

ANALISIS KEAKURATAN KATALOG DATA GEMPA BUMI INDONESIA PADA *SOFTWARE* JOKO TINGKIR TERHADAP *GLOBAL CENTROID MOMENT TENSOR* (GCMT) MENGGUNAKAN UJI-T BERPASANGAN, WILCOXON, DAN SUDUT KAGAN

¹⁾Adek Putri Dewanti, ²⁾Madlazim, ³⁾Muhammad Nurul Fahmi

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: adekputri.21030@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 keakuratan *focal mechanism* yang dihasilkan *software* Joko Tingkir terhadap GCMT dengan perhitungan sudut Kagan dan menganalisis keakuratan data katalog Joko Tingkir terhadap GCMT melalui perhitungan uji-t berpasangan dan Wilcoxon ditinjau dari hipotesis yang telah ditetapkan. Data yang diuji memiliki magnitudo momen (M_w) $\geq 5,0$ selama periode 2020-2024 dengan lima daerah penelitian yaitu daerah Jawa, Sumatera, Sulawesi, Maluku, Nusa Tenggara, dan Papua. Parameter yang diuji diantaranya waktu kejadian (*origin time*), kedalaman, *longitude*, *latitude*, dan *focal mechanism* diantaranya *strike*, *dip*, *rake*. Seluruh data gempa memiliki karakteristik gempa bumi tektonik atau presentase komponen *Double Couple* (DC) lebih dominan. Hasil perhitungan sudut Kagan dari 50 data uji menunjukkan tidak ada yang mencapai batas 60° sebagaimana dikemukakan oleh Kagan (1991). Nilai ini mengindikasikan bahwa *focal mechanism* dan bentuk *beachball* yang dihasilkan oleh *software* Joko Tingkir relatif sesuai dan homogen terhadap GCMT. Selain itu, nilai-t dari hasil uji-t berpasangan pada parameter kedalaman (-0,88), *dip* (1,64), dan *longitude* (-1,23) tidak ada yang mencapai nilai-t kritis $\pm 2,01$. Begitupula untuk nilai *z-score* dari Wilcoxon pada parameter magnitudo momen (-1,46), *strike* (-0,25), *rake* (-0,69) dan *latitude* (-0,32) tidak ada yang mencapai nilai-z kritis $\pm 1,96$. Dapat disimpulkan bahwa semua parameter penelitian tidak memiliki perbedaan signifikan antara data katalog Joko Tingkir terhadap GCMT.

Kata Kunci: Solusi CMT, Sudut Kagan, Uji-T Berpasangan, Wilcoxon

Abstract

This study was conducted with the aim of analyzing the accuracy of focal mechanisms produced by the Joko Tingkir software compared to GCMT using Kagan angle calculations, as well as assessing the accuracy of the Joko Tingkir catalog data against GCMT through paired t-test and Wilcoxon test calculations based on the established hypotheses. The tested data consist of earthquakes with a moment magnitude (M_w) ≥ 5.0 during the 2020–2024 period across five study regions: Java, Sumatra, Sulawesi, Maluku, Nusa Tenggara, and Papua. The parameters analyzed include origin time, depth, longitude, latitude, and focal mechanism parameters such as strike, dip, and rake. All tested earthquakes exhibit tectonic characteristics or a dominant Double Couple (DC) component. The Kagan angle results from 50 test data points showed that none exceeded the 60° threshold as stated by Kagan (1991). This indicates that the focal mechanisms and beachball diagrams generated by the Joko Tingkir software are relatively consistent and homogeneous with those of GCMT. In addition, the t-values from the paired t-test for the parameters of depth (-0.88), dip (1.64), and longitude (-1.23) did not reach the critical t-value of ± 2.01 . Similarly, the z-scores from the Wilcoxon test for the parameters of moment magnitude (-1.46), strike (-0.25), rake (-0.69), and latitude (-0.32) did not reach the critical z-value of ± 1.96 . It can be concluded that none of the parameters in this study showed significant differences between the Joko Tingkir catalog data and GCMT.

Keywords: CMT Solution, Kagan Angle, Paired T-Test, Wilcoxon Test

I. PENDAHULUAN

Informasi mengenai parameter *Centroid Moment Tensor* (CMT) merupakan salah satu elemen penting yang harus tersedia secara cepat dan akurat untuk keperluan mitigasi bencana (Sawade et al., 2022). Parameter ini memungkinkan estimasi mekanisme sumber gempa bumi berdasarkan analisis gelombang seismik yang tercatat dari berbagai stasiun di sekitar lokasi gempa. Menurut penelitian Triantafyllis et al. (2021), hasil inversi solusi CMT dikategorikan andal apabila distribusi stasiun seismik mencakup empat kuadran di sekitar episenter gempa dan nilai *Variance Reduction* (VR) melebihi 50% (Vackář et al., 2017). Proses inversi solusi CMT ini dapat dilakukan secara manual maupun otomatis.

Penentuan solusi *Centroid Moment Tensor* atau CMT telah berkembang dari metode manual menjadi otomatis. Pada awalnya, algoritma Isola yang dikembangkan oleh Sokos dan Zahradnik (2008) membutuhkan operator dan memiliki waktu perhitungan yang sangat lama. Kemudian, Scisola yang diperkenalkan oleh Triantafyllis et al., 2016 mengurangi waktu perhitungan menjadi sekitar 10 menit. Lalu perkembangan terbaru dengan algoritma Gisola oleh Triantafyllis et al. (2021), dengan perhitungan mendekati real-time, hanya sekitar 3,5 menit. Algoritma ini diimplementasikan pada software Joko Tingkir untuk gempa bumi di Indonesia. Walaupun Joko Tingkir menggunakan algoritma Gisola, kualitas data yang dihasilkan dari solusi CMT dari Gisola belum bisa dipastikan akurat. Oleh karena itu perlu dilakukan verifikasi terhadap data Joko Tingkir untuk melihat keakuratannya. Apabila data yang dihasilkan Joko Tingkir sudah baik menurut penelitian ini, dapat membantu upaya mitigasi bencana tektonik dan memberikan data katalog yang terpercaya bagi masyarakat

Global Centroid Moment Tensor (GCMT) adalah *website* yang berisi katalog solusi CMT berdasarkan data gelombang seismik yang dikumpulkan dari jaringan stasiun seismik di seluruh dunia (Sawade et al., 2022). Salah satu tantangan dalam menggunakan data katalog gempa bumi, seperti Joko Tingkir dan GCMT, adalah potensi perbedaan dalam metode pencatatan dan pemrosesan data yang dapat berdampak pada konsistensi dan akurasi parameter gempa. Misalnya, katalog GCMT menggunakan sinyal waveform dari stasiun teleseismik global untuk menghitung parameter gempa (Ekström et al., 2012). Metodologi ini membuat GCMT memberikan data yang lebih seragam dan mencakup area yang lebih luas, sehingga menjadikannya tolok ukur utama di banyak penelitian seismologi. Sebaliknya, katalog Joko Tingkir mengandalkan sumber data lokal dengan cakupan stasiun yang lebih terbatas (Madlazim, 2015). Perbedaan ini dapat mempengaruhi nilai katalog pada parameter gempa. Selain itu, faktor-faktor seperti variasi perangkat seismometer, *noise* lokal, dan pendekatan algoritma yang digunakan dalam inversi CMT bisa jadi turut berkontribusi terhadap perbedaan hasil (I. P. D. Pratama, 2021). Jika perbedaan ini tidak diverifikasi, hal ini dapat menimbulkan bias yang berpotensi mengurangi keandalan katalog Joko Tingkir dalam analisis seismologi atau mitigasi bencana.

Dalam analisis data, pendekatan statistika memainkan peran penting karena mampu memberikan kerangka objektif untuk memahami pola, hubungan, dan perbedaan dalam suatu data (Mishra & Datta-Gupta, 2017). Dalam konteks penelitian ini, tujuan utama adalah mengetahui perbedaan antara katalog gempa bumi pada *software* Joko Tingkir terhadap GCMT. Oleh karena itu, pendekatan metode komparasi statistika digunakan. Metode uji-t berpasangan digunakan untuk data terdistribusi normal, sedangkan metode Wilcoxon digunakan untuk data tidak terdistribusi normal (Sugiyono, 2018). Karena kedua data katalog dikumpulkan berdasarkan *origin time* yang sama, pendekatan *dependent* digunakan untuk memperhitungkan hubungan intrinsik antar data, sehingga analisis lebih sensitif terhadap perbedaan yang signifikan (Chen et al., 2018).

Untuk uji normalitas dalam statistika didasarkan pada banyaknya data penelitian yang akan diuji. Pada penelitian ini, sebanyak 50 kejadian gempa bumi digunakan sebagai data uji. Menurut Konopátov et al (2024) dalam menentukan metode distribusi data, Shapiro-Wilk direkomendasikan untuk ukuran sampel kecil hingga menengah yaitu $n \leq 50$. Mengingat penelitian klasik dari Razali dan Wah (2011) yang masih relevan hingga saat ini, pemilihan metode uji normalitas perlu mempertimbangkan tidak hanya ukuran sampel, tetapi juga karakteristik data. Berdasarkan ukuran sampel dalam penelitian ini yaitu 50 kejadian gempa bumi, maka uji Shapiro-Wilk menjadi pilihan yang paling tepat karena berada pada batas atas rentang efektivitasnya dan telah terbukti memiliki power test yang lebih baik dibandingkan uji normalitas lainnya untuk ukuran sampel tersebut.

Dalam statistika inferensial, pengujian hipotesis digunakan untuk menarik kesimpulan tentang populasi berdasarkan sampel data (Hedderich & Sachs, 2024). Proses ini melibatkan dua pernyataan berlawanan: hipotesis nol (H_0), yang menyatakan tidak ada efek, pengaruh, atau perbedaan dalam data, dan hipotesis

alternatif (H_1), yang menyatakan sebaliknya (Lieber, 1990; Park, 2015). Secara umum, pengujian hipotesis dilakukan dengan cara mengumpulkan data sampel, menghitung statistik uji, dan membandingkannya dengan distribusi probabilitas yang sesuai. Jika bukti yang diperoleh dari data cukup kuat untuk menolak H_0 , maka kita menerima H_1 sebagai kesimpulan. Sebaliknya, jika tidak ada bukti yang cukup untuk menolak H_0 , maka H_0 tetap diterima, tetapi ini tidak berarti H_0 benar secara mutlak, melainkan hanya tidak cukup bukti untuk menolaknya. Dalam konteks penelitian ini, pengujian hipotesis digunakan untuk membandingkan parameter gempa bumi antara katalog Joko Tingkir dan *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT). Dengan demikian, ditetapkan hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara kedua katalog, serta hipotesis alternatif (H_1) yang menyatakan bahwa terdapat perbedaan signifikan. Penetapan hipotesis ini mengikuti prinsip dasar statistika inferensial untuk uji komparasi dua sampel berpasangan (Siagian, 2021).

Penelitian ini menggunakan taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ atau 5%, yang merupakan standar umum. Pemilihan nilai $\alpha = 0,05$ memberikan keseimbangan optimal antara risiko kesalahan Tipe I (menolak H_0 padahal benar) dan kesalahan Tipe II (gagal menolak H_0 padahal salah) (Lieber, 1990; Kruschke & Liddell, 2018). Dalam konteks komparasi katalog gempa bumi, nilai $\alpha = 0,05$ memberikan tingkat kepercayaan sebesar 95% bahwa perbedaan yang terdeteksi benar-benar mencerminkan variasi sistematis antara kedua katalog secara statistik, bukan sekedar fluktuasi. Dibandingkan dengan nilai α yang lebih ketat 0,01 atau lebih longgar 0,10. Penggunaan $\alpha = 0,05$ lebih sesuai untuk evaluasi parameter seismik mengingat kompleksitas dan ketidakpastian alami dalam pengukuran parameter gempa bumi, serta kebutuhan untuk mendeteksi perbedaan yang bermakna secara geofisika tanpa terlalu sensitif terhadap variasi minor yang tidak signifikan secara praktis (Kruschke & Liddell, 2018).

Selain mengimplementasikan metode komparasi statistika, penelitian ini juga menggunakan metode sudut Kagan untuk mengevaluasi perbedaan mekanisme fokal. Metode sudut Kagan diterapkan untuk menghitung selisih minimum dari tiga parameter mekanisme fokal, yaitu *strike*, *dip*, dan *rake* (Kagan, 1991). Berdasarkan penelitian oleh Franco et al. (2020), metode sudut Kagan terbukti efektif dalam menganalisis perbedaan orientasi mekanisme fokal antar katalog *moment tensor*.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif antara data katalog gempa bumi pada *software* Joko Tingkir dan *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT) sebagai acuan yang diakui oleh komunitas geofisika internasional (Franco et al., 2020; Sawade et al., 2022) dengan menggunakan pendekatan statistika inferensial. Metode yang akan digunakan adalah uji-t berpasangan untuk data yang terdistribusi normal dan uji Wilcoxon untuk data yang tidak terdistribusi normal, serta metode sudut Kagan untuk mengevaluasi perbedaan *focal mechanism*.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian dimulai dengan menetapkan wilayah studi yaitu di wilayah Indonesia yang berada di koordinat 95^0 BT hingga 141^0 BT dan 6^0 LU hingga 11^0 LS. Setelah menentukan wilayah studi, pengumpulan data sekunder dilakukan melalui *software* Joko Tingkir pada laman <https://joko.tingkir.unesa.ac.id/>. Data mencakup parameter seismik *Centroid Moment Tensor* (CMT) otomatis *real-time* untuk kejadian gempa bumi di wilayah Indonesia pada periode 2020-2024. Pada penelitian ini diambil stasiun-stasiun yang merekam magnitudo momen (M_w) ≥ 5 . Parameter seismik pada CMT yang akan dianalisis meliputi magnitudo momen (M_w), kedalaman, *strike*, *dip*, *rake*, *longitude*, dan *latitude*. Algoritma komputasi canggih bernama Gisola diimplementasikan di *software* Joko Tingkir untuk menghasilkan solusi CMT, dengan input dari stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen yang diperoleh dari basis data *International Federation of Digital Seismograph Network Web Service* (FDSNWS) (Triantafyllis et al., 2022). Solusi CMT dari *software* Joko Tingkir digunakan sebagai data sekunder, untuk dibandingkan dengan solusi CMT dari GCMT.

Basis data dari GCMT diakui sebagai sumber utama oleh komunitas seismologi internasional (Vallée et al., 2011; Sawade et al., 2022), sehingga dapat digunakan sebagai acuan yang terpercaya untuk menilai keakuratan solusi CMT dari Joko Tingkir. Hasil penelitian ini dianalisis dengan uji-t berpasangan untuk data terdistribusi normal dan uji Wilcoxon untuk data tidak terdistribusi normal. Untuk uji normalitas digunakan Shapiro-Wilk karena data yang diuji berjumlah 50 data yang sudah mencakup tahun 2020-2024 (Konopatov et al., 2024). Selain itu, analisis menggunakan sudut Kagan diterapkan pada parameter *strike*, *dip*, dan *rake* untuk membandingkan perbedaan orientasi mekanisme gempa (Kagan, 1991). *Output* yang dihasilkan meliputi *p-value* normalitas, nilai-t, nilai-W, dan *p-value* hipotesis untuk menentukan perbandingan berbeda secara signifikan atau tidak. Dalam penelitian ini, hipotesis yang diuji ada dua sesuai konsep uji komparasi dalam statistika, yaitu:

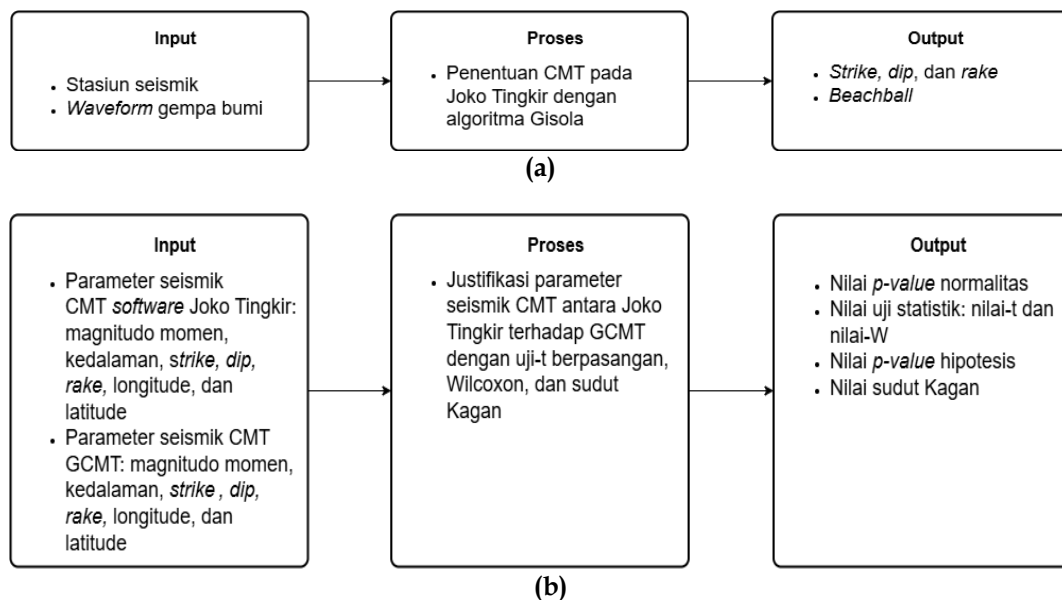
1. H_0 : Tidak ada perbedaan signifikan antara parameter data katalog Joko Tingkir dan GCMT
2. H_1 : Terdapat perbedaan signifikan antara parameter data katalog Joko Tingkir dan GCMT.

Untuk menentukan distribusi data, *p-value* normalitas yang dihasilkan dengan ketentuan:

1. Jika *p-value* normalitas $> 0,05$: Data terdistribusi normal, uji statistika yang digunakan adalah uji-t berpasangan.
2. Jika *p-value* normalitas $\leq 0,05$: Data tidak terdistribusi normal, uji statistika yang digunakan adalah Wilcoxon.

Dari nilai-t dan nilai-W, dihasilkan *p-value* hipotesis untuk penarikan kesimpulan perbedaan antara kedua data katalog. Untuk penarikan kesimpulan dari *p-value* hipotesis sesuai konsep statistika yaitu dengan ketentuan berikut:

1. Jika *p-value* hipotesis $> 0,05$: Tidak ada perbedaan signifikan antara parameter data katalog Joko Tingkir dan GCMT
2. Jika *p-value* hipotesis $\leq 0,05$: Terdapat perbedaan signifikan antara parameter data katalog Joko Tingkir dan GCMT.



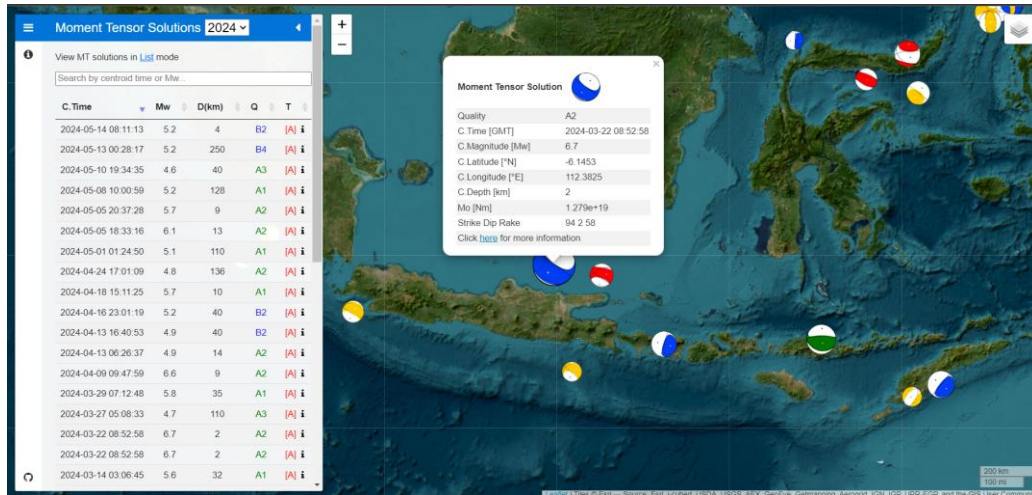
Gambar 1. Skema rancangan penelitian, (a) Penentuan CMT pada Joko Tingkir dengan algoritma Gisola. (b) Justifikasi solusi CMT antara Joko Tingkir terhadap GCMT terhadap GCMT dengan uji-t berpasangan, Wilcoxon, dan sudut Kagan.

B. Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa jenis variabel untuk mendukung analisis, diantaranya terdapat variabel manipulasi, variabel kontrol, variabel respons. Variabel manipulasi dalam penelitian ini yaitu waktu kejadian gempa bumi (*origin time*). Variabel kontrol mencakup wilayah geografis Indonesia dengan batas koordinat antara 95° BT hingga 141° BT dan 6° LU hingga 11° LS, data parameter seismik diantaranya *origin time*, magnitudo momen (M_w), kedalaman, *strike*, *dip*, *rake*, *longitude*, dan *latitude*. Lalu, data diambil dari tahun 2020 hingga 2024 dengan $M_w \geq 5,0$. Variabel respons dalam penelitian ini adalah nilai *p-value* normalitas, nilai statistik uji seperti nilai-t, dan nilai-W, nilai *p-value* hipotesis untuk penarikan kesimpulan, serta nilai Sudut Kagan tiap *origin time*.

C. Teknik Pengumpulan Data

Langkah pertama yang dilakukan adalah mengambil data sekunder parameter CMT *real-time* otomatis di software Joko Tingkir pada link <https://joko.tingkir.unesa.ac.id/>. Data parameter seismik yang digunakan diantaranya *origin time*, magnitudo momen (M_w), kedalaman, *strike*, *dip*, *rake*, *longitude*, dan *latitude*. Semua data dari parameter seismik tersebut diambil pada koordinat wilayah Indonesia yaitu di 6° LU hingga 11° LS, serta 95° BT hingga 141° BT. Selain itu, data diambil dari tahun 2020 sampai 2024 yang mencakup sebanyak 50 data dengan $M_w \geq 5,0$.



Gambar 2. Interface halaman Joko Tingkir.

Solusi CMT *real-time* otomatis di software Joko Tingkir didapatkan dengan algoritma komputasi tingkat tinggi yaitu Gisola dengan inputan data berupa stasiun seismik serta *waveform* tiga komponen dari database FDSNWS (Triantafyllis et al., 2021).

Global CMT Catalog Search

Search form

If you use CMT results in published work, please provide an appropriate citation; see [here](#) for information on how to cite the catalog. Thanks!

Enter parameters for CMT catalog search. All constraints are 'AND' logic.

Date constraints: catalog starts in 1976 and goes through present
There are several methods to choose date ranges—use the radio buttons to select which method you want to use

Starting Date:			Ending Date:		
☒ Year:	1976	Month: 1 Day: 1	☐ Year:	1976	Month: 1 Day: 1
☐ Year:	1976	Julian Day: 1	☐ Year:	1976	Julian Day: 1
☒ Number of days: 1			☐ Including starting day		

Magnitude constraints: catalog includes moderate to large earthquakes only
(see [note on calculation of magnitudes](#))

Moment magnitude: 0 ≤ Mw ≤ 10

Surface wave magnitude: 0 ≤ Ms ≤ 10

Body wave magnitude: 0 ≤ mb ≤ 10

Location constraints:

Latitude: (degrees) from -90 to 90 Must be between -90 and 90

Longitude: (degrees) from -180 to 180 Must be between -180 and 180

Depth: (kilometers) from 0 to 1000

Source time and mechanism constraints:

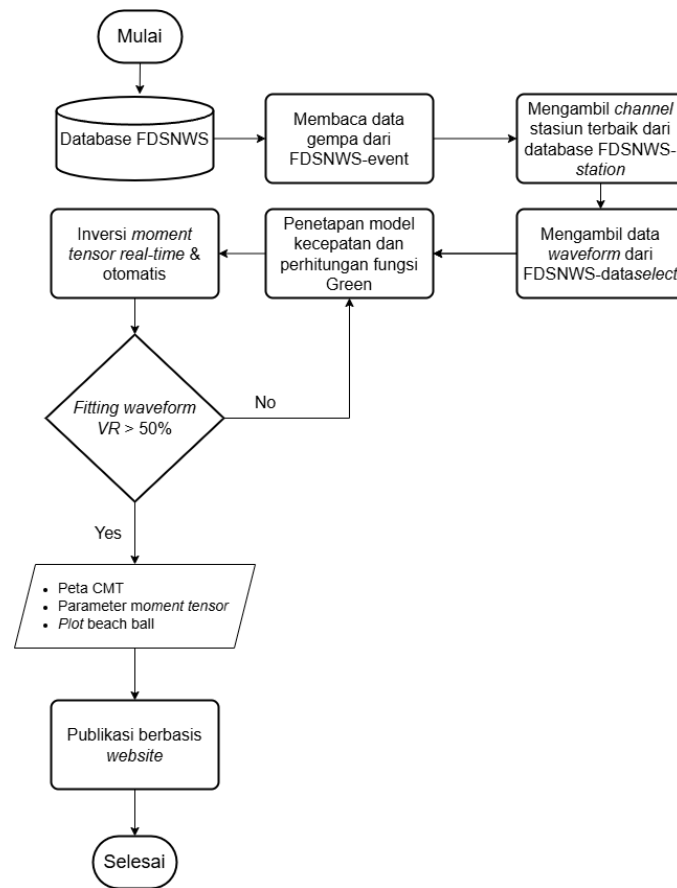
Centroid time shift: (seconds) from -9999 to 9999

Gambar 3. Interface halaman GCMT.

Selain dari software Joko Tingkir, data-data parameter seismik juga diambil dari GCMT dengan kriteria yang sama dengan pengambilan data di *software* Joko Tingkir. Untuk pengambilan data di Joko Tingkir perlu mengatur tahun yang akan ditampilkan, lalu menggeser peta hingga menampilkan wilayah Indonesia. Apabila terdapat *beachball* dengan $M_w \geq 5,0$, selanjutnya menekan *beachball* tersebut dan tekan “*click here*” untuk menampilkan informasi seismik yang diperlukan. Sedangkan untuk pengambilan data di GCMT, perlu mengatur *date constraints* pada laman Global CMT Catalog Search yaitu mengatur *starting date* dan *ending date*. Setelah itu mengatur besarnya *moment magnitude*, lokasi *latitude*, *longitude*, serta *depth*. Selanjutnya, data-data solusi CMT akan muncul sesuai dengan *date constraints* dan parameter-parameter seismik yang telah diatur

D. Teknik Pengolahan Data

Pada penelitian ini, teknik pengolahan data dibagi menjadi dua tahapan. Tahap pertama ialah menentukan solusi CMT pada *software* Joko Tingkir, lalu pada tahapan kedua adalah justifikasi solusi CMT pada *software* Joko Tingkir dengan uji komparasi statistika dan sudut Kagan. Penetapan CMT *real-time* otomatis pada platform Joko Tingkir diperoleh melalui metode Gisola. Data masukan terdiri dari data stasiun seismik dan *waveform* tiga komponen yang diambil dari *database* International Federation of Digital Seismograph Network Web Service (FDSNWS). Selanjutnya, dilakukan kalkulasi fungsi *Green* sebagai pemodelan untuk mendapatkan solusi *moment tensor*. Tahap berikutnya adalah melaksanakan perhitungan inversi secara komputasi dan visualisasi hasil inversi, termasuk peta CMT, *strike*, *dip*, *rake*, serta diagram *beachball* (Triantafyllis et al., 2021).



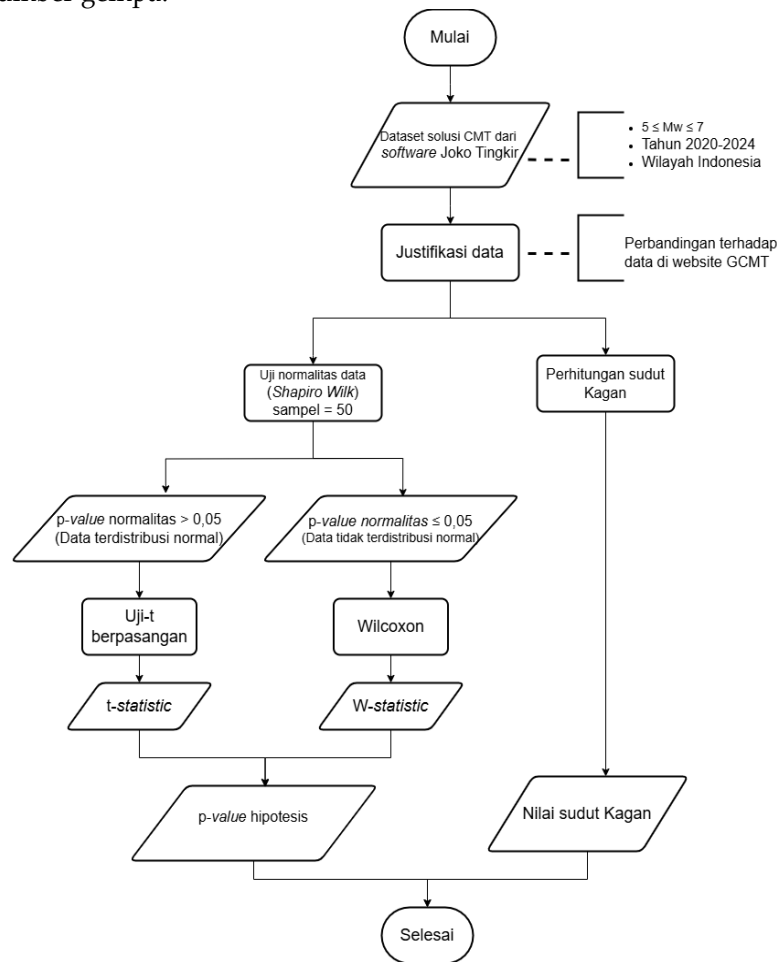
Gambar 4. Flowchart menentukan solusi CMT pada software Joko Tingkir.

Solusi CMT dinyatakan *reliable* jika memiliki nilai *Varian Reduction* (VR) melampaui 50% (Vackář et al., 2017). Apabila suatu data memiliki nilai VR 50%, maka dilakukan kalkulasi ulang fungsi *Green* untuk meningkatkan mutu solusi CMT. Kalkulasi ulang dilakukan dengan memilih stasiun seismik yang terletak pada empat kuadran di sekeliling lokasi gempa bumi dan memilih model kecepatan yang tepat (Triantafyllis et al., 2021).

Di tahap justifikasi data, dilakukan kalkulasi perbandingan dan analisis untuk mengevaluasi solusi CMT yang dihasilkan software Joko Tingkir terhadap data website GCMT. Semua parameter penelitian menggunakan metode komparasi statistika yaitu uji-t berpasangan untuk data terdistribusi normal dan Wilcoxon untuk data tidak terdistribusi normal. Untuk uji normalitas digunakan metode Shapiro-Wilk karena data penelitian yang diuji sebanyak 50 kejadian gempa, sesuai dengan penelitian Konopátov et al. (2024) yang merekomendasikan metode tersebut untuk ukuran sampel kecil hingga menengah yaitu $n \leq 50$. Metode Shapiro-Wilk juga memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi ketidaknormalan data pada ukuran sampel kecil hingga menengah ($n \leq 50$). Setelah dilakukan uji normalitas, diperoleh *p-value* normalitas dari uji Shapiro-Wilk. Jika *p-value* normalitas $> 0,05$, maka data dianggap terdistribusi normal, sehingga digunakan uji-t berpasangan. Sebaliknya, jika *p-value* normalitas $\leq 0,05$, maka data tidak berdistribusi normal, sehingga digunakan uji Wilcoxon. Setelah data diuji dengan uji-t berpasangan dan Wilcoxon sesuai dengan distribusi datanya, akan dihasilkan nilai statistik uji diantaranya nilai-t dan nilai-W. Dari nilai statistik uji ini, dihasilkan *p-value* hipotesis yang digunakan untuk menilai signifikansi perbedaan antara dua kelompok data. Apabila *p-value* hipotesis $\leq 0,05$, maka kedua kelompok data memiliki perbedaan signifikan, artinya ada bukti statistik bahwa Joko Tingkir dan GCMT berbeda secara nyata. Sebaliknya, apabila *p-value* hipotesis $> 0,05$, maka kedua kelompok data tidak ada perbedaan signifikan, artinya bukti statistik tidak cukup kuat untuk disimpulkan sebagai perbedaan nyata.

Dilakukan juga perhitungan sudut Kagan pada parameter *strike*, *dip*, dan *rake* untuk mengukur perbedaan orientasi antara dua vektor dalam ruang tiga dimensi yang mewakili arah masing-masing parameter. Berdasarkan Kagan (1991), jika nilai sudut Kagan lebih kecil dari 60° , maka dapat disimpulkan bahwa kedua katalog memiliki kesamaan yang tinggi dalam hal orientasi sumber gempa. Sebaliknya, apabila nilai sudut

Kagan lebih besar dari 60° , maka dapat disimpulkan bahwa kedua katalog memiliki perbedaan yang tinggi dalam hal orientasi sumber gempa.



Gambar 5. Flowchart justifikasi solusi CMT software Joko Tingkir dengan uji-t berpasangan, Wilcoxon, dan sudut Kagan.

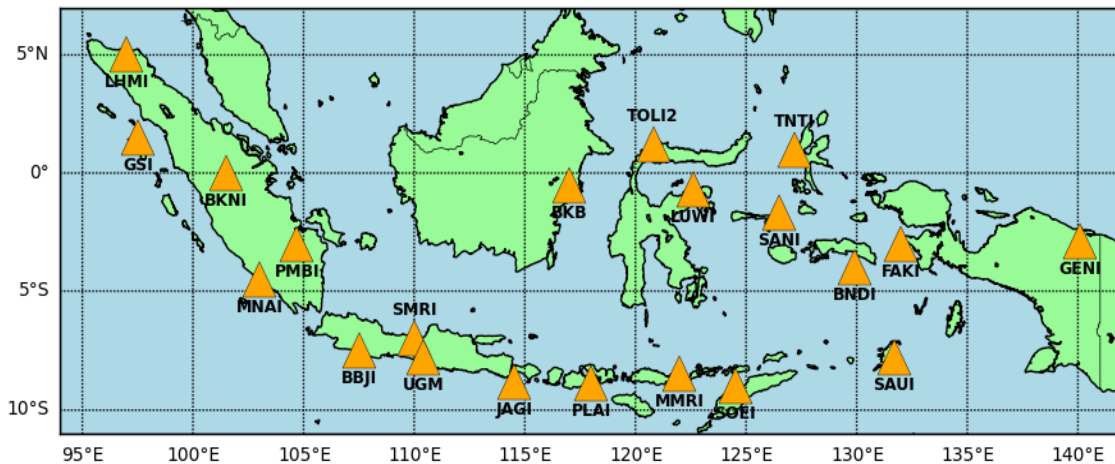
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan mekanisme sumber gempa bumi di Indonesia pada dasarnya dapat dilakukan melalui proses *inversi data Centroid Moment Tensor (CMT)* yang dikembangkan dengan menggunakan algoritma *Gisola* dan telah diimplementasikan secara praktis dalam perangkat lunak *Joko Tingkir* (Madlazim, 2015). Pada penelitian ini, analisis dilakukan dengan memanfaatkan data hasil inversi yang bersifat otomatis sekaligus *real-time* terhadap total 50 kejadian gempa bumi dengan magnitudo $M_w \geq 5,0$, yang tercatat terjadi pada rentang waktu antara tahun 2020 hingga 2024 dan tersebar di berbagai wilayah seismik aktif Indonesia.

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi waktu kejadian gempa (origin time), kedalaman sumber, serta informasi mengenai *focal mechanism* yang mencakup tiga elemen utama, yaitu *strike*, *dip*, dan *rake*. Selain itu, koordinat lokasi kejadian gempa bumi yang meliputi nilai longitude dan latitude juga digunakan sebagai variabel pendukung dalam analisis. Kombinasi parameter-parameter tersebut diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai karakteristik sumber gempa bumi, sekaligus memperkuat pemahaman terhadap dinamika tektonik yang berlangsung di wilayah Indonesia.

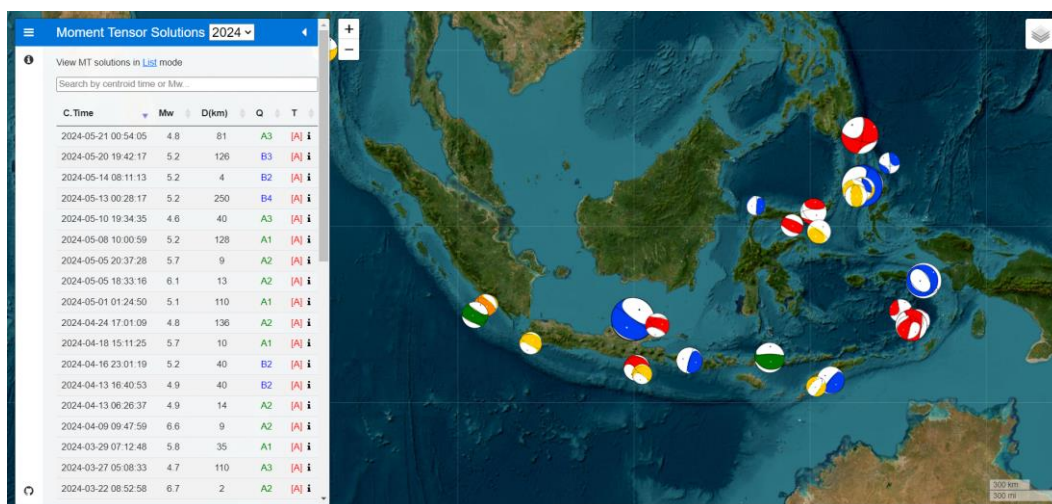
Evaluasi kualitas CMT dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain nilai *Variance Reduction (VR)* dari sinyal seismik, distribusi stasiun pengamat terhadap episenter, model kecepatan gelombang dalam proses inversi, serta pita frekuensi *waveform* (Ekström et al., 2012; Sawade et al., 2022). Distribusi stasiun seismik yang baik harus mencakup keempat kuadran di sekitar sumber gempa agar hasil inversi menjadi lebih representatif dan akurat (Prastowo & Hardy, 2015; Vackář et al., 2017). Gambar 6 menunjukkan peta persebaran stasiun seismik yang digunakan dalam penelitian ini, yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia. Jaringan stasiun tersebut telah memenuhi syarat distribusi spasial, sehingga mendukung hasil solusi CMT dengan kualitas yang lebih baik. Stasiun-stasiun ini merekam sinyal gelombang seismik dalam tiga komponen, yaitu *North-South (N)*,

East-West (E), dan Up-Down (Z) (Madlazim, 2015). Data *waveform* diperoleh dari jaringan GEOFON melalui database FDSNWS, yang telah mencakup berbagai wilayah di Indonesia.



Gambar 6. Peta persebaran stasiun seismik di Indonesia (Madlazim, 2015).

Pada Joko Tingkir, solusi awal hasil inversi ditandai dengan simbol [A] dan berstatus *preliminary*. Status ini menunjukkan bahwa data tersebut masih bersifat sementara dan belum dapat dipastikan keakuratannya tanpa proses evaluasi lanjutan (Madlazim, 2015). Untuk menilai kualitasnya, digunakan sistem penilaian berupa kombinasi huruf (A, B, C, dan D) dan angka (1,2,3, dan 4), di mana label A1 menunjukkan data dengan kualitas terbaik, sementara D4 merupakan kualitas paling rendah (Scognamiglio et al., 2009; Triantafyllis et al., 2021). Apabila hasil inversi awal memperlihatkan besar $VR \leq 50$, maka dilakukan proses revisi terhadap solusi tersebut. Pada tahap ini, solusi diperbarui dan ditandai dengan label [M] serta status berubah menjadi *reviewed*. Proses revisi mencakup perhitungan ulang fungsi Green, pemilihan ulang stasiun dengan VR tinggi, dan penyesuaian terhadap pita frekuensi yang digunakan dalam inversi (Triantafyllis et al., 2021).



Gambar 7. Peta diagram *beachball* di Indonesia pada software Joko Tingkir.

Gambar 7 menyajikan peta penyebaran kejadian gempa bumi di wilayah Indonesia yang dilengkapi dengan representasi diagram *beachball* pada software Joko Tingkir. Diagram ini merupakan hasil pemodelan berdasarkan parameter *focal mechanism*, yaitu nilai *strike*, *dip*, dan *rake*, yang diperoleh dari solusi CMT. Pemodelan ini berfungsi untuk mengidentifikasi jenis mekanisme patahan yang menjadi penyebab terjadinya gempa di suatu lokasi tertentu (Triantafyllis et al., 2022).

Seluruh data gempa yang digunakan dalam penelitian ini memiliki karakteristik gempa bumi tektonik, yang berarti presentase komponen *Double Couple* (DC) lebih dominan untuk setiap kejadian gempa bumi. Pemilihan data dengan dominasi komponen DC dilakukan karena sudut Kagan secara konseptual hanya valid untuk membandingkan mekanisme sumber gempa yang murni atau hampir murni bersifat DC, yaitu yang

mewakili proses patahan akibat aktivitas tektonik (Kagan, 1991; Vackář et al., 2017). Selain itu, gempa tektonik memiliki mekanisme yang lebih stabil dan konsisten dalam pola pergeseran sesar, sehingga lebih sesuai untuk metode sudut Kagan sekaligus uji komparasi statistika seperti uji-t berpasangan dan Wilcoxon.

A. Hasil Perhitungan Sudut Kagan

Menurut Kagan (1991), model *focal mechanism* gempa bumi yang direpresentasikan melalui diagram *beachball* merupakan hasil pemodelan orientasi bidang sesar dalam ruang tiga dimensi, yang ditentukan oleh tiga parameter utama, yaitu *strike*, *dip*, dan *rake*. Hasil perhitungan sudut Kagan pada 50 kejadian gempa bumi ditunjukkan pada Tabel 1 dengan perbandingan bentuk *beachball*-nya. Data hasil perhitungan sudut Kagan disajikan berdasarkan besarnya nilai sudut kagan dan nama daerah penelitian, lalu diidentifikasi tipe patahannya sesuai bentuk *beachball*.

Tabel 1. Tabel hasil perhitungan sudut Kagan antara Joko Tingkir dengan GCMT diurutkan berdasarkan besar sudut Kagan dan daerahnya.

No.	Origin Time	GCMT	Joko Tingkir	Sudut Kagan (°)	Daerah	Tipe Patahan
1.	22/03/2024			1,00	Jawa	Normal fault
2.	24/09/2021			1,00	Jawa	Normal fault
3.	05/05/2024			5,29	Jawa	Oblique reverse
4.	30/06/2023			7,28	Jawa	Oblique reverse
5.	01/11/2020			7,28	Jawa	Oblique reverse
6.	14/04/2023			9,34	Jawa	Strike-slip
7.	09/06/2020			11,84	Jawa	Thrust fault
8.	10/11/2023			13,18	Jawa	Thrust fault
9.	29/12/2021			13,99	Jawa	Oblique reverse
10.	21/01/2021			16,02	Jawa	Oblique reverse

11.	21/11/2022			21,86	Jawa	<i>Normal fault</i>
12.	05/04/2022			21,91	Jawa	<i>Thrust fault</i>
13.	15/11/2023			33,12	Jawa	<i>Thrust fault</i>
14.	04/06/2020			33,12	Jawa	<i>Thrust fault</i>
15.	14/09/2021			48,18	Jawa	<i>Normal fault</i>
16.	25/02/2022			49,07	Jawa	<i>Strike-slip</i>
17.	30/10/2021			49,07	Jawa	<i>Strike-slip</i>
18.	18/12/2021			17,05	Sumatera	<i>Oblique reverse</i>
19.	14/11/2023			35,37	Sumatera	<i>Oblique reverse</i>
20.	26/02/2024			39,40	Sumatera	<i>Thrust fault</i>
21.	21/05/2021			41,17	Sumatera	<i>Oblique reverse</i>
22.	28/03/2020			42,20	Sumatera	<i>Thrust fault</i>
23.	31/12/2020			42,34	Sumatera	<i>Thrust fault</i>
24.	24/05/2023			44,72	Sumatera	<i>Thrust fault</i>
25.	26/03/2020			49,08	Sumatera	<i>Thrust fault</i>

26.	12/10/2023			4,96	Sulawesi	<i>Thrust fault</i>
27.	09/01/2023			11,84	Sulawesi	<i>Oblique reverse</i>
28.	05/03/2021			13,61	Sulawesi	<i>Thrust fault</i>
29.	06/01/2021			17,04	Sulawesi	<i>Oblique normal</i>
30.	04/08/2023			18,52	Sulawesi	<i>Thrust fault</i>
31.	05/04/2020			30,54	Sulawesi	<i>Thrust fault</i>
32.	06/09/2020			39,96	Sulawesi	<i>Thrust fault</i>
33.	26/08/2021			47,85	Sulawesi	<i>Thrust fault</i>
34.	16/05/2022			22,48	Maluku	<i>Strike-slip</i>
35.	15/04/2023			24,72	Maluku	<i>Thrust fault</i>
36.	02/11/2021			25,50	Maluku	<i>Strike slip</i>
37.	10/02/2021			27,27	Maluku	<i>Strike slip</i>
38.	10/05/2024			27,60	Maluku	<i>Thrust fault</i>
39.	29/01/2020			32,71	Maluku	<i>Strike slip</i>
40.	24/01/2024			33,92	Maluku	<i>Strike slip</i>

41.	14/04/2023			37,96	Maluku	<i>Strike-slip</i>
42.	06/05/2020			38,60	Maluku	<i>Strike slip</i>
43.	14/01/2021			44,09	Maluku	<i>Thrust fault</i>
44.	06/08/2021			44,44	Maluku	<i>Oblique reverse</i>
45.	21/05/2021			45,12	Maluku	<i>Oblique reverse</i>
46.	19/01/2020			50,78	Nusa Tenggara	<i>Thrust fault</i>
47.	15/02/2020			5,55	Papua	<i>Normal fault</i>
48.	02/04/2023			23,26	Papua	<i>Strike-slip</i>
49.	23/07/2022			26,09	Papua	<i>Normal fault</i>
50.	14/01/2022			32,49	Papua	<i>Oblique reverse</i>

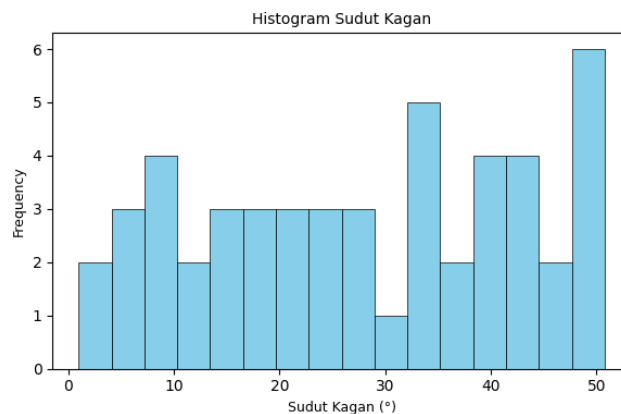
B. Pembahasan Keakuratan Focal Mechanism yang Dihasilkan Software Joko Tingkir terhadap GCMT dengan Perhitungan Sudut Kagan.

Evaluasi perbedaan *focal mechanism* dilakukan dengan pendekatan secara kualitatif menggunakan perhitungan sudut Kagan. Dari hasil perhitungan sudut Kagan pada Tabel 1, semua nilai sudut Kagan pada 50 data memiliki nilai di bawah 60°. Sesuai konsep Kagan (1991), artinya semua data memiliki tingkat keakuratan *focal mechanism* yang relatif tinggi, karena nilai-nilai sudut di bawah 60° menunjukkan perhitungan orientasi *fault* (*strike*, *dip*, dan *rake*) dan bentuk *beachball* yang relatif homogen terhadap GCMT. Hal dibuktikan melalui perbandingan bentuk *beachball* antara Joko Tingkir dan GCMT pada Tabel 1 yang memiliki perbedaan orientasi sudut yang minimal.

Berdasarkan histogram sudut Kagan pada Gambar 8, terlihat bahwa cukup banyak data yang memiliki nilai sudut Kagan mendekati 50°. Salah satu faktor utama yang dapat menyebabkan hal ini adalah distribusi stasiun seismik yang relatif sedikit dan terlalu jauh dari episentrum, *software* Joko Tingkir menggunakan data gempa bumi regional dengan cakupan stasiun yang terbatas daripada data teleseismik yang digunakan GCMT dengan cakupan stasiun yang lebih banyak, sehingga hasil *focal mechanism* yang dihasilkan memiliki perbedaan nilai yang besar (Hosseini et al., 2019; Madlazim, 2015). Hal tersebut mengakibatkan variasi nilai sudut Kagan yang besar yaitu mulai dari 1° hingga 50°. Faktor lainnya adalah perbedaan sudut kemiringan bidang sesar atau *dip* yang besar. Nilai *dip* cenderung lebih sulit diestimasi secara akurat melalui metode inversi *waveform*, karena sensitivitas sinyal seismik terhadap perubahan *dip* umumnya lebih rendah

dibandingkan terhadap *strike* dan *rake* (Kincal & Koca, 2009; Aberman et al., 2017). Hal ini diperparah dengan kualitas sinyal yang rendah atau sinyal dengan rasio sinyal terhadap derau (*signal-to-noise ratio*) yang buruk mengaburkan komponen vertikal dari gelombang untuk menghasilkan nilai *dip* yang sesuai (Kincal & Koca, 2009). Selain itu *dip* hanya dalam rentang 0° – 90° , sehingga adanya perubahan kecil dapat berdampak signifikan pada geometri bidang sesar hasil perhitungan sudut Kagan, akibatnya selisih sudut Kagan menjadi besar (Aberman et al., 2017).

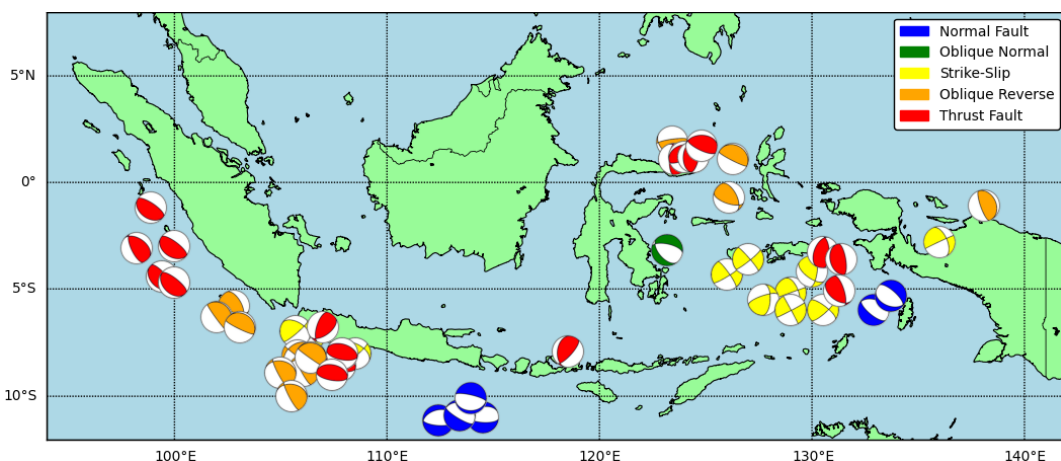
Beberapa *origin time* memiliki nilai sudut Kagan yang jauh berbeda walaupun di daerah yang sama, sebagai contoh pada Tabel 1 di daerah Jawa dengan data nomor 1 dan 17 memiliki nilai sudut Kagan sebesar $1,00^{\circ}$ dan $49,07^{\circ}$. Sesuai persamaan deret aritmatika dalam Wilcoxon, sudut Kagan dihitung untuk mengukur selisih rotasi antara dua matrik vektor antara dua centroid moment tensor, sehingga tidak berkorelasi dengan tipe patahan, kondisi geologi atau tektonik, maupun nilai magnitudo gempa (Kagan, 1991, 2000). Nilai sudut Kagan sepenuhnya merepresentasikan perbedaan orientasi antara dua solusi momen tensor, dalam konteks penelitian ini membandingkan hasil dari *software* Joko Tingkir dengan GCMT



Gambar 8. Histogram hasil perhitungan sudut Kagan.

C. Tipe Patahan

Beachball yang terbentuk pada Tabel 1 diinterpretasikan ke dalam tipe patahan. Pada Gambar 9 adalah *plotting beachball* data Joko Tingkir pada tahun 2020-2024 yang tersebar di enam daerah penelitian yaitu daerah Jawa, Sumatera, Sulawesi, Maluku, Nusa Tenggara, dan Papua. Tiap daerah dianalisis tipe patahannya berdasarkan bentuk *beachball* dan keadaan geologi yang mempengaruhi tiap daerah tersebut.

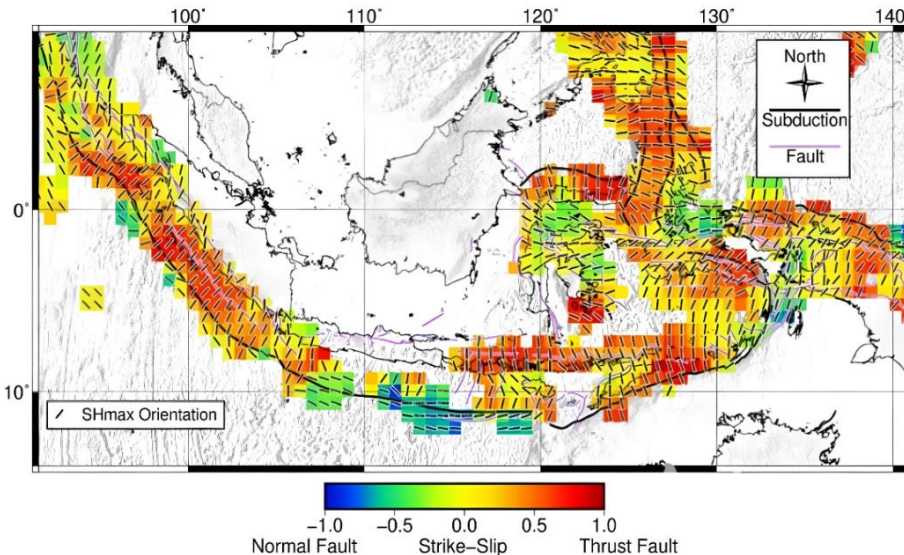


Gambar 9. Peta hasil *plotting beachball* di enam daerah penelitian di Indonesia pada tahun 2020-2024.

1. Daerah Jawa

Berdasarkan hasil diagram *beachball* pada Tabel 1, data daerah Jawa memiliki bentuk *beachball normal fault*, *oblique reverse*, *strike slip*, dan *thrust fault*. Hasil pemetaan *Spatial Mean of SHmax Orientation and Fault Type* pada Gambar 4.5, menunjukkan bahwa Indonesia memiliki warna *fault* dengan tipe patahan yang kompleks (W. Pratama & Kita, 2022). Pada zona selatan Jawa Timur didominasi oleh warna biru dan hijau. Warna *fault* biru merepresentasikan dominasi tegasan ekstensional dengan jenis patahan *normal fault*, sedangkan warna hijau

adalah kombinasi *normal fault* dan *strike-slip* atau disebut *oblique normal*. Adapun arah SH_{max} atau garis-garis hitam pada gambar, yang merepresentasikan arah gaya tegangan maksimum horizontal di kerak bumi (W. Pratama & Kita, 2022). Arah tegangan ini mengontrol tipe patahan dan potensi deformasi kerak di suatu wilayah (Aiman et al., 2023; W. Pratama & Kita, 2022). Arah SH_{max} di selatan Jawa timur terlihat sejajar dengan garis *trench* atau zona subduksi, yang merupakan ciri khas dari zona subduksi tidak saling terkunci (*uncoupled subduction zone*) seperti yang dijelaskan oleh Christensen dan Ruff (1988). Zona ini tidak mentransmisikan tegangan secara efektif dari lempeng subduksi ke busur atas, sehingga menghasilkan kondisi regangan (*extensional*) di busur belakang dan lebih memungkinkan terjadinya gempa-gempa dengan mekanisme sesar normal (Christensen & Lay, 1988; Aribowo, 2024).



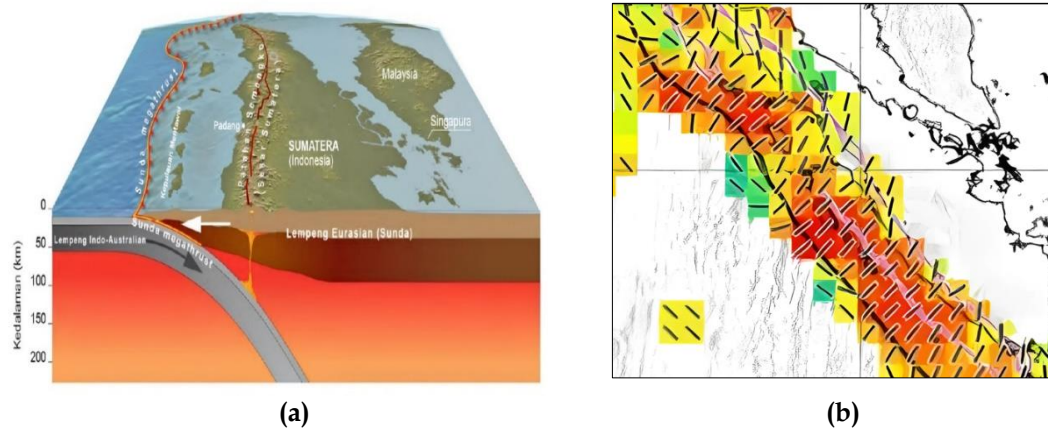
Gambar 10. Peta *Spatial Mean of SHmax Orientation and Fault Type* (W. Pratama & Kita, 2022).

Di bagian selatan Jawa Tengah dan Jawa Barat, terlihat warna *fault* berwarna hijau, kuning, kuning kemerahan atau oranye, dan sedikit warna merah. Warna kuning merepresentasikan patahan *strike-slip*, warna oranye merupakan zona patahan dengan kombinasi *strike-slip* dan *thrust fault* (*reverse fault*) atau disebut *oblique reverse*, dan warna merah adalah zona patahan *thrust fault*. Hal ini menjelaskan bahwa meskipun secara umum wilayah selatan daerah Jawa yang berada dekat dengan zona subduksi Lempeng Indo-Australia dan Eurasia yang mana bersifat *uncoupled* dan didominasi oleh regangan, namun pada bagian Jawa Tengah dan Jawa Barat terdapat kondisi tektonik yang berbeda. Di wilayah ini, terdapat indikasi segmentasi slab dan zona *coupling* lokal yang lebih kuat, yang memungkinkan terjadinya akumulasi tegangan kompresi dan geser (Basso et al., 2009; Sapiie et al., 2015; Supendi et al., 2018). Hal tersebut menimbulkan terbentuknya patahan dengan gerakan mendatar atau *strike-slip*, gerakan naik atau *thrust fault*, bahkan kombinasi gerakan mendatar dan naik atau *oblique reverse*.

2. Daerah Sumatera

Berdasarkan data *beachball* pada Tabel 1 daerah Sumatera, tiga di antaranya *oblique reverse*, sedangkan lima sisanya menunjukkan *thrust fault*. Hal ini sejalan dengan pola warna pada peta SH_{max} yang menunjukkan wilayah *fault* dominan berwarna merah dan oranye.

Pola *thrust fault* dan *oblique reverse* ini sesuai dengan karakter tektonik regional Sumatera yang didominasi oleh zona subduksi aktif di barat daerah Sumatera, tempat Lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah Lempeng Eurasia (Morgan et al., 2020; Natawidjaja et al., 2007). Wilayah ini termasuk dalam segmen Sunda Megathrust, yang secara tektonik tergolong *highly coupled* atau tingkat penguncian lempeng tinggi, sehingga menimbulkan akumulasi tegangan kompresi dalam jangka waktu lama dan dilepaskan dengan mekanisme *thrust fault* (Natawidjaja et al., 2007). Hal ini diperkuat oleh arah SH_{max} yang tegak lurus terhadap garis *trench* yang menandakan adanya gaya kompresi di zona subduksi, mengakibatkan *thrust fault*. Keberadaan patahan *oblique reverse* di beberapa lokasi menunjukkan bahwa adanya kombinasi sesar geser dan sesar naik diantara kedua lempeng. Hal tersebut dibuktikan dengan garis SH_{max} yang nampak miring terhadap garis *trench*, mencerminkan adanya kombinasi gaya kompresi dan gaya geser menghasilkan *oblique*.



Gambar 11. (a) Zona subduksi Sunda Megathrust di Daerah Sumatra (McCaughey et al., 2012). (b) Arah SHmax dan tipe patahan di Sumatra (dimodifikasi dari W. Pratama & Kita, 2022).

3. Daerah Sulawesi

Berdasarkan data *beachball* Tabel 1 daerah Sulawesi, sebagian besar gempa menunjukkan karakteristik *thrust fault*, dengan sedikit variasi berupa *oblique reverse*, dan *oblique normal*. Kondisi ini sejalan dengan kerumitan tektonik di wilayah Sulawesi yang berada pada zona kompleks konvergensi lempeng, di mana terjadi pertemuan antara Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Laut Filipina (Katili, 1978).



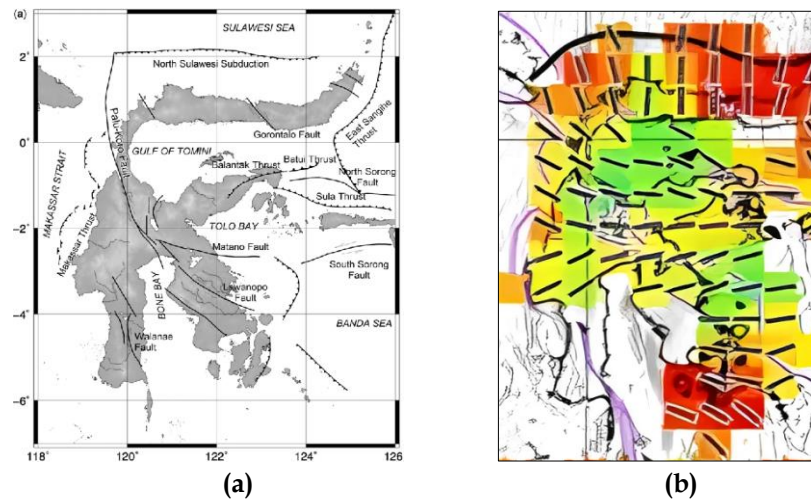
Gambar 12. Pertemuan Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Laut Filipina di Daerah Sulawesi (Sumber: Departemen Geosains FMIPA Universitas Indonesia (2025)).

Pada daerah Sulawesi Utara, terdapat zona konvergensi aktif akibat gaya kompresi Lempeng Laut Maluku dan interaksi blok mikro Sulawesi, sehingga menghasilkan patahan *thrust fault* dan *oblique reverse* (Massinai et al., 2018; Socquet et al., 2006). Jika dikorelasikan dengan peta SHmax, wilayah Sulawesi utara didominasi oleh warna merah dan sedikit oranye dengan arah SHmax yang tegak lurus sampai miring terhadap *trench*, mengindikasikan adanya gaya kompresi serta kombinasi gaya kompresi dan gaya geser di zona subduksi, sehingga menghasilkan *thrust fault* dan *oblique reverse*.

Pada kawasan Sulawesi Tengah dan sepanjang zona Sesar Lawanopo diketahui terdapat pola deformasi yang cukup kompleks, yang terutama dipengaruhi oleh aktivitas pergeseran sesar mendatar aktif (*active strike-slip faulting*) serta adanya proses ekstensi lokal di sekitarnya. Kombinasi kedua mekanisme tersebut kemudian menghasilkan pembentukan struktur patahan dengan karakter *oblique normal*, yaitu jenis patahan yang dipengaruhi secara bersamaan oleh komponen regangan dan geser (Natawidjaja & Daryono, 2015).

Apabila diamati lebih lanjut pada peta arah tegasan maksimum horizontal atau SHmax, kedua wilayah ini memperlihatkan dominasi warna hijau, dengan orientasi arah SHmax yang hampir sejajar terhadap *trench* terdekat. Kondisi ini memberikan indikasi adanya interaksi gaya regangan dan gaya geser yang bekerja secara bersamaan, sehingga memperkuat interpretasi mengenai terbentuknya sistem patahan *oblique normal* di daerah tersebut. Hal ini juga memperlihatkan bahwa dinamika tektonik di Sulawesi Tengah dan Sesar

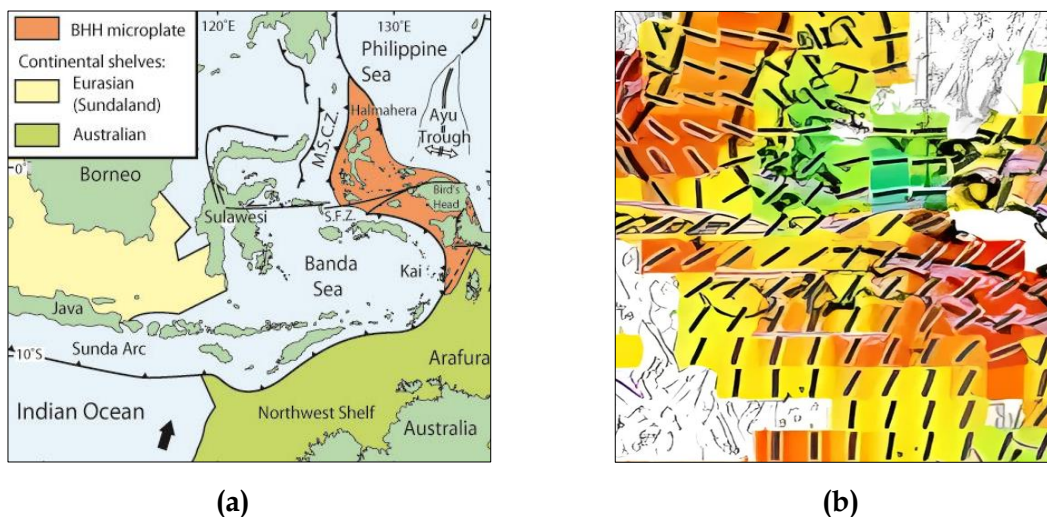
Lawanopo tidak hanya dipengaruhi oleh satu mekanisme deformasi tunggal, melainkan merupakan hasil dari kombinasi beberapa gaya tektonik yang kompleks.



Gambar 13. (a) Sesar-sesar aktif di Daerah Sulawesi (Mardhatillah et al., 2020). (b) Arah SHmax dan tipe patahan di Sulawesi (dimodifikasi dari W. Pratama & Kita, 2022).

4. Daerah Maluku

Pada diagram *beachball* Tabel 1 daerah Maluku, menunjukkan tipe patahan *strike-slip*, *oblique reverse*, dan *thrust fault*. Daerah Maluku berada di antara pertemuan lempeng besar dan mikroblok, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Pasifik, Lempeng Eurasia, dan Mikrolempeng Laut Maluku (Adii et al., 2021). Keempat sistem ini saling berinteraksi dan menimbulkan deformasi kompleks berupa subduksi ganda, sesar mendatar, serta zona tumbukan antar blok, yang semuanya turut membentuk pola tegangan regional di kawasan ini (Adii et al., 2021).



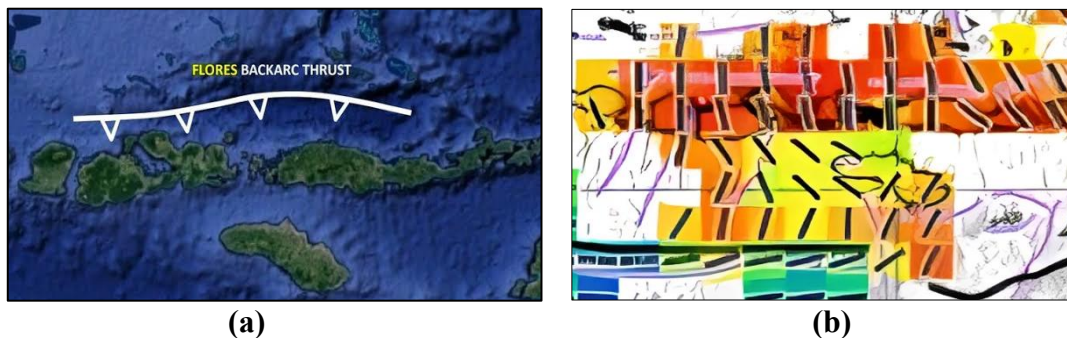
Gambar 14. (a) Lokasi lempeng tektonik di Maluku (Charlton, 2014). (b) Arah SHmax dan tipe patahan di Maluku (dimodifikasi dari W. Pratama & Kita, 2022).

Peta SHmax pada Gambar 14(b) di wilayah Maluku memperlihatkan variasi warna dominan kuning, oranye, dan merah. Pada daerah Laut Seram, terdapat zona subduksi aktif di mana Lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah mikroblok Seram dan Papua Barat, menghasilkan gerakan naik atau *thrust fault* (R. W. Saputra et al., 2025). Hal ini dibuktikan dengan warna *fault* berwarna merah pada peta SHmax dan arah SHmax yang tegak lurus terhadap garis *trench* yang menandakan adanya penunjaman atau gaya kompresi. Pada wilayah Halmahera dan sebagian daerah Seram, terdapat zona benturan antara Lempeng Laut Filipina yang bergerak ke barat dengan Lempeng Eurasia dan mikroblok di laut Halmahera, yang mana pertemuan

dua lempeng dan satu mikroblok ini menghasilkan kombinasi gaya kompresi dan gaya geser, sehingga menghasilkan *oblique reverse* (Yuliatmoko & Kurniawan, 2019). Hal ini dibuktikan dengan warna *fault* berwarna oranye dan arah SHmax yang miring terhadap garis *trench*. Sementara di Laut Banda, zona kompleks berupa lengkungan aktif (Banda Arc) dan cekungan belakang busur (*back-arc basin*), di mana adanya rotasi dan pembukaan cekungan Laut Banda akibat rollback slab subduksi, menyebabkan dominasi gaya geser lateral antar mikroblok, sehingga terbentuk *strike-slip* (Patria et al., 2021). Hal ini tergambar dengan *fault* berwarna kuning pada peta SHmax dan arah SHmax yang miring terhadap jalur *trench*.

5. Daerah Nusa Tenggara

Berdasarkan data diagram *beachball* Tabel 1 daerah Nusa Tenggara, kejadian gempa menunjukkan tipe patahan *thrust fault*. Ciri ini memperlihatkan adanya gaya kompresi di wilayah tersebut. Jika dikorelasikan dengan peta SHmax daerah Nusa Tenggara pada Gambar 15(b), terlihat bahwa wilayah tersebut didominasi oleh warna merah yang merepresentasikan zona patahan *thrust fault*.



Gambar 15. (a) Keberadaan Flores Back-Arc Thrust di Nusa Tenggara (Maulida et al., 2024).

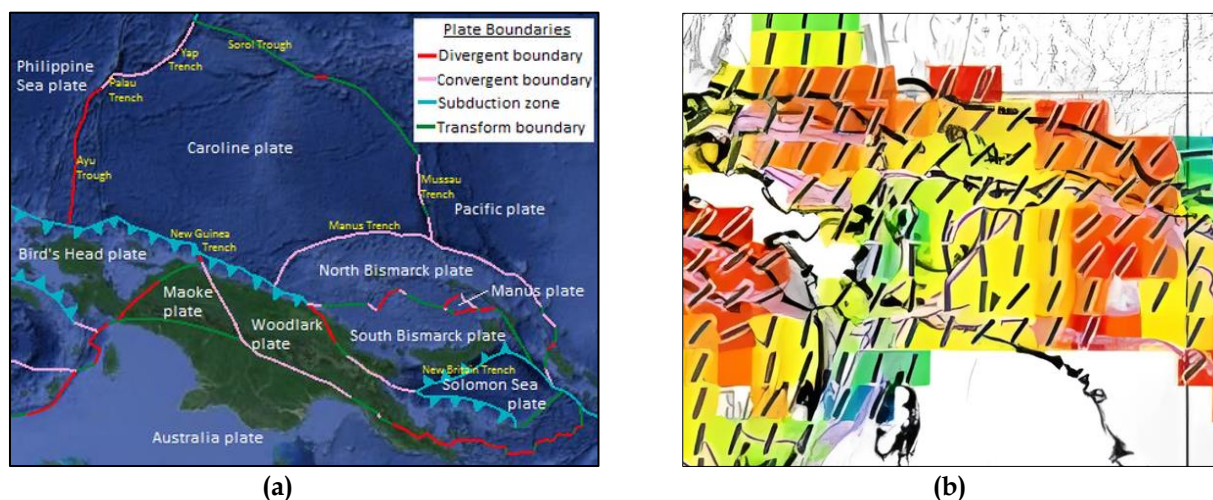
(b) Arah SHmax dan tipe patahan di Nusa Tenggara (dimodifikasi dari W. Pratama & Kita, 2022).

Kondisi *thrust fault* di Nusa Tenggara sangat erat kaitannya dengan keberadaan *Flores Back-Arc Thrust*, yaitu sistem sesar naik yang membentang dari Daerah Flores hingga Daerah Wetar (Maulida et al., 2024). Sesar ini terbentuk sebagai respons dari proses konvergensi antara Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia, menciptakan tekanan tektonik di wilayah busur belakang (*back-arc*) Nusa Tenggara (Taruna & Banyunegoro, 2018). Tekanan inilah yang memicu terbentuknya gempa-gempa dengan mekanisme *thrust fault*.

6. Daerah Papua

Berdasarkan diagram *beachball* Tabel 1 daerah Papua, jenis patahan yang tercatat adalah *normal fault*, *strike-slip*, dan *oblique reverse*. Jenis patahan di Papua dipengaruhi oleh interaksi antara Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, Lempeng Mikro Caroline, serta mikroblok seperti *Bird's Head Plate* atau Lempeng Kepala Burung, dan Lempeng Maoke (S. E. A. Saputra et al., 2022).

Di wilayah Papua bagian tengah, terjadi interaksi antara *Bird's Head Plate* dan *Maoke Plate*, disertai pengaruh sisa ekstensi dari *back-arc spreading* pada Laut Banda di barat daya yang menyebabkan pergeseran lateral antarblok, sehingga menghasilkan tipe patahan *strike-slip* (S. E. A. Saputra et al., 2022). Ini juga dibuktikan dengan arah SHmax yang miring terhadap garis *trench* di Papua bagian tengah, menandakan adanya gaya geser. Pada Papua bagian utara, keberadaan *New Guinea Trench* sebagai zona subduksi antara *Caroline Plate* dan daratan Papua menyebabkan kombinasi gaya kompresi dan gaya geser atau *oblique reverse* (Fu et al., 2024). Hal ini sesuai dengan peta SHmax di daerah tersebut yang berwarna oranye dan arah SHmax yang miring terhadap garis *trench* mencerminkan karakteristik *oblique reverse*. Di Papua bagian tengah, terutama di wilayah yang menunjukkan sedikit warna biru dan transisi biru kehijauan mengindikasikan adanya patahan *normal fault*. Fenomena ini disebabkan oleh tarikan kuat akibat divergensi mikroblok dan aktivitas *spreading* dari Laut Banda, memperkuat gaya regangan kerak di bagian bawah Papua, sehingga menimbulkan sesar normal (Adhitama et al., 2017; Cummins et al., 2020).



Gambar 16. (a) Lokasi lempeng tektonik di Papua (Zhang et al., 2022). (b) Arah SHmax dan tipe patahan di Papua (dimodifikasi dari W. Pratama & Kita, 2022).

D. Hasil Perhitungan Uji-T Berpasangan dan Wilcoxon.

Analisis secara kuantitatif dilakukan menggunakan perhitungan uji kompoarasi statistika yaitu menggunakan uji parametrik dengan uji-t berpasangan dan uji non-parametrik dengan Wilcoxon. Pada perhitungan uji-t berpasangan dan Wilcoxon dilakukan untuk melihat apakah terdapat perbedaan signifikan secara statistik atau tidak antara parameter CMT dari Joko Tingkir terhadap GCMT. Hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 2.

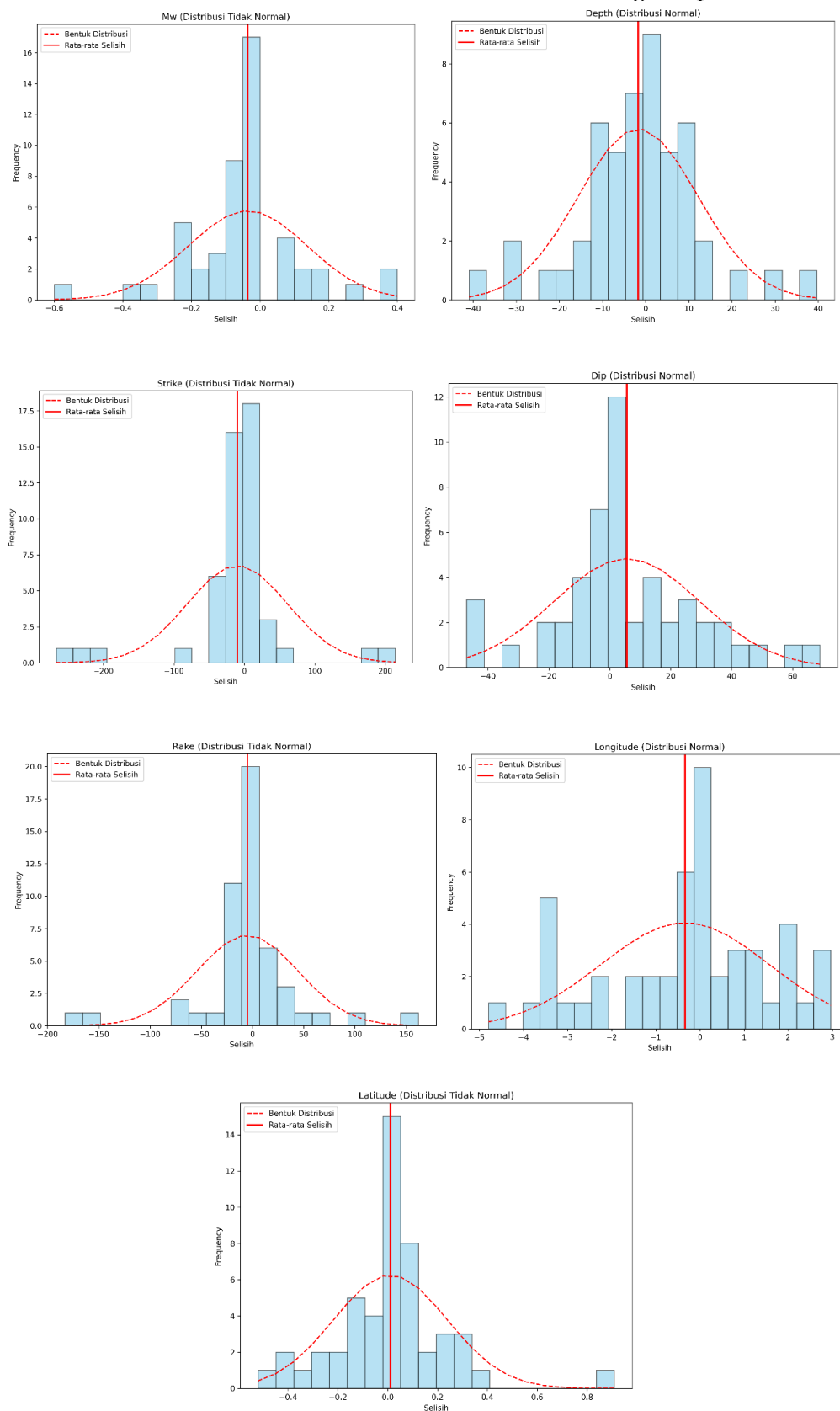
Tabel 2. Hasil perhitungan uji-t berpasangan dan Wilcoxon.

Parameter (Joko Tingkir vs GCMT)	p-value Normalitas ($\alpha=0,05$)	Uji	Nilai Statistika Uji (Nilai-t dan Nilai-W)	Z- score	p-value Hipotesis ($\alpha=0,05$)	Kesimpulan
Magnitudo Momen (M_w)	$2,69 \cdot 10^{-3}$	Wilcoxon	199,00	1,46	0,15	Tidak ada perbedaan signifikan
Kedalaman	$6,16 \cdot 10^{-2}$	Uji-T Berpasangan	-0,88	-	0,38	Tidak ada perbedaan signifikan
Strike	$2,68 \cdot 10^{-7}$	Wilcoxon	612,00	0,25	0,81	Tidak ada perbedaan signifikan
Dip	$1,54 \cdot 10^{-1}$	Uji-T Berpasangan	1,64	-	0,11	Tidak ada perbedaan signifikan
Rake	$7,03 \cdot 10^{-7}$	Wilcoxon	521,00	0,69	0,50	Tidak ada perbedaan signifikan
Longitude	$7,14 \cdot 10^{-2}$	Uji-T Berpasangan	-1,23	-	0,22	Tidak ada perbedaan signifikan
Latitude	$2,25 \cdot 10^{-3}$	Wilcoxon	386,50	0,32	0,76	Tidak ada perbedaan signifikan

E. Pembahasan Keakuratan Data Katalog Joko Tingkir terhadap GCMT melalui Perhitungan Uji-T Berpasangan dan Wilcoxon Ditinjau dari Hipotesis yang Telah Ditetapkan.

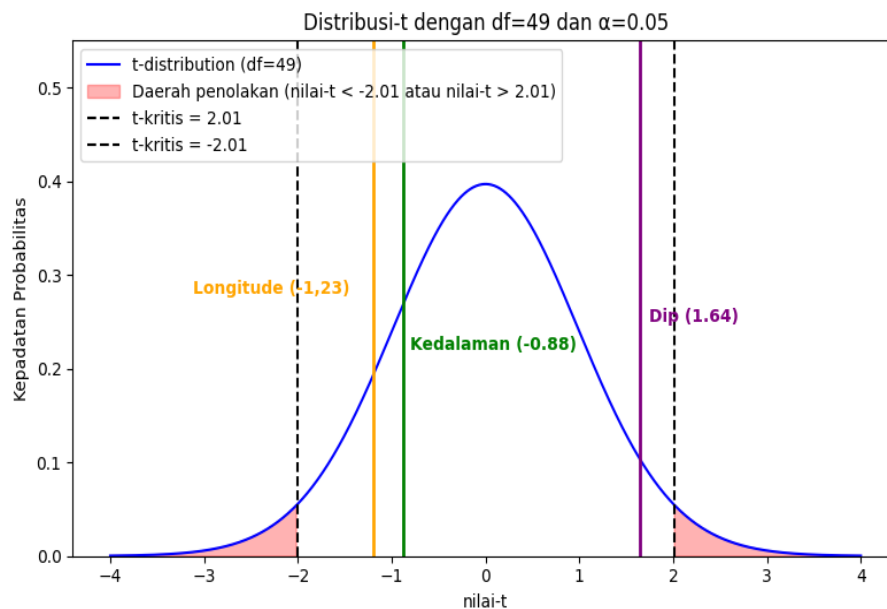
Pada Tabel 2, hasil uji normalitas menunjukkan ada empat parameter memiliki p-value normalitas $\leq 0,05$ yaitu parameter magnitudo momen (M_w), strike, rake, dan latitude, yang mengindikasikan bahwa distribusi selisih data pada parameter tersebut tidak terdistribusi normal karena memiliki selisih ekstrem, pada kondisi ini digunakan metode non-parametrik yaitu Wilcoxon. Lalu, ada tiga parameter dengan p-value normalitas $> 0,05$ yaitu parameter kedalaman, dip, dan longitude, yang mengindikasikan bahwa variasi selisih antar pasangan data relatif kecil dan mendekati rata-rata selisih populasi, sehingga data di tiga parameter ini terdistribusi normal karena

tidak memiliki selisih ekstrem. Dalam kondisi ini, metode uji parametrik yaitu uji-t berpasangan digunakan. Distribusi selisih ini divisualisasikan dalam bentuk histogram pada Gambar 9.



Gambar 17. Histogram hasil uji normalitas tiap parameter.

Statistika uji yang dihasilkan dari uji-t berpasangan dan Wilcoxon yaitu nilai-t dan nilai-W. Nilai-t direpresentasikan dengan persamaan $t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}}$, yang mana dari persamaan ini, dua parameter dikatakan tidak memiliki perbedaan sama sekali apabila nilai $\bar{d} = 0$, yang berarti pada kondisi $t = 0$. Apabila nilai-t semakin mendekati nol, maka terdapat bukti kuat bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara data katalog Joko Tingkir dengan GCMT, karena rata-rata perbedaannya mendekati 0. Tiga parameter yang menghasilkan nilai-t, diantaranya kedalaman, *dip*, dan *longitude* dengan masing-masing nilai-t yang dihasilkan yaitu -0,88, 1,64 dan -1,23. Apabila nilai-t bertanda negatif, artinya kebanyakan data katalog Joko Tingkir cenderung memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan data katalog GCMT. Sedangkan apabila nilai-t bertanda positif, artinya kebanyakan data katalog Joko Tingkir cenderung memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan data katalog GCMT.



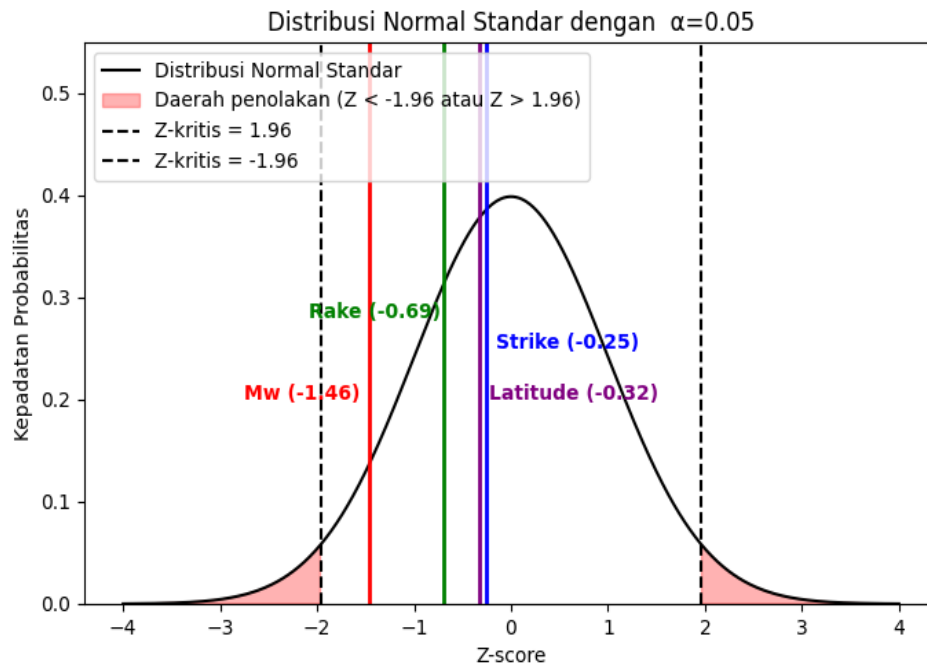
Gambar 18. Grafik distribusi-t dari hasil perhitungan uji-t berpasangan.

Grafik distribusi-t pada Gambar 10 menunjukkan kurva distribusi probabilitas untuk uji-t berpasangan dengan daerah kritis yang ditandai garis putus-putus. Nilai kritis sebesar $\pm 2,01$ diperoleh dari tabel distribusi-t dengan $df = 49$ dan $\alpha = 0,05$. Nilai $\pm 2,01$ ini adalah batas kritis untuk menentukan daerah penerimaan H_0 sekaligus batas minimum besarnya perbedaan dianggap signifikan secara statistik. Daerah di dalam rentang $-2,01 < t < 2,01$ memiliki kepadatan probabilitas yang tinggi, yang berarti probabilitas menerima H_0 lebih besar. Pada rentang ini, nilai-t yang diperoleh dekat dengan rata-rata populasi, sehingga hasil tersebut mencerminkan nilai selisih yang paling sering muncul. Dengan kata lain, pada rentang tersebut tidak ditemukan efek yang berarti secara statistik atau tidak ada perbedaan yang signifikan antara data katalog Joko Tingkir dan GCMT. Sedangkan, daerah diluar rentang $-2,01$ dan $2,01$ mendapatkan probabilitas menerima H_0 sangat kecil, karena nilai-t di daerah ini jauh dari nilai rata-rata populasi. Pada kondisi ini, statistika menganggap terdapat efek yang signifikan pada data, sehingga terdapat bukti yang kuat ada perbedaan signifikan antara data katalog Joko Tingkir dengan GCMT.

Semua nilai-t yang dihasilkan parameter kedalaman, *dip*, dan *longitude* berada di dalam rentang $-2,01 < t < 2,01$, yang berarti bahwa tidak ada satu pun dari ketiga parameter ini yang menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua katalog. Hal ini menunjukkan berdasarkan uji statistik yang dilakukan, data dari katalog Joko Tingkir dan GCMT tidak memiliki perbedaan yang cukup besar untuk dianggap signifikan secara statistik pada parameter kedalaman, *dip*, dan *longitude*. Dengan demikian, hipotesis nol (H_0), yang menyatakan bahwa tidak ada perbedaan antara kedua katalog, tidak dapat ditolak atau probabilitas H_0 terjadi sangat tinggi untuk ketiga parameter ini.

Empat parameter yang menghasilkan nilai-W dari uji Wilcoxon, diantaranya parameter magnitudo momen (M_w), *strike*, *rake*, dan *latitude*. Sesuai konsep Wilcoxon, dikatakan data kelompok Joko Tingkir tidak secara konsisten lebih besar atau lebih kecil daripada data kelompok GCMT, apabila jumlah peringkat positif (W_i^+) dan jumlah peringkat negatif (W_i^-) saling mendekati setengah dari jumlah total peringkat absolut. Untuk menjumlahkan peringkat absolut dari 50 data uji, menggunakan persamaan (4.1). Dari persamaan tersebut, nilai-W yang dihasilkan tiap parameter setidaknya harus mendekati 637,5. Dari keempat parameter

magnitudo momen (M_w), *strike*, *rake*, dan *latitude* menghasilkan nilai-W sebesar 199,612,521, dan 386. Semua nilai-W ini relatif tidak terlalu jauh dari 637,5, akan tetapi untuk mengetahui lebih lanjut apakah memang nilai-W yang dihasilkan merepresentasikan perbedaan yang tidak signifikan, maka perlu diketahui nilai kritisnya. Karena pada penelitian ini menggunakan data uji lebih dari 30 data, sesuai konsep Central Limit Theorem (CLT), data uji yang lebih dari 30 data, perlu dikonversi ke dalam bentuk distribusi normal standar dalam skala Z-score untuk mengetahui nilai-W yang dihasilkan berada dalam daerah kritis atau tidak, sehingga dapat ditentukan apakah terdapat perbedaan signifikan antara kelompok data Joko Tingkir dan GCMT.



Gambar 19. Grafik distribusi normal standar dari hasil perhitungan Wilcoxon.

Grafik distribusi normal standar pada Gambar 11 menunjukkan bentuk kurva distribusi probabilitas untuk uji Wilcoxon dengan daerah kritis yang ditandai berdasarkan nilai Z-score yang diperoleh pada Tabel 2. Nilai $\pm 1,96$ diperoleh dari tabel distribusi normal standar untuk $\alpha = 0,05$. Nilai $\pm 1,96$ ini adalah batas kritis untuk menentukan daerah penerimaan H_0 sekaligus batas minimum besarnya perbedaan dianggap signifikan secara statistik. Daerah di dalam rentang $-1,96 < Z < 1,96$ memiliki kepadatan probabilitas yang tinggi, yang berarti probabilitas menerima H_0 lebih besar, sehingga tidak ditemukan efek yang berarti secara statistik atau tidak ada perbedaan yang signifikan antara data katalog Joko Tingkir dan GCMT. Sedangkan daerah di luar rentang $-1,96$ dan $1,96$ memiliki probabilitas menerima H_0 yang sangat kecil, sehingga terdapat bukti kuat bahwa ada perbedaan signifikan antara data katalog Joko Tingkir dengan GCMT karena nilai di luar rentang tersebut dianggap nilai ekstrem.

Semua Z-score yang dihasilkan dari keempat parameter, yaitu *Mw* ($-1,46$), *strike* ($-0,25$), *rake* ($-0,69$), dan *latitude* ($-0,32$), berada di dalam rentang $-1,96 < Z < 1,96$. Hal ini menunjukkan bahwa keempat parameter tersebut berada dalam rentang menerima H_0 , yang mana pada rentang ini, selisih data masuk ke wilayah dengan selisih paling sering muncul. Sehingga untuk keempat parameter tersebut tidak ditemukan efek yang signifikan secara statistik, yang berarti tidak ada perbedaan signifikan antara data katalog Joko Tingkir dan GCMT.

F. Potensi Hasil terhadap Upaya Mitigasi Bencana

Perbedaan nilai antara kedua katalog data terjadi karena adanya perbedaan jenis data yang digunakan, yaitu data teleseismik pada GCMT dan data regional pada *software* Joko Tingkir. Data teleseismik memiliki cakupan stasiun perekam yang lebih luas dan banyak dibandingkan data regional. Untuk menguji konsistensi perbedaan tersebut, dilakukan pengujian statistik menggunakan uji-t berpasangan dan Wilcoxon sesuai dengan persebaran datanya untuk mengukur konsistensi kesignifikanan perbedaan diantara kedua katalog. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dari semua parameter yang diuji, secara statistik tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua katalog data. Hal ini mengindikasikan kedua katalog data tersebut relatif konsisten dan dapat diintegrasikan. Berdasarkan penelitian ini, data yang sudah ada pada Joko Tingkir

dapat dimanfaatkan dalam pemodelan risiko dan penyusunan strategi mitigasi, terlebih lagi dengan data stasiun dan data gempa yang lebih banyak, ini akan membuat pemodelan mitigasi bencana nantinya menjadi lebih komprehensif. Hasil statistik ini bisa dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas basis data bencana, yang mana dapat digunakan dalam pemodelan bahaya (*hazard*) dan risiko (*risk assessment*) dalam pembangunan model mitigasi bencana.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Hasil perhitungan sudut Kagan dari 50 data uji menunjukkan tidak ada yang mencapai batas 60° sebagaimana dikemukakan oleh Kagan (1991). Nilai ini mengindikasikan bahwa *focal mechanism* dan bentuk *beachball* yang dihasilkan oleh *software* Joko Tingkir relatif sesuai dan homogen terhadap GCMT. Faktor yang menyebabkan variasi nilai sudut Kagan menjadi besar dari 1° hingga 50° adalah distribusi stasiun seismik yang relatif sedikit dibandingkan GCMT dan terlalu jauh dari episentrum, *software* Joko Tingkir menggunakan data gempa bumi regional dengan cakupan stasiun yang terbatas daripada data teleseismik yang digunakan GCMT dengan cakupan stasiun yang lebih banyak, sehingga hasil *focal mechanism* yang dihasilkan memiliki perbedaan nilai yang besar. Selain itu, berdasarkan hasil analisis statistik menggunakan uji-t berpasangan dan uji Wilcoxon terhadap data katalog gempa bumi tahun 2020-2024, semua parameter dari magnitudo momen (M_w), kedalaman, *strike*, *dip*, *rake*, *longitude*, dan *latitude* tidak ditemukan perbedaan signifikan antara data katalog dari *software* Joko Tingkir terhadap Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Hal ini ditunjukkan oleh nilai-t dan nilai-W yang berada dalam daerah penerimaan H_0 , serta tidak mencapai daerah kritis. Dengan kata lain, selisih antara kedua data katalog tidak cukup signifikan secara statistik, sehingga probabilitas H_0 terjadi masih tinggi.

Berdasarkan keseluruhan hasil evaluasi sudut Kagan dan analisis statistik, dapat disimpulkan bahwa untuk periode tahun 2020–2024 pada parameter magnitudo momen (M_w), kedalaman, *strike*, *dip*, *rake*, *longitude*, dan *latitude* tidak ditemukan perbedaan yang signifikan antara data katalog Joko Tingkir dan GCMT, baik secara statistik maupun dari segi kesesuaian orientasi mekanisme gempa dengan sudut Kagan. Dengan demikian, *software* Joko Tingkir menghasilkan data yang tergolong baik dan dapat diandalkan masyarakat, termasuk dalam pengembangan upaya mitigasi bencana.

B. Saran

Ditemukan bahwa beberapa data kejadian gempa bumi yang tercatat di GCMT tidak tersedia di katalog Joko Tingkir, sehingga jumlah data yang dianalisis menjadi terbatas. Ke depannya, disarankan agar data katalog pada *software* Joko Tingkir diperluas dengan menambahkan data kejadian gempa yang tercatat di GCMT. Hal ini penting agar jumlah data lebih memadai untuk penelitian mendatang, sehingga hasil analisis menjadi lebih representatif dan valid.

DAFTAR PUSTAKA

- Aberman, K., Katzir, O., Zhou, Q., Luo, Z., Sharf, A., Greif, C., Chen, B., & Cohen-Or, D. (2017). Dip transform for 3D shape reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 36(4), 1–11.
- Adhitama, R., Hall, R., & White, L. T. (2017). *Extension in the Kumawa block, west Papua, Indonesia*.
- Adii, J., Kusumawati, D., Falevi, C., & Sahara, D. P. (2021). Maluku Sea Plate Faulting Regime Analysis: A Preliminary Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 873(1), 012100.
- Aiman, Y. A., Delorey, A. A., Lu, Y., & Bokelmann, G. (2023). S Hmax orientation in the Alpine region from observations of stress-induced anisotropy of nonlinear elasticity. *Geophysical Journal International*, 235(3), 2137–2148.
- Aribowo, Y. (2024). Geological Structure impacts to hydrocarbon potential and active faults in the East Java Basin, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 9(3), 373–377.
- Basso, T., Moraes, R. L. O., Sanches, B. P., & Jino, M. (2009). An investigation of java faults operators derived from a field data study on java software faults. *Workshop de Testes e Tolerância a Falhas (WTF)*, 156–168.
- Bayoud, H. A. (2021). Tests of normality: new test and comparative study. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 50(12), 4442–4463.
- Carlucci, M. E., & Wright, D. B. (2020). Inferential statistics. *Research Methods in Psychology*, 395.
- Charlton, T. (2014). *The Bird's Head-Halmahera microplate: an unrecognised plate simplifies present-day SE Asia tectonic*.

- Chin, T.-L., Chen, K.-Y., Chen, D.-Y., & Wang, T.-H. (2021). An attention-based hypocenter estimator for earthquake localization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–10.
- Christensen, D. H., & Lay, T. (1988). Large earthquakes in the Tonga region associated with subduction of the Louisville Ridge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B11), 13367–13389.
- 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.
- Dziewonski, A. M., Chou, T., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4), 2825–2852.
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200, 1–9.
- 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.
- Fu, Y., Zhang, G., Wang, W., Yang, A., He, T., Zhou, Z., & Han, X. (2024). Identification of the Caroline Plate boundary: constraints from magnetic anomaly. *Acta Oceanologica Sinica*, 43(8), 1–12.
- González, Á. (2024). Improvements and heterogeneities of the Global Centroid Moment Tensor catalog. *Seismological Research Letters*, 95(6), 3566–3578.
- Hosseini, H., Pakzad, M., & Naserieh, S. (2019). Iranian regional centroid moment tensor catalog: Solutions for 2012–2017. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.11.001>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9), e2021GC009812.
- Kagan, Y. Y. (1991). 3-D rotation of double-couple earthquake sources. *Geophysical Journal International*, 106(3), 709–716.
- Kagan, Y. Y. (2000). Temporal correlations of earthquake focal mechanisms. *Geophysical Journal International*, 143(3), 881–897.
- Katili, J. A. (1978). Past and present geotectonic position of Sulawesi, Indonesia. *Tectonophysics*, 45(4), 289–322.
- Madlazim, M. (2015). Validation of Joko Tingkir software using tsunami. *Journal of Tsunami Society International*, 34(3).
- Mardhatillah, E., Anggraini, A., & Nukman, M. (2020). Tinjauan Perubahan Stress Coulomb Ko-Seismik Pada Sekuens Gempa Palu M 7, 5 28 September 2018. *Jurnal Fisika Indonesia*, 24(3), 175–184.
- Massinai, M. A., Ismullah, M. M. F., Harime, B., & Alimuddin, F. (2018). Analysis of Focal Mechanism Distribution in Northern Sulawesi. *Journal of Physics: Conference Series*, 1093(1), 012038.
- Maulida, P., Laksono, S. A., Herawati, Y. A., Rizkiya, P., & Kurniawan, A. (2024a). Analysis of Deformation Along the Flores Back-Arc Thrust Using GPS Observation Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1418(1), 012033.
- Maulida, P., Laksono, S. A., Herawati, Y. A., Rizkiya, P., & Kurniawan, A. (2024b). Analysis of Deformation Along the Flores Back-Arc Thrust Using GPS Observation Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1418(1), 012033.
- McCaughey, J., Lubis, A. M., Huang, Z., Yao, Y., Hill, E. M., Eriksson, S., & Sieh, K. (2012). Earthquake and tsunami hazard in West Sumatra: integrating science, outreach, and local stakeholder needs. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 8535.
- Morgan, P. M., Feng, L., Meltzner, A. J., Mallick, R., & Hill, E. M. (2020). Diverse slip behavior of the banyak islands subsegment of the sunda megathrust in Sumatra, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(11), e2020JB020011.
- Natawidjaja, D. H., & Daryono, M. R. (2015). The Lawanopo Fault, Central Sulawesi, East Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 1658(1).
- Natawidjaja, D. H., Sieh, K., Galetzka, J., Suwargadi, B. W., Cheng, H., Edwards, R. L., & Chlieh, M. (2007). Interseismic deformation above the Sunda Megathrust recorded in coral microatolls of the Mentawai islands, West Sumatra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B2).
- Park, H. M. (2015). *Hypothesis testing and statistical power of a test*.
- 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.

- Prastowo, T., & Hardy, T. (2015). *SCIENCE OF TSUNAMI HAZARDS Journal of Tsunami Society International Volume 34 Number 3 2015 VALIDATION OF JOKO TINGKIR SOFTWARE USING TSUNAMI IMPORTANCE*. 34(3), 189. <http://www.iris.edu>
- Pratama, I. P. D. (2021). Koreksi Instrumen pada Seismometer Broadband Trilium-120p dan Short-Period DS-04A Co-Located di Stasiun Geofisika Denpasar (Studi Kasus: Gempabumi Lombok 31 Maret 2016). *Megasains*, 12(1), 1-7.
- Pratama, W., & Kita, S. (2022). *Stress field orientation obtained from earthquake focal mechanisms*.
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33.
- Sapiie, B., Danio, H., Priyono, A., Asikin, A. R., Widarto, D. S., Widiyanto, E., & Tsuji, T. (2015). Geological characteristic and fault stability of the Gundih CCS pilot project at central Java, Indonesia. *Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, 18-20 November 2015*, 110-113.
- Saputra, R. W., Diputra, A. S. G., Sahara, D. P., Surya, T. S. C., Sharfina, N. P., & Kusumawati, D. (2025). Stress Inversion and Fault Instability Analysis of Seram-Buru Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1458(1), 012029.
- Saputra, S. E. A., Fergusson, C. L., Dosseto, A., Dougherty, A., & Murray-Wallace, C. V. (2022). Late Quaternary neotectonics in the Bird's Head Peninsula (West Papua), Indonesia: implications for plate motions in northwestern New Guinea, western Pacific. *Journal of Asian Earth Sciences*, 236, 105336.
- Sawade, L., Beller, S., Lei, W., & Tromp, J. (2022). Global centroid moment tensor solutions in a heterogeneous earth: the CMT3D catalogue. *Geophysical Journal International*, 231(3), 1727-1738.
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., Ambrosius, B., & Spakman, W. (2006). Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B8).
- 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.
- Sugiyono, P. D. (2018). Quantitative, qualitative, and R&D research methods. *Bandung:(ALFABETA, Ed.)*.
- Taruna, R. M., & Banyunegoro, V. H. (2018). Earthquake relocation using double difference method for 2d modelling of subducting slab and back arc thrust in West Nusa Tenggara. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Aplikasinya (JPFA)*, 8(2), 132-143.
- Triantafyllis, N., Sokos, E., Ilias, A., & Zahradnik, J. (2016). Scisola: automatic moment tensor solution for SeisComP3. *Seismological Research Letters*, 87(1), 157-163.
- Triantafyllis, N., Venetis, I. E., Fountoulakis, I., Pikoulis, E., Sokos, E., & Evangelidis, C. P. (2022). Gisola: A high-performance computing application for real-time moment tensor inversion. *Seismological Society of America*, 93(2A), 957-966.
- Triantafyllis, N., Venetis, I., Fountoulakis, I., Pikoulis, E.-V., Sokos, E., & Evangelidis, C. (2021). Gisola: real-time moment tensor computation optimized for multicore and manycore architectures. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU21-15888.
- Uchide, T., Shiina, T., & Imanishi, K. (2022). Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(6), e2022JB024036.
- 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.
- Vallée, M., Charléty, J., Ferreira, A. M. G., Delouis, B., & Vergoz, J. (2011). SCARDEC: a new technique for the rapid determination of seismic moment magnitude, focal mechanism and source time functions for large earthquakes using body-wave deconvolution. *Geophysical Journal International*, 184(1), 338-358.
- Yuliatmoko, R. S., & Kurniawan, T. (2019). Analysis of Stress Drop Variations in Fault and Subduction Zones of Maluku and Halmahera Earthquakes in 2019. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Aplikasinya (JPFA)*, 9(2), 152-162.
- Zhang, Z., Li, S., Wang, G., Suo, Y., Wang, G., & Wang, P. (2022). Plate boundary processes of the Caroline Plate. *Science China Earth Sciences*, 65(8), 1554-1567.