

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Insiden seismik berupa gempa bumi berkekuatan Mw 7.25 terjadi di Laut Flores pada pukul 11.20 WITA tanggal 14 Desember 2021. Berdasarkan data lokasi episenter dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), pusat aktivitas seismik berada di sekitar 100 km sebelah utara Kota Maumere, Indonesia pada koordinat latitude -7.603 dan longitude 122.227 di kedalaman 14,3 km. Gempa bumi ini dikategorikan pada peta tingkat guncangan (*shakemap*) BMKG sebagai gempa dengan intensitas antara III dan VI skala Mercalli yang dimodifikasi.

Gempa bumi yang terjadi di Laut Flores diduga dipicu oleh aktivitas seismik dan sesar tektonik yang terjadi terkait dengan *Flores Sea Thrust System* atau FSTS (Maulana et al., 2023b), yang meliputi sesar Kalaotoa, sesar Selayar, dan sesar naik Laut Flores (Goes et al., 1997; Hall, 2002; Hutchings & Mooney, 2021; Supendi et al., 2020, 2022). Struktur utama di Laut Flores adalah sesar naik busur belakang (*back-arc thrust*) yang berarah barat-timur (Maulana et al., 2023a; Supendi et al., 2022). Supendi et al. (2022) mengungkapkan keberadaan sesar yang sebelumnya tidak dikenal, yang disebut Sesar Kalaotoa diduga memicu gempa bumi di Laut Flores dengan magnitudo 7.25 pada tanggal 14 Desember 2021. Sesar Kalaotoa (KF) berupa sesar dengan mekanisme sesar mendatar (*strike-slip fault*) berarah barat laut-tenggara. Sesar Kalaotoa diperkirakan memiliki panjang sekitar 100 kilometer (segmen lain dengan panjang ~50 dan ~40 km) dan berperan dalam pengaturan tektonik di Indonesia yang sangat kompleks (Supendi et al., 2022; Simanjuntak & Ansari, 2023).

Survey kerusakan yang dilakukan mengindikasikan jenis kerusakan signifikan akibat rekahan permukaan, retakan tanah, tanah longsor, dan amblesan tanah, terutama di wilayah selatan Pulau Kalaotoa (Maulana et al., 2023a). Sesar naik ini juga pernah menyebabkan gempa bumi berkekuatan Mw 7,5 pada kedalaman 27,7 km dan memicu gelombang tsunami setinggi 25 meter dengan radius sebaran 300 meter pada tanggal 12 Desember 1992, pukul 13.29 WITA dan kemudian selanjutnya memicu lagi gempa bumi yang disebut sebagai Gempa bumi Laut Flores 2021 (Supendi et al., 2022).

Kondisi geologi di daerah Kepulauan Selayar sebagian besar tersusun atas fragmen-fragmen mikro kontinen dan merupakan jalur pertemuan Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Hal ini menyebabkan aktivitas tektonik di sekitar wilayah tersebut sangat intensif dan rawan menimbulkan gempa bumi maupun tsunami (Maulana et al., 2023a). Oleh sebab itu, diperlukan adanya perhatian khusus untuk wilayah ini mengingat bencana gempa bumi masih belum dapat diprediksi kapan, dimana, dan seberapa besar kekuatannya. Hal yang dapat dilakukan sebagai upaya dalam meminimalisir dampak gempa bumi yaitu dengan

penentuan mekanisme fokus. Karakteristik mekanisme fokus dari Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores dapat memberikan gambaran terhadap tipe tegasan dan orientasinya. Informasi mengenai tipe tegasan dan orientasinya ini selanjutnya dapat digunakan sebagai model awal dalam membantu identifikasi Sesar Kalaotoa meliputi struktur dan tatanan tektonik serta menjadi acuan dalam mitigasi bencana di wilayah sekitar Sesar Kalatoa (Supendi et al., 2022; Simanjuntak & Ansari, 2023).

Metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik mekanisme fokus Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores pada penelitian ini yaitu Inversi *Waveform*. Metode inversi *waveform* diterapkan dengan tujuan agar diperoleh gambaran mekanisme fokus dengan menggunakan data hasil perekaman gelombang dari *event* Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores. Metode ini melibatkan proses inversi keseluruhan *waveform* untuk ketiga komponen seismograf, meliputi komponen vertikal, komponen utara-selatan (NS) dan komponen barat-timur (EW) (Zulkarnaen, 2015).

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan solusi momen tensor terbaik dalam penentuan mekanisme fokus Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores terhadap penggunaan *crustal model* AK135, IASP91 dan PREM.
2. Menganalisis stabilitas solusi momen tensor terbaik dan ketidakpastian parameter solusi sumber Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores.
3. Menganalisis karakteristik Sesar Kalaotoa berdasarkan tipe mekanisme fokus Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores serta menganalisis kompleksitas tektonik Laut Flores.

1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

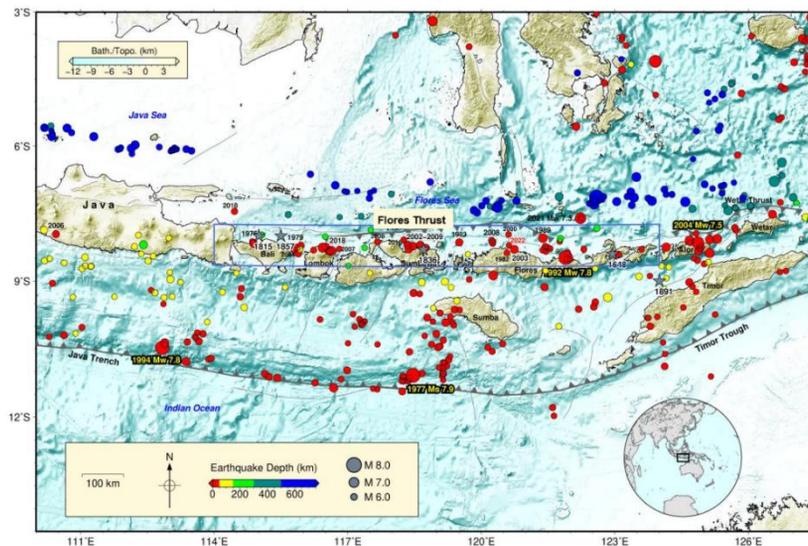
1. Memberikan informasi mengenai mekanisme fokus Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores berdasarkan parameter bidang sesar untuk pemodelan risiko gempa yang lebih baik.
2. Memberikan dasar ilmiah untuk memperbaiki metode analisis momen tensor di masa depan dengan mengidentifikasi tingkat kepercayaan dan kualitas data hasil inversi.
3. Mekanisme fokus Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores dapat memberikan informasi mengenai gambaran orientasi dan pergerakan Sesar Kalaotoa pada saat gempa terjadi, serta membantu memahami pola deformasi dan aktivitas tektonik yang berkontribusi pada pembentukan struktur geologi di Laut Flores.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Tatanan Tektonik Sulawesi dan Laut Flores

Kompleksitas tatanan tektonik Indonesia menjadikan Indonesia sebagai wilayah dengan tingkat seismistas yang aktif (Bird, 2003). Data fisiografi wilayah Indonesia dikategorikan menjadi menjadi tiga zona regional, meliputi Paparan Sunda, Paparan Sahul, dan Zona Peralihan. Paparan Sunda mencakup Laut Jawa, Selat Malaka, dan Laut Cina Selatan. Paparan Sahul meliputi Laut Aru dan bagian selatan Laut Banda. Sementara itu, zona peralihan mencakup sebagian Laut Banda, Laut Maluku, Laut Sulawesi, dan Laut Flores (Jufriansah et al., 2023).

Pulau Sulawesi terbentuk pada masa Oligosen-Miosen dikarenakan oleh adanya tumbukan antara Lempeng Eurasia dan fragmen mikro-benua dari Lempeng Indo-Australia (Maulana et al., 2023a). Lempeng Eurasia dan Indo-Australia sendiri melintasi Laut Flores dengan tatanan tektonik yang kompleks (Aslamia & Supardi, 2022). Kawasan ini memiliki seismisitas yang tinggi karena adanya zona subduksi dan jalur Mediterania yang membentuk palung-palung. Palung-palung ini menciptakan kawasan seismik dengan frekuensi kegempaan yang relatif tinggi (Zhang & Miller, 2021). Secara historis, telah terjadi beberapa gempa besar di Laut Flores. Selama 30 tahun terakhir, beberapa gempa dengan magnitudo $M_w > 7$ terjadi di wilayah ini, di antaranya pada 1992 (Felix et al., 2021; Jufriansah et al., 2023; Julius & Daryono, 2021; Sianipar, 2022; Supendi et al., 2022) dan event terbaru di tahun 2021 (Hakim et al., 2022; Jufriansah et al., 2023; Sianipar, 2022; Supendi et al., 2022). Kondisi gempa besar tersebut seperti Gambar 1.

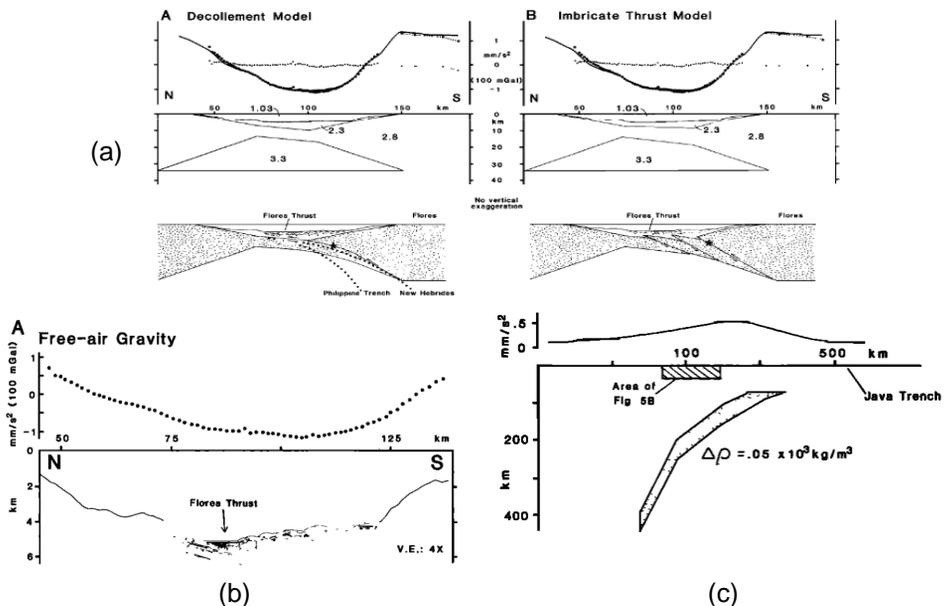


Gambar 1. Episentrum Gempa di Busur Sunda-Banda Bagian Timur dari Katalog USGS (United States Geological Survey). Seismisitas Lempeng Atas di Daerah Busur Belakang (Ditandai dengan Kotak Biru) Kemungkinan Disebabkan oleh Penunjaman Belakang Pada Sesar *Flores Thrust* (Sianipar, 2022)

Aktivitas seismik dan sesar tektonik yang terjadi terkait dengan *Flores Sea Thrust System* atau FSTS (Maulana et al., 2023b) yang meliputi sesar naik Laut Flores, sesar Kalaotoa, dan sesar Selayar. Di arah selatan dimana wilayah antara Bali hingga Nusa Tenggara Timur dibagi menjadi tiga sesar. Gambar 1 menunjukkan segmen barat yang dikenal sebagai Sesar Naik Flores (*Flores Thrust*), membujur dari timur laut Bali hingga utara Flores. Sesar ini merupakan bagian dari kompleks struktur geologi yang terbentuk akibat subduksi antara lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia (Syafitri & Didik, 2018).

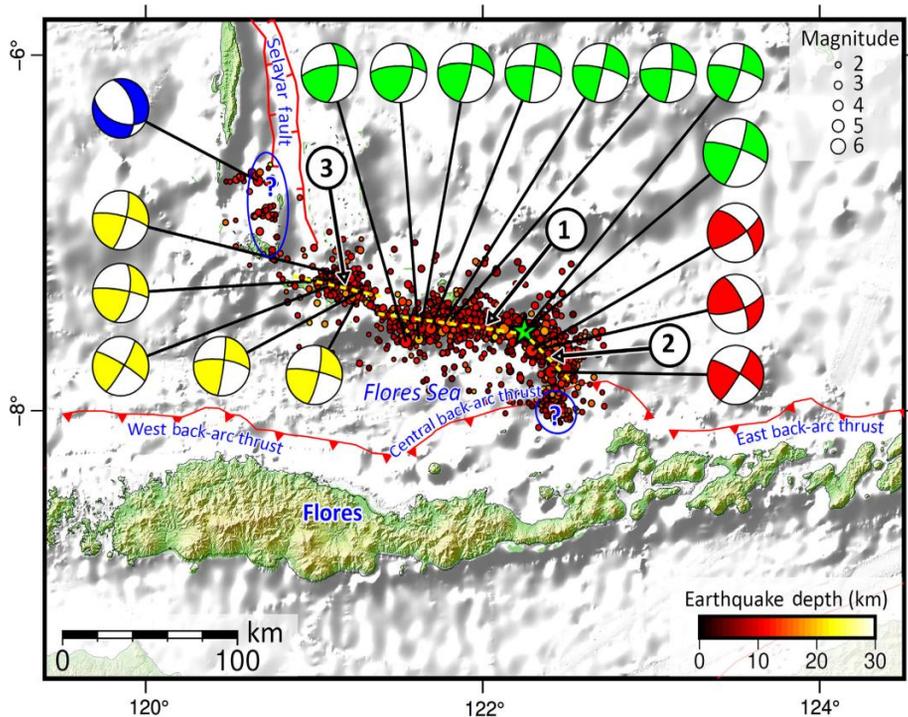
Pada tahun 2015, penelitian oleh Setiadi & Rohadi (2015) membuktikan keberadaan sesar *back-arc thrust* melalui relokasi gempa bumi menggunakan metode *teleseismic double difference*. Hasil relokasi menunjukkan pola sebaran hiposenter yang terutama terjadi pada gempa bumi dangkal dengan kedalaman kurang dari 60 km. Selain itu, Nugraha, et al. (2015) juga mengidentifikasi sesar *back-arc thrust* di wilayah Bali, Lombok, dan Sumbawa menggunakan metode tomografi. Dari hasil tomografi, terlihat adanya kontras anomali kecepatan di bagian utara Bali pada *shallow crust* dengan kedalaman kurang dari 50 km.

Identifikasi *back-arc thrust* yang tercakup dalam FSTS pernah dilakukan oleh McCaffrey & Nabelek (1987) menggunakan data anomali gravitasi. Gambar 2 menunjukkan hasil pemodelan penampang yang telah diperoleh. Model struktur yang diperoleh tersebut didapatkan dari hasil profil *free-air anomaly gravity* yang mengindikasikan terdapat anomali positif pada daerah yang diestimasi berupa *slab*.



Gambar 2. (a) Model Struktur Zona Flores *Back-Arc Thrust* (b) *Free-Air Gravity*, Sumbu y adalah Anomali dalam mGal, (c) *Deep Slab Structure* (McCaffrey & Nabelek, 1984)

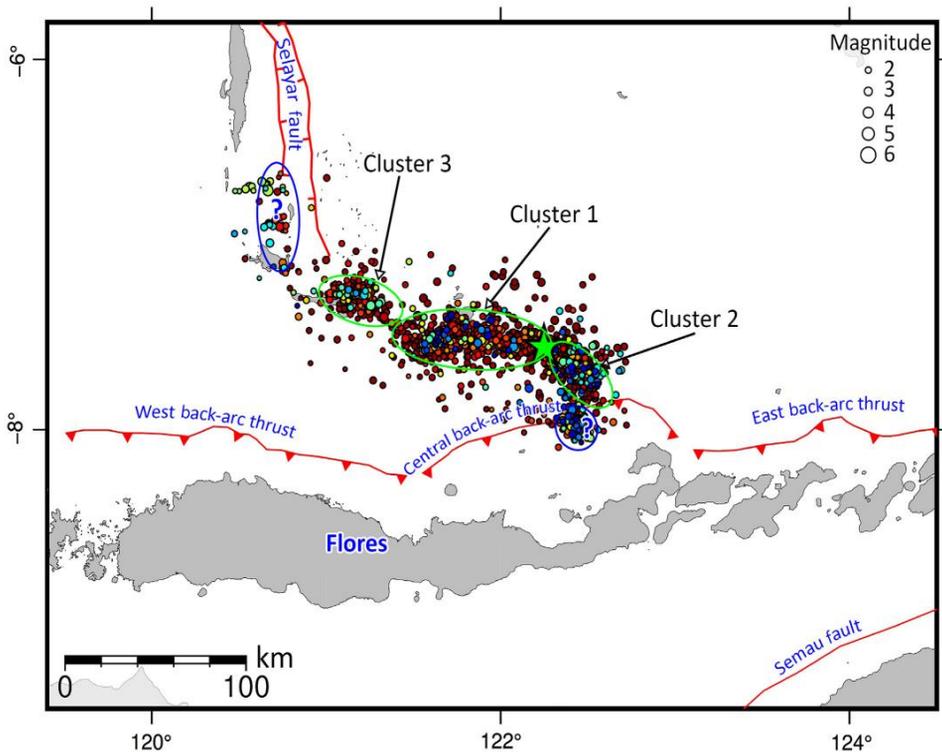
Sementara itu, penelitian seismotektonik yang dilakukan oleh Supendi, et.al (2020) dan Felix, et al. (2022) menemukan temuan baru di wilayah Indonesia Timur. Segmen sesar naik yang sebelumnya dianggap terisolasi dari Pulau Flores dan Pulau Wetar ternyata dipengaruhi oleh sesar naik Flores (*Flores back-arc thrust*). Supendi et al. (2022) juga mengungkapkan keberadaan sesar yang sebelumnya tidak dikenal, yang disebut Sesar Kalaotoa dengan mekanisme sesar mendatar (*strike-slip fault*) berarah barat laut-tenggara. Sesar ini diduga memicu gempa bumi di Laut Flores pada tanggal 14 Desember 2021. Sesar Kalaotoa diperkirakan memiliki panjang sekitar 100 kilometer dan berperan dalam tatanan tektonik di Indonesia yang sangat kompleks (Supendi et al., 2022; Simanjuntak & Ansari, 2023).



Gambar 3. Mekanisme Sumber dan Relokasi Hiposenter dari *Aftershock* Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores. Garis Kuning Putus-Putus Menunjukkan Tiga Segmen (1 = Segmen 1, 2 = Segmen 2, dan 3 = Segmen 3) Sesar Baru Kalaotoa yang Diduga Menyebabkan *Mainshock* dan Distribusi *Aftershock* (Supendi et al., 2022)

Penelitian yang dilakukan oleh Supendi, et al. (2022) menyatakan Sesar Kalaotoa mengalami pergeseran di sepanjang sistem sesar mendatar (*dextral strike slip*), yang terdiri dari segmen dengan panjang ~100, ~50, dan ~40 km seperti pada Gambar 3. Segmen-segmen ini kemudian dikenal sebagai sistem Sesar Kalaotoa (*Kalaotoa Fault System*), dimana segmen barat telah mengalami pergeseran ke arah utara kira-kira 10 hingga 15 km dari segmen tengah.

Informasi ini diperoleh berdasarkan klasterisasi yang dilakukan oleh Supendi, et al. (2022) dari distribusi *aftershock* gempa bumi Mw 7.25 (14 Desember 2021) setelah direlokasi. Hasilnya, terlihat adanya pola yang menarik dengan adanya tiga *cluster* (Gambar 4). *Cluster* ini diinterpretasikan sebagai indikasi pergeseran sepanjang sistem sesar yang dikenal sebagai sistem sesar Kalaotoa. Berdasarkan Gambar 3, *cluster* pertama terjadi akibat slip pada sesar utama yang membentang dari timur ke barat dengan panjang ~100 km dan bertanggung jawab atas gempa bumi Mw 7.25. Gempa ini juga tampaknya memicu aktivitas pada dua segmen lainnya, yaitu segmen yang mengarah tenggara dengan panjang ~40 km di bagian timur (*cluster 2*) dan segmen yang mengarah barat laut dengan panjang ~50 km di bagian barat (*cluster 3*). Ketiga segmen ini memiliki lebar sekitar 20 km, yang ditentukan melalui analisis visual dari distribusi gempa susulan (Supendi et al., 2022).



Gambar 4. Relokasi Episenter *Mainshock* Mw 7,2 (Bintang Hijau) dan *Aftershock*. Titik-Titik dengan Warna Berbeda Mewakili *Aftershock* Dihitung Berdasarkan Jumlah Hari Setelah *Mainshock* (Supendi Et Al., 2022)

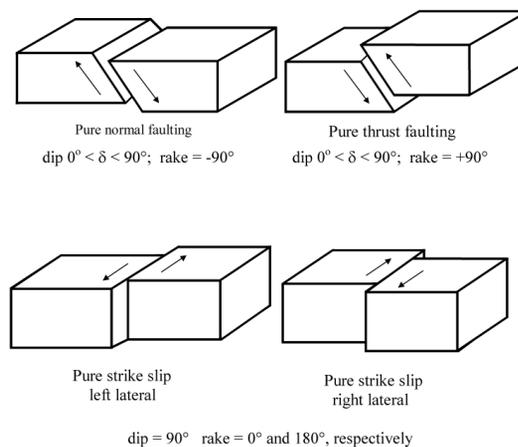
1.3.2 Teori Patahan

Teori patahan menjelaskan bagaimana energi yang terakumulasi dalam batuan akibat tekanan tektonik dapat dilepaskan secara mendadak hingga menyebabkan gempa bumi. Patahan atau sesar merupakan rekahan pada kerak bumi di mana terjadi pergeseran relatif (*displacement*) antara dua blok batuan (Scholz & Wallace,

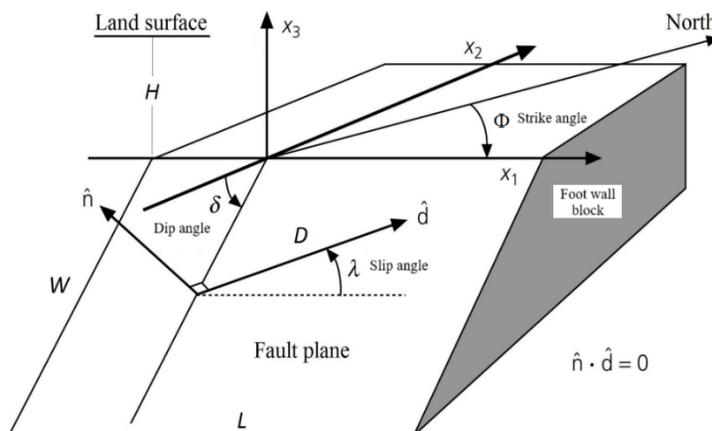
2002). Scholz juga menjelaskan bahwa proses ini umumnya terjadi di zona geser (*shear zone*), yang merupakan area di mana gaya geser beroperasi dan mengakibatkan deformasi permanen pada batuan. Bidang patahan (*fault plane*) adalah permukaan di mana pergeseran terjadi, sedangkan zona patahan (*fault zone*) mencakup area yang lebih luas yang mungkin terdiri dari beberapa bidang patahan dan menunjukkan gejala deformasi. Sesar yang sedang mengalami pergeseran akan menyebabkan bagian-bagian yang berhadapan saling berpindah sejajar dengan bidang patahan. Pergeseran pada sesar saat gempa bumi terjadi dapat diestimasi dengan menggunakan metode yang memanfaatkan waktu kedatangan gelombang P pertama (*first motion*) (Lay & Wallace, 1995).

Lay dan Wallace (1995) mengklasifikasikan beberapa jenis sesar yang digunakan sebagai ilustrasi untuk menggambarkan patahan yang terbentuk seperti pada Gambar 5. Beberapa jenis sesar tersebut meliputi:

- 1) Sesar mendatar (*strike-slip*) yang merupakan jenis patahan yang terjadi ketika dua blok sesar bergerak horizontal secara lateral tanpa pergerakan vertikal yang signifikan. Sesar ini terdiri atas dua jenis, yaitu:
 - a) *Right lateral* yang merupakan jenis gerakan sesar secara mendatar searah putaran jarum jam.
 - b) *Left lateral* yang merupakan jenis sesar yang bergerak mendatar berlawanan dari arah jarum jam.
- 2) Sesar tidak mendatar yang merupakan jenis patahan bergerak secara vertikal atau miring. Sesar ini meliputi:
 - a) Sesar turun (*normal*) berupa sesar yang bergerak turun ke bawah lebih rendah dibandingkan blok dasar.
 - b) Sesar naik (*reverse*) berupa sesar yang bloknya bergerak naik relatif terhadap blok dasar.
 - c) Sesar miring (*oblique fault*) berupa sesar dengan blok vertikal bergerak secara horizontal.



Gambar 5. Jenis-Jenis Bidang Sesar dan Arah Pergerakannya (Dost et al., 2009)



Gambar 6. Parameter Orientasi Bidang Sesar (Stein & Wysession, 2003)

Penentuan orientasi bidang sesar dapat diketahui dari parameter sesar seperti pada Gambar 6. Parameter ini membantu menggambarkan bagaimana dua blok sesar bergerak relatif satu sama lain. Dalam konteks ini, terdapat dua blok sesar yang relevan, yang meliputi *hanging wall* (bagian yang berada di atas) dan *foot wall* (bagian yang berada di bawah). Kedua blok ini memainkan peran penting dalam menggambarkan orientasi bidang sesar. Lay & Wallace, (1995) menjelaskan beberapa parameter bidang sesar yang digunakan dalam penentuan orientasi bidang sesar. Parameter tersebut adalah sebagai berikut.

1) *Strike* (Φ)

Dalam konteks mekanisme sumber gempa bumi, *strike* (Φ) adalah sudut yang terbentuk antara garis horizontal sesar di permukaan dengan arah utara bumi. Pengukuran *strike* dilakukan searah jarum jam dari arah utara, dan nilai *strike* berkisar antara $0^\circ \leq \Phi \leq 360^\circ$. Ini membantu menggambarkan orientasi bidang sesar dan pergerakan relatif antara dua blok bumi yang terlibat dalam gempa bumi.

2) *Dip* (δ)

Dip (δ) adalah sudut yang mengukur kemiringan bidang sesar terhadap bidang horizontal. Pengukuran ini dilakukan dari bidang vertikal yang tegak lurus terhadap bidang sesar. Nilai sudut *dip* berkisar antara $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$. *Dip* digunakan dalam memahami bagaimana sesar condong atau miring terhadap permukaan bumi.

3) *Rake* (λ)

Rake (λ) adalah sudut yang menggambarkan arah gerakan *slip* relatif terhadap garis sesar. Pengukuran *rake* dilakukan berlawanan dengan arah jarum jam dari posisi horizontal. Jika gerakan *slip* terjadi ke atas, maka *rake* akan memiliki nilai positif, sedangkan jika gerakan *slip* terjadi ke bawah, maka nilai *rake* akan negatif. Rentang nilai *rake* berada di antara $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$. Ini membantu dalam menentukan arah gerakan sesar selama gempa bumi.

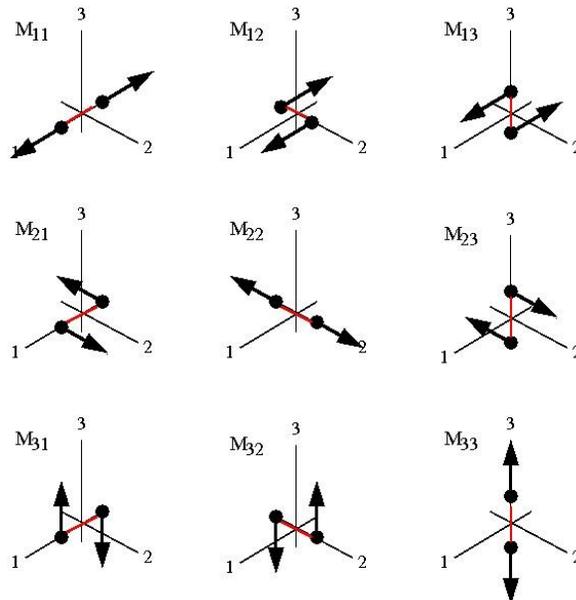
4) *Slip*

Slip merupakan vektor yang menggambarkan besarnya dan arah pergerakan relatif antara dua sisi sesar, yaitu *hanging wall* dan *foot wall*. Arah *slip* ditentukan oleh sudut yang terbentuk antara bidang sesar itu sendiri dan arah di mana *slip* tersebut bergerak.

1.3.3 Momen Tensor

1.3.3.1 Teori Momen Tensor

Momen tensor adalah representasi matematis dari sumber gempa yang menggambarkan deformasi di lokasi sumber yang menghasilkan gelombang seismik (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008). Konsep ini tidak terbatas pada gempa tektonik saja, tetapi juga mencakup berbagai sumber seismik lain seperti ledakan, runtuhnya bangunan, longsoran tanah, dan jatuhnya meteoroid. Dengan demikian, momen tensor memungkinkan untuk mengkarakterisasi sumber seismik dengan lebih luas dan mendetail (Lay & Wallace, 1995).

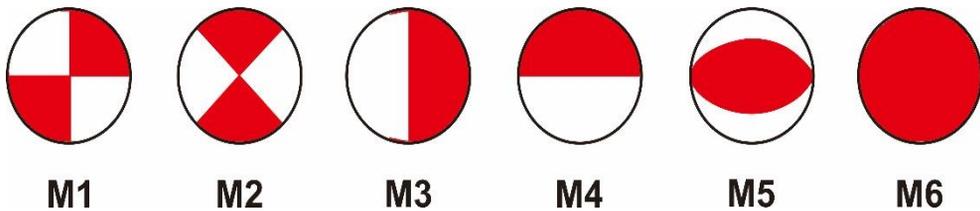


Gambar 7. Sistem Pasangan Gaya yang Mewakili Komponen-Komponen Momen Tensor Momen Kartesius, Panah Hitam Menunjukkan Arah Gaya yang Berlawanan (Gjuzi et al., 2022)

Gambar 7 menampilkan sembilan pasangan gaya yang terkait dengan momen tensor dari suatu sumber gempa bumi. Momen tensor, yang dilambangkan dengan M dan dinotasikan sebagai M_0 , menggambarkan momen seismik di sumber gempa. Pasangan gaya ini menggambarkan komponen-komponen dari momen tensor dalam koordinat kartesius, yang dinotasikan sebagai M_{ij} . Sistem koordinat ini digunakan untuk menentukan hubungan antara *strike*, *dip*, dan arah dislokasi pada bidang atau *rake* (Gjuzi et al., 2022).

Gempa bumi umumnya dianggap terjadi karena adanya gaya *double couple* yang aktif di pusat gempa, atau hiposenter (Shearer, 2019). Gaya *double couple* menggambarkan sumber gempa bumi sebagai dua pasangan gaya yang berlawanan dimana satu mewakili gaya tarikan (*tension*) dan yang lainnya berupa gaya tekanan (*pressure*). Gerakan yang dihasilkan oleh gaya ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu kompresi dan dilatasi, yang masing-masing menyebar di empat kuadran yang berbeda. Kompresi dan dilatasi ini dibatasi oleh dua bidang nodal yang berpotongan tegak lurus. Salah satu dari bidang nodal ini adalah bidang sesar, tempat terjadinya pergeseran, dan yang lainnya adalah bidang bantu, yang digunakan untuk analisis tambahan. Untuk memahami mekanisme sumber gempa lebih lanjut, analisis inversi tensor momen menggunakan enam komponen independen dari tensor momen dasar, yang kemudian diinterpretasikan sebagai representasi dari sumber gaya ganda tersebut (Kikuchi & Kanamori, 1991).

$$\begin{aligned}
 M_1: \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_2: \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_3: \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \\
 M_4: \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_5: \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; M_6: \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



Gambar 8. Momen Tensor Dasar yang Digunakan dalam Inversi Momen Tensor, Warna Merah Menunjukkan Kompresi dan Putih Menunjukkan Dilatasi (Kikuchi & Kanamori, 1991)

Momen tensor memiliki enam elemen independen dalam bentuk matriks, seperti pada persamaan (1). Selain itu, momen tensor M_{ij} dapat direpresentasikan sebagai kombinasi dari keenam elemen independennya, yaitu M_n . Gambar 8 mengilustrasikan keenam elemen independen dari matriks tersebut. Menurut Kikuchi dan Kanamori (1991), kombinasi linear dari elemen-elemen matriks ini dapat dijelaskan dengan cara tertentu. kombinasi linear dari keenam elemen matriks independen tersebut adalah sebagai berikut:

- 1) $M_1, \dots, M_6 =$ momen tensor umum,
- 2) $M_1, \dots, M_5 =$ moment tensor *deviatoric* murni,
- 3) M_1, \dots, M_5 dengan determinan nol $[M_{ij}] =$ *double couple*,
- 4) M_1, \dots, M_4 determinan nol $[M_{ij}] =$ *double couple* dengan *nodal plane* vertikal,
- 5) $M_1, \dots, M_2 =$ *strike-slip* murni.

Penerapan kombinasi linear pada elemen-elemen independen dari matriks, dapat menghasilkan beberapa pola dasar. Seperti, elemen M_1 dan M_2 berkaitan dengan jenis patahan *strike-slip* murni, sementara M_3 dan M_4 berkaitan dengan patahan *dip-slip* yang terjadi di bidang vertikal. Kombinasi antara elemen dari M_1 sampai M_5 yang memiliki determinan bernilai nol menghasilkan apa yang disebut dengan *double couple*. Elemen M_5 sendiri berkaitan dengan patahan *dip-slip* sementara elemen M_6 berkaitan dengan ledakan, yang merupakan sumber isotropik yang mendistribusikan energi secara seragam ke semua arah (Kikuchi & Kanamori, 1991).

1.3.3.2 Inversi Momen Tensor

Penelitian yang dilakukan oleh Sokos dan Zahradnik (2008) menjelaskan bahwa perhitungan kuadrat terkecil (*least-square*) untuk momen tensor, *grid search* untuk posisi *centroid* dan *source time* merupakan bentuk inversi *waveform* yang digunakan pada *software* ISOLA-GUI. Perhitungan *least-square* diterapkan karena dapat meminimalkan selisih antara data seismik yang diamati dan model sintetik yang dihasilkan. Selain itu, *grid search* juga diterapkan dengan menguji berbagai posisi sumber pada *grid* yang telah ditentukan dan memilih posisi yang memberikan kecocokan terbaik antara data dan model (Nugroho et al., 2007; Pramudya et al., 2023).

Analisis momen tensor berupa inversi linear yang bersifat *over-determined*, di mana jumlah data pengamatan lebih banyak daripada jumlah parameter yang akan diestimasi. Jenis inversi ini cenderung menghasilkan solusi yang lebih akurat karena adanya redundansi data yang membantu mengurangi efek dari kesalahan pengukuran atau *noise* (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008). Hasil dari Solusi inversi dapat diperoleh dengan analisa tingkat kecocokan dan seberapa mendekati model observasi terhadap model sintetik yang dihasilkan (Menke, 2018). Prinsip inversi berkaitan dengan hubungan antara data (\mathbf{d}) dan model (\mathbf{m}), yang keduanya diwakili dalam bentuk vektor. Data biasanya merupakan hasil pengamatan atau pengukuran di lapangan, sedangkan model mewakili parameter-parameter geofisika yang akan diperkirakan (Hufnagle, 2004; Menke, 2018). Data (\mathbf{d}) dinyatakan dalam:

$$\mathbf{d} = [d_{1NS}, d_{1EW}, d_{1Z}, \dots, d_{AX}]^T \quad (2)$$

data (\mathbf{d}) dalam inversi momen tensor pada persamaan (2) berupa data rekaman seismogram per stasiun dimana A menunjukkan stasiun yang digunakan dan X adalah komponen tiap stasiun (NS, EW, dan Z), sementara parameter model (\mathbf{m}) dinyatakan dalam:

$$\mathbf{m} = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_B]^T \quad (2)$$

Persamaan (3) menunjukkan 6 elemen dari momen tensor independen dengan B adalah 6. T mendefinisikan operasi transpos. Hal ini dikarenakan besaran terhadap komponen secara umum dinyatakan dalam bentuk matriks kolom. Selanjutnya, hubungan antara keduanya ditulis dalam bentuk:

$$\mathbf{d} = \mathbf{g}(\mathbf{m}) \quad (4)$$

Persamaan (4) berisi variabel g sebagai fungsi umum yang mendefinisikan *forward modelling* (fungsi Green) dan memungkinkan untuk diperolehnya prediksi data untuk suatu model. Persamaan untuk *forward modelling* dapat dinyatakan dalam persamaan (5) sebagai berikut (Menke, 2018):

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1M} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \cdots & G_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_M \end{bmatrix} \quad (5)$$

dengan demikian estimasi model m sebagai solusi inversi menggunakan persamaan (6) (Hufnagle, 2004; Menke, 2018), turunan dapat dilihat pada Lampiran 1:

$$m = [G^T G]^{-1} G^T d \quad (6)$$

Menurut Sokos dan Zahradnik (2018), momen tensor ditentukan melalui analisis data seismogram yang merupakan kombinasi utama dari momen tensor itu sendiri. Proses ini melibatkan inversi *waveform* tiga komponen, di mana data seismik yang teramati dibandingkan dengan model sintetik yang dihasilkan. Momen tensor menggambarkan gaya-gaya yang bekerja pada pusat sumber gempa bumi dan memberikan informasi penting mengenai mekanisme sumber gempa, termasuk parameter *strike*, *dip*, dan *rake*. Sehingga, estimasi parameter sumber gempa dengan lebih akurat, karena momen tensor dapat merepresentasikan interaksi kompleks antara gaya yang bekerja pada titik fokus gempa.

1.3.4 Fungsi Green

Fungsi Green tiga komponen dikembangkan dalam mengestimasi parameter sumber gempa dengan tujuan untuk mengkonstruksi solusi persamaan differensial tak homogen. Secara matematis, dapat dituliskan dalam bentuk (Kikuchi & Kanamori, 1991):

$$U_k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x; x') f(x') dx' \quad (7)$$

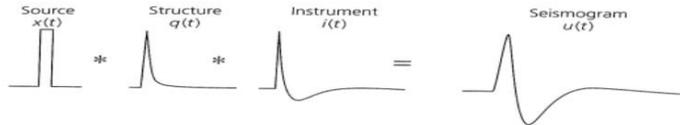
berdasarkan persamaan (7), apabila komponen rekaman seismik dari sebuah titik sumber ditinjau, maka diperoleh persamaan sebagai berikut (Lampiran 2).

$$U_k(x, t) = \sum_{i=1}^6 G_{ki}(x, x_s, t) * f_i(t) \quad (8)$$

dimana k adalah komponen dari stasiun, U_k mewakili rekaman pergeseran pada komponen ke- k , x adalah posisi *receiver*, x_s adalah posisi sumber gempa, G_{ki} adalah matriks fungsi Green yang bergantung pada sifat elastik dan anelastik bumi, serta $f_i(t)$ menyatakan 6 komponen momen tensor dasar independen. Persamaan 8 juga dapat dituliskan dalam notasi matriks seperti pada persamaan (9) (Ammon et al., 2020). Turunan fungsi Green pada persamaan (9) dapat dilihat pada Lampiran 3 dan turunan persamaan gelombang P dan S dapat dilihat di lampiran 4.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ \vdots \\ U_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & \dots & G_{1N} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & \dots & G_{2N} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & \dots & G_{3N} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & \dots & G_{4N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{M1} & G_{M2} & G_{M3} & G_{M4} & \dots & G_{MN} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Menurut Sokos dan Zahradnik (2008), data rekaman seismogram diambil dari kombinasi antar komponen utama momen tensor (Gambar 9).



Gambar 9. Kombinasi Fungsi Waktu Sumber, Fungsi Struktur dan Fungsi Waktu Menghasilkan Rekaman Seismogram (Stein & Wysession, 2003)

dimana $x(t)$ adalah *source time function*, $q(t)$ adalah fungsi struktur dan $i(t)$ adalah fungsi waktu dari respon instrumen.

6 Komponen momen tensor independen pada Persamaan (8) apabila keenam momen tensor yang menggambarkan kekuatan kopel gaya dari gempa diproyeksikan ke dalam koordinat bola, dimana r adalah radius atau jarak dari pusat bumi ke titik yang diamati, θ adalah sudut zenit atau sudut polar, yang diukur dari sumbu vertikal, dan ϕ adalah sudut azimuth, yang diukur di bidang horizontal dari arah referensi, dapat dituliskan dalam persamaan (10) sebagai berikut (Kikuchi & Kanamori, 1991):

$$f_1 = M_{rr}, f_2 = M_{\theta\theta}, f_3 = M_{\phi\phi}, f_4 = M_{r\theta}, f_5 = M_{r\phi} = M_{\phi r}, f_6 = M_{\theta\phi} = M_{\phi\theta} \quad (10)$$

atau dalam bentuk lain, yaitu pada persamaan (11):

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{XX} & M_{XY} & M_{XZ} \\ M_{XY} & M_{YY} & M_{YZ} \\ M_{XZ} & M_{YZ} & M_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kikuchi dan Kanamori (1991) menjelaskan bahwa momen tensor bersifat simetris, dikarenakan $M_{ij} = M_{ji}$. Sehingga dari sembilan momen tensor yang ada tersisa enam momen tensor independen. Adapun hubungan antara momen tensor dengan *strike* (ϕ), *dip* (δ) dan *rake* (λ) dapat dilihat pada persamaan (12) samai (17) sebagai berikut (hubungan ini diperoleh dari turunan rumus pada Lampiran 5).

$$M_{11} = M_{xx} = -M_0(\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi + \sin 2\delta \sin \lambda \sin^2 \phi) \quad (12)$$

$$M_{12} = M_{xy} = M_0 \left(\sin \delta \cos \lambda \cos 2\phi + \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \lambda \sin 2\phi \right) = M_{21} = M_{yx} \quad (13)$$

$$M_{13} = M_{xz} = -M_0(\cos \delta \cos \lambda \cos \phi + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \phi) = M_{31} = M_{zx} \quad (14)$$

$$M_{22} = M_{yy} = M_0(\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi - \sin 2\delta \sin \lambda \cos^2 \phi) \quad (15)$$

$$M_{23} = M_{yz} = -M_0(\cos \delta \cos \lambda \sin \phi - \cos 2\delta \sin \lambda \cos \phi) = M_{32} = M_{zy} \quad (16)$$

$$M_{33} = M_{zz} = M_0(\sin 2\delta \sin \lambda) \quad (17)$$

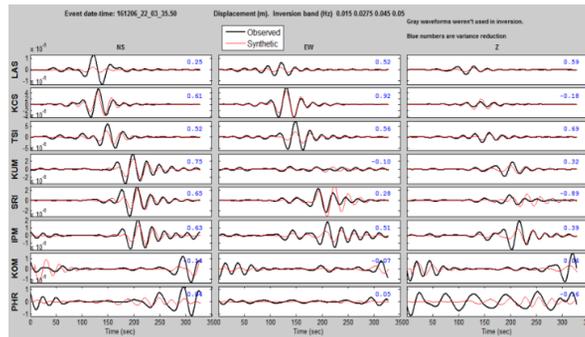
Hubungan matematis antara momen tensor dan parameter-parameter orientasi sesar seperti *strike* (ϕ), *dip* (δ), dan *rake* (λ) memberikan dasar penting untuk memahami perilaku sumber gempa. Pengetahuan mengenai parameter gempa, seperti hiposenter, kekuatan gempa, momen seismik, momen tensor, orientasi bidang sesar, serta pola dan luas bidang sesar, penting untuk diketahui karena berkaitan dengan risiko yang mungkin ditimbulkan oleh gempa bumi di permukaan (Zulkarnaen, 2015). Parameter sumber gempa bumi diestimasi melalui model inversi untuk mencapai pencocokan yang baik pada *waveform* tiga komponen (inversi *full waveform*). Proses inversi ini melibatkan ketiga komponen seismograf, yaitu komponen vertikal, komponen utara-selatan (NS), dan komponen barat-timur (EW) (Zulkarnaen, 2015).

Teori inversi dikembangkan untuk menarik kesimpulan dimana penyelesaian inversi biasanya dilakukan dengan mencari model optimal agar respons yang dihasilkan mendekati data pengamatan. Proses ini dilakukan dengan meminimalkan fungsi objektif tertentu yang menggambarkan seberapa dekat data observasi dengan respons hasil perhitungan dari model (Menke, 1993). Proses inversi yang efektif bergantung pada kesesuaian antara data observasi dan data sintetik yang dihasilkan selama proses inversi (Setyowidodo & Jaya Santosa, 2011).

1.3.5 Fitting Waveform

Fitting waveform dilakukan dengan cara menciptakan seismogram sintetik atau model pendekatan yang dibangun berdasarkan model kecepatan yang di-*input* menggunakan fungsi Green. Tujuannya adalah untuk menghasilkan *waveform* yang sedekat mungkin dengan *waveform* observasi, sehingga dapat merepresentasikan data gempa bumi yang ada. *Waveform* sintetik dirancang agar mirip dengan *waveform* observasi dari event sumber titik gempa. Model pendekatan ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk model kecepatan yang kompleks, respons instrumen, jarak antara sumber event dan penerima, serta faktor-faktor lainnya (Liu et al., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Liu et al (2021) juga menjelaskan bahwa proses ini sangat bergantung pada akurasi fungsi Green yang digunakan, karena fungsi ini menggambarkan respon medium terhadap sumber impulsif. Pemanfaatan fungsi Green dapat menghasilkan sintetik dari berbagai sumber momentum atau gaya. Hal ini memberikan keuntungan dalam hal efisiensi dibandingkan dengan simulasi gelombang secara langsung. Selain itu, pencocokan antara data seismik dan sintetik sangat penting untuk menentukan sumber gempa secara lebih akurat.



Gambar 10. *Fitting Waveform* pada Studi Kasus Gempa Bumi Pidie Jaya 7 Desember 2016 (H Simanjuntak dan Muksin Umar, 2018)

Gambar 10 merupakan salah satu contoh *fitting waveform* pada studi kasus Gempa Bumi Pidie Jaya 7 Desember 2016 yang dilakukan oleh Simanjuntak dan Muksin (2018). Penelitian ini menggunakan delapan stasiun dengan solusi *fitting* yang baik, meskipun terdapat beberapa komponen yang kurang *fitting*. Hal ditandai dengan nilai *variance reduction* (tulisan biru) yang akan semakin bagus bila mendekati 1, menunjukkan *fitting waveform* sintetik (merah) dan observasi (hitam) saling tumpang tindih.

Fitting waveform diperlukan karena dalam konsep inversi linear seperti pada persamaan (4), dimana parameter model (m) merupakan komponen yang dicari dari data (d) yang tersedia, sedangkan model pendekatan g (fungsi Green) dapat diwakili dengan baik jika *waveform* observasi disederhanakan pada frekuensi rendah. Penerapan *bandpass filter* pada frekuensi rendah, baik minimum maupun maksimum penting karena *centroid* momen gempa dari sumber titik berada pada *corner* frekuensi yang rendah, terutama untuk gempa-gempa besar. Hal ini terjadi sebelum gelombang menyebar dan terpengaruh oleh *noise* di medium pada frekuensi yang lebih tinggi (Aki & Richards, 2009).

Penggunaan *bandpass filter* akan membuat sinyal yang tidak relevan hilang. Sehingga, analisis menjadi lebih fokus pada komponen frekuensi yang signifikan untuk karakteristik sumber gempa. *Corner* frekuensi yang rendah ini sangat penting dalam memahami mekanisme sumber gempa dan memprediksi dampaknya. Oleh karena itu, pemilihan *filter* yang tepat sangat berpengaruh terhadap hasil *fitting* dan akurasi estimasi parameter sumber gempa (Aki & Richards, 2009).

1.3.6 Mekanisme Fokus

Solusi mekanisme fokus (*focal mechanism*) diperoleh melalui analisis pola gelombang yang dihasilkan oleh gempa bumi dan dicatat oleh sejumlah seismograf. Untuk menghasilkan mekanisme fokus yang dapat diandalkan, biasanya diperlukan setidaknya 10 rekaman, terutama jika stasiun seismograf tersebar merata di sekitar pusat gempa karena. Hal ini dikarenakan satu kejadian gempa harus memperhatikan distribusi antara stasiun-stasiun seismik yang mengelilingi episenter

yang disebut sebagai *azimuthal gap*. *Azimuthal gap* yang kecil akan semakin baik dikarenakan distribusi stasiun mengcover gempa dari berbagai arah (Belinić & Markušić, 2017). Karakterisasi menyeluruh terhadap mekanisme fokus memberikan informasi penting, termasuk waktu sumber gempa, lokasi episenter, kedalaman fokus, momen seismik (ukuran langsung dari energi yang dilepaskan oleh gempa bumi), serta komponen tensor momen spasial dan orientasinya (Cronin, 2010; H Simanjuntak dan Muksin Umar, 2018). Dengan menganalisis momen tensor, kita dapat menentukan orientasi dan jenis sesar yang mungkin terjadi (Shearer, 2019).

Slip yang bergerak ke atas dan menghasilkan *rake* positif menunjukkan adanya komponen *reverse slip*, sedangkan *rake* negatif biasanya terkait dengan komponen *normal slip*. Jika *rake* mencapai $\pm 90^\circ$, maka gerakan tersebut terjadi sepenuhnya sebagai *slip normal* atau *reverse* tanpa komponen geser (*strike-slip*). Dalam interpretasi gempa, pola ini penting untuk memahami jenis patahan dan dinamika proses gempa (Cronin, 2010). Cronin mengklasifikasikan jenis-jenis patahan berdasarkan nilai *rake* dari *slip* gempa seperti pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hubungan antara nilai *rake* dari *slip* gempa dan jenis patahan (Cronin, 2010)

Rake dari Slip Gempa	Jenis Patahan
0° atau 180°	<i>Pure strike-slip</i>
90°	<i>Pure dip-slip reverse</i>
-90°	<i>Pure dip-slip normal</i>
-20° hingga 20°	<i>Left-lateral strike-slip</i>
20° hingga 70°	<i>Reverse left-lateral oblique</i>
70° hingga 110°	<i>Reverse</i>
110° hingga 160°	<i>Reverse right-lateral oblique</i>
-160° hingga 160°	<i>Right-lateral strike slip</i>
-110° hingga -160°	<i>Normal right-lateral oblique</i>
-70° hingga -110°	<i>normal</i>
-20° hingga -70°	<i>Normal left-lateral oblique</i>

1.3.7 ISOLA-GUI

Inversi full *waveform* dilakukan dengan metode iterasi dekonvolusi (Zahradnik et al., 2008). ISOLA merupakan salah satu *software* yang mengimplementasikan metode ini untuk memperoleh parameter-parameter sumber gempa (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008). Parameter gempa ini kemudian tergambar dalam bentuk *Centroid Moment Tensor* (CMT), parameter sesar dan kedalaman gempa. Hasil parameter ini selanjutnya dapat dijadikan sebagai *input* dalam menganalisis bentuk patahan yang sebenarnya (*fault plane*) dengan metode *Hypocenter-Centroid* (H-C) (Setyowidodo & Jaya Santosa, 2011; Zahradnik et al., 2005).

ISOLA adalah *software* yang berbasis *Fortran Code* dan GUI Matlab dalam

melakukan inversi dengan metode *multiple point-source* data seismik (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008). ISOLA bertujuan untuk mempermudah perhitungan menggunakan Fortran dengan cepat, termasuk dalam persiapan data, perhitungan Fungsi Green, dan proses inversi, serta menghasilkan *output* dalam bentuk grafik dari mekanisme fokus (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008; Zulkarnaen, 2015). Sementara, dalam perhitungan fungsi Green, metode yang digunakan berupa metode *discrete wavenumber* yang dikembangkan oleh Bouchon (1981). Metode ini efektif untuk digunakan dalam analisis gempa lokal dan regional. Inversi yang diterapkan dalam program ini adalah inversi linier, di mana d merupakan data yang tersedia dan m adalah parameter yang ingin dicari seperti pada persamaan (4) yang diselesaikan dengan metode *least-square* persamaan (5) (Zulkarnaen, 2015).

Sokos dan Zahradnik (2018) menjelaskan bahwa meskipun metode *least-square* pada inversi linier dalam ISOLA secara teknis menyelesaikan parameter model (m) dalam satu langkah perhitungan, proses inversi secara keseluruhan tidak terbatas pada satu iterasi. Hal ini disebabkan oleh penerapan metode *multiple point-source*, di mana lokasi dan waktu sumber diuji pada berbagai titik *grid* di sekitar lokasi awal yang telah ditentukan. Pada setiap titik *grid*, fungsi Green dihitung, dan inversi dilakukan untuk menentukan parameter momen tensor. Proses ini diulangi untuk seluruh *grid*, dan solusi terbaik dipilih berdasarkan nilai misfit terkecil atau korelasi tertinggi antara data sintetis dan data observasi.

ISOLA-GUI digunakan untuk menganalisis mekanisme fokus dari momen tensor gempa. Melalui proses inversi, penentuan nilai eigen serta vektor eigen dapat ditentukan. Vektor eigen ini memberikan informasi mengenai *strike*, *dip*, dan *rake* (*slip*). Selain itu, nilai eigen juga menghasilkan besaran momen skalar M_0 . Untuk mencapai hasil yang optimal, dilakukan *fitting* kurva *displacement* antara data sintetis dan data lapangan. Dalam konteks ini, d mewakili data lapangan, sedangkan s adalah data sintetis. Kecocokan antara kedua data tersebut diukur menggunakan *variance reduction* (VR) dengan persamaan relevan yang dapat dituliskan sebagai berikut (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008; Zulkarnaen, 2015).

$$VR = 1 - \frac{|d-s|^2}{d^2} \quad (18)$$

Nilai 1 pada persamaan (18) menunjukkan bahwa kurva data sintetis berimpit dengan kurva data observasi. Jika nilai tersebut kurang dari satu, maka terdapat perbedaan antara kedua kurva yang mengakibatkan ketidakcocokan dalam perhitungan antara besaran event yang ada dan hasil pengolahan. Ketidakcocokan ini dipengaruhi oleh penentuan jumlah subevent yang akan menghasilkan residual data, yang berdampak pada nilai VR. Dengan kata lain, jumlah subevent yang tidak tepat dapat menyebabkan akurasi hasil pengolahan data menurun, karena VR yang rendah mencerminkan ketidakmampuan model untuk mengurangi varians secara efektif, mengakibatkan kesalahan perhitungan yang signifikan antara data observasi dan hasil pemodelan (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008; Zulkarnaen, 2015).

VR dalam analisis inversi mekanisme sumber gempa lebih sensitif terhadap distribusi kesalahan dan variasi data secara keseluruhan, berbeda dengan *Root Mean Square* (RMS) yang hanya mengukur kesalahan rata-rata titik per titik. Varred sangat berguna dalam menentukan jumlah subevent atau *point-source* yang optimal, karena mencerminkan seberapa banyak variasi dalam data dapat dijelaskan oleh model, sehingga memungkinkan evaluasi kualitas model yang lebih holistik (Kleijnen et al., 2012).

Selain nilai VR, parameter dalam mengukur kualitas hasil menggunakan ISOLA-GUI juga memperhatikan besar correlation solusi momen tensor yang dihasilkan, persentase DC (*Double Couple*), dan CN yang menunjukkan tingkat *resolvability* solusi momen tensor. Korelasi dalam konteks ISOLA-GUI merujuk pada pengukuran seberapa baik model sintetik yang dihasilkan dapat mencocokkan data seismik yang teramati. Dalam proses ini, nilai korelasi dihitung untuk menilai kesesuaian antara gelombang seismik yang direkam dan gelombang yang diprediksi berdasarkan model sumber gempa. Korelasi yang tinggi menunjukkan bahwa model tersebut berhasil mereproduksi pola yang diamati, sehingga memberikan informasi penting tentang karakteristik sumber gempa, seperti lokasi dan mekanisme fokusnya. ISOLA-GUI menggunakan analisis ini untuk membantu dalam menentukan parameter sumber gempa dengan lebih akurat dan efisien, serta untuk mengidentifikasi pola bidang sesar yang terkait dengan aktivitas seismik (E. N. Sokos & Zahradnik, 2008). Besar nilai correlation sendiri dapat diperoleh dari persamaan (19) dimana:

$$corr = \sqrt{VR} \quad (19)$$

Persentase *double couple* (DC) dalam penentuan momen tensor juga sangat penting karena mencerminkan sifat mekanisme sumber gempa. Persentase DC yang tinggi menunjukkan bahwa mekanisme sumber gempa lebih mendekati model *double couple*, dengan fokus pada pergeseran lateral tanpa komponen volumetrik yang signifikan. Sebaliknya, DC yang kurang dari 50% menunjukkan ketidakpastian mekanisme fokus, karena ini mengindikasikan kontribusi signifikan dari komponen isotropik atau *compensated linear vector dipole* (CLVD). Nilai DC yang rendah berarti bahwa gaya pada sumber gempa melibatkan deformasi volumetrik atau mekanisme kompleks lainnya, menyulitkan identifikasi pola *stress* lokal dan karakteristik geologi, serta mengindikasikan bahwa model mekanisme sumber mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan proses fisik yang terjadi. Dengan kata lain, persentase DC yang terklasifikasi dibawah 50% mencerminkan ketidakpastian mekanisme fokus (Carvalho et al., 2016).

Sementara itu, Condition number (CN) yang merupakan parameter penting dalam penentuan momen tensor dikarenakan nilai ini menunjukkan tingkat resolvabilitas dari solusi inversi. CN dihitung sebagai rasio antara *eigen value* terbesar dan terkecil dari matriks sensitivitas (Persamaan 20), yang mencerminkan stabilitas solusi yang dihasilkan. Nilai CN yang rendah menandakan bahwa sistem

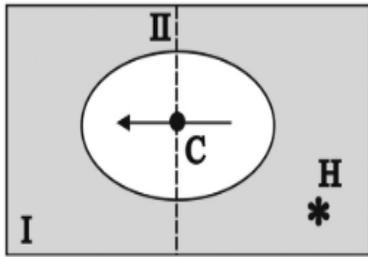
memiliki *resolvabilitas* yang baik, di mana perubahan kecil pada data seismik akan menghasilkan perubahan yang proporsional pada hasil inversi, sehingga meningkatkan kepercayaan terhadap hasil tersebut. Sebaliknya, nilai CN yang tinggi menunjukkan adanya ketidakstabilan dalam solusi, di mana noise atau kesalahan kecil dalam data dapat menyebabkan fluktuasi besar pada hasil momen tensor. Dengan demikian, analisis *condition number* sangat krusial untuk memastikan bahwa komponen isotropik dan elemen lainnya dari momen tensor dapat diidentifikasi dengan akurat dalam konteks inversi seismik (Křížová et al., 2013).

$$CN = \frac{\max_{i=1..6} (w_i)}{\min_{i=1..6} (w_i)} \quad (20)$$

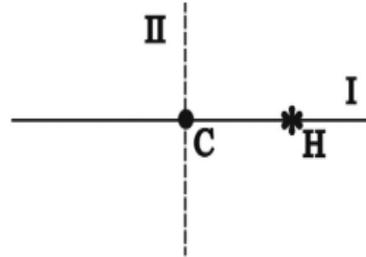
1.3.8 Metode H-C Plot

Penelitian yang dilakukan oleh Zahradnik, et al. (2008) mengembangkan Metode H-C dalam penentuan pemilihan terhadap *fault plane* dan *auxiliary plane*. Teknik ini efektif ketika posisi hiposenter (H) dan *centroid* (C) dari mekanisme sumber sudah diketahui. Hiposenter, titik dimana *rupture* mulai menyebar, ditentukan berdasarkan waktu perambatan gelombang, sementara *centroid* dihitung sebagai titik representatif dari daerah *slip* dominan pada sesar yang diperoleh dari solusi *Centroid Moment Tensor* (CMT). Solusi CMT juga menyediakan dua bidang nodal yang diidentifikasi melalui *strike* dan *dip angle*. Metode ini sangat berguna ketika penentuan hiposenter dan *centroid* dilakukan dengan akurat dan struktur kegempaan tidak terlalu kompleks.

Estimasi jarak antara *centroid* dan hiposenter dilakukan dengan memplot lokasi dari keduanya. Prinsip dasarnya adalah jika dua sesar melintasi *centroid* di antara bidang nodal I dan II, yang ditentukan oleh sudut *strike* dan *dip* dari solusi momen tensor, maka diasumsikan bahwa bidang sesar adalah planar. Dalam hal ini, *fault plane* adalah bidang yang paling dekat dengan hiposenter. Pada Gambar 11 (a), skema metode H-C plot yang ditampilkan menunjukkan bahwa H menandakan hiposenter dan C menandakan *centroid* yang dilewati oleh dua bidang nodal. Area berbentuk oval menandai zona dominan *slip*.



(a)



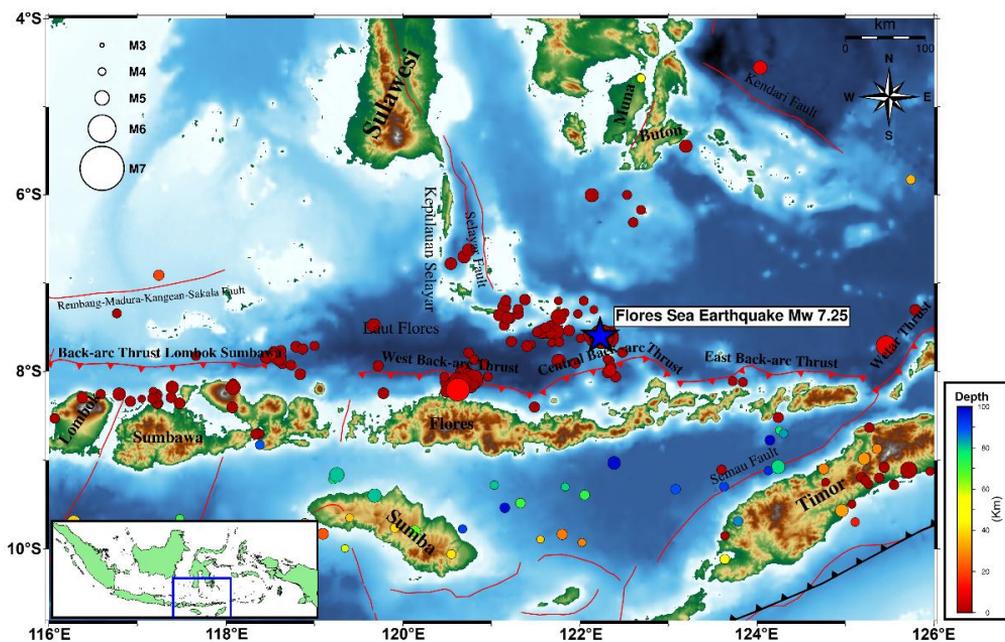
(b)

Gambar 11. Diagram Skematik Metode H-C Plot: H Menunjukkan Hiposenter, C Menunjukkan *Centroid*, Bidang I dan II adalah Nodal. Area *Oval* Menandakan *Slip* yang Dominan. (b) Diagram Skematik Metode H-C Plot dari Perspektif yang Berbeda, Namun Masih Menggambarkan Situasi yang Sama (Zahradnik et al., 2008)

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berfokus pada lokasi Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores dengan koordinat episenter pada latitude -7.603 dan longitude 122.227 dikedalaman 14,3 km, seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Peta Lokasi Penelitian (Bintang Biru Menunjukkan Lokasi Episenter Gempa bumi Laut Flores Mw 7.25)

2.2 Alat dan Bahan

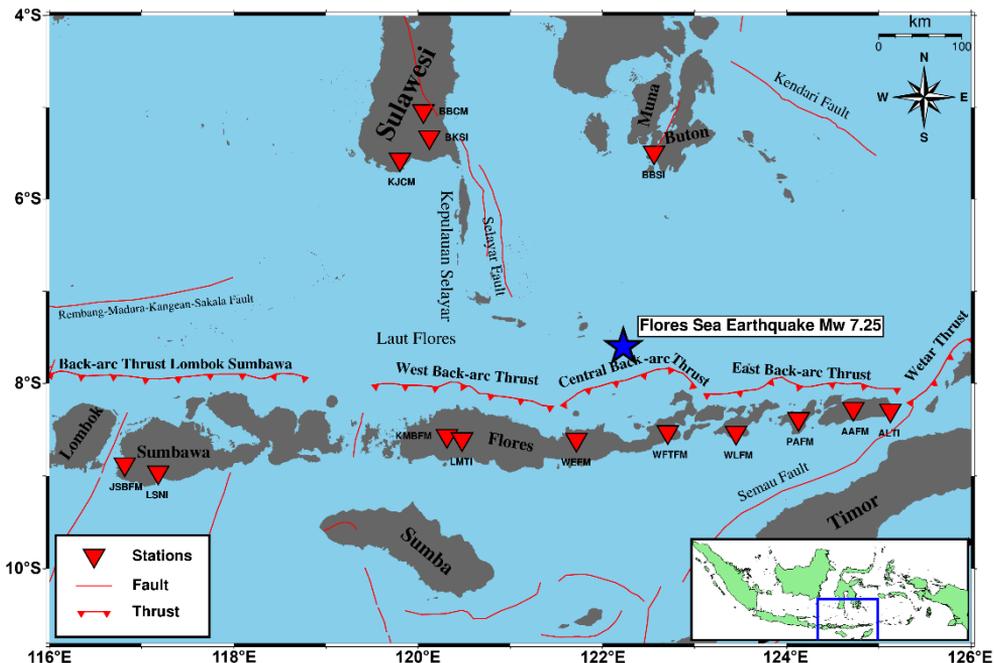
2.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada Penelitian Tugas Akhir ini yaitu :

1. Perangkat keras terdiri dari:
 - a) 1 buah laptop
 - b) 1 buah printer
2. Perangkat lunak terdiri dari:
 - a) *Software ISOLA-GUI 2024*
 - b) *Software Matlab R2021a*
 - c) *Software Visual Studio Code versi 1.94.2*
 - d) *Software GMT 5*
 - e) *Software GSView 5.0*
 - f) *Software Python versi 3.12.3*
 - g) *Software PyGMT versi 0.13.0*
 - h) *Software Geopsy*

2.2.2 Bahan

Data yang digunakan dalam Penelitian Tugas Akhir ini adalah data dari 14 stasiun perekaman Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), seperti pada Gambar 13 dengan informasi koordinat stasiun dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 13. Peta Lokasi dan Persebaran Stasiun Perekaman BMKG (Bintang Biru Menunjukkan Lokasi Episenter Gempa bumi Laut Flores Mw 7.25)

Tabel 2. Koordinat 14 stasiun perekaman gempa BMKG

Stasiun	Latitude	Longitude	Jarak ke Event (Km)
AAFM	-8.2734	124.723	285,019
ALTI	-8.29069	125.1252	328,469
BBCM	-5.0392	120.058	371,448
BKSI	-5.3219	120.1224	343,260
KJCM	-5.5646	119.8026	350,277
JSBFM	-8.87166	116.8165	612,397
WEFM	-8.60695	121.7179	124,408
WFTFM	-8.5247	122.71	115,002
WLFM	-8.5311	123.4499	169,425
KMBFM	-8.56542	120.3131	236,280
LMTI	-8.6011	120.4771	222,220
BBSI	-5.4885	122.56	236,722
LSNI	-8.96	117.18	575,898
PAFM	-8.3832	124.128	226,642

Dari 14 stasiun perekaman gempa, diperoleh data sekunder berupa:

1. Data *waveform mainshock* Gempa bumi Mw 7.25 Laut Flores tanggal 14 Desember 2021 yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kelas II Gowa. Data *waveform* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Lampiran 6.
2. Data seismograf stasiun perekaman Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika berupa koordinat stasiun, *digitizer sensitivity*, *seismogram sensitivity*, dan *poles and zeroes* yang diperoleh dari Metadata Stasiun BMKG. Data seismograf stasiun dapat dilihat pada Lampiran 7.

Data lain yang digunakan yaitu data model kecepatan global atau *Crustal model* AK135 (Kennett et al., 1995), IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991) dan *Preliminary Reference Earth Model* (PREM) (Dziewonski & Anderson, 1981). Data model kecepatan dapat dilihat pada Lampiran 8.

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Studi Literatur

Tahapan awal dalam penelitian ini adalah melakukan studi literatur dengan mengumpulkan bahan bacaan yang menjadi landasan atau referensi terkait teori yang mendasari analisis inversi *waveform*. Hal ini mencakup teori yang mendasari penelitian, pemahaman teknis mengenai pengolahan data, dan kondisi lokasi penelitian. Selain itu, referensi yang dikumpulkan juga mencakup metode yang akan digunakan, yaitu metode inversi *waveform* yang diimplementasikan dalam *software* ISOLA-GUI, termasuk pemanfaatan fungsi Green dalam memperoleh parameter sumber gempa bumi seperti *strike*, *dip*, dan *rake* dari mekanisme fokus melalui proses inversi yang sistematis dan terstruktur.

2.3.2 Reformating Data

Reformatting data adalah proses konversi format data dalam hal ini adalah data *waveform* dari format *.mseed* ke format *.SAC*. Proses ini dilakukan agar data dapat terbaca oleh *software* ISOLA-GUI. Proses *reformatting* dilakukan dengan menggunakan *software* Geopsy. Hasil keluaran dari proses ini adalah data dengan format *.SAC* yang terdiri dari komponen BHE, BHN dan BHZ.

2.3.3 Pre-Processing

Pre-Processing merupakan tahapan persiapan sebelum pengolahan data. Tahapan ini berupa tahapan penyiapan data *PLSTA.stn* stasiun meliputi nama, *latitude* dan *longitude* stasiun (Tabel 2). Data lain yang perlu disiapkan adalah berupa data *pzfiles* berisi sensitivitas serta data *poles and zeroes* untuk setiap stasiun. Informasi mengenai nilai sensitivitas serta *poles and zeroes* dari setiap stasiun diperoleh dari metadata BMKG. Kedua file ini kemudian disimpan dalam direktori ISOLA-GUI.

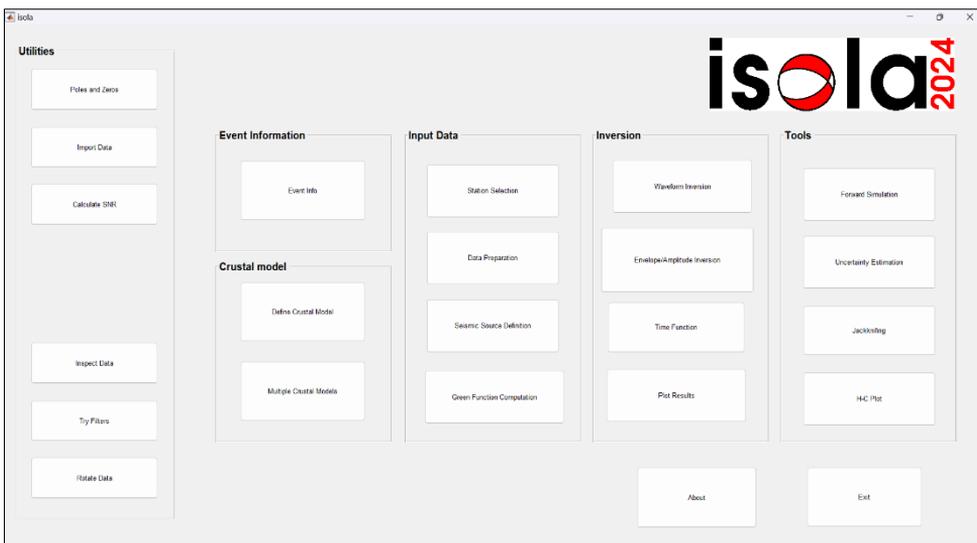
2.3.4 Pengolahan Data dengan ISOLA-GUI

Pengolahan data menggunakan ISOLA dilakukan dalam penentuan momen tensor dari data gempa, mengidentifikasi jenis sesar yang menyebabkan gempa bumi, serta memperoleh parameter-parameter gempa seperti *strike*, *dip*, dan *rake*. ISOLA-GUI dijalankan dengan menggunakan Matlab sebagai *interface*. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan sebelum melakukan *running* ISOLA di Matlab seperti penyesuaian *path* direktori pada sistem operasi komputer dan *path* pada software Matlab. Selain itu, *support software* juga sudah harus dalam kondisi terinstall. Hal ini ini dapat dicek dengan menggunakan perintah 'chkinst' pada *command window* Matlab.

```
>> Checking if isola.m is in Matlab path
Found isola.m in C:\Program Files\MATLAB\R2009b\isola_dev\isola.m
Checking for m_map
Found m_gshhs.m in C:\Program Files\MATLAB\R2009b\m_map\m_gshhs.m
Checking for Stereonets package.
Found Stereonet.m in C:\Program Files\MATLAB\R2009b\stereonet\stereonet.m
It seems that Mapping Toolbox is installed.
It seems that Control System Toolbox is installed.
It seems that Signal Processing Toolbox is installed.
It seems that Statistics Toolbox is installed.
It seems that System Identification Toolbox is installed.
It seems that GMT is installed. OK. Make sure you have high resolution coastlines installed also.
It seems that gsview is installed. OK. Make sure it has the name gsview32.exe (in windows).
It seems that isola FORTRAN CODE is installed. OK.
It seems that gawk is installed. OK.
```

Gambar 14. Output yang Dihasilkan Ketika Instalasi Isola Sesuai

Instalasi yang benar akan menghasilkan *output* seperti Gambar 14 (hasil tergantung pada penamaan folder/jalur instalasi). Respon yang diperoleh akan memberikan informasi mengenai terinstall atau tidaknya *software support* dan *toolbox-toolbox* yang berkaitan dalam penggunaan ISOLA. Selanjutnya tahapan *input* parameter dan pengolahan data sudah dapat dilakukan apabila tampilan main menu ISOLA sudah terlihat (Gambar 15).



Gambar 15. Tampilan Awal Software ISOLA-GUI

Dalam pengolahan data menggunakan ISOLA-GUI, ada beberapa tahapan proses sebagai berikut.

1. *Event Info*

Tahapan ini dilakukan untuk mendefinisikan parameter gempa berupa *date*, *origin time*, *location (degrees)*, *depth*, *magnitude*, *location agency* dan penentuan *windowing (Time Window Length)* yang sesuai untuk *waveform* setiap komponen stasiun (Gambar 16). Informasi mengenai parameter gempa ini diperoleh dari hasil relokasi gempa pada lembaga dimana data *waveform* diambil sebagai informasi referensi, seperti hasil relokasi yang dikeluarkan oleh BMKG.

The screenshot shows the 'eventinfo' GUI window with the following fields and values:

- Date (YYYYMMDD):** 20211214
- Location (specify either as Deg, Min or Deg):**
 - Lat (Deg,Min): -7, 36.180
 - Lat (N) (Deg): -7.603
 - Lon (Deg,Min): 122, 13.620
 - Lon (E) (Deg): 122.227
- Depth (km):** 14.3
- Origin Time:**
 - Hour: 03
 - Min: 20
 - Seconds: 23.00
- Comments:**
 - Magnitude: 7.27
 - Location agency: BMKG
- Time Window Length (sec):** A list box containing values: 102.4, 204.8, 307.2, 409.6 (highlighted), 1024, 2048. Below the list box is the text: "The chosen Time Window Length should be large enough to include the travel time from epicenter to stations plus the seismogram duration plus twice the safety interval."
- Automatic form fill:** e.g. 20100118 1556 8.38 38 25.19 21E55.44 8.29 5.23
- Paste your EventInfo here:** A text input field with a "Read" button next to it.
- Buttons:** "Save" and "Exit" buttons are located on the right side of the window.

Gambar 16. Tampilan *Event Information*

2. *Define Crustal model*

Pada tahap ini, dilakukan pendefinisian model bumi (*crustal model*) untuk lokasi penelitian, yang mencakup kedalaman, kecepatan gelombang P, kecepatan gelombang S, densitas, Q_p (*quality factor* gelombang P), dan Q_s (*quality factor* gelombang S) seperti Gambar 17, dengan plot respon V_p/V_s terhadap kedalaman seperti pada Gambar 18. Tahapan ini sangat penting sebagai langkah awal, karena ketepatan dalam pendefinisian *crustal model* akan berdampak pada proses selanjutnya.

3. Poles and Zeroes Defintion

Tahapan ini bertujuan untuk menambahkan parameter berupa sensitivitas seismograf dan juga koreksi instrumen dengan nilai *poles* dan *zeroes*. Tahapan ini dilakukan untuk memberikan nilai *poles*, *zeroes*, *normalization constant*, *digitizer sensitivity*, dan *seismometer sensitivity* pada setiap komponen stasiun (Gambar 19). Sebelumnya, *waveform* sampai ke seismometer dalam bentuk *ground units* (m/s) yang kemudian terkonversi menjadi dalam bentuk *volts* (tegangan) melalui *seismometer sensitivity*. Kemudian, melalui *digitizer sensitivity* data terkonversi lagi menjadi bilangan biner sebagai data *waveform*. Informasi mengenai nilai *poles*, *zeroes*, *normalization constant*, *digitizer sensitivity*, dan *seismometer sensitivity* dapat diperoleh dari metadata pada seismograf itu sendiri (Metadata BMKG).

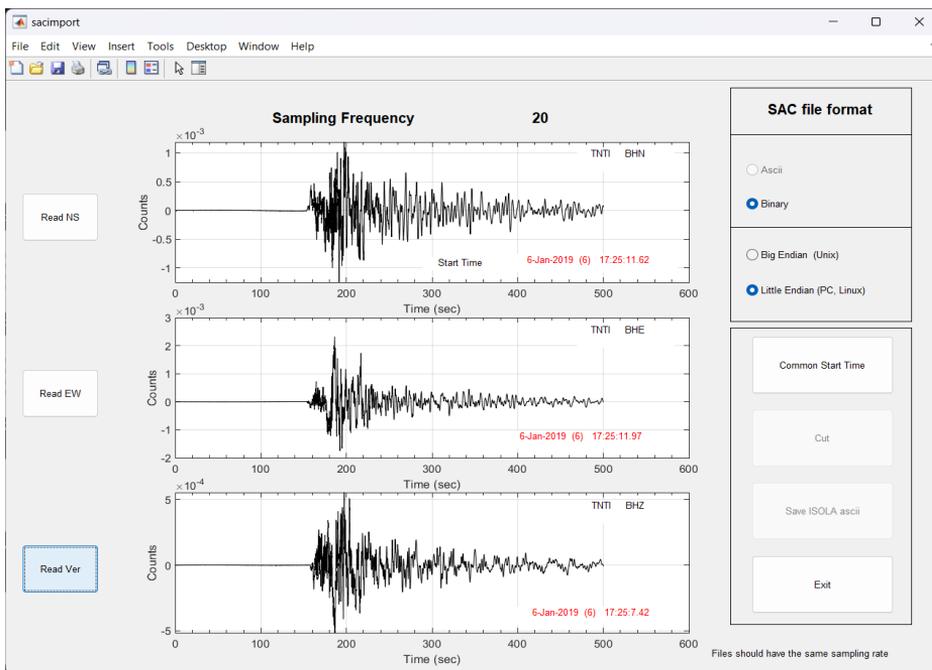
The screenshot shows the 'makepz' application window. It is divided into several sections:

- No of Zeroes:** A text box containing the number '2'.
- No of Poles:** A text box containing the number '6'.
- Zero and Pole Values:** Two columns of input fields. The 'New Zero (rad/sec)' column has four fields, all containing '0'. The 'New Pole (rad/sec)' column has eight fields with values: -0.037, 0.037, -0.037, -0.037, -190, 620, -190, -620, -2000, 3000, -2000, and -3000.
- Station Name:** A text box containing 'AAFM'.
- A0 normalization constant:** A text box containing '5.46606E+12'.
- Digitizer sensitivity (cnts/Volts):** A text box containing '1000'.
- Seismometer sensitivity (V/m/sec):** A text box containing '1000'.
- Buttons:** 'Plot', 'Help', 'Save file', 'Load PZ file' (highlighted in blue), and 'Exit'.

Gambar 19. Tampilan *Poles and Zeroes Definition*

4. Import Data

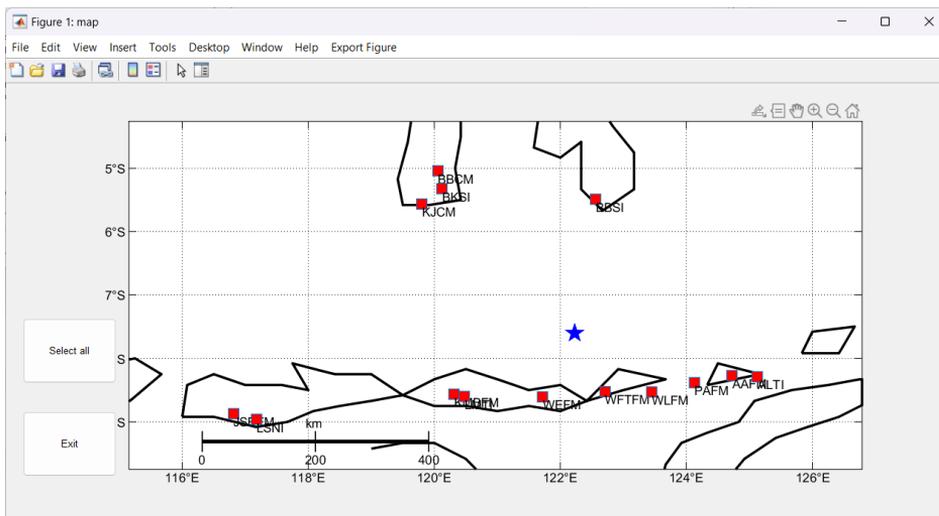
Proses *import data* dilakukan dengan meng-*input* masing-masing *waveform* dari setiap komponen stasiun meliputi BHN, BHE dan BHZ seperti pada Gambar 20. Proses ini bertujuan untuk menyamakan waktu tiba dari setiap gelombang dengan *Common Start Time* yang selanjutnya disimpan dalam format ISOLA .ascii (data *time* dan *amplitude*).



Gambar 20. Import Data

5. Station Selection

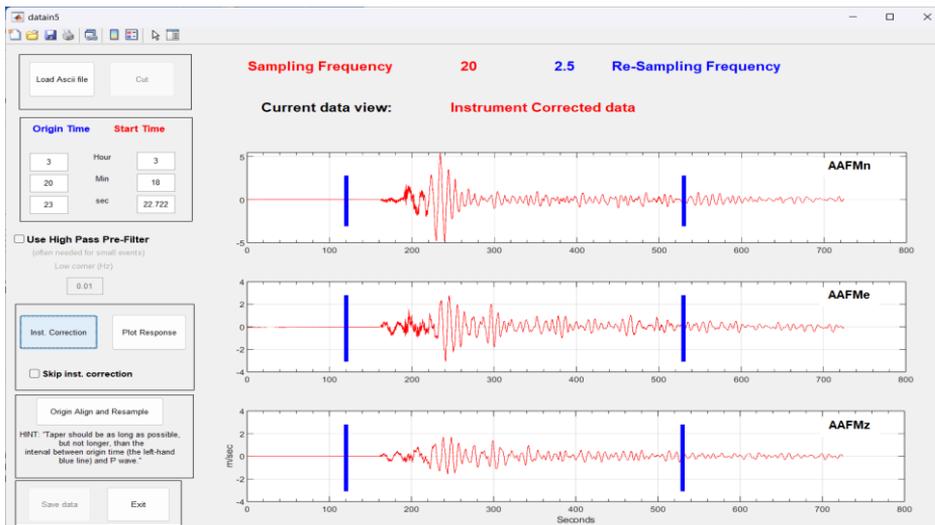
Tahap ini bertujuan untuk memilih stasiun yang akan digunakan dalam proses inversi. *Azimuthal gap* perlu diperhatikan dikarenakan nilai *azimuthal gap* yang kecil mengindikasikan stasiun tersebar merata di sekitar episenter, sehingga episenter lebih akurat karena data dari segala arah. Tampilan tahap ini dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Station Selection. Kotak Merah Merupakan Stasiun-Stasiun yang Dapat Dipilih dan Bintang Biru Menunjukkan Lokasi Gempa

6. *Data Preparation*

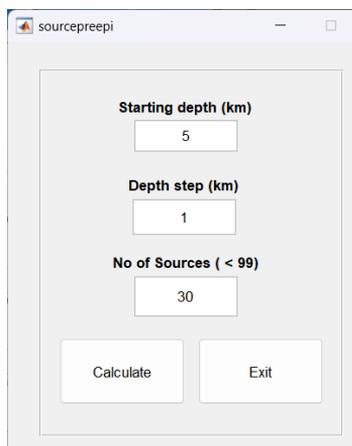
Raw Data Preparation dilakukan untuk melakukan koreksi instrumen, *time alignment*, *resampling*, dan *tapering* seperti pada Gambar 22. Koreksi instrumen dilakukan agar *waveform* clear dari respon instrumen. *Time alignment* dilakukan untuk menyamakan *starting time* tiap *waveform*. *Resampling* dilakukan untuk mengubah ukuran data untuk meminimalisir redundansi data dan penyesuaian frekuensi. Sementara *tapering* dilakukan untuk mengurangi *edge effect* berupa distorsi atau artefak di awal dan akhir *waveform*.



Gambar 22. *Raw Data Preparation*

7. *Seismic Source Definition*

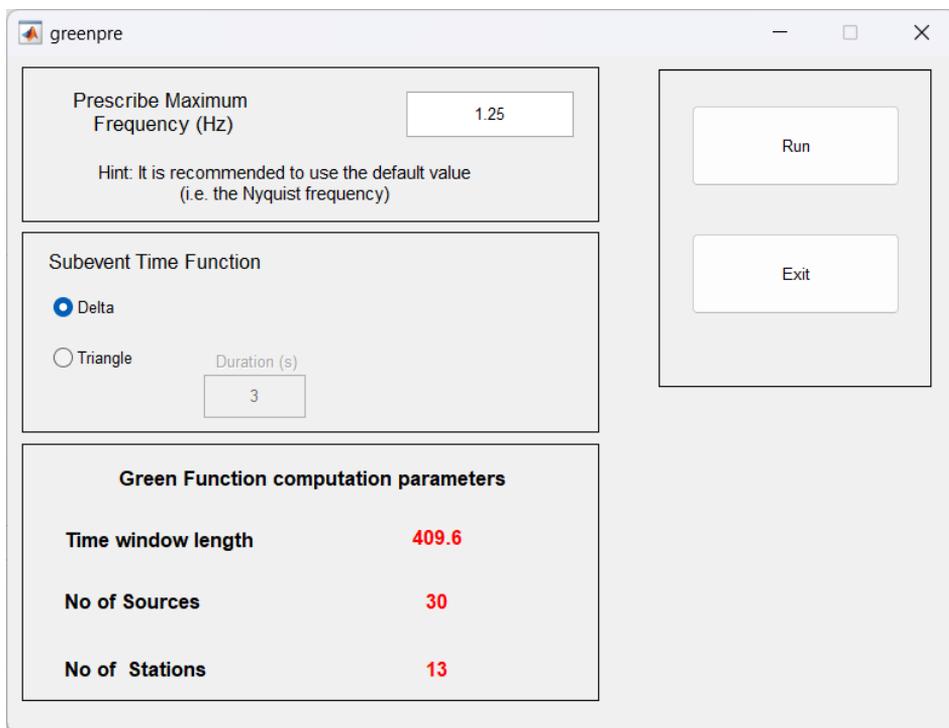
Tahap ini bertujuan untuk mendefinisikan *starting depth*, *depth step* dan *no of source* (Gambar 23) yang akan digunakan pada proses inversi. Tahap ini untuk menghitung kedalaman dari *fault plane* ke sumber (*focal depth*).



Gambar 23. *Seismic Source Definition*

8. Green Function Computation

Pada tahap ini dilakukan perhitungan fungsi Green untuk memperoleh besarnya momen tensor dan parameter sumber gempa lainnya dengan menggunakan Persamaan (8). *Prescribe maximum frequency* di-input sebagai perkiraan frekuensi maksimum/frekuensi nyquist (setengah dari *sampling frequency* yang digunakan) (Gambar 24).



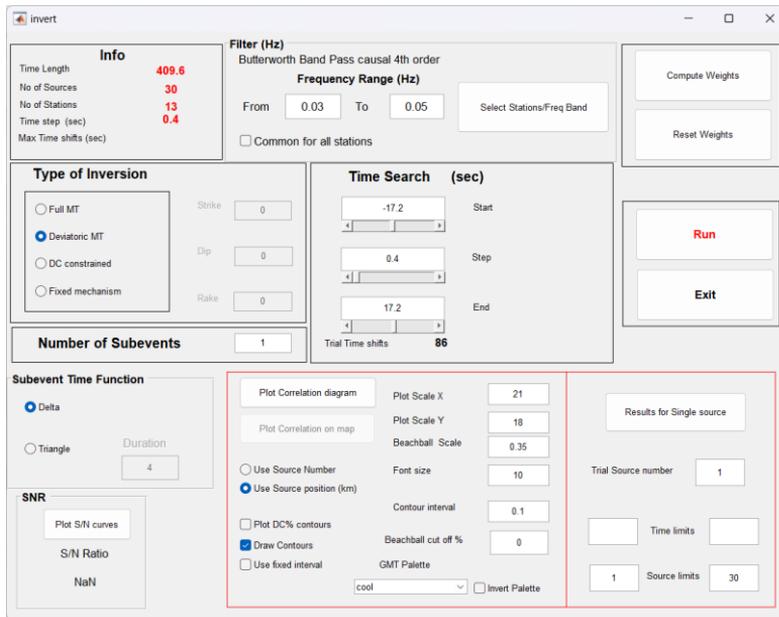
Gambar 24. Green Function Computation

9. Waveform Inversion

Proses inversi data *waveform* tiga komponen dilakukan metode iterasi dengan proses dekonvolusi. Hal ini dilakukan untuk memisahkan komponen sinyal seismik guna memperkirakan mekanisme sumber gempa. Proses ini mengacu pada pemisahan pengaruh fungsi respons instrumen, medium, dan rekaman lapangan dari sinyal yang diamati. Berbeda dari metode iterasi biasa karena fokusnya pada pencocokan gelombang seismik yang teramati dengan sinyal sintetis, yang dihasilkan melalui perhitungan fungsi Green. Metode ini tidak hanya mengandalkan iterasi standar, tetapi juga mempertimbangkan faktor-faktor lokal yang dapat mempengaruhi respons seismik (Kleijnen et al., 2012).

Pada tahap ini (Gambar 25), pemilihan frekuensi untuk *filter* disesuaikan dengan kondisi lokasi penelitian. *Trial and error* harus dilakukan hingga hasil momen tensor mengerucut dengan nilai *variance reduction*, *condition number*, dan *double couple* terbaik. Selain itu, penentuan *type of inversion* dan *time search*.

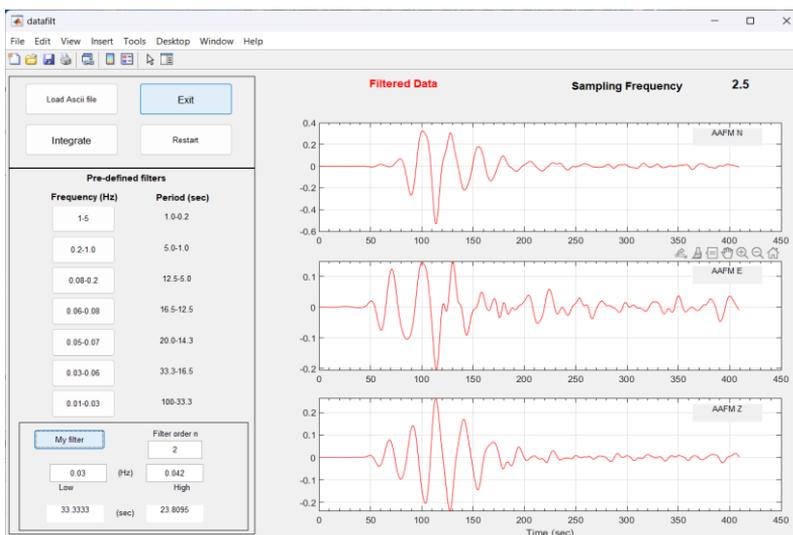
Proses inversi yang efektif ditentukan oleh kesesuaian antara data observasi dan data sintetis yang dihasilkan. Hasil yang optimal dicapai ketika data observasi dan data sintetis dengan nilai *variance reduction* yang mendekati 1.



Gambar 25. Waveform Inversion Settings

Pemilihan filter dapat dilakukan dengan menggunakan *utilities* ISOLA-GUI yaitu dengan menu *Try Filters*, dengan beberapa tahapan sebagai berikut.

- Data *waveform* dalam format Ascii yang diperoleh setelah *common start time*, diinput ke menu *Try Filters* (Gambar 26) dengan mengklik *Load Ascii File*.



Gambar 26. Tampilan *Try Filters Utilities*

- b) *Waveform* untuk komponen NS, EW akan tampil pada *waveform window*.
- c) Pada menu *Pre-defined Filters*, terdapat pilihan *corner* frekuensi (Hz) dan periode (detik). Ketika salah satu dari pilihan *range* filter di klik, data akan ditampilkan dalam grafik untuk visualisasi sesuai dengan *range* filter tersebut. Pemilihan filter juga dapat dilakukan secara manual dengan menginput *corner frekuensi* kemudian mengklik *My Filter*. Pemilihan filter ini perlu memperhatikan karakteristik sinyal yang relevan, rasio sinyal terhadap *noise*, dan rentang frekuensi yang mendukung analisis.
- d) Setelah *corner* frekuensi filter telah ditentukan dan sesuai dengan kondisi data *waveform*, *corner* frekuensi filter ini kemudian di input pada menu *Select Stations/Freq Band* pada *Waveform Inversion* (Gambar 27).

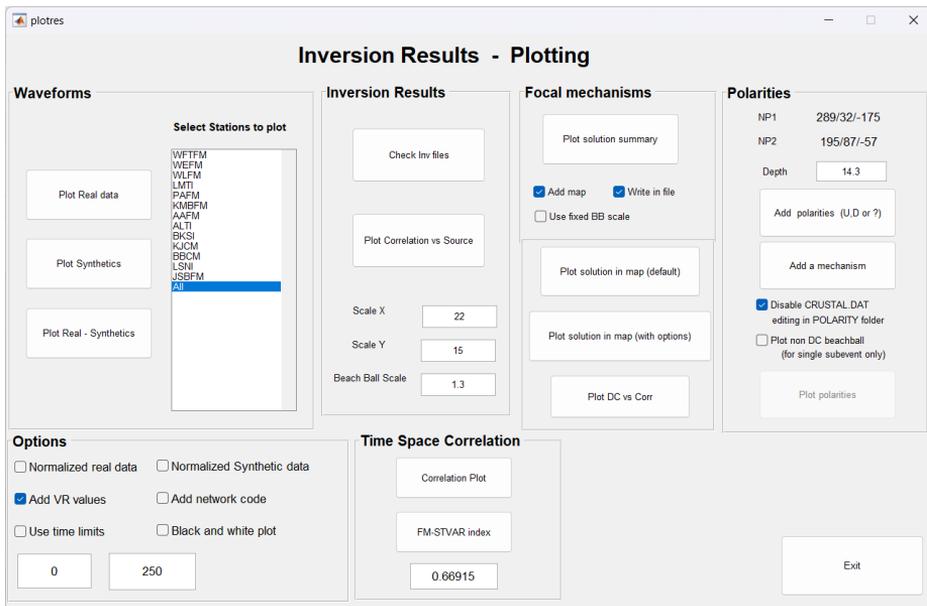
Stations	Components				LF	HF
WTFM	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input type="checkbox"/> Use NS	<input type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
WEFM	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
WLFM	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
LMTI	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
PAFM	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input type="checkbox"/> Use Z	0.02	0.038
KMBFM	<input type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
IBSI	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
AAFM	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.028	0.038
ALTI	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.028	0.038
BKSI	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
KJCM	<input type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.05
BBFM	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.03	0.042
LSNI	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.038	0.046
JSBFM	<input checked="" type="checkbox"/> Use Station	<input checked="" type="checkbox"/> Use NS	<input checked="" type="checkbox"/> Use EW	<input checked="" type="checkbox"/> Use Z	0.037	0.047

Gambar 27. *Select Stations/Freq Band*

- e) Klik *Update dan Exit* untuk menyimpan *corner* frekuensi filter yang telah diinput, *corner* frekuensi ini kemudian akan diterapkan pada tahap inversi.

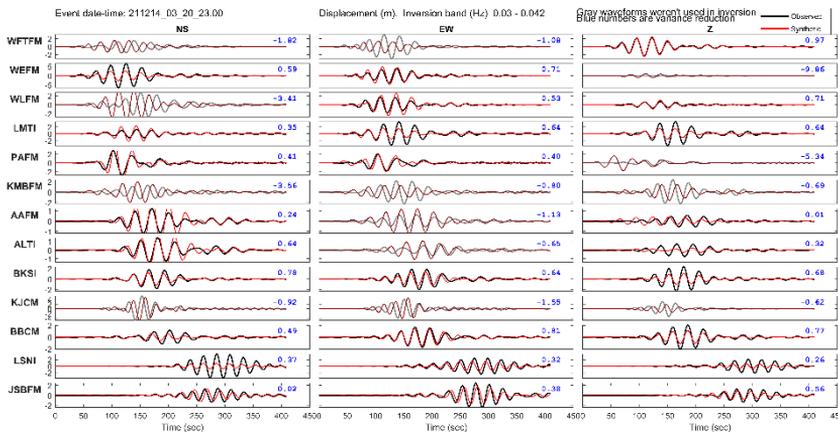
10. Plot Results

Pada tahap ini perhitungan fungsi Green ditampilkan dalam bentuk gambar momen tensornya disertai dengan informasi parameter sumber gempa. Contoh tampilan pada menu ini dapat dilihat pada Gambar 28.



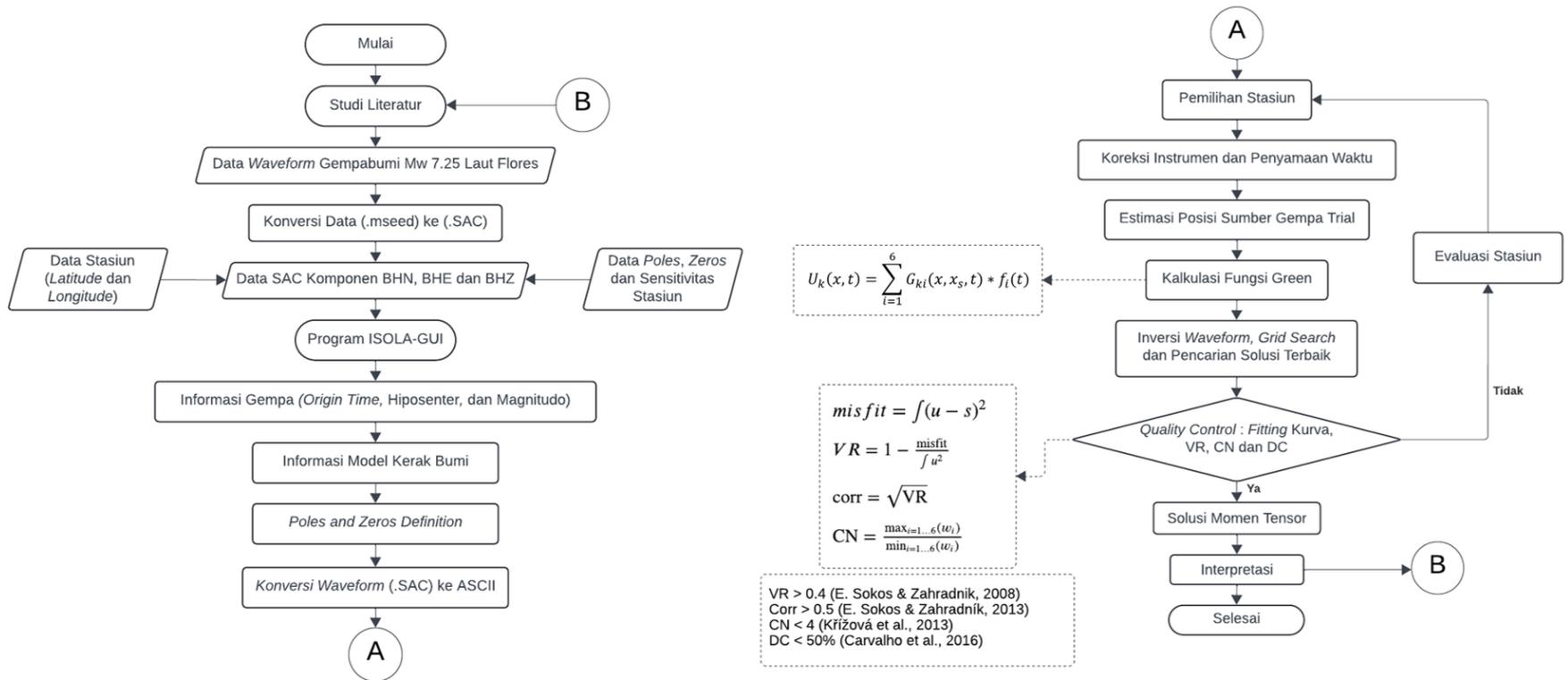
Gambar 28. Plot Results

Hasil dari proses inversi ditampilkan melalui pencocokan antara data observasi dan data sintetik. Hasil *fitting* yang baik ditunjukkan dengan nilai yang mendekati 1, yang berarti bahwa data observasi dan data sintetik cocok secara sempurna. Selain *fitting waveform*, tahap ini juga menghasilkan output lain berupa *correlation vs source*, *correlation plot*, *solution summary*, *polarities*, dan *FM-STVAR index*. Contoh solusi *fitting waveform* dapat dilihat pada Gambar 29.



Gambar 29. Fitting Waveform. Tulisan Warna Biru adalah Nilai Variance Reduction

2.4 Bagan Alir Penelitian



Gambar 30. Bagan Alir Penelitian