai $R^2 = 0.9428$ dan $y = 0.8194x + 16.837$; pada gambar 4.4 nilai $R^2 = 0.9076$ dan $y = 1.0885x - 19.329$. Nilai *R-square* (R^2) pada perbandingan tersebut bernilai 0.8792 atau 87.92 %; 0.9428 atau 94.28%; 0.9076 atau 90.76%, nilai tersebut mendekati 100%. *R-square* dengan model yang paling baik adalah model yang nilai *R-square* nya mendekati 100%. Semakin nilai *R-square* mendekati nilai 100% maka nilainya akan semakin identik dan semakin bagus (Israeli 2007).

Nilai *strike*, *dip* dan *rake* menentukan kecenderungan mekanisme gempabumi dimana nilai tersebut dihasilkan karena diakibatkan oleh beberapa faktor, seperti karakteristik patahan, *thrust*, maupun aktivitas gunung api (Villeneuve *et al.*, 2002). Gempabumi dapat dipetakan persebarannya sehingga dapat dianalisis apakah kecenderungan karakteristik gempabuminya diakibatkan oleh karakteristik patahannya atau faktor lainnya. Peta persebaran gempabumi di Wilayah Sulawesi dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 5. Persebaran gempabumi di Wilayah Sulawesi pada tahun 2018-2023

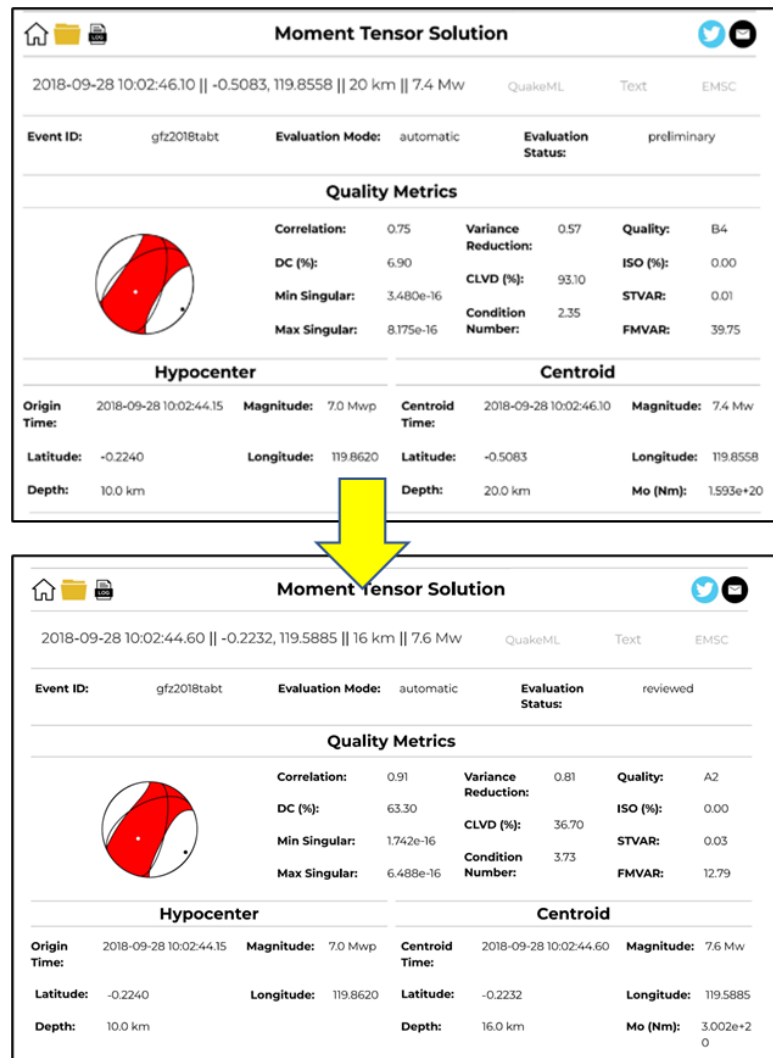
Peta persebaran gempabumi pada gambar 5 menunjukkan mekanisme gempabumi di Wilayah Sulawesi cenderung bersifat *strike-slip*. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik patahannya. Berikut adalah karakteristik patahan yang ada di Wilayah Sulawesi.



Gambar 6. Peta patahan tektonik di Wilayah Sulawesi (Patria et al., 2020)

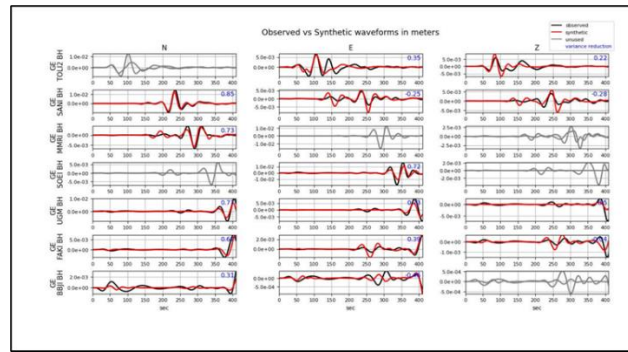
Pada gambar 6 dapat diketahui persebaran patahan yang ada di Wilayah Sulawesi sehingga dapat diketahui batas dari masing masing patahan. Patahan yang ada di Wilayah Sulawesi cukup banyak, hal tersebut yang memicu terjadinya banyak gempabumi di Wilayah Sulawesi (Sassa et al., 2019).

Gempabumi pada tanggal 28 September 2018 pukul 10.02 terjadi pada latitude -0.72 dan longitude 119.86 yang merupakan daerah di Sulawesi yang dilalui oleh jalur patahan Palu-Koro. Patahan Palu-Koro adalah patahan besar atau bisa dikatakan patahan utama di Pulau Sulawesi yang berstatus aktif (Bellier et al., 2001). Patahan Palu-Koro memiliki panjang kurang lebih 240 km yang terbentang dari sebelah utara Kota Palu ke arah selatan hingga Teluk Bone. Patahan ini memiliki jenis sinitral yang aktif dengan kecepatan pergeseran 25 hingga 30 mm/tahun. Episentrum gempabumi berada 80 km sebelah utara kota Palu atau pada kordinat $0,2559^{\circ}\text{LS}-119,8462^{\circ}\text{BT}$ (Shao et al., 2022).



Gambar 7. Hasil inversi waveform gempabumi tanggal 28 September 2018 pukul 10.02 sebelum direvisi (atas) dan sesudah direvisi (bawah)

Nilai VR sebesar 0.57 atau 57% meningkat menjadi 0.81 atau 81 % setelah direvisi. Kemudian magnitude (Mw) sebesar 7.4 Mw berubah menjadi 7.6 Mw. Besarnya DC sebesar 6.9% dan CLVD 93.1% berubah menjadi DC sebesar 63.3% dan CLVD 36.7%. Kedalaman centroid 20 km berubah menjadi 16 km. Karena Nilai DC nya lebih besar dari CLVD sehingga bisa diindikasikan bahwa gempabumi yang terjadi cenderung diakibatkan oleh aktivitas tektonik. Kemudian dapat diketahui kecocokan fitting gelombang hasil inversi menghasilkan nilai VR sebesar 81% yang berarti kualitas gempa sudah cukup baik karena nilai VR lebih dari 50%. Gempabumi pada tanggal 28 September 2018 pukul 10.02 ini juga menghasilkan gelombang tsunami lokal yang memiliki ketinggian hingga 8-10 m di dataran pesisir Teluk Palu (Heidarzadeh et al., 2019). Tektonik di wilayah Sulawesi dipengaruhi oleh gerakan relatif antara beberapa lempeng mikro yang berinteraksi karena konvergensi Australia, Pasifik dan Lempeng Laut Filipina. Akibat dari gerakan tersebut menjadikan pertambahan batuan sedimen laut, batuan vulkanik, dan fragmen Benua Australia (Spencer, 2011).



Gambar 8. Fitting otomatis gelombang antara data teramati stasiun seismik (garis hitam) dan data sintetik dari Joko Tingkir (garis merah)

Pada gambar 8 merupakan hasil gambar fitting otomatis gelombang antara data teramati stasiun seismik dan data sintetik yang telah dihitung melalui fungsi Green dalam Joko Tingkir. Stasiun seismik merekam gempabumi memiliki tiga komponen lokal yang teramati dan disimbolkan dengan N untuk komponen tangensial, E untuk komponen radial, dan Z untuk komponen vertikal. Gelombang berwarna hitam merupakan gelombang yang teramati di stasiun seismik dan gelombang berwarna merah merupakan bentuk gelombang sintetik dari perhitungan. Hasil kecocokan fitting gelombang di tentukan oleh nilai Variance Reduction (VR), apabila nilai VR lebih dari 50% maka dapat dikatakan hasil CMT dianggap reliable (Vackáar et al., 2017). Pada stasiun yang digunakan untuk merekam filter sinyal broadband yang terekam difilter dengan frekuensi inversi waveform antara 0.015-0.02 Hz dengan model kecepatan yang digunakan adalah ak135.vz. Frekuensi dan model kecepatan yang digunakan disesuaikan dengan karakteristik geologi yang ada di Sulawesi. Pencocokan model kecepatan dapat dilakukan secara otomatis oleh Joko Tingkir, namun masih bisa disesuaikan Kembali sehingga model kecepatan dan frekuensi yang digunakan sesuai dengan event gempabumi.

Tabel 1. Perbandingan antara solusi CMT Joko Tingkir *real-time* dan otomatis, solusi CMT Joko Tingkir hasil revisi *real-time* dan otomatis, dan GCMT pada gempabumi tanggal 28 September 2018 pukul 10.02

Focal Mechanism		GCMT	Joko Tingkir <i>real-time</i> dan otomatis	Joko Tingkir hasil revisi
Beach Ball				
Mw		7.6	7.4	7.6
Centroid Time		10:02:59:40	10:02:46:10	10:02:44:60
Latitude		-0.72	-0.5083	-0.2232
Longitude		119.86	119.8558	119.5885
Depth (km)		12.0	20.0	16.0
Nodal Plane 1	Strike	348	235	212
	Dip	57	41	36
	Rake	-15	121	94
Nodal Plane 2	Strike	87	16	26
	Dip	77	55	53
	Rake	-146	65	86
Karakteristik		Strike-slip	Strike-slip	Strike-slip

Pada tabel 1 dapat diketahui bahwa gempabumi pada tanggal 28 September 2018 10.02 data hasil *real-time* dan otomatis dari software Joko Tingkir serta hasil CMT manual atau revisi dari *real-time* dan otomatis dari Joko Tingkir menunjukkan nilai dari *strike*, *dip*, dan *rake* mirip dengan GCMT sebagai pembanding, kemudian setelah direvisi hasilnya menunjukkan perubahan yang lebih baik. Hasil dari analisis Penelitian ini sejalan dengan yang telah dilakukan oleh Gallant et al, (2020) dimana pada penelitiannya mengemukakan longsor besar yang terjadi akibat gempabumi ini. Mekanisme gempabumi yang terjadi dipengaruhi oleh karakteristik patahanya (Carvajal et al., 2019). Gempabumi ini terjadi di sekitar Patahan Palu-Koro, dimana patahan ini memiliki karakteristik strike-slip (Patria et al., 2020).

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dengan melakukan analisis parameter CMT seperti membandingkan nilai *strike*, *dip* dan *rake* diperoleh hasil bahwa nilai R-square *strike* 87.92 %; R-square *dip* 94.28%; R-square *rake* 90.76%, nilai tersebut identik dengan GCMT ditunjukkan dengan nilai R²-square mendekati 100% dimana hal tersebut merupakan model yang bagus (Israeli, 2007). Gambar beachball yang dihasilkan oleh Joko Tingkir identik dengan GCMT yang menunjukkan mekanisme gempabumi yang sama. Mekanisme gempabumi yang terjadi dipengaruhi oleh karakteristik patahanya dimana ketika patahanya bersifat strike-slip maka gempabumi yang terjadi juga akan memiliki kecenderungan strike-slip. Stasiun seismik yang digunakan untuk merekam tidak harus memenuhi 4 kuadran agar data Joko Tingkir berkualitas bagus.

Keseluruhan event gempabumi bagus ditunjukkan dengan nilai persentase dari VR seluruh event gempabumi melebihi 50%, dimana ketika nilai VR lebih dari 50% maka dianggap reliabel (Vackáar et al., 2017). Analisis nilai DC menunjukkan gempabumi di Wilayah Sulawesi lebih banyak disebabkan karena adanya aktivitas tektonik daripada aktivitas vulkanik ditunjukkan dengan nilai DC lebih besar dari CLVD, dimana nilai DC menunjukkan aktivitas tektonik dan CLVD menunjukkan aktivitas vulkanik (Padgett et al., 1999, Omira et al., 2019, Shuler et al., 2013). Gempabumi yang besar dan terkenal di Sulawesi yaitu pada tanggal 28 September 2018 pukul 10.02 memiliki mekanisme strike-slip dengan gempabumi disebabkan karena aktivitas tektonik karena nilai DC nya lebih besar daripada CLVD. Sehingga berdasarkan analisis tersebut dapat diketahui bahwa secara keseluruhan hasil penentuan CMT secara *real-time* dan otomatis pada Joko Tingkir memiliki akurasi yang tinggi. Jika terus dikembangkan Joko Tingkir dapat dipertimbangkan sebagai salah satu media early-warning system yang cukup akurat mengingat perhitungannya secara *real-time* dan otomatis serta dilakukan dalam waktu yang singkat dan akurat.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Akurasi hasil Centroid Momen Tensor (CMT) secara *real-time* dan otomatis menggunakan metode Gisola dalam software Joko Tingkir pada gempabumi di Sulawesi menunjukkan bahwa mekanisme gempabumi yang terjadi antara hasil CMT *real-time* dan otomatis Joko Tingkir dibandingkan dengan hasil CMT Global centroid Moment Tensor (GCMT) menunjukkan hasil yang signifikan sama. Dari 11 data gempabumi yang digunakan seluruhnya menunjukkan parameter CMT hasil *real-time* dan otomatis memiliki akurasi yang tinggi ketika dibandingkan dengan hasil GCMT. Revisi dari hasil CMT gempabumi *real-time* dan otomatis menggunakan metode Gisola dalam software Joko Tingkir pada gempa di Sulawesi dilakukan dengan cara penyesuaian stasiun seismik yang merekam, sample frekuensi data waveform yang digunakan, serta model kecepatan yang digunakan. Gempabumi yang terjadi pada tanggal 28 September 2018 pukul 10.02 yang berkualitas B4 berubah menjadi A2 sehingga keakuratan hasil CMT meningkat, ditunjukkan pada gambar beachball pada hasil revisi lebih identik dengan beachball GCMT dibandingkan dengan beachball sebelumnya yang secara *real-time* dan otomatis.

B. Saran

Berdasarkan Penelitian yang telah dilakukan maka dapat diberikan saran kepada peneliti selanjutnya ataupun untuk pengembangan penelitian ini kedepannya.

1. Ketika mengumpulkan data sekunder pada website GCMT dan Joko Tingkir hendaknya menggunakan akun yang sama sehingga memudahkan proses tracking data.
2. Ketika melakukan penelitian hendaknya memilih event gempabumi yang memenuhi 4 kuadran stasiun seismik
3. Akurasi penentuan CMT real-time otomatis Joko Tingkir cukup tinggi sehingga kedepannya disarankan Joko Tingkir sebagai early-warning system saat terjadi gempabumi yang berpotensi dapat menimbulkan tsunami sebagai upaya mitigasi bencana alam.

DAFTAR PUSTAKA

- Bellier, O., Siame, L., Beaudouin, T., Villeneuve, M., & Braucher, R. (2001). High slip rate for a low seismicity along the Palu-Koro active fault in Central Sulawesi (Indonesia). *Terra Nova*, 13(6), 463–470.
- Bozzoni, F., Furiosi, A., & Lai, C. G. (2023). Probabilistic assessment of the earthquake-induced soil liquefaction hazard at national scale: macrozonation of the Italian territory. *Natural Hazards*, 115(3), 2237–2255.
- Carlson, R. W. (2011). *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*.
- Carvajal, M., Araya-Cornejo, C., Sepúlveda, I., Melnick, D., & Haase, J. S. (2019). Nearly Instantaneous Tsunamis Following the Mw 7.5 2018 Palu Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 46(10), 5117–5126.
- Fahmi, M. N., & Madlazim. (2019). Identifikasi Patahan-Palu Koro Dengan Centroid Moment Tensor (Cmt) Menggunakan Inversi Waveform Tiga Komponen. *Jurnal Inovasi Fisika (IFI)*, 08, 4–10.
- Fajriani. (2021). Analisis Seismisitas Sulawesi Barat Berdasarkan Data Gempa 1967-2021. *Skripsi*, 14–15.
- Frederik, M. C. G., Udrek, Adhitama, R., Hananto, N. D., Asrafil, Sahabuddin, S., Irfan, M., Moefti, O., Putra, D. B., & Riyalda, B. F. (2019). First Results of a Bathymetric Survey of Palu Bay, Central Sulawesi, Indonesia following the Tsunamigenic Earthquake of 28 September 2018. *Pure and Applied Geophysics*, 176(8), 3277–3290.
- Gallant, A. P., Montgomery, J., Mason, H. B., Hutabarat, D., Reed, A. N., Wartman, J., Irsyam, M., Simatupang, P. T., Alatas, I. M., Prakoso, W. A., Djarwadi, D., Hanifa, R., Rahardjo, P., Faizal, L., Harnanto, D. S., Kawanda, A., Himawan, A., & Yasin, W. (2020). The Sibalaya flowslide initiated by the 28 September 2018 MW 7.5 Palu-Donggala, Indonesia earthquake. *Landslides*, 17(8), 1925–1934.
- Gupta, S. K., Suantio, A., Gray, A., Widyastuti, E., Jain, N., Rolos, R., Hoekstra, R. M., & Quick, R. (2007). Factors associated with E. coli contamination of household drinking water among tsunami and earthquake survivors, Indonesia. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 76(6), 1158–1162.
- Heidarzadeh, M., Muhari, A., & Wijanarto, A. B. (2019). Insights on the Source of the 28 September 2018 Sulawesi Tsunami, Indonesia Based on Spectral Analyses and Numerical Simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 176(1), 25–43.
- Israeli, O. (2007). A Shapley-based decomposition of the R-Square of a linear regression. *Journal of Economic Inequality*, 5(2), 199–212.
- Istiadzah, K., & Tingkir, J. (2020). Analisis Perbedaan Keakuratan Estimasi Parameter Gempa Bumi di Indonesia pada Januari sampai dengan April Tahun 2020 Menggunakan Software Early-Est dan Joko Tingkir.
- Liu, C., & Shi, Y. (2021). Space-Time Stress Variations on the Palu-Koro Fault Impacting the 2018 Mw 7.5 Palu Earthquake and Its Seismic Hazards. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(5), 1–11.

- Lowe-Wincentsen, D. (2016). Encyclopedia of Earthquake Engineering. In Reference Reviews (Vol. 30, Issue 6).
- Madlazim, & Hariyono, E. (2014). Joko Tingkir program for estimating tsunami potential rapidly. AIP Conference Proceedings, 1617(February 2015), 57–59.
- Madlazim, Prastowo, T., & Hardy, T. (2015). Validation of Joko Tingkir software using tsunami importance. Science of Tsunami Hazards, 34(3), 189–198.
- Melnik, O., Lyakhovsky, V., Shapiro, N. M., Galina, N., & Bergal-Kuvikas, O. (2020). Deep long period volcanic earthquakes generated by degassing of volatile-rich basaltic magmas. Nature Communications, 11(1), 1–7.
- Miyajima, M., Setiawan, H., Yoshida, M., Ono, Y., Kosa, K., Oktaviana, I. S., Martini, & Irdhiani. (2019). Geotechnical damage in the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia. Geoenvironmental Disasters, 6(1), 2–9.
- Nettles, M., & Dziewon, A. M. (2012). The Global CMT project 2004 – 2010 : Centroid-moment tensors. 201, 1–9.
- Nettles, M., Ekström, G., & Koss, H. C. (2011). Centroid-moment-tensor analysis of the 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake and its larger foreshocks and aftershocks. Earth, Planets and Space, 63(7), 519–523.
- Omira, R., Dogan, G. G., Hidayat, R., Husrin, S., Prasetya, G., Annunziato, A., Proietti, C., Probst, P., Paparo, M. A., Wronna, M., Zaytsev, A., Pronin, P., Giniyatullin, A., Putra, P. S., Hartanto, D., Ginanjar, G., Kongko, W., Pelinovsky, E., & Yalciner, A. C. (2019). The September 28th, 2018, Tsunami In Palu-Sulawesi, Indonesia: A Post-Event Field Survey. Pure and Applied Geophysics, 176(4), 1379–1395.
- Padgett, M. J., & Lesso, J. P. (1999). Sin a Sin a. 46, 175–179.
- Patria, A., & Putra, P. S. (2020). Development of the Palu-Koro Fault in NW Palu Valley, Indonesia. Geoscience Letters, 7(1), 1–11.
- Sabtaji, A. (2020). Statistik Kejadian Gempa Bumi Tektonik Tiap Provinsi di Wilayah Indonesia Selama 11 Tahun Pengamatan (2009-2019). Buletin Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika, 1(7), 31–46.
- Salsabillah, Q., & Prastowo, T. (2022). Analisis Relasi Momen Seismik Dan Magnitudo Momen Untuk Variasi Kedalaman Sumber Gempa Tektonik (Shallow, Intermediate, and Deep Sources). Inovasi Fisika Indonesia, 11(1), 8–16.
- Sassa, S., & Takagawa, T. (2019). Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. Landslides, 16(1), 195–200.
- Shao, X., Ma, S., & Xu, C. (2022). Distribution and characteristics of shallow landslides triggered by the 2018 Mw 7.5 Palu earthquake, Indonesia. Landslides, September.
- Shuler, A., Nettles, M., & Ekström, G. (2013). Global observation of vertical-CLVD earthquakes at active volcanoes. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(1), 138–164.
- Spencer, J. E. (2011). Gently dipping normal faults identified with Space Shuttle radar topography data in central Sulawesi, Indonesia, and some implications for fault mechanics. Earth and Planetary Science Letters, 308(3–4), 267–276.
- Takemura, S., Okuwaki, R., Kubota, T., Shiomi, K., Kimura, T., & Noda, A. (2020). Centroid moment tensor inversions of offshore earthquakes using a three-dimensional velocity structure model: Slip distributions on the plate boundary along the Nankai Trough. Geophysical Journal International, 222(2), 1109–1125.
- Triantafyllis, N., Venetis, I. E., & Fountoulakis, I. (2021). Gisola : A High-Performance Computing Application for Real-Time Moment Tensor Inversion.
- Uyanık, G. K., & Güler, N. (2013). A Study on Multiple Linear Regression Analysis. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 106, 234–240.

- Vackáář, 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.
- Vasyura-Bathke, H., Dettmer, J., Dutta, R., Mai, P. M., & Jónsson, S. (2021). Accounting for theory errors with empirical Bayesian noise models in nonlinear centroid moment tensor estimation. *Geophysical Journal International*, 225(2), 1412–1431.
- Vavryčuk, V. (2011). Tensile earthquakes: Theory, modeling, and inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(12), 1–14.
- Villeneuve, M., Gunawan, W., Cornee, J. J., & Vidal, O. (2002). Geology of the central Sulawesi belt (eastern Indonesia): Constraints for geodynamic models. *International Journal of Earth Sciences*, 91(3), 524–537.
- Wang, F., Fan, X., Yunus, A. P., Siva Subramanian, S., Alonso-Rodriguez, A., Dai, L., Xu, Q., & Huang, R. (2019). Coseismic landslides triggered by the 2018 Hokkaido, Japan (Mw 6.6), earthquake: spatial distribution, controlling factors, and possible failure mechanism. *Landslides*, 16(8), 1551–1566.
- Zenonos, A., De Siena, L., Widiyantoro, S., & Rawlinson, N. (2019). P and S wave travel time tomography of the SE Asia-Australia collision zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 293.
- Zhang, Y., Chen, Y. T., & Feng, W. (2019). Complex multiple-segment ruptures of the 28 September 2018, Sulawesi, Indonesia, earthquake. *Science Bulletin*, 64(10), 650–652.