



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RELOKASI GEMPABUMI UTAMA DAN GEMPABUMI SUSULAN  
MENGUNAKAN METODE MJHD (STUDI KASUS GEMPABUMI  
MENTAWAI 25 OKTOBER 2010)**

**SKRIPSI**

**YANUARSIH TUNGGAL PUTRI**

**0906602206**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**DEPOK**

**JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RELOKASI GEMPABUMI UTAMA DAN GEMPABUMI SUSULAN  
MENGUNAKAN METODE MJHD (STUDI KASUS GEMPABUMI  
MENTAWAI 25 OKTOBER 2010)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains**

**YANUARSIH TUNGGAL PUTRI**

**0906602206**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**DEPOK**

**JUNI 2012**

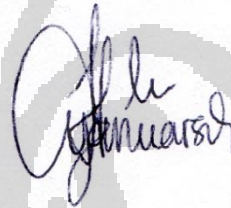
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Yanuarsih Tunggal Putri

NPM : 0906602206

Tanda Tangan :



Tanggal : 12 Juni 2012



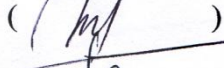

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Yanuarsih Tunggal Putri  
NPM : 0906602206  
Program Studi : Fisika  
Judul Skripsi : Relokasi Gempabumi Utama dan Gempabumi  
Susulan Menggunakan Metode MJHD (Studi  
Kasus Gempabumi Mentawai 25 Oktober  
2010)

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Eng. Supriyanto, M.Sc (  )  
Pembimbing II : Ir. Wijayanto, MDM (  )  
Penguji I : Drs. M. Syamsu Rosid, Ph.D (  )  
Penguji II : Dr. rer. nat. Abdul Haris (  )

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 12 Juni 2012

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah* *rabbil'alamiin*. Puji syukur penulis haturkan kepada Allah SWT yang selalu memberikan limpahan rahmat, hidayah dan karunia yang tak terhingga sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat yang dibutuhkan untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, semangat dan doa yang diberikan oleh banyak pihak. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada :

1. Keluarga tercinta : Bapak, Ibu, Abi yang selalu memberikan doa dan semangat pada penulis sehingga penulis bisa menjadikan setiap mimpi demi mimpi menjadi nyata. Semoga kebahagiaan ini bisa membuat kalian bahagia juga.
2. Bapak Dr. Eng. Supriyanto, M.Sc. dan Bapak Ir. Wijayanto, MDM, selaku dosen pembimbing, terimakasih atas bimbingan, saran dan bantuannya pada penulis sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
3. Bapak Drs. M. Syamsu Rosid Ph.D., dan Bapak Dr. rer. nat. Abdul Haris, selaku dosen penguji atas diskusi, saran dan kritiknya sehingga membuat skripsi ini menjadi lebih baik.
4. Dr. Nobuo Hurukawa, thank you very much for you kindness and guidance sensei.
5. Keluarga besar Soepardi dan Suroredjo, kalian sangat berpengaruh sampai akhirnya mimpi ini terwujud. Darah memang lebih kental daripada air. Budhe, terimakasih banyak atas pinjaman netbooknya di saat yang genting.
6. Rekan-rekan Pusat Gempabumi Nasional BMKG, Bapak-Bapak bos dan semua rekan, terimakasih atas pengertiannya, ijin-ijin yang diberikan dan jadwal tukar dinas yang lancar. Novi, Cici Meida, Mba Rahmah, Pita,

makasih ya doa dan dukungannya tiga tahun ini. Teh Oke, Teh Bea, Mas Tatok, Kang Gian, Kang Ramdhan, Mas Nova, terimakasih banyak atas ilmu yang dibagikan pada penulis.

7. Teman-teman S1 ekstensi geofisika angkatan 2009 : Banu – bona, Dwiki – bewok, Evan, Fristy, Habibie – bibie, Lilik, Tita, Riyan – singa aum aum, atas tiga tahun yang penuh warna, menyenangkan.
8. Keluarga baru saya di Laboratorium Modeling Geofisika, Departemen Fisika : Aji, Ichwan, Piril, Rino, Siska. Terimakasih atas doa, semangat, bantuan dan diskusi yang sangat membantu.
9. Mba Ratna, Mas Rizki dan semua bagian sekretariat Departemen Fisika, terimakasih banyak atas bantuannya sehingga penulis dapat melewati proses-proses administrasi dengan mudah dan lancar.
10. Semua pihak yang sudah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih banyak atas doa dan dukungannya.

Penulis menyadari kemungkinan masih banyak kekurangan yang terdapat dalam skripsi ini. Oleh karena itu penulis menerima jika ada saran dan kritik yang membangun untuk menyempurnakan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat dikembangkan lagi dan bermanfaat bagi semua pihak.

Depok, Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yanuarsih Tunggal Putri  
NPM : 0906602206  
Program Studi : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

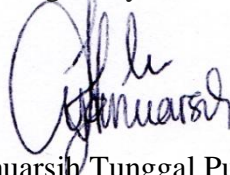
**Relokasi Gempabumi Utama dan Gempabumi Susulan Menggunakan Metode MJHD (Studi Kasus Gempabumi Mentawai 25 Oktober 2010)**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 12 Juni 2012

Yang menyatakan



(Yanuarsih Tunggal Putri)

## ABSTRACT

Name : Yanuarsih Tunggal Putri  
Program : Physics  
Title : Relocation of Mainshock and Aftershock of Earthquake  
Using MJHD Method. (Case Study Mentawai Earthquake  
25 October 2010)

The region along west of Sumatra island is very vulnerable region in case of earthquake disaster because of this region is located at active subduction zone which caused by convergent boundaries of two tectonic plates, Eurasian plates and Indo-Australian plates. The knowledge about tectonic setting is needed by the community at this region to increase their awareness of earthquake hazard and tsunami hazard that can hit them anytime. Precise hypocenter analysis is needed to understand about the accurate tectonic setting. Because of that reason, precise hypocenter information is very important. Earthquake relocation is used to recalculate earthquake hypocenter to become more precisely. In other hand, earthquake relocation also can be useful for identifying fault plane which can be determined by the earthquakes distribution. The purposes of this study is to relocate earthquake hypocenter of Mentawai earthquake 25 October 2010 (7.1 SR) and to identifying it's fault plane. Modified Joint Hypocenter Determination method is used to relocate earthquake's hypocenter by using P-wave arrival time from The Agency of Meteorology Climatology and Geophysical (BMKG). Earthquake that be relocated are earthquake which are recorded from the mainshock 25 October 2010 until 5 November 2010. The target area of relocation is  $\pm 1.5$  degree from the mainshock's latitude and  $\pm 1$  degree from the mainshock's longitude and also fulfil the requirement of MEQ and MNST. Finally, the result show that the fault plane of the Mentawai earthquake is the one with strike  $316^\circ$ , dip  $8^\circ$  and slip  $96^\circ$ .

Keyword : Mentawai earthquake, hypocenter relocation, mjhd.



## ABSTRAK

Nama : Yanuarsih Tunggal Putri  
Program Studi : Fisika  
Judul : Relokasi Gempabumi Utama dan Gempabumi Susulan  
Menggunakan Metode MJHD (Studi Kasus Gempabumi  
Mentawai 25 Oktober 2010)

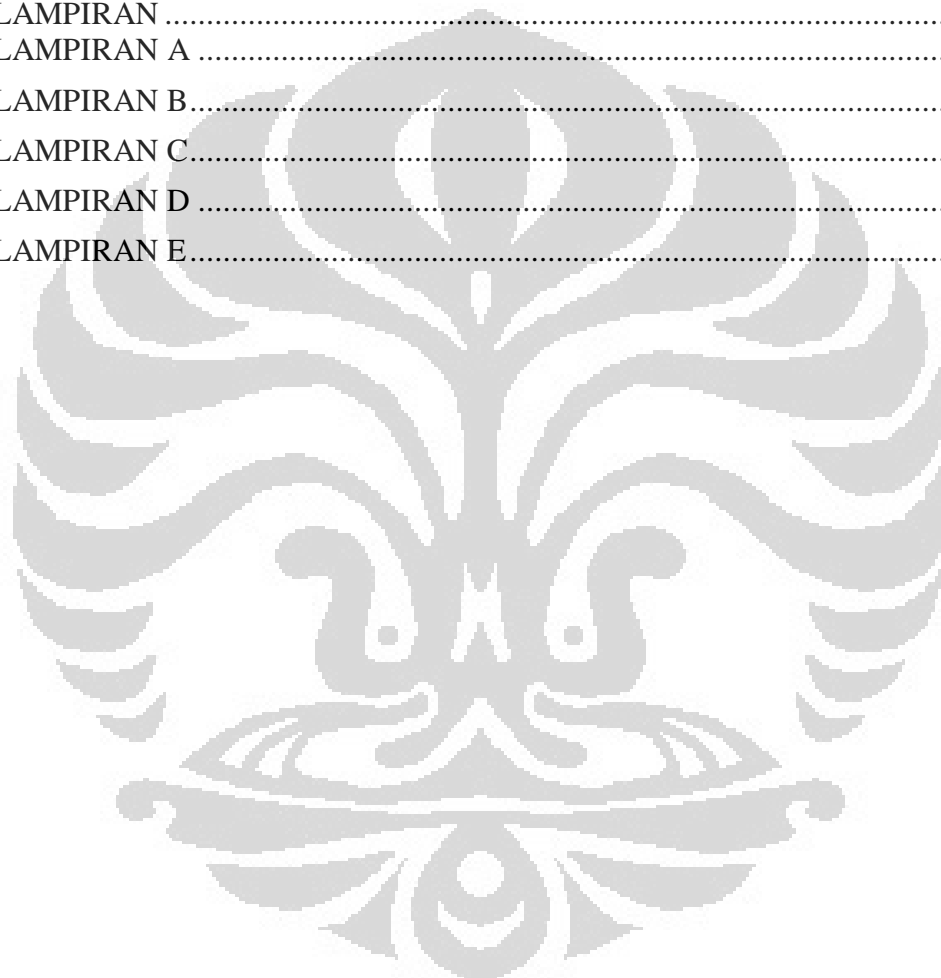
Daerah sepanjang barat Pulau Sumatera adalah daerah yang sangat rawan terhadap bencana gempabumi karena daerah tersebut merupakan zona subduksi aktif yang disebabkan oleh pertemuan dua lempeng tektonik yaitu lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia. Pengetahuan tentang kondisi tektonik ini sangat diperlukan oleh masyarakat di wilayah tersebut sehingga mereka lebih peduli terhadap bahaya gempabumi dan tsunami yang mengancam setiap waktu. Untuk memahami kondisi tektonik yang tepat diperlukan analisis *hypocenter* yang akurat. Karena itulah informasi mengenai *hypocenter* yang akurat sangat penting. Relokasi gempabumi dilakukan untuk menentukan ulang *hypocenter* gempabumi menjadi lebih akurat. Selain itu relokasi gempabumi juga dimanfaatkan untuk mengidentifikasi bidang patahan berdasarkan distribusi gempabumi yang terjadi. Penelitian ini bertujuan untuk merelokasi *hypocenter* gempabumi Mentawai 25 Oktober 2011 (7.1 SR). Metode *Modified Joint Hypocenter Determination* (MJHD) diterapkan untuk merelokasi *hypocenter* gempabumi menggunakan data waktu tiba (*arrival time*) gelombang-P dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Gempabumi yang direlokasi adalah data gempabumi yang tercatat mulai dari terjadinya gempabumi utama 25 Oktober 2010 hingga 5 November 2010. Batasan area relokasi adalah  $\pm 1.5^\circ$  dari lintang dan  $\pm 1^\circ$  dari bujur gempabumi utama. Hasil akhir dari relokasi ini menunjukkan bahwa bidang patahan yang terjadi adalah bidang dengan strike  $316^\circ$ , dip  $8^\circ$  dan slip  $96^\circ$ .

Kata kunci : Gempabumi Mentawai, relokasi *hypocenter*, mjhd.

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vii
ABSTRACT .....	viii
ABSTRAK .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Metodologi Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
BAB 2 TEORI DASAR .....	4
2.1 Sistem Tektonik .....	4
2.1.1 Teori Tektonik Lempeng .....	4
2.1.2 Sesar .....	7
2.2 Gelombang Seismik .....	10
2.2.1 Gelombang badan .....	11
2.2.2 Gelombang permukaan .....	12
2.3 Gempabumi .....	12
2.3.1 Jenis – jenis gempabumi .....	12
2.3.2 Parameter gempabumi .....	14
2.3.3 Mekanisme Fokal .....	17
2.4 Inversi Pada Geofisika .....	18
2.5 Luas Bidang Sesar .....	20
2.6 Seismisitas Indonesia .....	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	22
3.1 Modified Joint Hypocenter Determination (MJHD) .....	22
3.2 Data .....	27
3.3 Pengolahan Data .....	29
3.3.1 Pengambilan Data .....	30
3.3.2 Pengubahan Format Data .....	31
3.3.3 Inversi dengan MJHD .....	32
3.3.4 Plotting dengan GMT .....	33

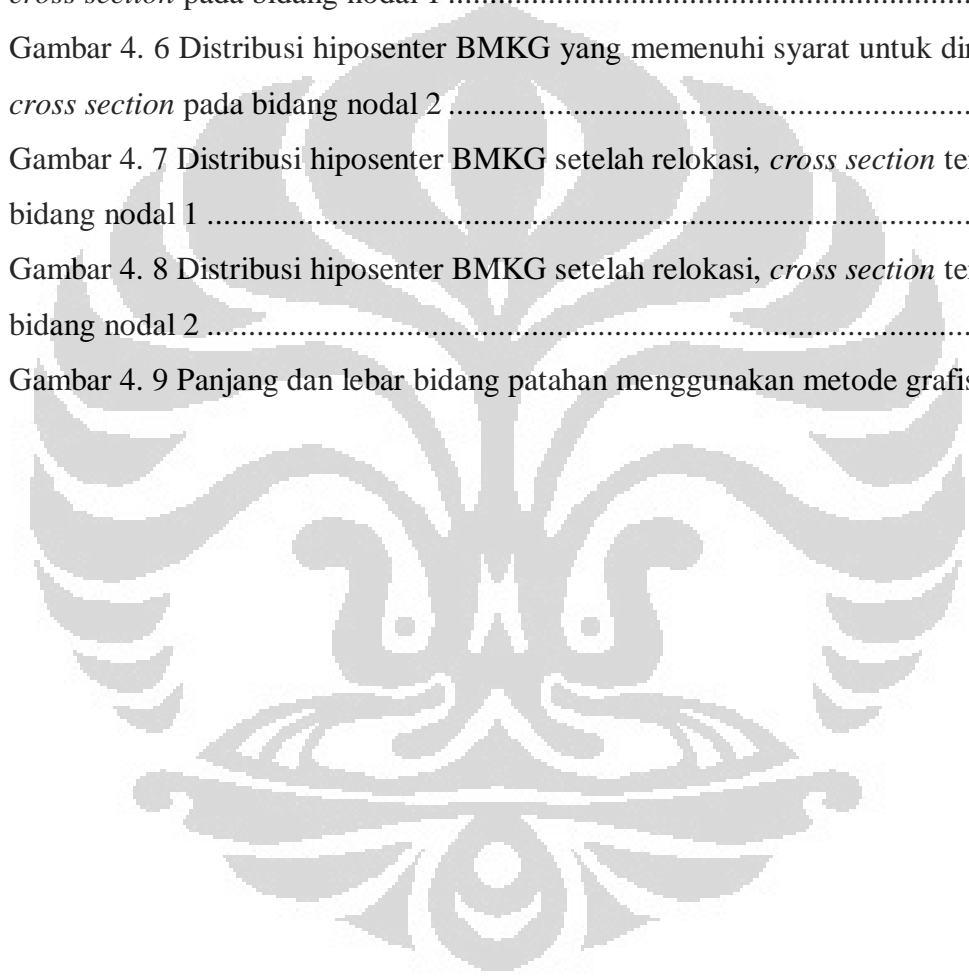
BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN .....	34
4.1 Relokasi Gempabumi .....	34
4.1.1 Hiposenter BMKG sebelum relokasi .....	34
4.1.2 Hiposenter BMKG setelah relokasi .....	39
4.2 Penentuan Arah dan Panjang Bidang Patahan.....	50
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran.....	54
REFERENSI.....	55
LAMPIRAN .....	58
LAMPIRAN A .....	58
LAMPIRAN B.....	59
LAMPIRAN C .....	60
LAMPIRAN D .....	62
LAMPIRAN E.....	64



## DAFTAR GAMBAR

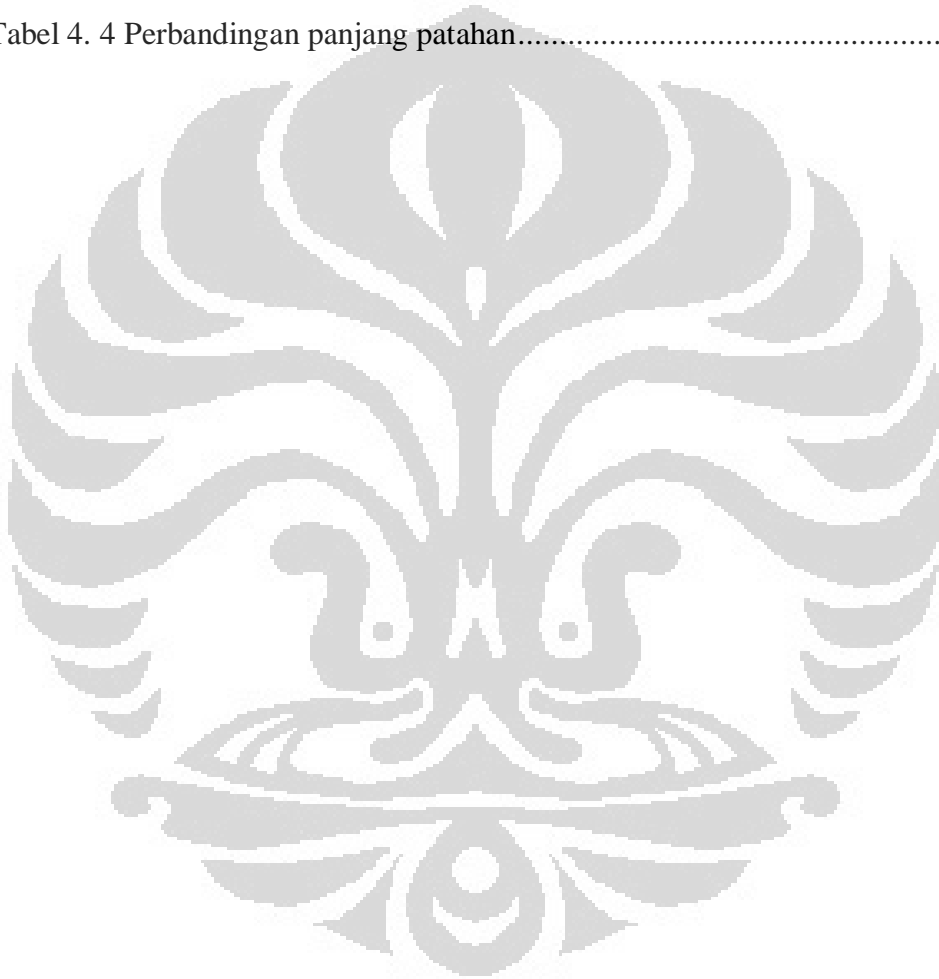
Gambar 2. 1 Struktur dalam bumi (USGS, 1999) .....	4
Gambar 2. 2 Tampilan benua selama kurun waktu 250 juta tahun terakhir (USGS, 2011) .....	5
Gambar 2. 3 Pertemuan lempeng divergen (Atmojo, 2009) .....	6
Gambar 2. 4 Pertemuan lempeng konvergen (Atmojo, 2009) .....	6
Gambar 2. 5 Pertemuan lempeng transform (Atmojo, 2009).....	7
Gambar 2. 6 Diagram bidang sesar (USGS, 2012A).....	7
Gambar 2. 7 Lereng sesar (USGS, 2009A).....	8
Gambar 2. 8 Jejak sesar (USGS, 2009B).....	8
Gambar 2. 9 Jenis-jenis sesar (USGS, 2012B).....	9
Gambar 2. 10 Jenis-jenis gelombang seismik (USGS, 2009C).....	10
Gambar 2. 11 Diagram Wadati (Hurukawa, 2008).....	14
Gambar 2. 12 Penyebaran gelombang P dan S dari <i>hypocenter</i> (Hurukawa, 2008) .....	15
Gambar 2. 13 Jarak <i>hypocenter</i> (Hurukawa, 2008).....	16
Gambar 2. 14 Mekanisme fokal (USGS, 2010A).....	18
Gambar 2. 15 Pemodelan data geofisika.....	19
Gambar 2. 16 Peta seismisitas Indonesia periode tahun 1800 – 2011 (BMKG, 2011) .....	21
Gambar 3. 1 Algoritma metode geiger pada relokasi hiposenter dan <i>origin time</i> . 23	
Gambar 3. 2 Konsep relokasi <i>hypocenter</i> gempa bumi (Hurukawa, 2008) .....	25
Gambar 3. 3 Penampang melintang sebaran slip USGS (Hayes, 2010) .....	27
Gambar 3. 4 Peta daerah penelitian .....	28
Gambar 3. 5 Gempabumi yang digunakan dalam studi relokasi .....	28
Gambar 3. 6 Diagram kerja studi relokasi gempa bumi menggunakan metode MJHD.....	30
Gambar 3. 7 Algoritma proses perubahan format data BMKG ke MJHD .....	31
Gambar 3. 8 Algoritma proses MJHD .....	32

Gambar 4. 1 Distribusi hiposenter BMKG sebelum direlokasi, <i>cross section</i> terhadap bidang nodal 1 .....	36
Gambar 4. 2 Distribusi hiposenter BMKG sebelum direlokasi, <i>cross section</i> terhadap bidang nodal 2 .....	37
Gambar 4. 3 Model slab zona subduksi Sumatera – Jawa (USGS, 2010B).....	38
Gambar 4. 4 Stasiun pencatat yang dipakai dalam relokasi.....	42
Gambar 4. 5 Distribusi hiposenter BMKG yang memenuhi syarat untuk direlokasi, <i>cross section</i> pada bidang nodal 1 .....	43
Gambar 4. 6 Distribusi hiposenter BMKG yang memenuhi syarat untuk direlokasi, <i>cross section</i> pada bidang nodal 2 .....	44
Gambar 4. 7 Distribusi hiposenter BMKG setelah relokasi, <i>cross section</i> terhadap bidang nodal 1 .....	45
Gambar 4. 8 Distribusi hiposenter BMKG setelah relokasi, <i>cross section</i> terhadap bidang nodal 2 .....	48
Gambar 4. 9 Panjang dan lebar bidang patahan menggunakan metode grafis.....	51



## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Mekanisme fokal gempabumi Mentawai 25 Oktober 2010.....	29
Tabel 4. 1 Parameter gempabumi BMKG yang dapat direlokasi.....	40
Tabel 4. 2 Perbandingan parameter gempabumi utama .....	46
Tabel 4. 3 Parameter hasil relokasi.....	49
Tabel 4. 4 Perbandingan panjang patahan.....	52



# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Dalam seismologi, penentuan *hypocenter* gempa bumi secara tepat dan akurat sangat penting. Penentuan *hypocenter* saat ini sudah semakin cepat seiring berkembangnya teknologi. Namun, parameter *hypocenter* yang dihasilkan dianggap masih perlu lebih diakuratkan karena dalam penentuannya, model kecepatan yang digunakan adalah model kecepatan satu dimensi yang global. Di sisi lain penentuan parameter *hypocenter* masih kurang optimal karena semata-mata ditujukan untuk memberikan informasi sesegera mungkin bagi masyarakat. Oleh karena itu dilakukan studi lebih lanjut untuk merelokasi parameter *hypocenter* gempa bumi yang telah dihasilkan sebelumnya. Parameter yang direlokasi adalah *hypocenter* serta waktu terjadinya gempa bumi (*origin time*).

Studi mengenai relokasi gempa bumi sudah banyak dilakukan dalam dunia seismologi internasional. Dalam studi ini, penulis melakukan studi relokasi *hypocenter* terhadap gempa bumi utama dan gempa bumi susulan Mentawai, 25 Oktober 2010 menggunakan metode *Modified Joint Hypocenter Determination* (MJHD) (Hurukawa dan Imoto, 1990, 1992). Metode MJHD ini memiliki keunggulan dapat menghitung banyak gempa bumi secara simultan dan memiliki koreksi stasiun dengan memperhitungkan heterogenitas lateral bumi, (Maung, 2009). Gempa bumi Mentawai sendiri merupakan tipe gempa bumi dengan patahan naik (*reverse fault*) dan termasuk sebagai gempa bumi tsunami (*tsunami earthquake*) atau gempa bumi yang menimbulkan tsunami. Gempa bumi ini juga merupakan *slow earthquake* yaitu gempa bumi yang getarannya dirasakan tidak terlalu kuat namun menimbulkan tsunami. Oleh karena beberapa karakteristik ini, penulis merasa tertarik untuk melakukan studi relokasi *hypocenter* pada gempa bumi Mentawai tersebut.

Pada studi ini, data yang digunakan adalah data waktu tiba gelombang P dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Data yang digunakan sudah melalui tahapan pra processing meliputi *picking* sinyal seismik hingga *quality control*. Data tersebut akan diinversikan dengan metode MJHD dan menghasilkan hypocenter terkoreksi. Hypocenter terkoreksi kemudian diplot menggunakan *Generic Mapping Tool* (GMT) untuk mengetahui arah bidang patahan (*fault plane*).

## 1.2 Tujuan

Tujuan dari studi ini adalah untuk merelokasi *hypocenter* gempa bumi menjadi lebih akurat menggunakan metode inversi MJHD. Selain itu menentukan bidang patahan dari dua *nodal plane* yang tergambar pada *focal mechanism solution* yang telah disediakan oleh *Global Centroid Moment Tensor* (Global CMT) berdasarkan distribusi *hypocenter* gempa bumi susulan yang terjadi.

## 1.3 Batasan Masalah

Pada studi ini akan dilakukan relokasi terhadap gempa bumi Mentawai 25 Oktober 2010. Relokasi dilakukan pada gempa bumi utama (*mainshock*) dan gempa bumi susulan (*aftershock*) dengan menggunakan metode *Modified Joint Hypocenter Determination* (MJHD). Gempa bumi susulan yang direlokasi adalah gempa bumi yang berada di daerah dengan batasan area  $\pm 1$  derajat dari bujur dan  $\pm 1.5$  derajat dari lintang gempa bumi utama.

## 1.4 Metodologi Penelitian

Dalam studi ini, penulis tidak menganalisa kembali sinyal seismik yang ada untuk mendapatkan waktu tiba gelombang-P namun langsung menggunakan data bacaan waktu tiba gelombang-P yang sudah ada di Badan Meteorologi



Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Data dari BMKG kemudian diubah ke dalam format data yang bisa diolah oleh program MJHD. Hasil relokasi dengan menggunakan program MJHD kemudian di plot dalam peta menggunakan program pemetaan yaitu *Generic Mapping Tool* (GMT).

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir terdiri dari lima bab yang secara garis besar dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bab 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini diterangkan latar belakang, tujuan, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

2. Bab 2 DASAR TEORI

Pada bab ini diterangkan tentang sitem tektonik, gempabumi, inversi geofisika, luas bidang sesar dan seismisitas Indonesia.

3. Bab 3 METODE PENELITIAN

Pada bab ini diterangkan tentang metode Modified Joint Hypocenter Determination (MJHD), data yang digunakan dan pengolahan data.

4. Bab 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini diterangkan tentang hasil yang didapat yaitu hasil relokasi gempabumi yang dilakukan dan penentuan bidang patahan serta luasannya.

5. Bab 5 KESIMPULAN DAN SARAN

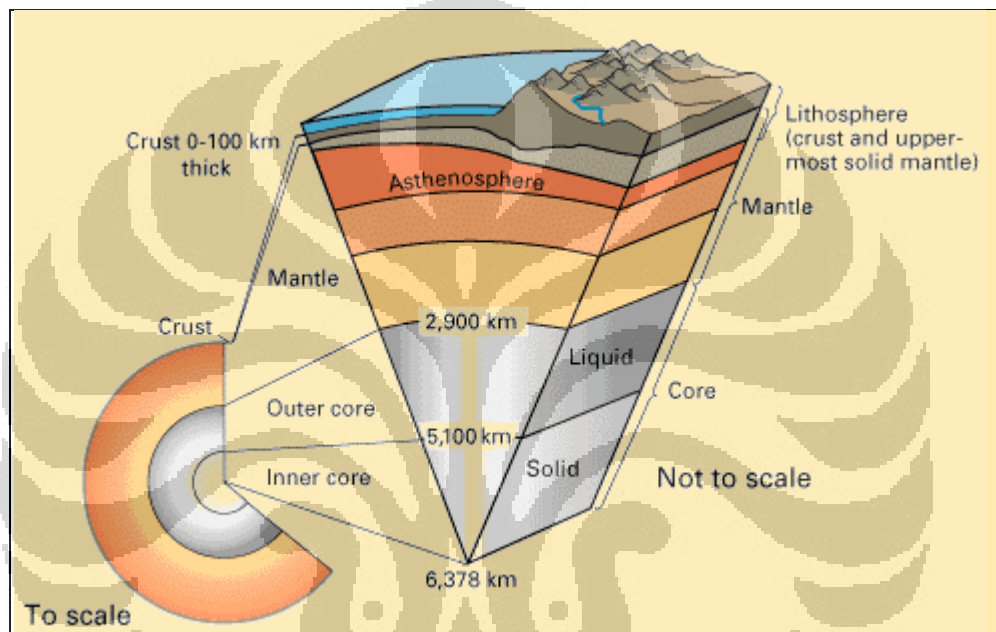
Pada bab ini diterangkan tentang kesimpulan dan saran yang dari penelitian ini.

## BAB 2 TEORI DASAR

### 2.1 Sistem Tektonik

#### 2.1.1 Teori Tektonik Lempeng

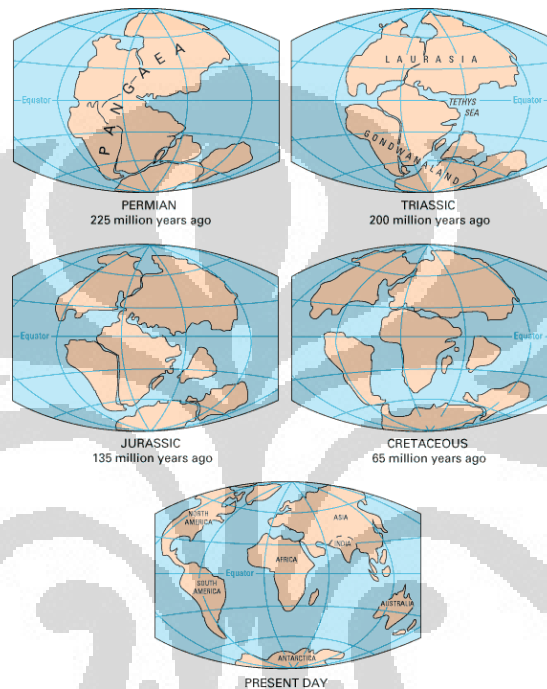
Seperti yang telah diketahui secara umum bahwa bumi ini tersusun dari beberapa lapisan, dimulai dari inti bumi dalam, inti bumi luar, mantel dan kerak.



Gambar 2. 1 Struktur dalam bumi (USGS, 1999)

Inti bumi bagian dalam merupakan daerah yang padat sekalipun suhunya sangat tinggi, hal ini disebabkan oleh tekanan di lapisan tersebut yang juga sangat besar. Inti bumi bagian luar bersifat cair. Mantel pada umumnya lebih padat dari pada inti luar namun dibagian yang bersentuhan dengan kerak bumi yaitu *asthenosphere* bersifat plastis mengarah ke cair. Kerak bumi atau disebut juga lapisan *lithosphere* mengapung diatas lapisan *asthenosphere*. Lapisan kerak bumi terdiri dari kerak benua (*continental crust*) dan kerak samudra (*oceanic crust*).

Saat pertama terbentuk, lapisan benua hanya ada satu yang disebut sebagai benua Pangea. Adanya arus konveksi yang terjadi di lapisan mantel menyebabkan benua ini terpecah dan bergerak saling menjauh menjadi benua Laurasia dan Gondwanaland. Dua benua besar ini pun kembali saling terpecah menjadi benua-benua yang ada sekarang ini, sampai saat ini pun lapisan kerak bumi masih bergerak dengan arah dan kecepatan yang berbeda-beda.

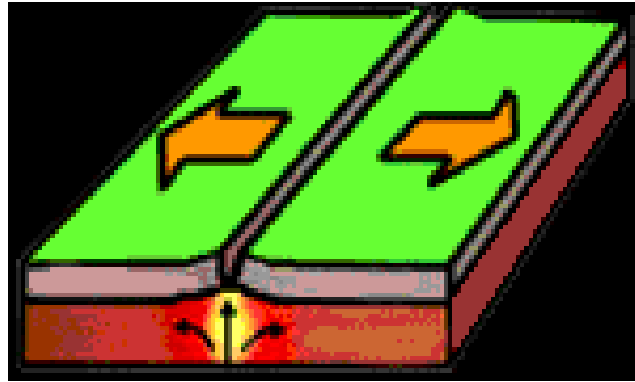


Gambar 2. 2 Tampilan benua selama kurun waktu 250 juta tahun terakhir (USGS, 2011)

Karena densitasnya yang lebih besar, kerak samudra cenderung menyusup ke bawah kerak benua. Tipe pertemuan lempeng-lempeng tektonik ini dibagi menjadi beberapa macam, yaitu :

1) Divergen

- Pertemuan lempeng tektonik yang saling menjauh.
- Pada daerah ini terbentuk lempeng benua baru ditandai dengan adanya palung dasar laut (*ridge*).
- Proses pergerakan semacam ini disebut sebagai *Sea Floor Spreading*.



Gambar 2. 3 Pertemuan lempeng divergen (Atmojo, 2009)

## 2) Konvergen

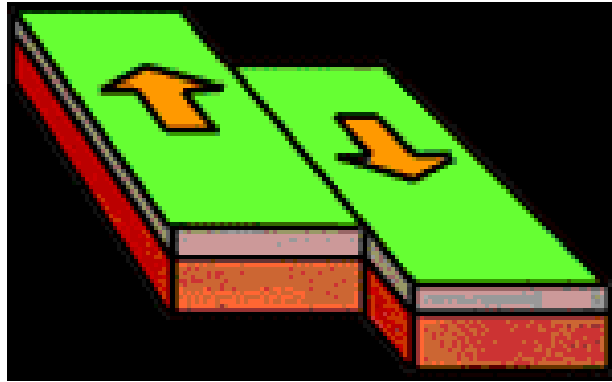
- Pertemuan lempeng tektonik yang saling bertumbukan.
- Salah satu lempeng yang densitasnya lebih besar akan menyusup di bawah lempeng lain yang densitasnya lebih ringan dan membentuk zona subduksi (*Subduction Zone*).



Gambar 2. 4 Pertemuan lempeng konvergen (Atmojo, 2009)

## 3) Transform

- Pertemuan lempeng tektonik yang bergerak secara lateral, satu melewati yang lainnya sehingga lapisan baru tidak terbentuk atau lapisan lama tidak rusak.

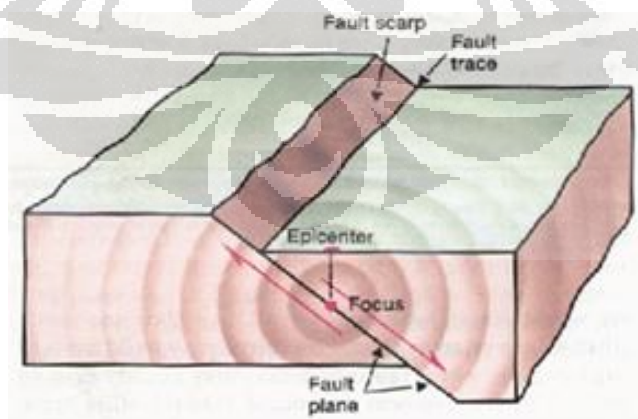


Gambar 2. 5 Pertemuan lempeng transform (Atmojo, 2009)

### 2.1.2 Sesar

Sesar (*fault*) adalah sebuah rekahan akibat pertemuan blok di lapisan kerak dimana blok tersebut saling bergerak satu sama lain relatif terhadap arah rekahan (USGS). Patahan lebih sering terjadi di daerah tumbukan antara lempeng benua dan lempeng samudra, namun dapat juga terjadi di tengah benua.

Bidang sesar (*fault plane*) adalah permukaan dimana terjadi *slip* selama gempa bumi (USGS). Hypocenter gempa bumi bisa diasumsikan sebagai sebuah titik di bidang sesar, namun pada kenyataannya gempa bumi adalah pelepasan energi yang terjadi pada sebuah bidang yang disebut juga bidang sesar.



Gambar 2. 6 Diagram bidang sesar (USGS, 2012A)

Gambar diatas menjelaskan tentang bidang sesar, *hypocenter* atau disebut juga *focus*, lereng sesar (*fault scarp*) yang merupakan penampakan di permukaan bumi yang menyerupai undakan yang diakibatkan oleh *slip* patahan dan jejak sesar (*fault trace*) yaitu pertemuan antara sesar dengan tanah di permukaan.



Gambar 2. 7 Lereng sesar (USGS, 2009A)



Gambar 2. 8 Jejak sesar (USGS, 2009B)

Dua blok yang bersinggungan disebut sebagai *hanging wall* dan *foot wall*. *Hanging wall* adalah blok yang terdapat di bagian atas bidang sesar sedangkan *foot wall* adalah blok yang terdapat di bagian bawah bidang sesar.

Ada tiga tipe sesar yang terjadi :

a) Sesar Strike-Slip

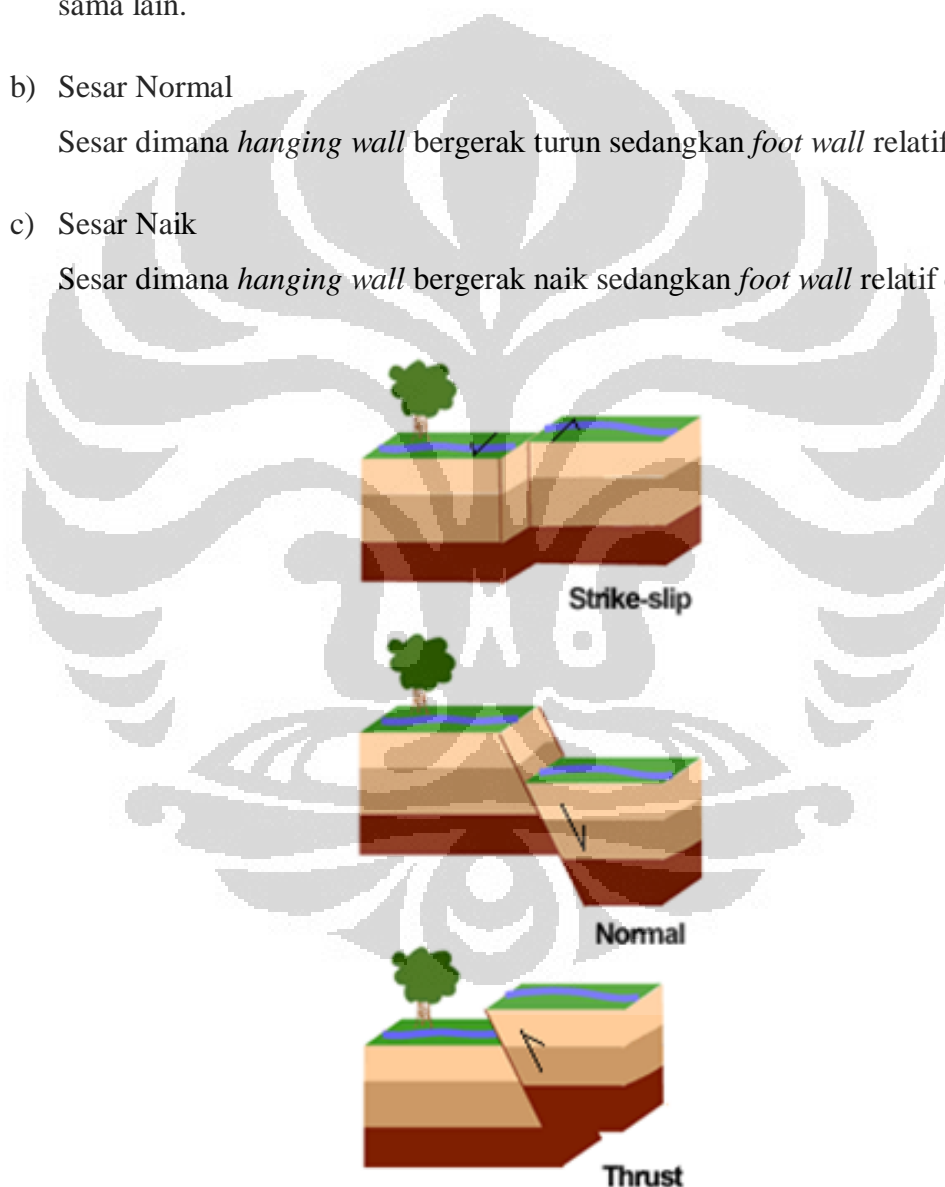
Sesar dimana dua blok yang bertemu saling bergerak horizontal terhadap satu sama lain.

b) Sesar Normal

Sesar dimana *hanging wall* bergerak turun sedangkan *foot wall* relatif diam.

c) Sesar Naik

Sesar dimana *hanging wall* bergerak naik sedangkan *foot wall* relatif diam.

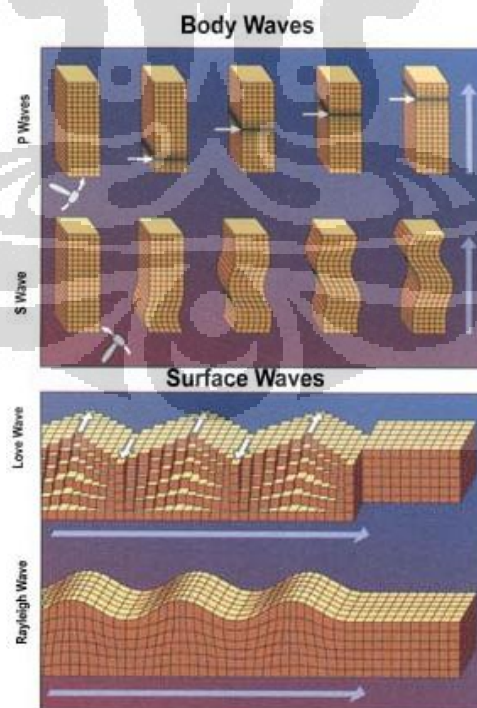


Gambar 2. 9 Jenis-jenis sesar (USGS, 2012B)

## 2.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat di dalam bumi diakibatkan oleh adanya gempa bumi, aktifitas vulkanik atau ledakan buatan manusia. Gelombang seismik disebut juga gelombang elastik karena osilasi partikel-partikel medium terjadi akibat interaksi antara gaya gangguan atau gradien stress melawan gaya-gaya elastik. Dari interaksi ini muncul gelombang longitudinal, gelombang transversal dan kombinasi diantara keduanya. Apabila medium hanya memunculkan gelombang longitudinal saja misalnya di dalam fluida, maka dalam kondisi ini gelombang seismik sering dianggap sebagai gelombang akustik.

Jika sumber yang menimbulkan terjadinya gelombang seismik sangat besar maka gelombang ini dapat merambat sampai ke inti bumi dan direkam di balik belahan bumi dari sumber gelombang yang terjadi. Gelombang seismik terdiri dari gelombang badan atau *body wave* dan gelombang permukaan atau *surface wave*.



Gambar 2. 10 Jenis-jenis gelombang seismik (USGS, 2009C)

Universitas Indonesia



### 2.2.1 Gelombang badan

Gelombang badan adalah gelombang seismik yang merambat hingga ke dalam bumi.

- Gelombang P

Gelombang P atau disebut juga gelombang primer adalah gelombang yang pertama kali tercatat di alat seismometer. Hal ini disebabkan karena gelombang ini memiliki kecepatan yang paling cepat dibandingkan gelombang seismik yang lain. Bentuk penjalaran gelombang P adalah longitudinal dimana arah gelombang sejajar dengan arah penjalarannya.

Gelombang P dapat menjalar di semua medium. Arah getarannya kedepan dan kebelakang sehingga materi yang dilaluinya mengalami tekanan dan peragangan seperti spiral. Oleh karena itu, sering disebut dengan *Push-Pull Wave* atau *Compressional Wave*. Persamaan dari kecepatan gelombang P adalah,

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

dimana  $V_p$  adalah kecepatan gelombang P,  $\lambda$  adalah parameter *Lame*,  $\mu$  adalah modulus geser dan  $\rho$  adalah densitas batuan.

Dalam peringatan dini gempa bumi maupun tsunami, gelombang P sangat bermanfaat karena gelombang ini adalah gelombang yang pertama kali sampai di stasiun pencatat sehingga analisa yang cepat dan akurat terhadap gelombang ini akan sangat bermanfaat dalam menentukan parameter gempa bumi dengan cepat pula.

- Gelombang S

Gelombang S atau gelombang sekunder adalah gelombang seismik yang hanya merambat di permukaan bumi. Merupakan gelombang transversal yang memiliki arah getar tegak lurus dengan arah penjalarannya. Gelombang ini memiliki waktu perambatan yang lebih lama dari pada gelombang P sehingga akan tercatat setelah gelombang P pada alat seismometer.

Gelombang S tidak dapat merambat di medium cair. Persamaan dari kecepatan gelombang S adalah,

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

dimana  $V_s$  adalah kecepatan gelombang S,  $\mu$  adalah modulus geser dan  $\rho$  adalah densitas batuan.

### 2.2.2 Gelombang permukaan

Gelombang permukaan adalah jenis gelombang seismik yang hanya merambat di permukaan bumi. Amplitudo gelombang ini akan semakin melemah jika semakin masuk ke dalam bumi.

- Gelombang *Rayleigh*  
Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang yang merambat pada batas permukaan saja dan hanya dapat merambat pada media padat serta arah getarannya berlawanan arah dengan arah perambatannya.
- Gelombang *Love*  
Gelombang *love* adalah gelombang yang hanya merambat pada batas lapisan saja dan bergerak pada bidang yang horisontal saja.

## 2.3 Gempabumi

### 2.3.1 Jenis – jenis gempabumi

Gempabumi merupakan suatu getaran pada bumi yang dirasakan oleh manusia. Sebab terjadinya gempabumi sendiri terdiri dari beberapa hal, yaitu:

#### 1. Gempabumi Vulkanik (Gunung Api)

Gempabumi ini disebabkan oleh adanya aktivitas vulkanik, biasanya terjadi saat gunung berapi sedang aktif. Gempabumi ini hanya dapat dirasakan oleh masyarakat yang tinggal di sekitar lokasi gunung berapi.

#### 2. Gempabumi Tektonik

Gempabumi ini disebabkan oleh adanya aktivitas tektonik yaitu pergeseran lempeng-lempeng tektonik dunia. Gempabumi ini merupakan gempabumi

yang sangat sering terjadi dan memiliki kemampuan merusak yang sangat tinggi. Gempabumi dapat dirasakan secara luas bahkan gelombang seismiknya dapat tercatat hampir di seluruh wilayah bumi jika kekuatan gempabumi yang terjadi sangatlah besar, seperti yang terjadi pada gempabumi Aceh 26 Desember 2004.

### 3. Gempabumi Runtuhan

Gempabumi ini disebabkan oleh runtuhnya suatu material, biasanya terjadi pada daerah kapur ataupun daerah pertambangan. Jenis gempabumi ini sangat lokal dan jarang terjadi.

### 4. Gempabumi Buatan

Gempabumi buatan adalah gempabumi yang getarannya diakibatkan oleh aktivitas manusia, seperti ledakan dinamit, nuklir atau palu yang dipukulkan ke permukaan bumi untuk kegiatan eksplorasi.

Sedangkan ditinjau kekuatan atau magnitudenya, gempabumi dapat dibedakan atas (Gunawan dan Subardjo, 2004):

1. Gempabumi sangat besar, dengan magnitudo lebih besar dari 8 SR
2. Gempabumi besar, dengan magnitudo antara 7 hingga 8 SR
3. Gempabumi merusak, dengan magnitudo antara 5 hingga 6 SR
4. Gempabumi sedang, dengan magnitudo antara 4 hingga 5 SR
5. Gempa bumi kecil, dengan magnitudo antara 3 hingga 4 SR
6. Gempabumi mikro, dengan magnitudo antara 1 hingga 3 SR
7. Gempabumi ultramikro, dengan magnitudo lebih kecil dari 1 SR

Berdasarkan tipenya Mogi membedakan gempabumi atas beberapa jenis, yaitu, (Gunawan dan Subardjo, 2004):

#### 1. Tipe I

Pada tipe ini gempabumi utama (*mainshock*) diikuti gempa susulan (*aftershock*) tanpa didahului gempa pendahuluan (*foreshock*).

#### 2. Tipe II

Sebelum terjadi gempa bumi utama, diawali dengan adanya gempa pendahuluan dan selanjutnya diikuti oleh gempa susulan yang cukup banyak.

### 3. Tipe III

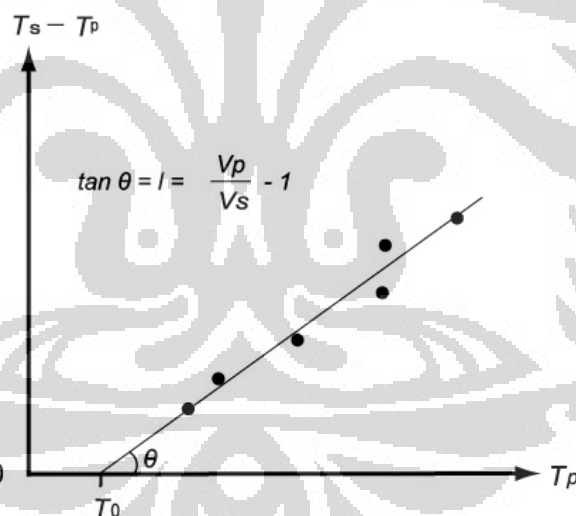
Tidak terdapat gempa bumi utama. Magnitude dan jumlah gempabumi yang terjadi besar pada periode awal dan berkurang pada periode akhirnya dan biasanya dapat berlangsung cukup lama. Tipe gempa ini disebut tipe *swarm*.

#### 2.3.2 Parameter gempabumi

##### a. Waktu Terjadi (*Origin Time*)

*Origin Time* atau waktu terjadinya gempabumi merupakan waktu dimana pelepasan energi pertama kali terjadi pada lempeng tektonik bumi yang mengalami tekanan akibat tumbukan atau gesekan.

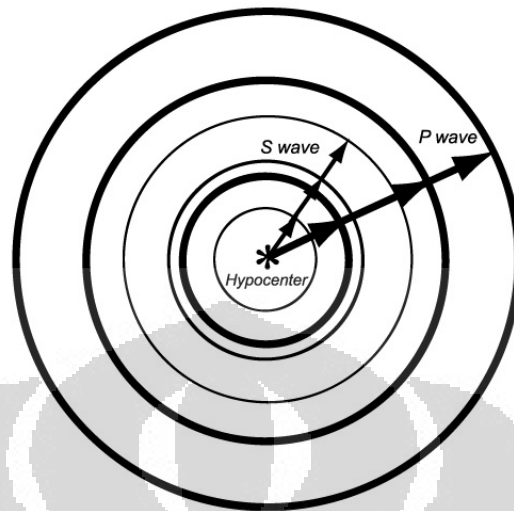
Untuk menentukan *origin time*, secara sederhana dapat menggunakan diagram Wadati,



Gambar 2. 11 Diagram Wadati (Hurukawa, 2008)

dimana  $T_p$  adalah waktu tiba gelombang P,  $T_s$  adalah waktu tiba gelombang S,  $T_0$  adalah origin time,  $V_p$  adalah kecepatan gelombang P dan  $V_s$  adalah kecepatan gelombang S.

*Origin time* ditentukan dari perpotongan garis  $T_p$  ketika  $T_s - T_p$  sama dengan nol.



Gambar 2. 12 Penyebaran gelombang P dan S dari *hypocenter* (Hurukawa, 2008)

Dengan menggunakan diagram Wadati, maka diketahui bahwa  $T_o$  adalah :

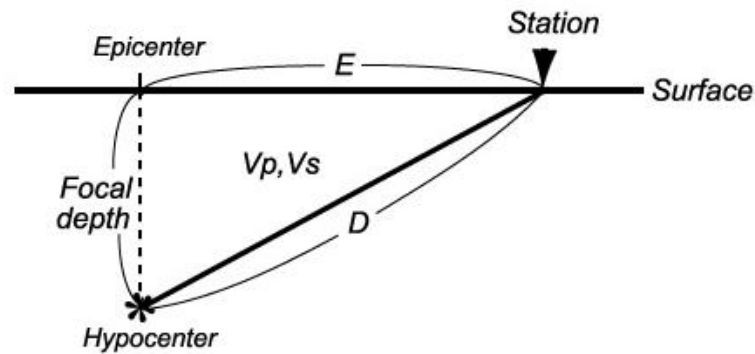
$$T_o = T_p - \frac{T_{sp}}{l} \quad (2.1)$$

dimana  $T_{sp}$  adalah  $T_s - T_p$  dan  $l$  adalah  $\frac{V_p}{V_s} - 1$ .

#### b. Hypocenter

*Hypocenter* merupakan pusat gempa bumi yang berada di dalam permukaan bumi. Untuk memudahkan terkadang *hypocenter* diasumsikan sebagai sebuah titik namun pada kenyataannya *hypocenter* merupakan sebuah bidang yang luasnya tergantung pada besarnya energi yang dilepaskan.

Penentuan *hypocenter* juga dapat menggunakan diagram Wadati, dengan mengasumsikan bahwa lapisan bumi adalah homogen,



Gambar 2. 13 Jarak *hypocenter* (Hurukawa, 2008)

dari gambar diatas,  $D$  adalah jarak *hypocenter* dengan stasiun pencatat, dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$D = T_{po} * V_p \quad (2.2)$$

$$D = T_{so} * V_s = (T_s - T_o) * V_s \quad (2.3)$$

$$= \{(T_s - T_p) + (T_p - T_o)\} * V_s \quad (2.4)$$

$$= (T_{sp} + T_{po}) * V_s \quad (2.5)$$

dimana  $T_{sp}$  adalah  $T_s - T_p$ .

#### c. Epicenter

*Epicenter* merupakan sebuah daerah di permukaan bumi yang tegak lurus terhadap *hypocenter*.

#### d. Magnitudo

Magnitudo merupakan besaran yang menunjukkan kekuatan gempabumi secara empiris. Satuan yang dipakai adalah Skala Richter.

Secara umum, magnitudo dapat dihitung menggunakan formula berikut:

$$M = \log a/T + f(\Delta, h) + C_s + C_R \quad (2.6)$$

dengan  $M$  adalah magnitudo,  $a$  adalah amplitudo gerakan tanah (dalam mikrometer),  $T$  adalah periode gelombang,  $\Delta$  adalah jarak pusat gempa atau episentrum,  $h$  adalah kedalaman gempa,  $C_s$ , dan  $C_R$  adalah faktor koreksi yang bergantung pada kondisi lokal dan regional daerahnya.

Secara lebih spesifik, magnitudo dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

1. Magnitudo Lokal ( $M_L$ )
2. Magnitudo Body Wave ( $m_b$ )
3. Magnitudo Surface Wave ( $M_s$ )
4. Magnitude Moment ( $M_w$ )

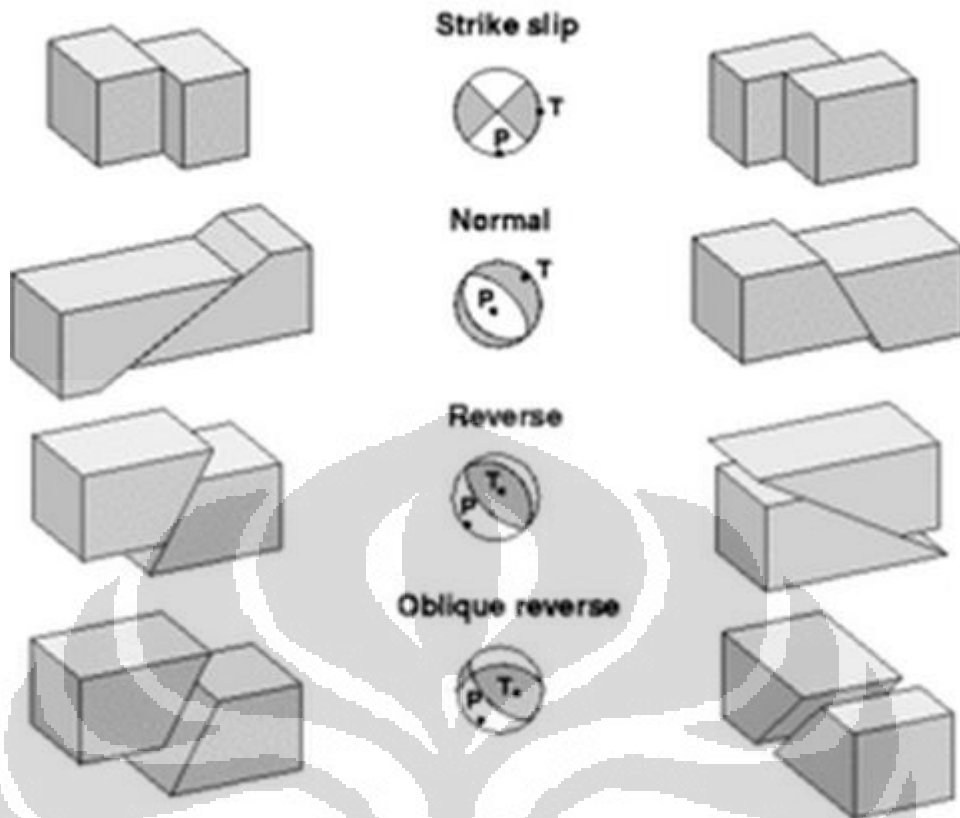
Hingga saat ini jenis magnitudo yang baru terus dikembangkan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika saat ini juga menggunakan jenis magnitudo  $M_w(mB)$  yaitu magnitude moment ( $M_w$ ) yang diturunkan dari magnitude bodywave broadband ( $mB$ ) dan Magnitudo  $M$  yaitu magnitude *summary* yang terdiri dari pemberatan rata-rata untuk tiap magnitude yang ada dan menghasilkan kemungkinan terbaik diantara magnitude-magnitude yang ada.

e. Intensitas

Intensitas merupakan besaran yang menunjukkan kekuatan gempabumi berdasarkan kerusakan yang diakibatkannya. Skala ini lebih subjektif karena nilainya tergantung pada orang yang mengamati. Namun saat ini sudah dikembangkan alat untuk menentukan besarnya skala intensitas yaitu berdasarkan nilai percepatan tanah di suatu daerah, sehingga skala yang di dapat lebih objektif. Skala yang secara umum digunakan adalah *Modified Mercalli System* (MMI).

### 2.3.3 Mekanisme Fokal

*Focal mechanism* merupakan sebuah gambar yang menjelaskan tentang sebuah sesar. Gambar ini seringkali disebut dengan nama "*beach ball*". Dengan menganalisa *focal mechanism* maka bisa diketahui jenis sesar, orientasi sesar serta arah slipnya. Pada gambar di bawah, T menunjukkan daerah yang mengalami tarikan (*tension*) dan digambarkan dengan warna abu-abu, sedangkan P menunjukkan daerah yang mengalami tekanan (*pressure*) dan digambarkan dengan warna putih.



Gambar 2. 14 Mekanisme fokal (USGS, 2010A)

#### 2.4 Inversi Pada Geofisika

Ilmu geofisika merupakan sebuah cabang ilmu yang mempelajari tentang sifat-sifat fisis bumi, seperti cepat rambat gelombang seismik, rapat massa batuan, resistivitas batuan dan sebagainya. Sifat-sifat ini sangat bervariasi baik secara vertikal maupun horizontal. Untuk mengetahui sifat-sifat ini maka dilakukan pengukuran-pengukuran, namun pengukuran-pengukuran yang dilakukan lebih banyak dilakukan di permukaan bumi. Sekalipun ada pengukuran yang dilakukan kedalam lapisan bumi maka jangkauannya akan sangat terbatas bahkan dibandingkan dengan ketebalan lapisan kerak bumi.

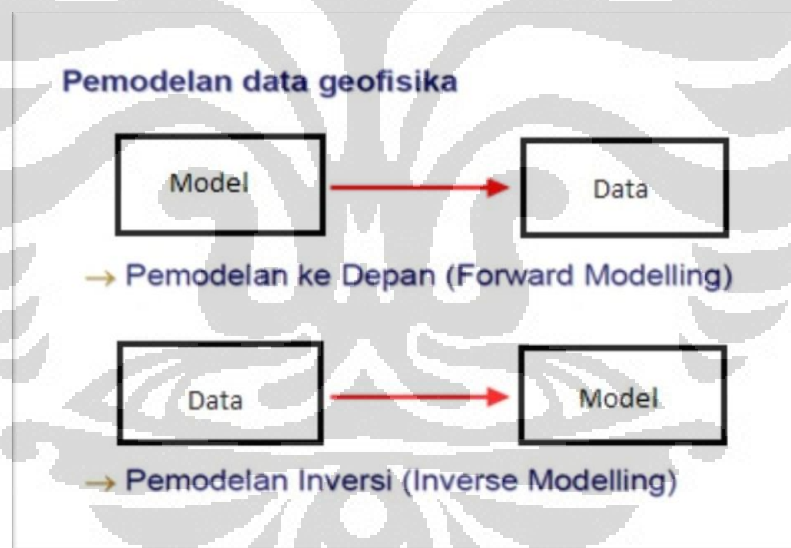
Dari pengukuran yang dilakukan akan didapat data lapangan yang diharapkan dapat digunakan untuk mengetahui distribusi sifat fisis bawah permukaan bumi yaitu dengan melakukan pemodelan. Model yang digunakan

**Universitas Indonesia**



diasumsikan sebagai lapisan bumi bawah permukaan dengan kondisi geologi dan bentuk tertentu. Tujuan representasi menggunakan model adalah agar permasalahan dapat disederhanakan dan respon model dapat dihitung dengan teori-teori fisika (Grandis, 2009).

Dalam ilmu geofisika, dikenal dua pemodelan yaitu *forward modeling* dan *inverse modeling*. *Forward modeling* menyatakan proses perhitungan data yang secara teoritis akan teramati di permukaan bumi jika diketahui harga parameter model bawah permukaan tertentu (Grandis, 2009). *Inverse Modeling* merupakan proses mendapatkan parameter model bawah permukaan dengan menggunakan data pengukuran langsung. Permasalahan geofisika pada dasarnya merupakan permasalahan inversi karena parameter model harus diperkirakan berdasarkan hasil pengamatan data (Grandis, 2009).



Gambar 2. 15 Pemodelan data geofisika

Contoh permasalahan inversi yang diterapkan dalam ilmu geofisika adalah :

1. Penentuan parameter gempabumi
2. Penentuan lokasi benda-benda purbakala yang terpendam
3. Penentuan lokasi kebocoran pipa bawah tanah
4. dll

## 2.5 Luas Bidang Sesar

Luas bidang sesar yang terjadi meliputi panjang area rekahan maupun lebar area rekahan dapat diidentifikasi menggunakan beberapa macam cara, salah satu diantaranya adalah secara empiris menggunakan metode *scaling law* yang dikenalkan oleh Wells dan Coppersmith tahun 1994.

Metode ini menghitung luasan bidang patahan dihubungkan dengan magnitude *moment* yang terjadi. Magnitude *moment* digunakan karena saat ini magnitude inilah yang dinilai sangat akurat karena merupakan perhitungan langsung dari energi yang dilepaskan saat gempa bumi.

Penghitungan empirisnya dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan pada tabel berikut,

Tabel 2. 1 Regresi panjang patahan, lebar patahan, area patahan dan magnitude moment (Wells dan Coppersmith, 1994)

Table 2A  
Regressions of Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Moment Magnitude (M)

Equation*	Slip Type <sup>†</sup>	Number of Events	Coefficients and Standard Errors		Standard Deviation <i>s</i>	Correlation Coefficient <i>r</i>	Magnitude Range	Length/Width Range (km)
			<i>a</i> (sa)	<i>b</i> (sb)				
$M = a + b * \log(\text{SRL})$	SS	43	5.16(0.13)	1.12(0.08)	0.28	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	5.00(0.22)	1.22(0.16)	0.28	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	4.86(0.34)	1.32(0.26)	0.34	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	5.08(0.10)	1.16(0.07)	0.28	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432
$\log(\text{SRL}) = a + b * M$	SS	43	-3.55(0.37)	0.74(0.05)	0.23	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	-2.86(0.55)	0.63(0.08)	0.20	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	-2.01(0.65)	0.50(0.10)	0.21	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	-3.22(0.27)	0.69(0.04)	0.22	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432
$M = a + b * \log(\text{RLD})$	SS	93	4.33(0.06)	1.49(0.05)	0.24	0.96	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	50	4.49(0.11)	1.49(0.09)	0.26	0.93	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	24	4.34(0.23)	1.54(0.18)	0.31	0.88	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	167	4.38(0.06)	1.49(0.04)	0.26	0.94	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$\log(\text{RLD}) = a + b * M$	SS	93	-2.57(0.12)	0.62(0.02)	0.15	0.96	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	50	-2.42(0.21)	0.58(0.03)	0.16	0.93	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	24	-1.88(0.37)	0.50(0.06)	0.17	0.88	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	167	-2.44(0.11)	0.59(0.02)	0.16	0.94	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$M = a + b * \log(\text{RW})$	SS	87	3.80(0.17)	2.59(0.18)	0.45	0.84	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	43	4.37(0.16)	1.95(0.15)	0.32	0.90	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	23	4.04(0.29)	2.11(0.28)	0.31	0.86	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	153	4.06(0.11)	2.25(0.12)	0.41	0.84	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$\log(\text{RW}) = a + b * M$	SS	87	-0.76(0.12)	0.27(0.02)	0.14	0.84	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	43	-1.61(0.20)	0.41(0.03)	0.15	0.90	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	23	-1.14(0.28)	0.35(0.05)	0.12	0.86	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	153	-1.01(0.10)	0.32(0.02)	0.15	0.84	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$M = a + b * \log(\text{RA})$	SS	83	3.98(0.07)	1.02(0.03)	0.23	0.96	4.8 to 7.9	3 to 5,184
	R	43	4.33(0.12)	0.90(0.05)	0.25	0.94	4.8 to 7.6	2.2 to 2,400
	N	22	3.93(0.23)	1.02(0.10)	0.25	0.92	5.2 to 7.3	19 to 900
	All	148	4.07(0.06)	0.98(0.03)	0.24	0.95	4.8 to 7.9	2.2 to 5,184
$\log(\text{RA}) = a + b * M$	SS	83	-3.42(0.18)	0.90(0.03)	0.22	0.96	4.8 to 7.9	3 to 5,184
	R	43	-3.99(0.36)	0.98(0.06)	0.26	0.94	4.8 to 7.6	2.2 to 2,400
	N	22	-2.87(0.50)	0.82(0.08)	0.22	0.92	5.2 to 7.3	19 to 900
	All	148	-3.49(0.16)	0.91(0.03)	0.24	0.95	4.8 to 7.9	2.2 to 5,184

\*SRL—surface rupture length (km); RLD—subsurface rupture length (km); RW—down-dip rupture width (km), RA—rupture area (km<sup>2</sup>).  
<sup>†</sup>SS—strike slip; R—reverse; N—normal.

## 2.6 Seismisitas Indonesia

Kondisi geografis Indonesia yang terletak pada tiga pertemuan lempeng tektonik utama dunia, yaitu lempeng Eurasia, Indo Australia dan lempeng Pasifik menyebabkan Indonesia menjadi salah satu negara dengan aktivitas kegempaan yang sangat tinggi di dunia. Selain itu masih ada lempeng mikro Filipina yang bergerak kearah Selatan di sebelah utara Sulawesi.



Gambar 2. 16 Peta seismisitas Indonesia periode tahun 1800 – 2011 (BMKG, 2011)

Berdasarkan data dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, tercatat terjadinya gempabumi setiap hari di wilayah Indonesia. Namun dari gempabumi – gempabumi yang terjadi tidak semua gempabumi dapat dirasakan oleh masyarakat atau merusak atau menimbulkan tsunami.

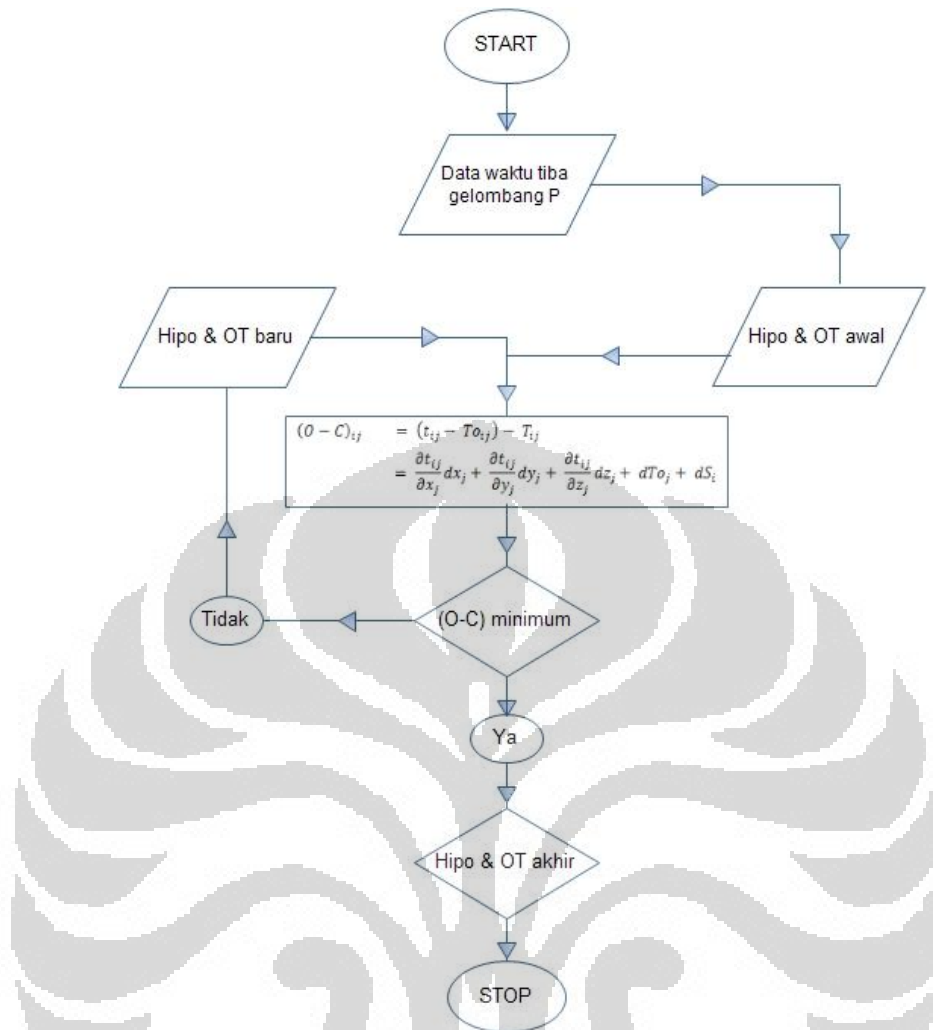
## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Modified Joint Hypocenter Determination (MJHD)

MJHD merupakan metode untuk merelokasi lokasi gempa bumi, parameter gempa bumi yang akan berubah adalah lintang dan bujur gempa bumi, waktu terjadinya gempa bumi, namun perubahan yang signifikan akan terjadi pada kedalaman *hypocenter* gempa bumi. MJHD dikembangkan oleh Hurokawa dan Imoto pada tahun 1990 dan 1992 untuk area lokal dan tahun 1995 untuk area global. Metode ini merupakan pengembangan dari metode relokasi yang telah ada sebelumnya yaitu metode *Joint Hypocenter Determination* (JHD).

Penentuan gempa bumi dengan tujuan early warning akan menggunakan *Single-event Location* dan menggunakan model kecepatan bumi 1-D. Metode JHD digunakan untuk memperbaiki lokasi gempa bumi (Kwang Hee Kim, 2005) dimana esensi dari metode JHD adalah memperhitungkan adanya kesalahan yang disebabkan oleh digunakannya model bumi yang terlalu sederhana (Kwang Hee Kim, 2005), yaitu dengan merelokasi suatu *cluster* gempa bumi secara simultan dan dengan menggunakan koreksi stasiun.

Metode JHD menggunakan metode Geiger untuk menentukan jarak *hypocenter* pada media yang heterogen. Sementara Metode Geiger menggunakan Gauss-Newton untuk menentukan lokasi gempa bumi atau *event* seismic. Metode ini sebetulnya dibuat untuk menentukan *origin time* dan *epicenter*, kemudian dikembangkan untuk menentukan *focal depth* dan *hypocenter*.



Gambar 3. 1 Algoritma metode geiger pada relokasi hiposenter dan *origin time*.

Dataarrival times  $t_i$  sebanyak  $n$ , digunakan untuk menentukan *origin time*  $T_o$  dan *hypocenter* dalam koordinat cartesian  $(x, y, z)$  dengan fungsi:

$$F(M) = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3.1)$$

$r_i$  adalah residu dari *observed* dan *calculated travel times*.

$$r_i = t_i - t_0 - T_i \quad (3.2)$$

Calculated travel times:

$$(T_i) = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} / V_p \quad (3.3)$$

Parameter yang tidak diketahui adalah :

$$M = T_0, x, y, z \quad (3.4)$$

Persamaan *least square* untuk inversi linear :

$$[A^T A] \delta M = A^T r \quad (3.5)$$

Jacobian A :

$$A = \begin{bmatrix} \partial r_1 / \partial t_0 & \partial r_1 / \partial x_0 & \partial r_1 / \partial y_0 & \partial r_1 / \partial z_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial r_n / \partial t_0 & \partial r_n / \partial x_0 & \partial r_n / \partial y_0 & \partial r_n / \partial z_0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\delta M = (\delta t_0, \delta x_0, \delta y_0, \delta z_0)^T \quad (3.7)$$

$$\text{Trial hypocenter} = x_0, y_0, z_0, t_0 \quad (3.8)$$

$$\text{Corrected hypocenter} = t_0 + \delta t_0, x_0 + \delta x_0, y_0 + \delta y_0, z_0 + \delta z_0 \quad (3.9)$$

Metode Geiger di atas kemudian dikembangkan menjadi persamaan untuk metode JHD, yaitu:

$$r_{ij} = dT_j + \frac{\partial t}{\partial x} dx_j + \frac{\partial t}{\partial y} dy_j + \frac{\partial t}{\partial z} dz_j + ds_i \quad (3.10)$$

$$i = 1, N ; j = 1, M$$

Dimana :

$$r_{ij} = t_{ij}^0 - t_{ij} = t_{ij}^0 - (T_j + \tau_{ij} + s_j) \quad (3.11)$$

Keterangan :

$M$  = event yang tercatat

$N$  = jumlah stasiun pencatat

$t_{ij}^0$  = waktu tiba yang dicatat

$t_{ij}$  = waktu tiba berdasarkan model kecepatan 1-D

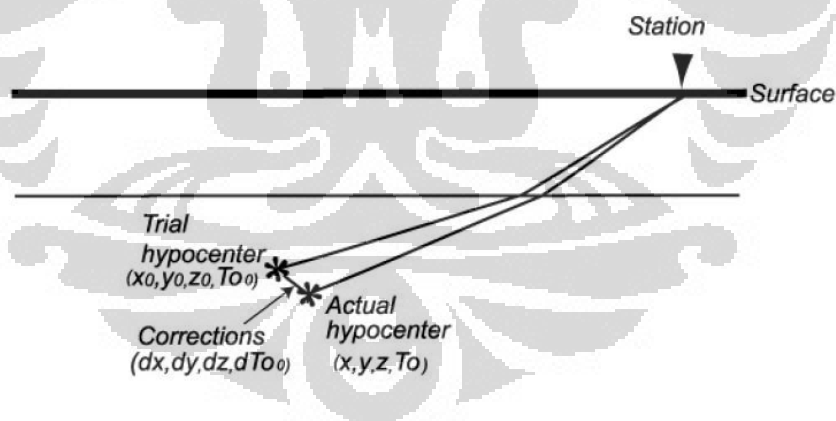
$T_j$  = estimasi permulaan origin time dari gempabumi j

$\tau_{ij}$  = waktu penjalaran yang dihitung dari gempabumi j dengan estimasi lokasi  $(x_j, y_j, z_j)$  ke stasiun i.

$s_i$  = koreksi stasiun untuk stasiun i.

$dT_j$  = gangguan dari *origin time* untuk gempabumi j.

Hurukawa dan Imoto kemudian mengembangkan metode MJHD untuk melokalisasi gempabumi lokal, dimana koreksi stasiun yang digunakan tidak bergantung pada jarak dan azimut antara pusat daerah study dengan stasiun yang digunakan, sehingga memperbaiki stabilitas metode ini (Hurukawa, 1995).



Gambar 3. 2 Konsep relokasi *hypocenter* gempabumi (Hurukawa, 2008)

Persamaan yang digunakan dalam penentuan *hypocenter* adalah:

$$\begin{aligned}
 (O - C)_{ij} &= (t_{ij} - T_{0ij}) - T_{ij} \\
 &= \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} dx_j + \frac{\partial t_{ij}}{\partial y_j} dy_j + \frac{\partial t_{ij}}{\partial z_j} dz_j + dT_{0j} + dS_i
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

dimana  $t_{ij}$  dan  $T_{ij}$  adalah waktu tiba dan *travel time* yang dihitung dari *event* sejumlah  $j$  pada stasiun sejumlah  $i$ ,  $dS_i$  adalah koreksi stasiun pada stasiun ke  $i$ ,  $To_j$  adalah waktu terjadi gempa,  $O$  adalah *travel time* yang diamati (*observed travel time*),  $C$  adalah waktu *travel time* yang dihitung (*calculated travel time*),  $(O - C)_{ij}$  adalah residu *travel time* pada *event* ke- $j$  di stasiun  $i$ ,  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  dan  $dTo$  adalah koreksi untuk *hypocenter* percobaan dari *event* ke- $j$ .

Pada MJHD ditambahkan dua prior, yaitu prior terhadap kedalaman dan prior terhadap *epicenter*.

Prior terhadap kedalaman membuat koreksi stasiun tidak bergantung pada jarak antara pusat studi dengan stasiun yang digunakan.

$$\sum_{i=1}^n S_i D_i = 0 \quad (3.13)$$

Prior terhadap *epicenter* membuat koreksi stasiun tidak bergantung pada azimut antara pusat studi dengan stasiun yang digunakan.

$$\sum_{i=1}^n S_i \cos \theta_i = 0, \sum_{i=1}^n S_i \sin \theta_i = 0, \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^n S_i = 0 \quad (3.15)$$

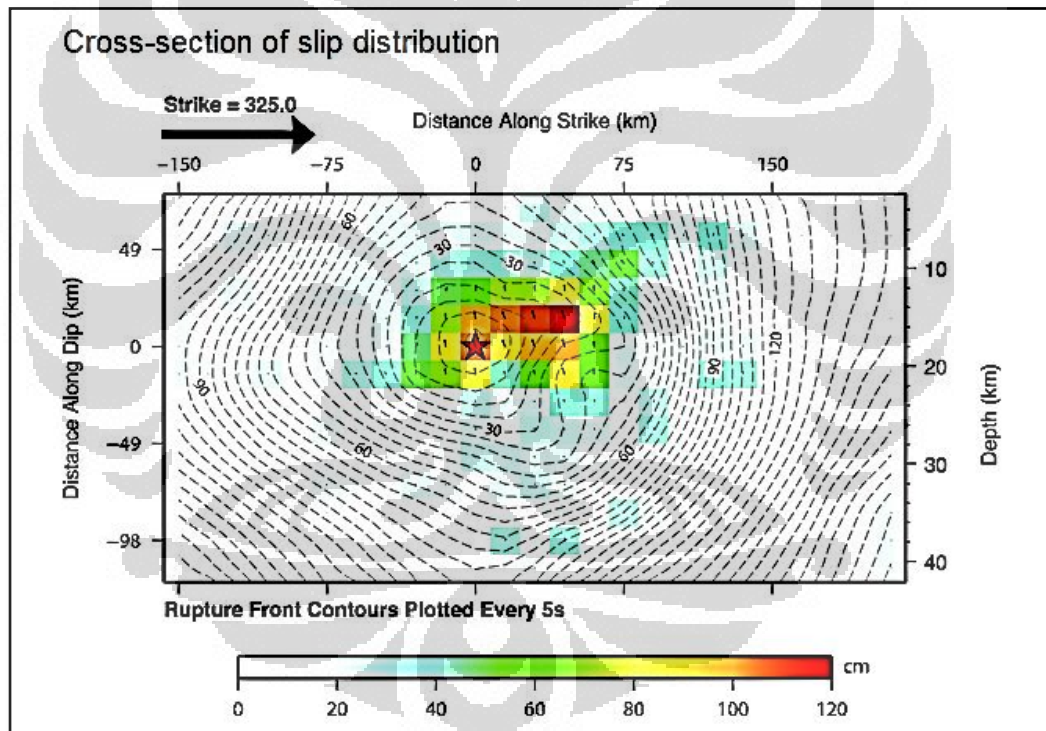
dimana  $S_i$  adalah koreksi stasiun di stasiun  $i$ ,  $D_i$  adalah jarak antara stasiun  $i$  dan pusat daerah,  $\theta_i$  adalah azimut stasiun  $i$  dari pusat daerah dan  $n$  adalah jumlah stasiun.



### 3.2 Data

Data yang digunakan dalam studi relokasi adalah data waktu tiba (*arrival time*) gelombang P dari katalog Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) untuk gempa bumi Mentawai 25 Oktober 2010 dan gempa-gempa susulannya (*aftershock*).

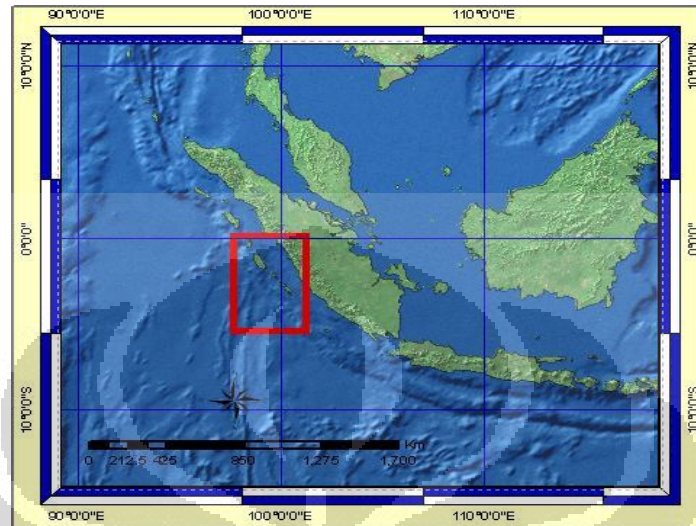
Keseluruhan jumlah gempa bumi yang diambil dari katalog BMKG dari tanggal 25 Oktober 2010 hingga 5 November 2010 sejumlah 121 data. Data diambil hingga hari ke-12 setelah gempa bumi utama didasarkan pada penghitungan peluruhan gempa bumi dari laporan BMKG.



Gambar 3. 3 Penampang melintang sebaran slip USGS (Hayes, 2010)

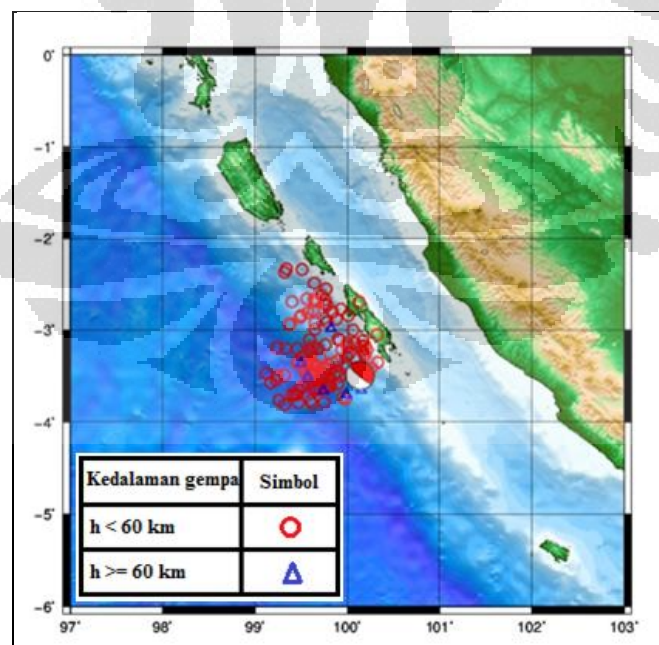
Pada gambar diatas dapat dilihat sebaran slip yang terjadi sejauh sekitar 200 kilometer sepanjang patahan, berdasarkan data ini maka penulis hanya

mengambil data gempabumi susulan yang terjadi pada area  $\pm 1.5$  derajat dari lintang dan  $\pm 1$  derajat dari bujur gempabumi utama.



Gambar 3. 4 Peta daerah penelitian

Data ini kemudian akan diubah ke dalam format data MJHD untuk selanjutnya direlokasi.

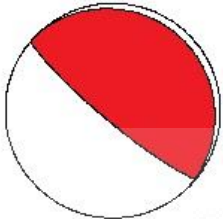


Gambar 3. 5 Gempabumi yang digunakan dalam studi relokasi

Universitas Indonesia

Data mekanisme fokal dari gempa bumi utama Mentawai diambil dari data global Centroid Moment Tensor (CMT), yaitu sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Mekanisme fokal gempa bumi Mentawai 25 Oktober 2010

	<i>Nodal Plane 1</i>	<i>Strike</i> : 316 <i>Dip</i> : 8 <i>Slip</i> : 96
	<i>Nodal Plane 2</i>	<i>Strike</i> : 130 <i>Dip</i> : 82 <i>Slip</i> : 89

### 3.3 Pengolahan Data

Dalam studi relokasi ini dilakukan beberapa langkah dalam pengerjaannya. Langkah-langkah tersebut dimulai dari pengambilan data dari katalog gempa bumi BMKG, mengubah format data BMKG menjadi format data MJHD, menentukan ulang *hypocenter* gempa bumi menggunakan metode MJHD, mengplot *hypocenter* terkoreksi, menganalisa hasil studi yang didapat dan kemudian menarik kesimpulan dari hasil analisa yang dilakukan.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam studi ini dapat dilihat dari diagram berikut ini :



Gambar 3. 6 Diagram kerja studi relokasi gempa bumi menggunakan metode MJHD.

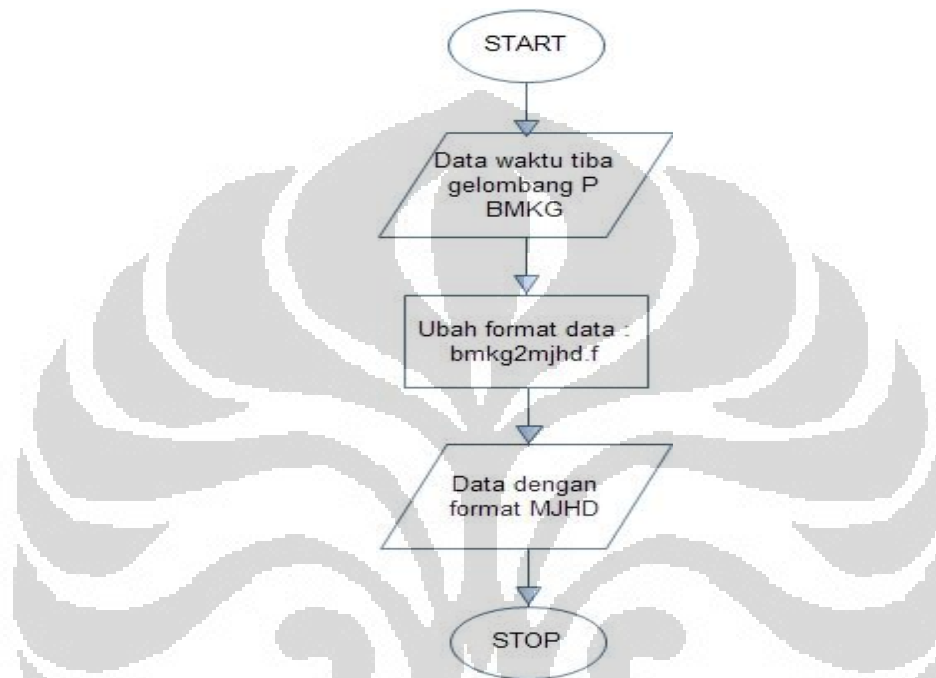
### 3.3.1 Pengambilan Data

Data waktu tiba gelombang P diambil dari data BMKG. Format data adalah dalam bentuk *arrival format*. Data ini berisi *event* gempa bumi yang terjadi beserta parameternya dan stasiun-stasiun yang mencatat *event* gempa bumi tersebut.

*Event* gempa bumi diambil dari saat terjadinya gempa bumi utama yaitu tanggal 25 Oktober 2010 pukul 14:42:21 WIB hingga tanggal 5 November 2010. Dari data tersebut kemudian dipilih lagi berdasarkan lokasinya. Gempa bumi yang direlokasi hanya gempa bumi yang terjadi di lokasi  $\pm 1.5$  derajat dari lintang dan  $\pm 1$  derajat dari bujur gempa bumi utama.

### 3.3.2 Pengubahan Format Data

Data gempabumi yang akan direlokasi merupakan data dengan format data BMKG, sementara itu untuk melakukan relokasi dengan metode MJHD, format data tersebut harus diubah lebih dahulu menjadi format data MJHD.



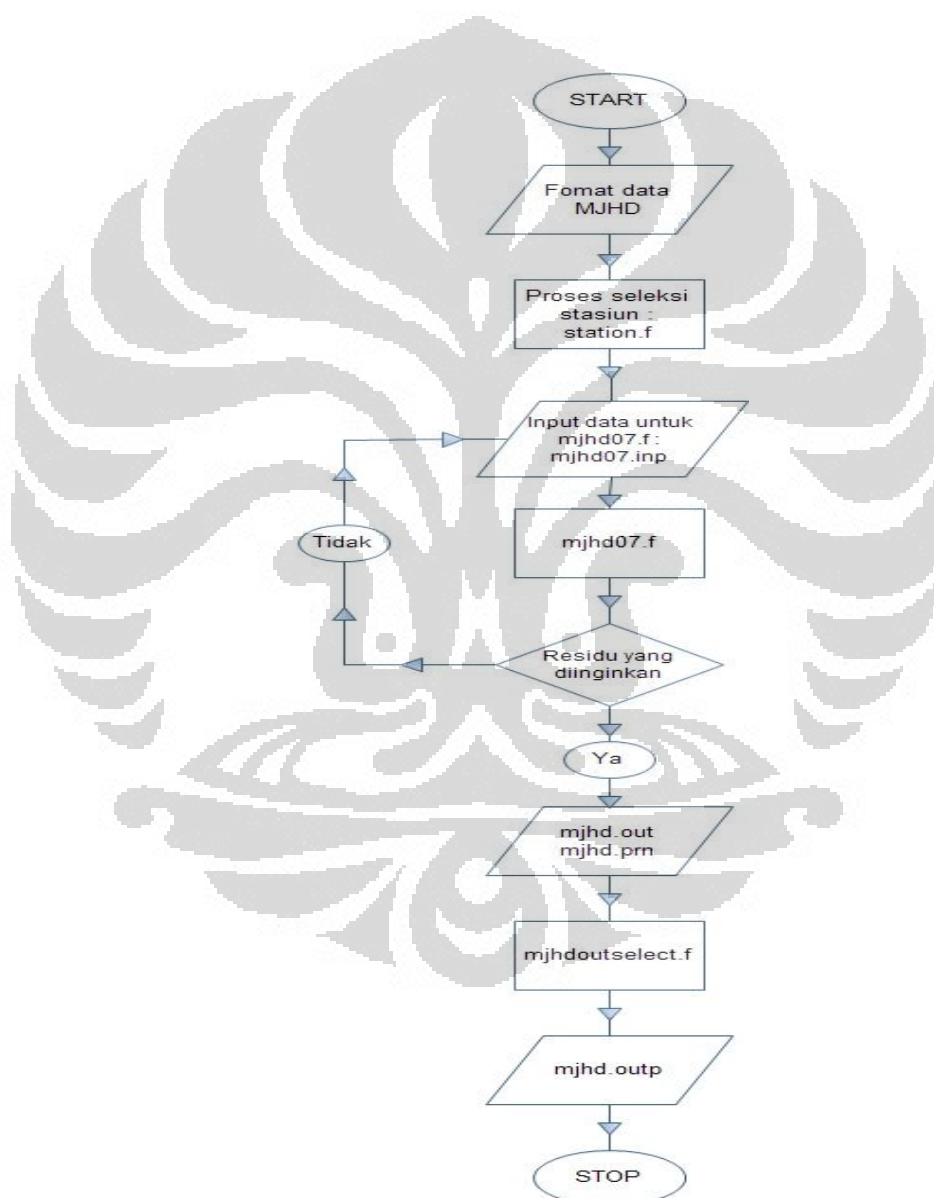
Gambar 3. 7 Algoritma proses pengubahan format data BMKG ke MJHD

Format data MJHD lebih sederhana daripada format data BMKG. Pada format data MJHD, parameter dari event gempabumi yang diambil adalah *origin time*, lintang, bujur, kedalaman, magnitude dan jumlah *fase* pada *event* gempabumi tersebut. Serta masih terdapat keterangan mengenai stasiun-stasiun pencatat beserta parameternya yaitu selisih waktu tiba gelombang P pada stasiun tersebut dengan *origin time* dalam orde detik, residu, jarak dan azimuth.

Setelah format data diubah maka data sudah dapat digunakan sebagai input dalam program MJHD.

### 3.3.3 Inversi dengan MJHD

Inversi dengan MJHD dimulai dengan menentukan *Minimum Number of Earthquake at Each Station* (MEQ) yaitu jumlah minimum sebuah gempa bumi dicatat pada sebuah stasiun, serta *Minimum Number of Station at Each Earthquake* (MNST) yaitu jumlah minimum stasiun yang mencatat sebuah gempa bumi. Pada studi relokasi ini, dipilih MEQ 10 dan MNST 20.



Gambar 3. 8 Algoritma proses MJHD

MEQ dan MNST ini kemudian digunakan sebagai input pada program *station* yaitu untuk menentukan jumlah stasiun yang memenuhi persyaratan MEQ dan MNST atau disebut *Number of Station* (NST) dan akan digunakan sebagai input parameter di dalam program MJHD. Untuk MEQ 10 dan MNST 20, NST yang didapat adalah 53.

Parameter lain yang perlu diganti berada pada input data MJHD, parameter-parameter tersebut adalah *iform* atau tipe data input, nama file masukan dan nama file keluaran, latitude (X0) dan longitude (Y0) gempa bumi utama sebagai data inisial, kedalaman fix (ZFIX) yaitu batas kedalaman gempa bumi dalam km, residu maksimum *travel time* (RESS), jumlah iterasi maksimum (ITRT), *standard deviasi* (STD1), jumlah stasiun yang tidak digunakan (NAST), jumlah gempa bumi pada data yang tidak digunakan (NEXC), akurasi pembacaan (RANKAB), RMAX yaitu batasan derajat dimana jika sebuah stasiun ada dalam batasan RMAX dari pusat area maka stasiun tersebut akan dilibatkan dalam perhitungan, pilihan mengenai hasil yang akan dicetak, magnitudo minimum (AMGM), dan nilai SLOPE.

Setelah parameter-parameter tersebut diedit pada file input MJHD, langkah selanjutnya adalah menjalankan program MJHD. Dalam studi ini, program MJHD dijalankan dengan menggunakan CYGWIN.

Program MJHD dijalankan beberapa kali hingga didapat hasil yang baik. Pada setiap iterasi, nama *file input*, *file output* dan residu maksimum *travel-time* pada file input MJHD harus selalu diubah.

#### 3.3.4 Plotting dengan GMT

*Hypocenter* terkoreksi yang didapat dengan menggunakan metode MJHD kemudian diplot dalam peta menggunakan *Generic Mapping Tool* (GMT). Peta tersebut menunjukkan sebaran *hypocenter* terkoreksi dilihat dari permukaan bumi dan *cross section*nya.

## **BAB 4**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

#### 4.1 Relokasi Gempabumi

##### 4.1.1 Hiposenter BMKG sebelum relokasi

Jumlah data gempabumi yang diperoleh dari BMKG sebagai input awal penghitungan relokasi adalah 121 gempabumi meliputi 1 gempabumi utama dan 120 gempabumi susulan.

Dalam studi relokasi ini penulis tidak menggunakan model kecepatan lokal namun menggunakan model kecepatan bumi global yaitu IASP91, Kenneth dan Engdahl (1991). Model kecepatan ini juga merupakan model yang digunakan pada sistem penganalisa gempabumi di BMKG. Model kecepatan IASP91 adalah model kecepatan bumi satu dimensi yang dihasilkan oleh International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI). Model kecepatan bumi yang dihasilkan oleh IASPEI adalah hasil pemodelan dengan menggunakan ribuan data gelombang P dan gelombang S yang direkam oleh ribuan seismometer di seluruh dunia.

Inversi atas data waktu tempuh fase-fase gelombang menghasilkan parameter kecepatan gelombang pada batuan-batuan penyusun bumi. Pada perkembangannya, inversi juga dilakukan terhadap frekuensi dari seismogram.

Pada model kecepatan IASP91 diperhitungkan dua lapisan diskontinuitas pada lapisan kerak bumi yaitu di kedalaman 20 dan 35 kilometer. Sedangkan lapisan diskontinuitas di mantel bumi terletak pada kedalaman 410 dan 660 kilometer (Bormann, 2002). Namun model ini hanya berisi parameter kecepatan gelombang P dan kecepatan gelombang S.



Dengan memperhitungkan distribusi sumber event seismik baik buatan maupun gempabumi dan stasiun pencatatnya yang tidak seragam maka model kecepatan IASP91 sudah meliputi bias geografi (Bormann, 2002).

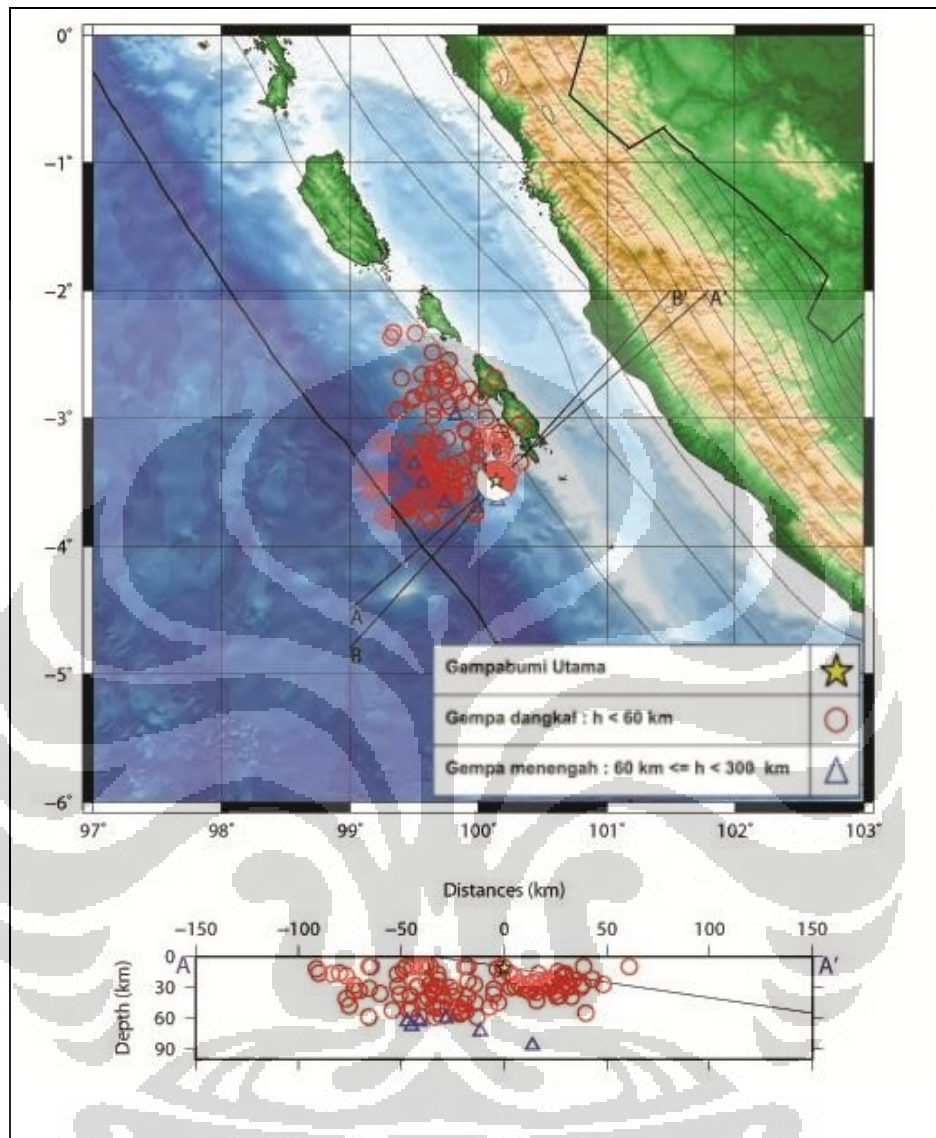
Kelebihan dalam relokasi dengan MJHD ini adalah adanya koreksi stasiun yang ditambahkan dalam proses mendapatkan hiposenter baru. Sehingga meskipun model kecepatan yang digunakan sama seperti yang digunakan untuk mendapatkan hiposenter awal namun hasilnya akan berbeda dan menjadi lebih akurat.

Sebaran hiposenter awal sebelum direlokasi dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Pada kedua gambar tersebut dapat dilihat juga *cross section* terhadap bidang nodal pertama dan kedua. Tujuan dari *cross section* ini adalah untuk melihat konsentrasi sebaran lokasi dan kedalaman hiposenter sehingga dapat diketahui bidang patahan yang terjadi di lapangan.

Gambar 4.1 menunjukkan distribusi hiposenter gempabumi BMKG sebelum direlokasi beserta *cross section*nya terhadap bidang nodal pertama. Arah *cross section* ini adalah 220 derajat dihitung dari utara ke arah timur.

Berdasarkan *cross section*nya dapat dilihat bahwa masih ada beberapa hiposenter gempabumi yang kedalamannya merupakan kedalaman yang diberikan secara manual oleh operator atau oleh sistem pemroses gempabumi yang digunakan di BMKG (SeisComp3) atau disebut *fixed depth* yaitu pada kedalaman  $\pm 10$  kilometer, termasuk juga gempabumi utama yang berada pada kedalaman 11 kilometer.

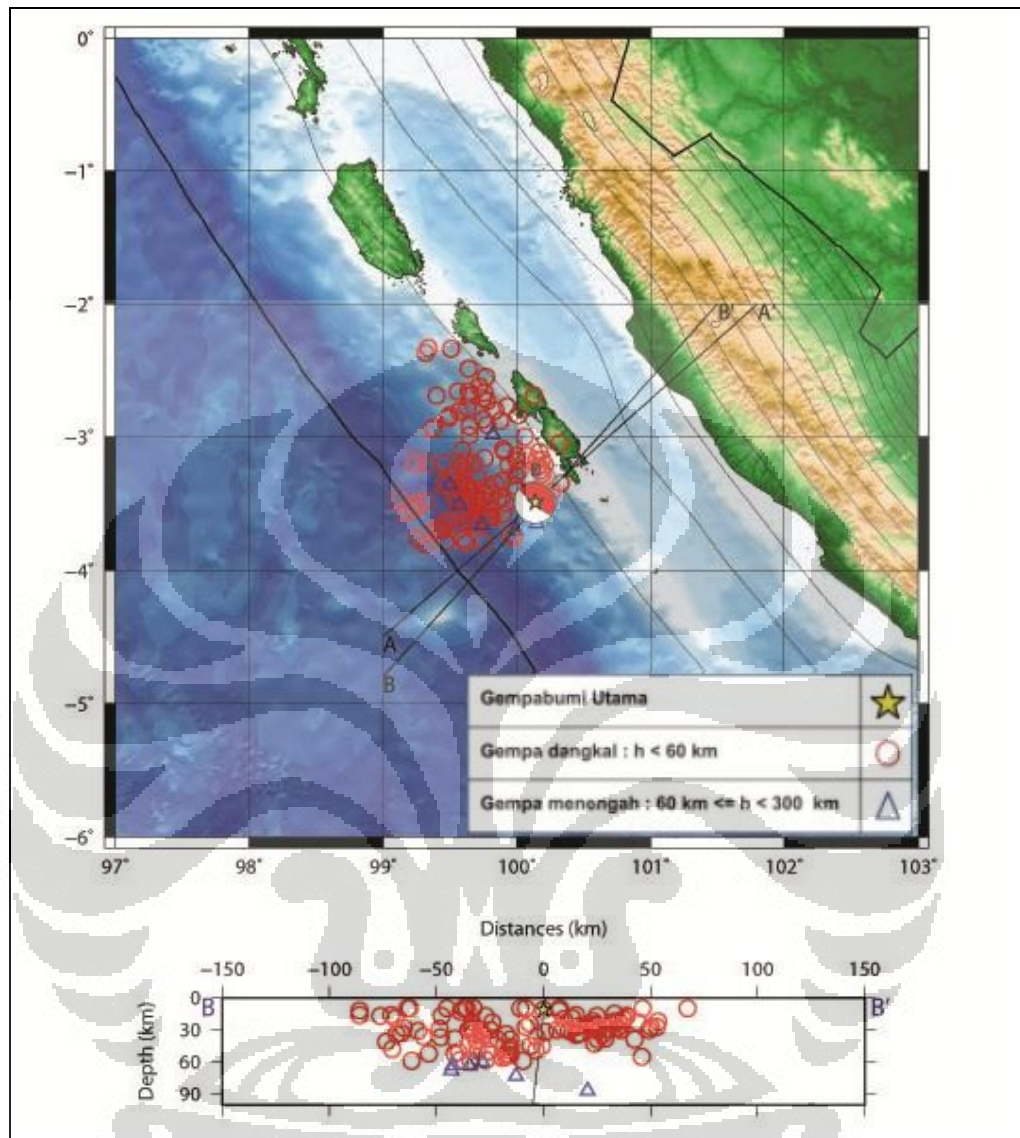
Adanya beberapa kedalaman hiposenter yang *fixed depth* ini ditujukan untuk mendapatkan hasil parameter kedalaman gempabumi yang baik karena hasil analisa sinyal gempabumi yang diberikan oleh sistem terkadang memberikan hasil yang kurang akurat dikarenakan beberapa hal seperti sebaran stasiun pencatat yang kurang rapat dan letak gempabumi yang jauh dari stasiun pencatat (*teleseismic*).



Gambar 4. 1 Distribusi hiposenter BMKG sebelum direlokasi, *cross section* terhadap bidang nodal 1

Sedangkan pada Gambar 4.2 dapat dilihat distribusi hiposenter BMKG beserta *cross section* terhadap bidang nodal kedua. Arah *cross section* ini yaitu 40 derajat dihitung dari utara ke arah timur. Dari *cross section* dapat dilihat bahwa hiposenter gempabumi banyak terletak pada kedalaman  $\pm 30$  km.

Universitas Indonesia



Gambar 4. 2 Distribusi hiposenter BMKG sebelum direlokasi, *cross section* terhadap bidang nodal 2

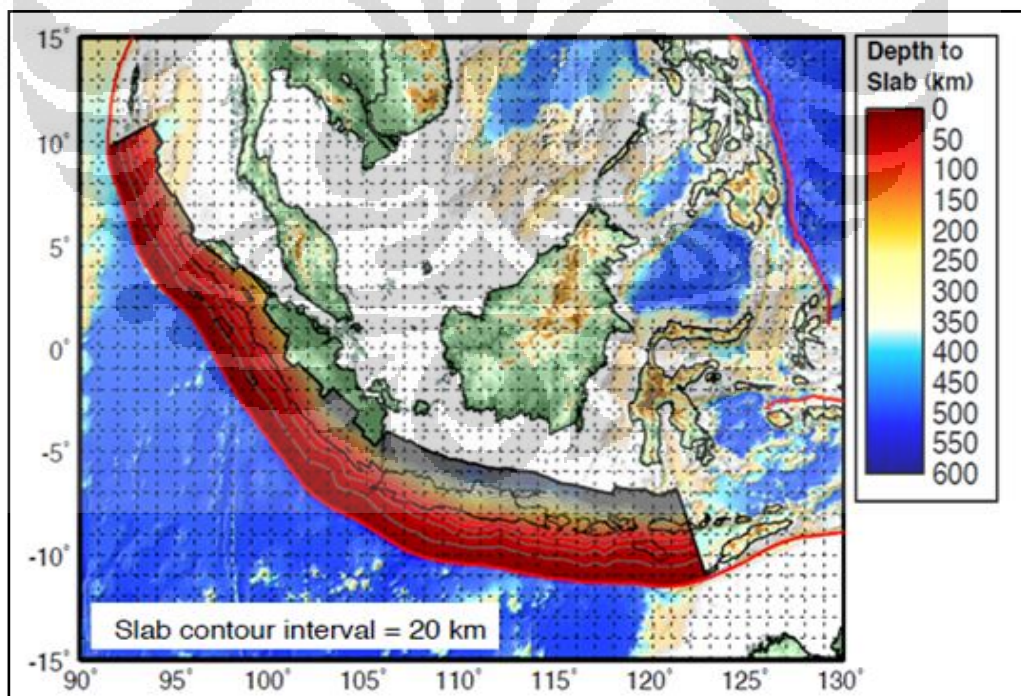
Sebaran hiposenter BMKG dilihat dari *cross section* terhadap bidang nodal pertama dan kedua belum dapat digunakan untuk menentukan bidang patahan yang terjadi. Hal ini disebabkan karena hiposenter gempabumi menyebar secara merata di daerah sekitar gempabumi utama.

Pada kedua gambar diatas diketahui juga bahwa sebaran hiposenter gempa bumi susulan memanjang ke arah barat laut dari gempa bumi utamasejajar dengan zona subduksi. Hal ini dapat menunjukkan bahwa gempa bumi ini merupakan gempa bumi yang dipengaruhi oleh aktivitas zona subduksi.

Sebaran hiposenter gempa bumi dari BMKG berada pada kedalaman dangkal yaitu diantara nol hingga 60 kilometer. Hanya ada lima gempa bumi yang termasuk dalam gempa bumi menengah yaitu berada pada kedalaman 60 hingga 300 kilometer.

Hal ini sudah sesuai jika ditinjau dari model kedalaman slab di daerah sepanjang barat Mentawai. Model slab dapat dilihat pada gambar plotting hiposenter gempa bumi yang ditunjukkan oleh garis – garis kontur. Garis kontur paling barat adalah awal dari penunjaman zona subduksi.

Data model slab berupa garis kontur tersebut didapatkan dari USGS. Dimana interval setiap konturnya sejauh 20 kilometer.



Gambar 4. 3 Model slab zona subduksi Sumatera – Jawa (USGS, 2010B)

Universitas Indonesia

Gambar 4.3 di atas menunjukkan dengan lebih jelas kontur slab beserta nilai kedalamannya di sepanjang barat pulau Sumatera menerus hingga ke selatan Nusa Tenggara Timur.

Model slab ini dapat digunakan sebagai acuan dalam menganalisa apakah parameter kedalaman gempabumi yang diperoleh baik dari analisa awal maupun setelah relokasi sudah sesuai dengan kondisi tektonik daerah penelitian atau belum.

#### 4.1.2 Hiposenter BMKG setelah relokasi

Pada studi relokasi dengan menggunakan metode MJHD ini digunakan persyaratan dalam menjalankan program MJHD untuk mendapatkan hasil relokasi hiposenter yang akurat.

Persyaratan tersebut adalah ditentukannya MEQ dan MNST. MEQ ditentukan sebesar 10 dimana berarti satu stasiun pencatat harus mencatat gempabumi minimal 10 buah. Sementara MNST ditentukan sebesar 20 dimana berarti satu buah gempabumi minimal dicatat oleh 20 stasiun. Persyaratan lainnya adalah hanya digunakannya data fase gelombang yang memiliki residu waktu tempuh (O-C) minimal satu detik.

Adanya ketentuan ini menyebabkan tidak semua gempabumi yang didapatkan dari BMKG dapat direlokasi. Dari input awal sejumlah 121 gempabumi hanya 38 gempabumi yang dapat direlokasi.

Hubungan antara MEQ dan MNST dengan banyaknya gempa yang direlokasi adalah berbanding terbalik. Semakin besar nilai MEQ dan MNST maka gempa yang direlokasi akan semakin sedikit karena hanya gempa-gempa yang tercatat di banyak stasiun yang akan direlokasi sedangkan gempa-gempa yang hanya dicatat oleh sedikit stasiun tidak akan direlokasi.

**Universitas Indonesia**

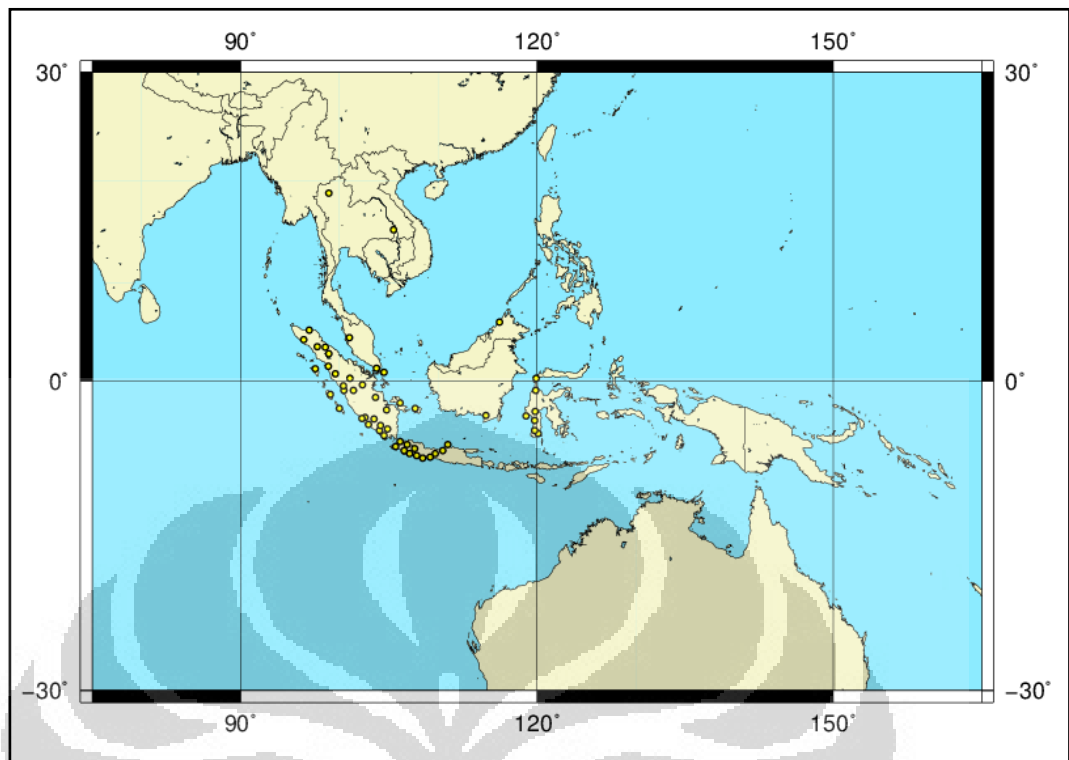
Sedangkan residu waktu tempuh (O-C) akan semakin baik jika nilainya semakin kecil. Namun hal ini dipengaruhi oleh kualitas data yang digunakan dalam studi relokasi. Data yang diperoleh dari BMKG dinilai akurat karena stasiun-stasiun pencatat gempa berada dekat dengan pusat gempa dan cukup rapat sehingga nilai residu dapat ditentukan cukup kecil yaitu minimal satu detik.

Tabel 4. 1 Parameter gempabumi BMKG yang dapat direlokasi

No	Tanggal	Jam	Menit	Detik	Lintang	Bujur	Depth (Km)	Mag	Jumlah Fase
1	20101025	14	42	21	-3.49	100.14	11	7.1	167
2	20101025	15	21	9	-3.52	99.72	10	5.7	49
3	20101025	17	36	40	-2.93	99.38	24	4.7	26
4	20101025	18	13	11	-2.77	99.93	10	4.3	29
5	20101025	18	22	50	-3.2	99.46	23	4.1	34
6	20101025	18	40	26	-2.87	99.75	17	4.5	55
7	20101025	18	48	39	-3.05	100.32	27	3.9	34
8	20101025	19	33	25	-3.49	99.64	10	5.4	40
9	20101025	19	37	30	-3.11	100.17	28	6.1	140
10	20101025	19	57	56	-3.25	100.18	22	4.9	50
11	20101025	20	4	5	-3.47	99.74	58	4.8	41
12	20101025	20	7	31	-3.17	100.19	29	4.4	26
13	20101025	20	22	11	-3.55	99.69	10	4.8	59
14	20101025	20	52	22	-3.2	99.33	29	4.4	55
15	20101025	21	35	0	-2.86	99.49	12	4	29
16	20101025	21	45	19	-3.18	100	34	3.9	27
17	20101025	22	10	2	-2.88	99.88	15	4.7	100
18	20101025	22	49	7	-3.36	99.46	10	4.2	73
19	20101025	22	59	55	-3.35	100.33	39	5.6	165
20	20101025	23	12	57	-3.54	99.23	19	5.1	38
21	20101026	3	28	31	-3.28	100.19	26	4.8	53
22	20101026	10	51	21	-3.8	99.62	10	5.3	32

23	20101026	11	33	19	-2.66	99.56	29	5.1	55
24	20101026	14	57	47	-2.33	99.34	17	4.9	30
25	20101026	19	40	40	-3.6	99.8	27	4.9	64
26	20101026	20	41	4	-2.37	99.32	25	4.7	46
27	20101026	23	9	45	-3.79	99.47	41	5.2	28
28	20101026	23	45	37	-2.49	99.64	30	5.6	41
29	20101027	0	4	1	-3.62	99.51	36	5.5	44
30	20101027	4	33	19	-3.65	99.7	10	4.9	52
31	20101027	5	16	57	-2.84	99.5	20	4.8	26
32	20101027	15	9	36	-3.76	99.26	12	5.1	32
33	20101027	21	34	57	-2.99	99.65	10	4.5	37
34	20101029	18	5	26	-3.38	99.63	17	5	91
35	20101030	0	55	36	-3.46	99.64	23	4.7	38
36	20101031	0	1	51	-3.61	99.78	10	4.8	34
37	20101031	12	23	39	-3.55	99.8	30	4.9	30
38	20101101	15	1	22	-2.69	99.4	16	4.8	24

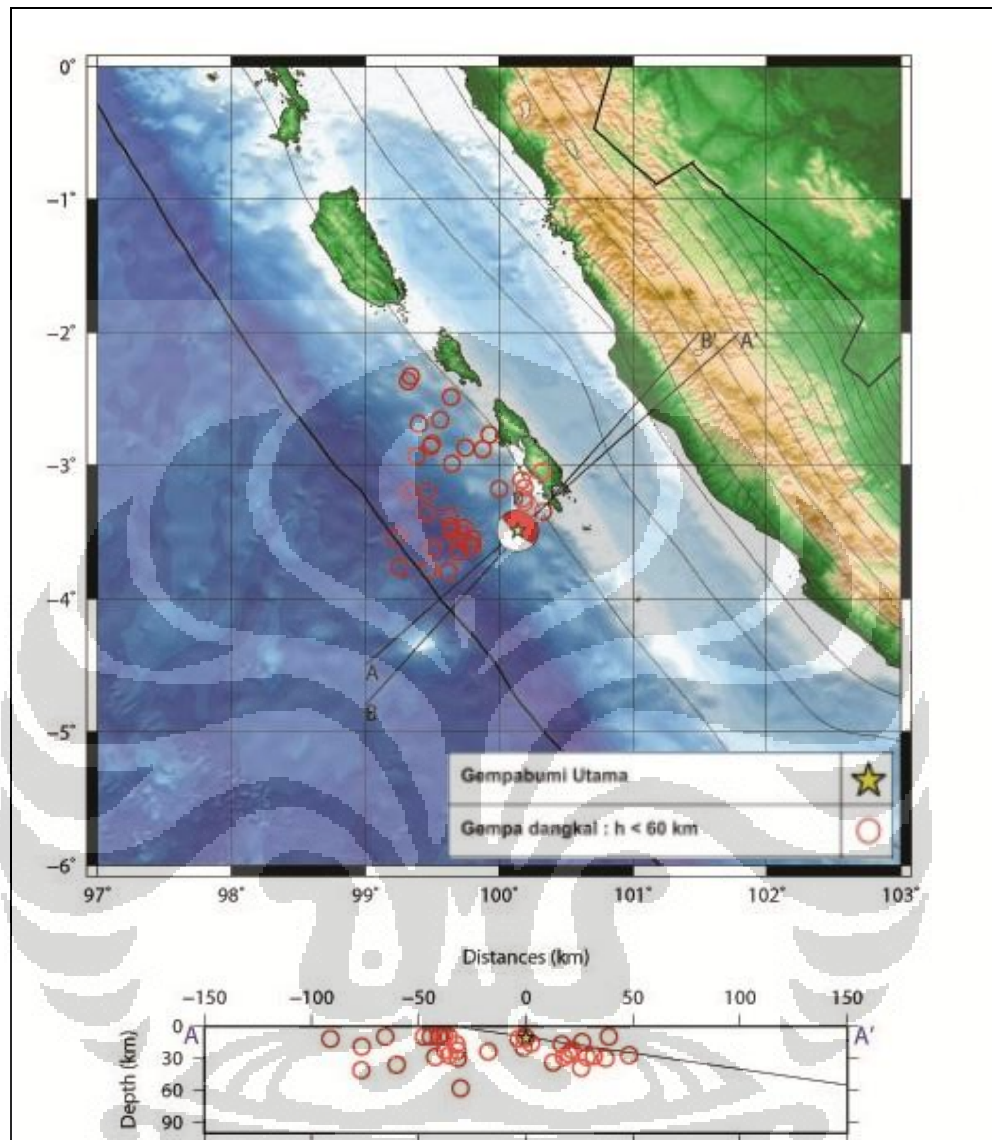
Tabel diatas menunjukkan data parameter gempabumi yang memenuhi syarat untuk direlokasi. Magnitude terkecil gempabumi yang direlokasi adalah 3.9 skala Richter. Gempa dengan magnitude 3.9 termasuk gempabumi kecil namun karena dicatat oleh cukup banyak stasiun yaitu 34 fase pada data nomor 7 dan 27 fase pada data nomor 16 maka gempa ini dapat direlokasi.



Gambar 4. 4 Stasiun pencatat yang dipakai dalam relokasi

Gambar 4.4 menunjukkan stasiun yang digunakan dalam relokasi MJHD. Stasiun yang digunakan hanyalah stasiun yang mencatat minimal 10 event gempabumi. Jumlah stasiun yang digunakan adalah 53 stasiun. Hampir seluruh stasiun yang digunakan adalah stasiun yang berada di wilayah Indonesia yaitu di pulau Sumatera, pulau Jawa, pulau Kalimantan dan pulau Sulawesi. Stasiun yang jauh tidak digunakan selain karena adanya syarat minimal gempabumi yang harus dicatat juga karena syarat residu waktu tempuh (O-C) minimal yaitu satu detik.



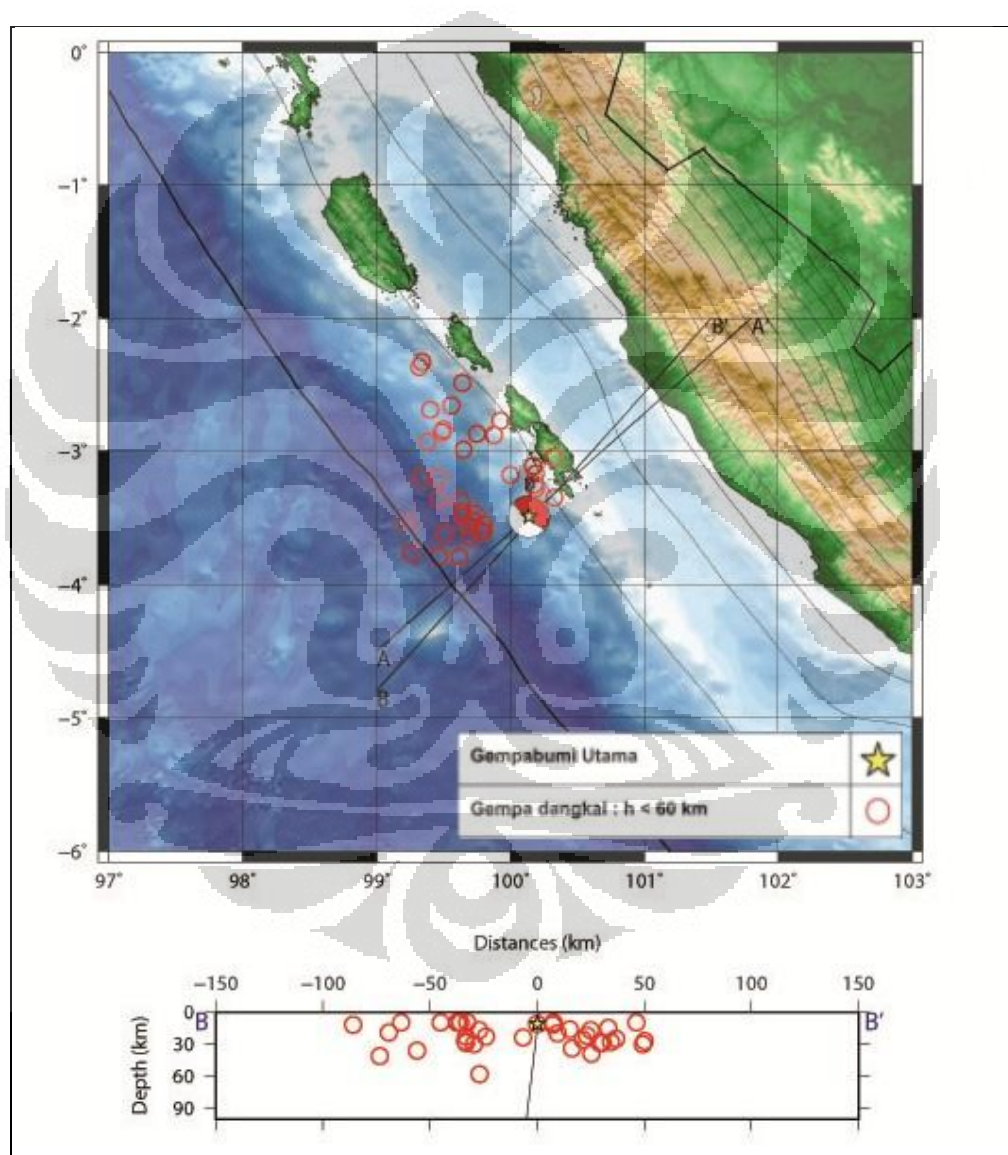


Gambar 4. 5 Distribusi hiposenter BMKG yang memenuhi syarat untuk direlokasi, *cross section* pada bidang nodal 1

Pada Gambar 4.5 diatas dapat dilihat ditribusi hiposenter BMKG sebelum direlokasi, namun hiposenter yang diplot pada gambar diatas adalah hiposenter-hiposenter gempabumi yang memenuhi syarat untuk direlokasi.

Dari 38 gempabumi yang memenuhi syarat, kesemuanya merupakan gempabumi dangkal.

*Cross section* yang ditunjukkan pada gambar diatas merupakan *cross section* terhadap bidang nodal pertama dengan arah *cross section* sama dengan gambar-gambar *cross section* sebelumnya.

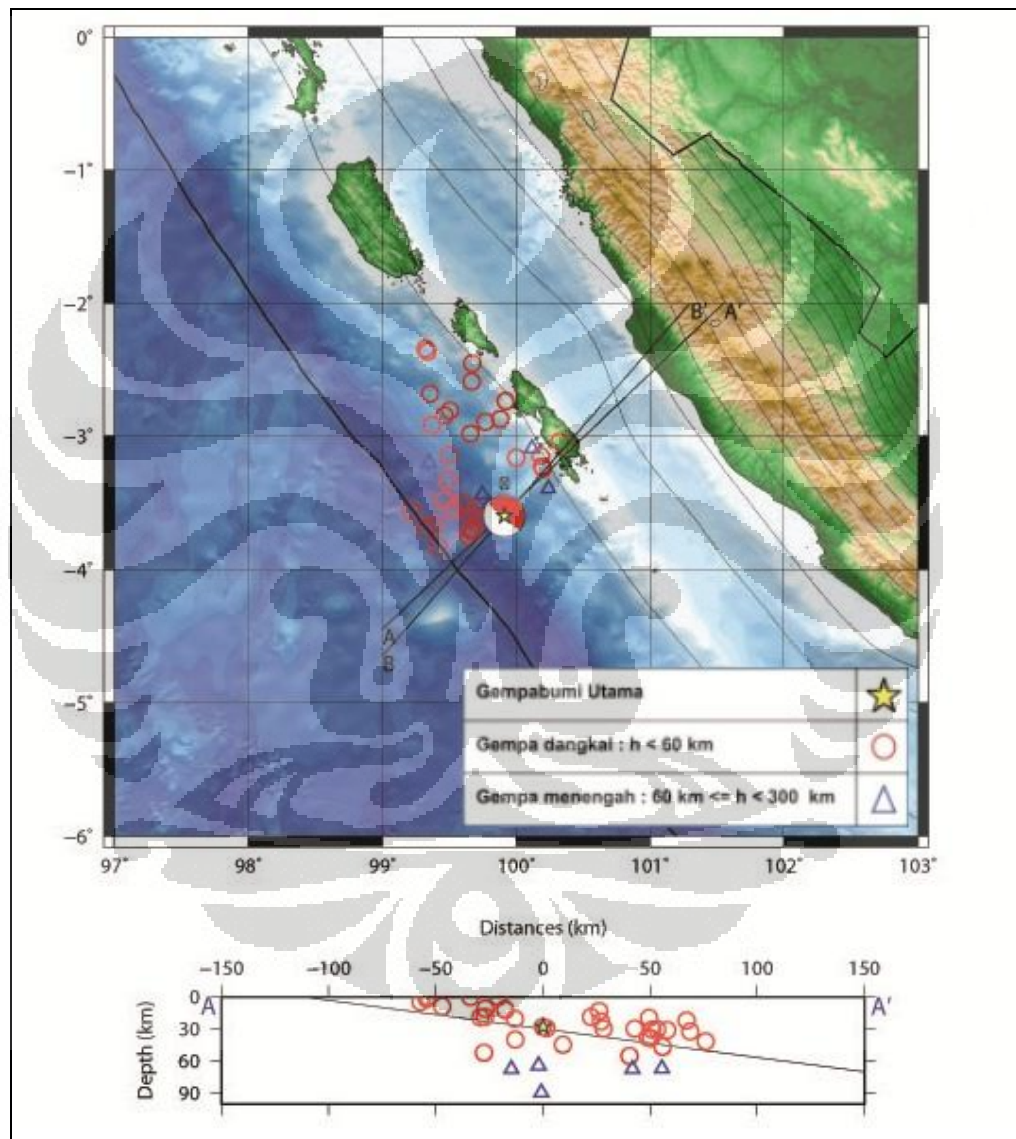


Gambar 4. 6 Distribusi hiposenter BMKG yang memenuhi syarat untuk direlokasi, *cross section* pada bidang nodal 2

Universitas Indonesia

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat distribusi hiposenter BMKG sebelum direlokasi dengan *cross section* terhadap bidang nodal kedua.

Dengan melihat gambar sebaran hiposenter sebelum direlokasi diharapkan dapat diketahui perbedaan dengan hiposenter setelah direlokasi.



Gambar 4. 7 Distribusi hiposenter BMKG setelah relokasi, *cross section* terhadap bidang nodal 1

Gambar 4.7 diatas menunjukkan hasil relokasi hiposenter. Dilihat dari sebaran hiposenter sebelum dan setelah relokasi terdapat beberapa perbedaan yaitu posisi hiposenter dari gempabumi utama dimana kedalaman awal adalah 11 km namun setelah direlokasi kedalamannya berubah menjadi 27.88 km. Hasil ini dinilai lebih akurat karena parameter kedalaman gempabumi utama sebelum direlokasi merupakan kedalaman yang diberikan secara manual oleh operator.

Letak dari gempabumi utama juga mengalami perubahan yaitu menjadi lebih mendekati zona subduksi dimana diketahui bahwa gempabumi Mentawai 25 Oktober 2010 ini merupakan gempabumi yang diakibatkan oleh aktivitas zona subduksi.

Tabel 4. 2 Perbandingan parameter gempabumi utama

No.	Instansi	Origin Time (GMT)	Long	Lat	Depth (km)	Mag
1	BMKG (sebelum relokasi)	14:42:21	100.14	-3.49	11	7.1 Mw(mB)
2	USGS	14:42:22	100.114	-3.484	20.6	7.7 Mw
3	Global CMT	14:42:59.8	99.32	-3.71	12	7.8 Mw
4	BMKG (setelah relokasi)	14:42:20.33	99.9141	-3.5986	27.88	7.1 Mw(mB)

Selain gempabumi utama, gempa-gempa susulan juga mengalami perubahan parameter baik kedalaman, lokasi maupun waktu terjadinya.

Dari peta sebaran hiposenter dapat dilihat bahwa ada beberapa gempa yang letaknya mendekati zona subduksi, empat gempa diantaranya terletak tepat di zona subduksi.

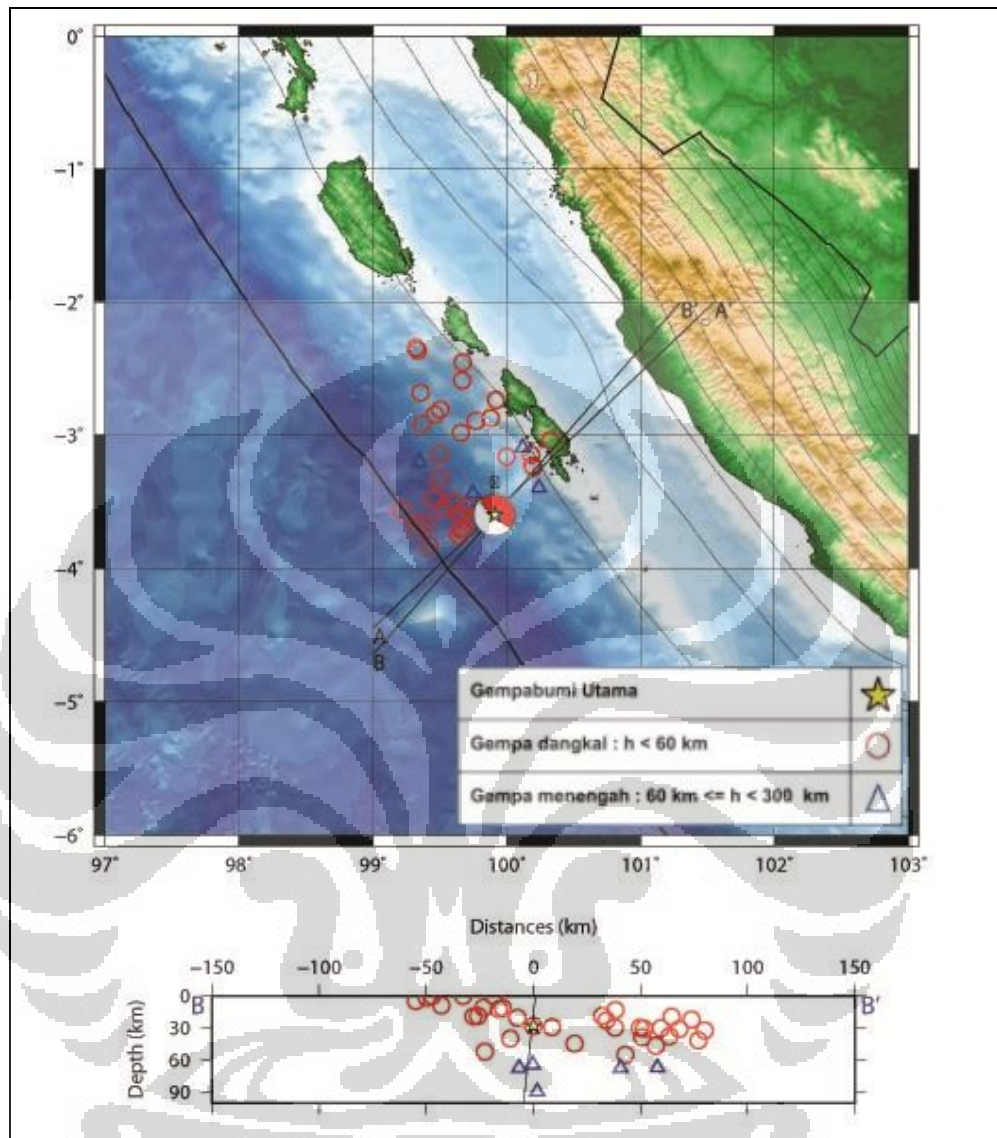
Diketahui sebelumnya bahwa ke-38 gempabumi yang belum direlokasi semuanya termasuk dalam kategori gempabumi dengan kedalaman dangkal

namun setelah direlokasi terdapat enam gempa bumi yang berubah kedalamannya menjadi lebih dalam yaitu lebih dari 60 kilometer.

Sebaran hiposenter gempa bumi setelah direlokasi menunjukkan kondisi yang sesuai dengan kondisi geologis daerah setempat yaitu tepat di zona subduksi dan juga sesuai dengan model slab yang ada. Gempa-gempa yang terjadi di daerah yang lebih dekat dengan zona subduksi memiliki kedalaman yang dangkal sedangkan semakin menjauhi zona subduksi kedalamannya semakin bertambah.

Pada Gambar 4.7 menunjukkan hasil *cross section* terhadap bidang nodal pertama. Hasil ini memperlihatkan hasil yang baik untuk mengidentifikasi bidang patahan sebenarnya yang terjadi di lapangan. Dapat dilihat pada gambar *cross section* bahwa hiposenter baru hasil dari relokasi terkonsentrasi pada garis dip bidang nodal pertama.

Konsentrasi hiposenter dapat digunakan untuk mengidentifikasi bidang patahan karena gempa-gempa susulan yang terjadi terletak pada satu garis dip maka disimpulkan bahwa garis dip tersebut adalah dip dari patahan yang terjadi. Dengan melihat hasil *cross section* pada bidang nodal pertama maka disimpulkan bahwa bidang nodal pertama dengan strike 316, dip 8 dan slip 96 adalah patahan yang terjadi di lapangan.



Gambar 4. 8 Distribusi hiposenter BMKG setelah relokasi, *cross section* terhadap bidang nodal 2

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat hasil *cross section* terhadap bidang nodal kedua. Namun hasil *cross section* ini masih belum dapat digunakan untuk mengidentifikasi bidang patahan karena hiposenter gempa bumi yang sudah direlokasi masih menyebar tidak terkonsentrasi sepanjang dip.

Universitas Indonesia

Tabel 4. 3 Parameter hasil relokasi

No.	Origin Time	dt	Longitude	dy	Latitude	dx	Depth (Km)	dz	Mag
1	101025144220.33	0.52	99.9141	0.0123	-3.5986	0.0106	27.88	4.89	7.1
2	1010251521 7.00	0.89	99.655	0.0412	-3.5992	0.028	0	4.82	5.7
3	101025173641.53	0.22	99.3709	0.0199	-2.916	0.0157	44.73	8.86	4.7
4	101025181312.79	0.23	99.9222	0.0204	-2.7371	0.0147	21.99	1.81	4.3
5	101025182252.02	0.53	99.4991	0.0249	-3.147	0.0181	29.46	4.04	4.1
6	101025184027.32	0.3	99.7707	0.0185	-2.8946	0.0154	29.59	1.98	4.5
7	101025184839.85	0.15	100.3272	0.0159	-3.04	0.0146	41.47	3.51	3.9
8	101025193325.42	0.49	99.5947	0.0176	-3.499	0.0152	11.25	3.15	5.4
9	101025193730.42	0.14	100.1182	0.0124	-3.0909	0.0115	66.78	2.16	6.1
10	101025195757.63	0.32	100.1951	0.0189	-3.2269	0.0164	30.57	3.26	4.9
11	10102520 4 4.99	0.22	99.7477	0.0207	-3.4376	0.0181	89.3	4.13	4.8
12	10102520 731.77	0.21	100.1819	0.0195	-3.1504	0.0179	46.68	6.56	4.4
13	101025202213.28	0.28	99.6994	0.0184	-3.5438	0.0179	39.89	14.66	4.8
14	101025205223.25	0.21	99.3459	0.0186	-3.2007	0.0152	67.59	4.71	4.4
15	1010252135 0.88	0.32	99.467	0.0153	-2.8448	0.0128	18.6	1.85	4
16	101025214519.65	0.17	99.9998	0.0143	-3.1641	0.0132	55.08	3.6	3.9
17	1010252210 3.66	0.23	99.882	0.0157	-2.8733	0.0126	30.07	1.62	4.7
18	1010252249 8.63	0.55	99.4921	0.0192	-3.3299	0.0163	20.21	4.74	4.2
19	101025225955.60	0.23	100.2401	0.0219	-3.3939	0.0183	67.3	2.61	5.6
20	101025231254.81	1	99.2156	0.035	-3.5677	0.0272	0	6.11	5.1
21	101026 32831.21	0.26	100.2019	0.0275	-3.2432	0.0216	38.68	2.98	4.8
22	101026105121.42	1.55	99.6408	0.0324	-3.7538	0.0237	0	12.57	5.3
23	101026113320.00	0.35	99.6679	0.0252	-2.5914	0.0193	30.97	2.68	5.1
24	101026145747.37	0.64	99.3241	0.0156	-2.3454	0.0113	19.59	5.25	4.9
25	101026194038.78	0.89	99.6715	0.0231	-3.6967	0.0171	18.65	6.46	4.9
26	1010262041 4.23	0.21	99.3353	0.0197	-2.366	0.0133	37.72	2.09	4.7
27	10102623 941.31	0.71	99.4225	0.0298	-3.8304	0.0214	4.73	3.95	5.2

Universitas Indonesia

28	101026234537.85	0.28	99.672	0.021	-2.4559	0.0156	32.41	2.8	5.6
29	101027 0 356.20	0.63	99.3252	0.0225	-3.6892	0.017	1.86	3.9	5.5
30	101027 43319.25	0.55	99.709	0.0253	-3.6144	0.0189	12.23	3.14	4.9
31	101027 51658.17	0.48	99.5075	0.0278	-2.8094	0.0203	29.89	3.43	4.8
32	10102715 936.73	0.62	99.3877	0.0266	-3.6609	0.019	9.13	3.39	5.1
33	101027213457.98	0.66	99.6577	0.033	-2.9817	0.0252	22.77	4.58	4.5
34	10102918 525.06	0.18	99.4573	0.0154	-3.4806	0.0136	52.11	3.08	5
35	101030 05533.97	0.62	99.5323	0.0278	-3.5509	0.0195	11.22	3.36	4.7
36	101031 0 151.11	1.38	99.662	0.0369	-3.7156	0.03	19.23	10.05	4.8
37	101031122339.78	0.23	99.8017	0.0217	-3.5086	0.0175	63.85	6.63	4.9
38	1011 115 122.26	0.55	99.3581	0.027	-2.6823	0.0181	13.34	3.24	4.8

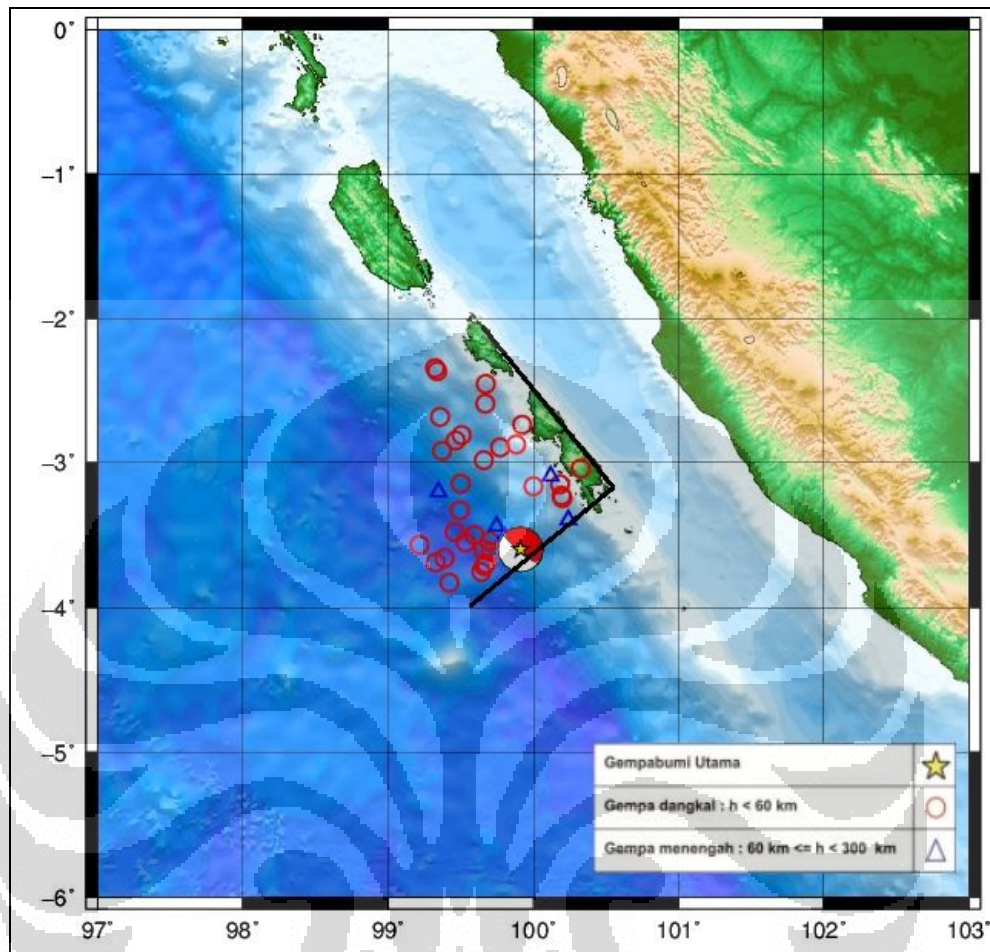
Tabel diatas menunjukkan parameter gempabumi hasil relokasi yang terdiri dari kolom origin time yang menunjukkan tahun-bulan-tanggal-jam-menit-detik saat terjadinya gempabumi, koreksi origin time (dt), longitude, koreksi longitude (dy), latitude, koreksi latitude (dx), kedalaman, koreksi kedalaman (dz) dan magnitudo.

Dengan menganalisa hasil relokasi gempabumi yang didapat dengan menggunakan metode MJHD ini dapat dikatakan bahwa, parameter gempabumi yang direlokasi mengalami perbaikan sehingga lebih akurat ditinjau dari sebaran lokasi dan sebaran kedalamannya.

#### 4.2 Penentuan Arah dan Panjang Bidang Patahan

Selain dapat mengetahui bidang patahan yang terjadi, sebaran hiposenter gempabumi susulan juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi panjang dan lebar bidang patahan.





Gambar 4. 9 Panjang dan lebar bidang patahan menggunakan metode grafis.

Dari studi relokasi ini diketahui bahwa panjang patahan yang terjadi adalah sepanjang 160 kilometer. Sedangkan lebar patahan adalah 135 kilometer. Sehingga dapat diketahui luasan bidang patahan adalah sebesar 160 x 135 kilometer.

Dalam studi kali ini, penghitungan luasan bidang patahan selain menggunakan pendekatan grafis dilakukan juga dengan menggunakan pendekatan empiris dengan *scalling law*, Well dan Coppersmith (1994). Rumusan yang

digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1 pada Bab 2. *Scalling law* dilakukan pada magnitude yang dikeluarkan oleh BMKG, USGS dan Global CMT.

Panjang dan lebar patahan juga dihitung menggunakan sebaran slip dimana informasi yang digunakan disini didapatkan dari USGS. Sebaran slip (Gambar 3.3) menunjukkan slip yang terjadi di lapangan dalam skala panjang dimana nilainya didapat dengan menginversi data sinyal seismik.

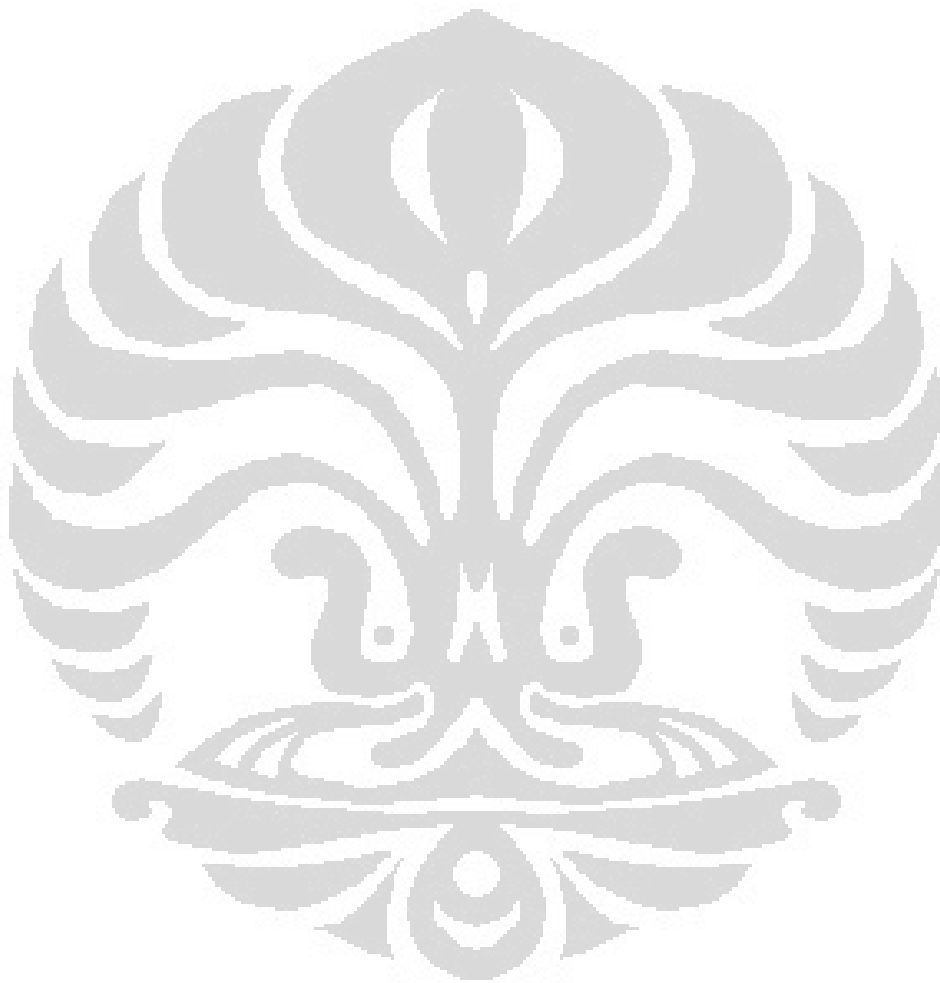
Tabel 4. 4 Perbandingan panjang patahan

No.	Metode	Panjang Patahan	Lebar Patahan
1	Metode grafis (sebaran hiposenter BMKG setelah relokasi)	160 km	135 km
2	<i>Scalling law</i> BMKG : 7.1 Mw(mB)	49.9 km	20 km
	USGS : 7.7 Mw	111.2 km	35.2 km
	Global CMT : 7.8 Mw	127.1 km	38.7 km
3	Slip distribution USGS	165 km	32 km

Dari Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa hasil yang didapat menggunakan metode grafis, *scalling law* dan sebaran slip memberikan hasil yang tidak jauh berbeda kecuali *scalling law* yang dilakukan pada Mw(mB). Hasil *scalling law* menggunakan Mw(mB) memberikan hasil yang sangat *under estimate* karena jauh dibawah hasil yang didapat dengan menggunakan metode lain. Hal ini

Universitas Indonesia

menunjukkan bahwa magnitudo *moment* akan memberikan hasil yang paling akurat dibandingkan magnitudo yang lain untuk menentukan deformasi yang terjadi akibat gempa bumi, sedangkan  $M_w(mB)$  tidak menghasilkan hasil yang akurat karena bukan merupakan magnitudo *moment* yang sebenarnya namun didapat secara empiris dari magnitudo *body* gelombang *broad band*( $mB$ ).  $M_w(mB)$  digunakan oleh BMKG agar dapat memberikan informasi secara cepat kepada masyarakat.



## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang sudah dijabarkan pada bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan sebaran hiposenter hasil dari relokasi menggunakan metode MJHD, dapat diidentifikasi bahwa bidang patahan yang terjadi pada gempa bumi Mentawai 25 Oktober 2010 adalah bidang nodal yang pertama pada mekanisme fokal yang diambil dari Global CMT dengan strike 316, dip 8 dan slip 96.
2. Berdasarkan sebaran hiposenter hasil relokasi terhadap kedalaman dapat diidentifikasi bahwa bidang patahan yang terjadi memiliki panjang 160 kilometer dan lebar 135 kilometer.

#### 5.2 Saran

Saran yang penulis ingin sampaikan untuk penghitungan relokasi gempa bumi menggunakan MJHD yang akan datang adalah :

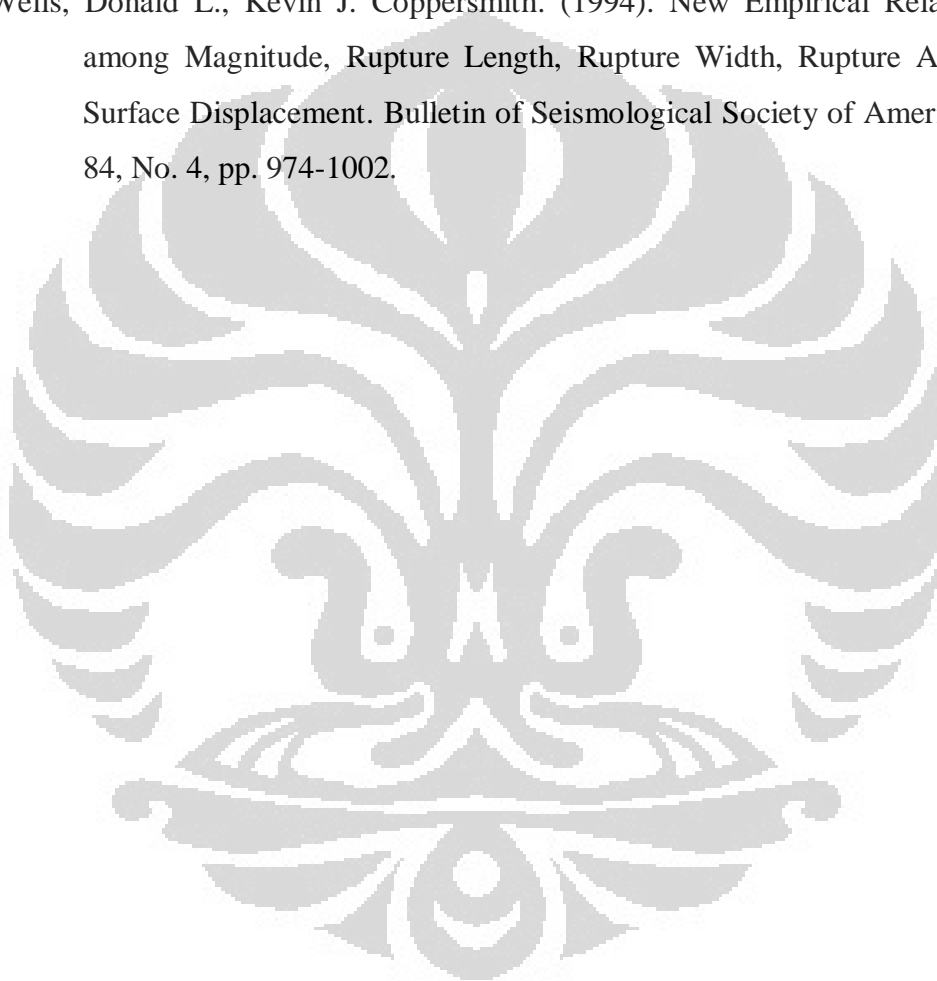
1. Menggunakan model kecepatan lokal, sehingga hasil yang didapat diharapkan akan lebih akurat.
2. Menggunakan fase gelombang lain selain gelombang P, misalnya menggunakan gelombang S.

## REFERENSI

- Atmojo, Jatmiko Prio. (2009). Plate Tectonic, Kuliah Geologi Dasar, Universitas Indonesia.
- Bormann, Peter. (2000). IASPEI, New Manual of Seismological Observatory Practice Volume 2 . GFZ German Research Centre for Geosciences. Germany.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2011). Peta Seismisitas Indonesia.
- Grandis, Hendra. (2009). Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, Jakarta.
- Global Centroid Moment Tensor. (29 Juni 2011). Global CMT Catalog. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Hayes, Gavin. (26 Oktober 2010, 19:20:53 UTC). Finite Fault Model Result of the Oct 25, 2010 Mw 7.7 Southern Sumatra Earthquake. [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/usa00043nx/finite\\_fault.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/usa00043nx/finite_fault.php). National Earthquake Information Center (NEIC) of the United States Geological Survey
- Hurukawa, N., and M. Imoto.(1990). Fine Structure of an Underground Boundary Between the Philippine Sea and Pacific Plates Beneath the Kanto District, Japan, Zisin, J. Seismol. Soc. Japan, 413-429. (in Japanese with an English abstract).
- Hurukawa, N., and M. Imoto.(1992). Subducting Oceanic Crust of the Philippine Sea and Pacific Plates and Weak-Zone-Normal Compression in Kanto District, Japan, Geophys. J. Int., 109, 639-652.
- Hurukawa, N.. (1995). Quick Aftershock Relocation of the 1994 Shikotan Earthquake and Its Fault Planes, Geophy. Res. Lett., 22, 3159-3162.
- Hurukawa, N..(2011). Relocation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Sequence and Fault Planes of  $M \geq 7$  Earthquakes,, Earth Planets Space, 63, 659-662.

- Hurukawa, N..(2008). Practical Analysis of Local Earthquakes, International Institute of Seismologi and Earthquake Engineering, Building Research Institute, Tsukuba, Japan. (CD-ROM)
- Ibrahim, Gunawan dan Subardjo. (2004). Pengetahuan Seismologi, Badan Meteorologi dan Geofisika, Jakarta.
- Kennett, B. L. N and E. R. Engdahl. (1991). Traveltime for global earthquake location and fase identification. Geophysic Journal International, 105, 429-465.
- Kim, Kwang Hee, Jer-Ming Chiu, Jose Pujol and Kou-Cheng Chen.(2005). Earthquake Relocations, Fault Zone Geometry and Constraints on Lateral Velocity Variations Using the Joint Hypocenter Determination Method in Taiwan Area, Earth Planets Space, 57, 809-823.
- Maung, Phyo Maung.(2009). Relocation of Earthquakes in Myanmar by MJHD Method : Aftershocks of Large Earthquakes and Seismicity Along the Sagaing Fault, IISEE, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- United States Geological Survey. (May 5, 1999). Inside the Earth. <http://pubs.usgs.gov/publications/text/inside.html>.
- United States Geological Survey. (November 03, 2009A 17:06:01 UTC). Earthquake Glossary – fault scarp. <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=fault%20scarp>
- United States Geological Survey. (November 03, 2009B 17:06:01 UTC). Earthquake Glossary – fault trace. <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=fault%20trace>.
- United States Geological Survey. (November 03, 2009C 17:06:01 UTC). Earthquake Glossary – seismic wave. <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=seismic%20wave>.
- United States Geological Survey. (April 28, 2010A 17:25:49 UTC). Focal Mechanism. <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/beachball.php>.
- United States Geological Survey. (December 01, 2010B 16:19:40 UTC). Slab Models for Subduction Zones. <http://earthquake.usgs.gov/research/data/slab/>.

- United States Geological Survey. (September 9, 2011). Historical perspective. <http://pubs.usgs.gov/publications/text/historical.html>.
- United States Geological Survey. (June 08, 2012A 19:55:47 UTC). Earthquake Glossary – fault plane. <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=fault%20plane>.
- United States Geological Survey. (June 08, 2012B 19:55:47 UTC). Earthquake Glossary – fault. <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=fault>.
- Wells, Donald L., Kevin J. Coppersmith. (1994). New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.



## LAMPIRAN

### LAMPIRAN A

#### Contoh format data BMKG

EventID: bmg2010uxkl

Date	Time	Latitude	Longitude	Depth	Mag	Type	Mag	smaj	smin	az	rms	cPhase	Region
2010-10-25	14:42:21	-3.49	100.14	11	7.1	Mw	(mB)	90.78	0.73	39	1.912	169	Southern Sumatra, Indonesia

Net	Sta	Phase	Date	Time	dis	Az	Res	Amp	Per	Qual	mb	ML	mB
IA	PPSI	P	2010-10-25	14:42:36.2	0.7	350	1.5	0	0	i			
IA	UBSI	P	2010-10-25	14:42:56.4	2.1	97	-0.5	0	0	i			
IA	SISI	P	2010-10-25	14:42:57.9	2.4	334	-2.3	0	0	i			
IA	KSI	P	2010-10-25	14:43:01.4	2.5	94	0.3	0	0	i			
IA	PDSI	P	2010-10-25	14:43:02.2	2.6	7	-0.6	0	0	i			
IA	SDSI	P	2010-10-25	14:43:07.6	2.8	27	1.1	0	0	i			
IA	PPI	P	2010-10-25	14:43:09.1	3	5	0.2	0	0	i			
IA	LHSI	P	2010-10-25	14:43:14.8	3.4	96	0.8	0	0	i			
IA	RGRI	P	2010-10-25	14:43:21.0	3.8	35	1.2	0	0	i			
IA	BKNI	P	2010-10-25	14:43:21.7	3.9	13	0.8	0	0	i			
IA	JMBI	P	2010-10-25	14:43:22.8	4	62	1.1	0	0	i			
IA	MDSI	P	2010-10-25	14:43:25.0	4.1	104	0.6	0	0	i			
IA	MNSI	P	2010-10-25	14:43:25.1	4.3	352	-1.3	0	0	i			
IA	LWLI	P	2010-10-25	14:43:25.7	4.2	111	0.7	0	0	i			
IA	FMBI	P	2010-10-25	14:43:31.5	4.6	83	1.1	0	0	i			
IA	KASI	P	2010-10-25	14:43:33.1	4.8	115	-0.1	0	0	i			
IA	SBSI	P	2010-10-25	14:43:33.2	4.9	352	-1.6	0	0	i			
IA	KLI	P	2010-10-25	14:43:36.0	4.9	106	1.2	0	0	i			
IA	GSI	P	2010-10-25	14:43:39.3	5.4	332	-2.3	2561.3	0.8	i			
IA	SDSI	S	2010-10-25	14:43:43.7	2.8	27	1.5	0	0	i			
MS	BTDF	P	2010-10-25	14:43:51.4	6	37	1.2	1737.8	1.2	i			
IA	PSI	P	2010-10-25	14:43:51.5	6.3	349	-1.9	1012.2	1.4	i			
PS	PSI	S	2010-10-25	14:43:51.6	6.3	349	-1.7	1012.2	1.4	i			
IA	PPBI	P	2010-10-25	14:43:52.6	6.1	78	1	893.7	1.1	i			
IA	CGJI	P	2010-10-25	14:43:52.8	6.3	120	-1.7	3706.9	1	i			
IA	TPRI	P	2010-10-25	14:43:53.6	6.2	45	1.2	3398.5	1	i			
IA	SBJI	P	2010-10-25	14:43:57.1	6.5	114	0.2	4313.9	1.2	i			
IA	KCSI	P	2010-10-25	14:44:05.7	7.4	341	-2.6	474.7	1.5	i			
IA	TSI	P	2010-10-25	14:44:05.7	7.1	347	0.7	2535.8	1.5	i			
IA	SKJI	P	2010-10-25	14:44:06.3	7.3	119	-1	5524.7	0.8	i			
IA	CBJI	P	2010-10-25	14:44:10.8	7.5	116	0.8	21670.3	1	i			
IA	TPI	P	2010-10-25	14:44:11.4	7.5	85	0.6	757.6	0.8	i			
IA	CNJI	P	2010-10-25	14:44:15.1	7.9	119	-1	5282.5	0.9	i			
MY	IPM	P	2010-10-25	14:44:17.8	8	6	1.2	1363.1	1.5	i			
AU	XMIS	P	2010-10-25	14:44:23.6	8.8	142	-5	611.3	1.6	i			
IA	CISI	P	2010-10-25	14:44:24.0	8.6	118	-1.9	6663.2	0.8	i			



## LAMPIRAN B

## Contoh format data MJHD

1	201010251442	21.0000	-3.4900	100.1400	11.0000	7.1000	167
	PPSI	36.20	1.5	0.70	350.0		
	UBSI	56.40	-0.5	2.10	97.0		
	SISI	57.90	-2.3	2.40	334.0		
	KSI	61.40	0.3	2.50	94.0		
	PDSI	62.20	-0.6	2.60	7.0		
	SDSI	67.60	1.1	2.80	27.0		
	PPI	69.10	0.2	3.00	5.0		
	LHSI	74.80	0.8	3.40	96.0		
	RGRI	81.00	1.2	3.80	35.0		
	BKNI	81.70	0.8	3.90	13.0		
	JMBI	82.80	1.1	4.00	62.0		
	MDSI	85.00	0.6	4.10	104.0		
	MNSI	85.10	-1.3	4.30	352.0		
	LWLI	85.70	0.7	4.20	111.0		
	PMBI	91.50	1.1	4.60	83.0		
	KASI	93.10	-0.1	4.80	115.0		
	SBSI	93.20	-1.6	4.90	352.0		
	KLI	96.00	1.2	4.90	106.0		
	GSI	99.30	-2.3	5.40	332.0		
	BTDF	111.40	1.2	6.00	37.0		
	PSI	111.50	-1.9	6.30	349.0		
	PPBI	112.60	1.0	6.10	78.0		
	CGJI	112.80	-1.7	6.30	120.0		
	TPRI	113.60	1.2	6.20	45.0		
	KOM	116.50	1.0	6.40	35.0		
	SBJI	117.10	0.2	6.50	114.0		
	KCSI	125.70	-2.6	7.40	341.0		
	TSI	125.70	0.7	7.10	347.0		
	SKJI	126.30	-1.0	7.30	119.0		
	CBJI	130.80	0.8	7.50	116.0		
	TPI	131.40	0.6	7.50	85.0		
	CNJI	135.10	-1.0	7.90	119.0		
	IPM	137.80	1.2	8.00	6.0		
	XMIS	143.60	-5.0	8.80	142.0		
	CISI	144.00	-1.9	8.60	118.0		
	MLSI	145.00	0.2	8.60	334.0		
	KUM	146.60	-0.5	8.70	3.0		
	LHMI	152.60	-1.2	9.20	340.0		
	CMJI	153.40	-1.5	9.30	118.0		
	SCJI	163.00	-0.1	9.90	115.0		
	BJI	168.70	0.8	10.30	112.0		

## LAMPIRAN C

Data stasiun yang digunakan dalam relokasi

NO.	STATION	LONGITUDE	LATITUDE	ELEVATION
1	BBKI	114.841103	-3.4625	110
2	BJI	109.709602	-7.3329	629
3	BKNI	101.039597	0.3262	65
4	BKSI	120.122398	-5.3219	0
5	BTDF	103.772888	1.36081	64.4
6	CBJI	106.849998	-6.42	0
7	CGJI	105.692902	-6.6135	0
8	CHTO	98.94381	18.81381	316
9	CISI	107.8153	-7.5557	544
10	CMJI	108.448502	-7.7837	0
11	CNJI	107.129601	-7.309	0
12	GSI	97.5755	1.30389	107
13	IPM	101.025497	4.4795	247
14	JMBI	103.641701	-1.6335	0
15	KAPI	119.751694	-5.01419	30
16	KASI	104.496696	-5.5236	0
17	KCSI	97.7715	3.522	204.7
18	KKM	116.214691	6.04431	830
19	KLI	104.856697	-4.863	32
20	KSI	102.592903	-3.6517	539
21	LEM	107.6175	-6.82661	1293
22	LHMI	96.947197	5.2288	3
23	LHSI	103.5233	-3.8267	0
24	LWLI	104.058899	-5.0175	938
25	MDSI	104.178299	-4.4861	0

26	MLSI	96.403999	4.2668	58
27	MNAI	102.955704	-4.3605	154
28	MNSI	99.579597	0.7955	0
29	MPSI	119.898003	0.3374	0
30	PCI	119.836601	-0.9054	150
31	PDSI	100.4617	-0.9118	276
32	PMBI	104.772003	-2.927	30
33	PMSI	118.914902	-3.5008	306.8
34	PPBI	106.136398	-2.1616	64
35	PPI	100.397003	-0.4568	0
36	PPSI	100.009598	-2.763	0
37	PSI	98.924004	2.801	987
38	RGRI	102.333801	-0.3491	41
39	SBJI	106.129997	-6.12	0
40	SBSI	98.889999	1.55	147
41	SCJI	109.1689	-7.681	45
42	SDSI	101.4282	-0.9324	0
43	SISI	99.0895	-1.3265	0
44	SKJI	106.556297	-7.0053	100
45	SMRI	110.440666	-7.04915	203
46	SPSI	119.769096	-3.9646	0
47	TPI	107.653389	-2.75631	25
48	TPRI	104.526299	0.9184	41
49	TSI	98.564499	3.5008	0
50	TTSI	119.819	-3.0451	0
51	UBPT	105.470001	15.28	120
52	UBSI	102.2714	-3.7611	28.1
53	UWJI	110.947403	-6.4191	62

## LAMPIRAN D

## Data output dari MJHD

## 1. File mjhd.out5p

No	Y	M	D	H	M	S	dt	Long	dX	Lat	dY	Depth	dZ	Mag	Phase	STD
1	101025144220.33	0.52	99.9141	0.0123	-3.5986	0.0106	27.88	4.89	7.1	47	0.372					
3	1010251521 7.00	0.89	99.6550	0.0412	-3.5992	0.0280	0.00	4.82	5.7	22	0.517					
8	101025173641.53	0.22	99.3709	0.0199	-2.9160	0.0157	44.73	8.86	4.7	25	0.334					
9	101025181312.79	0.23	99.9222	0.0204	-2.7371	0.0147	21.99	1.81	4.3	26	0.407					
11	101025182252.02	0.53	99.4991	0.0249	-3.1470	0.0181	29.46	4.04	4.1	30	0.450					
12	101025184027.32	0.30	99.7707	0.0185	-2.8946	0.0154	29.59	1.98	4.5	34	0.404					
13	101025184839.85	0.15	100.3272	0.0159	-3.0400	0.0146	41.47	3.51	3.9	23	0.360					
14	101025193325.42	0.49	99.5947	0.0176	-3.4990	0.0152	11.25	3.15	5.4	33	0.390					
15	101025193730.42	0.14	100.1182	0.0124	-3.0909	0.0115	66.78	2.16	6.1	47	0.423					
17	101025195757.63	0.32	100.1951	0.0189	-3.2269	0.0164	30.57	3.26	4.9	36	0.461					
18	10102520 4 4.99	0.22	99.7477	0.0207	-3.4376	0.0181	89.30	4.13	4.8	29	0.418					
19	10102520 731.77	0.21	100.1819	0.0195	-3.1504	0.0179	46.68	6.56	4.4	23	0.444					
20	101025202213.28	0.28	99.6994	0.0184	-3.5438	0.0179	39.8914.66	4.8	33	0.405						
21	101025205223.25	0.21	99.3459	0.0186	-3.2007	0.0152	67.59	4.71	4.4	37	0.391					
22	1010252135 0.88	0.32	99.4670	0.0153	-2.8448	0.0128	18.60	1.85	4.0	23	0.277					
23	101025214519.65	0.17	99.9998	0.0143	-3.1641	0.0132	55.08	3.60	3.9	24	0.309					
24	1010252210 3.66	0.23	99.8820	0.0157	-2.8733	0.0126	30.07	1.62	4.7	42	0.381					
25	1010252249 8.63	0.55	99.4921	0.0192	-3.3299	0.0163	20.21	4.74	4.2	36	0.430					
26	101025225955.60	0.23	100.2401	0.0219	-3.3939	0.0183	67.30	2.61	5.6	47	0.395					
27	101025231254.81	1.00	99.2156	0.0350	-3.5677	0.0272	0.00	6.11	5.1	28	0.582					
31	101026 32831.21	0.26	100.2019	0.0275	-3.2432	0.0216	38.68	2.98	4.8	31	0.471					
40	101026105121.42	1.55	99.6408	0.0324	-3.7538	0.0237	0.0012.57	5.3	24	0.445						
44	101026113320.00	0.35	99.6679	0.0252	-2.5914	0.0193	30.97	2.68	5.1	29	0.489					
48	101026145747.37	0.64	99.3241	0.0156	-2.3454	0.0113	19.59	5.25	4.9	22	0.279					
56	101026194038.78	0.89	99.6715	0.0231	-3.6967	0.0171	18.65	6.46	4.9	41	0.446					
58	1010262041 4.23	0.21	99.3353	0.0197	-2.3660	0.0133	37.72	2.09	4.7	31	0.354					
62	10102623 941.31	0.71	99.4225	0.0298	-3.8304	0.0214	4.73	3.95	5.2	22	0.382					
63	101026234537.85	0.28	99.6720	0.0210	-2.4559	0.0156	32.41	2.80	5.6	31	0.433					
64	101027 0 356.20	0.63	99.3252	0.0225	-3.6892	0.0170	1.86	3.90	5.5	32	0.395					
70	101027 43319.25	0.55	99.7090	0.0253	-3.6144	0.0189	12.23	3.14	4.9	33	0.416					
72	101027 51658.17	0.48	99.5075	0.0278	-2.8094	0.0203	29.89	3.43	4.8	21	0.447					
77	10102715 936.73	0.62	99.3877	0.0266	-3.6609	0.0190	9.13	3.39	5.1	28	0.386					
85	101027213457.98	0.66	99.6577	0.0330	-2.9817	0.0252	22.77	4.58	4.5	25	0.575					
99	10102918 525.06	0.18	99.4573	0.0154	-3.4806	0.0136	52.11	3.08	5.0	44	0.486					
103	101030 05533.97	0.62	99.5323	0.0278	-3.5509	0.0195	11.22	3.36	4.7	28	0.421					
108	101031 0 151.11	1.38	99.6620	0.0369	-3.7156	0.0300	19.2310.05	4.8	23	0.476						
111	101031122339.78	0.23	99.8017	0.0217	-3.5086	0.0175	63.85	6.63	4.9	28	0.395					
114	1011 115 122.26	0.55	99.3581	0.0270	-2.6823	0.0181	13.34	3.24	4.8	21	0.425					

## 2. Contoh file mjhd.prn

mjhd.prn5

NO	Y	M	D	HMN	SEC	X	Y	Z	MAG	N	STD
AST	P,SEC			D,DEG	DT	O-C	AZIM	DZ			
1	10	1025	1442	20.33		99.914	-3.599	27.88	7.1	47	0.372
				0.52		0.012	0.011	4.89			
PPSI	36.20			0.84		0.05	6.55				
UBSI	56.40			2.36		-0.77	94.00				
SISI	57.90			2.40		-0.46	339.93				
KSI	61.40			2.67		-0.75	91.21				
PDSI	62.20			2.72		0.19	11.60				
SDSI	67.60			3.05		0.36	29.77				
PPI	69.10			3.16		0.49	8.80				
LHSI	74.80			3.61		-0.33	93.71				
RGRI	81.00			4.03		0.24	36.89				
BKNI	81.70			4.06		0.30	16.12				
JMBI	82.80			4.20		0.12	62.43				
MDSI	85.00			4.34		0.04	101.85				
MNSI	85.10			4.38		-0.31	355.61				
LWLI	85.70			4.37		0.41	108.98				
PMBI	91.50			4.90		-0.05	82.31				
KASI	93.10			4.95		0.12	112.88				
SBSI	93.20			5.22		-0.79	348.67				
KLI	96.00			5.09		0.80	104.47				
GSI	99.30			5.40		-0.08	334.32				
BTDF	111.40			6.26		0.25	38.12				
PSI	111.50			6.43		-0.57	351.14				
PPBI	112.60			6.38		-0.28	77.23				
CGJI	112.80			6.49		-0.25	117.72				
TPRI	113.60			6.43		0.01	45.86				
SBJI	117.10			6.68		0.17	112.26				
SKJI	126.30			7.43		-0.47	117.37				
CBJI	130.80			7.46		0.22	112.35				
TPI	131.40			7.77		-0.25	84.04				
CNJI	135.10			8.07		0.38	117.47				
IPM	137.80			8.10		0.54	7.89				
CISI	144.00			8.79		-0.08	116.90				
LHMI	152.60			9.26		-0.07	341.31				
CMJI	153.40			9.45		0.17	116.46				
SCJI	163.00			10.06		-0.05	114.17				
BJI	168.70			10.43		0.26	111.24				

## LAMPIRAN E

Tabel Model Kecepatan IASP91

**Table 2.2 The IASP91 velocity model**

Depth (km)	Radius (km)	$v_p$ (km/s)	$v_s$ (km/s)
6371.00	0.	11.2409	3.5645
6271.00	100.000	11.2399	3.5637
6171.00	200.000	11.2369	3.5611
6071.00	300.000	11.2319	3.5569
5971.00	400.000	11.2248	3.5509
5871.00	500.000	11.2157	3.5433
5771.00	600.000	11.2046	3.5339
5671.00	700.000	11.1915	3.5229
5571.00	800.000	11.1763	3.5101
5471.00	900.000	11.1592	3.4956
5371.00	1000.00	11.1400	3.4795
5271.00	1100.00	11.1188	3.4616
5171.00	1200.00	11.0956	3.4421
5153.90	1217.10	11.0914	3.4385
5153.90	1217.10	10.2578	0.
5071.00	1300.00	10.2364	0.
4971.00	1400.00	10.2044	0.
4871.00	1500.00	10.1657	0.
4771.00	1600.00	10.1203	0.
4671.00	1700.00	10.0681	0.
4571.00	1800.00	10.0092	0.
4471.00	1900.00	9.9435	0.
4371.00	2000.00	9.8711	0.
4271.00	2100.00	9.7920	0.
4171.00	2200.00	9.7062	0.
4071.00	2300.00	9.6136	0.
3971.00	2400.00	9.5142	0.
3871.00	2500.00	9.4082	0.
3771.00	2600.00	9.2954	0.
3671.00	2700.00	9.1758	0.
3571.00	2800.00	9.0496	0.
3471.00	2900.00	8.9166	0.
3371.00	3000.00	8.7768	0.
3271.00	3100.00	8.6303	0.
3171.00	3200.00	8.4771	0.
3071.00	3300.00	8.3171	0.
2971.00	3400.00	8.1504	0.
2889.00	3482.00	8.0087	0.
2889.00	3482.00	13.6908	7.3015
2871.00	3500.00	13.6866	7.2970
2771.00	3600.00	13.6636	7.2722
2740.00	3631.00	13.6564	7.2645
2740.00	3631.00	13.6564	7.2645
2671.00	3700.00	13.5725	7.2302
2571.00	3800.00	13.4531	7.1819
2471.00	3900.00	13.3359	7.1348

Table 2.2 (continued)

Depth (km)	Radius (km)	$v_p$ (km/s)	$v_s$ (km/s)
2371.00	4000.00	13.2203	7.0888
2271.00	4100.00	13.1055	7.0434
2171.00	4200.00	12.9911	6.9983
2071.00	4300.00	12.8764	6.9532
1971.00	4400.00	12.7607	6.9078
1871.00	4500.00	12.6435	6.8617
1771.00	4600.00	12.5241	6.8147
1671.00	4700.00	12.4020	6.7663
1571.00	4800.00	12.2764	6.7163
1471.00	4900.00	12.1469	6.6643
1371.00	5000.00	12.0127	6.6101
1271.00	5100.00	11.8732	6.5532
1171.00	5200.00	11.7279	6.4933
1071.00	5300.00	11.5761	6.4302
971.00	5400.00	11.4172	6.3635
871.00	5500.00	11.2506	6.2929
771.00	5600.00	11.0756	6.2180
760.00	5611.00	11.0558	6.2095
760.00	5611.00	11.0558	6.2095
671.00	5700.00	10.8192	5.9785
660.00	5711.00	10.7900	5.9500
660.00	5711.00	10.2000	5.6000
571.00	5800.00	9.9010	5.4113
471.00	5900.00	9.5650	5.1993
410.00	5961.00	9.3600	5.0700
410.00	5961.00	9.0300	4.8700
371.00	6000.00	8.8877	4.8021
271.00	6100.00	8.5227	4.6281
210.00	6161.00	8.3000	4.5220
210.00	6161.00	8.3000	4.5180
171.00	6200.00	8.1917	4.5102
120.00	6251.00	8.0500	4.5000
120.00	6251.00	8.0500	4.5000
71.00	6300.00	8.0442	4.4827
35.00	6336.00	8.0400	4.4700
35.00	6336.00	6.5000	3.7500
20.00	6351.00	6.5000	3.7500
20.00	6351.00	5.8000	3.3600
0.	6371.00	5.8000	3.3600