

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI DAERAH LOMBOK  
DAN SEKITARNYA MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE  
DIFFERENCE***

SKRIPSI



**ABDULLAH A. ALI  
F1D314013**

**PROGRAM STUDI TEKNIK GEOFISIKA  
JURUSAN TEKNIK KEBUMIHAN**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JAMBI  
2021**

## HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Abdullah A. Ali  
NIM : F1D314013  
Program Studi : Teknik Geofisika  
Fakultas : Sains dan Teknologi  
Universitas : Jambi

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini yang berjudul “**Relokasi Hiposenter Gempabumi Daerah Lombok dan Sekitarnya Menggunakan Metode Double Difference**” merupakan hasil karya sendiri, tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim. Tanda tangan yang tertera dalam halaman pengesahan adalah asli. Jika tidak asli, saya siap menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Jambi, Juli 2021  
Penulis

Abdullah A. Ali  
F1D314013

## RINGKASAN

Lombok merupakan salah satu pulau yang berada di Provinsi Nusa Tenggara Barat yang terletak di antara Pulau Bali dan Sumbawa. Sumber gempabumi yang mengancam wilayah ini berasal dari zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam Lempeng Eurasia. Penentuan posisi hiposenter bermanfaat dalam analisis struktur detail seperti identifikasi zona patahan dan sebaran serta orientasi *micro fracture* (patahan micro). Metode *double difference* merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk merelokasi hiposenter gempabumi. Teknik *double difference* didasarkan pada kenyataan bahwa jika terdapat perbedaan jarak antara dua hiposenter yang sangat kecil dibandingkan dengan jarak antara kedua hiposenter tersebut terhadap stasiun dan memiliki skala kecepatan heterogenitas yang bisa dikatakan mirip, maka pola sinar gelombang yang dihasilkan dapat dikatakan identik antara kedua hiposenter tersebut. Sebanyak 273 kejadian gempabumi berhasil direlokasi dengan nilai residual waktu tempuh yang berada di nol dan mendekati nol. Persebaran gempa setelah direlokasi menunjukkan gempa di daerah Lombok dan Sekitarnya pada tahun 2018 sebagian besar berada di utara Pulau Lombok, dimana terdapat Sesar Flores disebelah utara Pulau Lombok yang disinyalir sebagai sumber aktivitas seismik. Berdasarkan hasil relokasi menunjukkan kemiringan Sesar Flores sebesar  $12.68^{\circ}$  yang disebabkan oleh dorongan Lempeng Indo-Australia secara horizontal.

**Kata Kunci:** Sesar Flores, subduksi, *double difference*, hiposenter; Lombok

## SUMMARY

*Lombok is one of the islands in West Nusa Tenggara Province, which is located between the Islands of Bali and Sumbawa. The source of the earthquake that threatens this region comes from the subduction zone of the Indo-Australian Plate which is piercing the Eurasian Plate. Hypocenter positioning is useful in detailed structural analysis such as fault zone identification and distribution and micro fracture orientation. The double difference method is one of the techniques used to relocate the hypocenter of earthquakes. The double difference technique is based on the fact that if there is a difference in the distance between the two hypocenters which is very small compared to the distance between the two hypocenters and the station and has a heterogeneous velocity scale that can be said to be similar, then the resulting wave beam pattern can be said to be identical between the two hypocenters. A total of 273 earthquake events were successfully relocated with the residual value of the travel time that was at zero and close to zero. The spread of the earthquake after being relocated shows that the earthquake in the Lombok and Surrounding areas in 2018 was mostly located in the north of Lombok Island. Where there is the Flores Fault in the north of Lombok Island which is alleged to be a source of seismic activity. Based on the results of the relocation, it shows the slope of the Flores Fault of  $12,68^{\circ}$  which is caused by the horizontal thrust of the Indo-Australian Plate.*

**Keyword:** *Flores Fault, subduction, double difference, hypocenter; Lombok*

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI DAERAH  
LOMBOK DAN SEKITARNYA MENGGUNAKAN METODE  
*DOUBLE DIFFERENCE***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh  
gelar sarjana pada Program Studi Teknik Geofisika



**ABDULLAH A. ALI  
F1D314013**

**PROGRAM STUDI TEKNIK GEOFISIKA  
JURUSAN TEKNIK KEBUMIHAN**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JAMBI  
2021**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul **RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI DAERAH LOMBOK DAN SEKITARNYA MENGGUNAKAN METODE DOUBLE DIFFERENCE** yang disusun oleh **ABDULLAH A. ALI, NIM: F1D314013** telah dipertahankan di depan Tim Penguji pada tanggal 16 Juni 2021 dan dinyatakan lulus.

Susunan Tim Penguji:

Ketua : Drs. Faizar Farid, M.Si  
Sekretaris : Ira Kusuma Dewi S.Si., M.T  
Anggota : 1. Drs. Nasri MZ, M.S  
2. Ir. Buhaira, M.P  
3. Ichy Lucya Resta, S.Pd., M.Si

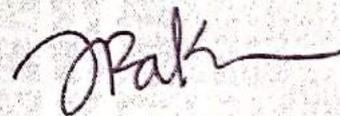
Disetujui:

Pembimbing Utama



Drs. Faizar Farid, M.Si  
NIP. 195812171989021001

Pembimbing Pendamping

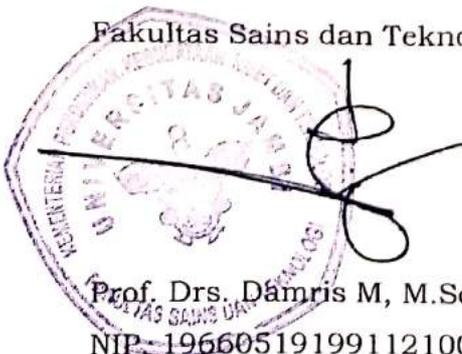


Ira Kusuma Dewi, S.Si., M.T  
NIP. 198701172019032015

Diketahui:

Dekan

Fakultas Sains dan Teknologi



Prof. Drs. Damaris M, M.Sc., Ph.D  
NIP. 196605191991121001

Ketua Jurusan

Teknik Kebumihan



Dr. Lenny Marlinda, S.T., M.T  
NIP. 197907062008122002

## RIWAYAT HIDUP



Abdullah Abdurrahman Ali, lahir di Kuala Tungkal pada tanggal 20 September 1996. Penulis telah menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD YPMM (Yayasan Pendidikan Mayang Mangurai) Tebing Tinggi pada tahun 2002 sampai 2008. Selanjutnya penulis melanjutkan sekolah di SMP YPMM (Yayasan Pendidikan Mayang Mangurai) pada tahun 2008 sampai 2011. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMK Yadika (Yayasan Abdi Karya) Jambi pada tahun 2011 hingga 2014. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Geofisika, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi pada tahun 2014.

Penulis menyelesaikan Kerja Praktik Lapangan (magang) di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Kota Bumi, Lampung pada Februari hingga Maret 2018 dengan judul “Analisis Data Gempabumi Magnitudo  $\geq 5.0$  SR Periode Mei Hingga Agustus 2017 Studi Kasus Wilayah Pusat Gempabumi Regional II Menggunakan Metode *Grid Search* dan Iteratif Secara Manual dan Komputasi”. Kemudian penulis melanjutkan tugas akhir di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta Pusat Bidang Pusat Gempabumi dan Tsunami pada November 2019 hingga Januari 2020 dengan judul “Relokasi Hiposenter Gempabumi Daerah Lombok dan Sekitarnya Menggunakan Metode *Double Difference*”. Skripsi ini juga telah dipertahankan di depan tim penguji pada 16 Juni 2021 dan dinyatakan lulus serta berhak menyanggah gelar Sarjana Teknik (S.T).

## PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi yang berjudul “**Relokasi Hiposenter Gemapbumi Daerah Lombok dan Sekitarnya Menggunakan Metode *Double Difference***”.

Skripsi ini penulis ajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Geofisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi. Dalam penyelesaian skripsi ini penulis telah mendapatkan bimbingan, arahan dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis selama pengerjaan hingga penyelesaian skripsi ini, diantaranya:

1. Kedua orangtua dan keluarga yang sangat saya cintai atas kesabarannya dan kecintaannya yang selalu memberikan dukungan moril dan semangat yang tak terhingga sehingga terselesaikannya skripsi ini.
2. Prof. Drs. Damris M, M.Sc., Ph.D Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.
3. Drs. Faizar Farid., M.Si sebagai pembimbing utama yang telah memberikan bantuan baik saran, arahan serta masukan selama penulis menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Ira Kusuma Dewi, S.Si., M.T sebagai pembimbing pendamping yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing serta memberikan bantuan dan arahan selama penulis menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Drs. Nasri MZ, M.Si., Ir. Buhaira, M.P., Ichy Lucy Rest S.Pd., M.Si. tim penguji yang telah meluangkan waktunya dalam kegiatan seminar untuk memberikan saran serta koreksi kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir ini menjadi skripsi yang baik.
6. Seluruh Jajaran Dosen dan Staf Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi
7. DR. Mohamad Ramdhan, M.T sebagai pembimbing lapangan yang telah suka rela membagikan waktu dan ilmunya untuk menyelesaikan data tugas akhir ini.
8. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta, Pusat Gempabumi dan Tsunami yang telah mengizinkan dan memfasilitasi penulis selama kegiatan Tugas Akhir.
9. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir, Ari (TGEF 14), Panji (TGEF 15), Ana (TGEF 15), dan Rafida (TGEF 15).

10. Seluruh rekan-rekan mahasiswa S-1 Teknik Geofisika Angkatan Tahun 2014 yang telah memberikan semangat, dan saran selama perkuliahan maupun dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat berpartisipasi dalam mengembangkan penelitian-penelitian bertema Sains di Indonesia. Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih.

Jambi,        Juli 2021  
Penulis

Abdullah A. Ali  
F1D314013

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERNYATAAN .....	i
RINGKASAN .....	ii
SUMMARY .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	v
RIWAYAT HIDUP .....	vi
PRAKATA .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
I. PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Manfaat .....	2
II. TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1 Penelitian yang Relevan .....	3
2.2 Kegempaan Daerah Bali-NTB .....	5
2.3 Tataan Tektonik Lombok dan Sekitarnya .....	6
2.4 Gempabumi .....	11
2.5 Parameter Gempabumi .....	12
2.6 Patahan .....	19
III. METODOLOGI PENELITIAN .....	21
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	21
3.2 Data .....	21
3.3 <i>Software</i> .....	22
3.4 Model Kecepatan Awal .....	22
3.5 Tahapan Penelitian .....	23
3.6 Diagram Alir Penelitian .....	28
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	29
4.1 Gempabumi Sebelum Relokasi .....	29
4.2 Gempabumi Setelah Relokasi .....	30
4.3 Analisis Gempabumi Setelah Relokasi .....	35
V. KESIMPULAN DAN SARAN .....	38
5.1 Kesimpulan .....	38
5.2 Saran .....	38
DAFTAR PUSTAKA .....	39
LAMPIRAN	

## **DAFTAR TABEL**

Tabel	Halaman
1 Rincian kegiatan Penelitian .....	21
2 Referensi Model Kecepatan Awal yang Digunakan .....	23
3 Parameter yang Digunakan Pada Program Ph2dt .....	24
4 Parameter yang Digunakan Pada Program Hypodd.....	26

## DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
1	Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda .....	6
2	Penggambaran Sesar Pada Daerah Lombok dan Sekitarnya .....	7
3	Ilustrasi dari Algoritma Relokasi Gempa <i>Double Difference</i> .....	16
4	Jenis-jenis Patahan.....	20
5	Diagram Bidang Patahan dan Terbentuknya Gempabumi .....	20
6	Peta Persebaran Stasiun Penelitian Terhadap Daerah Penelitian .....	22
7	Hasil Pengolahan Ph2dt .....	25
8	Hasil Pengolahan HypoDD.....	27
9	Diagram Alir Penelitian .....	28
10	Peta Persebaran Gempa Awal .....	29
11	Perbandingan Data Gempa.....	30
12	Histogram Residual Waktu Tempuh.....	32
13	Gempabumi Setelah Relokasi .....	33
14	Diagram Kompas.....	34
15	Diagram Rose.....	35
16	Grafik Persamaan Linear .....	36
17	Pemetaan Mekanisme Fokus dari Global CMT.....	37

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan daerah rawan gempabumi karena dilalui oleh jalur pertemuan 3 lempeng tektonik, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Lempeng Indo-Australia bergerak relatif ke arah timur laut dan menyusup kedalam lempeng Eurasia, sementara lempeng Pasifik bergerak relatif ke arah barat. Proses pergerakan lempeng-lempeng tektonik ini menyebabkan Indonesia menjadi wilayah yang rawan gempabumi.

Lombok merupakan salah satu pulau yang berada di Provinsi Nusa Tenggara Barat yang terletak di antara Pulau Bali dan Sumbawa. Sumber gempabumi yang mengancam wilayah Lombok berasal dari zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam Lempeng Eurasia (Sulaeman, dkk., 2019). Subduksi tersebut membentuk patahan naik busur belakang disepanjang utara Pulau Bali, Lombok, Sumbawa hingga Flores yang diketahui sebagai Sesar Flores (Hamilton, 1979). Pada tahun 2018 daerah Lombok dan Sekitarnya di landa oleh gempa merusak, tercatat ada enam kejadian gempabumi yang memiliki magnitudo lebih dari 5.5 SR, dimana serangkaian gempa yang terjadi di Lombok pada tahun 2018 dimulai pada bulan Juli.

Pemetaan kerawanan gempabumi, studi struktur kecepatan serta analisis seismisitas untuk studi global seperti proses tektonik maupun studi lokal memerlukan pengetahuan yang baik tentang penentuan hiposenter gempabumi yang presisi. Selain itu penentuan posisi hiposenter yang presisi juga bermanfaat dalam analisis struktur detail, misalnya identifikasi zona patahan dan sebaran serta orientasi *microfracture* (patahan mikro). Masalah terbesar dari analisis seismisitas adalah adanya ketidakpastian penentuan lokasi hiposenter yang sering kali jauh dari dimensi patahan sumber gempabumi tersebut, hal ini menyebabkan sulit untuk menginterpretasi struktur geologi dengan baik.

Akurasi dari lokasi hiposenter ditentukan oleh beberapa faktor, termasuk diantaranya adalah tipe dan banyaknya gelombang seismik yang terekam pada stasiun, geometri stasiun pengamat yang ada, akurasi pembacaan waktu tiba serta pengetahuan tentang struktur kecepatan gelombang seismik. Untuk skala lokal, faktor geometri pada prinsipnya bisa diperbaiki dengan menambah jumlah stasiun pengamat, sedangkan faktor kesalahan model kecepatan dan akurasi pembacaan waktu tiba membutuhkan analisis yang lebih lanjut. Model kecepatan bawah permukaan pada umumnya tidak bisa ditentukan dengan pasti karena keterbatasan data yang ada dan kompleksitas struktur bawah permukaan.

Pendekatan model sederhana bawah permukaan yang tepat diperlukan untuk dapat menentukan posisi hiposenter dengan baik.

Salah satu teknik untuk merelokasi hiposenter gempabumi adalah dengan algoritma *double difference* (perbedaan ganda). Teknik ini termasuk ke dalam metode penentuan lokasi hiposenter relatif. Teknik *double difference* didasarkan pada kenyataan bahwa jika terdapat perbedaan jarak antara dua hiposenter yang sangat kecil dibandingkan dengan jarak antara kedua hiposenter tersebut terhadap stasiun dan memiliki skala kecepatan heterogenitas yang bisa dikatakan mirip, maka pola sinar gelombang yang dihasilkan dapat dikatakan identik antara kedua hiposenter tersebut. Ini dapat diartikan pula bahwa dua gempabumi yang terekam pada stasiun yang sama akan memberikan kontribusi perbedaan pada jarak (Rohadi, dkk., 2011).

### **1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah**

Disebelah utara Pulau Lombok terdapat Sesar Flores yang terbentuk akibat dari zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam Lempeng Eurasia dibagian selatan. Sesar ini disinyalir sebagai penyebab utama aktifitas seismik yang ada di Pulau Lombok dan sekitarnya, sehingga masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pola persebaran gempabumi daerah Lombok pada tahun 2018 setelah dilakukan relokasi?
2. Bagaimana kondisi tektonik daerah Lombok dan sekitarnya berdasarkan hasil relokasi hiposenter gempa tahun 2018?

### **1.3 Tujuan**

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui pola persebaran gempabumi pada daerah Lombok dan Sekitarnya periode Juli hingga Desember tahun 2018 setelah dilakukan relokasi.
2. Untuk mengetahui struktur penyebab gempabumi pada daerah Lombok dan Sekitarnya dan memahami kondisi tektoniknya berdasarkan hasil relokasi hiposenter gempabumi periode Juli hingga Desember tahun 2018.

### **1.4 Manfaat**

Manfaat dari hasil penelitian ini yaitu diharapkan mampu memberikan informasi tektonik wilayah Lombok berdasarkan posisi hiposenter gempabumi yang lebih presisi pada tahun 2018 dan sebagai acuan untuk penelitian tentang daerah Lombok selanjutnya.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian yang Relevan

Pada tahun 2009, P. Sahara, W. Kusumo, Widiyantoro, dan Sule melakukan penelitian mengenai relokasi hiposenter gempa vulkanik Gunung Kelud menggunakan metode *double difference*. Data yang digunakan adalah data perekaman Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi mulai tanggal 27 september 2007 hingga 12 November 2007 oleh empat stasiun (KLD, SUM, GJM, dan KWH). Data tersebut berjumlah 293 sumber gempa vulkanik tipe A dan B. Hasil relokasi hiposenter dengan metode DD menunjukkan bahwa hiposenter bisa lebih terkonsentrasi pada satu *trend* struktur seismisitas dengan jelas.

Pada tahun 2011, Madrinovella, Widiyantoro, dan Meilano melakukan penelitian tentang relokasi hiposenter gempabumi Padang 30 September 2009 dengan menggunakan metode *double difference*. Data yang digunakan adalah waktu tempuh dari seluruh gempabumi yang terjadi pada tanggal 30 September 2009. Hasil relokasi hiposenter yang paling optimal menunjukkan bahwa posisi gempa berada lebih dangkal dan posisinya di sebelah barat lokasi hiposenter awal. Hasil perhitungan deformasi menunjukkan terjadinya pergeseran ke arah laut.

Pada tahun 2012, Sunardi dkk melakukan penelitian mengenai relokasi hiposenter gempabumi di wilayah Jawa dengan jumlah *event* gempabumi sebanyak 1352 data. Data yang digunakan merupakan data gempabumi wilayah Jawa tahun 2009-2010 dengan menggunakan metode *double difference*. Hasil relokasi menunjukkan pergeseran hiposenter lebih dari 50 km berjumlah sebanyak 7 kejadian gempabumi. Pergeseran hiposenter menyebar ke segala arah dan tidak memiliki kecenderungan ke arah tertentu, namun demikian perubahan hiposenter terbanyak ke arah barat.

Pada tahun yang sama yaitu di tahun 2012, Ismanto Hadi, dkk melakukan penelitian mengenai relokasi gempa mikro untuk memodelkan reservoir lapangan panasbumi di kamojang dengan menggunakan metode *double difference*. Data yang digunakan terdiri dari 113 gempa mikro yang terekam pada stasiun-stasiun pengamatan. Data diambil dalam interval waktu Juni s.d. September 2010. Hasil relokasi memperlihatkan terdapat kumpulan gempa yang berorientasi di Selatan Barat Daya area Kamojang.

Pada tahun 2014, Fathan & Daud melakukan penelitian pengaplikasian metode *double-difference* pada data *Mircroearthquake* menggunakan program MATLAB. Data yang digunakan adalah data sintetik yang dibuat dengan variasi model kecepatan dan data riil di suatu daerah dekat struktur patahan. Data

tersebut diolah menggunakan program *HYPO71* yang mengaplikasikan metode Geiger untuk mendapatkan lokasi awal hiposenter, kemudian direlokasi dengan menggunakan program buatan berbasis MATLAB (*Delta-Hypo*) dan program *HypoDD* yang mengaplikasikan metode *double-difference*. Hasil pengolahan data sintetik memberikan peningkatan akurasi episentral hingga 48% dan kedalaman hingga 42%. Hal ini menunjukkan bahwa metode *double-difference* berhasil merelokasi hiposenter sehingga diperoleh parameter dengan akurasi yang lebih baik. Hasil pengolahan data riil menunjukkan adanya kesesuaian lokasi hiposenter dengan struktur geologi dan patahan yang ada di lapangan.

Pada tahun 2015, Apdila dan Sunardi melakukan penelitian tentang relokasi gempa bumi Halmahera 15 November 2014 yang mengaplikasikan metode *double difference*. Jumlah gempa bumi yang dipergunakan sebanyak 323 *event* serta jaringan stasiun pencatat yang dipergunakan sebanyak 44 stasiun yang tersebar di sekitar Halmahera. Hasil setelah relokasi pergeseran gempa bumi dengan *fixed depth* 10 km menjadi kedalaman yang bervariasi dan perubahannya bersifat random. Nilai rms residual setelah relokasi menunjukkan semakin banyak yang mendekati nilai 0 dibandingkan sebelum relokasi. Hal ini mengindikasikan adanya perbaikan dalam posisi hiposenter gempa bumi Halmahera dan susulannya.

Pada tahun 2016, Setiadi dan Suardi melakukan penelitian mengenai relokasi Gempa bumi wilayah laut Maluku dengan menggunakan metode *double difference*. Data yang digunakan adalah data gempa bumi yang bersumber dari katalog gempa bumi BMKG dimulai dari Januari 2013 hingga Juni 2015. Data tersebut berjumlah 2048 kejadian yang tercatat di beberapa stasiun pencatat wilayah Laut Maluku dan sekitarnya. Jumlah gempa bumi yang direlokasi adalah sebanyak 1697 dari 2048 kejadian gempa bumi. Hasil relokasi didapatkan distribusi hiposenter yang dapat menunjukkan pola penujaman yang berasosiasi dengan zona subduksi di wilayah laut Maluku. Hasil dari relokasi hiposenter menggunakan *hypoDD* menunjukkan hiposenter yang lebih baik, yaitu gempa bumi dengan kedalaman tertentu telah terelokasi dan dapat lebih menggambarkan pola seismisitas di wilayah Laut Maluku.

Di tahun yang sama yaitu pada tahun 2016, Yusuf dan Santosa melakukan penelitian untuk mengetahui persebaran hiposenter wilayah Maluku selatan dengan menggunakan metode *double difference*. Data gempa yang digunakan adalah data gempa di wilayah Maluku selatan, periode 18 Januari 2011 sampai 25 Februari 2016 dengan magnitudo minimal 4.8 SR. Data tersebut berjumlah 99 *event* gempa bumi yang tersebar di wilayah Maluku selatan. Hasil dari relokasi hiposenter menunjukkan persebaran hiposenter gempa banyak

terjadi di dekat patahan, dan zona subduksi lempeng, pergeseran episenter lebih terkumpul pada satu titik dan kedalaman hiposenter lebih tersebar didominasi antara 2-50 km.

Pada tahun 2018, N. Rande & Ulfiana melakukan penelitian tentang relokasi Hiposenter gempabumi wilayah Sulawesi tengah yang mengaplikasikan metode *double difference*. Jumlah *event* gempabumi yang digunakan sebanyak 207 *event*. Data tersebut diambil pada periode Januari hingga April 2018. Hasil relokasi Hiposenter gempabumi menghasilkan episenter gempabumi yang lebih terkonsen pada lokasi sesar dan subduksi lempeng. Menghasilkan jumlah episenter yang relatif lebih sedikit dibanding sebelum relokasi yaitu 142 kejadian periode bulan Januari hingga April 2018.

## **2.2 Kegempaan Daerah Lombok dan Sekitarnya**

Daerah Lombok dan Sekitarnya (Bali-NTB) merupakan salah satu daerah dengan tingkat kegempaan yang cukup aktif karena letaknya yang merupakan bagian dari busur sunda bagian timur. Secara tektonik, Busur kepulauan Bali dan Nusa Tenggara berada di antara zona tumbukan lempeng Indo-Australia dengan Eurasia di bagian selatan dan patahan naik busur belakang Bali-Flores di bagian utara (Sunardi, 2009). Beberapa kejadian gempabumi merusak telah terjadi akibat aktivitas kedua lajur sumber gempabumi ini. Daerah ini memiliki karakteristik gempabumi yang beruntun, dimulai dengan gempa pendahuluan, gempa utama dan selanjutnya diikuti oleh gempa-gempa susulan (Sulaiman, dkk., 2002).

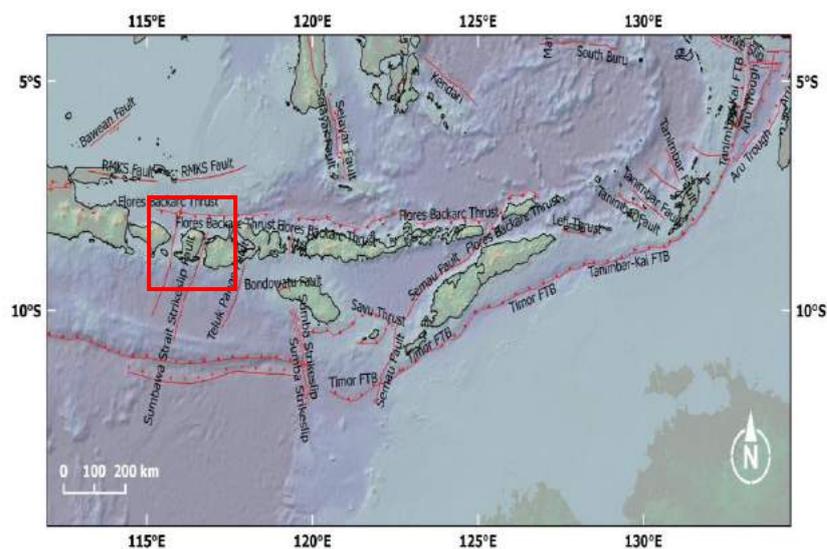
Pada kasus daerah Lombok dan Sekitarnya, kejadian gempabumi merusak dengan kekuatan diatas 6.0 magnitudo yang melanda wilayah ini tercatat pada :

- Juli 1856  
Gempa ini merupakan gempa tektonik pertama yang tercatat dalam sejarah literatur era kolonial pada tahun 1918. Gempa besar tersebut terjadi di daerah Lombok pada tahun 1856. Gempa ini memicu gelombang tsunami yang menghantam pesisir Ampenan di Mataram.
- Desember 1970  
Pada Desember 1970 Pulau Lombok diguncang dua gempa besar pada tanggal 21 dengan kekuatan 6.0 magnitudo dengan kedalaman 75 km dan tanggal 24 Desember dengan kekuatan 5.6 magnitudo kedalaman 70 km.
- Mei 1972  
Pada tanggal 28 Mei 1972 terjadi gempa merusak di Lombok dengan kekuatan 6.3 magnitudo dengan kedalaman 15 km.

- April 1978  
Gempabumi yang terjadi di Lombok pada tanggal 10 April 1978 memiliki kekuatan 6.7 magnitudo dengan kedalaman 19 km.
- Mei 1979  
Gempabumi yang terjadi di Lombok pada tanggal 30 Mei 1979 memiliki kekuatan 6.1 magnitudo dengan kedalaman 25 km.
- Januari 2000  
Pada tanggal 1 Januari tahun 2000, daerah Lombok dilanda gempa merusak dengan berkekuatan 6.1 magnitudo. Dampaknya 2000 rumah warga rusak parah akibat kejadian gempa ini.

### 2.3 Tatanan Tektonik Lombok dan Sekitarnya

Wilayah Lombok dan sekitarnya merupakan bagian dari Lempeng Eurasia. Lempeng ini bergerak dan berinteraksi secara konvergen dengan Lempeng Indo-Australia di bagian selatan. Hasil interaksi tersebut adalah Lempeng Indo-Australia yang mengalami subduksi akibat densitas batuan yang lebih tinggi. Subduksi ini menyebabkan terbentuknya sesar naik busur belakang di sepanjang utara Bali, Lombok, dan Flores yang disebut sebagai Sesar Flores (*Flores Back Arc Thrust*) (Silver et al., 1986). Tektonik aktif wilayah Lombok diperlihatkan pada **Gambar 1**.

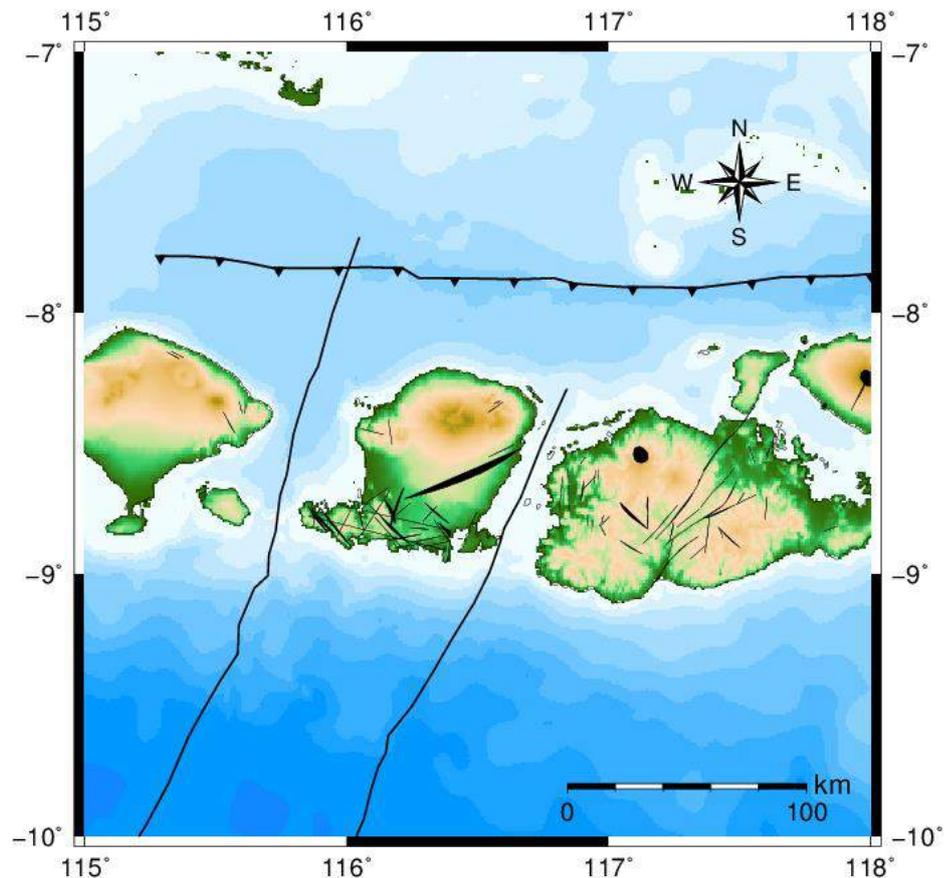


**Gambar 1.** Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda (Tim Pusat Gempabumi Nasional, 2017).

Seismisitas di daerah Lombok dan sekitarnya didominasi oleh gempa dangkal yang disebabkan oleh Sesar Flores. Estimasi kemiringan dari sesar ini berkisar

antara  $10^{\circ}$  hingga  $30^{\circ}$  ke arah selatan berdasarkan solusi mekanisme fokus untuk data gempabumi segmen Sesar Flores pada daerah Cekungan Bali (MacCaffrey & Nabelek, 1987).

Selain Sesar Flores, di sekitar Lombok terdapat juga sesar geser di sisi timur yang berada di antara Pulau Lombok dan Pulau Sumbawa, serta di sisi barat yang berada diantara Bali dan Pulau Lombok (Tim Pusat Gempabumi Nasional, 2017).



**Gambar 2.** Penggambaran sesar pada daerah Lombok dan sekitarnya. Terdapat Sesar Naik Flores di sebelah Utara Pulau Lombok, serta Sesar geser di sebelah Timur dan Barat Pulau Lombok. (Tim Pusat Gempabumi Nasional, 2017).

Secara geologi Pulau Lombok mempunyai batuan yang tergolong relatif muda, didominasi oleh batuan gunung api: breksi vulkanik, lava dan batupasir. Batuan yang tertua di Pulau Lombok adalah batuan dari Formasi Pengulung dan Kawangan, berumur Oligosen yang terbentuk dari kegiatan gunungapi bawah laut akibat adanya gejala tektonik. Gejala tektonik ini menyebabkan sesar normal dan sesar geser jurus yang berarah barat laut-tenggara. Selain sesar atau kelurusan, kekar juga banyak dijumpai di Pulau Lombok (Agustawijaya, dkk., 2006).

Formasi Pengulung dan Formasi Kawangan berada di bagian selatan Pulau Lombok, yang secara tektonik berada di bagian depan (*fore arc*). Di beberapa tempat batuan breksi vulkanik dan batupasir dari Formasi Pengulung dan Formasi Kawangan ini diterobos oleh batuan beku basal. Sedangkan di bagian utara Pulau Lombok, yaitu di sekitar Gunungapi Rinjani, batuan terdiri dari batuan gunungapi bersifat lepas dan berumur Kuartar. Lapisan batuan ini adalah cukup tebal, dan menutupi hampir dua per tiga bagian Pulau Lombok. Bagian utara ini secara tektonik termasuk ke dalam bagian tengah (*volcanic arc*). Hal ini berhubungan dengan kegempaan, dikarenakan batuan-batuan ini memberi andil kepada potensi bencana, terutama dalam merambatkan getaran gempa (Agustawijaya dan Syamsuddin, 2009). USGS (Anonim, 2005) menyebutkan bahwa penyebab kerusakan akibat gempa adalah terutama getaran. Intensitas getaran yang dialami oleh sebuah struktur bangunan adalah fungsi dari tiga faktor: kekuatan gempa, jarak terhadap sesar, dan jenis material penyusun bumi (Anonim, 2005).

Secara fisiografi, Pulau Lombok termasuk dalam Busur Gunungapi Nusa Tenggara yang merupakan bagian dari Busur Sunda sebelah timur dan Busur Banda Dalam Gunungapi sebelah barat. Secara stratigrafi, satuan batuan terdiri dari batuan gunungapi, batuan sedimen dan batuan terobosan yang umurnya berkisar dari Tersier sampai Kuartar. Struktur geologi yang terdapat di Pulau Lombok berupa sesar normal dan sesar mendatar yang umumnya berarah barat laut-tenggara. Gejala tektonika paling tua terjadi pada Oligosen hingga Meosen Awal dengan diikuti oleh kegiatan gunungapi bawah laut bersusunan andesit-basal yang menghasilkan sedimen gunungapi Formasi Pengulung dan Kawangan. Hal ini diduga akibat penunjaman Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia. Pada Akhir Tersier atau Awal Kuartar terjadi kegiatan tektonika yang menimbulkan sesar mendatar dan sesar normal (Sulaeman, dkk., 2019).

Ketebalan lapisan batuan dan tanah di Pulau Lombok bervariasi dari sekitar 2 m hingga >25 m. Jenis tanah didominasi oleh tanah pasir lanauan, terutama untuk ketebalan 2 m. Sedangkan untuk ketebalan lapisan tanah mulai dari 5 m hingga >25 m, jenis tanah yang dijumpai adalah pasir lepas. Lapisan tanah pasir merupakan akuifer yang baik, sehingga mempunyai potensi pelulukan jika terjadi gempa. Khusus di sekitar Gunungapi Rinjani, batuan yang berada disini adalah batuan sedimen lepas hasil letusan gunungapi. Material batuan berupa kerikil, lapili, dan bom, bersifat mudah lepas. Tanah penutup adalah pasir batupung dengan ketebalan sekitar 2 m. Tanah inipun bersifat lepas. Pulau Lombok mempunyai potensi bencana yang cukup tinggi. Hal ini didasarkan pada kondisi tanah yang bersifat lepas, tebal, mempunyai akuifer,

kondisi geologi struktur kekar dan sesar, serta di bagian utara pulau adalah merupakan kompleks gunungapi yang mempunyai batuan sedimen tidak kompak dan mudah lepas (Agustawijaya & Syamsuddin, 2009).

Berikut merupakan kelompok batuan yang ada di Pulau Lombok (Wafid, Agung., dkk., 2014).

#### Kelompok Endapan Aluvium

Merupakan endapan sungai, pantai dan rawa, terdiri dari pasir lanauan, lanau pasiran – lanau lempungan dan pasir lepas. Endapan rawa berupa lanau pasiran – lanau lempungan, berwarna abu-abu kehitaman, berbutir halus – sedang, sangat lunak – agak teguh, porositas sedang – tinggi. Endapan sungai berupa Lanau pasiran – lanau lempungan dan pasir lepas. Lanau pasiran – lanau lempungan, berwarna kuning kecoklatan – coklat, berbutir halus – sedang, mengandung kerikil, sangat lunak – padat, plastisitas rendah-sedang, tebal 3.50 – 6.50 m. Endapan pantai berupa pasir, berwarna abu-abu kehitaman, berbutir halus, porositas tinggi, mengandung cangkang kerang.

#### Kelompok Batuan Gunungapi Tak Terpisahkan

Merupakan hasil kegiatan Gunung api Pusuk (Qhvp), Nangi (Qhvn) dan Rinjani (Qhvr), terdiri dari lava, breksi dan tufa. Lava, berwarna abu abu kehitaman, keras, menunjukkan struktur skoria, kadang – kadang dijumpai sebagai batuguling dan pada tebing tebing terjal dijumpai kekar. Breksi, berwarna abu abu kehitaman, menyudut, fragmen andesit, keras dan kompak. Tufa, berwarna putih kekuningan, mudah hancur, berukuran pasir halus hingga sangat kasar dan dijumpai fragmen batu apung. Tanah pelapukan berupa lanau pasiran – pasir lanauan berwarna coklat kekuningan – coklat keabuan, halus – sedang, agak teguh – teguh, keadaan kering sangat teguh, plastisitas rendah, uji penetrometer saku 2.00 – 2.75 kg/cm<sup>2</sup>, tebal 1.50 – 4.50 m.

#### Kelompok Tufa Batu Apung

Merupakan batuan Vulkanik Kwartir dari Formasi Lekopiko (Qvl), terdiri dari tufa batu apung, breksi lahar dan lava. Tufa batu apung berwarna putih kekuningan, kurang kompak berukuran halus hingga kasar, mudah lulus air. Breksi lahar, berwarna abu – abu kehitaman, fragmen batuan beku andesit, menyudut, kurang kompak. Lava, berwarna abu-abu muda – kehitaman, velsikuler, berstruktur aliran, kompak dan keras. Tanah pelapukan berupa lanau pasiran – lanau lempungan, berwarna coklat kekuningan – coklat kemerahan, lunak – agak lepas, plastisitas rendah – non plastis, ketebalan tanah 1.50 – 3.50 m.

### Kelompok Breksi dan Lava

Merupakan bautan vulkanik hasil kegiatan gunungapi pada masa Plioplistosen dan Oligo-Miosen yang termasuk dalam formasi Kalibabak (TQb), Formasi Kalipalung (TQp) dan Formasi Pengulung (Tomp). Formasi Kalibabak (TQb) terdiri dari breksi dan lava. Breksi, berwarna abu-abu kecoklatan, fragmen batuan beku andesit dengan ukuran kerikil hingga bongkah, menyudut, pemilahan buruk, kompak, keras. Lava, berwarna abu-abu kehitaman, bersusunan andesit-basal, keras dan kompak. Tanah pelapukan berupa lempung lanauan-lempung pasiran dan pasir lanauan – pasir. Lempung lanauan – lempung pasiran, berwarna abu-abu, halus, lengket, lunak-agak teguh, plastisitas tinggi. Tebal 3 – 4 meter. Pasir lanauan – pasir, berwarna abu-abu kehitaman – coklat kehitaman, halus – kasar, lunak – agak lepas, porositas sedang – tinggi, tebal 1.50 – 3.50 m.

Formasi Kalipalung (TQp). Formasi Kalipalung terdiri dari perselingan antara breksi gampingan dan lava. Breksi gampingan, berwarna abu-abu, fragmen terdiri dari batuan beku andesit-basalt dengan ukuran kerikil hingga bongkah, masa dasarnya berupa tufa gampingan, semen karbonat, keras dan kompak. Lava, berwarna abu-abu kehitaman, bersusunan andesit-basal, kompak dan keras. Tanah pelapukan umumnya berupa lanau pasiran – pasir lanauan dan lempung lanauan – lempung pasiran. Lanau pasiran – pasir lanauan, berwarna abu-abu kehitaman, lunak – teguh, keadaan kering mudah pecah, plastisitas rendah – sedang, mengandung kerikil, tebal tanah 3.00 – 5.25 meter.

Formasi Pengulung (Tomp). Formasi Pengulung terdiri dari breksi lahar, lava dan tufa. Breksi lahar berwarna abu-abu kehitaman, fragmen batuan beku andesit, keras – agak rapuh. Lava berwarna abu-abu kehitaman, kompak, keras. Tufa, berwarna abu-abu muda hingga kehijauan, setempat mengandung pirit, rapuh. Tanah pelapukan berupa lempung lanauan – lempung pasiran, berwarna coklat kekuningan – coklat kemerahan, lunak – agak teguh, plastisitas sedang – tinggi, tebal tanah 3.00 – 3.75 m.

### Kelompok Batu Gamping

Merupakan batuan dari Formasi Ekas (Tme), terdiri dari batu gamping pasiran, batu gamping kristalin dan batu gamping terumbu, yang berumur Miosen Atas. Secara umum batu gamping berwarna putih kekuningan – putih keabuan, kompak, keras, setempat terdapat rongga dan terkekarkan. Tanah pelapukan berupa lempung pasiran, berwarna kuning kemerahan, agak gembur, sarang dan sedikit mengandung fragmen batu gamping berukuran kerikil – kerakal.

### Kelompok Batu Pasir

Merupakan batuan sedimen dari Formasi Kawangan (Tomk), terdiri dari perselingan batu pasir, batu lempung dan breksi. Batu pasir berwarna abu-abu kekuningan, berbutir halus – kasar, terpilah sedang, membulat – membulat tanggung, agak rapuh. Batu lempung, berwarna kuning kehijauan sampai abu-abu tua, rapuh dan mudah hancur. Breksi berwarna abu-abu kehitaman, fragmen batuan beku andesit, menyudut, keras, setempat dijumpai sisipan tufa dan batu lempung. Tanah pelapukannya berupa lanau pasiran merupakan hasil pelapukan lanjut dari batu pasir kuarsa dan breksi. Lanau pasiran berwarna merah kehitaman, lunak – agak teguh, ketebalan tanah antara 1.00 – 1.50 meter.

### Kelompok Batuan Beku

Merupakan batuan terobosan (Tmi), terdiri dari batuan beku dasit dan basalt. Dasir, berwarna abu-abu muda, bertekstur afanitik hingga porfiritik, keras. Basalt, berwarna abu-abu tua hingga kehitaman, bertekstur halus dengan masa dasar gelas dan bervesikuler, keras. Tanah pelapukannya berupa lempung lanauan, coklat kemerahan, agak teguh – teguh, plastisitas rendah sampai sedang, tebal tanah kurang dari 1.00 m.

## 2.4 Gempabumi

Gempabumi adalah peristiwa pelepasan energi secara tiba-tiba yang merupakan salah satu sumber yang dapat menimbulkan terjadinya penjalaran gelombang seismik. Seismolog Amerika, *Reid*, mengemukakan teori *elastic rebound*. Teori ini menyatakan, bahwa gempabumi merupakan gejala alam yang disebabkan oleh pelepasan energi regangan elastis batuan akibat akumulasi energi dari peristiwa tekanan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada kulit bumi yang terus-menerus.

Gempabumi dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber penyebab terjadinya (Ibrahim dan Subardjo, 2004).

1. Gempabumi runtuh (*Collapse Earthquake*) adalah gempabumi yang disebabkan oleh runtuhnya lubang-lubang di dalam bumi, seperti gua, tambang dan sebagainya.
2. Gempabumi vulkanik (*Volcanic Earthquake*) adalah gempabumi yang berasal dari gerakan magma karena aktivitas gunung api.
3. Gempabumi tektonik (*Tectonic Earthquake*) adalah gempabumi yang disebabkan oleh aktifitas sesar karena perlipatan kerak bumi, pembentukan pegunungan dan sebagainya. Gempabumi tektonik ini merupakan gempabumi yang signifikan terjadi di bumi secara menyeluruh.

4. Gempabumi bumi buatan, yaitu gempabumi yang terjadi karena dibuat oleh manusia, seperti ledakan dinamit atau ledakan nuklir.

Berdasarkan kedalaman sumber gempabumi, gempabumi dikelompokkan (Subardjo dan Ibrahim, 2004) menjadi 3, yaitu :

1. Gempabumi dangkal (kedalaman 0 – 60 km)
2. Gempabumi menengah (kedalaman 61 – 300 km)
3. Gempabumi dalam (kedalaman >300 km)

Berdasarkan kekuatan gempa, gempabumi diklasifikasikan menjadi 5 (Subardjo dan Ibrahim, 2004), yaitu :

1. Gempa sangat besar ( $M > 8.0$ )
2. Gempa besar ( $7.0 < M < 8.0$ )
3. Gempa sedang ( $4.5 < M < 7.0$ )
4. Gempa mikro ( $1.0 < M < 4.5$ )
5. Gempa ultra mikro ( $M < 1.0$ )

Berdasarkan pengelompokkan Mogi, pola umum terjadinya gempabumi dibedakan dalam 3 jenis (Subardjo dan Ibrahim, 2004), yaitu :

1. Tipe I, yaitu terjadinya gempabumi utama (*main shock*) tanpa diawali gempa pendahuluan (*fore shock*), namun diikuti dengan banyak gempabumi susulan (*after shock*). Gempabumi tipe ini merupakan gempabumi yang paling umum terjadi.
2. Tipe II, yaitu terjadinya gempabumi utama (*main shock*) yang diawali oleh gempa-gempa pendahuluan (*fore shock*) dan kemudian diikuti oleh gempa susulan (*after shock*) yang berjumlah cukup banyak.
3. Tipe III, yaitu gempabumi yang terjadi tanpa adanya gempabumi utama (*main shock*), biasa disebut gempabumi “swarm”.

## 2.5 Parameter Gempabumi

Ada beberapa parameter gempabumi yang dianalisis berdasarkan BMKG, yaitu :

1. Waktu Asal Kejadian (*Origin Time*)
2. Episenter
3. Hiposenter
4. Magnitudo

### **Waktu Asal Kejadian (*Origin Time*)**

Waktu asal gempa bumi atau *origin time* adalah waktu suatu gempa bumi terjadi di sumbernya pada kedalaman tertentu di lapisan bumi. Pada waktu tersebut akumulasi tegangan (*stress*) terlepas dalam bentuk penjalaran gelombang gempa bumi. Waktu asal dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*).

### **Episenter**

Episenter adalah titik di permukaan bumi yang merupakan refleksi tegak lurus dari hiposenter atau fokus gempa bumi. Kedalaman sumber gempa bumi adalah jarak hiposenter dihitung tegak lurus dari permukaan bumi dalam satuan km.

### **Hiposenter**

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

**Penentuan Lokasi Hiposenter.** Pada penentuan lokasi hiposenter melibatkan suatu proses inversi untuk mencari suatu lokasi hiposenter yang memiliki nilai error minimum antara waktu tempuh observasi dengan waktu tempuh kalkulasi. Proses ini merupakan upaya untuk mendapatkan informasi sifat fisis bawah permukaan bumi berdasarkan respons dan informasi rekaman gempa di permukaan.

Lokasi gempa didefinisikan dengan lokasi hiposenter gempa ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) dan waktu asal  $t_0$ . Hiposenter adalah lokasi fisik dari sumber gempa, biasanya diberikan dalam *longitude* ( $X_0$ ), *latitude* ( $Y_0$ ), dan kedalaman di bawah permukaan ( $Z_0$ ). Saat hiposenter dan waktu asal ditentukan oleh waktu kedatangan fase seismik dimulai oleh gempa pertama, lokasi akan dihitung sesuai dengan titik di mana gempa dimulai.

**Metode Geiger.** Metode Geiger adalah proses penentuan lokasi hiposenter gempa bumi berdasarkan kuadrat terkecil. Lokasi gempa bumi didefinisikan dengan lokal hiposenter gempa bumi ( $x_0, y_0, z_0$ ) dan waktu asal  $t_0$ . Hiposenter adalah lokasi fisik dari sumber gempa bumi, biasanya diberikan dalam *longitude* ( $x_0$ ), *latitude* ( $y_0$ ), dan kedalaman di bawah permukaan ( $z_0$ ). Residu waktu tempuh merupakan waktu tempuh hasil observasi terhadap waktu tempuh perhitungan. Indeks  $i$  menunjukkan data dari stasiun ke- $i$ . Waktu didapat dari waktu tiba di stasiun ke-1 dikurangi waktu asal (*origin time*) gempa bumi. Waktu tempuh

kalkulasi dapat dihitung berdasarkan model kecepatan 1D bawah permukaan. Secara matematis dirumuskan sebagai persamaan 1:

$$r_i = T_i^{obs} - T_i^{cal} \quad (1)$$

Kenyataan bahwa struktur bawah permukaan yang kompleks mengakibatkan sulitnya menentukan model kecepatan yang sama dengan keadaan sebenarnya, maka persamaan (1) adalah persamaan non-linear. Sehingga persamaan tersebut dilinearkan dengan ekspansi deret Taylor orde pertama.

$$dr_i = \frac{\partial T_i}{\partial x} dx + \frac{\partial T_i}{\partial y} dy + \frac{\partial T_i}{\partial z} dz + dt \quad (2)$$

Dimana,

r : residual

t : waktu asal

T : waktu tempuh gelombang

i : indeks stasiun pengamatan

$x_0, y_0, z_0$  : lokasi hiposenter

Persamaan (2) disusun ke dalam bentuk matriks dengan data dari sejumlah stasiun pengamat (persamaan 3, 4, 5).

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_i}{\partial x} & \frac{\partial T_i}{\partial y} & \frac{\partial T_i}{\partial z} & \frac{\partial T_i}{\partial t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial T_n}{\partial x} & \frac{\partial T_n}{\partial y} & \frac{\partial T_n}{\partial z} & \frac{\partial T_n}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\partial x = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$r = \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ \dots \\ rn \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[A]\partial x = dri \quad (6)$$

Matriks [A] berukuran N x 4. Matriks r berukuran N x 1. N adalah jumlah stasiun pengamat. Matriks r berisi residual waktu tempuh tiap stasiun. Matriks  $\partial x$  berukuran 4 x 1 dan berisi vector peturbasi atau perubahan parameter hiposenter terhadap parameter awal atau parameter dugaan.

Persamaan matriks diselesaikan dengan metode inversi nonlinear dan optimasi *least square*. Berdasarkan solusi persamaan matriks, didapat perbaikan lokasi hiposenter.

$$x_i = x_0 + dx \quad (7)$$

$$y_i = y_0 + dy \quad (8)$$

$$z_i = z_0 + dz \quad (9)$$

$$t_i = t_0 + dt \quad (10)$$

Perbaikan posisi hiposenter akan terus dilakukan dengan melakukan iterasi hingga residual waktu tempuh observasi dan kalkulasi mendekati nol.

**Metode Double Difference.** Waldhauser & Ellsworth (2000) menjelaskan, metode *double difference* merupakan salah satu teknik relokasi gempa bumi yang menggunakan data katalog gempa serta data korelasi silang, namun bisa digunakan salah satu atau keduanya. Metode *double difference* (DD) didasari pada asumsi bahwa jika terdapat dua pusat gempa (gempa berpasangan) dengan jarak yang lebih kecil dibandingkan dengan jarak antara dua pusat gempa ke stasiun perekam, maka *raypath* dan *waveform* kedua gempa ini bisa dianggap mirip. Selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terekam pada stasiun yang sama dianggap sebagai fungsi jarak antar kedua pusat gempa, sehingga dapat meminimalkan kesalahan model kecepatan tanpa menggunakan koreksi stasiun.

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (11)$$

Dengan  $i$  dan  $j$  menunjukkan indeks dua hiposenter yang berdekatan, dan  $k$  adalah indeks stasiun perekam untuk dua hiposenter yang berdekatan. Persamaan (11) dapat dilinearisasikan dengan deret Taylor orde pertama sebagai berikut.

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j \quad (12)$$

Dengan  $x, y, z$  menunjukkan posisi hiposenter dalam koordinat kartesian, dan  $\tau$  menunjukkan waktu, dan indeks  $ij$  untuk dua hiposenter yang berdekatan, dan untuk indeks  $k$  adalah stasiun pengamat untuk dua hiposenter yang berdekatan. Jika persamaan (12) dibentuk dalam matriks, maka penyusunan matriksnya adalah sebagai berikut.

$$[G] = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_k^1}{\partial x} & \frac{\partial T_k^1}{\partial y} & \frac{\partial T_k^1}{\partial z} & 1 & -\frac{\partial T_k^2}{\partial x} & -\frac{\partial T_k^2}{\partial y} & -\frac{\partial T_k^2}{\partial z} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial T_k^1}{\partial x} & \frac{\partial T_k^1}{\partial y} & \frac{\partial T_k^1}{\partial z} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial T_k^3}{\partial x} & -\frac{\partial T_k^3}{\partial y} & -\frac{\partial T_k^3}{\partial z} & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial T_k^{n-1}}{\partial x} & \frac{\partial T_k^{n-1}}{\partial y} & \frac{\partial T_k^{n-1}}{\partial z} & 1 & -\frac{\partial T_k^n}{\partial x} & -\frac{\partial T_k^n}{\partial y} & -\frac{\partial T_k^n}{\partial z} & -1 \end{bmatrix}$$

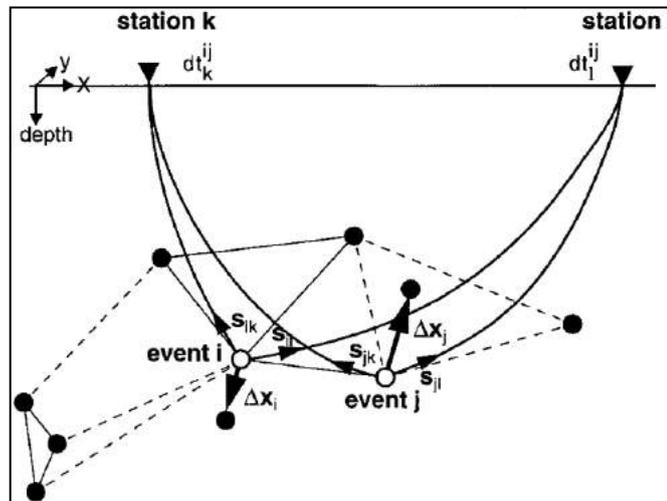
$$[m]^T = [dx^1 dy^1 dz^1 d\tau^1 \dots dx^n dy^n dz^n d\tau^n]^T$$

$$[d]^T = [dr_k^{12} dr_k^{13} \dots dr_k^{ij}]^T \quad (13)$$

Dengan menggabungkan persamaan (13) untuk semua pasangan hiposenter pada semua stasiun pengamat dalam satu *cluster* maka bentuk linier matriks  $DD$  adalah

$$WGm = Wd \quad (14)$$

Matriks  $G$  mengandung turunan parsial parameter hiposenter,  $W$  adalah matriks diagonal untuk pembobotan di tiap persamaan,  $m$  berisi data vektor perturbasi parameter setiap hiposenter pada satu *cluster*. Dan  $d$  berisi data waktu tempuh residual untuk setiap pasangan gempa yang terekam pada satu stasiun.



**Gambar 3.** Ilustrasi dari Algoritma Relokasi Gempa *Double Difference*.

Gambar 3 menunjukkan ilustrasi algoritma metode  $DD$ , dimana lingkaran hitam dan putih merupakan hiposenter uji yang dihubungkan dengan gempa disekitarnya dengan menggunakan data korelasi silang (garis utuh) dan data katalog (garis putus-putus). Notasi  $s$  adalah vektor *slowness*,  $\Delta x$  adalah vektor perubahan *event*  $i$  dan  $j$ , dan  $dt$  adalah selisih waktu tempuh antara *event*  $i$  dan  $j$  pada masing-masing stasiun  $k$  dan  $l$ .

## Magnitudo

Kekuatan gempabumi atau magnitudo adalah ukuran kekuatan gempabumi yang menggambarkan besarnya energi yang terlepas pada saat gempabumi terjadi dan hasil pengamatan seismograf. Richter memperkenalkan konsep magnitudo (kekuatan gempabumi di sumbernya) secara umum dengan satuan skala richter. Terdapat empat jenis magnitudo yang umum digunakan, yaitu Magnitude Local ( $M_L$ ), Magnitude Bodi ( $M_b$ ), Magnitudo Permukaan ( $M_s$ ), dan Magnitude Momen ( $M_w$ ).

**Magnitudo Lokal ( $M_L$ ).** Magnitudo Lokal ( $M_L$ ) pertama kali diperkenalkan oleh Richter di awal tahun 1930-an dengan menggunakan data kejadian gempabumi di daerah California yang direkam oleh Seismograf Woods-Anderson. Menurutnya dengan mengetahui jarak episenter ke seismograf dan mengukur amplitudo maksimum dari sinyal yang tercatat di seismograf maka dapat dilakukan pendekatan untuk mengetahui besarnya gempabumi yang terjadi.  $M_L$  mempunyai standar episenter 100 km. Jadi untuk mengatasi gempa yang mempunyai episenter kurang dari atau lebih dari 100 km digunakan sistem nomograph untuk menormalisasi amplitudo bumi dekat atau jauh dari 100 km berdasarkan atenuasi energi seismik di kalifornia.

**Magnitudo Bodi ( $M_b$ ).** Terbatasnya penggunaan magnitudo lokal untuk jarak tertentu membuat dikembangkannya tipe magnitudo yang bisa digunakan secara luas. Salah satunya adalah  $M_b$  atau magnitudo bodi (*Body-wave Magnitude*). Magnitudo ini didefinisikan berdasarkan catatan amplitudo dari gelombang P yang menjalar melalui bagian dalam bumi. Secara umum dirumuskan dengan persamaan :

$$m_b = \log (a/T) + Q (h,D) \quad (15)$$

Dengan : a = amplitudo getaran (mm)

T = periode getaran

Q (h,D) = koreksi jarak D dan kedalaman h yang didapatkan dari pendekatan empiris. Selain terdapat  $m_b$  ada juga yang disebut  $m_B$ ,  $m_B$  digunakan untuk periode panjang sedangkan  $m_b$  untuk periode pendek.

**Magnitudo Bodi ( $M_s$ ).** Selain magnitudo bodi dikembangkan pula  $M_s$ , Magnitudo permukaan (*Surface-wave Magnitude*). Magnitudo tipe ini didapatkan sebagai hasil pengukuran terhadap gelombang permukaan (surface waves). Untuk jarak  $D > 600$  km seismogram periode panjang (*long-period seismogram*) dari gempabumi dangkal didominasi oleh gelombang permukaan. Gelombang ini biasanya mempunyai periode sekitar 20 detik. Magnitudo ini juga akan

mengalami saturasi pada gempa yang mempunyai kekuatan diatas 8 skala richter. Amplitudo gelombang permukaan sangat tergantung pada jarak D dan kedalaman sumber gempa h. Gempabumi dalam tidak menghasilkan gelombang permukaan, karena itu persamaan persamaan Ms tidak memerlukan koreksi kedalaman. Magnitudo permukaan memiliki bentuk rumus sebagai berikut.

$$M_s = \log a + a \log D + b \quad (16)$$

Dengan : a = amplitudo maksimum dari pergeseran tanah horisontal pada periode 20 detik

D = Jarak (km), (a dan b adalah koefisien dan konstanta yang didapatkan dengan pendekatan empiris. Persamaan ini digunakan hanya untuk gempa dengan kedalaman sekitar 60 km).

$$M_b = 2.5 + 0.63 M_s \text{ atau } M_s = 1.59 m_b - 3.97 \quad (17)$$

**Magnitudo Momen ( $M_w$ ).** Momen seismik dapat diestimasi dari dimensi pergeseran bidang sesar atau analisis karakteristik gelombang gempabumi yang direkam di stasiun pencatat khususnya dengan seismograf periode bebas (*broadband seismograph*)

$$M_o = \mu D A \quad (18)$$

Dengan :  $M_o$  = Momen seismik,

$\mu$  = Rigiditas,

D = Pergeseran rata-rata bidang sesar,

A = Area sesar.

Secara empiris hubungan antara momen seismik dan magnitudo permukaan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\log M_o = 1.5 M_s + 16.1 \quad (19)$$

Kanamori (1997) dan Lay. T Wallace. T. C. (1995) memperkenalkan magnitudo momen yaitu suatu tipe magnitudo yang berkaitan dengan momen seismik namun tidak bergantung dari besarnya magnitudo permukaan.

$$M_w = (\log M_o / 1.5) - 10.73 \quad (20)$$

Dengan :  $M_w$  = Magnitudo momen

$M_o$  = Momen Seismik

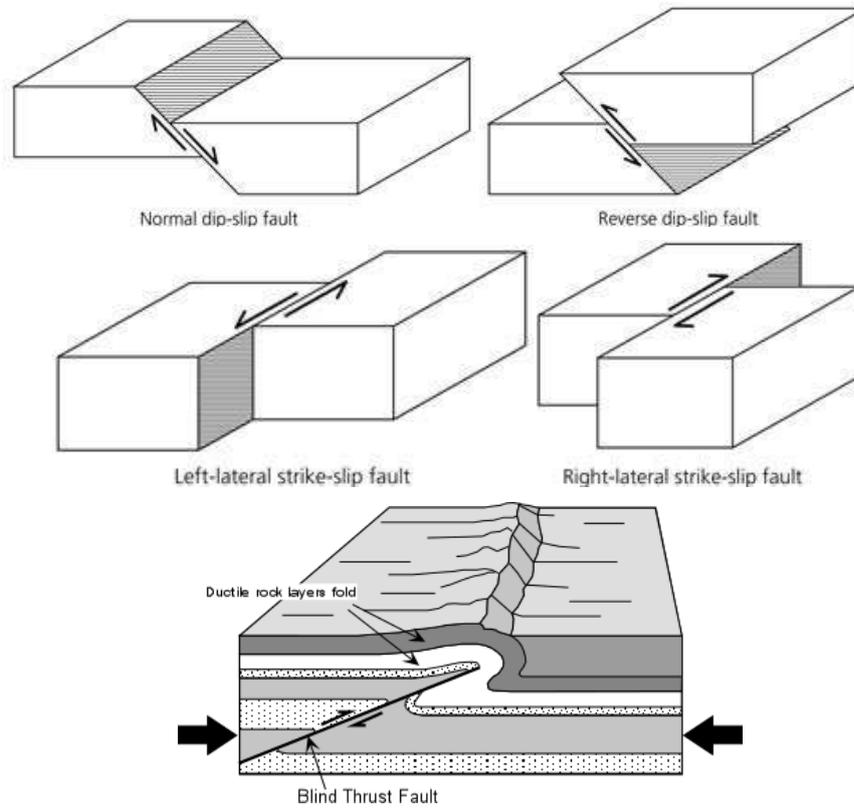
Meskipun dapat menyatakan jumlah energi yang dilepaskan di sumber gempabumi dengan lebih akurat, namun pengukuran magnitudo momen lebih kompleks dibandingkan pengukuran magnitudo  $M_L$ ,  $M_s$  dan  $m_b$ . Karena itu penggunaannya lebih sedikit dibandingkan penggunaan ketiga magnitudo lainnya.

## 2.6 Patahan

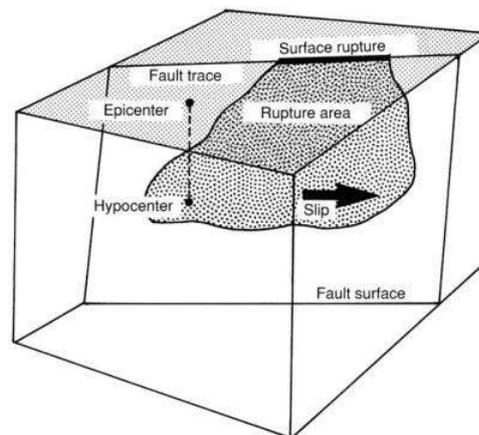
Sesar atau patahan (*Fault*) adalah bidang batas antara dua fraksi kulit bumi yang mengalami gerakan relatif, biasanya merupakan daerah yang relatif lemah, mengalami retakan atau terdapat celah. Dampak gempabumi yang terjadi dipengaruhi oleh pergerakan model gerak relatif batuan yang terjadi di sekitar sesar tersebut.

Terdapat berbagai jenis patahan, yang secara sederhana dapat dikelompokkan menurut sifat pergeserannya pada bidang patahan (Gambar 4), yaitu patahan yang bergeser searah kemiringan bidang patahan (*dip-slip faults*) dan patahan yang bergeser searah jurus bidang patahan (*strike-slip faults*). *Dip-slip faults* dapat dibedakan menjadi patahan turun (normal) bila blok batuan di atas bidang patahan bergerak turun, dan patahan naik (anjak) bila blok batuan di atas bidang patahan bergerak naik. Demikian pula dengan *strike-slip faults*, dapat dibedakan menjadi patahan sinistral bila blok batuan sebelah kiri bergerak mendekati, dan patahan dekstral bila blok batuan sebelah kanan bergerak mendekati.

Patahan bukanlah suatu bidang datar yang sederhana, yang dengan cepat bergeser bila terkena gaya. Kompleksitas geometri bidang patahan serta jenis batuan yang dipatahkan akan membuat patahan cenderung terkunci dan tidak mudah untuk bergerak. Gaya *stress* harus ditimbun dalam waktu yang lama hingga energi potensial tersimpan cukup besar untuk memulai pergeseran. Pergerakan (*rupture*) terjadi pertama kali pada titik lemah pada bidang patahan dan kemudian merambat secara cepat di sepanjang bidang patahan tersebut (Gambar 4). Energi potensial yang tersimpan pun dilepaskan sebagai gelombang seismik yang merambat ke segala arah, fenomena yang dikenal sebagai gempabumi. Titik awal mula pergeseran patahan disebut sebagai hiposentrum (*focus*). Titik pada permukaan bumi ketika hiposentrum diproyeksikan ke atas disebut episentrum.



**Gambar 4.** Jenis-jenis Patahan : Termasuk Contoh Patahan Tertutup (*Blind Fault*) Jenis Sesar Anjak (Diagram Paling Bawah) (Husein, S., 2016).



**Gambar 5.** Diagram Bidang Patahan dan Terbentuknya Gempabumi (Abott, 2004).

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pusat Gempabumi dan Tsunami, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) pusat pada 4 November 2019 hingga 14 Januari 2020 yang beralamat di Jl. Angkasa 1 No. 2, RW.10, Gn. Sahari Sel., Kec. Kemayoran, Kota Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10610.

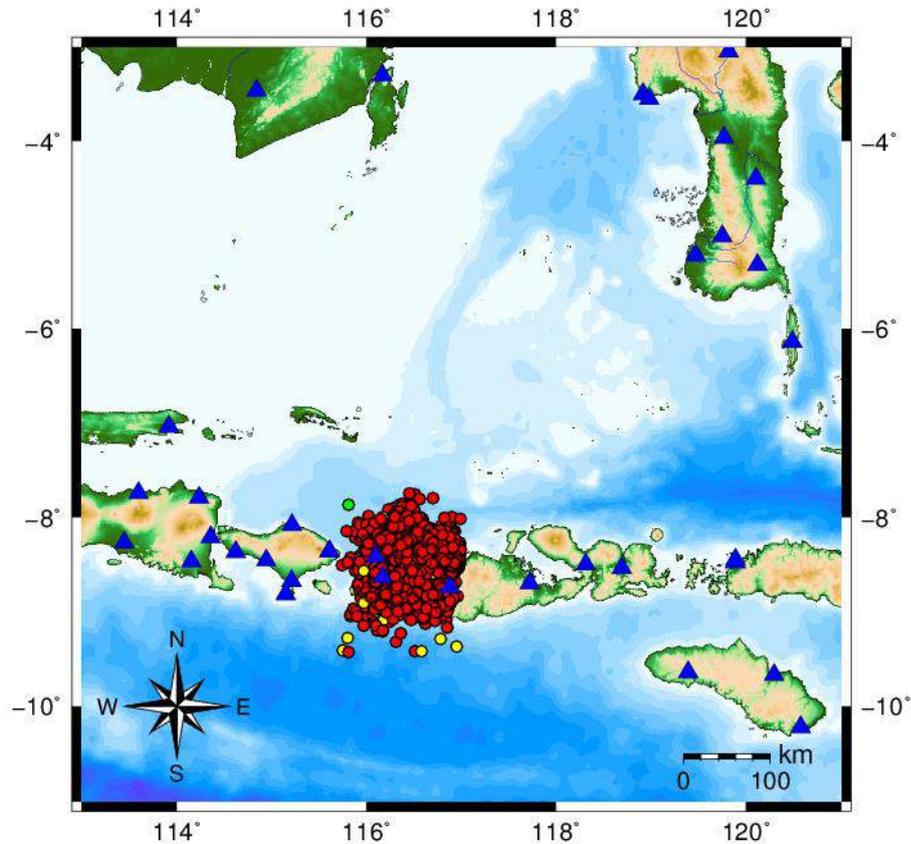
Dengan jadwal pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut :

**Tabel 1.** Rincian Kegiatan Penelitian

No	Agenda Kegiatan	Nov	Des	Jan	Mar	Jul	Agu	Feb	Jun	
1	Studi Literatur	■								
2	Pengolahan Data	■								
3	Seminar Hasil							■		
4	Penulisan Laporan Akhir			■						
5	Ujian Skripsi								■	

#### 3.2 Data

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data *arrival time* dari katalog BMKG untuk gempabumi daerah Lombok dan sekitarnya periode 1 Juli hingga 31 Desember 2018 dengan batasan koordinat daerah penelitian  $7^{\circ}$  LS hingga  $10^{\circ}$  LS serta  $115^{\circ}$  BT hingga  $118^{\circ}$  BT. Data gempa awal yang digunakan berjumlah 2457 kejadian. Kejadian-kejadian gempa tersebut direkam oleh beberapa stasiun terdekat yang cenderung berada di bagian timur dan barat dari daerah penelitian. Data stasiun yang digunakan merupakan data stasiun seismik yang tidak hanya di daerah penelitian, tetapi data stasiun menyeluruh yang tersebar di seluruh dunia.



**Gambar 6.** Peta Persebaran Stasiun Perekam Terhadap Daerah Penelitian.

### 3.3 Software

Berikut beberapa *software* yang digunakan pada penelitian ini:

1. Python, digunakan untuk mengkonversi data katalog gempa BMKG ke dalam format .pha.
2. Ph2dt, untuk membuat data diferensial yang akan digunakan sebagai input pada program HypoDD.
3. HypoDD (*Hypocenter Double Difference*), digunakan untuk proses relokasi data gempabumi metode *double difference*.
4. *Generic Mapping Tools*, digunakan untuk membuat peta sebaran gempabumi.
5. *Matlab*, digunakan untuk membuat diagram kompas dan diagram rose.
6. *Microsoft Excel 2007*, digunakan untuk sortir data dan membuat histogram residual waktu tempuh.

### 3.4 Model Kecepatan Awal

Model kecepatan awal yang digunakan diambil dari model kecepatan untuk relokasi gempabumi di Jawa Tengah (Sunardi, et al., 2012), yang merupakan gabungan dari hasil penelitian model kecepatan lokal Jawa Tengah

(Wagner et al., 2007) untuk kedalaman hingga 20 km dan model kecepatan AK135 (Kennet, Engdahl, & Buland, 1995) untuk lapisan kedalaman lebih dari 20 km.

**Tabel 2.** Referensi Model Kecepatan Awal yang Digunakan. (Kennett et al., 1995; Wagner et al., 2007).

<b>Kedalaman (km)</b>	<b>Kecepatan (km/s)</b>
5	5
10	6
15	6.75
25	7.11
35	7.24
45	7.37
60	7.6

### 3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu tahap *preprocessing*, tahap relokasi, *plotting* persebaran gempabumi, plot histogram residual dan plot diagram pergeseran.

#### Tahap Preprocessing

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dan seleksi terhadap data gempabumi dengan sejumlah input parameter pada program ph2dt untuk membentuk pasangan-pasangan gempabumi. Pembentukan pasangan-pasangan gempabumi tersebut bertujuan untuk membuat data diferensial sebagai input pada program hypoDD. Seleksi data dilakukan untuk memastikan bahwa data yang digunakan memiliki korelasi tinggi terhadap jarak kedua hiposenter yang dicari. Data katalog gempa BMKG dikonversikan terlebih dahulu ke dalam format .pha agar dapat dibaca oleh program ph2dt.

Penentuan input parameter pada program ph2dt untuk membuat sejumlah pasangan gempabumi disesuaikan dengan jumlah data dan persebaran gempabumi. Beberapa input parameter yang akan mempengaruhi jumlah pasangan gempabumi yang digunakan adalah sebagai berikut.

**Minimum Pick Weight (MINWGHT).** *Minimum Pick Weight* (MINWGHT) yaitu nilai bobot kualitas *picking* waktu tempuh terendah dalam perhitungan. Nilai berkisar antara 0 sampai 1, dengan nilai 1 menunjukkan kualitas terbaik dengan memungkinkan adanya eliminasi data dengan bobot dibawah nilai yang dimasukkan. Nilai 0 menunjukkan data dalam katalog akan digunakan tanpa seleksi berdasarkan bobot.

**Maximum Distance (MAXDIST).** *Maximum Distance (MAXDIST)* yaitu jarak maksimum antara pasangan gempa bumi dengan stasiun pencatat.

**Maximum Separation (MAXSEP).** *Maximum Separation (MAXSEP)* yaitu jarak maksimum antar kejadian gempa yang masih dipasangkan. Nilai MAXSEP diatur supaya gempa dipasangkan hanya pada gempa lain yang memiliki jarak yang cukup dekat untuk dianggap sebagai pasangan gempa dengan lintasan identik. Akan tetapi, pengaturan nilai MAXSEP yang terlalu kecil juga akan menyebabkan banyaknya gempa yang tidak memiliki pasangan sehingga tidak dapat direlokasi dengan *double-difference*.

**Maximum Neighbors (MAXNGH).** *Maximum Neighbors (MAXNGH)* yaitu jumlah maksimum pasangan yang dapat dimiliki oleh sebuah kejadian gempa.

**Minimum Links (MINLNK).** *Minimum Links (MINLNK)* yaitu jumlah fase minimum yang harus dimiliki dua kejadian gempa untuk dipasangkan.

**Minimum Observation (MINOBS).** *Minimum Observation (MINOBS)* yaitu jumlah minimal tautan yang disimpan ke dalam sistem untuk dilakukan perhitungan metode *double-difference*. Pada penelitian ini nilai MINOBS yang digunakan adalah 12.

**Maximum Observation (MAXOBS).** *Maximum Observation (MAXOBS)* yaitu jumlah maksimal tautan yang disimpan ke dalam sistem untuk dilakukan perhitungan metode *double-difference*.

Beberapa parameter yang dimasukkan ke dalam program ph2dt terdapat pada tabel 3.

**Tabel 3.** Parameter yang digunakan pada program ph2dt.

Parameter	Nilai
MINWGHT	0
MAXDIST	500 km
MAXSEP	100 km
MAXNGH	100
MINLNK	6
MINOBS	12
MAXOBS	200

```

hp@DESKTOP-5555500 /home/Program_Ph2dt
$ ./ph2dt.exe ph2dt.inp
starting ph2dt (v1.3 - 08/2010)...

reading data ...
> stations = 454
> events total = 1176
> events selected = 456
> phases = 11211
forming dtimes...
> P-phase pairs total = 280964
> S-phase pairs total = 50082
> outliers = 5897 ( 1%)
> phases at stations not in station list = 2284
> phases at distances larger than MAXDIST = 63171
> P-phase pairs selected = 18609 ( 6%)
> S-phase pairs selected = 6435 ( 12%)
> weakly linked events = 7 ( 1%)
> linked event pairs = 1943
> average links per pair = 12
> average offset (km) betw. linked events = 17.5434589
> average offset (km) betw. strongly linked events = 21.3068428
> maximum offset (km) betw. strongly linked events = 99.9774323

Done.

Output files: dt.ct; event.dat; event.sel; ph2dt.log
ph2dt parameters were:
(minwght,maxdist,maxsep,maxngh,minlnk,minobs,maxobs)
0. 500. 100. 100 6 12 200

```

**Gambar 7.** Hasil Pengolahan Ph2dt

Hasil *output* dari program ph2dt terdiri dari 4 file, yaitu **dt.ct** (informasi waktu tempuh dari hasil pasangan gempabumi), **event.dat** (berisi informasi gempabumi secara keseluruhan), **event.sel** (berisi informasi gempabumi yang sesuai parameter MINOBS), dan **ph2dt.log** (informasi hasil *output* ph2dt).

### Tahap Relokasi

Pada tahap ini relokasi dilakukan dengan menggunakan hypoDD. HypoDD digunakan untuk memproses pasangan kejadian gempa dari hasil katalog maupun *cross-corelation* (dalam penelitian ini hanya digunakan data katalog). Program hypoDD akan mengelompokkan pasangan-pasangan gempabumi ke dalam bentuk *cluster*. *Cluster* bisa hanya terdiri atas dua gempabumi atau lebih. *Cluster* ini akan membuat rantai yang saling berhubungan dari pasangan-pasangan gempabumi yang berhubungan kuat atau memenuhi kriteria parameter yang diberikan. Adapun beberapa parameter yang digunakan dalam relokasi menggunakan hypoDD, sebagai berikut.

**OBSCT.** OBSCT merupakan jumlah hasil pengamatan minimum *event* gempa yang dihubungkan. Semakin tinggi nilai OBSCT, semakin stabil hasil akhir perhitungan, dengan resiko memecah *cluster* gempa menjadi *subcluster* yang

lebih kecil. Adapun nilai OBSCT sebaiknya tidak lebih besar dari MINLNK pada ph2dt supaya *event* yang diperhitungkan memiliki hubungan kuat.

**WDCT.** WDCT merupakan nilai jarak maksimum antara gempabumi yang berpasangan. Jika ada pasangan *event* yang memiliki nilai lebih dari WDCT, maka data tersebut dieliminasi karena dianggap sudah tidak memiliki kekuatan hubungan yang cukup. Nilai WDCT sebaiknya seimbang dengan nilai MAXSEP yang ada di ph2dt supaya tidak banyak data yang dieliminasi dan menghasilkan data yang hubungan antar event yang kuat.

**ISOLV.** ISOLV merupakan solusi inversi yang akan digunakan pada program hypoDD. Dalam penelitian ini digunakan *Conjugate Gradient Least Square* (LSQR).

**NITER.** NITER merupakan jumlah iterasi untuk setiap set iterasi.

**DAMP.** DAMP merupakan nilai redaman yang digunakan untuk mengatur seberapa cepat perhitungan mengalami konvergensi tertentu. Parameter ini mempengaruhi nilai *Conditional Number* (CND) yang menunjukkan seberapa baik sebaran data dan keberadaan pencilan pada data tersebut. Nilai batasan terbaik CND berkisar 40 hingga 80 (Waldhauser, 2001).

**Tabel 4.** Parameter yang digunakan pada program hypoDD.

<b>NITER</b>	<b>WTCTP</b>	<b>WTCTS</b>	<b>WRCT</b>	<b>WDCT</b>	<b>DAMP</b>
4	1	1	2	100	39
4	1	1	2	100	38
4	1	1	2	100	33
4	1	1	2	100	24

```

events: event.sel
stations: seis_sta.dat
OUTPUT FILES:
initial locations: hypoDD.loc
relocated events: hypoDD.reloc
event pair residuals: hypoDD.res
station residuals: hypoDD.sta
source parameters: hypoDD.src
Relocate cluster number 1
Relocate all events
Reading data ... Fri Jan 10 10:16:34 2020
# events = 456
# stations < maxdist = 28
# catalog P dtimes = 17911
# catalog S dtimes = 6434
# dtimes total = 24345
# events after dtimes match = 276
# stations = 22
clustering ...
Clustered events: 276
Isolated events: 0
# clusters: 1
Cluster 1: 276 events

RELOCATION OF CLUSTER: 1 Fri Jan 10 10:16:35 2020
-----
Initial trial sources = 276

IT EV CT RMSCT RMSST DX DY DZ DT OS AQ CND
% % ms % ms m m m ms m
1 1 100 92 466 -11.4 964 634 1653 1043 124 368 0 78
2 2 100 85 358 -23.2 707 338 848 798 74 669 0 76
3 3 100 79 294 -17.6 588 211 553 535 47 915 0 71
4 4 99 74 250 -14.9 510 163 413 392 35 1096 0 66
5 5 99 69 214 -14.5 441 125 317 288 27 1167 0 66
6 6 99 64 185 -13.5 380 94 230 336 22 1113 0 63
7 7 99 59 160 -13.6 344 76 165 187 16 1213 0 61
8 8 99 55 137 -14.2 279 68 134 151 13 1231 0 58
9 9 99 51 117 -14.8 251 66 136 153 15 1245 0 69
10 10 99 46 96 -17.7 195 57 118 124 11 1248 0 65
11 11 99 41 76 -21.5 174 45 94 93 9 1256 0 58
12 12 99 36 56 -26.6 121 36 78 76 7 1259 0 55
13 13 99 30 36 -34.6 91 35 81 81 7 1258 0 76
14 14 99 23 19 -48.5 76 26 57 44 4 1253 0 66
15 15 99 17 6 -68.7 26 13 26 17 2 1252 0 57
16 16 99 12 1 -84.6 5 3 7 4 0 1252 0 48

```

**Gambar 8.** Hasil Pengolahan HypoDD

### Plot Persebaran Gempabumi

Pembuatan plot persebaran gempabumi sebelum dan sesudah relokasi dilakukan dengan menggunakan Generic Mapping Tool (GMT). Hal ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan posisi episenter gempabumi sebelum dan sesudah relokasi. Adapun pada tahap ini dilakukan plot *cross section*. Hasil *cross section* tersebut menunjukkan persebaran kedalaman gempa (hiposenter) sebelum dan sesudah relokasi.

### Pembuatan Histogram Residual

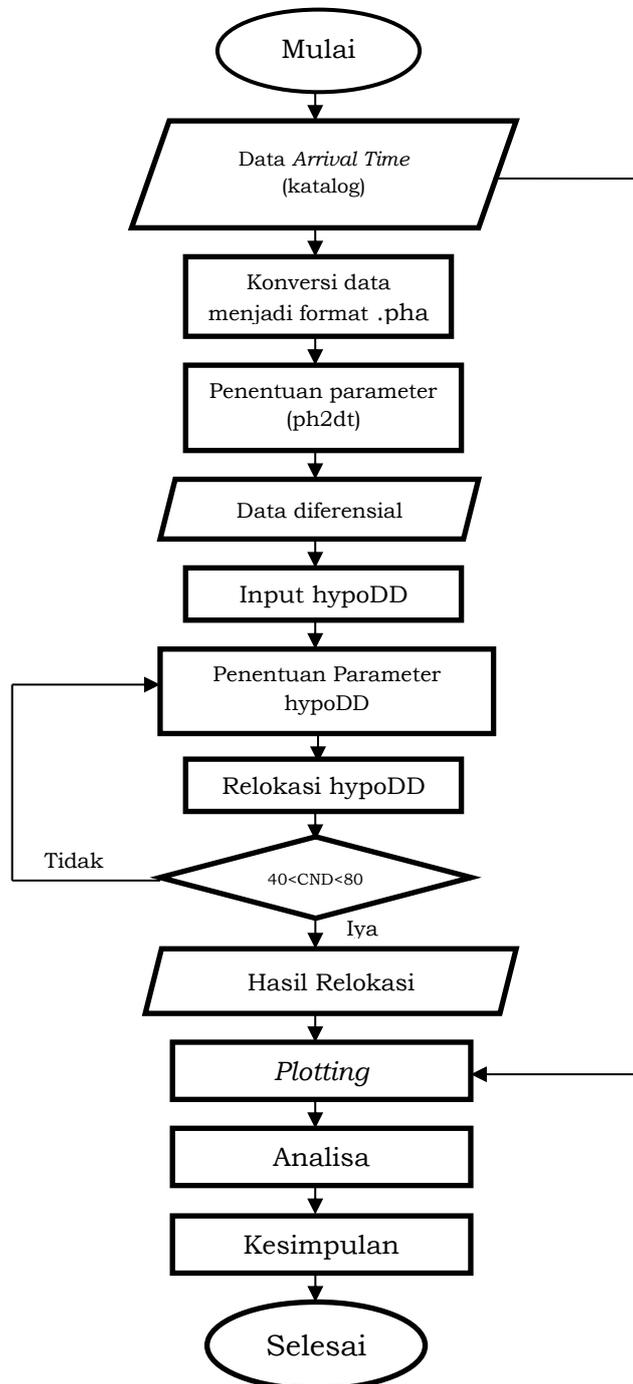
Pada tahap ini, pembuatan histogram residual sebelum dan sesudah relokasi dilakukan dengan menggunakan *microsoft excel*. Pengolahan histogram residual dilakukan berdasarkan nilai residual dari data katalog (sebelum relokasi) dan hasil hypoDD (sesudah relokasi).

### Pembuatan Diagram Pergeseran

Pada tahap ini, data hasil relokasi gempabumi diolah ke dalam diagram kompas dan rose dengan menggunakan *software* MATLAB untuk menggambarkan pergeseran gempabumi setelah relokasi terhadap gempabumi sebelum relokasi.

### 3.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir untuk penelitian ini ditunjukkan pada gambar 9.

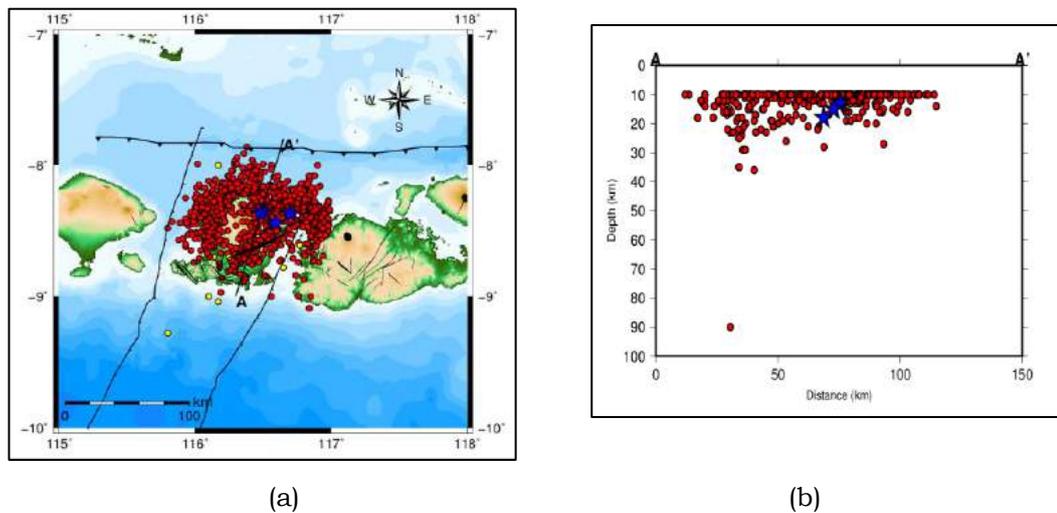


**Gambar 9.** Diagram Alir Penelitian

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Gempabumi Sebelum Relokasi

Data yang digunakan merupakan data *arrival time* yang berasal dari katalog BMKG. Jumlah data awal yang digunakan yaitu sebanyak 2457 kejadian. Model kecepatan awal yang digunakan dalam sistem penentuan gempabumi BMKG yaitu IASP91. IASP91 merupakan model kecepatan bumi satu dimensi yang dihasilkan oleh *International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior* (IASPEI).

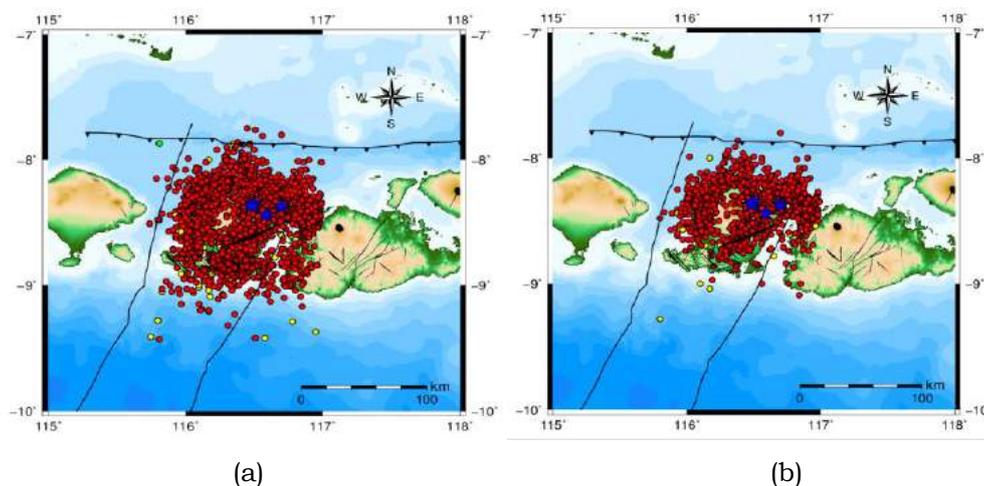


PETA SEISMISITAS DAERAH LOMBOK JULI – DESEMBER 2018		
● Dangkal (Kedalaman 0 – 60 km)	● Menengah (Kedalaman 60 – 300 km)	● Dalam (Kedalaman > 300 km)
★ Gempa Utama (M > 6.0)		

**Gambar 10.** Peta persebaran gempa awal (a) episenter dan (b) hiposenter.

Persebaran gempabumi sebelum relokasi yang dipetakan (gambar 10a) terlihat memenuhi sisi barat, tengah, dan timur Pulau Lombok. Sebagian besar gempa tersebut adalah gempa dangkal yang memiliki kedalaman kurang dari 40 km. Serangkaian gempa dengan kedalaman 10 km pada penampang (gambar 10b) terlihat seperti membentuk pola garis lurus. Hal ini dikarenakan gempa sebelum relokasi masih menggunakan model kecepatan global (IASP91) yang menyebabkan sistem perhitungan terhadap waktu tiba gempa tidak menemukan solusi untuk nilai tersebut, sehingga kedalaman 10 km diberikan secara otomatis (*fix depth*). Untuk itu diperlukan model kecepatan lokal yang lebih detail dalam proses relokasi sehingga model hiposenter gempabumi yang dihasilkan lebih presisi. Adapun data pada persebaran gempa tersebut adalah data gempa yang sudah di sortir berdasarkan nilai *azimuthal gap*.

Sortir data berdasarkan nilai *azimuthal gap* berguna untuk meningkatkan kualitas data gempabumi yang akan direlokasi dengan mengurangi *error* akibat dari *azimuthal gap* sehingga kesalahan model menjadi lebih kecil. *Azimuthal gap* yang besar dapat mengurangi akurasi penentuan hiposenter gempabumi sehingga tidak disarankan untuk digunakan dalam proses relokasi (Bai, Wu, Zhang, & Kawasaki., 2006). Dalam penelitian ini, data yang dieliminasi merupakan data yang memiliki nilai azimuthal gap diatas  $180^{\circ}$ .



**Gambar 11.** Perbandingan data gempa (a) Sebelum sortir azimuth dan (b) sesudah sortir azimuth.

Dari 2457 kejadian gempa (gambar 11a), kejadian gempabumi yang dieliminasi ada sebanyak 1281 sehingga hanya menyisakan 1176 kejadian gempabumi (gambar 11b). Sebagian besar data yang tereliminasi berada di bagian selatan dari daerah penelitian. Hal ini dikarenakan ketiadaan stasiun perekam di bagian selatan, dimana hal tersebut berpengaruh terhadap akurasi penentuan hiposenter, sehingga data yang mengalami *error* lebih cenderung berada di bagian selatan.

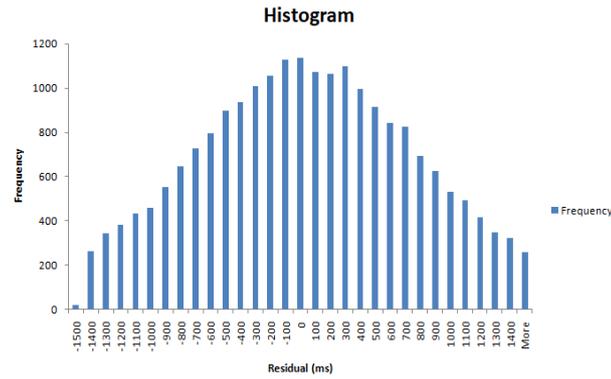
#### 4.2 Gempabumi Setelah Relokasi

Dalam pengolahan untuk merelokasi data gempabumi menggunakan hypoDD digunakan prinsip *trial and error*. Hal ini dilakukan dengan memberikan beberapa input pada program tersebut sesuai dengan tabel 3 dan tabel 4. Pengulangan terus dilakukan hingga mendapatkan hasil yang lebih baik, hal ini bisa dipastikan dengan melihat hasil histogram residual waktu tempuh yang dibuat. Jumlah kejadian sebelum relokasi yang telah disortir berdasarkan *azimuthal gap* berjumlah 1176 kejadian (gambar 11b). Dalam proses relokasi

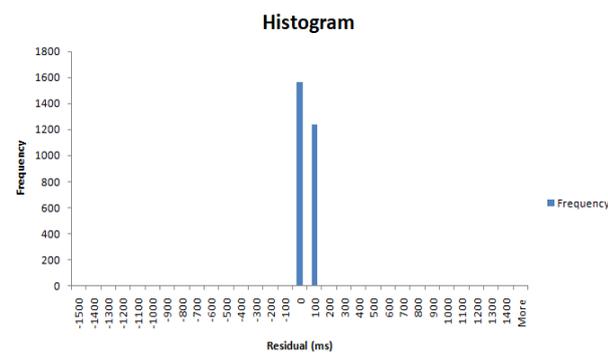
kejadian gempa yang dieliminasi ada sebanyak 903 sehingga hanya menyisakan 273 kejadian gempabumi (gambar 13). Banyak kejadian gempa yang dieliminasi disebabkan oleh parameter pada  $ph2dt$  (tabel 3) maupun  $hypoDD$  (tabel 4) yang membatasi jarak antar pasangan kejadian gempabumi yang terlibat. Ketika suatu kejadian gempabumi yang tidak memiliki pasangan dengan kejadian gempabumi lainnya, maka kejadian tersebut dieliminasi. Jika terjadi *airquake* dalam proses iterasi relokasi *double difference*, maka kejadian gempabumi yang menghasilkan *airquake* tersebut juga akan dieliminasi dan iterasi tersebut dijalankan ulang. *Airquake* merupakan gempabumi yang pada proses relokasi memiliki kedalaman yang terlalu dangkal dengan nilai dibawah 0. Dengan demikian, hasil relokasi *double difference* akan sering memiliki jumlah kejadian gempabumi yang lebih sedikit dibanding dengan sebelum relokasi.

#### **Validasi Hasil Pengolahan HypoDD**

Sebelum melihat hasil gempa yang sudah direlokasi menggunakan  $hypoDD$ , dilakukan validasi dengan membuat histogram residual waktu tempuh. Validasi dilakukan dengan membuat grafik histogram waktu tempuh residual gempabumi sebelum relokasi dan setelah relokasi. Histogram residual bertujuan untuk melakukan analisis terhadap kecocokan data lapangan dan model parameter matematis yang digunakan. Histogram residual sendiri merupakan selisih antara waktu tempuh observasi dan waktu tempuh kalkulasi.



(a)



(b)

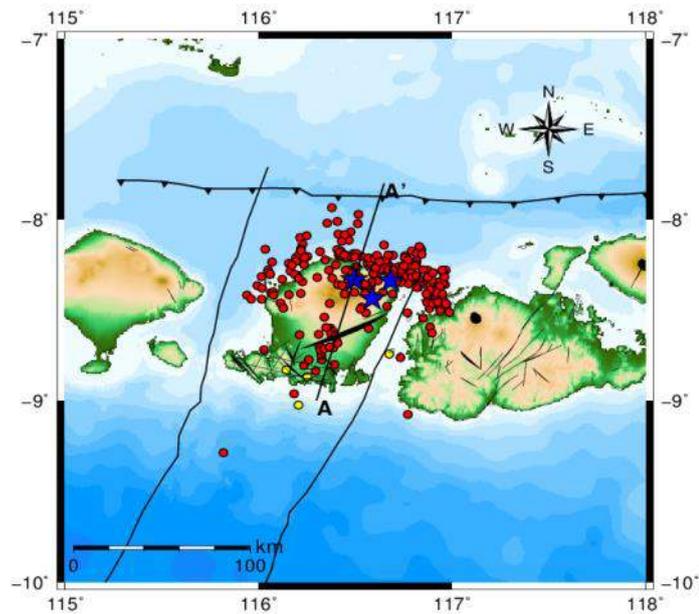
**Gambar 12.** Histogram Residual Waktu Tempuh (a) Data Sebelum Relokasi dan (b) Data Setelah Relokasi

Gambar 12 menunjukkan grafik histogram residual gempa sebelum relokasi (a) dan sesudah relokasi (b). Dari perbandingan Gambar 12 (a) dan (b) tampak bahwa nilai residual waktu tempuh hasil relokasi lebih banyak berada pada nilai 0 dan mendekati 0. Sedangkan untuk data sebelum direlokasi memiliki nilai residual waktu tempuh yang lebih bervariasi. Nilai residual yang berada pada nilai 0 dan mendekati 0 menunjukkan bahwa relokasi menggunakan metode *double difference* memberikan hasil relokasi yang presisi, mendekati model yang sebenarnya.

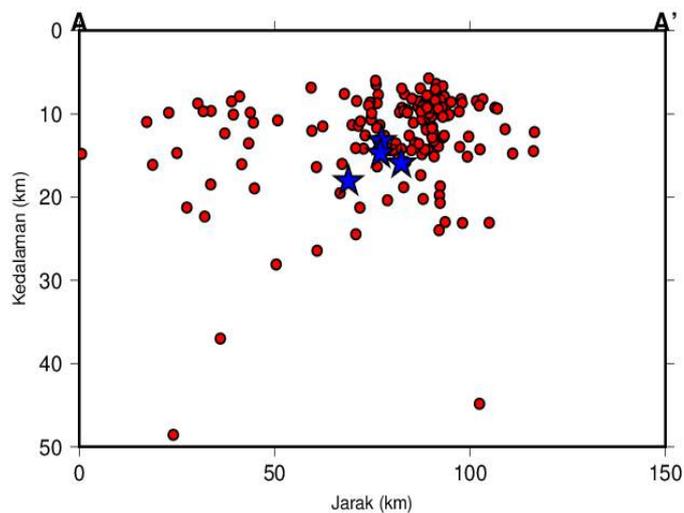
### Persebaran Setelah Relokasi

Persebaran gempabumi setelah relokasi pada gambar 13a menunjukkan gempa lebih mengumpul dan sebagian besar berada disepanjang utara Pulau Lombok. Gempa yang sebelumnya memiliki nilai kedalaman 10 km (*fix depth*) (gambar 10b) mengalami perubahan nilai yang lebih bervariasi dan tidak ada kecenderungan perubahan menjadi lebih dangkal ataupun lebih dalam (gambar 13b). Hal ini terjadi karena proses pemasangan kejadian gempa akan memberikan pembanding antara satu hiposenter dengan hiposenter lainnya,

sehingga dapat dihitung solusi nilai kedalaman dengan lebih presisi. Gempa yang sebelumnya terlihat memenuhi Pulau Lombok kini hanya menyisakan sebagian besar di sepanjang timur hingga barat bagian utara Pulau Lombok sampai ke bagian utara Pulau Sumbawa dan juga terdapat tiga segmen utara-selatan yang ada di bagian barat, tengah, dan timur Pulau Lombok.



(a)



(b)

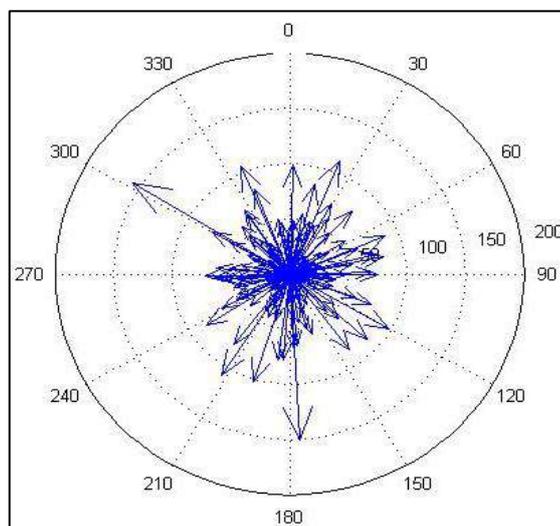
PETA SEISMISITAS DAERAH LOMBOK JULI – DESEMBER 2018		
● Dangkal (Kedalaman 0 – 60 km)	● Menengah (Kedalaman 60 – 300 km)	● Dalam (Kedalaman > 300 km)
★ Gempa Utama (M > 6.0)		

**Gambar 13.** Gempabumi Setelah Relokasi (a) Episenter dan (b) Hiposenter

Persebaran gempa tersebut sesuai dengan kondisi tektonik Pulau Lombok dan sekitarnya, dimana terdapat Sesar Flores disepanjang bagian utara Bali, Lombok hingga Flores. Pranantyo & Cummins (2019) menyatakan bahwa Sesar Flores merupakan sumber aktivitas seismik yang terjadi di daerah Lombok dan sekitarnya. Sesar tersebut merupakan sesar naik yang timbul akibat dari tumbukkan Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia dengan kemiringan yang landai dan memanjang. Zona subduksi tersebut menjadi sumber gaya dorong horizontal yang membentuk Sesar Flores, sehingga bagian Sesar Flores yang terdekat dari pendorong akan mudah untuk digerakkan dan memiliki gaya gesek yang lebih kecil dibandingkan dengan bagian yang lebih jauh. Dorongan tersebut menyebabkan bagian tubuh Lempeng Eurasia terdorong keatas di sepanjang utara Bali, Lombok, hingga Flores.

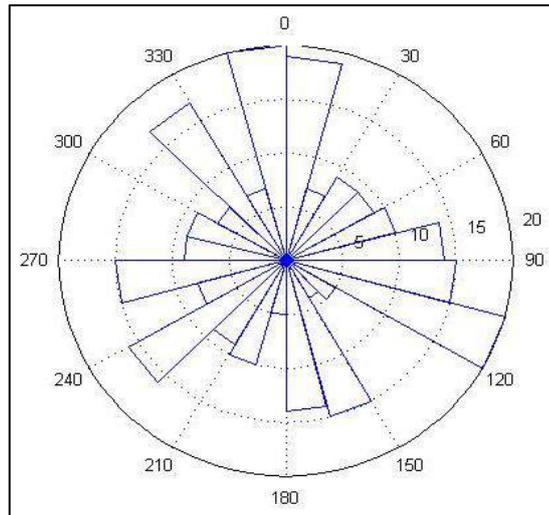
#### **Diagram Kompas dan Rose**

Gambar 14 dan 15 merupakan diagram yang menunjukkan perubahan posisi hiposenter yang sudah direlokasi menggunakan hypoDD. Diagram kompas digunakan untuk menunjukkan jarak perubahan hiposenter, sedangkan diagram rose digunakan untuk menunjukkan jumlah perubahan posisi hiposenter berdasarkan arah sudut kuadran. Penggambaran dengan menggunakan kedua diagram ini untuk menunjukkan pola pergeseran hiposenter secara lebih sederhana.



**Gambar 14.** Diagram Kompas

Gambar 14 adalah diagram kompas yang menunjukkan arah dan jarak pergeseran gempa. Skala 50 hingga 200 menunjukkan jarak pergeseran dalam km serta skala 0 – 330 menunjukkan sudut kuadran. Dari diagram kompas terlihat pergeseran gempabumi lebih banyak pada jarak kurang dari 100 km dan 50 km lalu hanya sedikit gempabumi dengan jarak pergeseran lebih dari 100 km.



**Gambar 15.** Diagram Rose

Gambar 15 adalah diagram rose yang menunjukkan arah dan jumlah pergeseran kejadian gempabumi. Skala 0 hingga 330 menunjukkan interval sudut pergeseran gempabumi setelah relokasi dan skala 5 hingga 20 menunjukkan jumlah kejadian gempabumi. Pada diagram tersebut terlihat pergeseran hiposenter setelah relokasi menyebar ke segala arah namun perubahan hiposenter terbanyak terdapat pada arah utara. Arah pergerakan tersebut menunjukkan bahwa setelah proses relokasi, persebaran hiposenter lebih mendekati struktur penyebab terjadinya gempa.

#### **4.3 Analisis Gempabumi Setelah Relokasi**

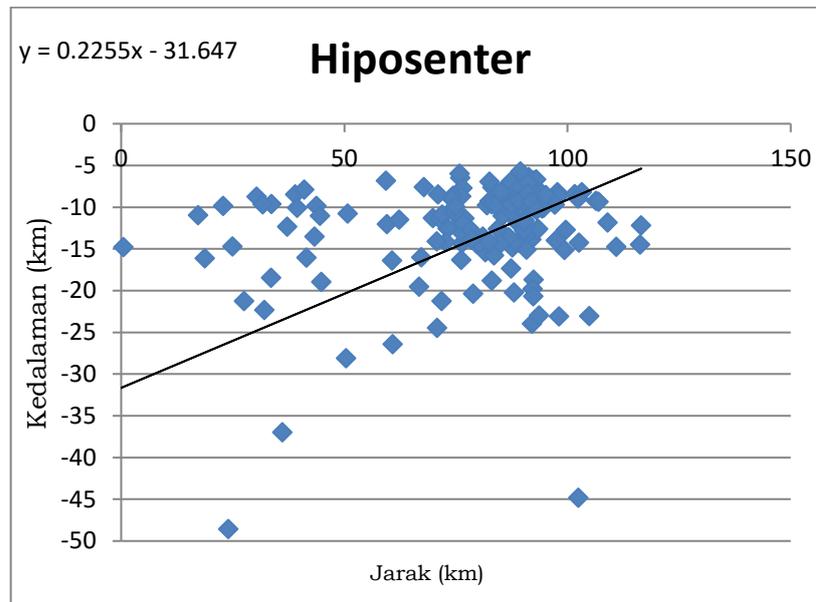
Berdasarkan hasil relokasi *double difference*, persebaran gempabumi yang terjadi pada daerah Lombok dan Sekitarnya pada periode Juli hingga Desember tahun 2018 didominasi oleh gempa yang berada dibagian utara serta gempa-gempa besar yang memiliki magnitudo diatas 6.0 semuanya berada di bagian utara Pulau Lombok yang memanjang dari barat-timur sesuai dengan arah dan bentuk dari perpanjangan Sesar Flores. Terdapat juga 3 segmen utara-selatan di bagian barat, tengah, dan timur Pulau Lombok. Secara kedalaman, gempabumi yang berada di Pulau Lombok dan sekitarnya didominasi gempa dangkal dengan kedalaman 7 hingga 20 km dari permukaan dan lebih sedikit gempabumi dengan kedalaman 20 hingga 50 km (gambar 13b). Kedalaman gempabumi yang dangkal terhadap bidang sesar berpotensi menimbulkan kerusakan yang berat. Bidang sesar tersebut memiliki panjang yang mencapai laut, sehingga walaupun episenter teridentifikasi di darat, hal ini berpotensi memicu datangnya tsunami yang disebabkan oleh dorongan bidang sesar tersebut.

Kemungkinan besar aktifitas Sesar Flores merupakan penyebab utama terjadinya gempabumi pada daerah Lombok dan Sekitarnya pada tahun 2018, ditunjukkan dengan persebaran gempa setelah relokasi yang sebagian besar berada di bagian utara lokasi penelitian, untuk itu dilakukan analisis kemiringan Sesar Flores. Analisa kemiringan Sesar Flores dilakukan dengan mengasumsikan bahwa kejadian-kejadian gempa setelah direlokasi berada pada bidang penyebab gempa tersebut, sehingga dapat dihitung *slope* dari persebaran gempa tersebut. Tren kemiringan Sesar Flores dianalisa berdasarkan data gempa setelah hasil relokasi dengan menggunakan persamaan linear berikut :

$$Y = 0.225x - 31.64. \quad (21)$$

Dari persamaan tersebut nilai derajat kemiringan sesar (*dip*) dapat ditentukan dengan mengambil nilai *slope*, sehingga :

$$Dip = \tan^{-1}(a) = \tan^{-1}(0.225) = 12.68^{\circ} \quad (22)$$

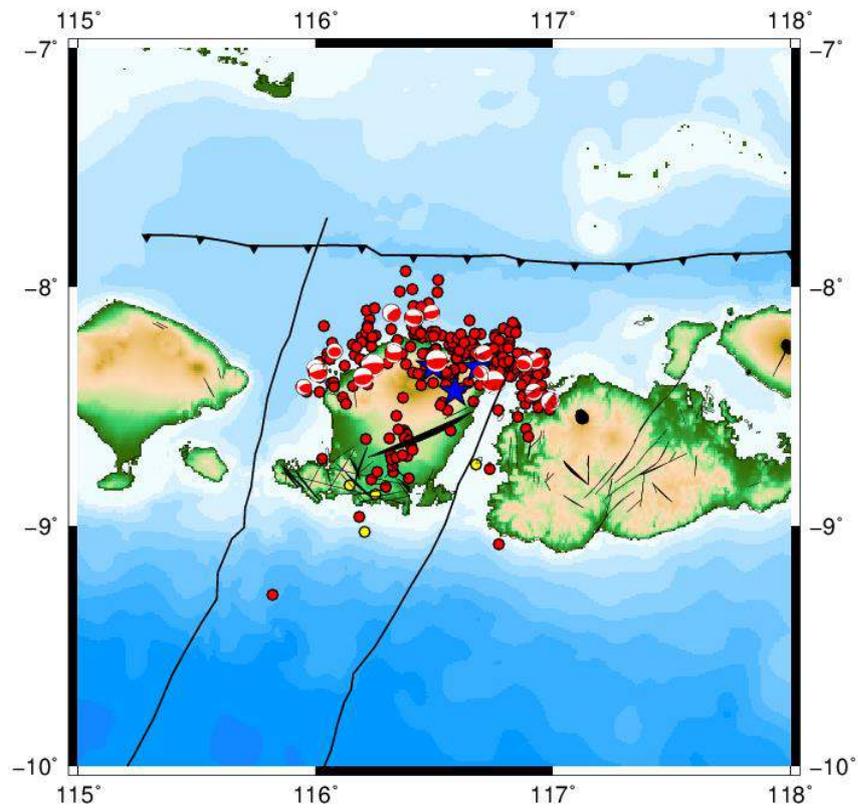


**Gambar 16.** Grafik Persamaan Linear

Dari perhitungan tersebut, dapat diasumsikan bahwa berdasarkan data gempa hasil relokasi, Sesar Flores memiliki nilai kemiringan  $12.68^{\circ}$ . Nilai kemiringan sesar tersebut sesuai dengan rentang yang diberikan oleh solusi mekanisme fokus tunggal segmen cekungan Bali yaitu sekitar  $10$  hingga  $30^{\circ}$  (MacCaffrey & Nabelek, 1987).

Untuk menunjukkan struktur penyebab gempabumi pada daerah penelitian digunakan juga data mekanisme fokus. Data mekanisme fokus diambil dari Global CMT sebagai pembandingan terhadap persebaran hasil relokasi. Persebaran mekanisme fokus tersebut secara konsisten menunjukkan penyebab

gempa utama di daerah Lombok tahun 2018 adalah Sesar Flores, yang diketahui sebagai sesar naik.



**Gambar 17.** Pemetaan Mekanisme Fokus dari Global CMT terhadap sebaran gempa setelah relokasi.

## **V. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil relokasi menunjukkan rangkaian kejadian gempa yang terjadi di Lombok bulan Juli hingga Desember pada tahun 2018 didominasi gempa yang berada di utara Pulau Lombok.
2. Hasil analisis data setelah relokasi menunjukkan gempa di daerah Lombok 2018 sebagian besar diakibatkan oleh keberadaan Sesar Naik Flores di sebelah utara. Kemiringan Sesar Flores yang dianalisis memiliki nilai sebesar  $12.68^{\circ}$ .

### **5.2 Saran**

Dalam analisis kegempaan untuk daerah Lombok dan Sekitarnya lebih baik menggunakan luasan penelitian yang lebih luas hingga mencakup zona subduksi di selatan serta daerah yang terdampak oleh Sesar Flores sehingga dapat mengetahui karakteristik Sesar Flores secara menyeluruh.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abott, P.L. (2004). *Natural Disasters*. 4<sup>th</sup> ed., McGraw Hill Higher Education, Boston, 460 p.
- Agustawijaya, D. S. (2006). "Aspek-aspek Geologi Teknik Geologi Teknik dan Kegempaan dalam Analisis Resiko Gempabumi." *Orasi Ilmiah dalam rangka Dies Natalis Universitas Mataram ke 44, 2 Oktober 2006*.
- Agustawijaya, D. S., Sulistyowati, T., Suroso, A., dan Hadi, S. (2005). "Pengkajian bahaya longsor tipe jatuhan batuan (rockfall)." *Laporan Tahap I Penelitian Hibah Bersaing*, Direktorat Jendral pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional.
- Agustawijaya, D. S., Sulistyowati, T., Suroso, A., dan Hadi, S. (2006). "Pengkajian bahaya longsor tipe jatuhan batuan (rockfall)." *Laporan Tahap II Penelitian Hibah Bersaing*, Direktorat Jendral pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional.
- Agustawijaya, D. S., Syamsuddin. (2009). "Pengembangan Metode Analisis Risiko Bencana: Sebuah Studi Kasus Pulau Lombok". Universitas Mataram, Mataram.
- Andi Mangga, S., Atmawinata, S., Hermanto, B., dan Amin, T.C. (1994). *Peta Geologi Lembar Lombok, Nusa Tenggara*, Direktorat Jendral Geologi dan Sumberdaya Mineral, Departemen Pertambangan dan Energi.
- Anonim. (2005). *Putting Down Roots in Earthquake Country: Your Handbook for the San Fransisco Bay Region*, USGS.
- Anonim. (2005). *Laporan Bulanan Aktifitas Kegempaan di Daerah NTB*. Balai Besar Meteorologi dan Geofisika Wilayah III, Denpasar.
- Apdila, A., & Sunardi, B. "Aplikasi Metode *Double Difference* untuk Relokasi Hiposenter Gempabumi Halmahera 15 November 2014 dan Susulannya". Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
- Aswad, Sabrianto. 2010. *Relokasi Gempa Vulkanik Kompleks Gunung Guntur Menggunakan Algoritma Double Difference*. Karya Tulis. Institut Teknologi Bandung : Bandung.
- Devalentino, K. 2016. Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Metode *Double Difference* dan Implikasi Terhadap Seismotektonik di Wilayah Nusa Tenggara Barat. *Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya*.
- Febriani, Y., Daruwati, I., & Hatika, R, G. 2013. Analisis Nilai *Peak Ground Acceleration* dan Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Data Mikroseismik Pada Daerah Rawan Gempabumi di Kota Bengkulu.
- Gomberg, J.S., J.S., Sheldock, K.M., & Roecker, S.W. (1990). The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimations. *Bull. Seismol.Soc. Am.*, 80, 1605-1628.

- Hamilton, W. (1979). *Tectonics of Indonesian Region*. United States Geological Survey.
- Ismanto Hadi, D., Irfan, M., Hasanuddin., Aswad, S., & Juanda A, A. “Relokasi Gempa Mikro Menggunakan Metode *Double Difference* untuk Memodelkan Lapangan Reservoir Lapangan Panasbumi Kamojang”. *Geofisika Unhas & PT. Pertamina Geothermal Energy Jakarta*.
- Kanamori, H., 1977, The Energy Release in Great Earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 82. 2981-2987.
- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R., & Buland, R. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122(1)
- Lay, T. Dan Wallace, T.C., 1995, *Modern Global Seismology*, Academic Press, San Diego.
- McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, Gravity, and the Origin of The Bali Basin: An Example of a Nascent Continental Fold-and-Thrust Belt. *Journal of Geophysical Research*, 92(B1), 441-460.
- Madrinovella, I., Widiyantoro, S., Meilano, I. (2011). “Relokasi Hiposenter Gempa Padang 30 September 2009 Menggunakan Metode *Double Difference*”. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- N. Rande, M., & Ulfiana, E. “Analisis Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Algoritma *Double Difference* Wilayah Sulawesi Tengah”. *Stasiun Geofisika Kelas I Palu & Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*.
- Nur, J. I., Anggono, T., & Yulianto, M.T, T. “Aplikasi Metode *Double Difference* Dalam Relokasi Hiposenter untuk Menggambarkan Zona Transisi antara Busur Banda dan Busur Sunda”. *Youngster Physics Journal*.
- Pranantyo, I. R., & Cummins, P. R. (2019). Multi Data-Type Source Estimation for the 1992 Flores Earthquake and Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 1-5.
- P. Sahara, D., W. Kusumo, A., Widiyantoro, S., & Sule, R. “Aplikasi Metode *Double difference* untuk Relokasi Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Kelud Secara Akurat”. *Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, ITB. Bandung*.
- Rohadi, S., Widiyantoro, S., Andri, DN., & Masturyono. (2011). “Relokasi gempabumi menggunakan metode tomografi double difference pada data gempabumi di Jawa tengah (katalog meramex)”. *Proceedings JCM. The 36th HAGI and 40th IAGI Annual Convention and Exhibition, Makassar*.
- Setiadi, T., & Suardi, I. “Relokasi Gempabumi di Wilayah Laut Maluku Menggunakan Metode *Double Difference (HypoDD)*”. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG), Tangerang Selatan.

- Silver, E.A., Breen, N. A., Prasetyo, H., & Hussong, D.M. (1986). Multibeam Study of The Flores Backarc Thrust Belt, Indonesia. *Journal of Geophysical Research*, 91(B3), 3489-3500.
- Subardjo., dan Ibrahim, G., 2004. *Pengetahuan Seismologi*. Jakarta: Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Sulaiman, R., Muzli, Nugroho.S. 2002. *Karakteristik Gempabumi di sumba dan sekitarnya*, Prosiding HAGI.
- Sulaeman, C., A.Minarno, P., Afif, H., Robiana, R., Solikhin, A., Omang, A., Supartoyo, Priambodo, I., Hidayati, S., & Meilano, I. (2019). "Deformasi Pulau Lombok Berdasarkan Data GPS". *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*.
- Sunardi, B., Rohadi, S., Masturyono., Widiyantoro, S., Sulastri., Susilanto, P., Hardy, T., dan Setyonegoro, W. (2012). "Relokasi Hiposenter Gempabumi Wilayah Jawa Menggunakan Teknik *Double Difference*". *Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, Jakarta., BBMKG BMKG Wilayah 2, Ciputat., Institut Teknologi Bandung, Bandung*.
- Sunardi, B. 2009. Analisa Fraktal dan Rasio Slip Daerah Bali-NTB Berdasarkan Pemetaan Variasi Parameter Tektonik, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*.
- Sunarjo., Gunawan, M. T., & Pribadi, S. (2009). "Gempabumi Edisi Populer". *Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Jakarta : Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Wagner, D., Koulakov, I., Rabbel, W., Luehr, B. G., Wittwer, A., Kopp, H., Bohm, M., Asch, G. (2007). Joint inversion of active and passive seismic data in Central Java. *Geophysical Journal International*, 170(2), 923-932,
- Waldhauser, F. (2001). HypoDD: A Computer- Program to compute *double difference Earthquake location*. *USGS Open File Report*.
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. 2000. *A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 6, pp. 1353-1368.
- Xu, S., Fukuyama, E., Ben-Zion, Y., & Ampuero, J,-P. (2015). Dynamic rupture activation of backthrust fault branching. *Tectonophysics*, 644-645, 161-183.
- Yusuf, Ryandi., &Santosa, B. "Persebaran Hiposenter Maluku Selatan Menggunakan Metode *Double Difference*". Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

## LAMPIRAN

### LAMPIRAN 1. DATA KATALOG (ARRIVAL TIME)

EventID: bmg2018mtdy													
Date	Time	Latitude	Longitude	Depth	Mag	Type	Mag	smaj	smin	az	rms	cPhase	Region
2018-07-01	06:00:15.1	-8.70	116.14	120	4.47	M		0.00		0.00	154	0.68	25 Sumbawa Region, Indonesia
Net	Sta	Phase	Date	Time	dis	Az	Res	Amp	Per	Qual	mb	ML	mB
IA	KLNI	P	2018-07-01	06:00:32.8	0.3	351	0.3	0	0	0	0	0	0
IA	KLNI	S	2018-07-01	06:00:45.9	0.3	351	1.0	0	0	0	0	0	0
IA	TWSI	P	2018-07-01	06:00:36.0	0.7	93	0.3	0	0	0	0	0	0
IA	TWSI	S	2018-07-01	06:00:51.6	0.7	93	0.0	0	0	0	0	0	0
IA	DNP	P	2018-07-01	06:00:37.6	0.9	271	0.8	0	0	0	0	0	0
IA	IGBI	P	2018-07-01	06:00:37.6	1.0	263	0.4	0	0	0	0	0	0
IA	SRBI	P	2018-07-01	06:00:38.2	1.1	304	0.1	0	0	0	0	0	0
IA	PLAI	P	2018-07-01	06:00:45.5	1.6	95	1.4	0	0	0	0	0	0
IA	PLAI	S	2018-07-01	06:01:08.1	1.6	95	1.4	0	0	0	0	0	0
IA	JAGI	P	2018-07-01	06:00:47.7	2.0	277	0.6	0	0	0	0	0	0
IA	JAGI	S	2018-07-01	06:01:13.0	2.0	277	1.3	0	0	0	0	0	0
IA	ABJI	P	2018-07-01	06:00:50.3	2.1	295	0.6	0	0	0	0	0	0
IA	DBNI	P	2018-07-01	06:00:51.2	2.2	85	0.7	0	0	0	0	0	0
IA	GRJI	P	2018-07-01	06:01:16.1	4.0	296	0.9	0	0	0	0	0	0
IA	PWJI	P	2018-07-01	06:01:18.3	4.3	279	1.1	0	0	0	0	0	0
IA	SWJI	P	2018-07-01	06:01:21.4	4.4	282	0.9	0	0	0	0	0	0
IA	BWJI	P	2018-07-01	06:01:20.7	4.5	309	0.2	0	0	0	0	0	0
IA	BASI	P	2018-07-01	06:01:22.7	4.6	109	0.4	0	0	0	0	0	0
II	KAPI	P	2018-07-01	06:01:30.1	5.1	45	0.3	0	0	0	0	0	0
IA	BKSI	P	2018-07-01	06:01:30.6	5.2	50	0.1	0	0	0	0	0	0
IA	EDFI	P	2018-07-01	06:01:33.5	5.5	91	1.2	0	0	0	0	0	0
IA	UGM	P	2018-07-01	06:01:36.0	5.6	278	0.4	0	0	0	0	0	0
IA	SBNI	P	2018-07-01	06:01:39.6	5.9	108	0.6	0	0	0	0	0	0
IA	MMRI	P	2018-07-01	06:01:41.8	6.0	90	0.2	0	0	0	0	0	0
IA	KPJI	P	2018-07-01	06:01:58.3	7.3	280	0.4	0	0	0	0	0	0
EventID: bmg2018oeng													
Date	Time	Latitude	Longitude	Depth	Mag	Type	Mag	smaj	smin	az	rms	cPhase	Region
2018-07-21	16:45:15.4	-8.44	115.93	87	2.94	M		0.00		0.00	149	0.60	11 Bali Region, Indonesia
Net	Sta	Phase	Date	Time	dis	Az	Res	Amp	Per	Qual	mb	ML	mB
IA	KLNI	P	2018-07-21	16:45:29.4	0.2	85	0.6	0	0	0	0	0	0
IA	KLNI	S	2018-07-21	16:45:38.3	0.2	85	0.8	0	0	0	0	0	0
IA	DNP	P	2018-07-21	16:45:33.1	0.8	252	0.0	0	0	0	0	0	0

### LAMPIRAN 2. SCRIPT PETA GMT

```
1 pscoast -R115/118/-10/-7 -JML3c -Balgl:"PETA SEISMISITAS DAERAH LOMBOK JULI - DESEMBER 2018 " : --FONT_TITLE=14,Times-Bold -Ggreen
2 gempa_utama.ps
3 girdimage indo.nc -R -JM -Celev.cpt -O -K >> gempa_utama.ps
4 gawk "(print %2, %1, %3, %4*0.009)" obs12reloc.dat | psxy -R -JM -O -K -Ctabel.cpt -Sc0.2 -Wthin >> gempa_utama.ps
5 gawk "(print %2, %1, %3, %4*0.009)" besar_utama_sesudah.dat | psxy -R -JM -O -K -Ctabel_64.cpt -Sa0.6 -Wthin >> gempa_utama.ps
6 psxy -R -JM -W0.01 -Gblack -K -O fault.gmt >> gempa_utama.ps
7 psxy -R -JM -W1 -Sf0.4i/0.05i+r+t -Gblack -O -K Sesar_Flores.gmt >> gempa_utama.ps
8 psxy -R -JM -W0.9 -Sf5.0i/0.01i+l -Gblack -O -K sesar_geser_sumbawa.gmt >> gempa_utama.ps
9 psxy -R -JM -Wthicker -O -K transform.gmt -m >> gempa_utama.ps
10 psxy -R -JM -W0.2 -O -K pantai.gmt >> gempa_utama.ps
11 psxy -R -JM -W0.9 -Sf0.8i/0.07i+l+t -Gblack -O -K sesar_subduksi.gmt >> gempa_utama.ps
12 pscoast -JM -R -K -O -P -Dh -Iz/0.1p,blue -L115.5/-9.8/17/100+1+jr --FONT_LABEL=13p -Tf117.5/-7.5/0.5i/2 --FONT_TITLE=11p --MAP_T
13 echo 116.3 -9 14 0 1 LT A >> linel.dat
14 echo 116.65 -7.8 14 0 1 LT A >> linel.dat
15
16 psxy linel.dat -JM -R -W1 -P -O -K >> gempa_utama.ps
17 pstext linel.dat -JM -R -P -O -K >> gempa_utama.ps
18
19 echo H 13 1 PETA SEISMISITAS DAERAH LOMBOK JULI - DESEMBER 2018 > legenda
20 echo D 0 1.5p >> legenda
21 echo N 3 >> legenda
22 echo V 0 1p >> legenda
23 echo S 0.1i c 0.1i red 0.25p 0.2i Dangkal (Kedalaman 0 - 60 km) >> legenda
24 echo S 0.1i c 0.1i yellow 0.25p 0.2i Menengah (Kedalaman 60 - 300 km) >> legenda
25 echo S 0.1i c 0.1i green 0.25p 0.2i Dalam (Kedalaman > 300 km) >> legenda
26 echo V 0 1.5p >> legenda
27
28 echo D 0 1.5p >> legenda
29 echo N 1 >> legenda
30 echo V 0 1.5p >> legenda
31 echo S 0.1i a 0.2i Blue 0.25p 0.2i Gempa Utama (M > 7.0) >> legenda
32 echo V 0 1.5p >> legenda
33
34 pslegend -Dx3.20i/0.25i/9.60i/0.9i/TC -J -R -O -K -F legenda -X-2 -Y-2.5 >> gempa_utama.ps
35
36 # mensortir data gempa sesuai garis yang telah diplot -C adalah posisi titik A dan -E adalah posisi titik B
37 gawk "(print %2, %1, %3)" obs12reloc.dat | project -Q -C116.3/-9 -E116.65/-7.8 -Fpz -W-30/30 > cross12obs_sesudah.dat
38 gawk "(print %2, %1, %3)" besar_utama_sesudah.dat | project -Q -C116.3/-9 -E116.65/-7.8 -Fpz -W-30/30 > cross_utama_sesudah.dat
39
```

LAMPIRAN 3. DATA CT.DT

1	#	1	1079		
2	KLNI	17.700	16.800	1.0000	P
3	DNP	22.500	17.600	1.0000	P
4	SRBI	23.100	22.400	1.0000	P
5	PLAI	53.000	56.900	1.0000	S
6	PLAI	30.400	32.700	1.0000	P
7	JAGI	57.900	51.300	1.0000	S
8	JAGI	32.600	29.600	1.0000	P
9	ABJI	35.200	33.900	1.0000	P
10	DBNI	36.100	41.000	1.0000	P
11	GRJI	61.000	59.600	1.0000	P
12	PWJI	63.200	60.900	1.0000	P
13	SWJI	66.300	63.100	1.0000	P
14	#	3	97		
15	KLNI	9.100	8.500	1.0000	P
16	TWSI	11.300	11.300	1.0000	P
17	TWSI	18.700	19.900	1.0000	S
18	PLAI	24.900	25.000	1.0000	P
19	SRBI	23.600	22.600	1.0000	P
20	DNP	24.600	25.200	1.0000	P
21	BYJI	36.700	35.900	1.0000	P
22	ABJI	38.300	39.000	1.0000	P
23	JAGI	38.100	37.500	1.0000	P
24	GRJI	64.500	64.300	1.0000	P
25	MKS	64.000	64.800	1.0000	P
26	BASI	68.400	68.300	1.0000	P
27	#	3	8		
28	KLNI	15.400	15.500	1.0000	S
29	KLNI	9.100	8.500	1.0000	P
30	TWSI	11.300	11.900	1.0000	P
31	TWSI	18.700	19.000	1.0000	S
32	PLAI	24.900	25.400	1.0000	P
33	SRBI	23.600	23.400	1.0000	P
34	DNP	24.600	25.800	1.0000	P
35	BYJI	36.700	36.000	1.0000	P
36	ABJI	38.300	38.600	1.0000	P
37	JAGI	38.100	37.200	1.0000	P
38	KRK	62.600	62.200	1.0000	P
39	GRJI	64.500	63.700	1.0000	P
40	MKS	64.000	64.000	1.0000	P

LAMPIRAN 4. EVENT.DAT

1	20180701	6001510	-8.7000	116.1400	120.000	4.5	0.00	0.00	0.68	1
2	20180721	16451540	-8.4400	115.9300	87.000	2.9	0.00	0.00	0.60	2
3	20180728	22473840	-8.3500	116.5000	13.000	6.5	0.00	0.00	1.37	3
4	20180728	22553870	-8.3000	116.5800	13.000	4.9	0.00	0.00	0.71	4
5	20180728	22564600	-8.3200	116.5200	11.000	5.4	0.00	0.00	1.27	5
6	20180728	22584660	-8.3600	116.5600	10.000	4.8	0.00	0.00	0.83	6
7	20180728	23053980	-8.3400	116.5100	13.000	5.2	0.00	0.00	1.05	7
8	20180728	23064920	-8.3100	116.4900	10.000	5.7	0.00	0.00	1.08	8
9	20180728	23155640	-8.5200	116.5300	10.000	5.0	0.00	0.00	1.30	9
10	20180728	23193650	-8.3400	116.5800	16.000	4.8	0.00	0.00	0.84	10
11	20180728	23245260	-8.5900	116.4400	21.000	3.3	0.00	0.00	0.69	11
12	20180728	23392080	-8.2600	116.4800	11.000	5.0	0.00	0.00	0.87	12
13	20180728	23495690	-8.6600	116.4500	23.000	2.9	0.00	0.00	0.44	13
14	20180728	23574240	-8.5400	116.5100	10.000	3.3	0.00	0.00	0.33	14
15	20180729	22420	-8.4900	116.5400	10.000	2.8	0.00	0.00	0.10	15
16	20180729	33090	-8.4900	116.4500	10.000	3.1	0.00	0.00	0.20	16
17	20180729	53010	-8.3200	116.4800	12.000	4.5	0.00	0.00	0.69	17
18	20180729	121030	-8.4800	116.4600	10.000	3.1	0.00	0.00	0.08	18
19	20180729	183370	-8.3500	116.5700	16.000	4.4	0.00	0.00	0.92	19
20	20180729	320220	-8.2000	116.6000	10.000	4.1	0.00	0.00	0.83	20
21	20180729	360230	-8.7400	116.3900	23.000	3.2	0.00	0.00	0.58	21
22	20180729	373460	-8.3100	116.4900	11.000	4.5	0.00	0.00	0.78	22
23	20180729	435400	-8.3000	116.6200	16.000	4.3	0.00	0.00	0.68	23
24	20180729	461480	-8.5200	116.3900	12.000	3.4	0.00	0.00	0.44	24
25	20180729	515580	-8.7300	116.2600	16.000	2.5	0.00	0.00	0.21	25
26	20180729	523720	-8.7200	116.3100	15.000	3.1	0.00	0.00	0.24	26
27	20180729	1045120	-8.6300	116.3400	12.000	3.5	0.00	0.00	0.27	27
28	20180729	1073590	-8.6500	116.3400	15.000	3.0	0.00	0.00	0.14	28
29	20180729	1103100	-8.4600	116.4600	14.000	2.8	0.00	0.00	0.55	29
30	20180729	1121350	-8.6600	116.3000	11.000	3.0	0.00	0.00	0.12	30
31	20180729	1142050	-8.6500	116.3700	13.000	4.1	0.00	0.00	0.31	31
32	20180729	1225320	-8.5900	116.4100	19.000	3.5	0.00	0.00	0.39	32
33	20180729	1292770	-8.7800	116.3000	18.000	2.7	0.00	0.00	0.37	33
34	20180729	1305580	-8.7100	116.3000	16.000	2.7	0.00	0.00	0.42	34
35	20180729	1390900	-8.7000	116.4000	24.000	3.0	0.00	0.00	0.31	35
36	20180729	1442440	-8.2800	116.5500	12.000	4.9	0.00	0.00	1.09	36
37	20180729	1503190	-8.3200	116.4400	10.000	5.3	0.00	0.00	1.30	37
38	20180729	1531660	-8.6100	116.3600	15.000	4.2	0.00	0.00	0.32	38
39	20180729	1542930	-8.6300	116.3400	17.000	3.8	0.00	0.00	0.37	39
40	20180729	2200800	-8.2800	116.5500	12.000	5.0	0.00	0.00	1.01	40

LAMPIRAN 5. EVENT.SEL

1	20180701	6001510	-8.7000	116.1400	120.000	4.5	0.00	0.00	0.68	1
2	20180728	22473840	-8.3500	116.5000	13.000	6.5	0.00	0.00	1.37	3
3	20180728	22553870	-8.3000	116.5800	13.000	4.9	0.00	0.00	0.71	4
4	20180728	22564600	-8.3200	116.5200	11.000	5.4	0.00	0.00	1.27	5
5	20180728	22584660	-8.3600	116.5600	10.000	4.8	0.00	0.00	0.83	6
6	20180728	23053980	-8.3400	116.5100	13.000	5.2	0.00	0.00	1.05	7
7	20180728	23064920	-8.3100	116.4900	10.000	5.7	0.00	0.00	1.08	8
8	20180728	23155640	-8.5200	116.5300	10.000	5.0	0.00	0.00	1.30	9
9	20180728	23193650	-8.3400	116.5800	16.000	4.8	0.00	0.00	0.84	10
10	20180728	23392080	-8.2600	116.4800	11.000	5.0	0.00	0.00	0.87	12
11	20180729	53010	-8.3200	116.4800	12.000	4.5	0.00	0.00	0.69	17
12	20180729	183370	-8.3500	116.5700	16.000	4.4	0.00	0.00	0.92	19
13	20180729	373460	-8.3100	116.4900	11.000	4.5	0.00	0.00	0.78	22
14	20180729	435400	-8.3000	116.6200	16.000	4.3	0.00	0.00	0.68	23
15	20180729	1121350	-8.6600	116.3000	11.000	3.0	0.00	0.00	0.12	30
16	20180729	1142050	-8.6500	116.3700	13.000	4.1	0.00	0.00	0.31	31
17	20180729	1442440	-8.2800	116.5500	12.000	4.9	0.00	0.00	1.09	36
18	20180729	1503190	-8.3200	116.4400	10.000	5.3	0.00	0.00	1.30	37
19	20180729	1531660	-8.6100	116.3600	15.000	4.2	0.00	0.00	0.32	38
20	20180729	1542930	-8.6300	116.3400	17.000	3.8	0.00	0.00	0.37	39
21	20180729	2200800	-8.2800	116.5500	12.000	5.0	0.00	0.00	1.01	40