



TUGAS AKHIR – SF 091321

**ESTIMASI *MOMENT TENSOR* DAN POLA
BIDANG SESAR PADA ZONA SUBDUKSI DI
WILAYAH SUMATERA UTARA PERIODE
2012-2014**

**LILIS EKA RACHMAWATI
NRP 1110 100 041**

**Dosen Pembimbing
Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
NIP. 19620802 198701.1.001**

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014**



FINAL PROJECT – SF 091321

**THE MOMENT TENSOR AND FAULT PLANE
PATTERN ESTIMATE ON SUBDUCTION ZONE
IN NORTH SUMATERA REGION FROM
EARTHQUAKE EVENT ON 2012-2014**

**LILIS EKA RACHMAWATI
NRP 1110 100 041**

**Supervisor
Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
NIP. 19620802 198701.1.001**

**Physics Department
Faculty of Mathematics and Natural Science
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014**



TUGAS AKHIR – SF 091321

**ESTIMASI *MOMENT TENSOR* DAN POLA BIDANG
SESAR PADA ZONA SUBDUKSI DI WILAYAH
SUMATERA UTARA PERIODE 2012-2014**

**LILIS EKA RACHMAWATI
NRP 1110100041**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U
NIP.19620802 198701.1.001**

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014**

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirrabbi ‘alamiin, puji syukur penulis ucapkan hanya kepada Allah SWT yang telah melimpahkan risiko dan rahmat-Nya selama penulis menjalani perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, sehingga penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

ESTIMASI *MOMENT TENSOR* DAN POLA BIDANG SESAR PADA ZONA SUBDUKSI DI WILAYAH SUMATERA UTARA PERIODE 2012-2014

Dengan terselesaikannya tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunannya terutama kepada:

1. Kedua orangtua penulis, Ibunda Soeherni Ayahanda Adi Soepriono yang telah memberikan banyak do'a, dukungan dan semangat yang tiada henti serta dukungan dari keluarga
2. Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U yang memberikan bimbingan mulai awal penulisan tugas akhir hingga selesai.
3. Bapak Zainuri, M.Si selaku dosen wali.
4. Bapak Dr. Yono Hadi P., M. Eng. dan Dr. Melania Suweni M., M.T., selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA ITS.
5. Seluruh Staf Pengajar di Jurusan Fisika ITS.
6. Sahabat penulis, Rida, Ibad, Eka, dan lain-lain
7. Teman-teman penulis, A. Akbar
8. Serta teman-teman Cosmic 2010 yang selalu berbagi semangat dan perhatian selama berkuliah mulai tahun 2010 hingga sekarang penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Dan pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari akan keterbatasannya, berharap kritik dan saran yang membangun. Semoga dengan adanya Tugas Akhir ini dapat menginspirasi pembaca dan menyumbangkan ilmu khususnya dalam bidang geofisika.

Surabaya, 10 Juni 2014

Lilis Eka Rachmawati

LEMBAR PENGESAHAN

ESTIMASI MOMENT TENSOR DAN POLA BIDANG SESAR PADA ZONA SUBDUKSI DI WILAYAH SUMATERA UTARA PERIODE 2012-2014

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada

Bidang Studi Fisika Bumi

Program Studi S-1 Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

oleh :

LILIS EKA RACHMAWATI
NRP. 1110 100 041

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U



**ESTIMASI MOMENT TENSOR DAN POLA
BIDANG SESAR PADA ZONA SUBDUKSI DI
WILAYAH SUMATERA UTARA PERIODE
2012-2014**

Nama Mahasiswa : Lilis Eka Rachmawati
NRP : 1110 100 041
Jurusan : Fisika FMIPA-ITS
Pembimbing : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U

Abstrak

Penelitian ini mengestimasi tentang pola bidang patahan yang didapat dari focal mechanism gempa dan momen tensor pada tiap event di Sumatera Utara pada periode 2012-2014. Hal ini dikarenakan Sumatera Utara berada pada zona subduksi antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia yang mana terjadi penunjaman Lempeng Eurasia dibawah Indo-Australia. Untuk mendapatkan besar momen tensor dan focal mechanism-nya memakai program ISOLA-GUI dengan menghitung Fungsi Green dan melakukan proses inversi untuk mendapatkan momen tensor dan focal mechanism gempa. Bentuk focal mechanism ditunjukkan dalam bentuk solusi moment tensor yang lebih dikenal dengan bentuk beach ball. 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 5,6 Skala Richter. Pola bidang sesar yang terbentuk adalah dip-slip jenis vertical dan reverse fault di zona subduksi dan strike slip di sekitar patahan Sumatra. Dengan besar rentang momen tensor untuk masing-masing komponennya sebesar $M_{11} = 2.08 \exp17$ sampai $1.3 \exp18$, $M_{22} = 1.28 \exp17$ sampai $1.31 \exp18$, $M_{33} = 6.4 \exp16$ sampai $6.58 \exp17$, $M_{31} = 8.45 \exp16$ sampai $7.14 \exp18$, $M_{32} = 5.7 \exp16$ sampai $7.405 \exp18$, dan $M_{12} = 9.79 \exp16$ sampai $1.045 \exp18$. Sedangkan untuk besar slip dari event gempa di Sumatera Utara

event 01-05-2014 menghasilkan slip sebesar 0,05 m. Event 01-12-2013 menghasilkan slip sebesar 0,22 m. Event 02-07-2013 menghasilkan slip sebesar 0,30 m. Event pada 21-01-2013 menghasilkan slip sebesar 0,26 m. Event pada 10-01-2013 menghasilkan slip sebesar 0,04 m. Event pada 25-07-2012 menghasilkan slip sebesar 0,35 m.

Kata Kunci : *momen tensor, dip-slip, focal mechanism, , reverse fault, strike slip*

**THE MOMENT TENSOR AND FAULT PLANE PATTERN
ESTIMATE ON SUBDUCTION ZONE IN NORTH
SUMATERA REGION FROM EARTHQUAKE EVENT ON
2012-2014**

Name : Lilis Eka Rachmawati
Student Identity : 1110 100 041
Department : Physics, FMIPA-ITS
Advisor : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U

Abstract

This research estimated the pattern of fault plane from focal mechanism and moment tensor in each event in Northern Sumatera on 2012-2014. This is caused from North Sumatra is located in subduction zone between the Eurasian Plate and the Indo-Australian whichever occurs subduction under the Eurasian Plate Indo-Australian. The magnitude of moment tensor and the focal mechanism available from ISOLA-GUI Program using Green Function and inversion proses. The pattern of focal mechanism is shown in the form of moment tensor solutions as beach ball type. From the results of the calculation of focal mechanism can shown fault plane and slip from fault. The magnitude of earthquake that is used in this research more than equal to 5.6 SR. The fault plane in this research are dip-slip with vertical type, reverse type in subduction zone and strike slip fault in Sumatra fault. The magnitude of each component of moment tensor has range for $M_{11} = 2.08 \text{ exp}17$ until $1.3 \text{ exp}18$, $M_{22} = 1.28 \text{ exp}17$ until $1.31 \text{ exp}18$, $M_{33} = 6.4 \text{ exp}16$ until $6.58 \text{ exp}17$, $M_{31} = 8.45 \text{ exp}16$ until $7.14 \text{ exp}18$, $M_{32} = 5.7 \text{ exp}16$ until $7.405 \text{ exp}18$, and $M_{12} = 9.79 \text{ exp}16$ until $1.045 \text{ exp}18$. Slip of each event in Northern Sumatera on event 01-05-2014 is 0,05 m. Event

01-12-2013 is 0,22 m. *Event* 02-07-2013 is 0,30 m. *Event* 21-01-2013 is 0,26 m. *Event* 10-01-2013 is 0,04 m. *Event* 25-07-2012 is 0,35 m.

Keywords: *moment tensor, dip-slip, focal mechanism, reverse fault, strike slip*

DAFTAR ISI

Bab	Halaman
Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	iv
Abstract	vi
Kata Pengantar	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar	xiii
Daftar Tabel	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Gempa Bumi	3
2.2 Kekuatan Gempa Bumi	6
2.3 Penjalaran Gelombang Seismik	6
2.4 Struktur Geologi Sesar dan Kekar.....	8
2.5 Geometri Sesar(<i>fault</i>).....	11
2.6 Magnitudo	12
2.7 <i>Moment Magnitudo</i> (Mw).....	12
2.8 Kondisi Geologi Sumatra.....	13
2.9 Sistem Sesar Sumatra	15
2.10 Program ISOLA-GUI.....	17
2.11 Inversi <i>Waveform</i>	18
2.12 Perhitungan <i>Slip</i>	24

BAB III METODOLOGI	27
3.1 Diagram Alir Penelitian	27
3.2 Penentuan Lokasi Penelitian	28
3.3 <i>Full Waveform</i> dalam SAC.....	29
3.4 Memilih Stasiun.....	29
3.5 Menghitung Fungsi Green	34
3.6 Inversi CMT.....	34
3.7 <i>Plot CMT</i>	35
3.8 Analisa dan Pembahasan.....	37
3.9 Kesimpulan	38
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Analisa Data	39
4.1.1 Data Penelitian.....	39
4.1.2 Hasil Perhitungan.....	41
4.1.2.a Hasil Momen Tensor.....	41
4.1.2.b Hasil <i>Focal Mechanism</i>	41
4.1.2.c Hasil Perhitungan Panjang, Lebar, Luas, dan <i>Slip</i>	44
4.2 Pembahasan	46
4.2.1 <i>Focal Mechanism</i> Masing-Masing <i>Event</i>	46
4.2.2 <i>Momen Tensor</i>	48
4.2.3 <i>Focal Mechanism</i> dan <i>Slip</i>	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN.....	59
Lampiran a Data Rekaman Gempa Tiap Stasiun	59
Lampiran b <i>Fitting</i> Kurva	77
Lampiran c Gambar Hasil <i>Focal Mechanism</i>	81
BIODATA PENULIS	87



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Model Bumi Haslinger-Santosa (H-S).....	27
Tabel 4.1 Data <i>Event</i> yang Terjadi di Sumatera Utara	39
Tabel 4.2 Nama Stasiun yang Digunakan dalam Penelitian	39
Tabel 4.3 Momen Tensor untuk Gempa Sumatera Utara	41
Tabel 4.4 Bidang Sesar dan <i>Auxiliary Plane</i> untuk Masing- Masing <i>Event</i>	41
Tabel 4.5 <i>Beach Ball</i> dan <i>Hcplot</i> untuk Masing-Masing <i>Event</i>	42
Tabel 4.6 Perbandingan <i>Beach Ball</i> Penelitian dengan Katalog.	43
Tabel 4.7 Besar Panjang, Lebar, Luas, dan <i>Slip</i> Sesar dari Masing-Masing <i>Event</i>	45
Tabel 4.8 Besar <i>Moment Seismic</i> dari Perhitungan, Data, dan Katalog untuk Masing-Masing <i>Event</i>	45



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gerakan Dasar dari Sesar: Sesar Mendatar, Sesar Turun, dan Sesar Naik	3
Gambar 2.2	Pola Pergerakan Gelombang P dan Gelombang S..	8
Gambar 2.3	Sesar Normal.....	9
Gambar 2.4	Sesar Mendatar.....	9
Gambar 2.5	Sesar Translasi (Sesar Naik)	10
Gambar 2.6	Sesar <i>Oblique</i> (Sesar Diagonal)	10
Gambar 2.7	Kekar Tarik (Kiri), Kekar Gerus (Tengah), dan Kekar <i>Hybrid</i> (Kanan).....	11
Gambar 2.8	Sistem Sesar Sumatra	15
Gambar 2.9	Geometri Sesar dengan Bidang Normal yang Membentuk Sudut Terhadap Bidang Horizontal dan Vertikal.....	22
Gambar 2.10	Hubungan Momen Tensor Pilihan dan <i>Focal Mechanism</i> yang Terkait	23
Gambar 2.11	Tipe Sesar dalam Melakukan Analisa Dasar dari Jenis-Jenis Sesar	24
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3.2	Peta Provinsi Sumatera Utara	28
Gambar 3.3	Pengambilan Data dari Website <i>www.webdc.eu</i> ..	28
Gambar 3.4	Proses Konversi Data dari Format <i>Seed</i> ke <i>SAC</i> ..	29
Gambar 3.5	Tampilan Awal Program ISOLA-GUI.....	29
Gambar 3.6	Tampilan Tampilan <i>SAC Import</i> Program ISOLA-GUI.....	30
Gambar 3.7	<i>Input</i> Identitas Gempa	31
Gambar 3.8	Penentuan Stasiun Gempa	33
Gambar 3.9	<i>Import</i> Data <i>SAC</i>	33
Gambar 3.10	<i>Instrumental Correction</i> dari Data Gempa Serta Penyetaraan <i>Origin Time</i>	33
Gambar 3.11	Penentuan <i>Multiple Point Source</i>	33
Gambar 3.12	Proses Perhitungan Fungsi Green	34

Gambar 3.14 (A). <i>Fitting Kurva Displacement</i> antara Data Sintetik dengan Data Observasi. (B). Hasil Solusi <i>Centroid Moment Tensor</i> dari Gempa	36
Gambar 3.15 <i>Plotting</i> Bidang Patahan dan <i>Auxiliary Plane</i> Gempa.....	37
Gambar 4.1 Lokasi Stasiun dan <i>Event</i> (A).01-05-2014, 01-12-2013, 02-07-2013, dan 21-01-2013 (B).10-01-2013 dan 25-07-2012 (GMT)	40
Gambar 4.2 Hasil <i>Fitting Kurva Displacement</i> dari Data <i>Event</i> Gempa Tanggal 01/05/2014 Pukul 14:35:40 WIB.....	49
Gambar 4.3 Sistem Sesar yang Ada di Sumatera, SFZ, MFZ, dan Zona Subduksi	52
Gambar 4.4 Posisi <i>Beach Ball</i> Menggambarkan Posisi <i>Epicenter</i> dengan Besar <i>Beach Ball</i> Bervariasi yang Ditentukan oleh Besar Momen Tensor Gempa (<i>GMT</i>).....	52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pulau Sumatra merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang cukup unik dengan kondisi geologinya. Selain menjadi pulau terbesar ke enam di dunia, Sumatra memiliki kondisi geologi yang unik. Kondisi geologi yang begitu unik disebabkan letaknya yang berada pada daerah tumbukan dua lempeng besar yaitu Lempeng Indo-Australia di bagian selatan dan Lempeng Eurasia dibagian utara yang ditandai dengan terdapatnya pusat-pusat gerakan tektonik di Kepulauan Mentawai dan sekitarnya. Sejarah pulau Sumatra berhubungan erat dengan dimulainya peristiwa pertumbukan antara Lempeng India-Australia dan Asia Tenggara sekitar 45,6 juta tahun yang lalu. Gerakan Lempeng Indo-Australia yang semula mempunyai kecepatan 86 milimeter/tahun menurun menjadi 40 milimeter/tahun karena terjadi proses tumbukan tersebut (Sih dan Natawidjaja, 2000).

Akibat dari aktivitas tektonik yang banyak, diperlukan sebuah analisa pola pergeseran dari tumbukan antar lempeng pada zona subduksi dan pergeseran dari sesar yang membentang dari Sumatra Utara sampai Sumatra Selatan yang dinamakan SFZ (*Sumatran Fault Zone*) (Madlazim, 2010). Dengan adanya gempa di wilayah Sumatra Utara dapat dilakukan analisa pola bidang sesarnya yang nantinya akan mempermudah dalam mengetahui pola geometri dari patahan yang ada di zona subduksi yang dihasilkan dari gesekan antar Lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia maupun sesar aktif dari *Sumatra Fault Zone*.

Oleh karena itu, untuk mengetahui pola bidang sesarnya ditentukan dari *focal mechanism* yang didapat dari penentuan momen tensor dari bidang sesar akibat gempa yang terjadi serta besar *slip* dari sesar. Dalam hal ini akan digunakan informasi data gempa yang terjadi di wilayah Sumatra Utara pada tahun 2012-2014.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dari tugas akhir ini adalah

1. Bagaimana menentukan momen tensor dari *event* gempa yang terjadi?
2. Bagaimana menentukan pola bidang sesar dari *focal mechanism*?
3. Berapa besar *slip* dari sesar yang ada di wilayah Sumatra Utara?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah,

1. Wilayah penelitian gempa berada di Sumatra Utara.
2. *Event* yang digunakan terjadi pada tahun 2012-2014
3. Magnitudo gempa yang diteliti lebih dari sama dengan 5,6 SR (Skala *Richter*).
4. Penelitian ini dibatasi hanya pada penentuan momen tensor dan *focal mechanism* gempa dan *slip*-nya.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menentukan momen tensor dari event gempa yang terjadi.
2. Menentukan pola bidang sesar dari analisa *focal mechanism*.
3. Menentukan besar *slip* dari sesar yang ada di wilayah Sumatra Utara.

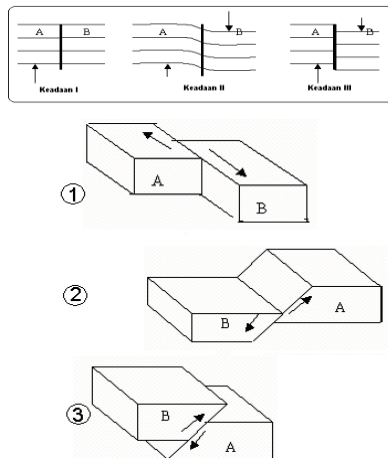
1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat mengetahui pola bidang sesar dari wilayah Sumatra Utara dan besar slip yang terjadi pada masing-masing *event* dalam periode tahun 2012-2014.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gempa Bumi

Gempa bumi tektonik terjadi karena adanya proses pergerakan lempeng yaitu berupa tumbukan, pelipatan, pergeseran, dan penyusupan yang berpengaruh terhadap media yang dilewati proses tersebut. Di daerah pertemuan lempeng akan timbul suatu tegangan diakibatkan oleh tumbukan dan geseran antar lempeng serta sifat-sifat elastisitas batuan. Tegangan pada batuan akan terkumpul terus-menerus sehingga sesuai dengan karakteristik batuan yang akan sampai pada titik patah, energi yang terkumpul selama terjadi proses tegangan akan dilepaskan. Waktu pelepasan itulah gempa bumi terjadi. Gambar 2.1 memperlihatkan mekanisme gempa bumi yang menjadi sumber gempa tektonik. Garis tebal vertikal menunjukkan pecahan atau sesar pada bagian bumi yang padat (Abidin dan Heri Andreas, 2009).



Gambar 2.1. Gerakan Dasar dari Sesar: Sesar Mendatar, Sesar Turun, Dan Sesar Naik.

Pada keadaan I menunjukkan suatu lapisan yang belum terjadi perubahan bentuk geologi. Karena di dalam bumi terjadi gerakan yang terus-menerus, maka akan terdapat *stress* yang lama kelamaan akan terakumulasi dan mampu merubah bentuk geologi dari lapisan batuan (Klinge dan Kahke, 1991).

Keadaan II menunjukkan suatu lapisan batuan telah mendapat dan mengandung *stress* dimana telah terjadi perubahan bentuk geologi. Daerah A mendapat *stress* ke atas, sedangkan daerah B mendapat *stress* ke bawah. Proses ini berjalan terus sampai *stress* yang terjadi di daerah ini cukup besar untuk merubahnya menjadi gesekan antara daerah A dan daerah B. Lapisan batuan yang sudah tidak mampu lagi untuk menahan *stress*, akan mengakibatkan suatu pergerakan atau perpindahan yang tiba-tiba sehingga terjadilah patahan. Peristiwa pergerakan secara tiba-tiba ini disebut gempa bumi.

Pada keadaan III menunjukkan lapisan batuan yang sudah patah karena adanya pergerakan yang tiba-tiba dari batuan tersebut. Gerakan perlahan-lahan sesar ini akan berjalan terus, sehingga seluruh proses di atas akan diulangi lagi dan sebuah gempa akan terjadi lagi setelah beberapa waktu lamanya, demikian seterusnya. Teori Reid ini dikenal dengan nama "*Elastic Rebound Theory*" (Kadir, 1996).

Gempa bumi jika diklasifikasikan berdasarkan sebab terjadinya dapat dibedakan sebagai berikut (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.

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 runtuhan 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.

Singkatnya gempa bumi merupakan gerakan tanah yang terjadi secara tiba-tiba dan bersifat *transient* (sesaat) dimana sumber getarannya berasal dari mantel bumi atau kerak bumi yang dapat menyebabkan kerusakan di permukaan bumi. Hampir 90% gempa bumi yang terjadi adalah gempa tektonik dan sisanya adalah gempa bumi vulkanik dan runtuhan.

Menurut teori lempeng tektonik, permukaan bumi terpecah menjadi beberapa lempeng tektonik besar. Lempeng tektonik adalah segmen keras kerak bumi yang mengapung di atas astenosfer yang cair dan panas. Oleh karena itu, lempeng tektonik ini bebas untuk bergerak dan saling berinteraksi satu sama lain. Daerah perbatasan lempeng-lempeng tektonik merupakan tempat-tempat yang memiliki kondisi tektonik yang aktif, yang menyebabkan gempa bumi, gunung berapi, dan pembentukan dataran tinggi. Teori lempeng tektonik merupakan kombinasi dari teori sebelumnya yaitu teori pergerakan benua (*Continental Drift*) dan pemekaran dasar samudra (*Sea Floor Spreading*). 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, sedangkan energi gelombang menjalar melalui medium elastis yang dilewatinya dan dapat dirasakan sangat kuat di daerah terjadinya gempa bumi tersebut (Nurcahya dan Brotopuspito, 2004).

2.2 Kekuatan Gempa Bumi

Kekuatan gempa bumi adalah ukuran kekuatan gempa bumi yang menggambarkan besarnya energi yang terlepas pada saat gempa bumi terjadi dan merupakan hasil pengamatan seismograf. Kekuatan gempa bumi sering disebut *Magnitude* atau magnitudo.

Berdasarkan kekuatan atau magnitudonya, gempa bumi dapat dikelompokkan menjadi 6 (Nurcahya dan Brotopuspito, 2004):

1. Gempa bumi sangat besar dengan skala magnitudo lebih besar dari 8.
2. Gempa bumi besar dengan skala magnitudo antara 6 sampai 8.
3. Gempa bumi sedang dengan skala magnitudo antara 4 sampai 6.
4. Gempa bumi kecil dengan skala magnitudo antara 3 sampai 4.
5. Gempa bumi mikro dengan skala magnitudo antara 1 sampai 3.
6. Gempa bumi ultra mikro dengan skala magnitudo lebih kecil dari 1.

2.3 Penjalaran Gelombang Seismik

Dalam 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. Ada dua tipe gelombang elastik dasar, yaitu:

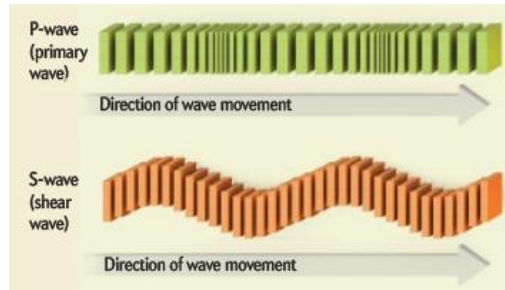
1. Gelombang yang mengakibatkan kompresi dan peregangan material elastik dalam arah perambatan gelombang.
2. Gelombang yang mengakibatkan pergeseran material elastik dalam bidang tegak lurus arah perambatan gelombang.

Macam gelombang di atas disebut sebagai gelombang P dan S. Gelombang P merupakan gelombang primer yang merambat lebih cepat dan datang pertama kali serta tajam (kandungan frekuensi yang lebih tinggi). Gelombang ini dapat merambat melalui medium padat, cair, dan gas. Kecepatan gelombang P dalam padatan kira-kira sekitar 1,8 km/s sampai 7 km/s, dan periodenya terletak antara 5 detik sampai 7 detik. Gelombang S merupakan gelombang sekunder yaitu gelombang transversal. Amplitudo gelombang S lebih besar dari gelombang P dan kandungan frekuensi yang lebih rendah. Periode gelombang S berada antara 11 detik sampai 13 detik. Gelombang S tidak dapat merambat pada medium gas atau cairan, sehingga tidak ada gelombang S yang dapat merambat dalam inti bumi luar dan lautan.

Gelombang gempa bumi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu gelombang badan dan gelombang permukaan (Goncalves dan Abry, 1993).

1. Gelombang Badan (*Body Wave*)

Gelombang badan adalah gelombang yang merambat melalui lapisan dalam bumi. Gelombang ini terdiri dari 2 macam gelombang yaitu gelombang longitudinal dan transversal. Gelombang longitudinal, dimana gerakan partikelnya menjalar searah dengan arah penjarangan gelombang. Gelombang longitudinal ini dikenal dengan nama gelombang primer (P), karena gelombang ini tiba lebih dahulu pada permukaan bumi. Gelombang transversal, yaitu gelombang dimana gerakan partikelnya menjalar dengan arah tegak lurus terhadap arah penjarangan gelombang. Gelombang transversal ini dikenal dengan nama gelombang S (sekunder), karena gelombang ini tiba pada permukaan bumi setelah gelombang primer.



Gambar 2.2 Pola Pergerakan Gelombang P dan Gelombang S

2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang permukaan yaitu gelombang yang menjalar sepanjang permukaan dan mempunyai amplitudo yang sangat besar atau pada suatu lapisan dalam bumi, gelombang ini terdiri dari:

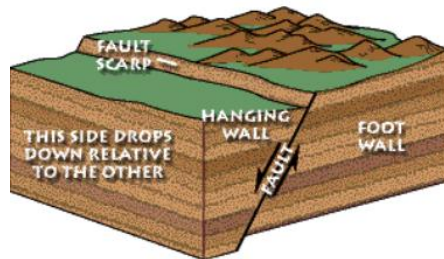
- a. Gelombang *Love* dan Gelombang *Rayleigh* yaitu gelombang yang menjalar melalui permukaan yang bebas dari bumi.
- b. Gelombang *Stonely*, seperti Gelombang *Rayleigh* tetapi menjalarnya melalui batas dua lapisan di dalam bumi.
- c. Gelombang *Channel*, yang menjalar melalui lapisan yang berkecepatan rendah di dalam bumi.

2.4 Struktur Geologi Sesar dan Kekar

Gempa terjadi pada bidang sesar (*fault*). Sesar merupakan rekahan atau zona rekahan pada batuan yang memperlihatkan pergeseran. Berikut ini ada empat jenis sesar, yaitu sebagai berikut:

1. Sesar Normal

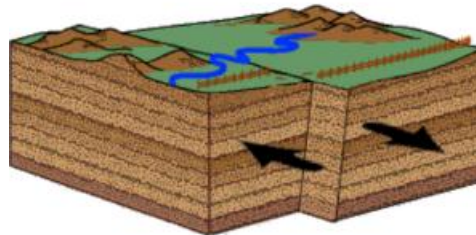
Sesar normal disebut juga sesar turun. Sesar ini relatif turun terhadap *foot wall*, bidang sesarnya mempunyai kemiringan yang besar.



Gambar 2.3 Sesar Normal

2. Sesar Mendatar

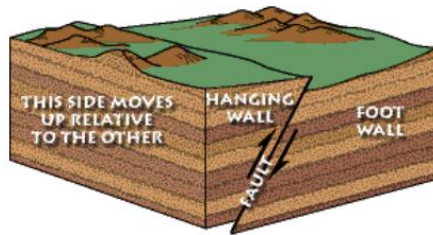
Sesar mendatar sering disebut sesar *strike-slip*. Sesar ini bergerak secara *horizontal*. Sesar mendatar ditentukan dengan menghadap bidang sesar, bila bidang di depan bergerak ke kiri disebut mendatar *sinistral* dan sebaliknya sesar mendatar *dekstral*.



Gambar 2.4 Sesar *Strike Slip*

3. Sesar Translasi (Sesar Naik)

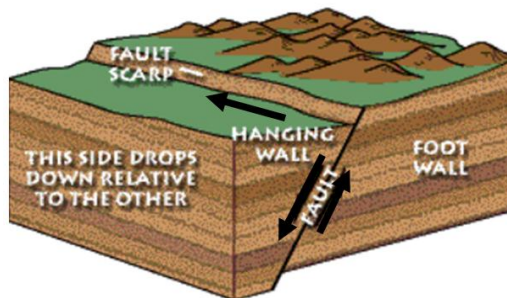
Sesar naik atau sesar translasi mengalami pergeseran sepanjang garis lurus. Biasanya *hanging wall* relatif naik terhadap *foot wall*, dengan kemiringan bidang sesar besar. Sesar ini biasanya disebut juga sesar naik. Umumnya sesar normal dan sesar naik pergerakannya hanya vertikal, jadi sering disebut sebagai sesar *dip slip*.



Gambar 2.5 Sesar Naik

4. Sesar *Oblique* (Sesar Diagonal)

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



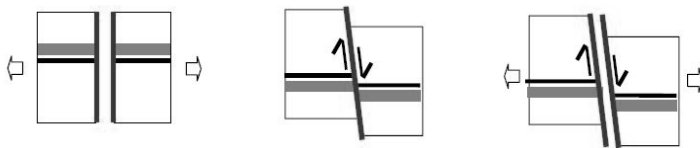
Gambar 2.6 Sesar *Oblique*

5. Kekar

Kekar (*Joint*) merupakan salah satu struktur yang sulit diamati. Sebab kekar dapat terbentuk pada setiap waktu kejadian geologi, misalnya sebelum terjadinya suatu lipatan atau terbentuknya semua struktur tersebut. Hal ini yang juga merupakan kesulitan adalah tidak adanya atau relatif kecil pergeseran dari kekar.

Secara umum kekar dibedakan menjadi empat, yaitu:

1. Kekar tarik, yaitu rekahan yang membuka akibat gaya ekstensi yang berarah tegak lurus terhadap arah rekahan.
2. Kekar gerus, yaitu kekar yang biasanya berpasangan dan terdapat pergeseran yang diakibatkan oleh gaya kompresi.
3. Kekar *hybrid*, yaitu kekar yang berpenampakan sebagai kekar gerus yang membuka, kombinasi antara kekar gerus dan kekar tarik.
4. Kekar tarik tak beraturan, yaitu kekar yang arah kekarnya tak beraturan, sering diakibatkan oleh *hydraulic fracturing*.



Gambar 2.7 Kekar Tarik (kiri), Kekar Gerus (tengah) dan Kekar Hybrid (kanan) (Masykur, 2011).

2.5 Geometri Sesar (*fault*)

Proses *rupture* yang terjadi pada sesar merupakan proses yang kompleks. *Rupture* merupakan fungsi ruang dan waktu. *Slip* merupakan vektor perpindahan dari bidang sesar. Bentuk *rupture* tidak beraturan dan memiliki gaya-gaya dalam berbagai arah. Berdasarkan geometri sesar, digambarkan dengan menetapkan tiga vektor Eigen sudut yaitu: *strike*, *dip*, dan *slip* (Madlazim, 2011).

1. *Strike*

Strike adalah sudut yang digunakan untuk menentukan orientasi *fault* dan diukur searah jarum jam dari utara. Sebagai contoh, *strike* 0° atau 180° menunjukkan *fault* yang berorientasi pada arah utara-selatan, 90° atau 270° menunjukkan orientasi *fault* ke timur-barat. Sudut *strike* mulai dari 0° sampai kurang dari 360° .

2. *Dip*

Dip adalah sudut yang menggambarkan kecuraman permukaan *fault*. Sudut ini diukur dari permukaan bumi, atau paralel bidang sesar ke permukaan bumi. Kemiringan *fault horizontal* adalah nol (biasanya ditetapkan dalam 0°), dan kemiringan *fault* vertikal adalah 90° . Sudut *dip* antara 0° sampai 90° . Bagian batuan yang berada di atas *fault* disebut *hanging wall*, bagian batuan yang berada di bawah *fault* disebut *foot wall*.

3. *Slip*

Dip dan *strike* menggambarkan orientasi *fault*, sedangkan ke arah gerakan *fault* diwakili oleh parameter *slip*. *Slip* ini memiliki dua komponen, yaitu jarak pergeseran, yang menginformasikan seberapa jauh batuan itu bergerak, dan arahnya (vektor) (Madlazim, 2011).

2.6 Magnitudo

Magnitudo adalah ukuran logaritmik dari kekuatan gempa bumi. Magnitudo tidak berhubungan langsung dengan sumber gempa dan bertujuan untuk penyediaan perhitungan cepat yang sederhana. Magnitudo dipakai untuk analisis peninjauan awal dari data gempa (katalog) (Afnimar, 2009).

2.7 Moment Magnitudo (M_w)

Untuk mengurangi sebagian kesulitan dari *magnitude saturation*, Kanamori (1977) memperkenalkan konsep dari *moment magnitude* pada ilmu kegempaan. Rumusan dari *moment magnitude* adalah sebagai berikut:

$$M_w = (\log M_o - 9.1) / 1.5 \quad (2.1)$$

dimana M_o adalah *moment seismik*.

Di dalam rumusan tersebut, *moment seismik* digambarkan oleh

$$M_o = \mu \bar{D} S \quad (2.2)$$

dimana μ adalah rigiditas, \bar{D} adalah *offset* rata-rata pada *fault*, dan S adalah area *fault*.

Momen seismik adalah salah satu yang paling akurat menentukan parameter-parameter sumber seismik. Bagi banyak gempa-gempa besar, M_o telah ditentukan dengan menggunakan gelombang tubuh periode panjang, gelombang permukaan, osilasi bebas, dan data geodesi. Dalam pendekatan ini, mencoba untuk memperpanjang M_s di luar titik dari saturasi total dan juga menyediakan kesinambungan dengan gempa-gempa besar. Bagaimanapun juga, penentuan M_o adalah lebih sulit daripada mengukur magnitudo, meskipun analisis seismik modern telah secara rutin menyediakan M_o bagi seluruh *event-event* global yang lebih besar dari $M_w = 5.0$ (Lay dan Wallace, 1995).

2.1 Kondisi Geologi Sumatra

Lempeng Indo-Australia bertabrakan dengan Lempeng Eurasia di lepas pantai Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara, sedangkan dengan Pasifik di utara Irian dan Maluku utara. Salah satu hasil pertemuan ketiga ini membentuk pulau Sumatra. Pulau Sumatra dicirikan oleh tiga sistem tektonik. Berurutan dari barat ke timur adalah sebagai berikut, zona subduksi *oblique* dengan sudut penunjaman yang landai, Sesar Mentawai dan zona sesar besar Sumatra. Zona subduksi di Pulau Sumatra yang sering sekali menimbulkan gempa tektonik memanjang membentang sampai ke Selat Sunda dan berlanjut hingga selatan Pulau Jawa .

Subduksi ini mendesak lempeng Eurasia dari bawah Samudra Hindia ke arah barat laut di Sumatra dan *frontal* ke utara terhadap Pulau Jawa dengan kecepatan pergerakan yang bervariasi. Puluhan hingga ratusan tahun, dua lempeng itu saling menekan, namun Lempeng Indo-Australia dari selatan bergerak lebih aktif. Pergerakannya yang hanya beberapa milimeter hingga beberapa sentimeter per tahun ini memang tidak terasa oleh manusia. Karena dorongan Lempeng Indo-Australia terhadap bagian utara Sumatra kecepatannya hanya 5,2 cm per tahun, sedangkan yang di bagian selatannya kecepatannya 6 cm per tahun. Pergerakan lempeng di daerah barat Sumatra yang miring

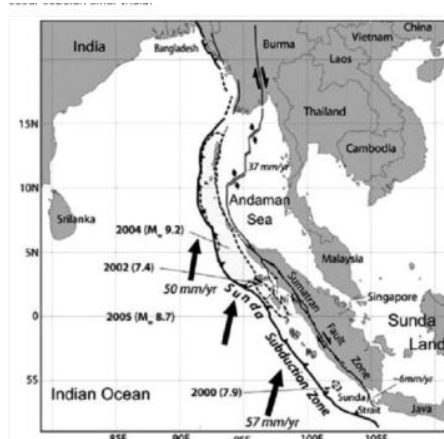
posisinya ini lebih cepat dibandingkan dengan penyusupan lempeng di selatan Jawa.

Perubahan posisi Sumatra yang sebelumnya berarah E-W menjadi SE-NW dimulai pada Eosen-Oligosen. Perubahan tersebut juga mengindikasikan meningkatnya pergerakan sesar mendatar Sumatra seiring dengan rotasi. Subduksi *oblique* dan pengaruh sistem mendatar Sumatra menjadikan kompleksitas regim *stress* dan pola *strain* pada Sumatra (Darman dan Sidi, 2000). Karakteristik Awal Tersier Sumatra ditandai dengan pembentukan cekungan-cekungan belakang busur sepanjang Pulau Sumatra, yaitu Cekungan Sumatra Utara, Cekungan Sumatra Tengah, dan Cekungan Sumatra Selatan Sumatra dapat dibagi menjadi 5 bagian (Darman dan Sidi, 2000).

Penunjaman yang terjadi di sebelah barat Sumatra tidak benar-benar tegak lurus terhadap arah pergerakan Lempeng India-Australia dan Lempeng Eurasia. Lempeng Eurasia bergerak relatif ke arah tenggara, sedangkan Lempeng India-Australia bergerak relatif ke arah timur laut. Karena tidak tegak lurus inilah maka Pulau Sumatra dirobek sesar mendatar yang dikenal dengan nama Sesar Semangko.

Penunjaman Lempeng India–Australia juga mempengaruhi geomorfologi Pulau Sumatra. Adanya penunjaman menjadikan bagian barat Pulau Sumatra terangkat, sedangkan bagian timur relatif turun. Hal ini menyebabkan bagian barat mempunyai dataran pantai yang sempit dan kadang-kadang terjal. Pada umumnya, terumbu karang lebih berkembang dibandingkan dengan berbagai jenis bakau. Bagian timur yang turun akan menerima tanah hasil erosi dari bagian barat (yang bergerak naik), sehingga bagian timur memiliki pantai yang datar lagi luas. Di bagian timur, gambut dan bakau lebih berkembang dibandingkan terumbu karang.

2.2 Sistem Sesar Sumatra



2.8 Sistem Sesar Sumatra

Pulau Sumatra tersusun atas dua bagian utama, sebelah barat didominasi oleh keberadaan lempeng samudra, sedangkan sebelah timur didominasi oleh keberadaan lempeng benua. Berdasarkan gaya gravitasi, magnetisme dan seismik ketebalan sekitar 20 kilometer, dan ketebalan lempeng benua sekitar 40 kilometer (Hamilton, 1979).

Sejarah tektonik Pulau Sumatra berhubungan erat dengan dimulainya peristiwa pertumbukan antara Lempeng India-Australia dan Asia Tenggara, sekitar 45,6 juta tahun yang lalu, yang mengakibatkan rangkaian perubahan sistematis dari pergerakan relatif lempeng-lempeng disertai dengan perubahan kecepatan relatif antar lempengnya berikut kegiatan ekstrusi yang terjadi padanya. Gerak Lempeng India-Australia yang semula mempunyai kecepatan 86 milimeter/tahun menurun menjadi 40 milimeter/tahun karena terjadi proses tumbukan tersebut. Setelah itu kecepatan mengalami kenaikan sampai sekitar 76 milimeter/tahun (Sieh dan Natawidjaja, 1994). Proses tumbukan ini pada akhirnya mengakibatkan terbentuknya banyak sistem sesar sebelah timur India (Sieh dan Natawidjaja, 1994).

Ada 4 jenis segmen yang terdapat di Sumatra Utara, yaitu:

1. Segmen Barumun (Sumut)

Panjang : 125 Km

Slip rate : 1 cm/thn

Slip Accumulation per 100 thn : 10 cm

Slip Accumulation per 200 thn : 20 cm

Periode pengulangan 100 thn : 7.2 Mw

Periode pengulangan 200 thn : 7.4 Mw

2. Segmen Angkola (Sumut)

Panjang : 160 Km

Slip rate : 1 cm/thn

Slip Accumulation per 100 thn : 10 cm

Slip Accumulation per 200 thn : 20 cm

Periode pengulangan 100 thn : 7.2 Mw

Periode pengulangan 200 thn : 7.4 Mw

3. Segmen Toru (Sumut)

Panjang : 95 Km

Slip rate : 2,7 cm/thn

Slip Accumulation per 100 thn : 27 cm

Slip Accumulation per 200 thn : 54 cm

Periode pengulangan 100 thn : 7.5 Mw

Periode pengulangan 200 thn : 7.7 Mw

4. Segmen Renun (Sumut)

Panjang : 220 Km

Sliprate : 2,7 cm/thn

Slip Accumulation per 100 thn : 27 cm

Slip Accumulation per 200 thn : 54 cm

Periode pengulangan 100 thn : 7.5 Mw

Periode pengulangan 200 thn : 7.7 Mw

Aktivitas sesar Sumatra dipicu oleh adanya interaksi pertemuan Lempeng di Samudra Hindia yang membentang di sebelah barat Sumatra hingga ke selatan Jawa dan Bali. Dalam hal ini, Lempeng Indo-Australia menujam Lempeng Eurasia. Di barat Sumatra berdesakan Lempeng Indo-Australia yang lebih aktif

mengarah ke utara dengan kecepatan 7 sentimeter per tahun, sedangkan di selatan Jawa kecepatannya 6 sentimeter per tahun.

Adanya subduksi aktif dan patahan di Sumatra menyebabkan munculnya Bukit Barisan sejajar patahan yang merupakan lapisan permukaan tanah yang terangkat. Sementara itu, di Selat Sunda terjadi mekanisme tekanan dan regangan yang menimbulkan struktur geologi yang unik seperti munculnya Gunung Krakatau di selat itu.

2.3 Program ISOLA-GUI

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

Program ISOLA berdasarkan pada representasi *multiple point-source* dan metode iterasi dekonvolusi seperti yang digunakan oleh Kikuchi dan Kanamori (1991) untuk data gempa teleseismik. Perhitungan Fungsi Green menggunakan metode *discrete wave number* 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.

$$d = Gm \quad (2.3)$$

yang dapat diselesaikan dengan metode *least-square*

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (2.4)$$

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,

$$\text{varred} = 1 - \frac{|d - s|^2}{d^2} \quad (2.5)$$

Nilai 1 menunjukkan kurva data sintetik berimpit dengan kurva data observasi, apabila 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 data residual yang berpengaruh pada nilai *varred*. Selain jumlah *subevent*, proses *filtering* berpengaruh pada periode yang akan digunakan oleh program ISOLA-GUI dari data seismogram dalam proses perhitungan inversi (Sokos dan Zahrandik, 2009).

2.4 Inversi *Waveform*

Informasi mengenai parameter gempa (hiposenter, kekuatan gempa, momen seismik, momen tensor, dan orientasi bidang sesar), pola, dan luas bidang sesar penting untuk diketahui karena hal ini terkait dengan resiko yang diakibatkan oleh gempa bumi di permukaan. Untuk mendapatkan parameter sumber gempa bumi dapat dilakukan dengan metode inversi *waveform* tiga komponen, yakni proses inversi yang melibatkan ketiga komponen dari seismogram meliputi komponen vertikal, komponen utara-selatan, dan komponen barat-timur.

Metode inversi merupakan salah satu metode geofisika yang kerap kali digunakan untuk memprediksi kenampakan di bawah permukaan bumi. Dalam ilmu geofisika, teori inversi secara luas dikembangkan dengan tujuan untuk mengambil kesimpulan tentang interior bumi dari sekumpulan data fisika yang diamati di permukaan bumi. Pemecahan inversi biasanya

dilakukan dengan mencari suatu model optimal dimana respon yang dihasilkan mendekati dengan data pengamatan. Hal ini dilakukan dengan meminimalkan suatu fungsi objektif tertentu yang menggambarkan seberapa dekat data pengamatan dengan respon hasil perhitungan (data sintetis) suatu model.

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 linier. 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:

$$u_j(t) = \sum_{q=1}^5 \int d\tau \iiint_V G_{jq}(t-\tau, x, y, z) M_q(\tau, x, y, z) dV + e_o \quad (2.6)$$

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

$$\begin{aligned} u_j(t) &= \sum_{q=1}^5 \int G_{jq}(t-\tau, x_c, y_c, z_c) M_q'(\tau, x_c, y_c, z_c) d\tau + e_o + e_m \\ &= \sum_{q=1}^5 M_q'' \int G_{jq}(t-\tau, x_c, y_c, z_c) T(t) d\tau + e_o + e_m \quad (2.7) \end{aligned}$$

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 mengasumsikan $e_o + e_m$ menjadi Gaussian dengan nilai tengah nol dan kovarian σ_j^2 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 (2.7) dapat ditulis ulang dalam bentuk vektor:

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{G}(T(t), x_c, y_c, z_c)_j \mathbf{m} + \mathbf{e}_j \quad (2.8)$$

Juga dapat ditulis ulang dalam bentuk vektor sederhana seperti berikut :

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

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

dan dimana secara berturut-turut d dan e adalah N -dimensi data dan vektor kesalahan, m adalah vektor parameter model 6-dimensi, G adalah $N \times 6$ koefisien matriks. Penyelesaian

persamaan matriks di atas diperoleh dengan menggunakan pendekatan *least square*, jika bentuk gelombang pengamatan (d) dan konvolusi Fungsi Green dengan fungsi waktu dari sumber (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 :

$$M_{xx} = -M_o (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi + \sin 2\delta \sin \lambda \sin^2 \phi) \quad (2.9)$$

$$M_{xy} = M_{yx} = M_o (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi + \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \lambda \sin 2\phi) \quad (2.10)$$

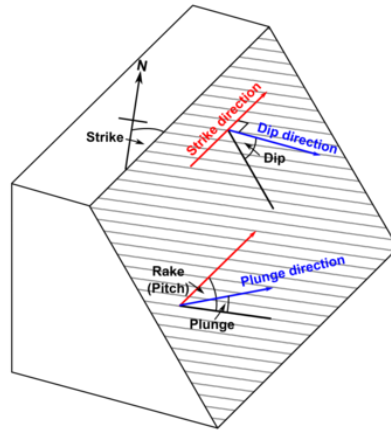
$$M_{xz} = M_{zx} = -M_o (\cos \delta \cos \lambda \cos \phi + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \phi) \quad (2.11)$$

$$M_{yy} = M_o (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi - \sin 2\delta \sin \lambda \cos^2 \phi) \quad (2.12)$$

$$M_{yz} = M_{zy} = -M_o (\cos \delta \cos \lambda \sin \phi - \cos 2\delta \sin \lambda \cos \phi) \quad (2.13)$$

$$M_{zz} = M_o \sin 2\delta \sin \lambda \quad (2.14)$$













dimana adalah ϕ *strike*, δ *dip*, λ *slip* (x: utara, y: timur, z: arah ke bawah). Untuk mengetahui posisi sudutnya, dapat dilihat pada ilustrasi berikut ini,



Gambar 2.9 Geometri Sesar dengan Bidang Normal yang Membentuk Sudut terhadap Bidang *Horizontal* dan Vertikal (Stein dan Wysession, 2003).

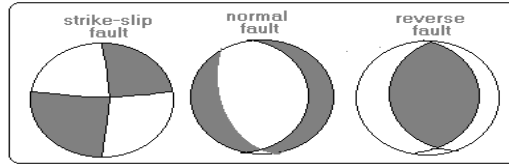
Jika kita asumsikan kecepatan gelombang P dan S dekat dengan area sumber gempa, kita dapat menentukan kedalaman hiposentral menggunakan *pick* pP dan sP . Informasi mekanisme patahan terkandung dalam bentuk radiasi. Jika kita sederhanakan penjelasan tentang inversi momen tensor, kita dapat memperkirakan komponen momen tensor (atau *focal mechanism*) untuk menyesuaikan amplitudo dari pengamatan 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 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).

Moment tensor	Beachball	Moment tensor	Beachball
$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$-\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$	

Gambar 2.10 Hubungan Momen Tensor Pilihan dan *Focal Mechanism* yang terkait (Stein Dan Wyssession, 2003).

Dalam gambar 2.10 baris paling atas menunjukkan sebuah *eksplosion* (kiri) dan *implosion* (kanan). 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 2.11. Tipe Sesar dalam Melakukan Analisa Dasar dari Jenis-Jenis Sesar.

2.5 Perhitungan Slip

Untuk validasi identifikasi sesar berdasarkan anomali variasi nilai gravitasi, maka dilakukan pengolahan mekanisme sumber gempa bumi dilakukan pengamatan pada deformasi kerak dengan perhitungan momen seismik untuk menghitung besarnya energi yang dilepaskan oleh gempa dengan memperhitungkan perpindahan yang terjadi di dalam *slip* di sepanjang sesar dan luas permukaan sesar yang mengalami *slip* (Hank dan Kanamori, 1979).

$$M_o = \mu \cdot A \cdot D \quad (2.15)$$

dimana :

M_o = momen seismik gempa (Nm),

μ = rigiditas

A = luas bidang sesar (m^2)

D = deformasi / dislokasi (m)

Dilakukan kalkulasi hubungan antara magnitudo gempa dengan momen seismik menurut persamaan (Wells dan Coppersmith, 1994).

$$\text{Log } M_o = 1,6 M_w + 16,1 \quad (2.16)$$

Beberapa parameter gempa yang akan dianalisa adalah momen seismik, lokasi atau episenter pusat gempa, kedalaman pusat gempa, dan mekanisme fokus dan geometri sesar. Untuk

panjang dan lebar dari deformasi dapat ditentukan dari daerah distribusi gempa utama (*main shock*), gempa-gempa kecil sebelum gempa utama (*fore shock*), dan gempa-gempa susulun (*after shock*). Magnitudo dari *fore shock* dan *after shock* selalu lebih kecil daripada *mainshock*. Secara empiris panjang, lebar, dan *slip fault* dapat ditentukan dengan melakukan interpolasi berdasarkan persamaan persamaan sebagai berikut (Papazachos dan Karakaisis, 2004).

1. Perhitungan *Strike-slip Fault*

a. Panjang sesar (L)

$$\text{Log } L = 0,59M - 2,30 \quad (2.17)$$

b. Lebar sesar (W)

$$\text{Log } W = 0,23M - 0,49 \quad (2.18)$$

c. Luas sesar (S)

$$\text{Log } S = 0,82M - 2,79 \quad (2.19)$$

2. Perhitungan *Dip-slip Fault*

a. Panjang sesar (L)

$$\text{Log } L = 0,55M - 2,19 \quad (2.20)$$

b. Lebar sesar (W)

$$\text{Log } W = 0,31M - 0,63 \quad (2.21)$$

c. Luas sesar (S)

$$\text{Log } S = 0,86M - 2,82 \quad (2.22)$$

dimana :

L = panjang slip (m)

W = lebar slip (m)

S = Luas slip (km²).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

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

1. Event Info

Pada tahap ini dimasukkan data mengenai informasi gempa yang terjadi di Sumatera Utara, mulai dari tanggal terjadinya gempa beserta waktunya mulai dari jam hingga detik, magnitudo, lintang, bujur gempa serta kedalaman gempa.

The screenshot shows a web-based form for entering earthquake event information. The form is organized into several panels:

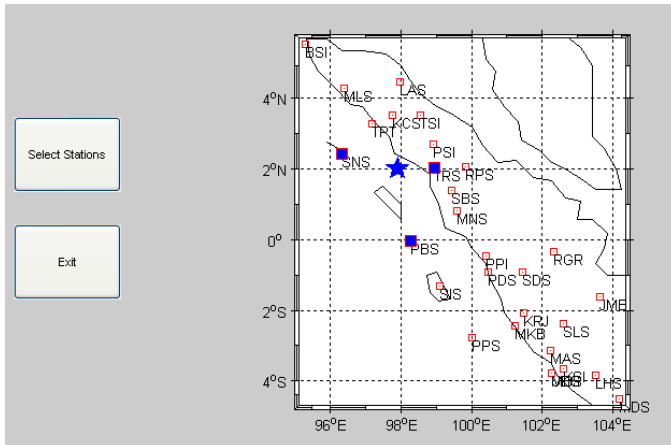
- Event Info:** Contains input fields for latitude (38.00, 50.00), longitude (21.00, 50.00), depth (10 km), and magnitude (6.1). It also includes a 'COMM->CODE' field and a 'Depth (km)' field with a value of 10.
- Event Origin Time:** Contains input fields for the hour (7), minute (37), and seconds (5) of the earthquake's occurrence.
- Comments:** Contains input fields for the date (20130702) and location agency (IA).
- Data start time:** Contains input fields for the hour (7), minute (37), and seconds (5) of the data recording start time.
- Data Options:** Contains a dropdown menu for 'Time Length (sec)' with options: 245.76, 409.6, 819.2, and 1638.4.

Buttons for 'Update' and 'Exit' are located on the right side of the form.

Gambar 3.7 Input Identitas Gempa

2. Station Selection

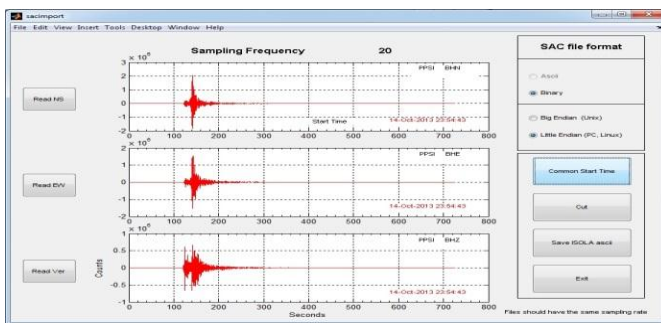
Setelah memasukkan mengenai informasi gempa, dilakukan pemilihan stasiun tempat data yang digunakan dalam pengolahan,



Gambar 3.8 Penentuan Stasiun Gempa

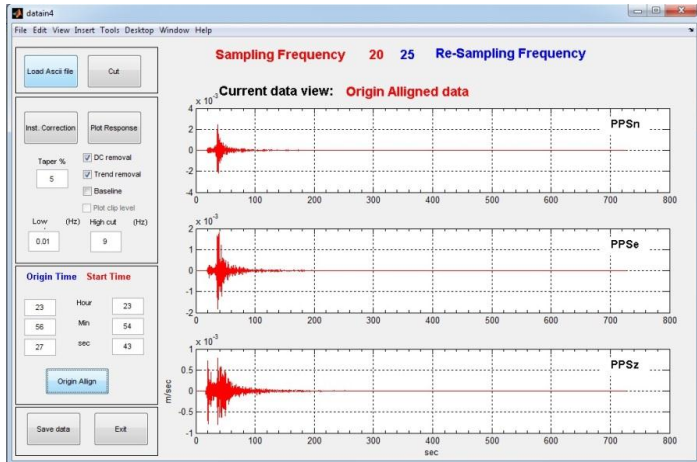
3. Raw Data Preparation

Sebelum masuk pada tahap ini dilakukan *import* data SAC ke dalam program untuk diolah,



Gambar 3.9 Import Data SAC

Setelah *importing* data SAC maka program akan menyimpan data SAC menjadi data ASCII dalam format *.dat*. Kemudian dilakukan *instrumental correction* yakni mengoreksi data dari setiap seismograf dan dilakukan penyetaraan waktu, *origin time* dari data gempa.



Gambar 3.10 Instrumental Correction Dari Data Gempa Serta Penyetaraan *Origin Time*.

4. Seismic Source Definition

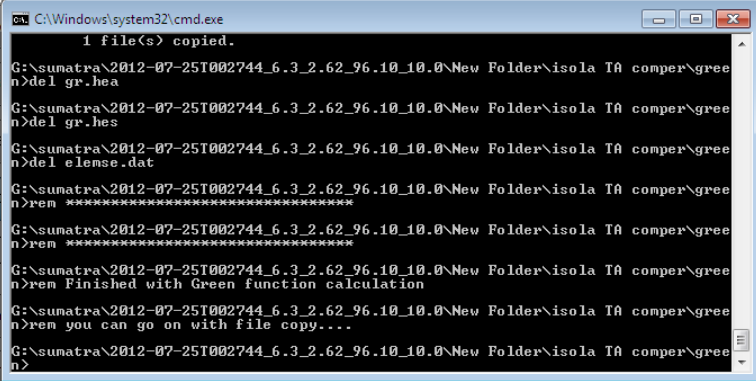
Program ini berdasarkan pada *multiple point source* (Sokos dan Zahrandik, 2009) sehingga diperlukan jumlah sumber gempa dugaan yang terjadi.

Lat	Lon	Depth
-1.81	100.36	57

Gambar 3.11 Penentuan *Multiple Point Source*

3.5 Menghitung Fungsi Green

Pada proses ini dilakukan perhitungan Fungsi Green. Proses ini merupakan tahap pengolahan menggunakan Fungsi Green. Setelah melalui tahapan ini, kemudian digunakan dalam proses inversi,



```

C:\Windows\system32\cmd.exe
1 file(s) copied.
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>del gr.heg
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>del gr.hes
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>del elease.dat
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>rem *****
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>rem *****
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>rem Finished with Green function calculation
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>rem you can go on with file copy...
G:\sumatra\2012-07-25T002744_6.3_2.62_96.10_10.0\New Folder\isola TA comper\gree
n>
  
```

Gambar 3.12 Proses Perhitungan Fungsi Green

3.6 Inversi CMT

Proses inversi CMT dilakukan untuk mendapatkan hasil mengenai kurva *displacement* antara data sintetik, dari model yang ada dengan data hasil observasi. Dalam tahapan ini dibutuhkan input berupa filter. Proses *filtering* yang berfungsi 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*. Pada tahapan Inversi CMT setelah melakukan *Running*, didapatkan hasil variasi reduksi. Apabila variasi reduksi kurang dari 0,45 maka dilakukan filtering kembali dengan memasukkan filter yang baru untuk mendapatkan hasil variasi reduksi yang bagus. Jika Hasil variasi reduksi masih dibawah 0,45 maka dilakukan proses pemilihan stasiun kembali agar hasil variasi reduksi mendekati 1.

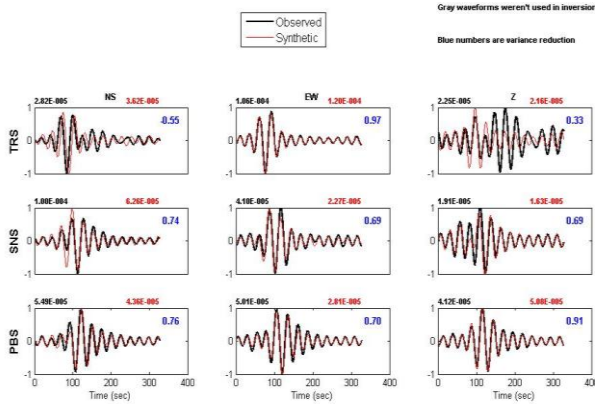
The screenshot shows the 'invert' software interface with the following sections:

- Info:** Time Length: 327.68, No of Sources: 10, No of Stations: 3, Min Time shifts (sec): -100, Max Time shifts (sec): 100.
- Filter (Hz):** filter (f1,f2,f3,f4), flat band-pass between f2, f3, cosine tapered between f1, f2 and between f3, f4. Parameters: f1: 0.005, f2: 0.05, f3: 0.05, f4: 0.055.
- Type of Inversion:**
 - Full MT:
 - Deviatoric MT:
 - DC constrained:
 - Fixed mechanism:
- (dt) Time Search (sec):** Strike: 0, Dip: 0, Rate: 0. Time Search parameters: Start: 0, End: 4, Time Step: 0.2, Trial Time shifts: 0, 5, 100.
- Number of Subevents:** 1
- Plot Correlation diagram:**
 - Convert to PNG:
 - Use Source Number:
 - Use Distance-Depth:
 - Plot DC% contours:
 - Draw Contours:
 - Use fixed interval:
- Plot Scale X:** 21, **Plot Scale Y:** 18, **Beachball Scale:** 0.35, **Font size:** 10, **Contour interval:** 0.1, **GMT Palette:** cool, Invert Palette.
- Results for Single source:** Source Number: 1, Time limits: [], Source limits: 1 to 10.
- Buttons:** Compute Weights, Reset Weights, Deselect Stations, Run, Exit.

Gambar 3.13 Penentuan Proses Inversi

3.7 Plot CMT

Setelah dilakukan inversi CMT, 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 Sumatera Utara.



(a)

MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (IA)

Origin time 20140501 14:35:40.00
 Lat 1.99 Lon 97.91 Depth 58

CENTROID

Trial source number : 21 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat 1.99 Lon 97.91
 Centroid Depth : 45
 Centroid time : +0.2 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 7.802e+017

Mw : 5.9

DC% : 79.8

CLM03 : 20.2

Var.red.(for stations used in inversion):0.78

Var.red.(for all stations) : 0.78

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver
131	77	59	TRS	+	+	+
21	33	155	SNS	+	+	+
			PBS	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

245 25

T-axis Azimuth Plunge

8 49

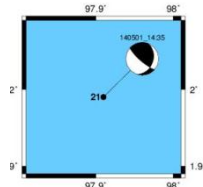
Nor Nct Mep

3.078 2.076 -5.154

Nst Msp Mfp

5.479 -2.901 1.501

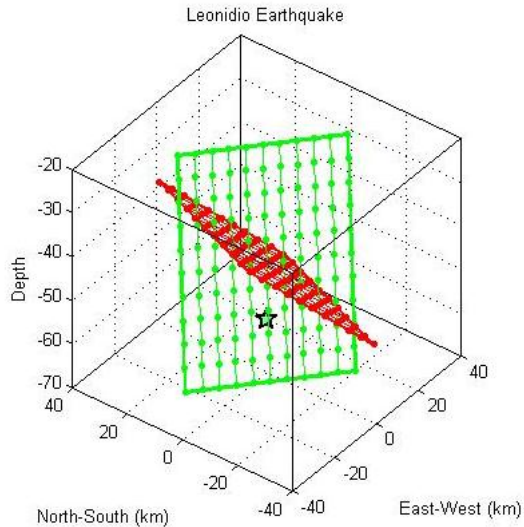
Exponent (Nm) : 17



(b)

Gambar 3.14 (a) *Fitting Kurva Displacement* antara Data Sintetik dengan Data Observasi. (B) Hasil Solusi *Centroid Moment Tensor* dari Gempa.

Ketika telah mendapatkan solusi momen tensor, untuk mengetahui bidang patahan dan *auxiliary plane*, maka digambarkan menggunakan program *hcplot*.



Gambar 3.15 Plotting Bidang Patahan dan Auxiliary Plane Gempa

3.8 Analisa dan Pembahasan

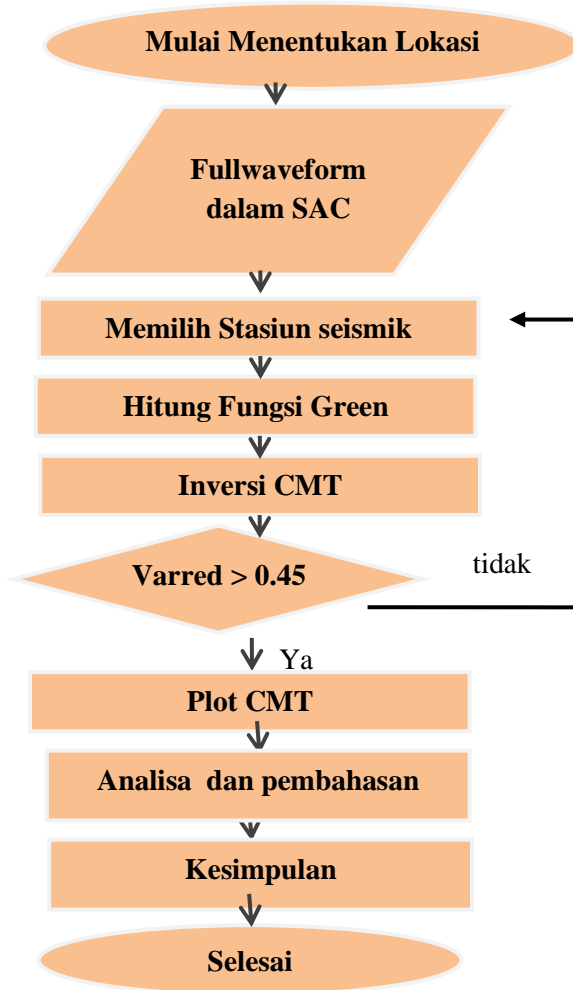
Pada tahap ini, dilakukan analisa hasil pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI mengenai momen tensor dan *focal mechanism* gempa. Variasi bentuk dari *beach ball* menunjukkan bentuk geometri dari sesar yang terjadi. Bentuk geometri ini dipengaruhi oleh geologi regional dari Sumatera Utara dan letak hiposenternya. Untuk mempermudah menganalisa, digunakan program *hplot* untuk mengetahui bidang sesar dan *auxiliary plane* serta program GMT (*Generic Mapping Tools*) digunakan untuk memetakan lokasi episenter dari masing-masing *event* dengan bentuk *beach ball*-nya sehingga diketahui dengan pasti bentuk geometri dari sesar yang ada serta hubungan antara masing-masing *beach ball* dalam menggambar sesar yang terbentuk di wilayah Sumatera Utara tersebut, kemudian dihitung besar *slip* dari masing-masing sesar dari setiap *event*.

3.9 Kesimpulan

Dari hasil analisa mengenai momen tensor dan *focal mechanism* yang terjadi di wilayah Sumatera Utara dapat disimpulkan mengenai pola bidang sesar yang terjadi di wilayah Sumatera Utara pada tahun 2012-2014 serta besar *slip* dari sesar yang ada.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

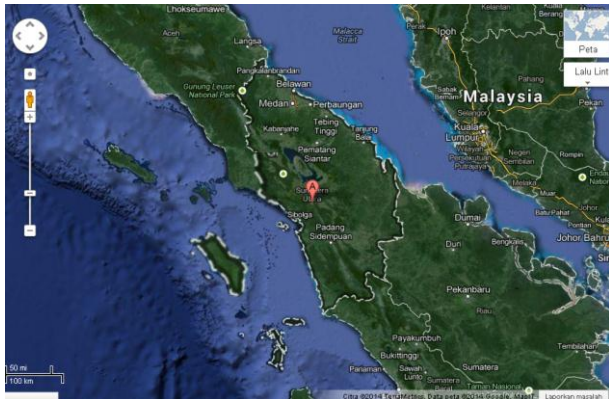
3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Penentuan Lokasi Penelitian

Lokasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah wilayah Sumatera Utara yang berada pada garis $6^{\circ}32'$ lintang utara sampai $0^{\circ}98'$ lintang selatan serta $94^{\circ}61'$ sampai $99^{\circ}1'$ bujur timur (*maps.google.com*). Data gempa yang terjadi di Sumatera Utara didapatkan dari *website* GFZ (*Geo Forschungs Zentrum*) *www.webdc.eu*. Data yang digunakan adalah data *event* gempa yang terjadi di wilayah Sumatera Utara selama tahun 2012-2014 dengan besar magnitudo lebih dari sama dengan 5,6 SR.



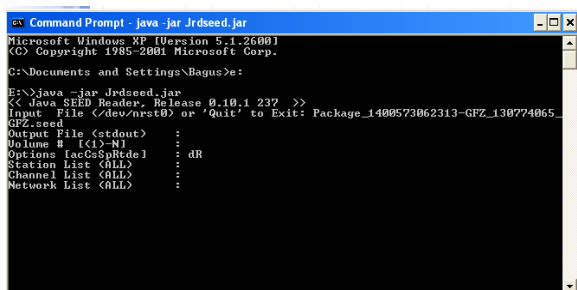
Gambar 3.2 Peta Provinsi Sumatera Utara (*maps.google.com*).



Gambar 3.3 Pengambilan Data dari *website* *www.webdc.eu*.

3.3 Full Waveform dalam SAC

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 *Jrdseed* yang terdapat pada *windows*. Tujuan dari pengubahan format data mentah ke SAC adalah agar gelombang dapat terbaca dalam 3 komponen yaitu komponen BHE,BHN, dan BHZ.



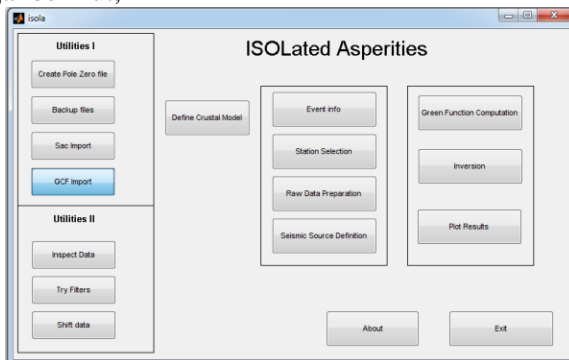
```

C:\Documents and Settings\Bagusze:
E:\>java -jar Jrdseed.jar
<< Java SEED Reader, Release 0.10.1 237 >>
Input File </dev/nrst0> or 'Quit' to Exit: Package_1400573062313-GFZ_130774065
GFZ.seed
Output File <stdout>      :
Volume # <[1]-N1>       :
Options <acCsSpRtdcJ>    : dR
Station List <ALL>      :
Channel List <ALL>      :
Network List <ALL>      :
  
```

Gambar 3.4 Proses Konversi Data dari Format *Seed* ke SAC

3.4 Memilih Stasiun

Setelah dikonversi, terlebih dahulu masuk ke dalam program ISOLA-GUI. Adapun tampilan program ISOLA-GUI sebagai berikut,

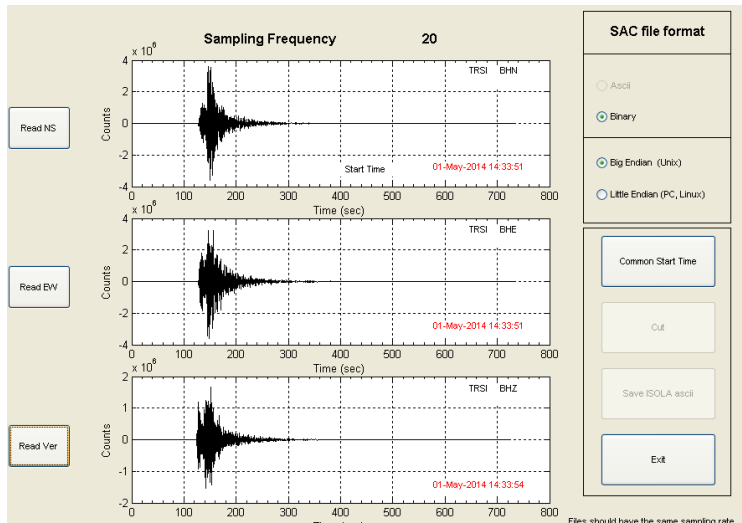


Gambar 3.5 Tampilan Awal Program ISOLA-GUI.

Untuk menjalankan program tersebut mengikuti langkah-langkah sebagai berikut ini,

1. SAC Import

Sac Import adalah perintah memasukkan data SAC stasiun yang kita pilih untuk tahapan pengolahan selanjutnya. Terlebih dahulu memilih stasiun dengan jumlah minimal 3, akan tetapi lebih banyak stasiun yang kita gunakan akan semakin baik. Dalam pemilihan stasiun, sebaiknya stasiun yang digunakan adalah stasiun yang dapat mewakili keempat bidang yang merupakan hasil dilatasi-kompresi dari episenter gempa *event* tersebut. Hal ini ditujukan agar stasiun tersebut mewakili sebagai stasiun yang merekam *event* sesuai dengan hasil yang baik untuk momen tensor.



Gambar 3.6 Tampilan *SAC Import* Program ISOLA-GUI.

2. Define Crustal Model

Ditentukan model bumi di wilayah Sumatera Utara. Model bumi yang digunakan pada penelitian ini adalah model bumi Haslinger-Santosa (H-S) (Madlazim, 2011)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Data Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan *event* yang terjadi di Sumatera Utara,

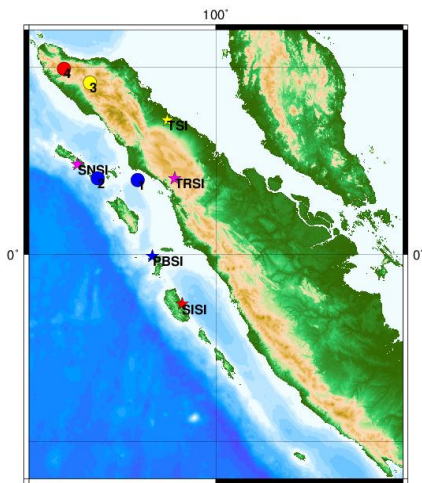
Tabel 4.1 Data *Event* yang terjadi di Sumatera Utara

No	Tanggal <i>Event</i>	Jam	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Mag</i>	<i>depth</i>
1	01-05-2014	14:35:50	1,99	97,91	5,8	58
2	01-12-2013	06:29:58	2,04	96,84	5,9	17
3	02-07-2013	07:37:05	4,59	96,63	6,1	10
4	21-01-2013	22:22:53	4,96	95,94	6	10
5	10-01-2013	13:47:05	4,66	95,09	5,6	55
6	25-07-2012	00:27:44	2,62	96,10	6,3	10

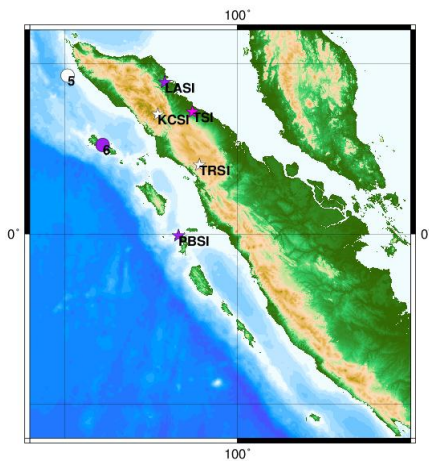
Dan stasiun yang digunakan dalam penelitian ini adalah

Tabel 4.2 Nama Stasiun yang Digunakan dalam Penelitian

No	Nama	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
1	TRSI	2,03	98,96
2	SNSI	2,41	96,33
3	PBSI	-0,05	98,28
4	SISI	-1,33	99,09
5	TSI	3,5	98,56
6	KCSI	3,52	97,77
7	LASI	4,46	97,97



(a)



(b)

Gambar 4.1. Lokasi Stasiun dan *Event* (a).01-05-2014, 01-12-2013, 02-07-2013, dan 21-01-2013 (b).10-01-2013 dan 25-07-2012. Warna yang sama menunjukkan penggunaan *event* dan stasiun yang dipakai, sedangkan warna merah muda menunjukkan stasiun yang digunakan untuk semua *event* pada gambar (GMT)

4.1.2 Hasil Perhitungan

4.1.2.a Hasil Momen Tensor

Hasil pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI memperoleh besar momen tensor untuk masing-masing *event* sebagai berikut (tanda negatif menunjukkan arah yang berlawanan)

Tabel 4.3 Momen Tensor untuk Gempa Sumatera Utara

<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
01-05-2014	3,078	2,076	-5,154	5,479	-2,901	1,501	17
01-12-2013	0,157	-0,304	0,146	2,605	-2,702	-0,108	18
02-07-2013	0,064	-1,297	1,233	1,083	0,149	-1,045	18
21-01-2013	-0,268	-1,041	1,309	-0,324	0,057	-0,643	18
10-01-2013	3,581	-2,298	-1,283	0,845	-0,867	0,979	17
25-07-2012	0,658	-0,34	-0,318	7,135	-7,405	0,25	18

4.1.2.b Hasil *Focal Mechanism*


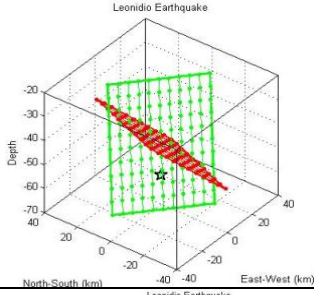

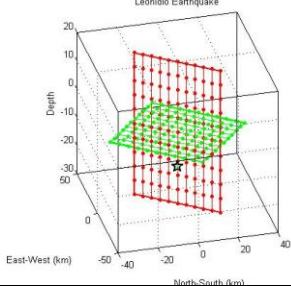

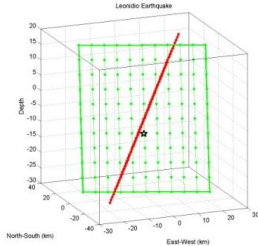
Pada saat gempa terjadi, ada dua bidang yang menjadi acuan dalam penentuan momen tensor yaitu *fault plane* atau yang disebut bidang patahan, sedangkan *auxiliary plane* yang saling tegak lurus (Stein, 2003).


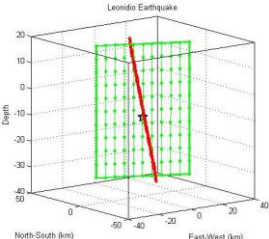

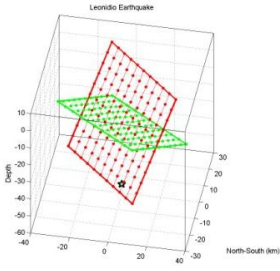

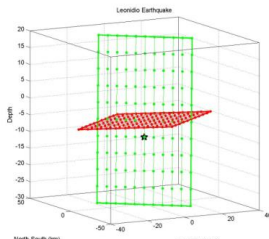
Tabel 4.4 Bidang Sesar dan *Auxiliary Plane* untuk Masing-Masing *Event*

Event	Plane I			Plane II		
	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake
01-05-2014	131	77	59	21	33	155
01-12-2013	234	3	8	136	90	93
02-07-2013	297	80	-154	202	64	-11



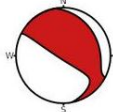
21-01-2013	122	82	-165	30	75	-9
10-01-2013	298	35	84	126	55	94
25-07-2012	136	88	90	226	2	0



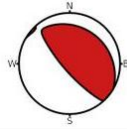


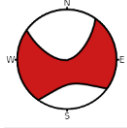


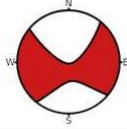

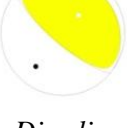
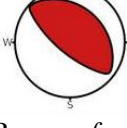


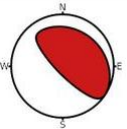
Tabel 4.5 Beach Ball dan Hcplot untuk Masing-Masing Event

<i>Event</i>	<i>Beach ball</i>	<i>Hcplot</i>
01-05-2014	 <p><i>Reverse fault</i></p>	
01-12-2013	 <p><i>Dip slip</i></p>	
02-07-2013	 <p><i>Strike slip</i></p>	

21-01-2013	 <p><i>Strike slip</i></p>	
10-01-2013	 <p><i>Reverse fault</i></p>	
25-07-2012	 <p><i>Dip slip</i></p>	

Tabel 4.6 Perbandingan *Beach Ball* Penelitian dengan Katalog

<i>Event</i>	Penelitian	USGS	IRIS
01-05-2014	 <p><i>Reverse fault</i></p>	 <p><i>Reverse fault</i></p>	 <p><i>Reverse fault</i></p>

01-12-2013	 <i>Dip slip</i>	 <i>Dip slip</i>	 <i>Reverse fault</i>
02-07-2013	 <i>Strike slip</i>	 <i>Strike slip</i>	 <i>Strike slip</i>
21-01-2013	 <i>Strike slip</i>	 <i>Strike slip</i>	 <i>Strike slip</i>
10-01-2013	 <i>Reverse fault</i>	 <i>Dip slip</i>	 <i>Reverse fault</i>
25-07-2012	 <i>Dip slip</i>	 <i>Dip slip</i>	 <i>Reverse fault</i>

4.1.2.c Hasil Perhitungan Panjang, Lebar, Luas, dan Slip

Berikutnya dilakukan perhitungan panjang, lebar, luas, dan *slip fault*, Dari besar magnitudo *event* gempa yang ada di Sumatera Utara didapatkan besar *slip* (D) untuk masing-masing *event* sebagai berikut,

Tabel 4.7 Besar Panjang, Lebar, Luas, dan *Slip* Sesar dari Masing-Masing *Event*

<i>Event</i>	<i>M_w</i>	<i>L(km)</i>	<i>W(km)</i>	<i>S(km²)</i>	<i>Ū(m)</i>
01-05 2014	5.9	11.35	15.81	179.47	0.05
01-12-2013	6.3	18.84	21.04	396.28	0.22
02-07-2013	6.2	19.91	8.18	162.93	0.30
21-01-2013	6	17.38	7.76	134.90	0.26
10-01-2013	5.6	7.76	12.76	99.08	0.04
25-07-2012	6.6	27.54	26.06	717.79	0.35

Tabel 4.8 Besar *Moment Seismic* dari Perhitungan, Data, dan Katalog untuk Masing-Masing *Event*

<i>Event</i>	<i>Mo</i> pengolahan (Nm)	<i>Mo</i> perhitungan (Nm)	<i>Mo</i> Katalog USGS (Nm)	<i>Mo</i> Katalog IRIS (Nm)
01-05 2014	7.80E+17	8.91E+17	7.88E+17	1.161 E+18
01-12- 2013	3.76E+18	3.55E+18	1.81E+18	1.324 E+18
02-07- 2013	1.97E+18	1.78E+18	1.95E+18	1.584 E+18
21-01- 2013	1.40E+18	1.26E+18	1.47E+18	1.783 E+18
10-01- 2013	3.06E+17	3.16E+17	4.06E+17	4.181 E+17
25-07- 2012	1.03E+19	1.00E+19	7.18E+18	4.337 E+18

4.2 Pembahasan

4.2.1 *Focal Mechanism* masing-masing event

Berdasarkan table 4.5, maka dapat dijabarkan sebagai berikut:

a. *Event 01-05-2014*

Gempa yang terjadi pada tanggal 01-05 2014 pada pukul 14:35:40 menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah *reverse fault*. Pola *reverse* dapat diketahui dengan memperhatikan apakah *rake* yang ada bernilai positif. Pada event ini, bidang pertama (hijau) yang merupakan bidang patahan memiliki memiliki besar *strike* = 131, *dip* = 77, dan *rake* = 59 dan bidang kedua (merah) besar *strike* = 21, *dip* = 33, dan *rake* = 155. Jarak antara hiposenter gempa dengan bidang pertama sebesar 3,74 km sedangkan jarak dengan bidang kedua sebesar 11,1 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. *Auxiliary plane* merupakan bidang yang tegak lurus dengan bidang patahan. Pemilihan bidang patahan dengan *auxiliary plane* dapat dilakukan dengan cara melihat jarak hiposenter dari *plane*. Jarak yang terdekat menunjukkan bidang patahan, dan sebaliknya untuk *auxiliary plane*. Untuk jarak antara titik *centroid* nya dengan jarak hiposenter sebesar 13 km.

b. *Event 01-12-2013*

Gempa yang terjadi pada tanggal 01-12-2013 pukul 06:29:58 menunjukkan pola bidang sesar yang berbentuk *dipslip fault*. Pola *dip slip* dapat diketahui dengan memperhatikan *rake* yang ada bernilai positif. Pada event ini memiliki karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 234, *dip*=3, dan *rake* = 8. Dengan bidang kedua (merah) memiliki besar *strike* = 136, *dip* = 90, dan *rake* = 193. Jarak antara hiposenter gempa dengan bidang merah sebesar 2 km sedangkan jarak dengan bidang hijau sebesar 12 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna merah dan *auxiliary plane*-nya berwarna hijau. Untuk

jarak antara titik *centroid* nya dengan jarak hiposenter sebesar 12 km.

c. Event 02-07-2013

Gempa yang terjadi pada tanggal 02-07-2013 pukul 07:37:05 menunjukkan pola bidang sesar *strike slip*. Pola *strike slip* dapat diketahui dengan memperhatikan *rake* yang ada bernilai negatif. Pada *event* ini memiliki karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike*=297, *dip*=80, dan *rake*=-154. Dengan bidang kedua (merah) besar *strike*=202, *dip*=64, dan *rake*=-11. Jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 1,48 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 4,77 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak titik *centroid* nya dengan jarak hiposenter sebesar 5 km.

d. Event 21-01-2013

Gempa yang terjadi pada tanggal 21-01-2013 pukul 22:22:53 menunjukkan pola bidang sesar *strike slip*. Pola *strike slip* dapat diketahui dengan memperhatikan *rake* yang ada bernilai negatif. Pada *event* ini memiliki karakteristik bidang pertama (hijau) besar *strike* = 122, *dip* = 82, dan *rake* = -165. Dengan bidang kedua (merah) besar *strike* = 30, *dip* = 75, dan *rake* = -9. Jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 2,07 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 2,24 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak titik *centroid* nya dengan jarak hiposenter sebesar 3 km.

e. Event 10-01-2013

Gempa yang terjadi pada tanggal 10-01-2013 pukul 13:47:05 menunjukkan pola bidang sesar *reverse fault*. Pola *reverse fault* dapat diketahui dengan memperhatikan *rake* yang ada bernilai positif. Pada *event* ini memiliki karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar *strike* = 298, *dip* = 35, dan *rake* =

84. Dengan bidang kedua (merah) besar $strike = 126$, $dip = 55$, dan $rake = 94$. Jarak antara hiposenter dengan bidang merah sebesar 21,13 km sedangkan dengan bidang hijau sebesar 29,50 km, sehingga bidang patahannya adalah yang berwarna merah dan *auxiliary plane*-nya berwarna hijau. Untuk jarak titik *centroid* nya dengan jarak hiposenter sebesar 36 km.

f. Event 25-07- 2012

Gempa yang terjadi pada tanggal 25-07-2012 pukul 00:27:44 menunjukkan pola bidang sesar *dip slip*. Pola *dip slip* dapat diketahui dengan memperhatikan $rake$ yang ada bernilai positif. Pada *event* ini memiliki karakteristik untuk bidang pertama (hijau) besar $strike = 236$, $dip = 2$, dan $rake = 0$. Dengan bidang kedua (merah) besar $strike = 136$, $dip = 88$, dan $rake = 90$. Jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 0,17 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 5 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Untuk jarak titik *centroid* nya dengan hiposenter sebesar 5 km.

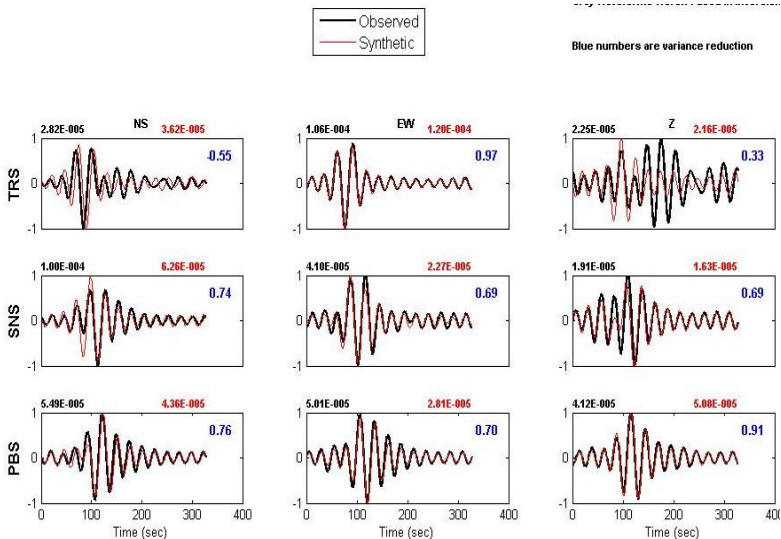
4.2.2 Momen Tensor

Momen Tensor dan *focal mechanism* didapatkan dari hasil inversi momen tensor. *Focal mechanism* adalah penggambaran dari deformasi inelastis di kawasan sumber yang menghasilkan gelombang seismik. Momen tensor digunakan untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa. Komponen momen tensor ada 6 yang ditunjukkan dengan bentuk dasar dari *focal mechanism* yang digambarkan dengan *beach ball*. Sokos dan Zahrandik (2009) menuliskan bahwa untuk data rekaman seismogram merupakan kombinasi dari komponen utama momen tensor, sedangkan untuk mengetahui kecocokan antara hasil estimasi dengan hasil data observasi yang ada dilapangan dapat diketahui dengan melihat besar varian reduksinya. Semakin mrndekati nilai 1, maka hasil *fittingnya* semakin cocok.

Fungsi Green secara umum adalah penggabungan dari fungsi respon, efek proses perambatan, dengan unit impulsif

dan/atau gaya Fungsi Green merupakan perhitungan estimasi dari fungsi waktu sumber sehingga dari estimasi ini dapat diketahui besar momen tensor hasil permodelan.

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 4.2. Hasil *Fitting* Kurva *Displacement* dari Data *Event* Gempa Tanggal 01/05/2014 Pukul 14:35:40 (*ISOLA-GUI*).

Pada gambar 4.2 terlihat ada dua garis warna, yaitu warna merah dan hitam. Garis yang berwarna merah merupakan kurva estimasi dari Fungsi Green, sedangkan kurva yang berwarna hitam merupakan kurva dari data observasi seismogram. Besar kecocokan kurva ditentukan oleh varian reduksi (Sokos dan Zahrandik, 2009). Apabila nilai variasi reduksi mendekati angka 1 menunjukkan bahwa kurva hasil *fitting* semakin cocok.

Dari masing-masing *event* gempa varian reduksinya berkisar mulai dari 0.78, 0.85, 0.86, 0.83, 0.6, 0.63. Berdasarkan nilai-nilai dari variasi reduksi ini menunjukkan bahwa hasil *fitting* pengolahan sudah akurat. Varian reduksi ini ditentukan oleh besar *filtering* yang dilakukan dalam proses inversi.

Selain proses inversi ini, ketidakcocokan kurva dipengaruhi oleh sifat elastik dan tak elastik dari medium yang dilewati oleh gelombang sumber gempa (Stein, 2003). Fungsi Green menggambarkan sinyal yang akan terekam oleh seismograf sehingga dari Fungsi Green ini didapatkan sebuah model dari sinyal. Dari model ini diperbandingkan dengan hasil rekaman seismogram sebenarnya. Dari hasil memperbandingkan ini dapat diketahui ketidakcocokannya.

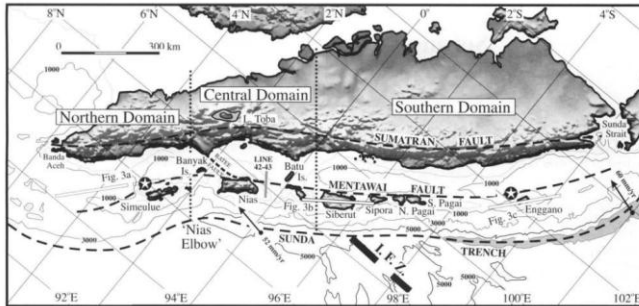
Berdasarkan tabel 4.6 menunjukkan adanya kesamaan dari hasil penelitian dengan katalog internasional yang ada. Hal ini menunjukkan bahwa hasil penelitian ini telah presisi dengan katalog internasional. Pada event 01-05-2014 katalog dan hasil penelitian sama sama menunjukkan *beach ball* berbentuk *reverse fault*. Pada event 01-12-2013 dan 25-07-2012 katalog berbentuk *reverse fault* pada IRIS dan berbentuk *dip slip* pada USGS yang mana menunjukkan hasil yang sama dengan penelitian. *Event* ini berada pada zona subduksi yang cenderung berbentuk *dip slip*. Pada event 02-07-2013 dan 21-01-2013 katalog dan hasil penelitian sama sama menunjukkan *beach ball* berbentuk *strike slip* yang berada di sekitar *Sumatra Fault Zone*. Terlihat bahawa hanya pada *event* 10-01-2013 *beach ball* antara penelitian dengan katalog USGS terlihat berbeda jenis *beach ball* nya., akan tetapi masih dalam satu slip yaitu *dip slip*. Katalog USGS memiliki jenis *vertical dip slip* sedangkan untuk penelitian adalah *reverse fault* yang mana juga merupakan jenis *dip slip*. Akan tetapi dibandingkan dengan katalog lain, yaitu IRIS memiliki kesamaan jenis yaitu *reverse fault*.

Sedangkan untuk tabel 4.8 diketahui bahwa perhitungan momen seismik yang diperoleh dari persamaan 2.16 dengan data yang diolah dengan ISOLA menunjukan adanya sedikit

perbedaan angka. Hal ini dapat disebabkan oleh proses filtering saat menggunakan program ISOLA, akan tetapi hal ini tidak menjadi masalah karena bila dikaitkan dengan data perhitungan tidak jauh berbeda. Untuk perbandingan dengan katalog USGS, terdapat perbedaan pada *event* 01-12-2013 dengan nilai $1.81E+18Nm$ untuk USGS dan $3.76E+18Nm$ untuk pengolahan. Dengan perbedaan tersebut, kemudian dibandingkan kembali dengan hasil perhitungan yaitu sebesar $3.55E+18Nm$. Pada *event* 25-07-2012 nilai M_0 yang diperoleh dari katalog USGS adalah sebesar $7.18E+18Nm$, sedangkan dari pengolahan memperoleh $1.03E+19Nm$ dan $1.00E+19Nm$ dari perhitungan. Nilai momen seismik antara pengolahan berbeda dengan hasil momen seismik dari katalog IRIS. Hasil momen seismik dari katalog IRIS hampir mendekati dengan katalog USGS, akan tetapi ada beberapa perbedaan seperti pada *event* 01-05-2012 dengan nilai $1.161E+18Nm$ dan 25-07-2012 dengan nilai $4.337E+18Nm$. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan nilai momen seismik yang cukup besar. Pengolahan dengan menggunakan stasiun lokal lebih akurat karena menggunakan stasiun lokal yang jaraknya dekat dengan sumber gempa dibandingkan dengan pengolahan dari sumber katalog yang menggunakan stasiun yang jauh.

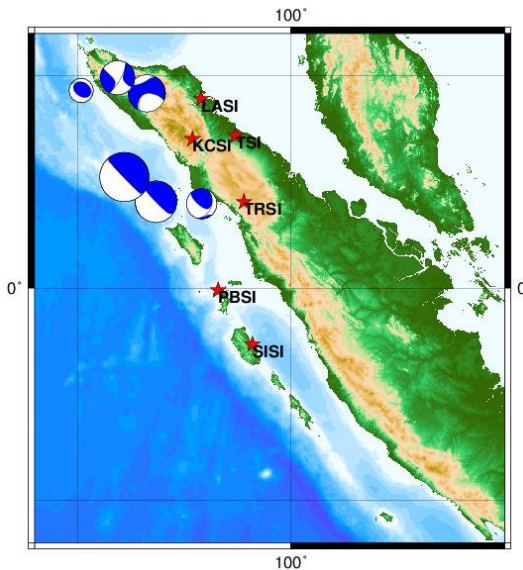
4.2.3 Focal Mechanism dan Slip

Bentuk *focal mechanism* dari masing-masing *event* menunjukkan pola bidang sesar *dip slip fault* dan beberapa *strike slip fault*. Bentuk pola ini dipengaruhi oleh kondisi geologi regional Sumatera Utara. Di wilayah Sumatera Utara terdapat tiga sistem sesar, SFZ (*Sumatran Fault Zone*), sesar Mentawai, dan zona subduksi.



Gambar 4.3. Sistem Sesar yang Ada di Sumatera, SFZ, dan Zona Subduksi (Barber, 2005).

Pola sesar dari masing-masing *event* dapat ditunjukkan dengan menggunakan program GMT untuk mengetahui pola yang ditimbulkan oleh tiga sistem sesar.



Gambar 4.4. Posisi *Beach Ball* Menggambarkan Posisi *Epicenter* dengan Besar *Beach Ball* Bervariasi yang Ditentukan oleh Besar Momen Tensor Gempa (GMT)

Penggambaran posisi *beach ball* di atas menunjukkan besar momen tensorsnya pula. Pola bidang sesar yang terbentuk di daerah sekitar zona subduksi adalah *dip slip* dengan jenis *vertical slip* dan *reverse fault*, sedangkan di daerah sekitar bukit barisan adalah jenis *strike slip*. Hal ini dapat dibandingkan dengan penelitian sebelumnya bahwa untuk lokasi yang berada pada zona subduksi mempunyai pola bidang sesar *dip slip* yang mempunyai pengaruh lebih besar. Sieh dan Natawijaya (2000) mengatakan bahwa gerakan sesar yang ada di Sesar Mentawai mempunyai pola bidang sesar bervariasi mulai dari *normal fault*, *strike slip* dan *reverse fault*. Untuk daerah di sekitar patahan Sumatra adalah berpola *strike slip*. Rangkaian gempa yang terjadi di Sumatra umumnya berada di dekat zona batas konvergen antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia yang bergerak 60 mm/tahun (Madlazim, 2010). 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*).

Berdasarkan rumusan pada dasar teori persamaan (2.19) dan (2.22), menghasilkan nilai-nilai *slip* pada masing-masing *event* yang dapat dilihat pada tabel 4.7 . Besarnya *slip* yang terjadi pada *event* 01-05-2014 menghasilkan *slip* sebesar 0,05 m. *Event* 01-12-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,22 m. *Event* 02-07-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,30 m. *Event* pada 21-01-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,26 m. *Event* pada 10-01-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,04 m. *Event* pada 25-07-2012 menghasilkan *slip* sebesar 0,35 m.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

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 Sumatera Utara pada tahun 2012-2014 mempunyai rentang sebagai berikut ini,
 $M_{11} = 2,080 \text{ exp}17$ sampai $1,040 \text{ exp}18$
 $M_{22} = 1,283 \text{ exp}17$ sampai $1,310 \text{ exp}18$
 $M_{33} = 6,400 \text{ exp}16$ sampai $6,580 \text{ exp}17$
 $M_{31} = 8,450 \text{ exp}16$ sampai $7,140 \text{ exp}18$
 $M_{32} = 5,700 \text{ exp}16$ sampai $7,405 \text{ exp}18$
 $M_{12} = 9,790 \text{ exp}16$ sampai $1,045 \text{ exp}18$
2. Pola bidang sesar gempa yang terjadi di wilayah Sumatera Utara adalah dominan sesar *dip slip* jenis vertikal dan *reverse fault* di zona subduksi dan *strike slip* di sekitar patahan Sumatra.
3. Besar *slip* dari *event* gempa di Sumatera Utara pada gempa di Sumatera Utara dari tahun 2012-2014 adalah sebagai berikut,
Event 01-05-2014 menghasilkan *slip* sebesar 0,05 m.
Event 01-12-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,22 m.
Event 02-07-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,30 m.
Event 21-01-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,26 m.
Event 10-01-2013 menghasilkan *slip* sebesar 0,04 m.
Event 25-07-2012 menghasilkan *slip* sebesar 0,35 m.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis dalam penelitian ini adalah diperlukan penelitian lanjut mengenai besar *slip* berdasarkan kondisi geologi agar penelitian lebih akurat.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z dan Heri Andreas. 2009. *Crustal Deformation Studies in Java (Indonesia) Using GPS*, *Journal of Earthquake and Tsunami*, vol. 3, No. 2 pp. 77–88.
- Afnimar . 2009. *Seismologi*. Bandung :ITB.
- Bowler, Sue. 2003. *Bumi yang Gelisah*. Jakarta: Erlangga.
- Darman, H dan Sidi,F. H. 2000. *The geology of Indonesia*, Jakarta : Association of geologist special publication.
- Goncalves, P. P dan P. Flandrin Abry. 2003. *Wavelet-based spectral analysis of 1/f processes,"International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, IEEE Proceedings, vol. 3, pp. 237-240.
- Hamilton, Warren. 1997. *Tectonic of the Indonesian Region*. Washington, D.C : U.S Government Printing Office.
- Hanks, Thomas C. dan Hiroo Kanamori. 1997. *Moment magnitude scale*. *Journal of Geophysical Research* 84 (B5): 2348–2350. Retrieved 2007-10-06.
- Kadir, W.G.A. 1996. *Dekonvolusi Anomali Gaya berat Bouguer dan Derivatif Vertikal Orde Dua dengan Menggunakan Persamaan Dasar Potensial Studi Kasus : Pulau iosumatera*, Disertasi Institut Teknologi Bandung.
- Kikuchi, M., and H. Kanamori. 1991. *Inversion of Complex Body Wave-III*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 2335-2350.
- Klingele, E. E., Marson, I and Kahke, H. G. 1991. *Automatic Interpretation of Gravity Gradiometric data in two dimension vertical gradientt*, *Geophysical Prospecting*, 39, 4007-434.
- Lay, Thorne dan Terry Wallace. 1995. *Modern Global Seismology*. United States of America: Academic Press.
- Madlazim. 2011. *Estimasi CMT, Bidang Sesar dan Durasi Rupture Gempa Bumi di Sumatera serta Kemungkinan Penerapannya untuk Sistem Peringatan Dini Tsunami*. Disertasi Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.

- Masykur, M. Romli. 2011. *Analisis Inversi Waveform Tiga Komponen Untuk Menentukan Pola Bidang Sesar Gempa Bumi di Daerah Jawa Barat*. Surabaya. Tesis Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.
- Nurchaya, B. dan Brotopuspito, S. 2004. *Coherent Continuous Wavelet Transforms and Polarization Analysis of Multi Phase Earthquake*. Artikel IAGI.
- Papazachos, C.B., and Karakaisis, G.F., 2004. *Global Relations between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes*. Bull. Geol. Soc. Greece, Vol. XXXVI. Proceedings of the 10 International Congress, Thessaloniki, April 2004Th.
- Sieh, Kerry dan Danny Natawidjaja. 2000. *Neotectonics of the Sumatran Fault, Indonesia*. Journal of Geophysical Research, vol. 105, No. B12, pages 28, 295-28,326.
- Sokos, Efthimios N, Jiri Zahrandik. 2008. *ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data*. Computers and Geoscience 34 967-977.
- Steith, Stein. Michael Wyession. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Oxford : Blackwell Publishing Ltd.
- Wells, D.L., and Coppersmith, K.J. 1994. *New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacements*: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 84, p. 974–1002.

BIODATA PENULIS



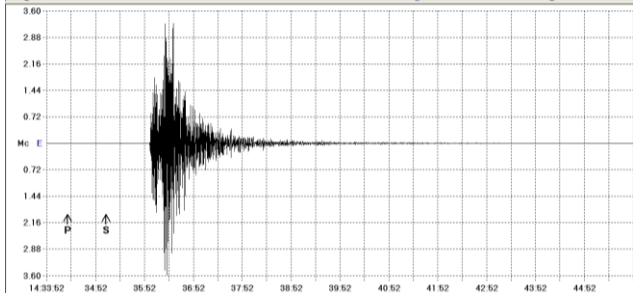
Penulis dilahirkan pada tanggal 20 Maret 1992 di Kota Pahlawan sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Pendidikan formal penulis dimulai dari TK Aisyah Bustanul Atfal 4, Kemudian lanjut ke SD Muhammadiyah 11 Surabaya. Selama SMP, penulis bersekolah di SMPN 3 Surabaya dan berhasil melanjutkan studi ke SMAN 2 Surabaya. Setelah lulus dari SMA, penulis memasuki dunia perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, di jurusan Fisika dengan bidang minat fisika bumi. Penulis mempunyai ketertarikan pada dunia sastra, desain dan sains. Penulis dapat dihubungi melalui email lilisholmes@gmail.com.

Lampiran a

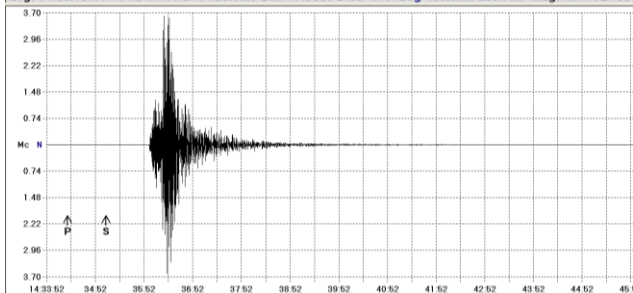
1. Data rekaman gempa pada tanggal 01/05/2014 pukul 14:35:40

a. Stasiun TRSI

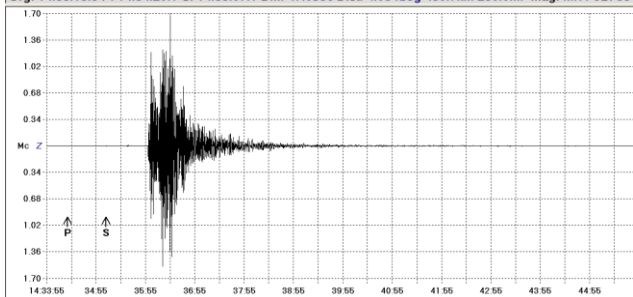
Start: 5/01/14 14:33:51 UTC Station: TRSI 2.0256N 98.9594E Samples: 14698 SPS: 20.0
Max/Min: 3255873/-3581912 X: 12:13.0 Y: 3.6Mc
Org: 14.33:15.5 P: 14.34:17.3 S: 14:35:04.7 Diff: 47.4sec Dist: 4.089deg 454.6km 282.5mi Mag: M??? JB: 33



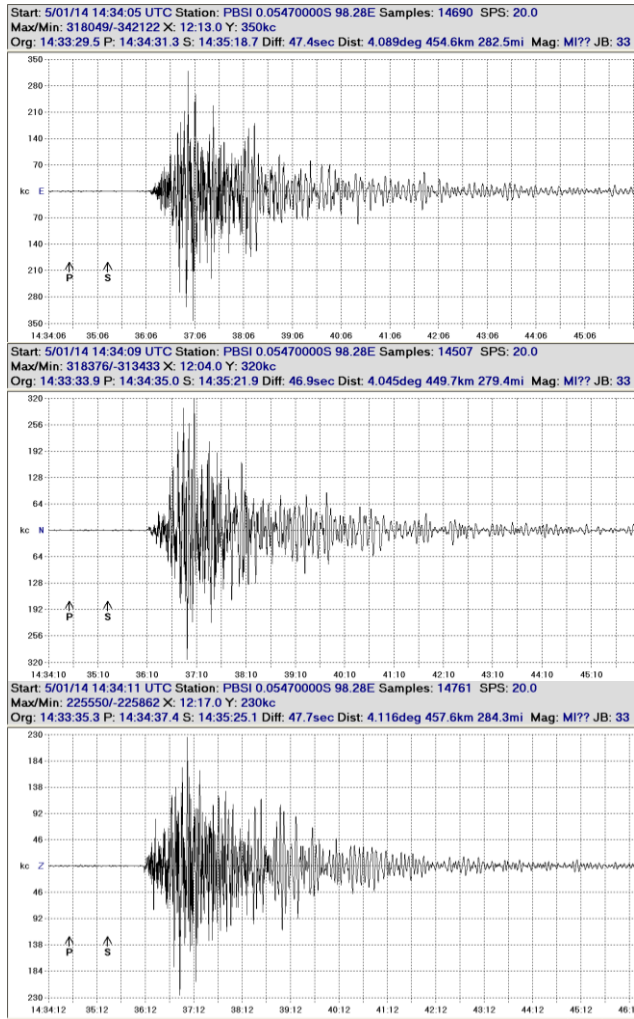
Start: 5/01/14 14:33:51 UTC Station: TRSI 2.0256N 98.9594E Samples: 14744 SPS: 20.0
Max/Min: 3603915/-3604686 X: 12:16.0 Y: 3.7Mc
Org: 14.33:15.4 P: 14.34:17.4 S: 14:35:05.0 Diff: 47.6sec Dist: 4.107deg 456.6km 283.7mi Mag: M??? JB: 33



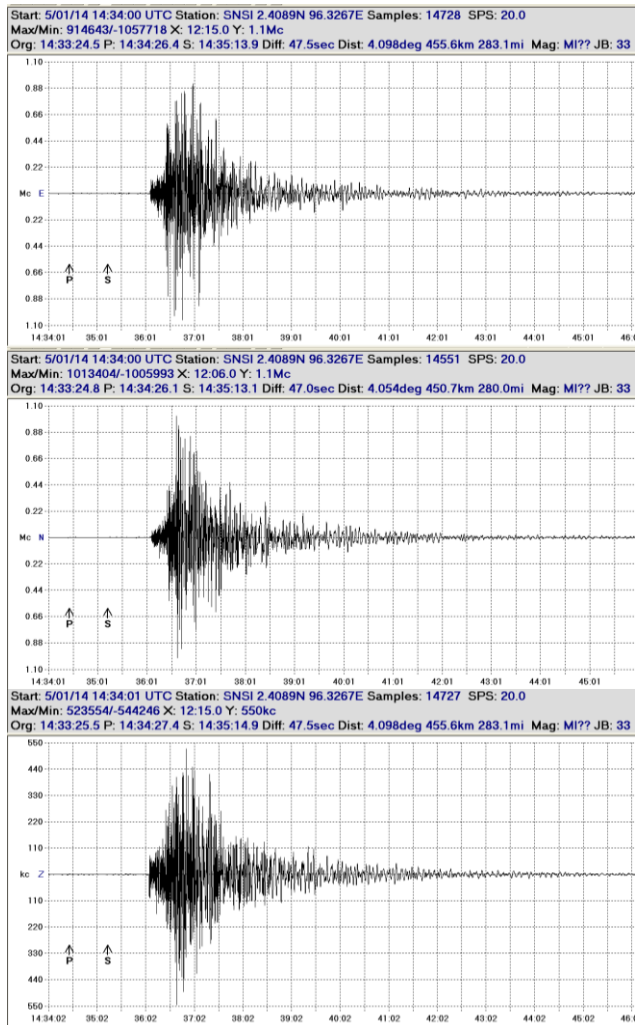
Start: 5/01/14 14:33:54 UTC Station: TRSI 2.0256N 98.9594E Samples: 14548 SPS: 20.0
Max/Min: 1668814/-1545880 X: 12:06.0 Y: 1.7Mc
Org: 14.33:18.8 P: 14.34:20.1 S: 14:35:07.1 Diff: 47.0sec Dist: 4.054deg 450.7km 280.0mi Mag: M??? JB: 33



b. Stasiun PBSI

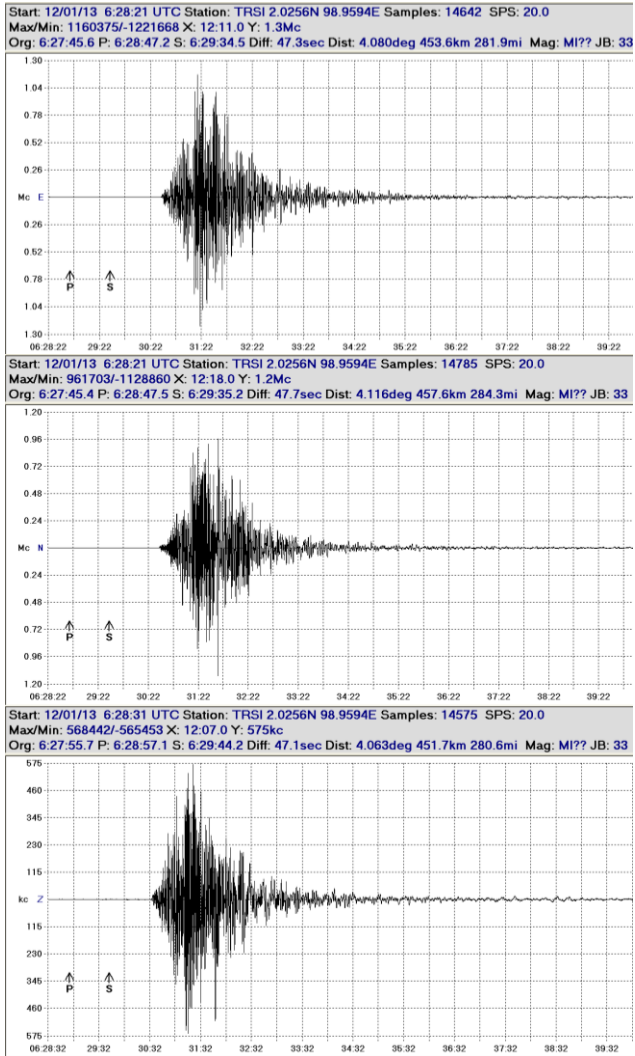


c. Stasiun SNSI

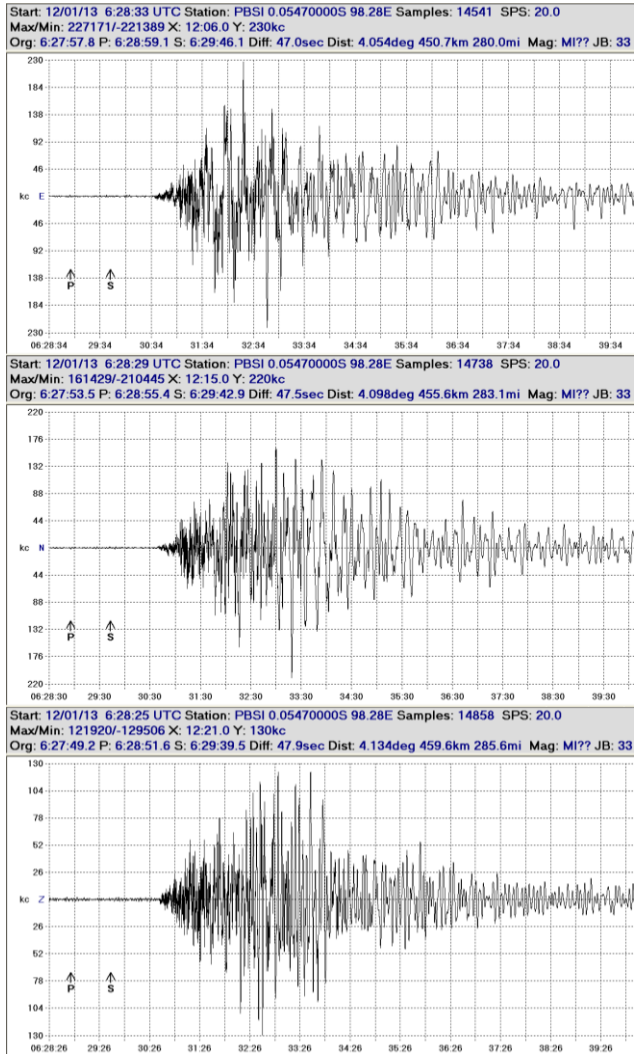


2. Data rekaman gempa pada tanggal 01/12/2013 pukul 06:29:58

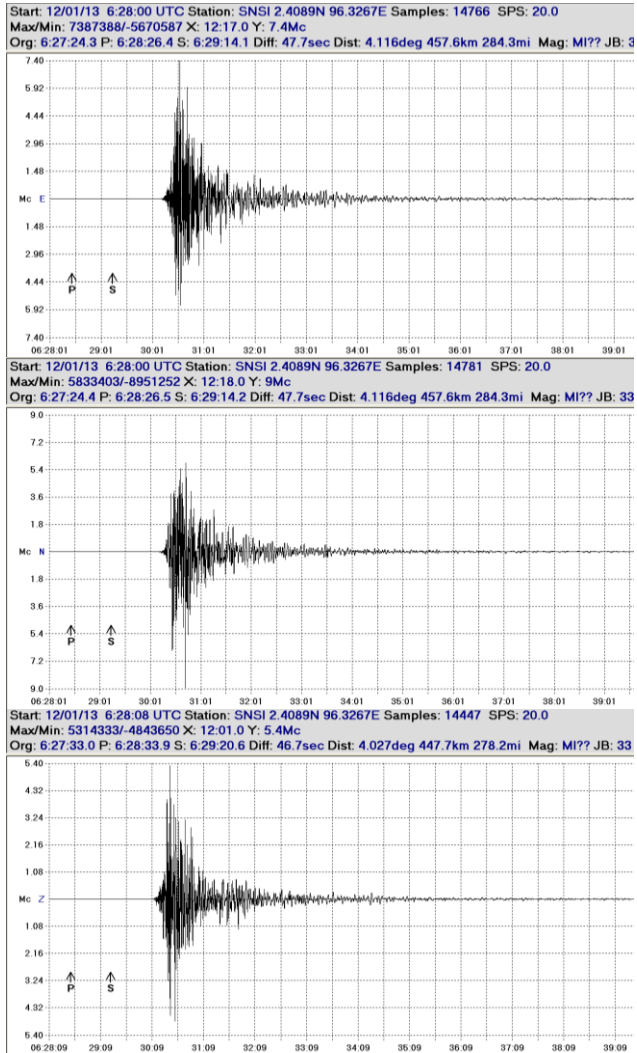
a. Stasiun TRSI



b. Stasiun PBSI

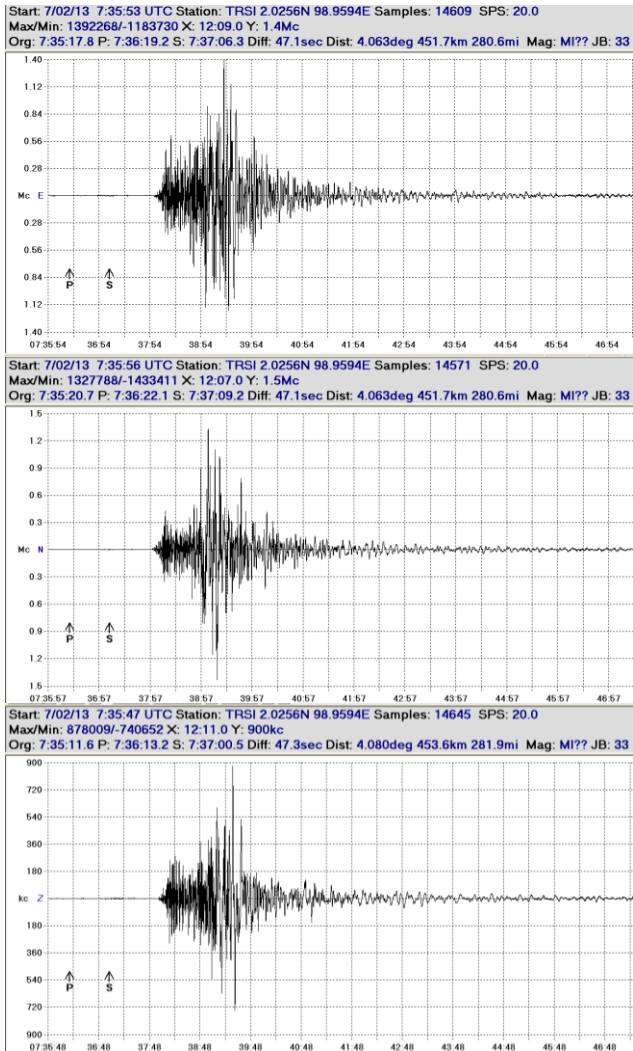


c. Stasiun SNSI

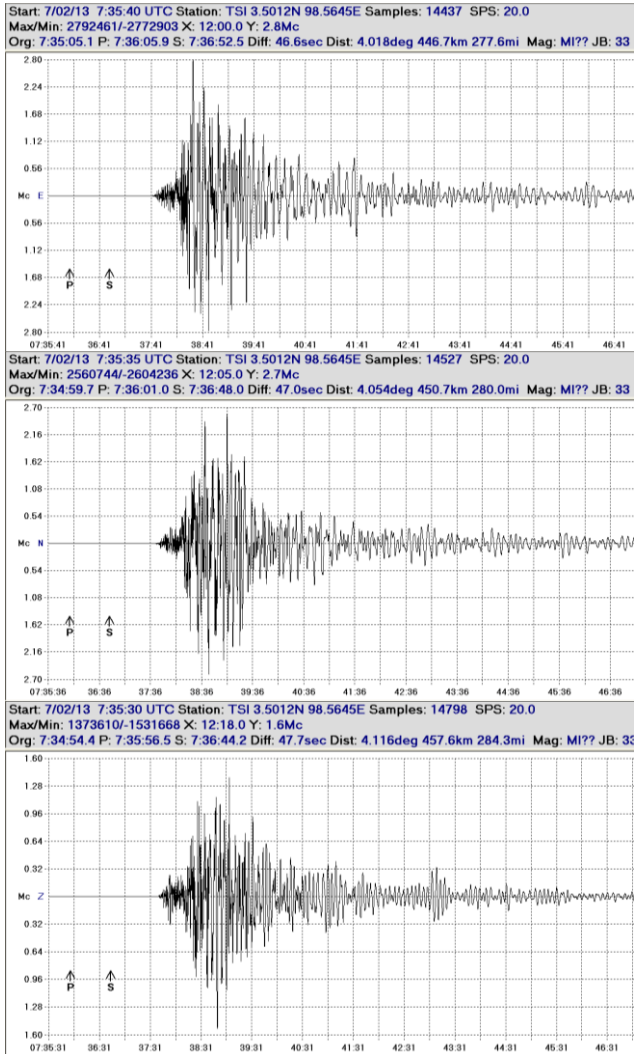


3. Data rekaman gempa pada tanggal 02/07/2013 pukul 07:37:05

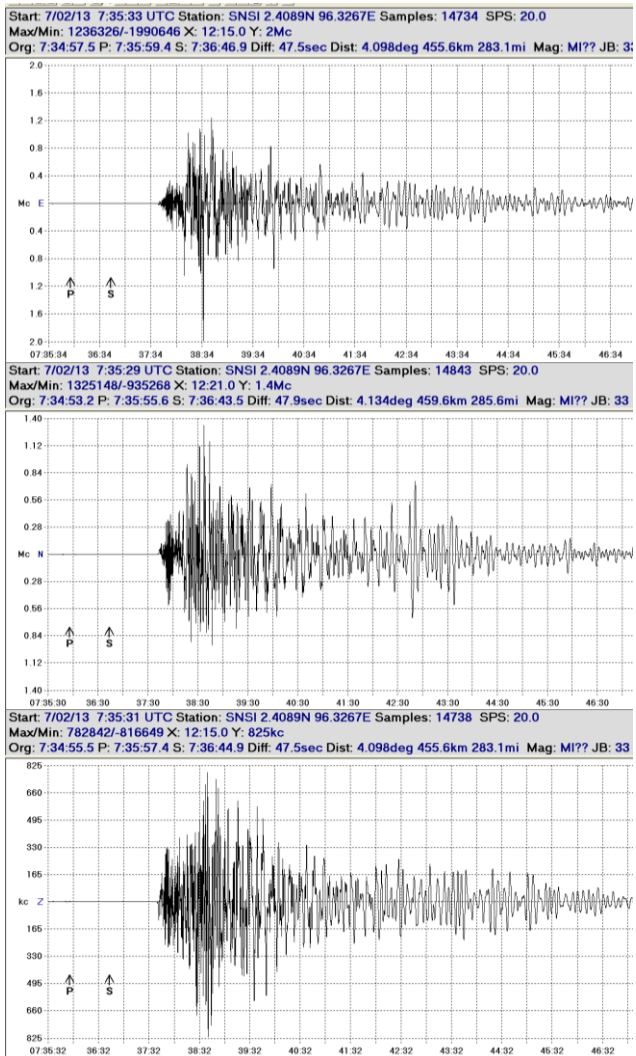
a. Stasiun TRSI



b. Stasiun TSI



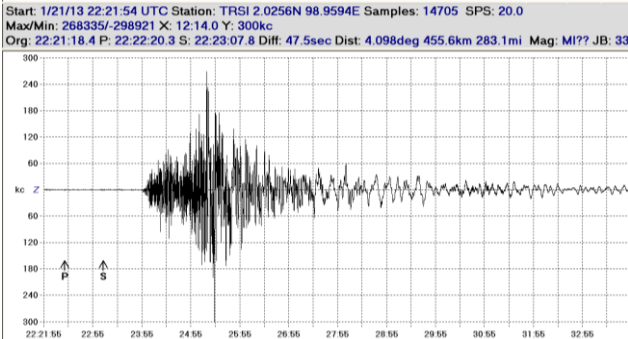
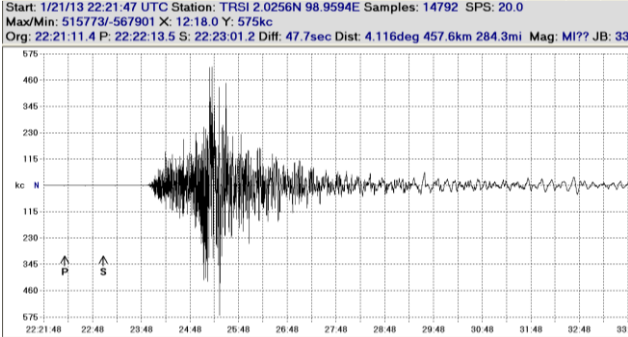
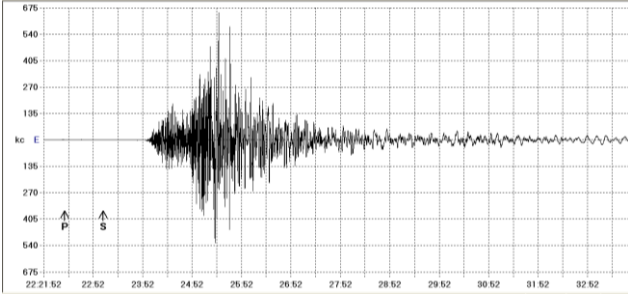
c. Stasiun SNSI



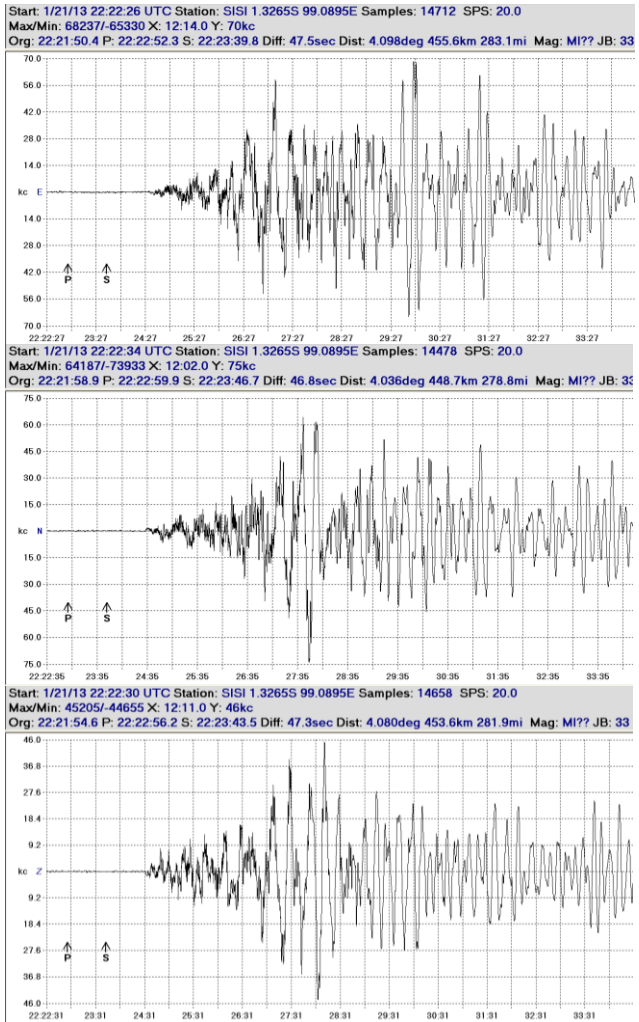
4. Data rekaman gempa pada tanggal 21/01/2013 pukul 22:22:53

a. Stasiun TRSI

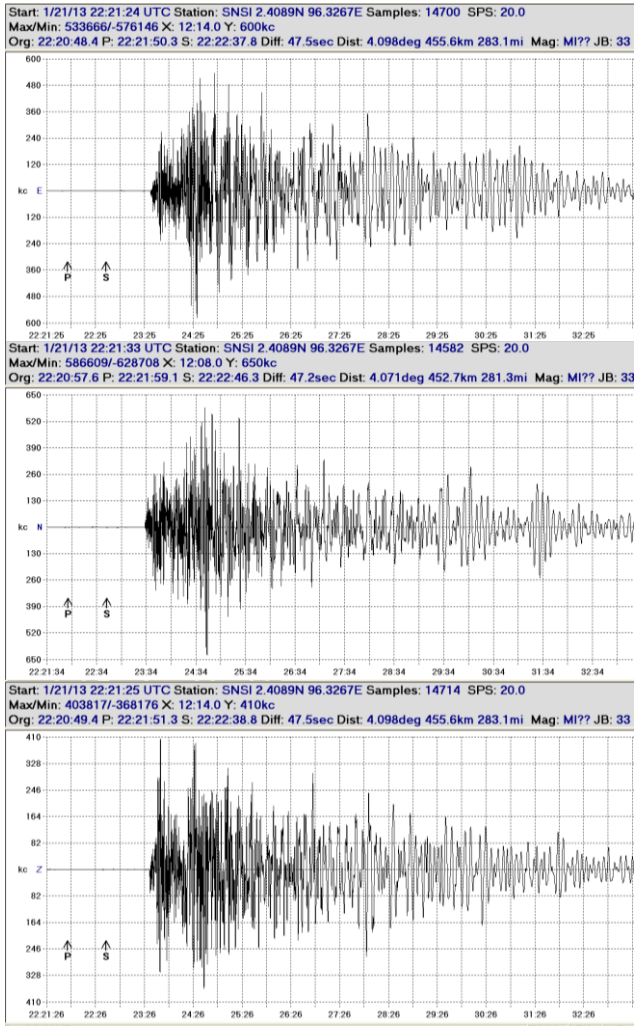
Start: 1/21/13 22:21:51 UTC Station: TRSI 2.0256N 98.9594E Samples: 14544 SPS: 20.0
 Max/Min: 650081/-527172 X: 12.06.0 Y: 675kc
 Org: 22:21:15.8 P: 22:22:17.1 S: 22:23:04.1 Diff: 47.0sec Dist: 4.054deg 450.7km 280.0mi Mag: M1?? JB: 33



b. Stasiun SISI

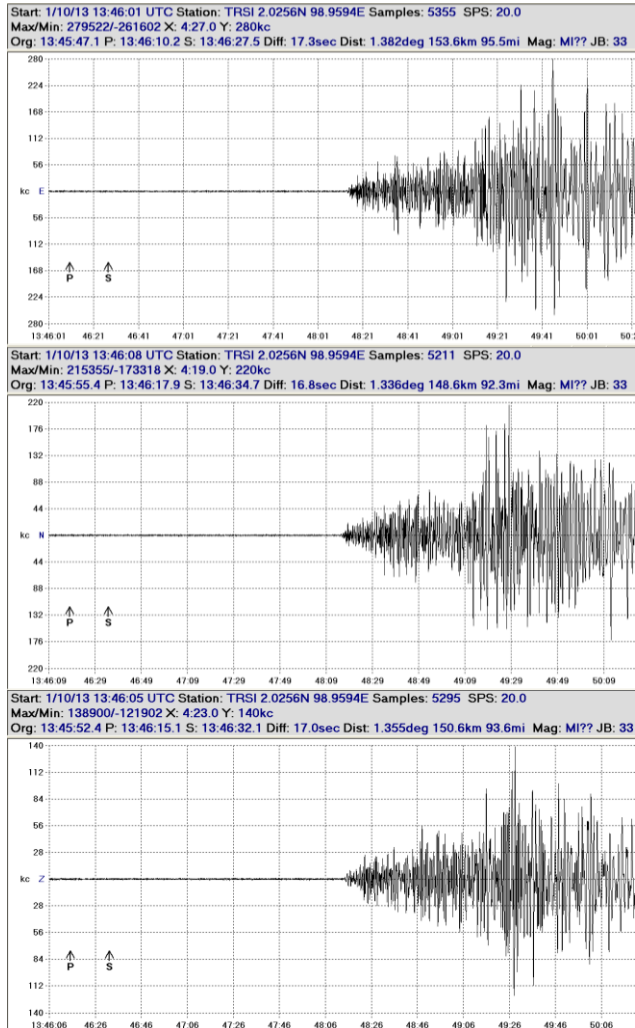


c. Stasiun SNSI



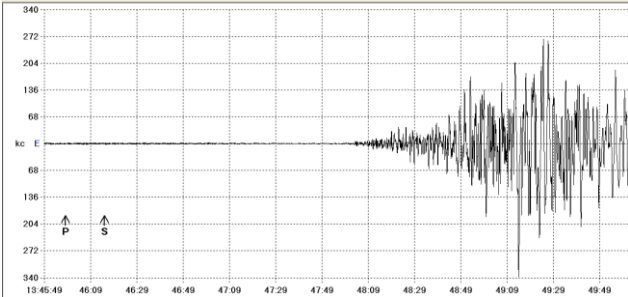
5. Data rekaman gempa pada tanggal 10/01/2013 pukul 13:47:05

a. Stasiun TRSI

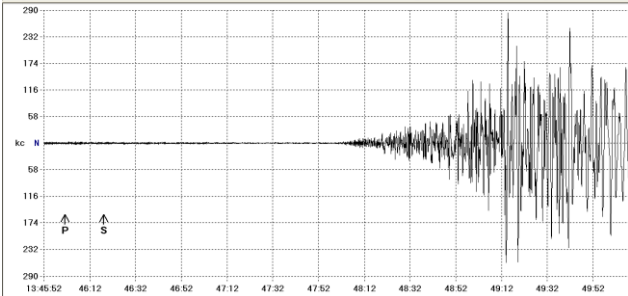


b. Stasiun TSI

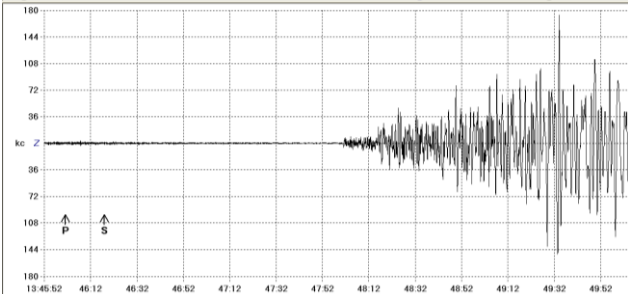
Start: 1/10/13 13:45:48 UTC Station: TSI 3.5012N 98.5645E Samples: 5276 SPS: 20.0
 Max/Min: 264358/-337410 X: 4.22 0 Y: 340kc
 Org: 13:45:35.3 P: 13:45:58.0 S: 13:46:15.0 Diff: 17.0sec Dist: 1.355deg 150.6km 93.6mi Mag: MI?? JB: 33



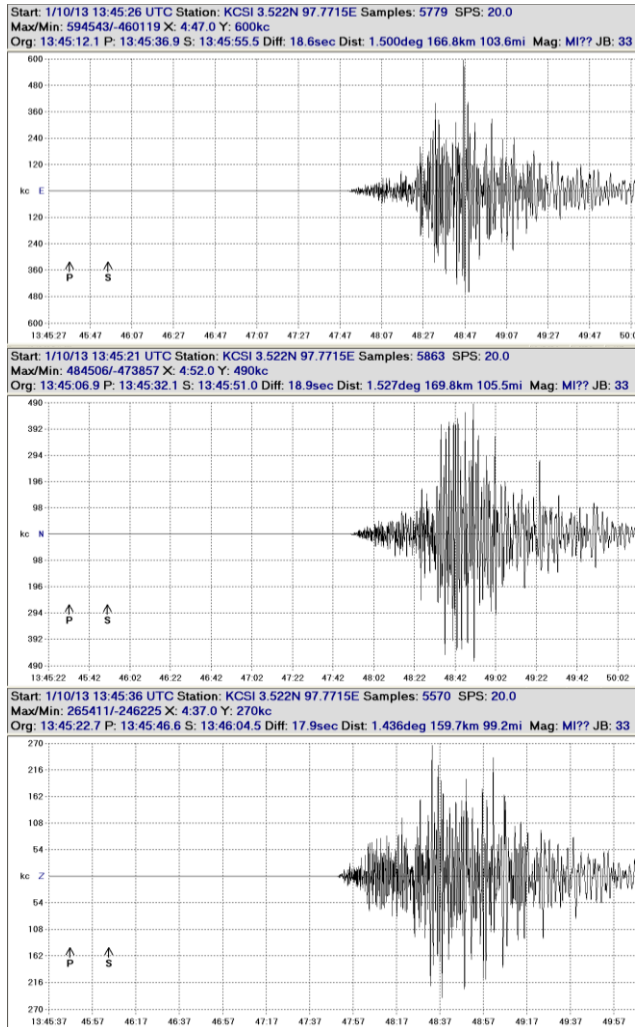
Start: 1/10/13 13:45:51 UTC Station: TSI 3.5012N 98.5645E Samples: 5282 SPS: 20.0
 Max/Min: 283971/-260298 X: 4.23 0 Y: 290kc
 Org: 13:45:38.4 P: 13:46:01.1 S: 13:46:18.1 Diff: 17.0sec Dist: 1.355deg 150.6km 93.6mi Mag: MI?? JB: 33



Start: 1/10/13 13:45:51 UTC Station: TSI 3.5012N 98.5645E Samples: 5247 SPS: 20.0
 Max/Min: 173661/-149755 X: 4.21 0 Y: 180kc
 Org: 13:45:38.4 P: 13:46:01.0 S: 13:46:17.9 Diff: 16.9sec Dist: 1.346deg 149.6km 93.0mi Mag: MI?? JB: 33

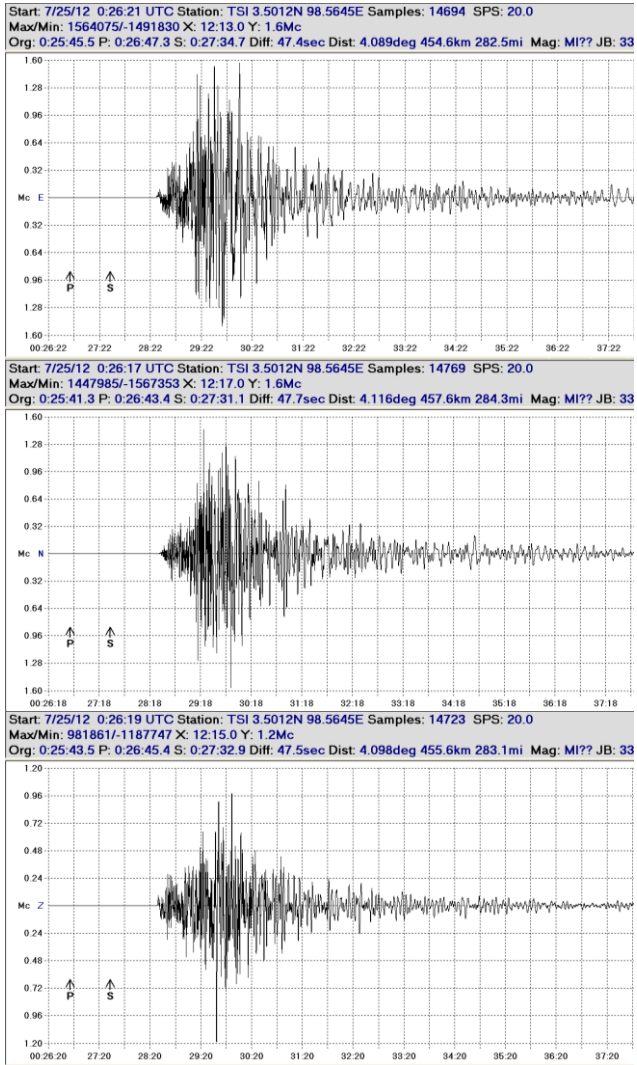


c. Stasiun KCSI

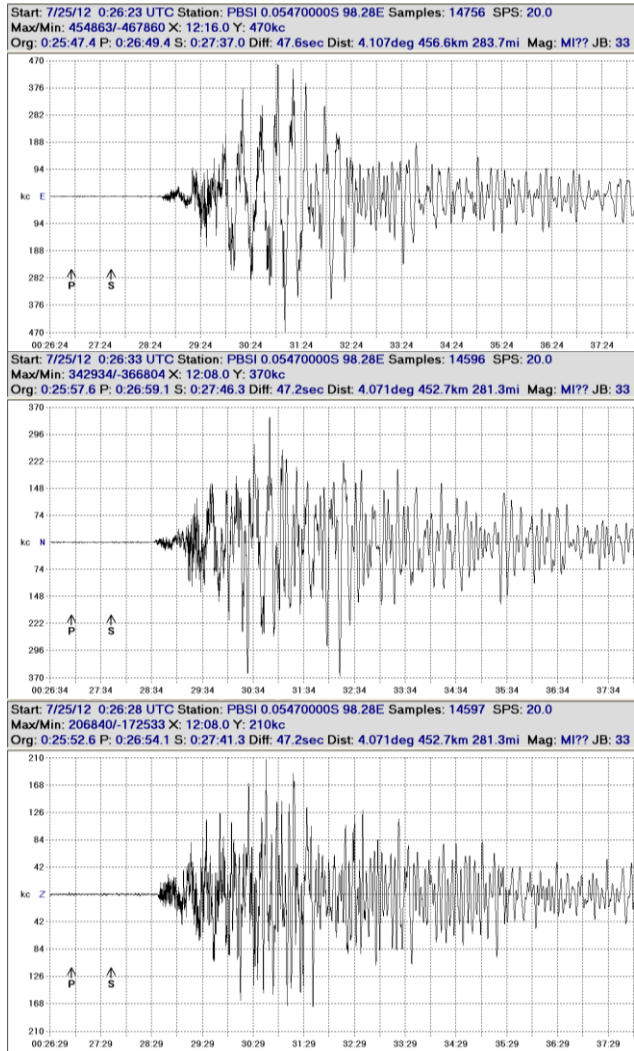


6. Data rekaman gempa pada tanggal 25/07/2012 pukul 00:27:44

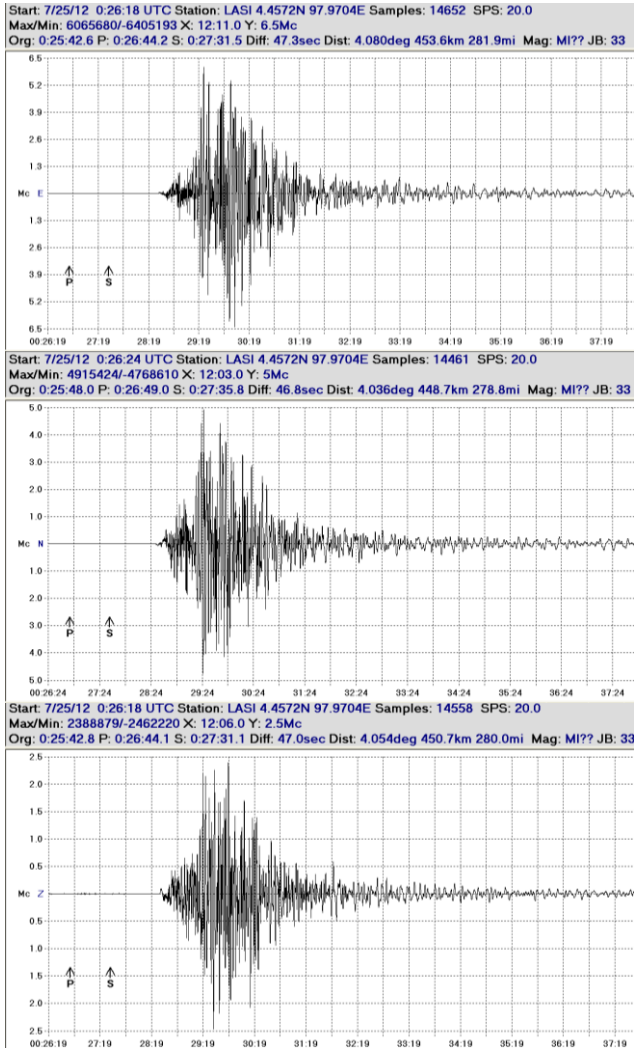
a. Stasiun TSI



b. Stasiun PBSI

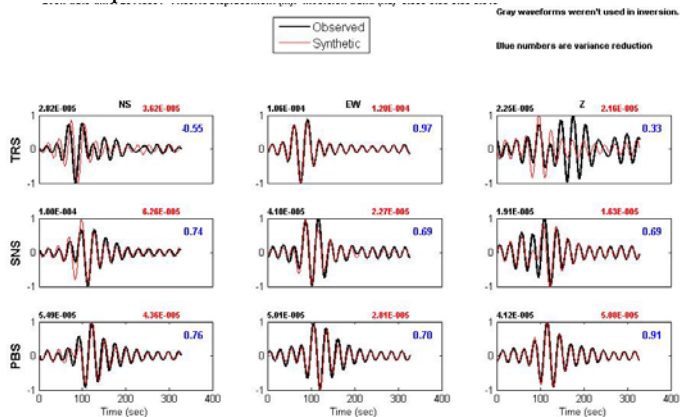


c. Stasiun LASI

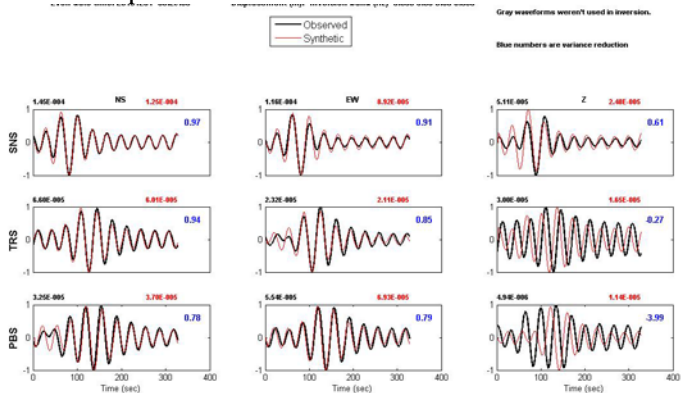


Lampiran b

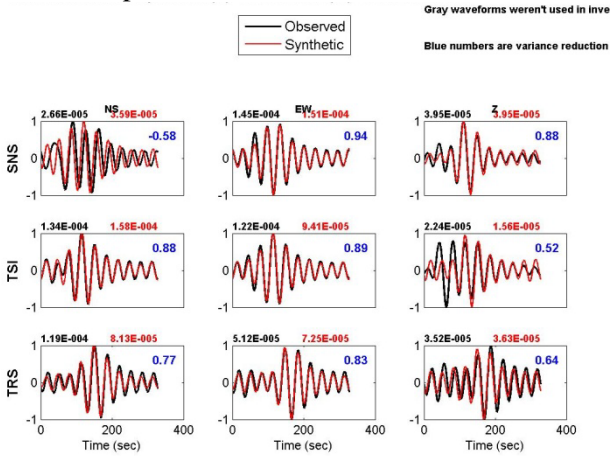
1. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 01/05/2014 pukul 14:35:40



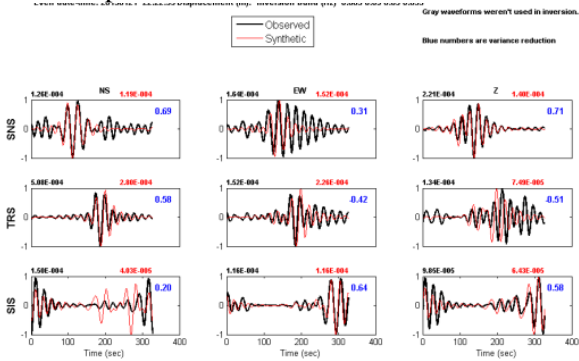
2. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 01/12/2013 pukul 06:29:58



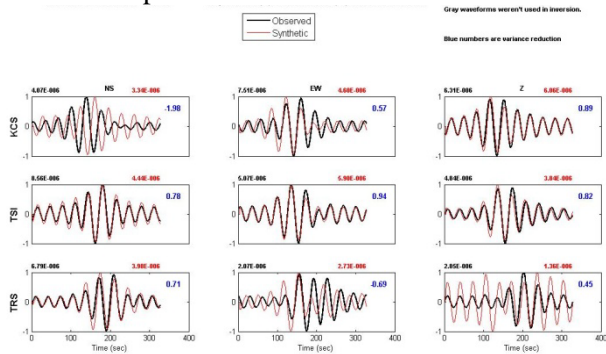
3. *Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 02/07/2013 pukul 07:37:075*



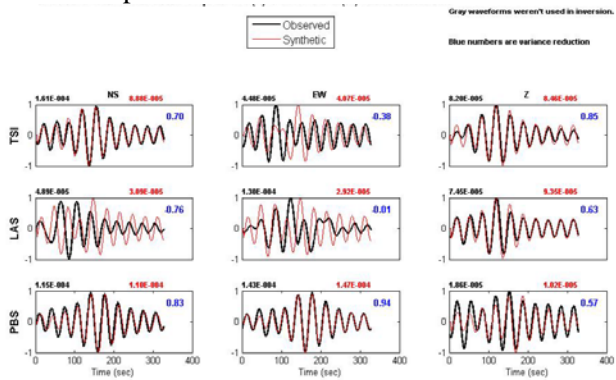
4. *Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 21/01/2013 pukul 22:2:53*



5. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 10/10/2013 pukul 13:47:05



6. *Fitting kurva displacement* untuk event gempa pada tanggal 25/07/2012 pukul 00:27:44



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran c

1. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 01/05/2014 pukul 14:35:40

MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (IA)

Origin time 20140501 14:35:40.00
 Lat 1.99 Lon 97.91 Depth 58

CENTROID

Trial source number : 21 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat 1.99 Lon 97.91
 Centroid Depth : 45
 Centroid time : +0.2 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 7.802e+017

Mw : 5.9

DC% :79.8

CLVD% :20.2

Var.red.(for stations used in inversion):0.78

Var.red.(for all stations) :0.78

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver	Components Used
131	77	59	TRS	+	+	+	
21	33	155	SNS	+	+	+	
			PBS	+	+	+	

P-axis Azimuth Plunge

245 25

T-axis Azimuth Plunge

8 49

Mrr Mtt Mpp

3.078 2.076 -5.154

Mrt Mrp Mtp

5.479 -2.901 1.501

Exponent (Nm): 17



2. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 01/12/2013 pukul 06:29:58

MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (IA)

Origin time 20131201 06:29:58.00
Lat 2.04 Lon 96.84 Depth 17

CENTROID

Trial source number : 1 (Fixed Epicenter inversion)
Centroid Lat 2.04 Lon 96.84
Centroid Depth : 5
Centroid time : +4 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 3.764e+018

Mw : 6.3

DC% :90

CLVD% :10

Var.red.(for stations used in inversion):0.85

Var.red.(for all stations) :0.85

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver
234	3	8	SNS	+	+	+
136	90	93	TRS	+	+	+
			PBS	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

222 44

T-axis Azimuth Plunge

49 45

Mrx	Mtt	Mpp
0.157	-0.304	0.146
Mrt	Mrp	Mtp
2.605	-2.702	-0.108
Exponent (Nm): 18		



3. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 02/07/2013 pukul 07:37:05

MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (IA)

Origin time 20130702 07:37:05.00
 Lat 4.59 Lon 96.63 Depth 10

CENTROID

Trial source number : 4 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat 4.59 Lon 96.63
 Centroid Depth : 11
 Centroid time : +1.2 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 1.973e+018

Mw : 6.1

DC% :51.1

CLVD% :48.9

Var.red.(for stations used in inversion):0.86

Var.red.(for all stations) :0.86

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver	Used
297	80	-154	SNS	+	+	+	
202	64	-11	TSI	+	+	+	
			TRS	+	+	+	

P-axis Azimuth Plunge

162 26

T-axis Azimuth Plunge

67 10

Mrr Mtt Mpp

0.064 -1.297 1.233

Mrt Mrp Mtp

1.083 0.149 -1.045

Exponent (Nm): 18



4. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 21/01/2013 pukul 22:22:53

MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (IA)

Origin time 20130121 22:22:53.00
 Lat 4.96 Lon 95.94 Depth 10

CENTROID

Trial source number : 2 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat 4.96 Lon 95.94
 Centroid Depth : 7
 Centroid time : +0.2 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 1.398e+018

Mw : 6

DC% : 74.3

CLVD% : 25.7

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

Var. red. (for all stations) : 0.83

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver
122	82	-165	SNS	+	+	+
30	75	-9	TRS	+	+	+
			SIS	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

346 16

T-axis Azimuth Plunge

255 4

Mrr Mtt Mpp

-0.268 -1.041 1.309

Mrt Mrp Mtp

-0.324 0.057 -0.643

Exponent (Nm) : 18



5. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 10/01/2013 pukul 13:47:05

MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (IA)

Origin time 20130110 13:47:05.00

Lat 4.66 Lon 95.09 Depth 55

CENTROID

Trial source number : 8 (Fixed Epicenter inversion)

Centroid Lat 4.66 Lon 95.09

Centroid Depth : 19

Centroid time : +3.6 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 3.507e+017

Mw : 5.6

DC% : 62.9

CLVD% : 37.1

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

Var.red.(for all stations) :0.6

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver
298	35	84	KCS	+	+	+
126	55	94	TSI	+	+	+
			TRS	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

213 10

T-axis Azimuth Plunge

52 79

Mrr Mtt Mpp
3.581 -2.298 -1.283

Mrt Mrp Mtp
0.845 -0.867 0.979

Exponent (Nm): 17



6. Hasil *focal mechanism* dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 25/07/2012 pukul 00:27:44

MOMENT TENSOR SOLUTION

HYPOCENTER LOCATION (IA)

Origin time 20120125 00:27:44.00
 Lat 2.62 Lon 96.1 Depth 10

CENTROID

Trial source number : 1 (Fixed Epicenter inversion)
 Centroid Lat 2.62 Lon 96.1
 Centroid Depth : 5
 Centroid time : +4 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 1.030e+019

Mw : 6.6

DC% : 98.5

CLVD% : 1.5

Var. red. (for stations used in inversion) : 0.63

Var. red. (for all stations) : 0.63

Strike	Dip	Rake	Station	NS	EW	Ver
136	88	90	TSI	+	+	+
226	2	0	LAS	+	+	+
			PBS	+	+	+

P-axis Azimuth Plunge

226 43

T-axis Azimuth Plunge

46 47

Mrr	Mtt	Mpp
0.658	-0.340	-0.318
Mrt	Mrp	Mtp
7.135	-7.405	0.250

Exponent (Nm) : 18

