

**ANALISA POLA BIDANG SESAR PADA ZONA
SUBDUKSI DI WILAYAH SELATAN PULAU SUMATERA
DARI EVENT GEMPA PADA TAHUN 2011-2014**

Nama Mahasiswa : Riski Salim
NRP : 1109 100 064
Jurusan : Fisika FMIPA-ITS
Pembimbing : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U

Abstrak

Pada penelitian membahas tentang momen tensor dan pola bidang patahan yang didapat dari focal mechanism gempa di selatan Pulau Sumatera. Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia, gempa-gempa yang terjadi di Pulau Sumatera merupakan implikasi geodinamika dari deformasi aktif di sekitar Sunda dan Java trench, dalam menentukan momen tensor dan focal mechanism-nya menggunakan program ISOLA-GUI dengan menghitung fungsi Green dan melakukan proses inversi. Dari hasil perhitungan focal mechanism ditentukan bidang patahan dan besar slip dari sesar. Data yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai magnituda lebih dari sama dengan 5.5 Skala Richter. Hasil dalam penelitian ini dibandingkan dengan hasil dari Global CMT guna memperkuat pengambilan kesimpulan, adapun dari penelitian ini didapatkan bahwa untuk untuk pola bidang patahan yang terjadi di wilayah selatan Pulau Sumatera yang menggunakan data gempa yang terjadi pada tahun 2011-2014 adalah pola reverse fault dan dip-slip, untuk pola dip-slip diduga merupakan implikasi dari zona subduksi di sebelah barat Pulau Sumatera . Dengan besar rentang momen tensor untuk masing-masing komponennya sebesar $M_{11} = 2.531 \cdot 10^{15}$ sampai $0.205 \cdot 10^{18}$, $M_{22} = 3.495 \cdot 10^{15}$ sampai $0.337 \cdot 10^{18}$, $M_{33} = 0.964 \cdot 10^{15}$ sampai $0.131 \cdot 10^{18}$, $M_{31} = 0.544 \cdot 10^{15}$ sampai $5.174 \cdot 10^{18}$, $M_{32} =$

1.107 10¹⁵ sampai 4.113 10¹⁸, dan $M_{12} = 1.140 10^{15}$ sampai 0.430 10¹⁸. Sedangkan untuk besar slip rata-rata dari event gempa diselatan Pulau Sumatera pada tahun 2011-2014 274.71 meter.

Kata Kunci : *Moment tensor, focal mechanism, reverse fault dan dip slip*

**THE FAULT-PLANE PATTERN ANALYSIS AT THE
SUBDUCTION ZONE IN SOUTHERN SUMATERA
REGION FROM EARTHQUAKE EVENT OCCURS
DURING 2011-2014 PERIODS**

Name : Riski Salim
NRP : 1109 100 064
Department : Physic, FMIPA-ITS
Academic Supervisor : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa,
S.U

Abstrack

Based on the research that examines about moment-tensor and fault-plane pattern from South Sumatera's earthquake focal mechanism, Indonesia lays on a strongly active tectonic zone which caused by the concourse of the world's three main earth plates including nine smaller other plates. Earthquakes that happen in Sumatera island is an implication from the active deformations and geodynamics around Sunda and Java trench. ISOLA-GUI program was used in determining the moment-tensor and the focal mechanism by doing the inversion process and calculating the Green function formula. The data comes from focal mechanism calculation is used to determined the fault-plane and the slip value from the fault. The data used in this research has magnitude's value approximately 5.5 Ritcher Scale and not less. The result in this research is compared to the result from the Global CMT to strengthen the final conclusion, as for the result in this research concluded that the fault-plane patterns happens in South Sumatera using earthquake's data during 2011-2014 periods is the reverse-fault pattern and dip-slip. For the dip-slip pattern itself was suspected as implication from subduction zone in the west region of Sumatera island with the moment-tensor value range from $M_{11} = 2.531 \cdot 10^{15}$ to $0.205 \cdot 10^{18}$, $M_{22} = 3.495 \cdot 10^{15}$ to $0.337 \cdot 10^{18}$, $M_{33} = 0.964 \cdot 10^{15}$ to $0.131 \cdot 10^{18}$, $M_{31} =$

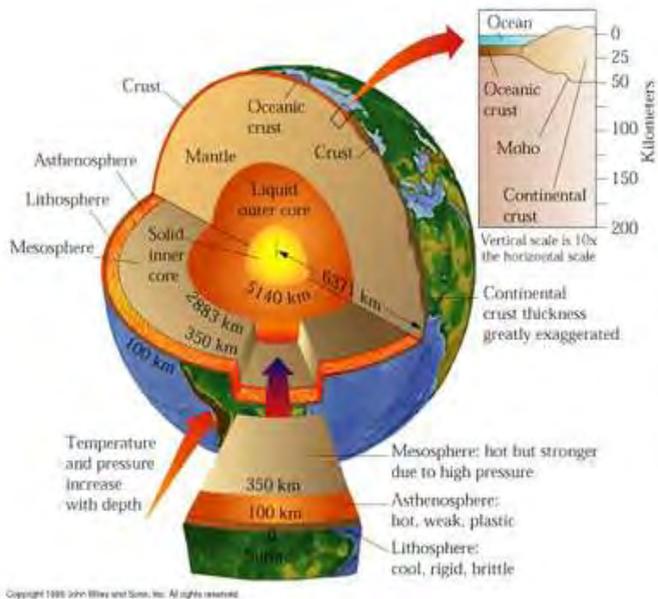
$0.544 \cdot 10^{15}$ to $5.174 \cdot 10^{18}$, $M_{32} = 1.107 \cdot 10^{15}$ to $4.113 \cdot 10^{18}$, and $M_{12} = 1.140 \cdot 10^{15}$ to $0.430 \cdot 10^{18}$. Whereas the average slip value from earthquake event happens in South Sumatera region during 2011-2014 periods is 274.71 meters.

Keywords : *Moment tensor, focal mechanism, reverse fault, and dip slip*

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Geologi Pulau Sumatera

Permukaan bumi tersusun oleh beberapa lempeng besar tektonik yang selalu bergerak akibat dari panas yang dihasilkan dari dalam bumi. Pergerakan ini sangat lambat namun perpindahan akibat pergerakan ini terus terjadi di setiap waktu. Akibatnya, lempeng bergerak berlawanan satu sama lain.



Gambar 2.1 struktur lapisan bumi

Secara geografis, kepulauan Indonesia berada di antara 6° lintang utara dan 11° lintang selatan serta 95° bujur timur- 141° bujur timur. Indonesia terletak diantara tiga lempeng bumi, yaitu lempeng India-Australia, lempeng pasifik dan lempeng Eurasia. Lempeng India-Australia dan lempeng Pasifik diketahui masih sangat aktif, masing-masing bergerak dengan kecepatan rata-rata 7 cm/tahun menuju Indonesia (Gordon and Jurdy, 1986). Ditinjau

secara geologis, kepulauan Indonesia berada pada pertemuan dua jalur gempa utama, yaitu jalur gempa *Sirkum Pasifik* dan jalur gempa *Alpide Transasiatic*, karena itu kepulauan Indonesia berada pada daerah yang mempunyai aktifitas gempa bumi yang cukup tinggi (Irwan dan Bagus J. S, 2011).

Sumatera terletak pada perbatasan antara lempeng Indian (Indo-Australia) di bagian selatan dan timur dan lempeng Eurasia dari timur sampai barat. Lempeng Indo-Australia berinteraksi dengan lempeng Eurasia yang relatif diam, menyebabkan zona subduksi membujur sepanjang Pulau Sumatera dan Jawa hingga Nusa Tenggara, daerah inilah yang merupakan daerah gempa bumi aktif. Ketika dua lempeng bertemu, lempeng India ditekan ke dalam oleh tetangganya, membentuk *Sunda Trench*. Proses geologi yang terjadi sangat kompleks, sebagian besar pulau Sumatera dibentuk oleh runtuh batuan di bawah tekanan yang sangat besar. Batuan ini lalu berkembang menjadi lapisan kulit baru dan menimbulkan letusan gunung berapi.

Peta Indonesia memperlihatkan lintasan panjang gunung berapi sepanjang perbatasan lempeng pada Pulau Jawa dan Sumatera. Gunung api di Sumatera merupakan jenis gunung api yang sering meletus dan gempa dengan magnituda di atas 7 SR pun cukup sering terjadi.



Gambar 2.2 Pulau Sumatera berdasarkan wilayah administrasi

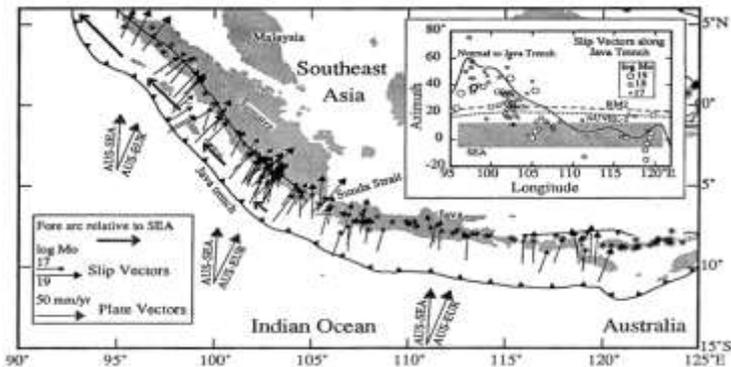
Kejadian gempa yang terjadi didekat batas pertemuan antara lempeng samudra yang menujam masuk ke bawah lempeng benua diklasifikasikan sebagai zona subduksi. Zona subduksi Sumatera terbentang dari Selat Sunda ke arah utara hingga Laut Andaman. Kegempaan pada zona subduksi Sumatera terjadi di dekat palung pertemuan lempeng hingga kedalaman sekitar 250 km dengan sudut penunjaman sekitar 300 sampai 400. Menurut LIPI, dorongan lempeng Indo-Australia terhadap bagian utara Sumatra adalah 55 mm/tahun dan 60 mm/tahun pada bagian selatan Sumatra.

Patahan geser Sumatera merupakan indikasi saling berpasasan atau saling bergeser antara dua lempeng kerak bumi.

Patahan ini merentang mulai dari Banda Aceh sampai ke Teluk Semangko di Selat Sunda, dengan panjang sekitar 1650-1700 km (M. Ihsan, 2008).

Pulau Sumatera dan Jawa terletak diantara tiga zona yang dapat mengakibatkan gempa bumi di Indonesia. Pertama, zona subduksi lempeng yang disebut dengan Palung Sunda. Palung ini membusur melalui sebelah selatan Sumba, selatan Jawa, barat Sumatera hingga Andaman. Kedua, sistem sesar Sumatera (Sesar Semangko). Sesar ini merupakan sesar yang sangat aktif di daratan yang membelah Pulau Sumatera, mulai dari Teluk Semangko, membentang sepanjang pegunungan bukit barisan sampai wilayah Aceh di utara, sejajar dengan batas lempeng atau daerah subduksi sebelah barat Sumatera. Ketiga, Sesar Mentawai, Sesar Bate dan Sesar Andaman Barat merupakan sesar *strike-slip* yang membujur di antara Sesar Sumatera dan Palung Sunda (Masykur, 2011).

Konvergensi antara Lempeng Samudera dan Benua membentuk zona palung busur, seperti yang terdapat di Sumatera dan Jawa. Zona palung dapat mencapai kedalaman 11 km di depan busur vulkanik sebagai tempat akumulasi sedimen asal busur, serta sedimen turbidit dan pelajik, namun biasanya telah terdeformasi dan tertutupi oleh kompleks subduksi.



Gambar 2.3 Peta busur Sunda (*Sunda Trench*) yang menunjukkan arah pergerakan lempeng (McCaffrey, 1991).

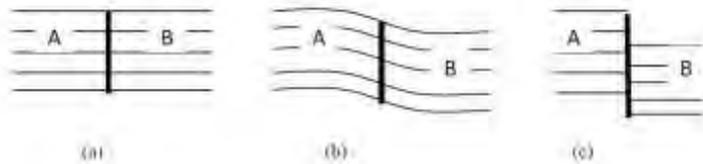
2.2 Gempa Bumi

Gempa bumi tidak lain merupakan manifestasi dari getaran lapisan batuan yang patah yang energinya menjalar melalui badan dan permukaan bumi berupa gelombang seismik. Energi yang dilepaskan pada saat terjadinya patahan tersebut dapat berupa energi deformasi, energi gelombang dan lain-lain. Energi deformasi ini dapat terlihat pada perubahan bentuk sesudah terjadinya patahan, misalnya pergeseran sedang energi gelombang menjalar melalui medium elastis yang dilewatinya dan dapat dirasakan sangat kuat di daerah terjadinya gempa bumi tersebut (Nurcahya dan Brotospito, 2004).

Sebuah gempa yang besar menghasilkan gerakan tanah yang dapat dicatat di hampir seluruh permukaan bumi. Melalui seismometer yang sensitif di stasiun penerima, gerakan tanah akibat gempa tersebut direkam dan disajikan kembali sebagai seismogram. Seismogram tersusun atas fase-fase gelombang yang kompleks, berasal dari refleksi/refraksi yang terjadi di dalam bumi, akibat adanya perbedaan parameter elastik pada sistem perlapisan model bumi, disebut antar muka, sepanjang perambatan gelombang dalam medium bumi dari sumber gempa hingga stasiun penerima (Bagus jaya Santosa, 2011)

Jika dua lempeng bertemu pada suatu sesar, keduanya dapat bergerak saling menjauhi, saling mendekati atau saling bergeser. Umumnya, gerakan ini berlangsung lambat dan tidak dapat dirasakan oleh manusia namun terukur sebesar 0-15 cm per tahun. Terkadang gerakan lempeng ini berhenti dan saling mengunci, sehingga terjadi pengumpulan energi yang berlangsung terus sampai pada suatu saat batuan pada lempeng tektonik tersebut tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut sehingga terjadi pelepasan mendadak yang kita kenal sebagai gempa bumi. (http://www.bmkg.go.id/bmkg_pusat/Geofisika/gempabumi_bmkg).

Proses terjadinya gempa bumi dapat dilihat pada gambar 2. 4



Gambar 2.4 Skematik proses gempa bumi

Garis tebal vertikal menunjukkan patahan atau *fault* pada bagian bumi yang padat. Berikut adalah penjelasan untuk Bagian-bagian pada gambar 2.4

Gambar (a) : pada keadaan ini menunjukkan bahwa suatu lapisan yang belum terjadi perubahan-perubahan bentuk stuktur bumi.

Gambar (b) : pada keadaan ini menunjukkan bahwa suatu lapisan batuan telah mendapat dan mengandung tegangan (*stress*), dimana telah terjadi perubahan bentuk stuktur batuan. Untuk daerah A mendapat tegangan ke atas, sedang pada daerah B mendapat tegangan ke bawah. Proses ini berjalan terus hingga tegangan yang terjadi di daerah ini cukup besar untuk merubahnya menjadi gesekan antara daerah A dan daerah B. dalam kurun waktu yang cukup lama, lapisan batuan tidak akan mampu lagi untuk menahan tegangan sehingga terjadi suatu pergerakan atau perpindahan yang tiba-tiba dari kedua blok tersebut. Pada saat itulah terjadi patahan/sesar sambil dipancarkan sejumlah energi yang berupa gelombang seismik yang biasa disebut dengan gempa bumi.

Gambar (c) : pada keadaan ini menunjukkan bahwa suatu lapisan batuan yang sudah patah, karena adanya pergerakan yang tiba-tiba dari batuan.

Gerakan perlahan-lahan di daerah sesar (*fault*) ini berjalan terus, dimana seluruh proses diatas berulang kembali dan sebuah gempa baru timbul lagi di daerah tersebut setelah beberapa waktu. Demikianlah proses ini berlangsung secara terus-menerus

dan teori ini dikenal sebagai *elastic rebound theory* (Gunawan Ibrahim & Subardjo, 2003, Pengetahuan Geofisika).

Klasifikasi gempa bumi menurut penyebabnya (Bowler, 2003) :

1. Gempa Bumi Tektonik

Gempa bumi tektonik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh dislokasi atau perpindahan akibat pergeseran lapisan bumi yang tiba-tiba terjadi pada struktur bumi, yakni adanya tarikan atau tekanan.

Pergeseran lapisan bumi ada 2 macam:

- Vertikal
- Horizontal

2. Gempa Bumi Vulkanik

Gempa bumi vulkanik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas gunung api atau letusan gunung api. Pada saat dapur magma bergejolak, ada energi yang mendesak lapisan bumi. Energi yang mendesak lapisan bumi ada yang mampu mengangkat lapisan bumi sampai ke permukaan disertai getaran. Gunung api yang akan meletus biasanya mengakibatkan gempa bumi.

3. Gempa Bumi Runtuhan

Gempa bumi runtuh adalah gempa bumi yang di sebabkan runtuhnya atap gua atau terowongan tambang di bawah tanah. Jika batuan pada atap rongga atau pada dinding rongga mengalami pelapukan, maka rongga dapat runtuh karena tidak mampu lagi menahan beban di atas rongga. Runtuhnya gua dan terowongan yang besar bisa mengakibatkan getaran yang kuat.

Berdasarkan kedalaman sumber (h), gempa bumi digolongkan atas :

1. Gempa bumi dalam (*deep earthquake*), dengan kedalaman, $h > 300$ Km
2. Gempa bumi menengah (*intermediate earthquake*), dengan kedalaman, $80 < h \leq 300$ Km

3. Gempa bumi dangkal (*shallow earthquake*), dengan kedalaman, $h \leq 80$ Km

Kedalaman dari suatu gempa dapat diketahui melalui seismogram yaitu melalui rekaman gelombang permukaannya. Walaupun pola gelombang permukaan tidak selalu mengindikasikan jenis gempa bumi berdasarkan kedalamannya, namun metode yang paling akurat untuk menentukan titik fokus dari gempa bumi adalah dengan membaca rekaman fase pada seismogram. Fase untuk kedalaman adalah karakteristik fase pP, refleksi gelombang P dari permukaan bumi pada suatu titik di dekat. Pada jarak stasiun seismogram, pP mengikuti gelombang P yang interval waktunya berubah secara perlahan terhadap jarak tetapi berubah cepat terhadap kedalaman. Interval waktu ini, pP – P (pP minus P) , digunakan untuk menghitung kedalaman fokus. Dengan menggunakan perbedaan waktu antara pP dan P yang terbaca pada seismogram dan jarak antara episenter dan stasiun seismograf, kedalaman gempa bumi dapat ditentukan dari kurva *travel time* atau tabel kedalaman.

Gelombang gempa lain yang digunakan untuk menentukan *focal depth* adalah fase sP, refleksi dari gelombang S sebagai gelombang P dari permukaan bumi pada titik dekat episenter. Gelombang ini terekam setelah pP, kira-kira 1,5 kali interval waktu pp-P. Kedalaman gempa bumi dapat ditentukan dari fase sP dan dengan cara yang sama seperti dengan menggunakan gelombang pP yaitu dengan menggunakan kurva *travel time* dan tabel kedalaman untuk sP. Jika gelombang pP dan sP dapat diidentifikasi pada seismogram, *focal depth* dapat ditentukan secara akurat (<http://earthquake.usgs.gov/>).

Berdasarkan tipenya, Mogi membedakan gempa bumi atas :

1. Tipe I : pada tipe ini gempa bumi utama diikuti gempa susulan tanpa didahului oleh gempa pendahuluan (*fore shock*)
2. Tipe II : pada tipe ini sebelum terjadinya gempa utama terlebih dahulu diawali dengan adanya gempa

pendahuluan dan selanjutnya diikuti oleh gempa susulan yang cukup banyak.

3. Tipe III : pada tipe ini tidak terdapat gempa utama. Magnitude dan jumlah gempa bumi yang terjadi besar pada periode awal dan berkurang pada periode akhir, seringkali berlangsung cukup lama dan bisa mencapai tiga bulan. Tipe gempa ini disebut tipe *swarm* dan biasanya terjadi pada daerah vulkanik seperti gempa Gunung Lawu pada tahun 1979.

Perbedaan klasifikasi atau pengelompokan gempa bumi diatas disebabkan oleh kerak bumi (*crust*), distribusi kedalaman dan kepentingan dalam kerekeyasaan.

2.3 Kekuatan Gempa Bumi

Kekuatan gempa bumi atau magnituda (*magnitude*) adalah ukuran kekuatan gempa bumi, menggambarkan besarnya energi yang terlepas pada saat gempa bumi terjadi dan merupakan hasil pengamatan seismograf.

Berdasarkan kekuatan atau *magnitude* (M), gempa bumi dapat dibedakan atas (Hagiwara, 1964):

1. Gempa bumi sangat besar (*great earthquake*), dengan skala magnituda, $M > 8,0$ SR
2. Gempa bumi besar (*major earthquake*), dengan skala magnituda, $7,0 < M \leq 8,0$ SR
3. Gempa bumi sedang (*moderate earthquake*), dengan skala magnituda, $5,0 < M \leq 7,0$ SR
4. Gempa bumi kecil (*small earthquake*), dengan skala magnituda, $3,0 < M \leq 5,0$ SR
5. Gempa bumi mikro (*micro earthquake*), dengan skala magnituda, $1,0 < M \leq 3,0$ SR
6. Gempa bumi ultra mikro (*ultramicro earthquake*), dengan skala magnituda, $M \leq 1,0$ Sr

2.4 Intensitas Gempa Bumi

Intensitas (*Intensity*) gempa bumi adalah skala kekuatan gempa bumi berdasarkan hasil pengamatan efek gempa bumi terhadap manusia, struktur bangunan dan lingkungan pada

tempat tertentu. Intensitas gempa bumi umumnya dinyatakan dengan *Modified Mercalli Intensity* (MMI).

Tabel 2.1 Skala Intensitas MMI (Prasetya, 2006).

Skala MMI	Deskripsi
I	Getaran tidak dirasakan kecuali dalam keadaan luar biasa oleh beberapa orang (biasanya pada orang yang berada di gedung bertingkat).
II	Getaran dirasakan oleh beberapa orang, benda-benda ringan yang digantung bergoyang.
III	Getaran dirasakan nyata didalam rumah, terasa getaran seakan-akan ada truk lewat.
IV	Pada siang hari dirasakan oleh orang banyak dalam rumah, di luar beberapa orang terbangun. Gerabah pecah, pintu bergemerincing, dinding berbunyi karena pecah.
V	Getaran dirasakan oleh hampir semua penduduk, orang banyak terbangun. Gerabah pecah, jendela dsb. Pecah, barang-barang terpelanting, pohon-pohon, tiang-tiang dll, tampak bergoyang. Bandul lonceng dapat berhenti.
VI	Getaran dirasakan oleh semua penduduk, kebanyakan terkejut dan lari keluar, plester dinding jatuh dan cerobong asap dari pabrik rusak. Kerusakan ringan.
VII	Tiap-tiap orang keluar rumah. Kerusakan ringan pada rumah-rumah dan bangunan dengan konstruksi yang baik dan tidak baik, cerobong asap pecah/retak-retak. Terasa oleh orang-orang yang naik kendaraan.
VIII	Kerusakan ringan pada bangunan dengan konstruksi kuat. Retak-retak pada bangunan yang kuat, dinding dapat lepas dari rangka rumah, cerobong asap dari pabrik-pabrik dan monumen-monumen roboh. Air menjadi keruh.
IX	Kerusakan pada bangunan-bangunan yang kuat, rangka-rangka rumah menjadi tidak lurus, banyak retak-retak pada bangunan yang kuat. Rumah tampak agak pindah

	dari pondamennya. Pipa-pipa dalam tanah putus.
X	Bangunan dari kayu yang kuat rusak, rangka-rangka rumah lepas dari pondamennya, tanah terbelah, rel kereta melengkung, tanah longsor di tiap-tiap sungai dan di tanah-tanah yang curam.
XI	Bangunan-bangunan hanya sedikit yang tetap berdiri. Jembatan rusak, terjadi lembah. Pipa dalam tanah tidak dapat dipakai sama sekali, tanah terbelah, rel kereta melengkung sekali.
XII	Hancur sama sekali. Gelombang tampak pada permukaan tanah. Pemandangan menjadi gelap. Benda-benda terlempar ke udara.

2.4 Parameter Gempa Bumi

Seiring dengan bertambahnya tingkat peradaban ilmu, muncul kajian-kajian khusus tentang gempa bumi, dampak yang timbul akibat gempa bumi, deskripsi gempa bumi secara teoritis melalui pemodelan maupun pemanfaatan informasi yang diindikasikan oleh gempa bumi hingga kajian tentang parameter-parameter yang dapat disimpulkan dari penjalaran gelombang-gelombang tersebut. (Garland,1979)

Parameter gempa yang dikenal saat ini ada 4, yaitu:

1. Waktu terjadinya gempa bumi (*origin time*)
2. Lokasi pusat gempa bumi (*episenter*)
3. Kedalaman pusat gempa bumi (*depth*)
4. Kekuatan gempa bumi (*magnitudo*)

Episenter dan kedalaman dari suatu gempa bumi sering disebut sebagai *hiposenter* gempa bumi. (Susilawati,2008)

2.5 Teori Penjalaran Gelombang Seismik

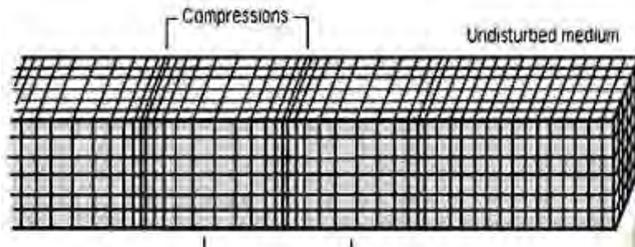
Pada peristiwa gempa bumi, batuan menunjukkan sifatnya sebagai padatan elastik. Padatan elastik ini dapat menjalarkan berbagai fase gelombang sehingga dapat mengakibatkan adanya pergerakan permukaan tanah setelah gempa terjadi. Gelombang gempa bumi merupakan gelombang elastik yang terjadi karena adanya pelepasan energi dari sumber gempa yang dipancarkan ke

segala arah, Perambatan gelombang ini bergantung pada sifat elastisitas batuan yang dilewatinya.

Gelombang seismik ada yang merambat melalui interior bumi disebut sebagai *body wave*, dan ada juga yang merambat melalui permukaan bumi yang disebut *surface wave*. Sumber gelombang seismik ada dua yaitu alami dan buatan. Sumber alami terjadi karena adanya gempa tektonik, gempa vulkanik dan runtuh/ longsoran, sedangkan buatan menggunakan gangguan yang disengaja.

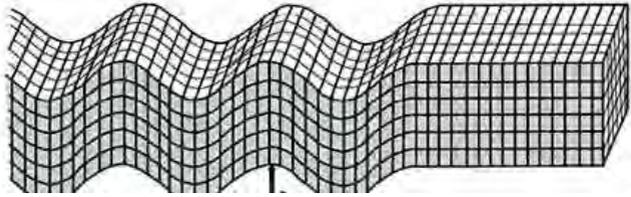
1. Gelombang Badan (*Body Wave*) adalah gelombang yang menjaral dalam media elastik dan arah perambatannya keseluruhan bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjalarannya gelombang dapat dibedakan menjadi gelombang P dan gelombang S :

- a. Gelombang P disebut dengan gelombang kompresi/gelombang longitudinal. Gelombang ini memiliki kecepatan rambat paling besar dibandingkan dengan gelombang seismik yang lain, dapat merambat melalui medium padat, cair dan gas.



Gambar 2. 5 Gelombang P

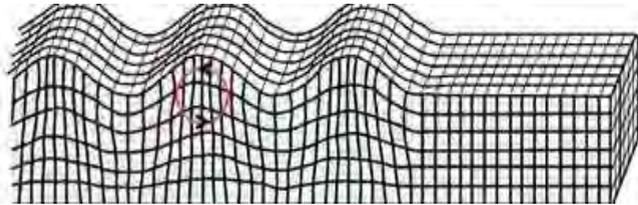
- b. Gelombang S disebut juga gelombang *shear*/gelombang transversal. Gelombang ini memiliki cepat rambat yang lebih lambat bila dibandingkan dengan gelombang P dan hanya dapat merambat pada medium padat saja. Gelombang S tegak lurus terhadap arah rambatnya.



Gambar 2. 6 Gelombang S

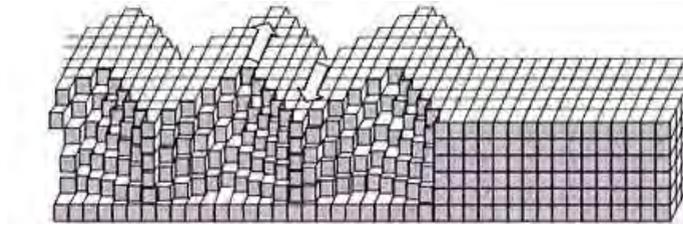
2. Gelombang permukaan merupakan salah satu gelombang seismik selain gelombang badan. Gelombang ini ada pada batas permukaan medium. Berdasarkan pada sifat gerakan partikel media elastik, gelombang permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar, yang menjalar akibat adanya efek *free surface* dimana terdapat perbedaan sifat elastik (Susilawati, 2008). Jenis dari gelombang permukaan ada dua yaitu gelombang Reyleigh dan gelombang Love.

- a. Gelombang Reyleigh merupakan gelombang permukaan yang orbit gerakannya elips tegak lurus dengan permukaan dan arah penjarannya. Gelombang jenis ini adalah gelombang permukaan yang terjadi akibat adanya interferensi antara gelombang tekan dengan gelombang geser secara konstruktif.



Gambar 2.7 Gelombang Rayleigh

- b. Gelombang Love merupakan gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal yang merupakan gelombang S horizontal yang penjarannya paralel dengan permukaannya (Gadallah and Fisher, 2009).



Gambar 2.8 Gelombang Love

Untuk mengamati penjalaran gelombang ditunjukkan dari data seismik yang secara alami merupakan sinyal *nonstationer* yang mempunyai berbagai macam frekuensi dan dalam bentuk waktu. Dekomposisi Waktu - Frekuensi (*Time - Frequency Decomposition*), yang merupakan dekomposisi spektral sinyal seismik untuk mengetahui karakteristik waktu terhadap frekuensi yang menunjukkan respon batuan bawah permukaan (*subsurface rocks*) dan reservoir (Goncalves dan Abry, 1993).

2.6 Struktur Geologi Kekar dan Sesar

Gaya tektonik secara kontinu menekan, menarik, membengkokkan dan mematahkan batuan di litosfer. Sumber energi tektonik berasal dari energi panas yang diubah menjadi energi mekanik oleh konveksi. Aliran konveksi sangat besar, batuan panas dalam mesosfir dan astenosfer perlahan-lahan menyeret dan membengkokkan litosfir secara kontinu yang akhirnya menyebabkan batuan terdeformasi (Magetsari, dkk.)

Batuan yang berbeda akan memiliki sifat yang berbeda terhadap gaya tegasan yang bekerja pada batuan batuan tersebut, Berbeda dengan fluida yang dapat berubah bentuk karena aliran, maka batuan mengalami perubahan bentuk melalui proses deformasi. Deformasi adalah perubahan bentuk benda padat karena proses fisis. Perubahan bentuk ini dapat berupa lipatan (*fold*), retakan (*crack*), dan patahan/sesar (*fault*), dengan demikian kita juga dapat memperkirakan bahwa beberapa batuan ketika terkena gaya tegasan yang sama akan terjadi retakan atau terpatahkan, sedangkan yang lainnya akan terlipat. Deformasi

pada batuan ini biasanya tidak dapat diamati secara langsung karena prosesnya begitu lama dan kejadiannya terdapat di dalam bumi namun suatu deformasi dapat berlangsung dalam waktu yang singkat seperti saat terjadinya gempa bumi di Yogyakarta pada tahun 2006, deformasi tersebut dapat terlihat langsung di permukaan bumi.



Gambar 2.9 Lipatan



Gambar 2.10 Patahan



Gambar 2.11 Deformasi berupa retak pada jalan raya yang diakibatkan oleh gempa bumi di Yogyakarta pada tahun 2006 dengan kekuatan 6,2 skala Richter

Ketika batuan-batuan yang berbeda tersebut berada di area yang sama, seperti batuan yang bersifat lentur menutupi batuan yang bersifat retas, maka batuan yang retas kemungkinan akan terpatahkan dan batuan yang lentur mungkin hanya melengkung atau terlipat di atas bidang patahan. Demikian juga ketika batuan-batuan yang bersifat lentur mengalami retakan di bawah kondisi tekanan yang tinggi, maka batuan tersebut kemungkinan terlipat sampai pada titik tertentu kemudian akan mengalami pensesaran, membentuk suatu patahan.

Kekar atau *joint* adalah rekahan-rekahan lurus planar yang membagi-bagi batuan yang tersingkap menjadi blok-blok dan merupakan bentuk rekahan yang paling sederhana yang dijumpai

pada hampir semua batuan. Kekar pada umumnya terdapat sebagai rekahan tensional dan tidak ada gerak sejajar bidanganya.

Pada lapisan-lapisan sedimen sering terdapat kekar-kekar yang bervariasi arahannya, rekahan ini terbentuk selama penimbunan dan litifikasi yang akan tertutup selama tertimbun di kedalaman. Karena erosi dan tersingkap, sedikit pendinginan dan kompresi relief memungkinkan rekahan agak terbuka. Secara umum dibedakan menjadi empat, yaitu kekar tarik (rekahan yang membuka akibat gaya ekstensi yang berarah tegak lurus terhadap arah rekahan), kekar gerus (biasanya berpasangan dan terdapat pergeseran yang diakibatkan oleh gaya kompresi), kekar *hybrid* (berpenampakan sebagai kekar gerus yang membuka, kombinasi antara kekar gerus dan kekar tarik) dan kekar tarik tak beraturan (arah kekar tak beraturan, sering merupakan akibat *hydraulic fracturing*).

Sedangkan sesar atau *fault* adalah rekahan pada batuan yang mengalami pergerakan sejajar bidanganya. Dalam klasifikasi sesar dipergunakan pergeseran relatif, dikarenakan tidak diketahui sisi sesar yang mana yang bergerak terhadap sisi sesar lainnya. Pergerakan salah satu sisi melalui bidang sesar membuat salah satu blok relatif naik atau turun terhadap lainnya. Blok diatas bidang sesar disebut dengan *hanging wall* sedangkan blok yang dibawah disebut dengan *foot wall*.

Sesar diklsifikasikan berdasarkan atas dip bidang sesar dan arah gerak relatifnya, menjadi sesar normal (*normal fault*), sesar mendatar (*strike-slip*) dan sesar naik (*reverse fault*).

1. Sesar Normal

Hanging wall relatif turun terhadap *foot wall*, bidang sesarnya mempunyai kemiringan yang besar. Sesar ini biasanya disebut juga sesar turun. Umumnya, dua atau lebih sesar normal dengan jurus sejajar dan kemiringan berlawanan akan membentuk segmen tinggian dan amblesan pada kerak. Blok yang turun disebut dengan *graben* atau *rift* dan blok yang turun disebut dengan *horst*.

2. Sesar Mendatar

Sesar mendatar atau sering disebut sesar geser memiliki arah gerak ke arah horizontal. Sesar mendatar ditentukan dengan menghadap bidang sesar, bila bidang di depan bergerak ke kiri disebut mendatar *sinistral* dan sebaliknya sesar mendatar *dekstral*. Sesar ini sering disebut sesar *strike-slip*.

3. Sesar Translasi (Sesar Naik)

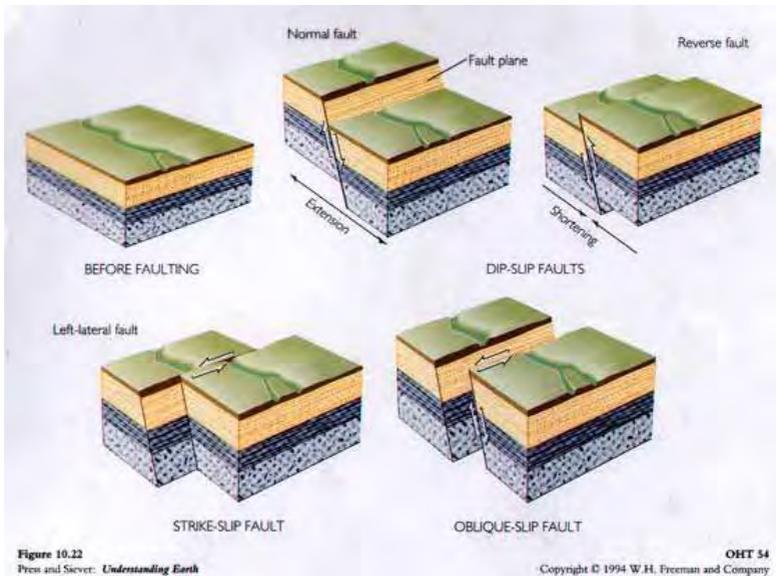
Sesar ini mengalami pergeseran sepanjang garis lurus. Biasanya *hanging wall* relatif naik terhadap *foot wall*, dengan kemiringan bidang sesar besar. Sesar ini biasanya disebut juga sesar naik. Umumnya sesar normal dan sesar naik pergerakannya hanya vertikal, jadi sering disebut sebagai sesar *dip-slip*. Perbedaan *reverse fault* dan *thrust fault* lebih kepada besar sudut kemiringan dari bidang sesarnya. Apabila landai ($<10^{\circ}$) disebut *thrust fault*, sebaliknya disebut *reverse fault*.

4. Sesar *Oblique* (Sesar Diagonal)

Pergerakan dari sesar ini gabungan antara horizontal dan vertikal sehingga membentuk arah diagonal. Gaya-gaya yang bekerja menyebabkan sesar mendatar dan sesar normal.

5. Sesar Gunting

Pergerakan dari sesar ini juga sama dengan sesar *oblique* yaitu horizontal dan vertikal. Sesar yang pergeserannya berhenti pada titik tertentu sepanjang jurus sesar. Gaya yang bekerja sama dengan sesar normal.



Gambar 2. 12 Pengklasifikasikan sesar

2.7 Inversi *Waveform*

Pemodelan merupakan proses estimasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati. Model menyatakan suatu besaran fisis yang bervariasi terhadap posisi. Dengan demikian model dapat dinyatakan oleh parameter model yang terdiri dari parameter fisis dan geometri yang menggambarkan distribusi spasial parameter fisis tersebut. Hubungan antara respons model dengan parameter model dinyatakan oleh persamaan matematis yang diturunkan dari konsep fisika yang mendasari fenomena yang ditinjau.

Menke (1984) mendefinisikan teori inversi sebagai suatu kesatuan teknik atau metode matematika dan statistika untuk memperoleh informasi yang berguna mengenai sistem fisika berdasarkan observasi terhadap sistem tersebut. Sistem fisika yang dimaksud adalah fenomena yang kita tinjau, hasil observasi terhadap sistem adalah data sedangkan informasi yang ingin diperoleh dari data adalah parameter model.

Kesesuaian antara respons model dengan data pengamatan umumnya dinyatakan oleh suatu fungsi obyektif yang harus diminimumkan. Proses pencarian minimum fungsi obyektif tersebut berasosiasi dengan proses pencarian model optimum. Dalam kalkulus jika suatu fungsi mencapai minimum maka turunannya terhadap variabel yang tidak diketahui di titik tersebut adalah nol. Karakter minimum fungsi tersebut digunakan untuk pencarian parameter model. Secara lebih umum, model dimodifikasi sedemikian rupa hingga respon model menjadi fit dengan data. Dalam proses tersebut jelas bahwa pemodelan inversi hanya dapat dilakukan jika hubungan antara data dan parameter model telah diketahui.

Zahrandik dalam Setyowidodo (2011) mengatakan bahwa pemodelan momen tensor didapatkan dari inversi yang memanfaatkan *waveform* ataupun gelombang tiba gelombang P. Momen tensor ini digunakan untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi (Setyowidodo dan Santosa, 2011). Ketika suatu gempa bumi terjadi, gelombang seismik itu disebarkan dari hiposenter yang akan membawa banyak informasi dari mekanisme sumber gempa bumi. Dari gelombang seismik kita dapat menaksir suatu retakan yang mendadak berlangsung sepanjang sesar. Analisa momen tensor seismik pada jarak-jarak lokal, teleseismik dan regional sudah menjadi suatu praktek yang rutin di dalam ilmu gempa. Momen tensor seismik berisi tidak hanya informasi dari suatu ukuran gempa bumi tapi juga informasi suatu keadaan dari tekanan permukaan tektonik dan lokasi suatu zona yang lemah/zona sesar (Suardi, 2006).

Dengan menggunakan inversi momen tensor, proses sumber gempa secara detail dapat didapatkan dari pengamatan data. Momen tensor untuk berbagai jenis gempa bumi dapat di tentukan secara rutin. Juga mencoba dan melakukan *modeling* kesalahan dengan memperlakukan secara hati-hati dan seksama dari data tersebut dapat menghasilkan pengetahuan penting sekitar sumber gempa (Yoshida, 1995).

Karena momen tensor seismik selalu simetris, maka momen tensor dapat dideskripsikan sebagai pasangan ganda pada setiap saat. Juga kita dapat memperlakukan sumber dan proses perambatan sebagai penghubung linear. Sehingga dimungkinkan untuk membangun pengamatan bentuk gelombang dengan menjumlahkan perpindahan berat momen tensor untuk tiap-tiap momen tensor (fungsi konvolusi dari Fungsi Green dan fungsi waktu sumber). Karena hanya untuk pasangan ganda, jumlah komponen-komponen bebas dari momen tensor adalah enam. Kita dapat memilih pasangan ganda, m_1, \dots, m_6 , sebagai dasar momen tensor.

Umumnya, komponen vertikal dari pengamatan bentuk gelombang seismik di stasiun untuk gempa yang biasa dapat di tunjukkan sebagai berikut

$$u_j(t) = \sum_{q=1}^5 \int d\tau \iiint_V G_{jq}(t-\tau, x, y, z) M_q(\tau, x, y, z) dV + e_o, \dots (2.1)$$

dimana V mewakili sumber ruang, G_{jq} adalah Fungsi Green lengkap, M_q adalah momen tensor dan e_o adalah kesalahan pengamatan. Kita menggambarkan proses sumber seismik sebagai titik sumber model.

$$\begin{aligned} u_j(t) &= \sum_{q=1}^5 \int G_{jq}(t-\tau, x_c, y_c, z_c) M_q'(\tau, x_c, y_c, z_c) d\tau + e_o + e_m \\ &= \sum_{q=1}^5 M_q'' \int G_{jq}(t-\tau, x_c, y_c, z_c) T(t) d\tau + e_o + e_m, \dots (2.2) \end{aligned}$$

dimana M_q' dan M_q'' adalah momen tensor pada pusat sumber (x_c, y_c, z_c) , $T(t)$ adalah fungsi sumber waktu, dan e_m adalah kesalahan modeling. Untuk sederhananya, kita asumsikan $e_o + e_m$ menjadi Gaussian dengan nilai tengah nol dan kovarian $\sigma_j^2 \mathbf{I}$. σ_j adalah standar deviasi gelombang P , yang proporsional

dengan amplitudo bentuk gelombang. Kita asumsikan σ_j proporsional terhadap amplitudo maksimum gelombang masing-masing dari bentuk gelombang hasil pengamatan. Rumus pengamatan (2.2) dapat ditulis ulang dalam bentuk vektor:

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{G}(T(t), x_c, y_c, z_c)_j \mathbf{m} + \mathbf{e}_j \dots (2.3)$$

Juga dapat ditulis ulang dalam bentuk vektor sederhana seperti berikut :

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} u_{ud}(t_1) \\ u_{ud}(t_2) \\ \vdots \\ u_{ns}(t_1) \\ \vdots \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{ud}^{m_1}(t_1) & G_{ud}^{m_2}(t_1) & \dots & G_{ud}^{m_5}(t_1) \\ G_{ud}^{m_1}(t_2) & G_{ud}^{m_2}(t_2) & \dots & G_{ud}^{m_5}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{ns}^{m_1}(t_1) & \vdots & \vdots & G_{ns}^{m_5}(t_1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix}, \mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \end{bmatrix},$$

dan dimana secara berturut-turut \mathbf{d} dan \mathbf{e} adalah N-dimensi data dan vektor kesalahan, \mathbf{m} adalah *vector parameter* model 6-dimensi, \mathbf{G} adalah $N \times 6$ koefisien matriks. Penyelesaian persamaan matriks di atas diperoleh dengan menggunakan pendekatan *least square*, jika bentuk gelombang pengamatan (\mathbf{d}) dan konvolusi fungsi Green dengan fungsi waktu dari sumber (\mathbf{G}) telah diketahui. Kita menentukan kedalaman hiposentral dan durasi dan bentuk fungsi waktu sumber dengan metode grid

karena ini diperlukan untuk inversi momen tensor. Kita konversikan proses sumber dari bidang patahan ke momen tensor dengan menggunakan persamaan sederhana berikut :

$$M_{xx} = -M_o (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi + \sin 2\delta \sin \lambda \sin^2 \phi) \dots (2.4)$$

$$M_{xy} = M_{yx} = M_o (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi + \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \lambda \sin 2\phi) \dots (2.5)$$

$$M_{xz} = M_{zx} = -M_o (\cos \delta \cos \lambda \cos \phi + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \phi) \dots (2.6)$$

$$M_{yy} = M_o (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi - \sin 2\delta \sin \lambda \cos^2 \phi) \dots (2.7)$$

$$M_{yz} = M_{zy} = -M_o (\cos \delta \cos \lambda \sin \phi - \cos 2\delta \sin \lambda \cos \phi) \dots (2.8)$$

$$M_{zz} = M_o \sin 2\delta \sin \lambda \dots (2.9)$$

dimana adalah ϕ strike, δ dip, λ slip (x: utara, y: timur, z: arah kebawah).

Jika kita asumsikan kecepatan gelombang P dan S dekat dengan area sumber gempa, kita dapat menentukan kedalaman hiposentral menggunakan *pick* pP dan sP . Informasi mekanisme patahan terkandung dalam bentuk radiasi. Jika kita sederhanakan penjelasan tentang inversi momen tensor, kita dapat memperkirakan komponen momen tensor (atau *focal mechanism*) untuk menyesuaikan amplitudo dari pengamatn bentuk gelombang dan amplitudo bentuk pola radiasi. Untuk memperoleh solusi momen tensor, kita asumsikan segitiga sederhana fungsi waktu sumber, dan memvariasikan durasi waktu sumber dan kedalaman pusat gempa.

Untuk memperoleh momen seismik dan *focal mechanism* gempa bumi dari komponen momen tensor, kita menggunakan

metode transformasi untuk mengkonversi momen tensor pada dua bidang patahan. Jika memiliki vektor Eigen (\mathbf{t} , \mathbf{b} , \mathbf{p}) dari momen tensor,

$$\begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{xy} & M_{zz} \end{pmatrix} (\mathbf{t} \ \mathbf{b} \ \mathbf{p}) = (\mathbf{t} \ \mathbf{b} \ \mathbf{p}) \begin{pmatrix} M_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_o \end{pmatrix}$$

Kita dapat memperoleh vektor patahan (\mathbf{n} : unit normal vektor pada bidang patahan, \mathbf{d} : unit vektor slip) dari persamaan Model bidang patahan satu :

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{t} + \mathbf{p}), \mathbf{d} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{t} - \mathbf{p}) \dots (2.10)$$

Model bidang patahan lainnya,

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{t} - \mathbf{p}), \mathbf{d} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{t} + \mathbf{p}) \dots (2.11)$$

Persamaan-persamaan ini menunjukkan bahwa kita tidak dapat mendeteksi bidang patahan dari momen tensor. Kita dapat menentukan parameter patahan dari vektor patahan dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$\phi = \arctan\left(-\frac{n_1}{n_2}\right) \dots (2.12)$$

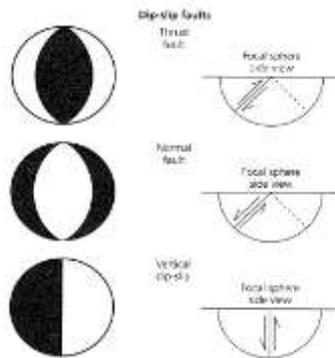
$$\delta = \arccos(-n_3) \dots (2.13)$$

$$\lambda = \arcsin\left(-\frac{d_3}{\sin \delta}\right) \dots (2.14)$$

Untuk memperoleh penyelesaian momen tensor dari bentuk gelombang tubuh (*P wave*), kita asumsikan segitiga sederhana fungsi waktu sumber dan lima komponen-komponen dasar momen tensor (Kikuchi dan Kanamori, 1991), dan

memvariasikan durasi waktu sumber gempa dan kedalaman pusat gempa. Fungsi Green dihitung dengan metode Kikuchi dan Kanamori (1991),

Momen tensor yang jika ditransformasikan ke dalam sistem koordinat memiliki arah vektor utara, barat dan mengarah keluar. Arah gerakan sesar dibagi menjadi dua berdasarkan arahnya, arah horizontal dan arah vertikal. Hubungan sesar dengan bentuk *beach ball* untuk arah vertikal dapat dilihat dalam gambar berikut,



Gambar 2.13 Bentuk gerakan dari sesar dengan arah dasar vertikal (Stein dan Wysession, 2003).

2.8 Fungsi Green

Fungsi Green secara umum adalah penggabungan dari fungsi respon, efek proses perambatan dengan unit impulsive dan/atau gaya. Penggunaan fungsi Green secara akurat sangat penting agar diperoleh solusi-solusi yang sesuai, karena fungsi Green sensitif terhadap mekanisme sumber dan kedalaman di dalam proses menganalisis sumber pecahan.

Berdasarkan persamaan dari suku Fungsi Green,

$$u(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x') f(x') dx' \dots (2.15)$$

Maka komponen rekaman seismik dari sebuah sumber titik dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$U_k(x, t) = \sum_{i=1}^6 G_{ki}(x, x_s, t) * f_i(t) \dots (2.16)$$

Dengan U_k adalah displacement pada stasiun ke- k dalam seismogram, x adalah posisi *receiver*, x_s adalah posisi sumber gempa dan G_{ki} adalah Fungsi Green, bergantung pada sifat elastik dan anelastik dari bumi. Dan tanda bintang menunjukkan konvolusi. Sedangkan $f_i(t)$ menyatakan enam komponen momen tensor dasar yang independen. Dalam koordinat kartesian, keenam momen tensor tersebut adalah,

$$\begin{aligned} f_1 = M_{11}, f_2 = M_{22}, f_3 = M_{33}, f_4 = M_{12} = M_{21}, f_5 = M_{13} \\ = M_{31}, f_6 = M_{23} = M_{32} \dots (2.17) \end{aligned}$$

Transformasi Fourier dari persamaan dapat ditulis sebagai berikut,

$$U_k(x, \omega) = \sum_{i=1}^6 G_{ki}(x, x_s, \omega) * f_i(\omega) \dots (2.18)$$

Konsep momen tensor dapat memberi deskripsi yang lengkap tentang gaya dari sumber titik seismik. Pada umumnya momen tensor memiliki enam komponen momen tensor dasar yang independen simetris. Jika $G_{ki}(x, x_s, t)$ adalah fungsi Green yang juga melambangkan seismogram sintetis pada stasiun ke- k dan tensor dasar ke- i , M_i . Seismogram yang teramati dilambangkan $U_k(x, t)$, maka estimasi terbaik dari koefisien a_i untuk M_i dapat dicari dengan,

$$\begin{aligned} \Delta = \sum_{k=1}^{Nr} \int \left[U_k(x, t) - \sum_{i=1}^6 a_i G_{ki}(x, x_s, t) \right]^2 dt \dots (2.19) \\ \Delta = R_x - 2 \sum_{i=1}^6 a_i G_i + \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 R_{nm} a_n a_m = \text{minimum} \end{aligned}$$

Dimana Nr adalah jumlah stasiun yang digunakan,

$$R_x = \sum_k \int [U_k(x, t)]^2 dt \dots (2.20)$$

$$R_{nm}(x) = \sum_k \int [G_{ki}(x, x_s, t) G_{km}(x, x_s, t)] dt \dots (2.21)$$

$$G_i(x, x_s) = \sum_k \int [G_{ki}(x, x_s, t) U_k(t)] dt \dots (2.22)$$

Dengan

$$\frac{\partial \Delta}{\partial a_n} = 0, \text{ untuk } k = 1 \text{ sampai } 6$$

Kemudian dicari persamaan sebagai berikut,

$$\sum_{m=1}^6 R_{nm} a_m = G_i, \text{ dimana } i = 1, 2, \dots, 6 \dots (2.23)$$

Invers dari matriks $[R_{nm}]$ adalah $[R^I_{nm}]$, sehingga

$$\sum_{m=1}^6 R_{nm} R^I_{nm} = \delta_{nm}, \text{ dimana } n, m$$

$= 1, 2, \dots, 6$ dan δ_{nm} adalah delta kronecker.

Maka diperoleh solusi,

$$a_i = a_i^0 = \sum_m R^I_{nm} G_m$$

Sehingga diperoleh kesalahan residu,

$$\Delta = R_x - \sum_i G_i a_i^0$$

Pada tingkatan ini a_i^0 dan juga Δ merupakan fungsi dari parameter x dan x_s optimum ditentukan dari Δ minimum atau

$$\psi_M(x, x_s) = \frac{\sum_i G_i a_i^0}{R_x} = \frac{\sum_i \sum_m R^I_{im} G_i a_i^0}{R_x} = \text{minimum}$$

ψ_M adalah korelasi antara bentuk gelombang sintetik dan hasil observasi. Faktor normalisasi R_x dimunculkan sedemikian sehingga $\psi_M=1$.

2.9 Perhitungan Slip

Pada gempa lokal yang magnituda berada pada kisaran 3 SR sampai 6.5 SR dapat menggunakan persamaan,

$$\log M_0 = 1.5M_L + 16 \dots (2.24)$$

Dengan M_L menyatakan besar magnituda gempa lokal. Sedangkan menurut Aki (1996) dalam Leonard (2010) besar momen seismik dapat ditentukan menggunakan persamaan,

$$M_0 = \mu \bar{D} L W \dots (2.25)$$

Konstanta μ menyatakan koefisien rigiditas dari batuan lapisan, \bar{D} adalah besar *average slip* dari sesar, L adalah panjang dari sesar dan W menyatakan besar lebar dari sesar. Leonard (2010) pun menyatakan bahwa untuk menentukan besar momen seismik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan,

$$\log M_0 = \frac{5}{2} \log L + \frac{3}{2} \log C_1 + \log C_2 \mu \dots (2.26)$$

Dengan C_1 dan C_2 adalah konstanta dengan nilai masing-masing adalah 17.5 dan 3.9×10^{-5} . Dari persamaan 2.26 dapat dicari L dengan mensubsitusi M_0 dari persamaan 2.24. Untuk mendapatkan besar W , Leonard (2010) juga mengusulkan bahwa untuk mendapatkannya menggunakan persamaan,

$$W = C_1 L^\beta \text{ dengan } \beta \approx 2/3 \dots (2.27)$$

2.10 Program ISOLA-GUI

Program ISOLA-GUI merupakan program yang menggunakan *tool* Matlab dan bertujuan untuk mempermudah menghitung dengan Fortran dengan cepat seperti persiapan data, perhitungan Fungsi Green dan proses inversi serta hasil dalam bentuk gambar grafis dari *focal mechanism* (Sokos dan Zahrandik, 2008)

Sokos (2009) menjelaskan bahwa Program ISOLA berdasarkan pada representasi *multiple point - source* dan metode iterasi dekonvolusi seperti yang digunakan oleh Kikuchi dan Kanamori (1991) untuk data gempa teleseismik. Dan untuk menghitung Fungsi Green menggunakan metode *discrete wavenumber* oleh Bouchon. Metode ini baik digunakan untuk gempa lokal dan regional. Inversi yang digunakan dalam program

ini adalah inversi linier dengan d merupakan data dan m adalah parameter yang dicari.

$$d = Gm \dots (2.28)$$

yang dapat diselesaikan dengan metode *least-square*

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d \dots (2.29)$$

ISOLA-GUI digunakan untuk menjelaskan *focal mechanism* dari momen tensor gempa. Dari proses inversi dapat diketahui besar nilai eigen dan vektor eigennya. vektor eigen memberikan nilai *strike*, *dip*, dan *rake* (*slip*). Nilai eigen memberikan besar momen skalar M_0 . Untuk mendapatkan hasil yang bagus, maka dilakukan *fitting* kurva *displacement* untuk data sintetik dengan data lapangan. Dimisalkan, d adalah data lapangan dan s adalah data sintetik. Kecocokan (*fit*) diantara kedua data diukur dengan *variance reduction* (*varred*) dengan persamaan,

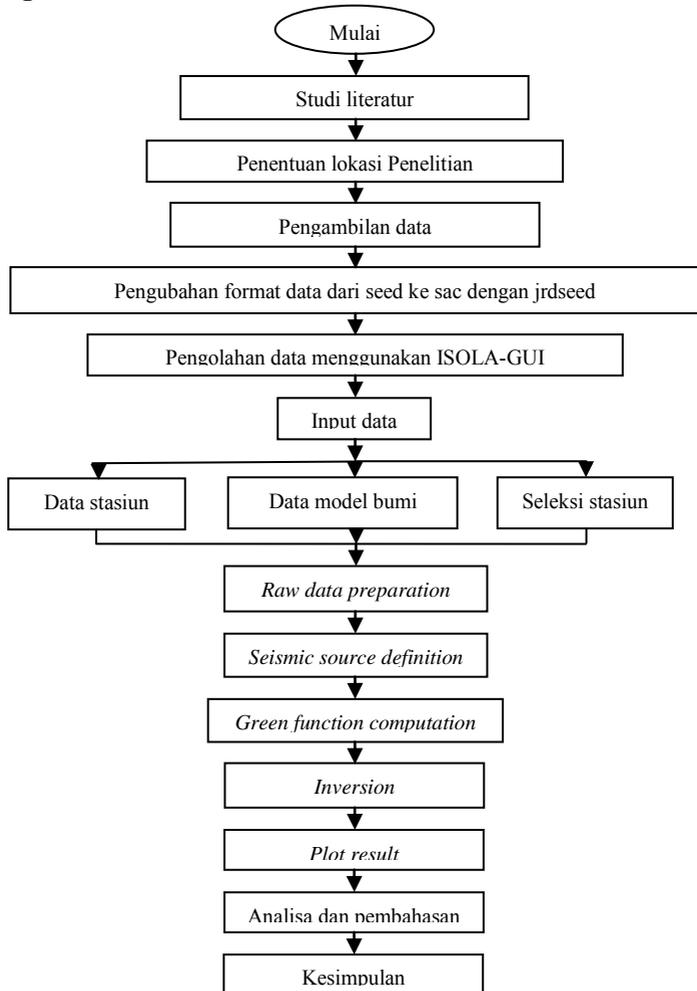
$$varred = 1 - \frac{|d - s|^2}{d^2} \dots (2.30)$$

Nilai 1 menunjukkan kurva data sintetik berimpit dengan kurva data observasi, apa bila kurang dari satu, maka terjadi perbedaan pada kurvanya sehingga akan menghasilkan ketidakcocokan perhitungan antara besar *event* yang ada dengan hasil pengolahan. Ketidakcocokan ini dipengaruhi oleh penentuan jumlah *subevent* yang akan menghasilkan residual data yang berpengaruh pada nilai *varred*. Selain, jumlah *subevent*, proses *filtering* berpengaruh pada perioda yang akan digunakan oleh program ISOLA-GUI dari data seismogram dalam proses perhitungan inversi (Sokos dan Zahrandik, 2009)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Studi Literatur dan Persiapan

Pada tahap Studi literatur dan persiapan ini dilakukan pengidentifikasian masalah dan pengumpulan literatur untuk mendapatkan pengetahuan yang akan mendukung penelitian seperti kondisi geologi wilayah selatan Pulau Sumatera, teori-teori mengenai *focal mechanism* yang akan digunakan dalam penentuan pola bidang sesar melalui momen tensor serta perhitungan terkait *slip* dari sesar.

3.3 Penentuan Lokasi Penelitian

Lokasi dalam penelitian ini adalah wilayah selatan Pulau Sumatera, Indonesia yang secara administrasi terbagi ke dalam tiga Provinsi yaitu, Sumatera Selatan, Bengkulu serta Bandar Lampung.

3.3.1 Sumatera Selatan

Wilayah Sumatera Selatan berada pada garis 1° lintang selatan sampai 4° lintang selatan serta 102° BT sampai 106° bujur timur, dengan luas daerah sebesar $87.017.41 \text{ km}^2$ dengan pusat pemerintahan di Palembang.



Gambar 3.2 Peta Provinsi Sumatera Selatan

3.3.2 Bengkulu



Gambar 3.3 Peta Provinsi Bengkulu

Provinsi yang beribukota di Kota Bengkulu ini berada pada $5^{\circ} 40' - 2^{\circ} 0'$ Lintang Selatan dan $100^{\circ} 40' - 104^{\circ} 0'$ Bujur Timur. Provinsi Bengkulu memiliki luas total sebesar $19.788,70 \text{ km}^2$ ($7.640,46 \text{ mil}$), total populasi penduduk $1.972.196$ dan kepadatan $100/\text{km}^2$.

3.3.3 Bandar Lampung

Bandar Lampung adalah Provinsi paling selatan di Pulau Sumatera, di sebelah utara berbatasan dengan Provinsi Bengkulu dan Provinsi Sumatera Selatan. Secara geografis Bandar Lampung terletak pada kedudukan : Timur – Barat antara $103^{\circ} 40' - 105^{\circ} 50'$ Bujur Timur, sedangkan pada kedudukan : Utara – Selatan berada antara $6^{\circ} 45' - 3^{\circ} 45'$ Lintang Selatan dengan luas wilayah sebesar 35.376 km^2 (13.659 mil).



Gambar 3.4 Peta Provinsi Bandar Lampung

3.4 Pengambilan Data

Sumber data yang berupa data gempa yang terjadi di selatan pulau Sumatera didapatkan dari *website* GFZ (*GeoForschungsZentrum*) www.webdc.eu. Data yang digunakan adalah data *event* gempa yang terjadi di wilayah selatan Pulau Sumatera selama tahun 2011-2014 dengan besar magnituda lebih dari sama dengan 5.5 SR.

3.5 Pengubahan Format Data dari Seed Ke Sac dengan Jrdseed

Data dari GFZ dalam format *seed* yang dirubah ke dalam format *SAC* untuk diolah pada program ISOLA-GUI. Untuk merubah format dari *seed* ke *SAC* menggunakan program *rdseed*.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe - java -jar islandVer0301.jar
Cleaning List (All) :
Cleaning List (All) :
Loc. Ids COLL 1 (For spaces) :
Mixing GE_BBN1..BNE, 14611 samples (Binary), starting 2010.324 21:23:52.2190 UT
Mixing GE_BBN1..BNC, 14672 samples (Binary), starting 2010.324 21:24:01.8190 UT
Mixing GE_BBN1..BND, 14623 samples (Binary), starting 2010.324 21:23:53.7690 UT
Mixing GE_BBN1..BNE, 14679 samples (Binary), starting 2010.324 21:24:02.2690 UT
Mixing GE_BBN1..BNC, 14910 samples (Binary), starting 2010.324 21:24:12.4190 UT
Mixing GE_BBN1..BND, 14670 samples (Binary), starting 2010.324 21:24:31.4190 UT
Mixing GE_PMB1..BNE, 14842 samples (Binary), starting 2010.324 21:22:42.3190 UT
Mixing GE_PMB1..BNC, 14458 samples (Binary), starting 2010.324 21:22:54.9190 UT
Mixing GE_PMB1..BND, 14688 samples (Binary), starting 2010.324 21:22:47.4190 UT
Mixing GE_PMB1..BNE, 14824 samples (Binary), starting 2010.324 21:23:12.3190 UT
Mixing GE_PMB1..BNC, 14491 samples (Binary), starting 2010.324 21:23:20.7690 UT
Mixing GE_PMB1..BND, 14572 samples (Binary), starting 2010.324 21:23:22.9190 UT
Output File (data\output\ or "Out" in Path) :
  
```

Gambar 3.5 Proses konversi data dari format *seed* ke SAC



Gambar 3.6 Tampilan awal program ISOLA-GUI.

3.6 Pengolahan Data Menggunakan ISOLA-GUI

Dalam Menginput data ke dalam Program ISOLA-GUI terdapat tiga jenis data yang diinput yaitu :

1. *SAC Import*

Data yang didapatkan dari dari GFZ yang telah diubah ke dalam format SAC diimport untuk diolah dalam program ISOLA-GUI.



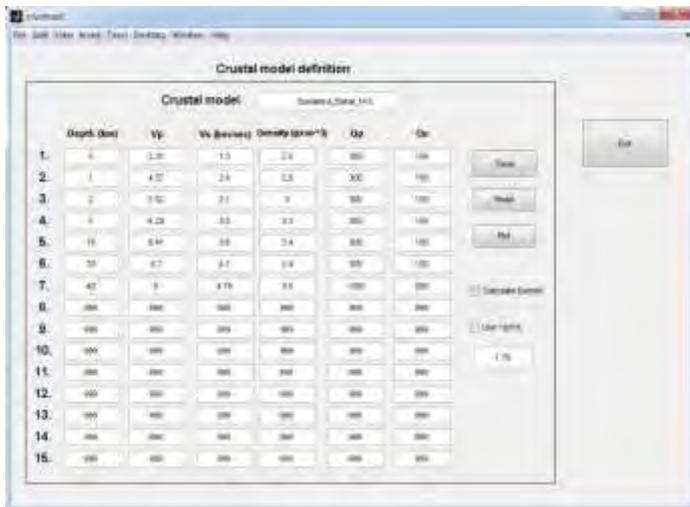
Gambar 3.7 SAC *import* dalam program ISOLA-GUI

2. Data Model Bumi

Dalam penelitian di wilayah selatan Pulau Sumatera ini menggunakan model bumi Haslinger-Santosa.

Tabel 3.1 Model Bumi Haslinger-Santosa (H-S).

No	V_p (km/s)	Kedalaman (km)	V_s (km/s)	Massa Jenis (g/cm ³)	Q_p	Q_s
1	2.31	0.0	1.300	2.500	300	150
2	4.27	1.0	2.400	2.900	300	150
3	5.52	2.0	3.100	3.000	300	150
4	6.23	5.0	3.500	3.300	300	150
5	6.41	16.0	3.600	3.400	300	150
6	6.70	33.0	4.700	3.400	300	150
7	8.00	40.0	4.760	3.500	1000	500



Gambar 3.8 Tampilan model bumi H-S dalam ISOLA-GUI

3. *Event Info*

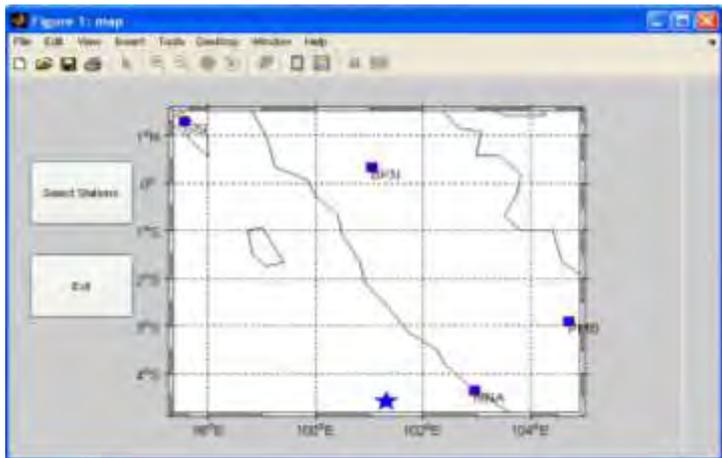
Pada tahap ini, data mengenai informasi-informasi gempa bumi yang terjadi di wilayah selatan Pulau Sumatera dimasukkan ke dalam program untuk diolah, informasi gempa tersebut seperti waktu terjadinya gempa bumi meliputi tanggal, bulan, tahun, jam, menit dan detik kemudian besar magnituda gempa, posisi garis lintang, bujur serta kedalaman gempa yang terjadi.



Gambar 3.9 *Input* identitas gempa

4. *Station Selection*

Setelah informasi mengenai *event* gempa bumi telah dimasukkan ke dalam program ISOLA-GUI, dilakukan pemilihan stasiun-stasiun gempa yang akan diolah. Dalam penelitian ini menggunakan empat stasiun gempa, posisi stasiun yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.10.

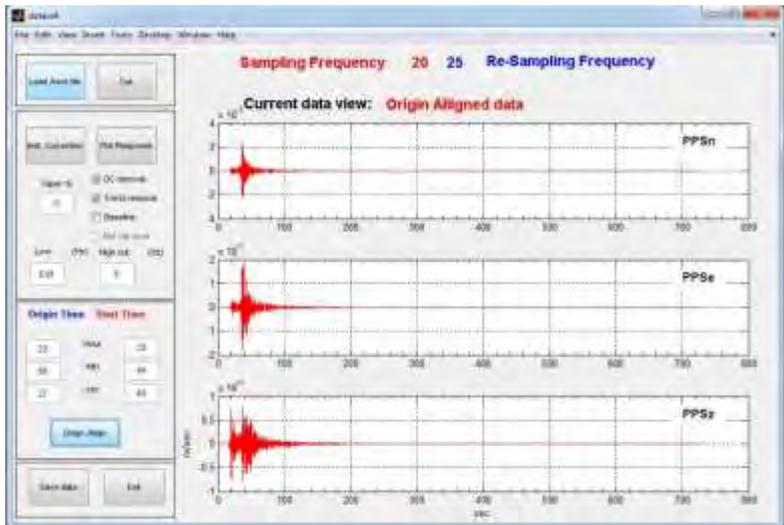


Gambar 3.10 lokasi stasiun yang digunakan dalam penelitian

Setelah menginput tiga jenis data ke dalam program ISOLA-GUI dan menentukan stasiun-stasiun gempa yang digunakan tahapan-tahapan selanjutnya adalah :

1. *Raw Data Preparation*

Pada tahapan awal memasukan data melalui SAC *import* maka data SAC akan tersimpan dalam bentuk data ASCII dalam ekstensi *.dat*. Pada tahapan *raw data preparation* ini data dikoreksi dari setiap seismograf dan disetarakan waktu *origin time* tiap gelombang gempa bumi tersebut.



Gambar 3.11 *Instrumental correction* dari data gempa serta penyetaraan *origin time*.

2. Seismic Source Definition

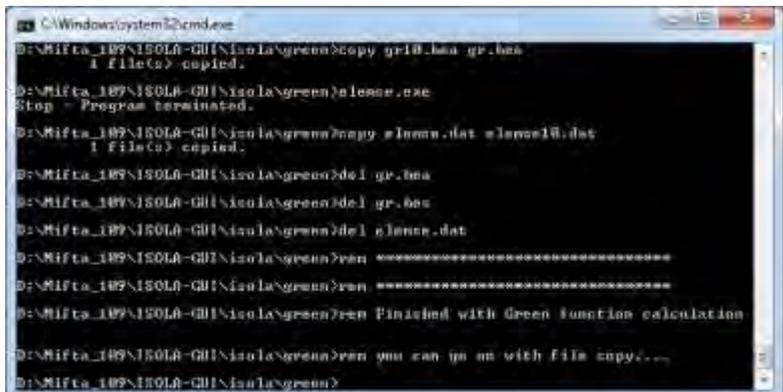
Program ini berdasarkan pada *multiple point source* (Sokos dan Zahrandik, 2009) sehingga diperlukan jumlah sumber gempa dugaan yang terjadi, tahap ini merupakan tahapan terakhir dalam persiapan data sebelum diinversi.



Gambar 3.12 Penentuan *multiple point source*

3. Green Function Computation

Pada tahap ini dilakukan perhitungan Fungsi Green yang selanjutnya digunakan dalam proses inversi,



Gambar 3.13 Proses perhitungan Fungsi Green

4. Inversion

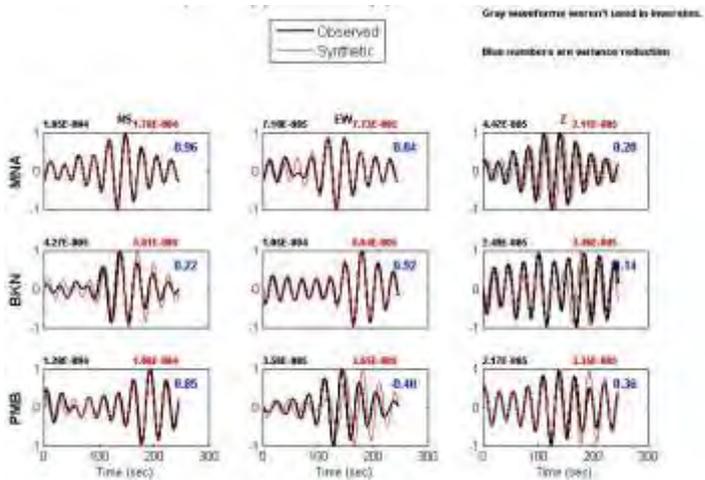
Proses inversi ini dilakukan untuk mendapatkan hasil mengenai kurva *displacement* antara data sintetik, dari model yang ada dengan data hasil observasi. Oleh karena itu, dilakukan proses *filtering* untuk mendapatkan hasil yang bagus dalam *fitting* kurva. Tidak hanya itu saja, dalam proses inversi ini juga untuk mendapatkan besar momen tensor dari analisis mengenai *waveform*.



Gambar 3.14 Penentuan proses inversi

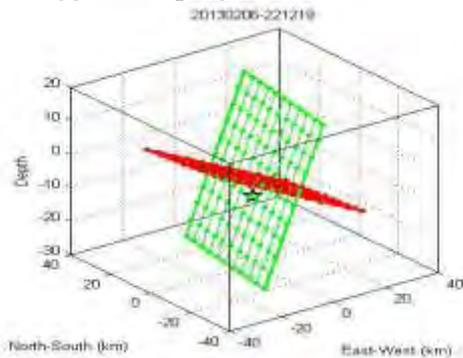
5. Plot Results

Setelah dilakukan inversi, maka didapatkan hasil mengenai momen tensor dan *focal mechanism* berupa gambar mengenai *beach ball* dan kurva *displacement*. Dalam gambar ini menjelaskan mengenai arah gerakan dari patahan yang terjadi di gempa wilayah selatan Pulau Sumatera.



Gambar 3.15 *Fitting* kurva *displacement* antara data sintetik dengan data observasi.

Setelah mendapatkan solusi momen tensor, digambarkan bidang patahan dan *auxiliary plane* dari momen tensor gempa yang terjadi menggunakan program *hcplot*.



Gambar 3.16 *Plotting* bidang patahan dan *auxiliary plane* gempa

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Data Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan enam *event* gempa bumi yang terjadi di wilayah selatan Pulau Sumatera,

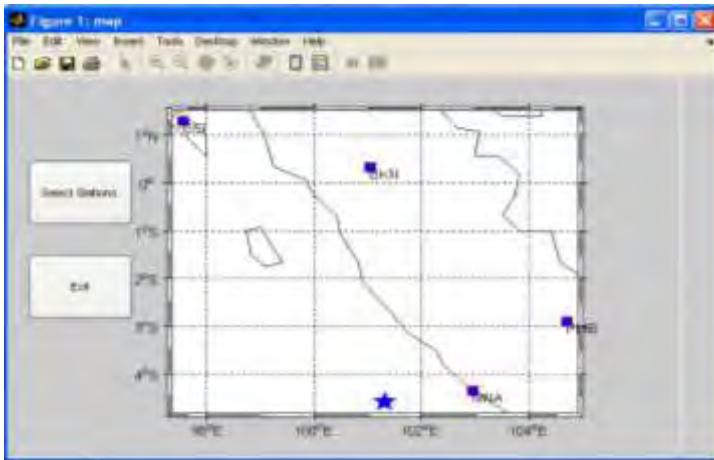
Tabel 4.1 Data *event* gempa yang terjadi di wilayah selatan Pulau Sumatera

No	Tanggal	Jam	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Mag</i>	<i>depth</i>
1	2011-01-02	15:19:32	-4.60	101.32	5.6	33
2	2012-09-14	04:51:49	-3.32	100.64	6.1	33
3	2013-07-06	05:05:07	-3.32	100.52	6.0	29
4	2014-04-03	09:30:23	-5.37	102.16	5.6	39
5	2011-10-30	11:52:29	-3.31	101.33	5.5	51
6	2011-01-17	19:20:57	-5.19	102.54	6.2	41

Dan stasiun yang digunakan dalam penelitian ini adalah

Tabel 4.2 Nama Stasiun yang digunakan di dalam penelitian

No	Nama	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
1	PMBI	-2.90	104.70
2	GSI	1.30	97.58
3	BKNI	-0.33	101.04
4	MNAI	-4.36	102.96



Gambar 4.1. Lokasi Stasiun (*Geofon*, 2014)

4.1.2 Hasil Perhitungan

4.1.2.a Hasil Momen Tensor

Dari hasil pengolahan menggunakan program ISOLA-GUI didapatkan besar momen tensor untuk masing-masing *event* sebagai berikut (tanda negatif menunjukkan arah yang berlawanan),

Tabel 4.3 Momen tensor untuk gempa di wilayah selatan Pulau Sumatera

<i>Event</i>	$M_{rr}=M_{33}$	$M_{tt}=M_{11}$	$M_{pp}=M_{22}$	$M_{rt}=M_{31}$	$M_{rp}=M_{32}$	$M_{tp}=M_{12}$	Exp
2011-01-02	5.920	-4.181	-1.739	4.274	-1.138	-0.0496	17
2012-09-14	0.095	0.007	-0.102	5.174	-4.113	0.166	18
2013-07-06	0.131	0.205	-0.337	2.586	-1.252	0.430	18
2014-04-03	3.519	-1.670	-1.849	1.332	-2.187	0.279	17
2011-10-30	9.176	-4.336	-4.810	3.762	-0.536	2.292	16
2011-01-17	0.964	2.531	-3.495	0.544	-1.107	-1.140	15

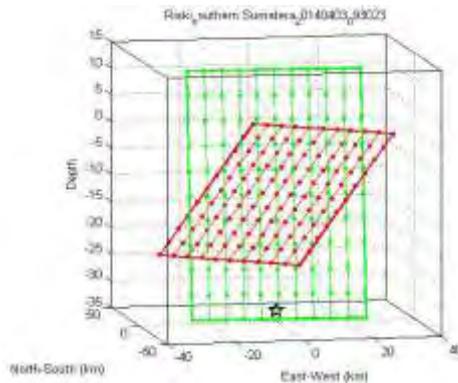
4.1.2.b Hasil *Focal Mechanism*

Pada saat gempa terjadi, ada dua bidang yang menjadi acuan dalam penentuan momen tensor yaitu *auxiliary plane* serta bidang patahan (*fault plane*) yang saling tegak lurus (Stein dan Wysession, 2003).

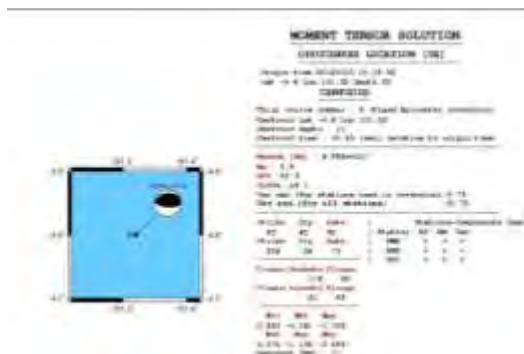
Tabel 4.4 Bidang sesar dan *auxiliary plane* untuk masing-masing *event*

Event	Plane I			Plane II		
	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake
2011-01-02	95	65	98	256	26	73
2012-09-14	128	89	89	218	1	0
2013-07-06	15	10	169	116	88	81
2014-04-03	148	66	91	325	24	88
2011-10-30	124	56	78	325	35	107
2011-01-17	148	84	24	55	67	173

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 02/01/2011 pada pukul 15:19:32 WIB menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah *reverse fault* dengan karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 95, *dip* = 65 dan *rake* = 98 dan bidang kedua (merah) besar *strike* = 256, *dip* = 26 dan *rake* = 73. Dari plot HC didapatkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang pertama sebesar 9.30 km sedangkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang kedua sebesar 19.78 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak antara titik *centroid*-nya dengan jarak hiposenter sebesar 22.0 km.



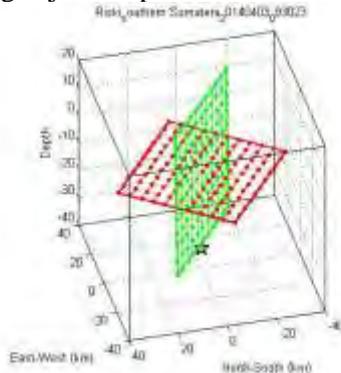
Gambar 4.2 Orientasi bidang patahan pada gempa bumi yang terjadi tanggal 02/01/2011 pukul 15:19:32



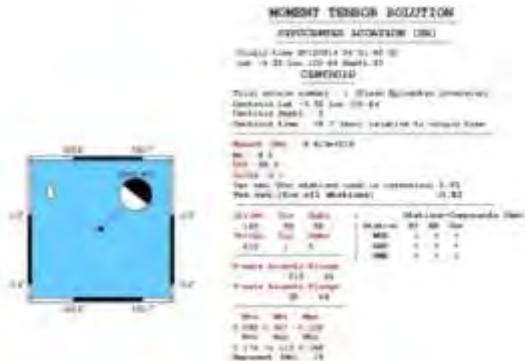
Gambar 4.3 Bentuk *beach ball* dari pola bidang sesar pada gempa yang terjadi tanggal 02/01/2011 pukul 15:19:32

Pada gempa bumi yang terjadi pada tanggal 14/09/2012 pada pukul 04:51:49 WIB menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah *strike slip* dengan karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 128, *dip* = 89 dan *rake* = 89 dan bidang kedua (merah) besar *strike* = 218, *dip* = 1 dan *rake* = 0. Dari plot HC didapatkan jarak antara hiposenter gempa dengan

bidang pertama sebesar 3.04 km sedangkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang kedua sebesar 28.00 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak antara titik *centroid*-nya dengan jarak hiposenter sebesar 28.00 km.

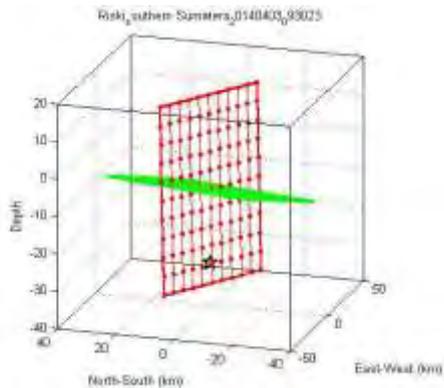


Gambar 4. 4 Orientasi bidang patahan pada gempa bumi tanggal 14/09/2012 pukul 04:51:49

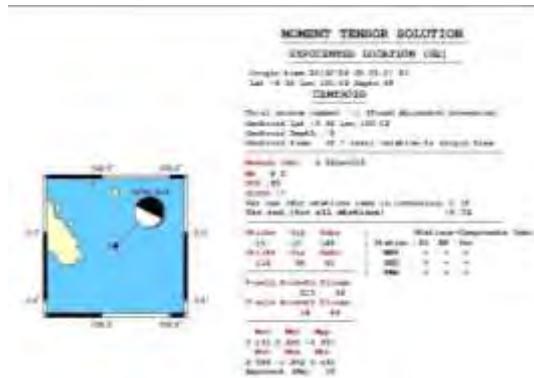


Gambar 4.5 Bentuk *beach ball* dari pola bidang sesar pada gempa yang terjadi tanggal 14/00/2012 pukul 04:51:49

Pada gempa bumi yang terjadi pada tanggal 06/07/2013 pada pukul 05:05:07 WIB menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah *dip slip* dengan karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 15, *dip* = 10 dan *rake* = 169 dan bidang kedua (merah) besar *strike* = 116, *dip* = 88 dan *rake* = 81. Dari plot HC didapatkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang pertama sebesar 19.76 km sedangkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang kedua sebesar 0.70 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak antara titik *centroid*-nya dengan jarak hiposenter sebesar 20.00 km.

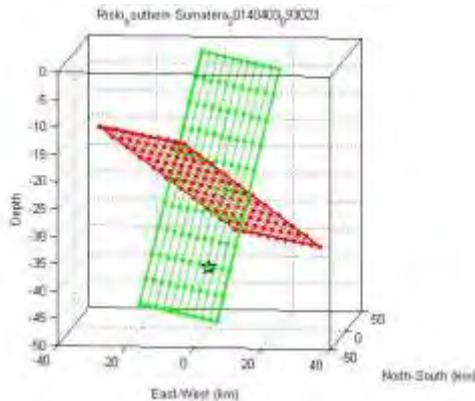


Gambar 4. 6 Orientasi bidang patahan pada gempa bumi tanggal 06/07/2013 pukul 05:05:07

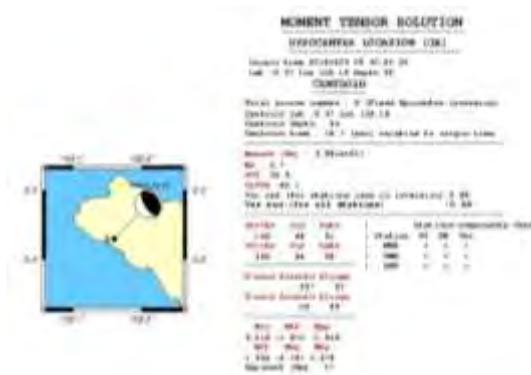


Gambar 4.7 Bentuk *beach ball* dari pola bidang sesar pada gempa yang terjadi tanggal 06/07/2013 pukul 05:05:07

Pada gempa bumi yang terjadi pada tanggal 03/04/2014 pada pukul 09:30:23 WIB menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah *reverse fault* dengan karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 148, *dip* = 66 dan *rake* = 91 dan bidang kedua (merah) besar *strike* = 325, *dip* = 24 dan *rake* = 88. Dari plot HC didapatkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang pertama sebesar 6.24 km sedangkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang kedua sebesar 13.75 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak antara titik *centroid*-nya dengan jarak hiposenter sebesar 15.00 km.



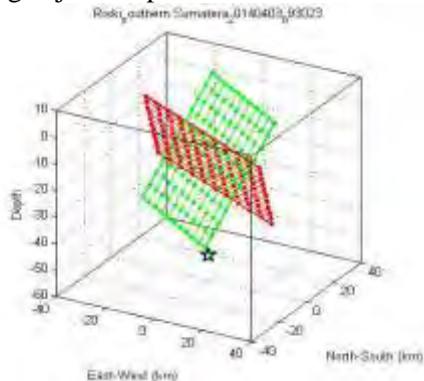
Gambar 4. 8 Orientasi bidang patahan pada gempa bumi tanggal 03/04/2014 pukul 09:30:23



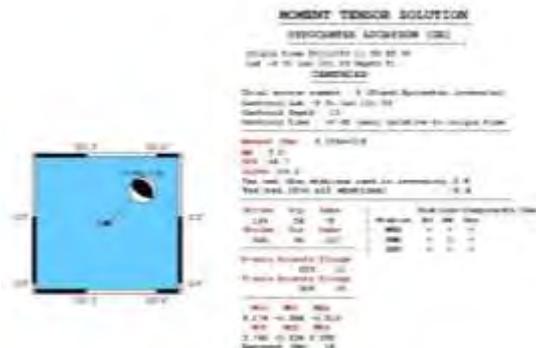
Gambar 4.9 Bentuk *beach ball* dari pola bidang gesar pada gempa yang terjadi tanggal 03/04/2014 pukul 09:30:23

Pada gempa bumi yang terjadi pada tanggal 30/10/2011 pada pukul 11:52:29 WIB menunjukkan bahwa pola bidang gesar yang terbentuk adalah *reverse fault* dengan karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 124, *dip* = 56 dan *rake* = 78

dan bidang kedua (merah) besar $strike = 325$, $dip = 35$ dan $rake = 107$. Dari plot HC didapatkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang pertama sebesar 20.71 km sedangkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang kedua sebesar 29.50 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak antara titik *centroid*-nya dengan jarak hiposenter sebesar 36.00 km.

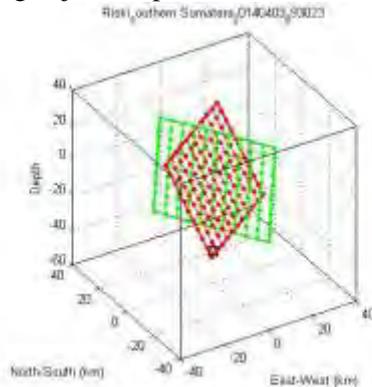


Gambar 4.10 Orientasi bidang patahan pada gempa bumi tanggal 30/10/2011 pukul 11:52:29

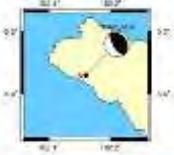
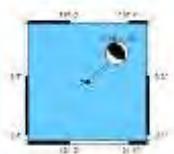
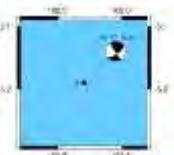


Gambar 4.11 Bentuk *beach ball* dari pola bidang sesar pada gempa yang terjadi tanggal 30/10/2011 pukul 11:52:29

Pada gempa bumi yang terjadi pada tanggal 17/01/2011 pada pukul 19:20:57 WIB menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah *strike slip* dengan karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 148, *dip* = 84 dan *rake* = 24 dan bidang kedua (merah) besar *strike* = 55, *dip* = 67 dan *rake* = 173. Dari plot HC didapatkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang pertama sebesar 15.36 km sedangkan jarak antara hiposenter gempa dengan bidang kedua sebesar 19.60 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak antara titik *centroid*-nya dengan jarak hiposenter sebesar 40.00 km.



Gambar 4. 12 Orientasi bidang patahan pada gempa bumi tanggal 17/01/2011 pukul 19:20:57

2014-04-03		
2011-10-30		
2011-01-17		

Tabel 4.6 Informasi yang didapat dari Global CMT

Event	Depth(Km)	Mo	Strike Bidang 1	Strike Bidang 2	Dip Bidang 1	Dip Bidang 2	Slip Bidang 1	Slip Bidang 2
2011-01-02	20.8	6E+24	314	129	14	16	85	89
2012-09-14	12.0	3.11E+25	324	130	10	81	104	88
2013-07-06	21.4	1.58E+25	331	126	18	73	114	82
2014-04-03	32.3	8.53E+24	325	125	24	68	108	82
2011-10-30	46.7	2.8E+24	320	124	27	64	104	83
2011-01-17	35.4	1.24E+25	310	125	22	68	95	88

Beach ball hasil pengolahan data dengan *beach ball* yang didapatkan dari global CMT terdapat hasil yang berbeda, hasil yang berbeda tersebut pada event gempa pada tanggal 17-01-2011, berdasarkan hasil pengolahan data pola bidang sesar diketahui adalah *strike slip* namun *beach ball* yang didapatkan dari global CMT menunjukkan bahwa pola bidang sesar adalah *reverse*, perbedaan ini diduga dikarenakan input data yang

berbeda walaupun tidak teralu besar perbedaannya. Input data tersebut adalah input data mengenai kedalaman centroid, pada hasil pengolahan data yang didapat dari webdc informasi kedalaman centroid adalah 24 km sedangkan dari Global CMT adalah 32.3 km.

4.1.2.c Hasil Perhitungan *Slip*

Dari besar magnituda *event* gempa yang ada di wilayah selatan Sumatera didapatkan besar *slip* untuk masing-masingnya sebagai berikut,

Tabel 4.7 Besar *Slip* sesar dari masing-masing *event*

<i>Event</i>	M_L	$\mu(N/m^2)$	$\beta(m/s)$	L(km)	W(km)	A(km ²)	$\bar{D}(m)$
02-01-2011	5.6	7.51×10^{10}	4700	1065.53	182.54	19440	171.98
14-09-2012	6.1	7.51×10^{10}	4700	2125.60	289.30	61495	305.83
06-07-2013	6.0	4.40×10^{10}	3600	2291.49	304.17	69700	325.59
03-04-2014	5.6	7.51×10^{10}	4700	1065.32	182.54	19446	175.98
30-10-2011	5.5	7.93×10^{10}	4760	907.901	164.08	14897	150.53
17-01-2011	6.2	7.93×10^{10}	4760	2388.80	312.65	74662	336.98

4.2 Pembahasan

Dari referensi diketahui momen tensor dan *focal mechanism* didapatkan dari hasil inversi momen tensor. Inversi ditentukan oleh data seismogram, Fungsi Green dan komponen momen tensor. Sebagaimana persamaan berikut,

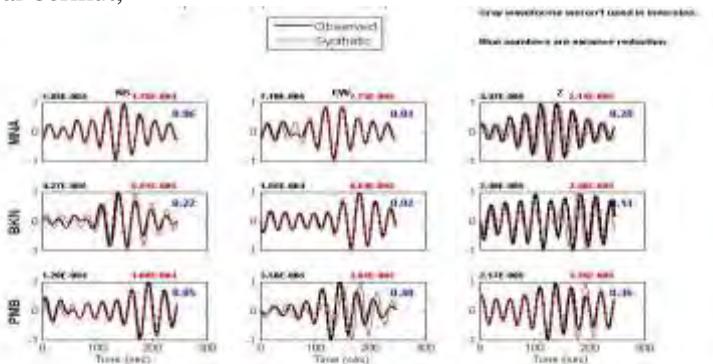
$$u_i(t) = \sum_{j=1}^6 G_{ij}(t)m_j \dots (4.1)$$

$u_i(t)$ adalah data rekaman seismogram, $G_{ij}(t)$ adalah Fungsi Green dan m_j adalah komponen momen tensor (Stein dan Wyession, 2003).

Fungsi Green merupakan perhitungan estimasi dari fungsi waktu sumber sehingga dari estimasi ini dapat diketahui besar momen tensor hasil permodelan. Fungsi Green dapat dituliskan sebagai,

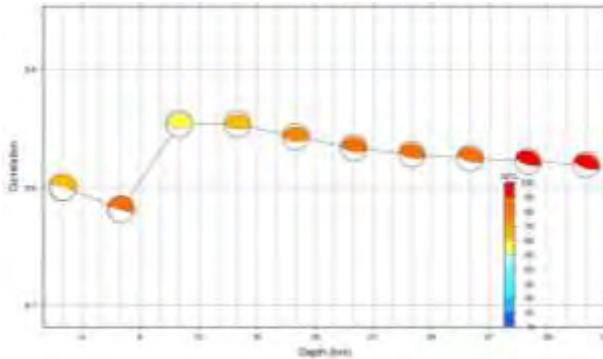
$$g(t) = e(t) * q(t) \dots (4.2)$$

Perhitungan Fungsi Green dan inversi menggunakan program ISOLA-GUI didapatkan hasil *fitting* kurva *displacement* dari data hasil observasi lapangan (data seismogram) dengan data hasil estimasi menggunakan Fungsi Green dapat dilihat dalam gambar berikut,



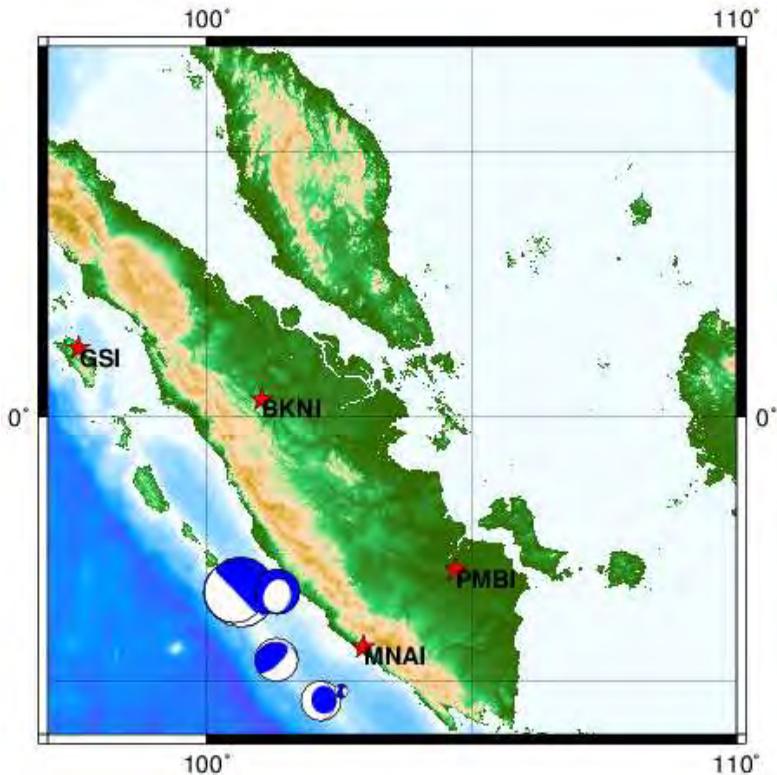
Gambar 4.14. Hasil *fitting* kurva *displacement* dari data *event* gempa tanggal 14/09/2012 pukul 19:20:57 WIB (ISOLA-GUI)

Kurva berwarna merah adalah kurva estimasi dari Fungsi Green dan kurva berwarna hitam adalah kurva dari data seismogram. Besar kecocokan kurva ditentukan oleh varian reduksi (Sokos dan Zahrandik, 2009). Nilai satu menunjukkan bahwa kurva hasil *fitting* berimpit penuh sedangkan nilai varian reduksinya nol maka ketidakcocokannya sangat besar, dapat dikatakan bahwa perbedaan kurvanya sangat jauh berbeda.



Gambar 4.15 Korelasi antara seismogram teramati dan sintetik sebagai fungsi kedalaman (*trial*) sumber gempa bumi. Warna mempresentasikan DC

Berdasarkan gambar 4.15 menunjukkan bahwa kesetabilan mekanisme fokal dan *fitting* terbaik berada pada kedalaman 11 km dan persentase DC konsisten berada diatas 60%. Dari masing-masing *event* gempa varian reduksinya berkisar mulai dari 0.60 sampai 0.83. Varian reduksi ini ditentukan oleh besar *filtering* yang dilakukan dalam proses inversi. Inversi yang digunakan dalam program ISOLA-GUI ini adalah *Deviatoric Moment Tensor Inversion* yang menghitung proses inversi untuk komponen 5 komponen dasar momen tensor serta menggunakan DC (*Double Couple*) dan CLVD (*Compensated Linier Vector Dipole*) yang mana inversi ini menurut Sokos dan Zahrandik (2009) merupakan metode inversi yang paling bagus dalam program ISOLA-GUI.



Gambar 4.16 Persebaran *beach ball* dari 6 event gempa

Bentuk *focal mechanism* dari masing-masing *event* menunjukkan pola bidang sesar *reverse fault* dan *dip-slip fault*. Bentuk pola ini dipengaruhi oleh kondisi geologi regional Pulau Sumatera. Wilayah selatan Pulau Sumatera diketahui terdapat zona sesar Sumatera yang dikenal sebagai Sesar Semangko yang membelah Pulau Sumatera menjadi dua bagian, sesar ini membentang di sepanjang Bukit Barisan dari Teluk Semangko di Selat Sunda hingga wilayah utara Aceh, selain Sesar Semangko wilayah selatan Pulau Sumatera pun terdapat lempeng India-Australia menyusup di bawah lempeng Eurasia dengan arah yang

miring sekitar $40-45^{\circ}$ (Madlazim, 2011). Penunjaman miring tersebut mengakibatkan terbentuknya SFZ, yaitu suatu zona sesar geser manganan, yang memanjang dari ujung utara hingga ujung selatan Pulau Sumatera hal ini berbeda dengan penyusupan lempeng India Australia di bawah lempeng Eurasia yang terjadi sepanjang lepas pantai selatan Pulau Jawa yang menyusup dengan arah normal sehingga tidak terbentuk suatu zona sesar seperti yang ada di Pulau Sumatera.



Gambar 4.17 Sistem sesar yang ada di Sumatera, SFZ, MFZ dan zona subduksi (geologi.iagi.or.id).

Berdasarkan gambar 4.16 dapat dilihat bahwa *beach ball* yang dekat dengan zona subduksi adalah *dip-slip* hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Madrinovella dkk (2011) yang menyebutkan bahwa batas lempeng yang konvergen pada dua lempeng yang rigid antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia menimbulkan pola bidang sesarnya berbentuk *dip-slip* yang terjadi di sepanjang zona subduksi Sumatera (*megathrust*).

Secara geologi, hal ini terjadi akibat dari penunjaman samudera (bagian dari Lempeng Eurasia). Lempeng Indo-

Australia bergerak ke arah utara-timur laut dan mendorong Lempeng Eurasia dengan kecepatan 5 cm/tahun (Madrinovella dkk, 2011), bergerak 2.7 cm/tahun (Prasetya, 2006). Sedangkan Indo-Australia sendiri bergerak 60 mm/tahun (Madlazim, 2010). Minister dan Jordan dalam Bellier dan Sebrier (1994) mengatakan sepanjang zona subduksi Lempeng Indo-Australia menunjam dibawah Lempeng Eurasia yang bergerak dengan rata-rata 75 mm/tahun. Dari pengolahan data gempa yang terjadi pada 03/04/2014 yang pusat gempanya berada diantara *sunda trench* atau zona subduksi dan SFZ (*Sumatran Fault Zone*) mempunyai pola sesar *reverse fault*. Peta batimetri Selat Sunda, antara Jawa dan Sumatera menunjukkan bahwa bagian selatan dari sesar Sumatera dikaitkan dengan dua garis sesar yang menonjol didasar laut (Nishimura, et al, 1986; Zen et al, 1991; Pramumijoyo and Sebrier, 1991).

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan didapat kesimpulan sebagai berikut,

1. Besar momen tensor untuk masing-masing komponennya dari 6 *event* gempa di wilayah selatan Pulau Sumatera pada tahun 2011-2014 mempunyai rentang sebagai berikut ini,
 $M_{11} = 2.531 \cdot 10^{15}$ sampai $0.205 \cdot 10^{18}$
 $M_{22} = 3.495 \cdot 10^{15}$ sampai $0.337 \cdot 10^{18}$
 $M_{33} = 0.964 \cdot 10^{15}$ sampai $0.131 \cdot 10^{18}$
 $M_{31} = 0.544 \cdot 10^{15}$ sampai $5.174 \cdot 10^{18}$
 $M_{32} = 1.107 \cdot 10^{15}$ sampai $4.113 \cdot 10^{18}$
 $M_{12} = 1.140 \cdot 10^{15}$ sampai $0.430 \cdot 10^{18}$
2. Pola bidang sesar gempa yang terjadi di wilayah selatan Pulau Sumatera adalah sesar naik (*reverse fault*) dan sesar dalam (*dip-slip*) di zona subduksi.
3. Besar *slip* rata-rata dari *event* gempa di wilayah selatan Pulau Sumatera pada tahun 2011-2014 sebesar 274.71 meter.

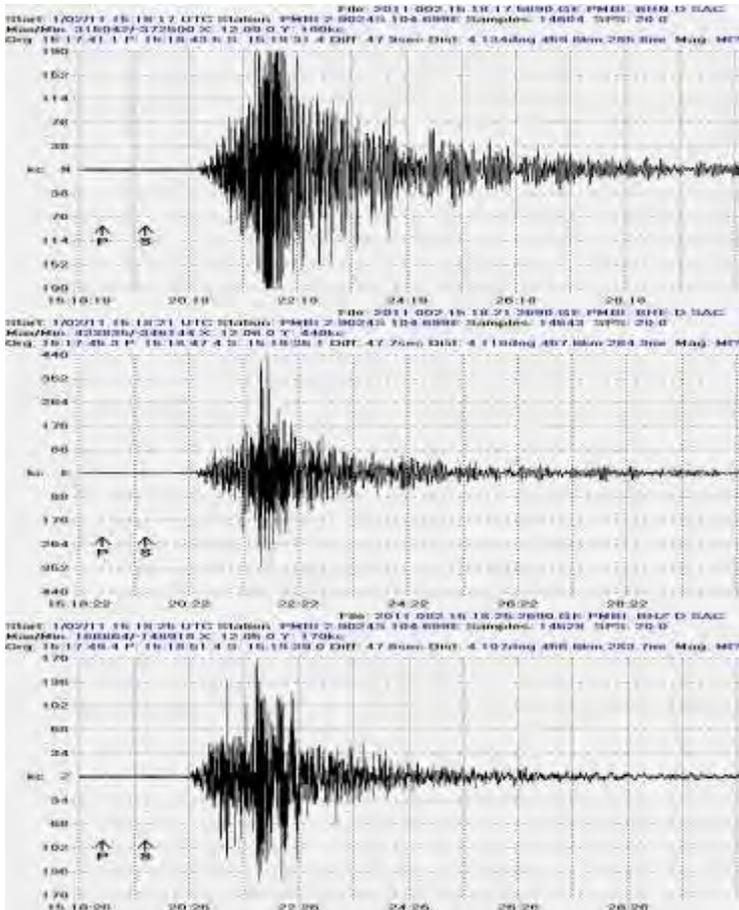
5.2 SARAN

Saran yang diberikan penulis dalam penelitian ini adalah perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penentuan momen tensor dan pola bidang sesar dari *focal mechanism* terutama dalam hal proses perhitungan Fungsi Green, inversi dan proses *filtering*.

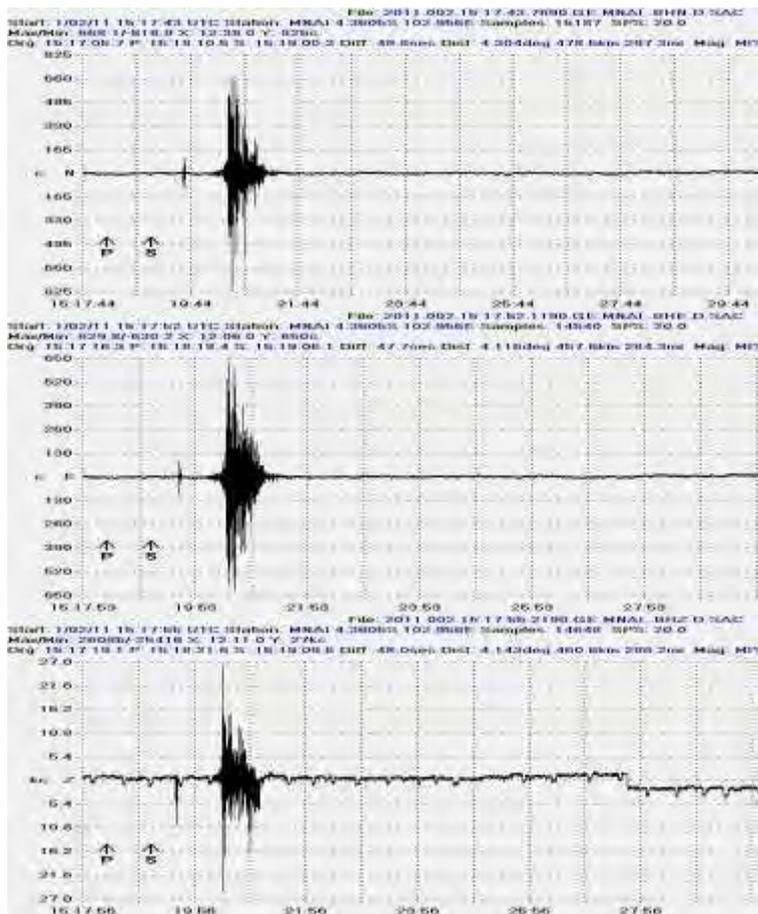
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran a

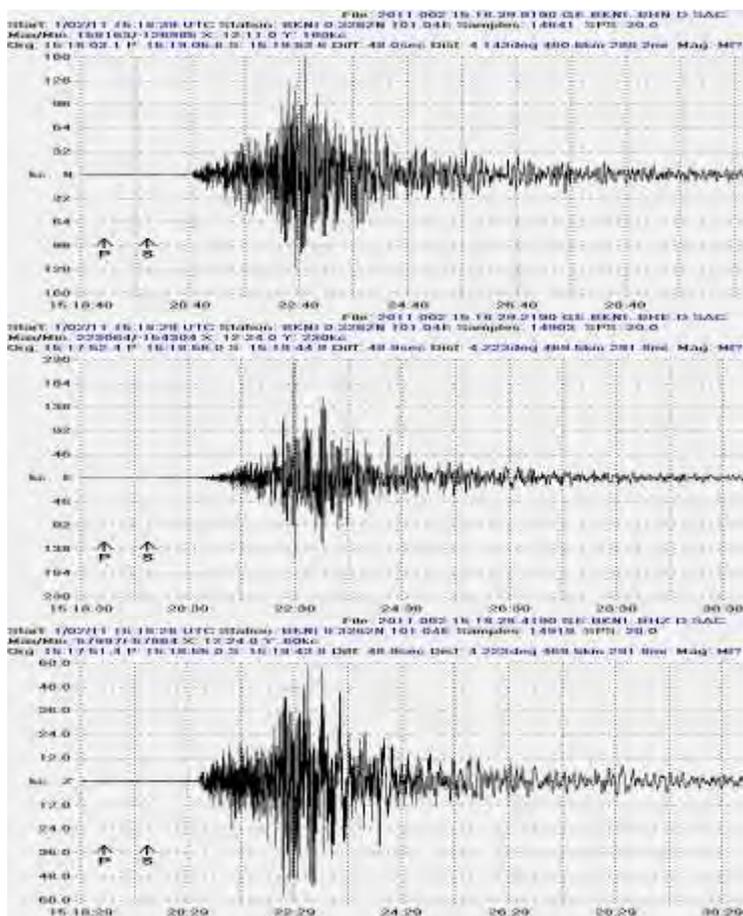
1. Data rekaman gempa pada tanggal 02/01/2011 pukul 15:19:32 WIB
 - a. Stasiun PMBI



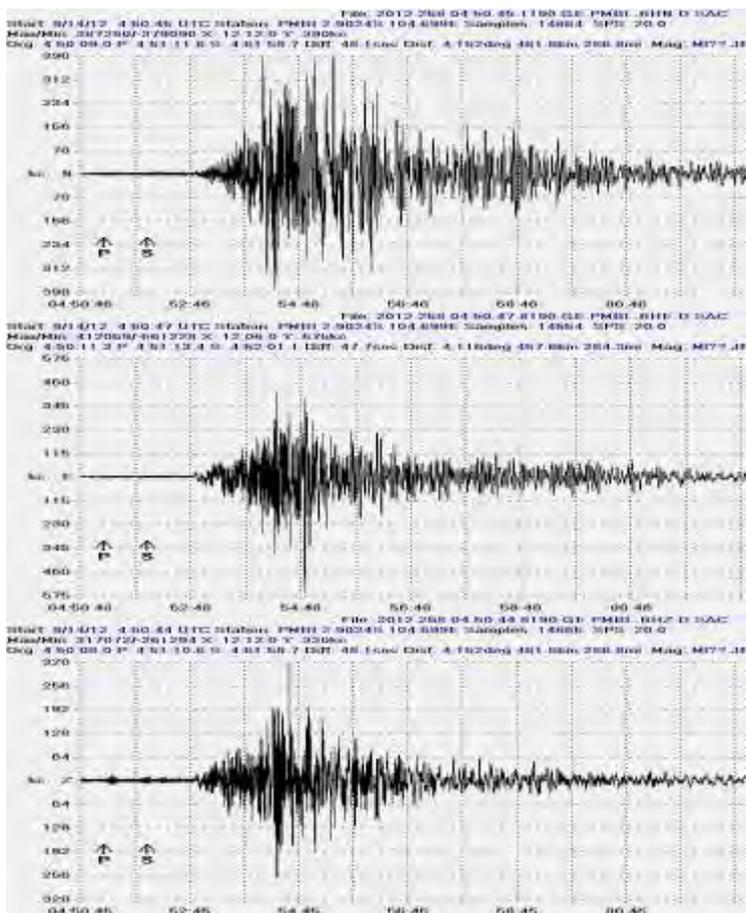
b. Stasiun MNAI



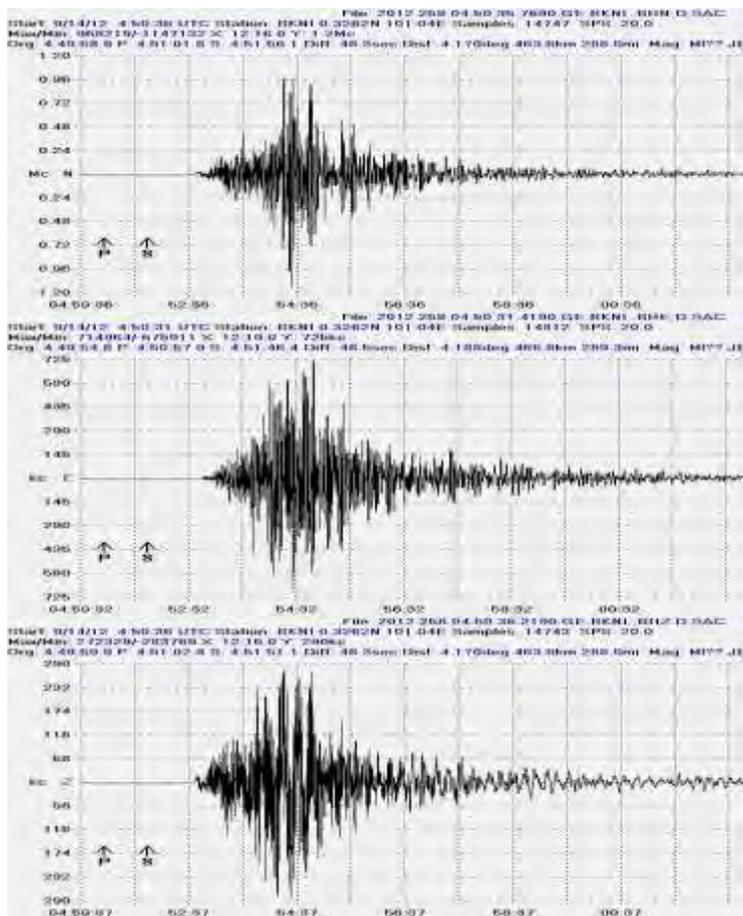
c. Stasiun BKNI



2. Data rekaman gempa pada tanggal 14/09/2011 pukul 04:51:49 WIB
 - a. Stasiun PMBI

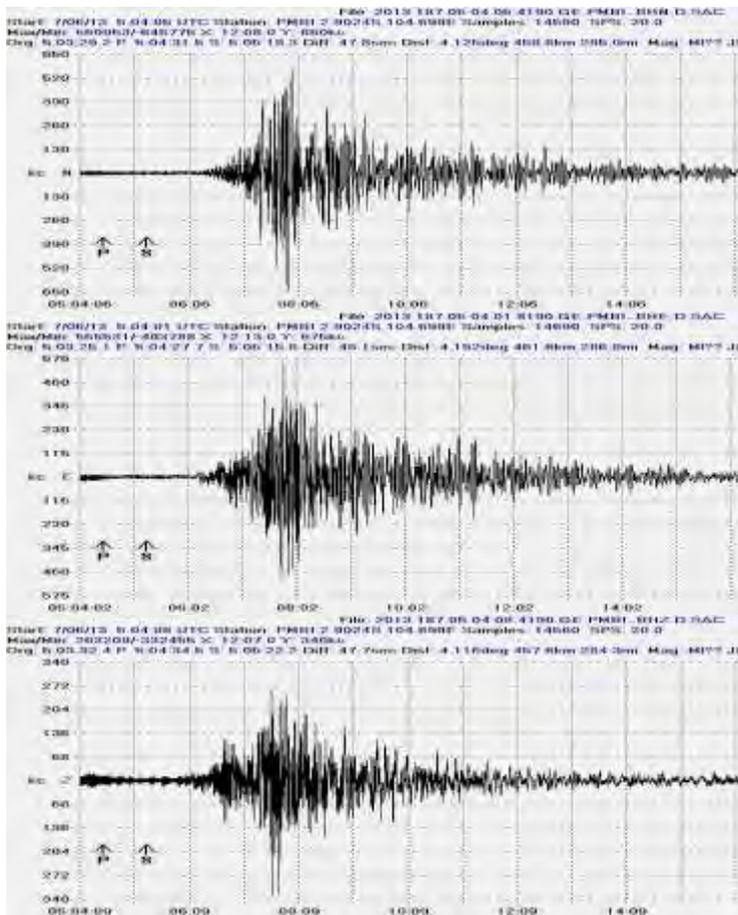


c. Stasiun BKNI

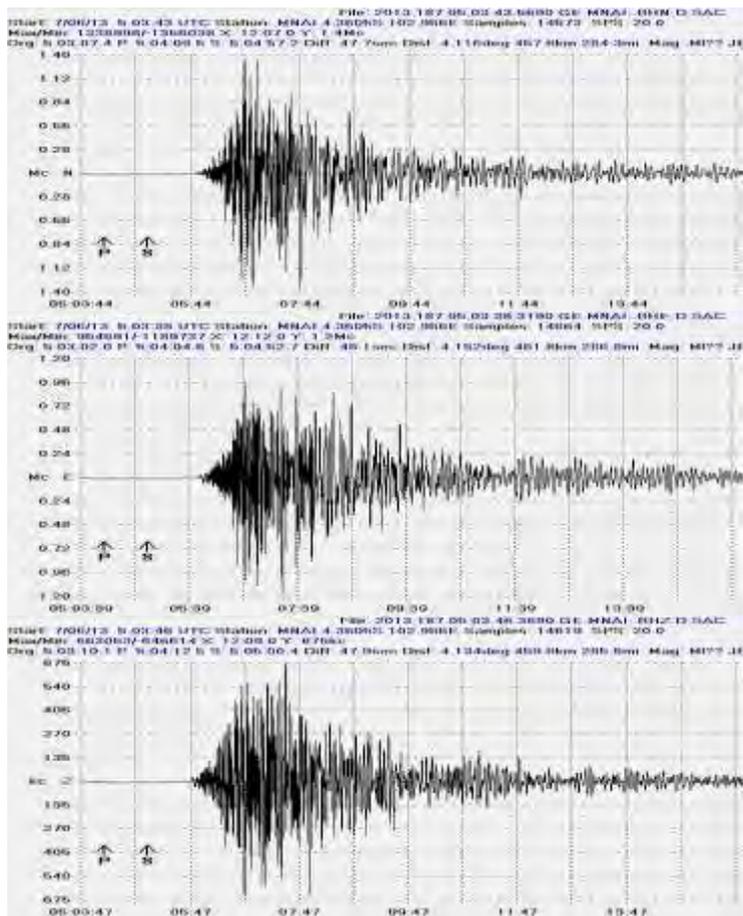


3. Data rekaman gempa pada tanggal 06/07/2013 pukul 05:05:07 WIB

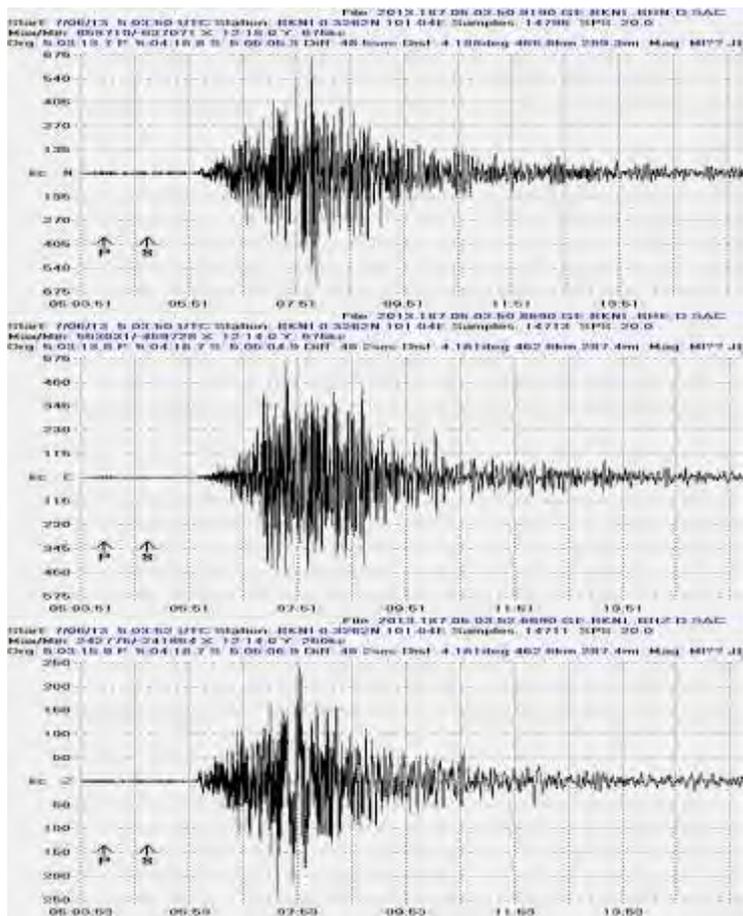
a. Stasiun PMBI



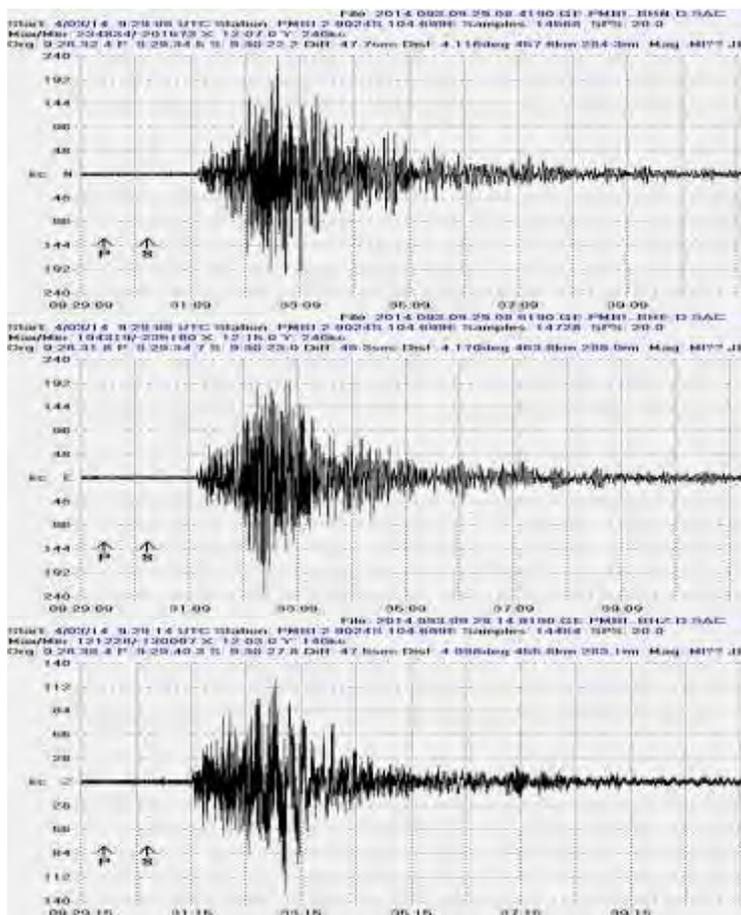
b. Stasiun MNAI



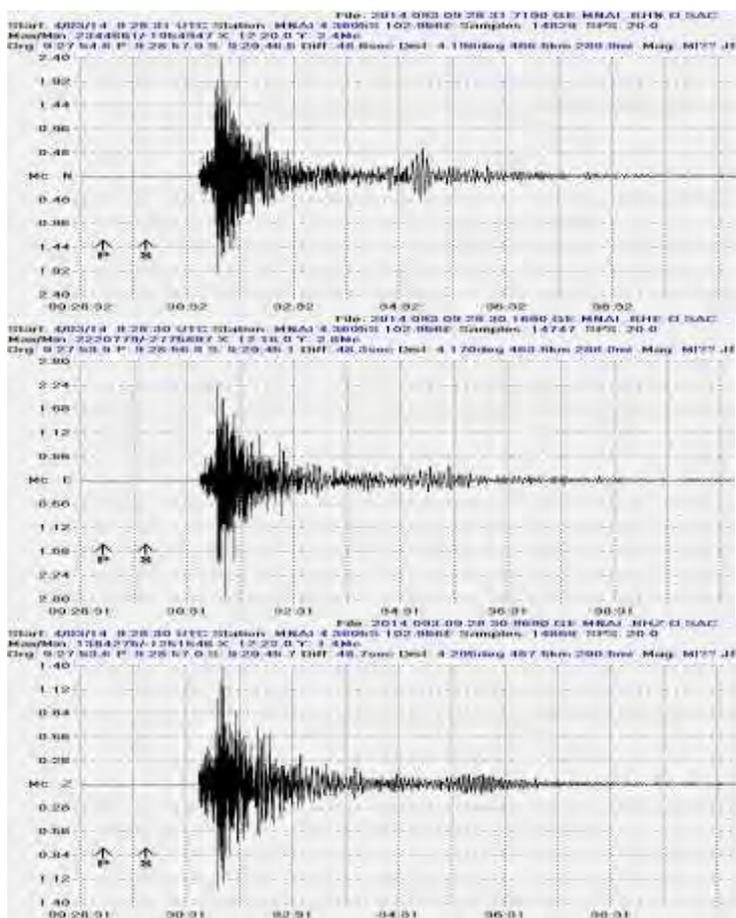
c. Stasiun BKNI



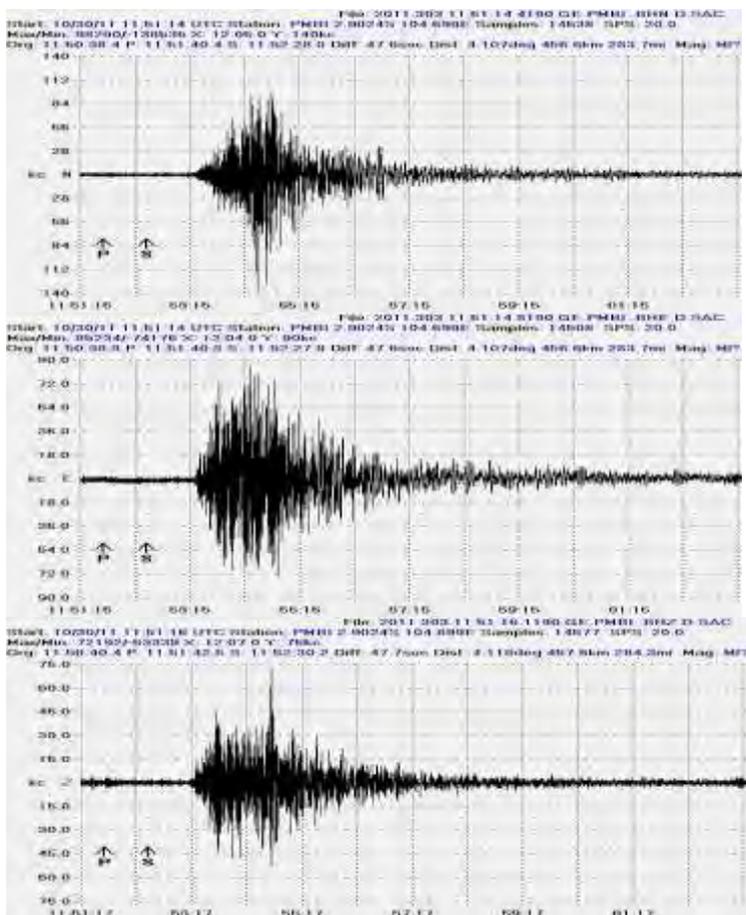
4. Data rekaman gempa pada tanggal 03/04/2014 pukul 09:30:23 WIB
- a. Stasiun PMBI



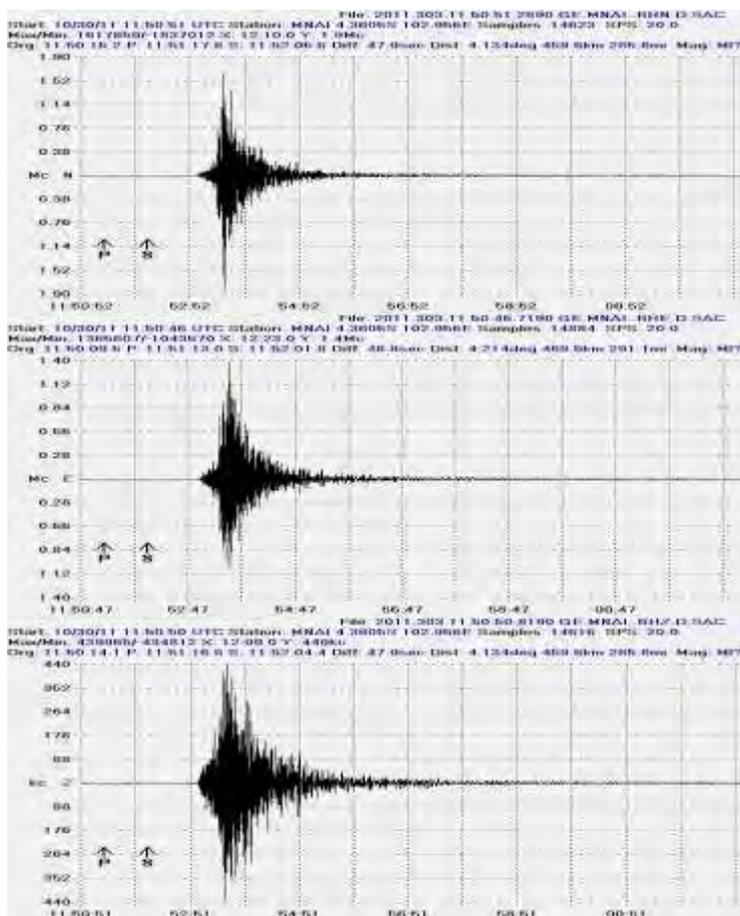
b. Stasiun MNAI



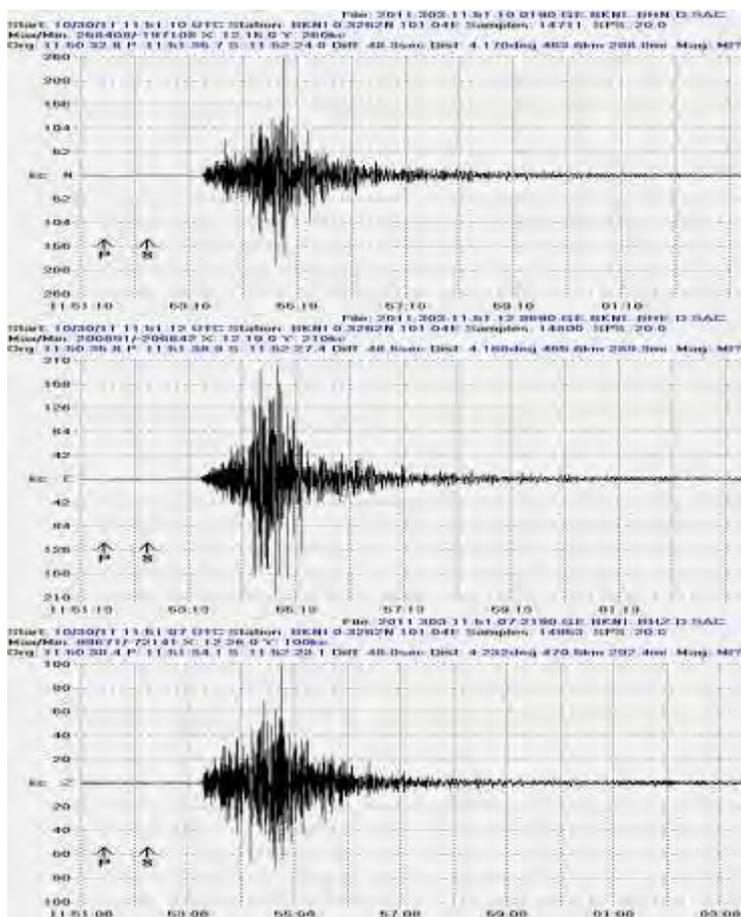
5. Data rekaman gempa pada tanggal 30/10/2011 pukul 11:52:29 WIB
 - a. Stasiun PMBI



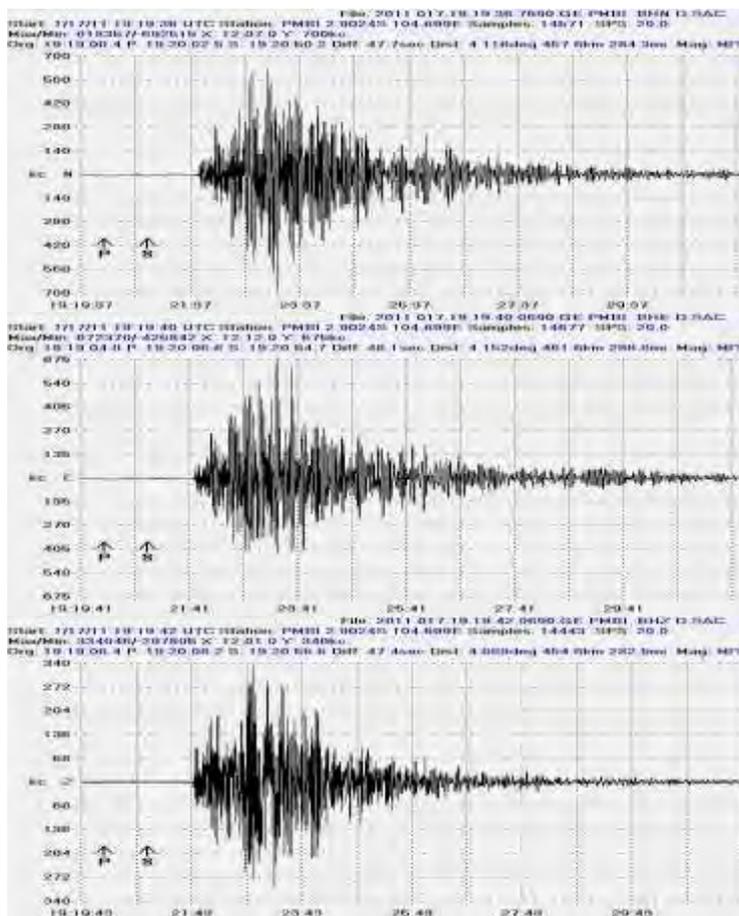
b. Stasiun MNAI



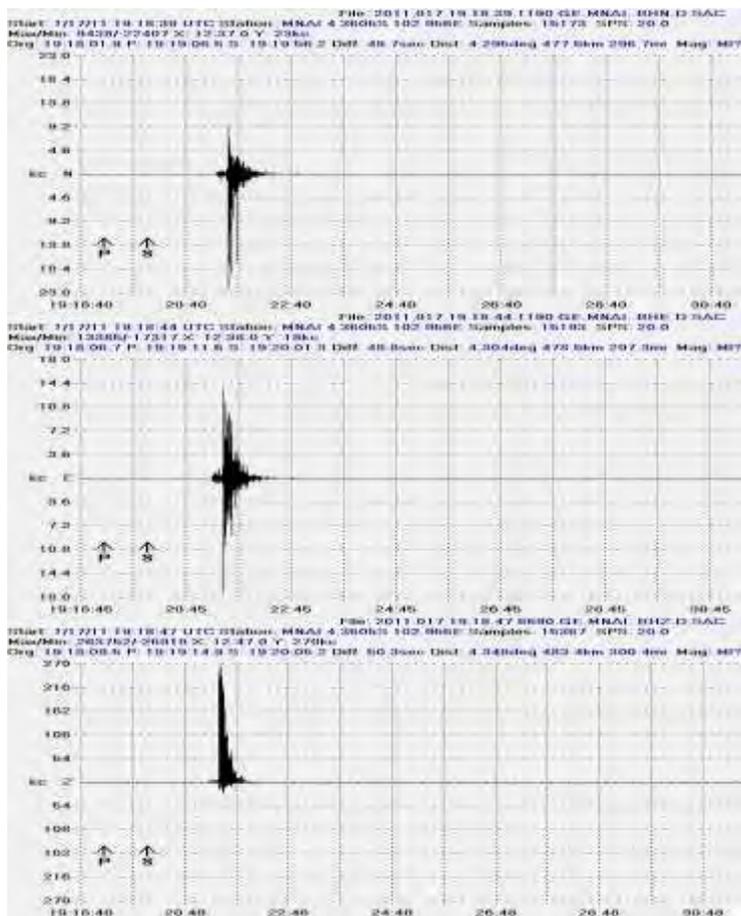
c. Stasiun BKNI



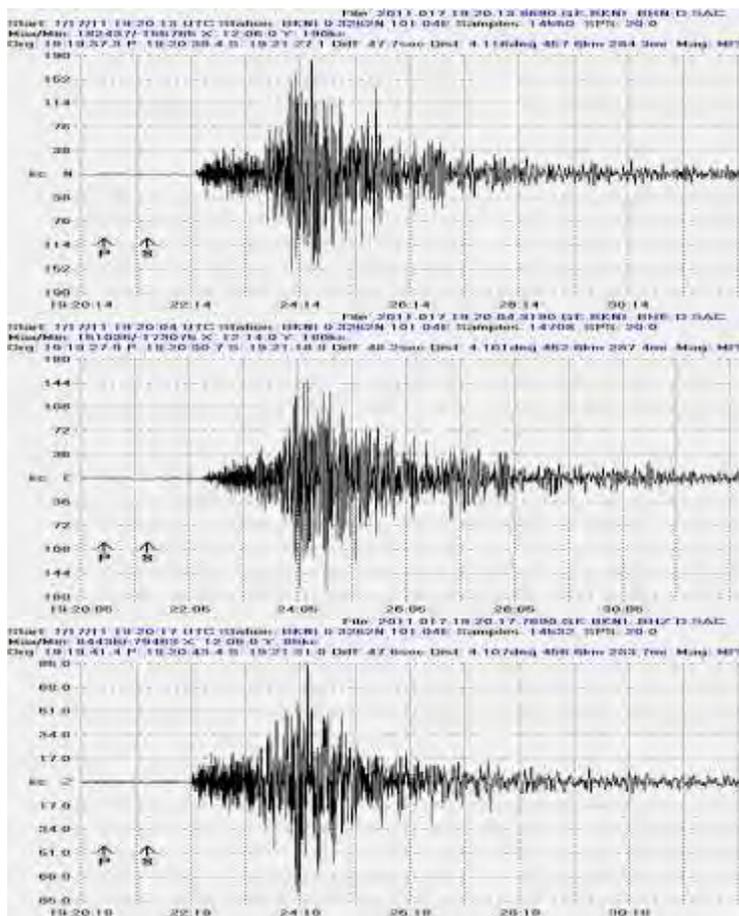
6. Data rekaman gempa pada tanggal 17/01/2011 pukul 19:20:57 WIB
- a. Stasiun PMBI



b. Stasiun MNAI

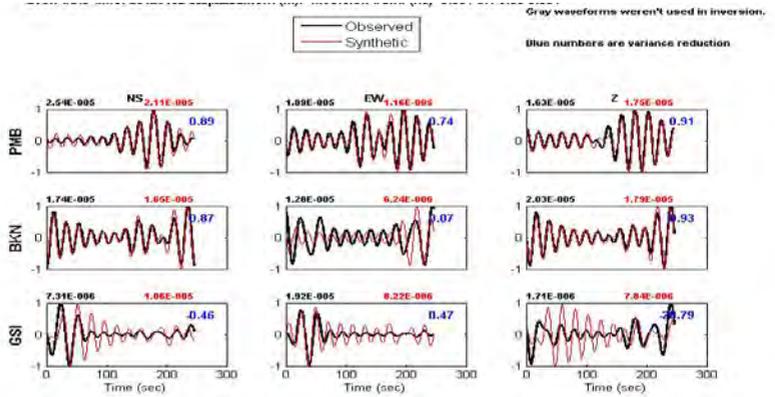


c. Stasiun BKNI

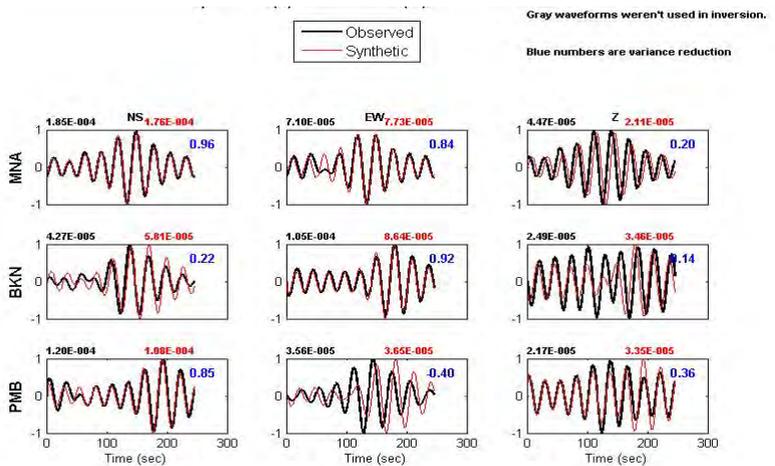


Lampiran b

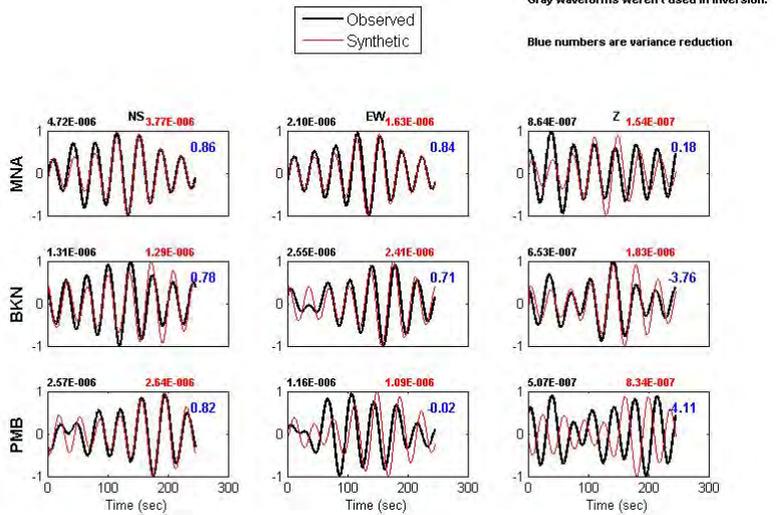
1. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 02/01/2011 pukul 15:19:32 WIB



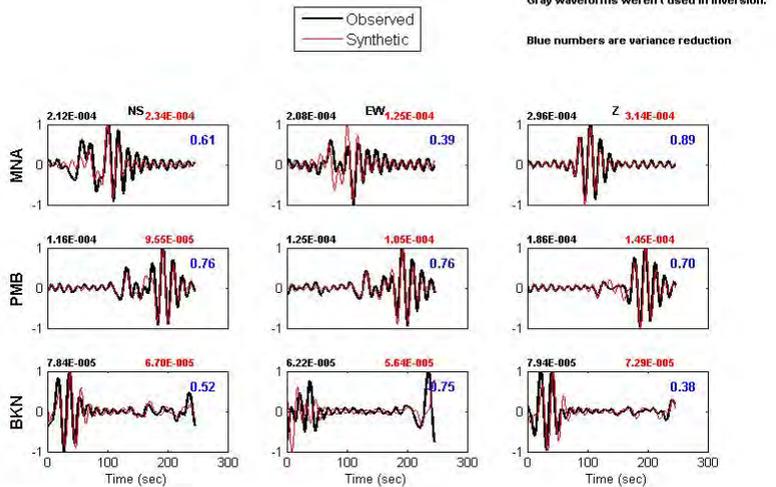
2. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 14/09/2012 pukul 04:51:49 WIB



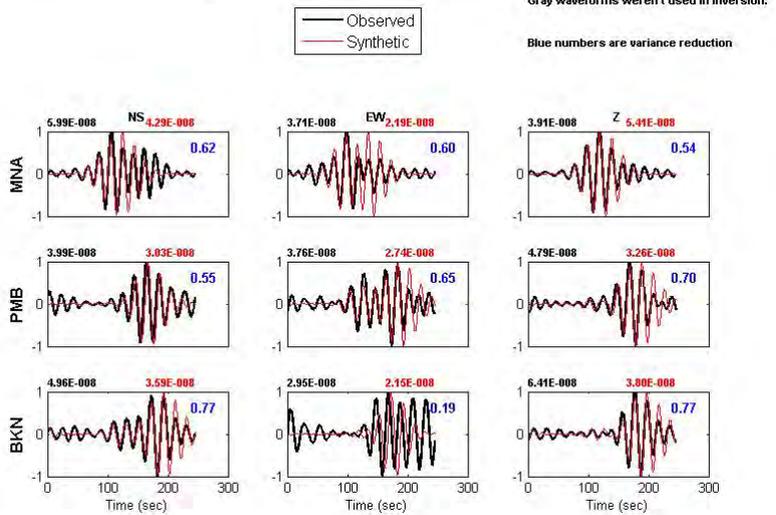
3. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 06/07/2013 pukul 05:05:07 WIB



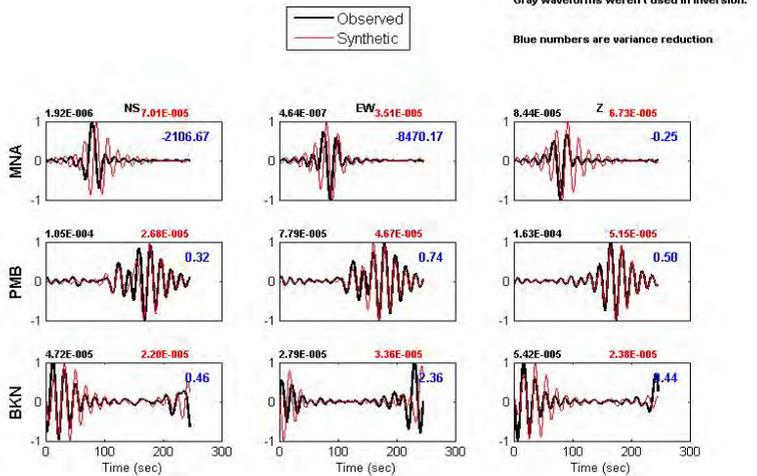
4. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 03/04/2014 pukul 09:30:23 WIB



5. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 30/10/2011 pukul 11:52:29 WIB



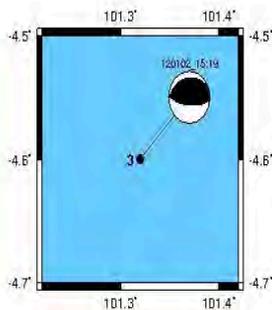
6. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 17/01/2011 pukul 19:20:57 WIB



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran c

1. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 02/01/2011 pukul 15:19:32 WIB



MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (GE)

Origin time 20120102 15:19:32
 Lat -4.6 Lon 101.32 Depth 33

CENTROID

Trial source number : 3 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat -4.6 Lon 101.32
 Centroid Depth : 11
 Centroid time : +0.45 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 6.898e+017

Mw : 5.8

DC% : 50.3

CLVD% : 49.7

Var. red. (for stations used in inversion): 0.73

Var. red. (for all stations) : 0.73

Strike	Dip	rake	Station	NS	EW	Ver
95	65	98	PMB	+	+	+
256	26	73	BRN	+	+	+
			GSI	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

179 20

T-axis Azimuth Plunge

21 69

Nrr Mrt Mpp

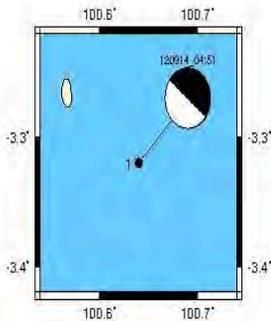
5.920 -4.181 -1.739

Mrt Mrp Mtp

4.274 -1.138 -0.496

Exponent (Nm) : 17

2. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 14/09/2012 pukul 04:51:49 WIB



MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (GE)

Origin time 20120914 04:51:49.00
 Lat -3.32 Lon 100.64 Depth 33

CENTROID

Trial source number : 1 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat -3.32 Lon 100.64
 Centroid Depth : 5
 Centroid time : +2.7 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 6.613e+018

Mw : 6.5

DC% :96.9

CLVD% :3.1

Var. red. (for stations used in inversion) :0.83

Var. red. (for all stations) :0.83

Strike	Dip	Take	Station	NS	EW	Ver
128	89	89	MNA	+	+	+
219	1	0	BEN	+	+	+
			PMS	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

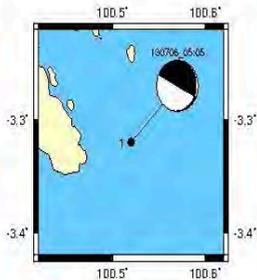
219 44

T-axis Azimuth Plunge

38 46

Nrr Mtt Mpp
 0.095 0.007 -0.102
 Mrt Mrp Mtp
 5.174 -4.113 0.166
 Exponent (Nm) : 18

3. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 06/07/2013 pukul 05:05:07 WIB



MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (GE)

Origin time 20130706 05:05:07.00
 Lat -3.32 Lon 100.52 Depth 29

CENTROID

Trial source number : 1 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat -3.32 Lon 100.52
 Centroid Depth : 9
 Centroid time : +2.7 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 2.920e+018

Mw : 6.2

DC% : 93

CLWD% : 7

Var. red. (for stations used in inversion) : 0.72

Var. red. (for all stations) : 0.72

Strike	Dip	Take	Station	NS	EW	Ver
15	10	169	MVA	+	+	+
116	88	81	BKN	+	+	+
			PMS	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge
 215 42

T-axis Azimuth Plunge
 16 46

Nrr Nrt Nrp

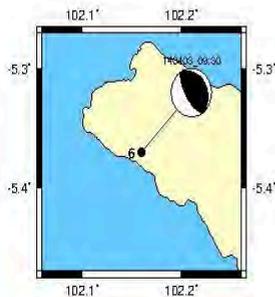
0.131 0.205 -0.337

Nrt Nrp Nrp

2.596 -1.252 0.430

Exponent (Nm) : 18

4. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 03/04/2014 pukul 09:30:23 WIB



MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (GE)

Origin time 20140403 09:30:23.00
 Lat -5.37 Lon 102.16 Depth 39

CENTROID

Trial source number : 6 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat -5.37 Lon 102.16
 Centroid Depth : 24
 Centroid time : +2.7 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 3.991e+017

Mw : 5.7

DCP : 34.9

CLVD% : 65.1

Var. red. (for stations used in inversion): 0.68

Var. red. (for all stations) : 0.68

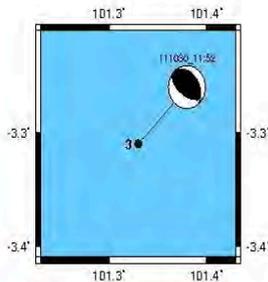
Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver	Used
148	66	91	MNA	+	+	+	
325	24	88	FMS	+	+	+	
			BKN	+	+	+	

P-axis Azimuth Plunge
 237 21

T-axis Azimuth Plunge
 59 69

Mrr Mrt Mtp
 3.519 -1.670 -1.849
 Mrt Mtp Mtr
 1.332 -2.187 0.279
 Exponent (Nm) : 17

5. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 30/10/2011 pukul 11:52:29 WIB



MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (GE)

Origin time 20111030 11:52:29.00

Lat -3.31 Lon 101.33 Depth 51

CENTROID

Trial source number : 3 (Fixed Epicenter inversion)

Centroid Lat -3.31 Lon 101.33

Centroid Depth : 15

Centroid time : +0.45 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 9.105e+016

Mw 5.2

DC% 46.7

CLVD% 53.3

Var. red. (for stations used in inversion) : 0.6

Var. red. (for all stations) : 0.6

Strike	Dip	rake	Station	NS	EW	Ver
124	56	78		+	+	+
325	35	107		+	+	+
			BKN	+	+	+

F-axis Azimuth Plunge

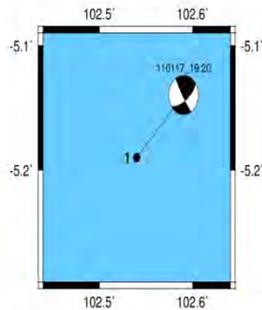
223 11

T-axis Azimuth Plunge

359 75

Mrr Mrt Mpp
 9.176 -4.366 -4.810
 Mrt Mrp Mtp
 3.762 -0.536 2.292
 Exponent (Nm) : 16

6. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 17/01/2011 pukul 19:20:57 WIB



MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (UPSL)

Origin time 20110117 19:20:57.00

Lat -5.19 Lon 102.54 Depth 41

CENTROID

Trial source number : 1 (Fixed Epicenter inversion)

Centroid Lat -5.19 Lon 102.54

Centroid Depth : 1

Centroid time : +4 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 3.549e+015

Mw : 4.3

DC% :54.6

CLVD% :45.4

Var.red. (for stations used in inversion):0.81

Var.red. (for all stations) :0.81

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver
148	84	24	MNA	+	+	+
55	67	173	FMB	+	+	+
			BKN	+	+	+
			GSI	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

279 12

T-axis Azimuth Plunge

14 21

Mrr Mrt Mpp

0.964 2.531 -3.495

Mrt Mqp Mtp

0.544 -1.107 -1.140

Exponent (Nm) : 15

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran d

1. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* dari Global CMT untuk *event* gempa pada tanggal 02/01/2011 pukul 15:19:32 WIB

201101021519A SOUTHERN SUMATRA, INDONE

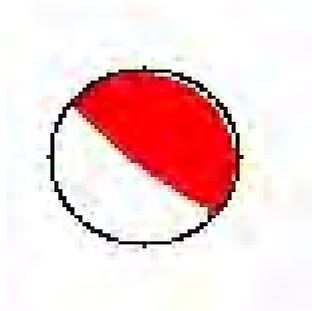
Date: 2011/ 1/ 2 Centroid Time: 15:19:35.5 GMT
Lat= -4.73 Lon= 101.22
Depth= 20.8 Half duration= 1.9
Centroid time minus hypocenter time: 4.5
Moment Tensor: Expo=24 2.930 -1.630 -1.300 4.130 -3.270 1.360
Mw = 5.8 mb = 5.7 Ms = 5.8 Scalar Moment = 6e+24
Fault plane: strike=314 dip=14 slip=95
Fault plane: strike=129 dip=76 slip=89



2. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* dari Global CMT untuk *event* gempa pada tanggal 14/09/2012 pukul 04:51:14 WIB

201209140451A SOUTHERN SUMATRA, INDONE

Date: 2012/ 9/14 Centroid Time: 4:51:51.7 GMT
Lat= -3.58 Lon= 100.32
Depth= 12.0 Half duration= 3.9
Centroid time minus hypocenter time: 4.6
Moment Tensor: Expo=25 0.989 -0.469 -0.519 2.280 -1.860 0.546
Mw = 6.3 mb = 6.1 Ms = 6.3 Scalar Moment = 3.11e+25
Fault plane: strike=324 dip=10 slip=104
Fault plane: strike=130 dip=81 slip=88



3. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* dari Global CMT untuk *event* gempa pada tanggal 06/07/2013 pukul 05:05:07 WIB

201307060505A SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA

Date: 2013/ 7/ 6 Centroid Time: 5: 5:10.1 GMT
 Lat= -3.58 Lon= 100.22
 Depth= 21.4 Half duration= 2.6
 Centroid time minus hypocenter time: 3.4
 Moment Tensor: Expo=25 0.872 -0.375 -0.497 1.100 -0.715 0.461
 Mw = 6.1 mb = 5.9 Ms = 6.3 Scalar Moment = 1.58e+25
 Fault plane: strike=331 dip=18 slip=114
 Fault plane: strike=126 dip=73 slip=82



4. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* dari Global CMT untuk *event* gempa pada tanggal 03/04/2014 pukul 09:30:23 WIB

201404030930A SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA

Date: 2014/ 4/ 3 Centroid Time: 9:30:27.1 GMT

Lat= -5.62 Lon= 101.87

Depth= 32.3 Half duration= 2.1

Centroid time minus hypocenter time: 7.5

Moment Tensor: Expo=25 0.628 -0.304 -0.324 0.520 -0.301 0.271

Mw = 5.9 mb = 0.0 Ms = 5.6 Scalar Moment = 8.53e+24

Fault plane: strike=325 dip=24 slip=108

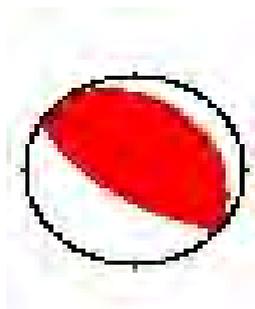
Fault plane: strike=125 dip=68 slip=82



5. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* dari Global CMT untuk *event* gempa pada tanggal 30/10/2011 pukul 11:52:29 WIB

201110301152A SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA

Date: 2011/10/30 Centroid Time: 11:52:31.7 GMT
Lat= -3.46 Lon= 101.18
Depth= 46.7 Half duration= 1.5
Centroid time minus hypocenter time: 4.3
Moment Tensor: Expo=24 2.140 -1.190 -0.948 1.510 -0.865 1.160
M_w = 5.6 m_b = 5.6 M_s = 5.6 Scalar Moment = 2.8e+24
Fault plane: strike=320 dip=27 slip=104
Fault plane: strike=124 dip=64 slip=83



6. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* dari Global CMT untuk *event* gempa pada tanggal 17/01/2011 pukul 19:20:57 WIB

201101171920A SOUTHERN SUMATRA, INDONE

Date: 2011/ 1/17 Centroid Time: 19:20:59.9 GMT

Lat= -5.37 Lon= 102.45

Depth= 35.4 Half duration= 2.4

Centroid time minus hypocenter time: 2.7

Moment Tensor: Expo=25 0.844 -0.538 -0.306 0.751 -0.499 0.426

Mw = 6.0 mb = 6.1 Ms = 6.0 Scalar Moment = 1.24e+25

Fault plane: strike=310 dip=22 slip=95

Fault plane: strike=125 dip=68 slip=88

