

Skripsi Geofisika

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI DI JAWA BARAT
DAN SEKITARNYA TAHUN 2017-2021 MENGGUNAKAN
METODE *DOUBLE DIFFERENCE* DAN MEKANISME FOKUS**



OLEH:

MARNIATI RAMLI

H061181017

**PROGRAM STUDI GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

MAKASSAR

2022

HALAMAN JUDUL

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI DI JAWA BARAT DAN
SEKITARNYA TAHUN 2017-2021 MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE
DIFFERENCE* DAN MEKANISME FOKUS**

SKRIPSI

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Departemen Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

OLEH:

MARNIATI RAMLI

H061181017

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI DI JAWA BARAT DAN
SEKITARNYA TAHUN 2017-2021 MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE
DIFFERENCE* DAN MEKANISME FOKUS**

Disusun dan diajukan oleh

MARNIATI RAMLI

H061181017

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada tanggal...*17 November 2022*
dan dinyatakan memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Ir. Bambang Harimei, M.Si

NIP. 196105011991031003

Pembimbing Pertama

Muh. Fawz Ismullah M. M.T

NIP. 199111092019031010

Menyetujui,
Ketua Departemen Geofisika

Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Marniati Ramli

NIM : H061181017

Departemen : Geofisika

Judul Tugas Akhir: Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Di Jawa Barat Dan

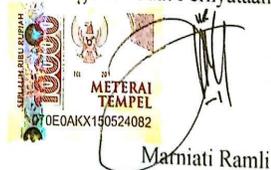
Sekitarnya Tahun 2017-2021 Menggunakan Metode *Double*

Difference Dan Mekanisme Fokus

Menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar hasil karya saya sendiri dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas Hasanuddin atau Lembaga Penelitian lain kecuali kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang sudah lazim digunakan, karya tulis ini merupakan murni dari gagasan penelitian saya sendiri, kecuali arahan Tim Pembimbing dan Tim Penguji.

Makassar, 17 November 2022

Yang Membuat Pernyataan


Marniati Ramli

ABSTRAK

Wilayah Jawa terkhusus daerah Jawa Barat berada di Zona Subduksi Lempeng Indo Australia-Eurasia yang menyebabkan banyak peristiwa gempa bumi di wilayah ini baik di darat maupun di laut. Relokasi hiposenter gempa bumi salah satunya dilakukan untuk analisis struktur detail seperti identifikasi zona sesar dan sebarannya, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sebaran hiposenter gempa bumi di Wilayah Jawa Barat dan Sekitarnya tahun 2017-2021 dan mengetahui sebaran sesar penyebab terjadinya gempa bumi. Metode *Double Difference* merupakan metode yang tidak menggunakan koreksi stasiun untuk relokasi. Metode Mekanisme Fokus gempa bumi merupakan penentuan mekanisme sumber gempa dengan membaca gerak awal gelombang P. Data gempa bumi diperoleh dari katalog gempa bumi BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika) dan data polaritas gelombang P dari ISC (*International Seismological Center*). Hasil dari penelitian ini setelah dilakukan relokasi menunjukkan hasil yang baik dengan nilai Residual yang dihasilkan mendekati nol dan sebaran gempa bumi yang mendekati struktur penyebab gempa bumi serta membentuk klaster gempa pada zona subduksi di daerah penelitian. Hasil penelitian menunjukkan sebaran gempa bumi terhadap Mekanisme Fokus gempa bumi yang disebabkan subduksi menunjukkan jenis sesar naik dan sesar geser di daerah laut maupun darat Jawa Barat dan Sekitarnya berdasarkan struktur patahan, besar gempa dan kedalaman.

Kata Kunci: Relokasi Hiposenter, *Double Difference*, Mekanisme Fokus, Sesar.

ABSTRACT

The Java region, especially the West Java area, is located in the Indo-Australian-Eurasia Plate Subduction Zone which causes many earthquakes in this region both on land and at sea. One of the relocations of earthquake hypocenters was carried out for detailed structural analysis such as identification of fault zones and their distribution, this study aims to determine the distribution of earthquake hypocenters in West Java and surrounding areas in 2017-2021 and determine the distribution of faults that cause earthquakes. The Double Difference method is a method that does not use station correction for relocation. The Earthquake Focal Mechanism Method is the determination of the mechanism of the earthquake source by reading the initial motion of the P wave. Earthquake data were obtained from the BMKG catalog (Meteorological, Climatology and Geophysics Agency) earthquake and P wave polarity data from the ISC (International Seismological Center). The results of this study after relocation showed good results with the resulting residual value close to zero and the distribution of earthquakes approaching the structure that caused the earthquake and forming earthquake clusters in the subduction zone in the study area. The results of the study show that the distribution of earthquakes on the Earthquake Focal Mechanism caused by subduction shows the type of upswing and shear faults in the sea and land areas of West Java and surrounding areas based on the fault structure, earthquake magnitude and depth.

Keywords: *Hypocenter Relocation, Double Difference, Focus Mechanism, Fault.*

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim. Segala Puja dan Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan kesehatan dan kekuatan atas rahmat dan hidayah-Nya, sehingga Penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Di Jawa Barat Dan Sekitarnya Tahun 2017-2021 Menggunakan Metode *Double Difference* Dan Mekanisme Fokus**”. Tak lupa pula Penulis haturkan shalawat serta salam kepada baginda Nabi Muhammad SAW selaku uswatun hasanah bagi seluruh umatnya. Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini telah banyak masalah dan kendala yang didapatkan, namun dapat terselesaikan dengan baik dan Penulis berharap ini merupakan salah pembelajaran untuk melanjutkan kehidupan yang penuh tantangan. Penghargaan tertinggi taklupa saya haturkan kepada Bapak **Ramli** yang selalu menjadi tepat keluh kesah dan semangat penulis, Ibu **Nurmiati** selaku mama Penulis yang telah banyak memberikan nasihat -nasihatnya, Ibu **Marhumi** dan Bapak **Tahang** yang telah merawat penulis dan atas dukungannya juga sampai saat ini, kepada Saudara Penulis **Muhammad Ilyas** telah mendukung segala keputusan yang penulis ambil dan selalu mengerti kondisi penulis.

Dalam pengusunan Tugas Akhir ini, penulis juga banyak mendapatkan bimbingan, kritik dan saran yang membangunnya dari berbagai pihak. Olehnya itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih banyak kepada:

1. Bapak **Drs. Hasanuddin M.Si** selaku Penasehat Akademik penulis yang selalu memberikan arahan dan dukungannya selama mengenyam Pendidikan di Universitas Hasanudddin.

2. Bapak **Dr. Alimuddin Hamzah, M.Eng** dan Bapak **Dr. Erfan Syamsuddin, M. Si** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Geofisika FMIPA Unhas.
3. Bapak **Ir. Bambang Harimei, M.Si** selaku Pembimbing Utama penulis, selalu memberikan arahan, kritik, masukan dan ilmunya yang sangat bermanfaat bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak **Muh. Fawzy Ismullah M. S.Si, M.T**, selaku Pembimbing Pertama penulis yang selalu memberikan masukan dan ilmunya yang bermanfaat bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
5. Bapak **Virga Librian, M.T**, selaku Pembimbing selama Tugas Akhir di BMKG Stasiun Geofisika Kelas I Bandung yang membantu pengolahan data dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
6. Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si, M.T** dan Ibu **Makharani, S.Si, M.Si** selaku Dosen Penguji, terima kasih atas kritik, saran dan masukan yang membangun kepada penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. **Bapak dan Ibu Dosen** serta para **Staf Akademik Departemen Geofisika FMIPA Unhas** yang telah memberikan ilmu, arahan dan bantuannya selama penulis menempuh Pendidikan di Universitas Hasanuddin.
8. Keluarga penulis, **Sarina, Andi Rahma, Kakak Ana Iwan, Ismail** dan lain-lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, yang telah mendukung dan memberikan semangat kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.

9. Sahabat penulis dari sejak TK sampai sekarang **Uni, Jisdam, Rika**, terima kasih selalu kebersamaan sampai sekarang. Semangat semua.
10. Member Grup **TSP (Andi Ieli, Andinna, Andi Evi, Andi Rahma, Anti, Tenten)** penulis yang selalu hiburan kalau pulkam meski jarang sekali kumpul, terima kasih atas semua.
11. Member **Kalem Squad (Irma, Fira, Ainul, Ayu, Sri, Heral, Komang)**, teman dari maba sampai sekarang, terima kasih atas bantuannya selama ini.
12. Member grup **Basecamp Salama (Iis, Irma, Zefa, Wilda, Aini, Fira, Onding, Sri, Jihan, Cinu dan Dihar)**, terima kasih sudah mau jadi teman penulis selama di Makassar, tetap seperti itu.
13. Grup **Netflix Team (Dihar, Fira, Fya dan Wilda)**, terima kasih sudah menjadi wadah deeptalk penulis kadang-kadang, banyak menghibur, sering-sering nongkrong meski sibuk nantinya.
14. Member di grup **Tongkrongan Kami, Teh Fya dan Aa Fian**, terima kasih sudah mau dibebankan selama di Bandung.
15. Teman-teman **Himafi 2018 (Fira, Fya, Irma, Inul, Iis, Aini, Sri, Onding, Jihan, Jojo, Wilda, Fhaika, Mute, Nilam, Kiki, Juni, Eve, Ayu, Ocha, Windi, Sheren, Dhea, Yen, Nisa, Ilmi, Dena, Nuunu, Vika, Yesi, Geby, Wibu, Feni, Milda, Suci, Risda, Fiskah, Fina, Syana, Uli, Fatim, Sari, Cunni, Yuni, Cica, Acam, Aqila, Angela, Azmi, Aulia, Dede, Sinyo, Hasnan, Iful, Rahmat, Agung, Sarwan, Fian, Wawan, Yusuf, Komang, Heral, Uci, Masdar, Yusran, Yansen, Yusril, Azlan,**

Syahrul, Fauzaan, Muli, Indra, Hadi dan Slengos) yang telah banyak menyumbangkan kenangan bersama selama penulis menempuh pendidikan. Terima kasih.

16. Teman-teman **Mipa 2018** terkhusus teman pengurus **BEM FMIPA Unhas Periode 2021/2022**. Terima kasih telah memberikan penulis banyak pengalaman dan banyak pelajaran.

17. Kakak-kakak dan adik-adik **Himafi FMIPA Unhas, HMGF FMIPA Unhas** dan **KM FMIPA Unhas**, terima kasih sudah banyak menambah pengalaman pada penulis.

18. Teman-teman dan Kakak-kakak **Kampus Mengajar Angkatan 2 (Kak Mila, Kak Rachel, Onding, Heral, Agung)** terima kasih telah mau jadi partner mengajar yang banyak memberikan pelajaran dan pengalaman.

19. Teman-teman pengurus **SPE Unhas SC periode 2021/2022** terkhusus kepada **Divisi Human Resources Development**, terima kasih telah banyak memberikan pengalaman dan kesan berharganya selama mengurus.

20. Teman-teman **Student Volunteer JCB 2021** dan **PIT IAGI 2022**, terima kasih telah memperkenalkan banyak hal dan budaya kepada penulis, serta kenangannya yang takkan pernah dilupakan, tetap bersilaturahmi.

Serta orang-orang yang tidak dapat disebutkan penulis satu persatu. Terima Kasih.

Makassar, 17 November 2022



Marniati Ramli

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Ruang Lingkup.....	3
I.4 Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Geologi Regional Jawa Barat	5
II.1.1 Pola Sesar Jawa Barat	8
II.2 Gempa Bumi.....	11
II.2.1 Penyebab Terjadinya Gempa Bumi	11
II.2.2 Jenis Gempa Bumi	13
II.2.3 <i>Magnitude</i> Gempa Bumi.....	15
II.2.4 Gelombang Energi Gempa.....	15
II.3 Sesar.....	17
II.3.1 Jenis Sesar	17
II.4 Mekanisme Fokus Gempa (<i>Focal Mechanism</i>).....	20
II.5 Metode Geiger	23
II.6 Metode <i>Double Difference</i>	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	30
III.1 Lokasi Penelitian	30
III.2 Alat dan Bahan	31

III.2.1 Alat	31
III.2.2 Bahan	32
III.3 Metode Pengolahan Data.....	32
III.3.1 Pengolahan Data <i>Double Difference (HypoDD)</i>	32
III.3.2 <i>Focal Mechanism (Software AZMTAK)</i>	33
III.4 Bagan Alir Penelitian	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
IV.1 Sebaran Hiposenter Gempa bumi.....	35
IV.1.1 Pemetaan Hasil Sebelum dan Setelah Relokasi Hiposenter di Wilayah Jawa Barat dan Sekitarnya.....	35
IV.1.2 Analisis Seismotektonik di Jawa Barat dan Sekitarnya	38
IV.2 Validasi Residual Waktu Tempuh dan RMS Error.....	39
IV.3 Analisis Sebaran <i>Focal Mechanism</i> (Mekanisme Fokus) Gempa Bumi ..	42
BAB V PENUTUP.....	45
V.1 Kesimpulan.....	45
V.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	46
LAMPIRAN.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Geologi regional Jawa Barat (Sampurno, 1976)	5
Gambar 2. 2 Sesar di Jawa Barat	8
Gambar 2. 3 Mekanisme terjadinya gempa bumi	12
Gambar 2. 4 Jenis-Jenis gelombang (Elnashai dan Sarno, 2008)	16
Gambar 2. 5 Struktur sesar secara umum	17
Gambar 2. 6 Ilustrasi Normal Faults	18
Gambar 2. 7 Ilustrasi Reverse Faults	18
Gambar 2. 8 Ilustrasi Strike-slip Faults	19
Gambar 2. 9 Ilustrasi Oblique Faults	19
Gambar 2. 10 Geometri Sesar)	20
Gambar 2. 11 Penentuan mekanisme fokus (Cronin, 2010)	22
Gambar 2. 12 Penggambaran Metode Double Difference oleh Waldhauser dan Ellsworth (2000)	26
Gambar 2. 13 Prinsip kerja HypoDD	28
Gambar 3. 1 Peta Lokasi Penelitian	30
Gambar 3. 2 Peta Seismitas Jawa Barat tahun 2020-2021 sebelum relokasi	31
Gambar 3. 3 Bagan Alir Penelitian	34
Gambar 4. 1 (a) Peta sebaran hiposenter sebelum relokasi di Jawa Barat dan sekitarnya tahun 2017-2021. (b) Peta sebaran hiposenter setelah relokasi di Jawa Barat dan sekitarnya tahun 2017-2021.....	35
Gambar 4. 2 (a) Penampang melintang dari A-A' sebelum relokasi. (b) Penampang melintang dari A-A' setelah relokasi	38

Gambar 4. 3 (a) Histogram residual waktu tempuh sebelum relokasi (b) Histogram residual waktu tempuh setelah relokasi	40
Gambar 4. 4 (a) Histogram RMS sebelum relokasi. (b) Histogram RMS setelah relokasi.....	41
Gambar 4. 5 Sebaran Mekanisme Fokus Gempa Bumi pada daerah penelitian ..	42

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Jawa Barat merupakan salah satu daerah yang memiliki kondisi geografis dan geologi yang unik, struktur geologi yang berkembang di Jawa Barat dipengaruhi oleh aktivitas lempeng Indo-Australia yang menunjam di bawah lempeng Eurasia, akibat aktivitas tumbukan lempeng ini akan menghasilkan elemen tektonik di Jawa Barat berupa palung, busur luar non vulkanik, cekungan depan busur, jalur magmatisma, cekungan belakang busur dan paparan sunda oleh Katili (1973, dalam Haryanto, 2006).

Wilayah pantai selatan Provinsi Jawa Barat yang terletak dekat dengan pusat gempa bumi dan pada umumnya tersusun oleh endapan Kuarter, berupa endapan aluvium, endapan rombakan gunungapi, serta endapan tersier yang sebagian telah mengalami pelapukan, sehingga bersifat memperkuat efek guncangan gempa bumi. Wilayah yang tersusun oleh endapan kuarter tersebut akan mengalami guncangan gempa bumi lebih kuat dibandingkan wilayah lainnya.

Geologi daerah Jawa Barat dikontrol atas dua tumbukan lempeng yang berbeda jenis, lempeng pertama berada di bagian utara yaitu lempeng Benua Eurasia dan lempeng kedua berada di selatan yaitu lempeng Samudera Hindia_Australia. Kedua lempeng tersebut saling bertumbukan yang mengakibatkan Lempeng samudera menunjam ke lempeng benua dan membentuk morfologi palung laut (*trench*). Akibatnya zona tersebut mungkin merupakan sumber utama gempa bumi yang melanda daerah tersebut (Van Bemmelen, 1949).

Gempa bumi di daerah Jawa Barat termasuk gempa dangkal, hal ini disebabkan karena aktifitas tiga sesar yang aktif di Jawa Barat, yaitu sesar Lembang, sesar Cimandiri dan Sesar Baribis. Struktur sesar arah barat-timur berjenis sesar naik dan struktur sesar arah utara-selatan berupa sesar mendatar (Van Bemmelen, 1949).

Analisis kondisi tektonik dalam studi gempa bumi dan aktivitas tektonik dari suatu daerah sangat penting untuk menentukan parameter sumber seismik secara akurat. Pada penentuan hiposenter diperlukan analisis tektonik yang terperinci seperti identifikasi struktural. Metode yang digunakan pun beragam namun pada penelitian ini relokasi hiposenter gempa bumi menggunakan *Double Difference* yang digunakan untuk mendapatkan posisi hiposenter gempa bumi yang lebih akurat dari sebelumnya kemudian dari hasil penelitian didapatkan persebaran hiposenter yang lebih mendetail dan akurat (Prasetya, 2006). Algoritma *Double Difference* mampu meminimalkan *error* tanpa menggunakan koreksi stasiun, jika kedua jarak antara dua hiposenter yang sangat kecil dibandingkan dengan jarak anatara dua hiposenter tersebut terhadap stasiun maka pola sinar gelombang atau *raypath* yang dihasilkan dapat dikatakan sama antara kedua hiposenter tersebut (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).

Patahan atau sesar (*fault*) merupakan salah satu akibat yang ditimbulkan dari aktivitas tektonik. Patahan atau sesar merupakan bentuk bergerak relatif terhadap blok yang lain. Pergerakan ini bisa relatif turun, naik, ataupun mendatar terhadap blok yang lain. Pemahaman tentang karakteristik patahan atau sesar yang

mengakibatkan gempa bumi sangat penting untuk mengetahui jenis dan karakteristik gempa bumi (Setyowidodo dan Santosa, 2011).

Untuk mengetahui karakteristik patahan atau sesarnya maka diperlukan juga analisis mengenai mekanisme sumber gempa (*focal mechanism*). Mekanisme fokus gempa bumi digunakan untuk mengetahui karakteristik gempa dan meminimalisir kerusakan yang mungkin terjadi, dengan menentukan nilai bidang sesar yang meliputi *strike*, *dip* dan *rake*.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, Adapun rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pola persebaran hiposenter gempa bumi di Jawa Barat dan sekitarnya sebelum dan sesudah relokasi dengan menggunakan metode *Double Difference*?
2. Bagaimana jenis sesar yang terdapat di Jawa Barat dan sekitarnya penyebab gempa bumi menggunakan mekanisme fokus?

I.3 Ruang Lingkup

Data yang digunakan merupakan data katalog BMKG pada tahun 2020-2021 di Jawa Barat pada koordinat $104^{\circ}8' - 108^{\circ}41'$ BT dan $5^{\circ}50' - 7^{\circ}50'$ LS. Data terdiri dari waktu tiba gelombang, posisi hiposenter dan posisi stasiun. Data gempa bumi direlokasi menggunakan metode *Double Difference* dengan *software* HypoDD. Pengolahan data untuk mendapatkan *beachball* mekanisme fokus menggunakan

data gempa hasil relokasi. Data *fase polaritas* ISC (*International Seismological Center*) untuk beberapa gempa terpilih dari 2017-2021 diolah menggunakan *software AZMTAK*. Data tersebut diolah menjadi pola distribusi hiposenter gempa bumi dan mekanisme fokus menggunakan nilai *strike*, *dip* dan *rake*.

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini, sebagai berikut:

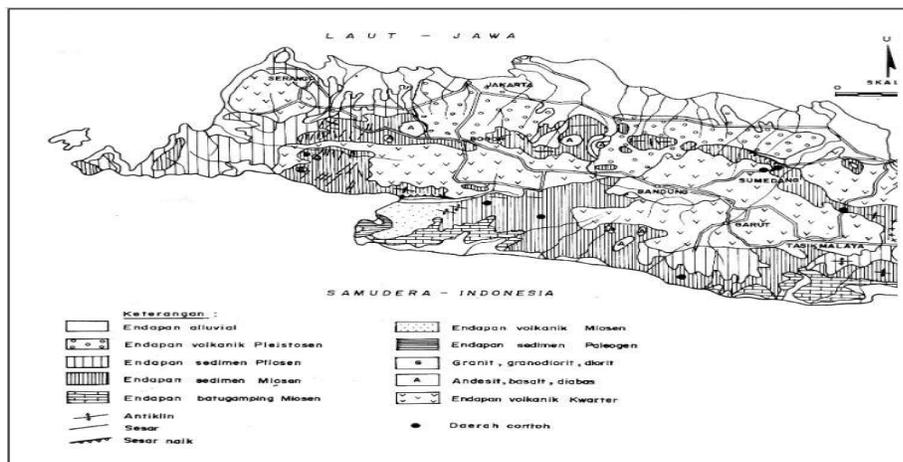
1. Mengetahui pola persebaran hiposenter gempa bumi di daerah Jawa Barat dan sekitarnya sebelum dan sesudah relokasi menggunakan *double difference*.
2. Mengetahui jenis sesar penyebab terjadinya gempa bumi Jawa Barat dan sekitarnya pada tahun 2017-2021 menggunakan mekanisme fokus.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Geologi Regional Jawa Barat

Provinsi Jawa Barat terletak pada $104^{\circ}08'$ - $108^{\circ}41'$ BT dan $5^{\circ}50'$ - $7^{\circ}50'$ LS sebelah barat berbatasan dengan Selat Sunda, sebelah Utara dengan Laut Jawa dan daerah Khusus Ibukota Jakarta, sebelah Timur berbatasan dengan Provinsi Jawa Tengah dan sebelah Selatan dibatasi oleh Samudera Indonesia. Jawa Barat dikontrol oleh hasil aktivitas tumbukan dua lempeng yang berbeda jenis yang menghasilkan komposisi tektonik utama di Jawa Barat yaitu palung, busur luar non vulkanik, cekungan depan busur, jalur magmatisma, cekungan belakang busur dan paparan sunda. Lempeng bagian utara yaitu Lempeng Benua Eurasia dengan komposisi granitis dan lempeng Selatan yaitu Lempeng Samudra Hindia-Australia dengan kandungan basaltis, hal ini menyebabkan kedua lempeng ini saling bertumbukan yang mengakibatkan Lempeng Samudra menunjam di bawah lempeng benua (Hamilton, 1979).



Gambar 2. 1 Geologi regional Jawa Barat (Sampurno, 1976)

Pada jaman pra tersier Jawa Barat merupakan kompleks mélange yaitu zona percampuran antara batuan kerak samudera dengan batuan kerak benua. Terdiri dari batuan metamorf, vulkanik dan batuan beku yang diketahui hanya adanya dari data pemboran di bagian utara laut Jawa Barat (Martodjojo, 1984).

Pada tersier awal (paleosen) terbentuk komplek Mélange pada Barat Daya Jawa Barat (Teluk Cileutuh) yang diduga sebagai bagian zona penunjaman ke arah Jawa Tengah. Di sebelah utara Jawa Barat mulai di endapkan produk hasil letusan gunung api yang terendapkan sebagai formasi Jatibarang sementara. Pada kala Eosen, Jawa Barat berada pada kondisi benua, yang ditandai oleh ketidakselarasan, tetapi Rajamandala-Sukabumi merupakan area terestial fluvial dimana hadir formasi Gunung Walat yang mengisi depresi intrac basin.

Pada kala Oligosen Awal ditandai oleh ketidakselarasan pada Puncak Gunung Walat berupa konglomerat batu pasir kuarsa yang menunjukkan suatu tektonik uplift di seluruh daerah. Pada kala Oligosen akhir diawali dari transgesi marin yang terbentuk dari selatan-timur (SE) ke arah utara-timur (NE). pada kala ini juga diendapkan formasi Gantar pada bagian utara yang berupa terumbu karbonat dan berlangsung selama siklus erosi dan transgesi yang berulang kali, pada waktu yang sama terjadi pengangkatan sampai Meosen Awal bersamaan dengan aktivitas vulkanik yang menghasilkan struktur lipatan pada sesar dengan arah barat daya timur laut.

Pada Meosen setelah formasi Rajamandala terbentuk maka pada cekungan Bogor diisi oleh endapan turbidit dan volcanic debris. Sementara pada bagian selatan diendapkan formasi Jampang dan Cimandiri. Di sebelah utara yang diendapkan

formasi Parigi dan formasi subang. Pengangkatan kala Meosin tengah diikuti oleh pelipatan dan pensesaran berarah barat-timur. Pliosen Akhir mengalami pengangkatan yang diikuti oleh pelipatan lemah, zona Cimandiri mengalami pensesaran mendatar.

Zaman Kuartar peristiwa geologi banyak aktivitas oleh vulkanisme sehingga pada seluruh permukaan tertutupi oleh satuan produk gunung api. Daerah Bandung tersumbat akibat sungai Citarum oleh lava erupsi Tangkuban Perahu sehingga tergenang oleh air dan terbentuk danau Bandung. Selama tergenang maka daerah Bandung dan sekitarnya seperti Padalarang dan Cimahi banyak terbentuk endapan-endapan danau. Sampai akhirnya danau bocor di daerah gamping Sang Hyang Tikoro dan selama itu terendapkan lagi produk-produk gunung api dari Tangkuban Perahu.

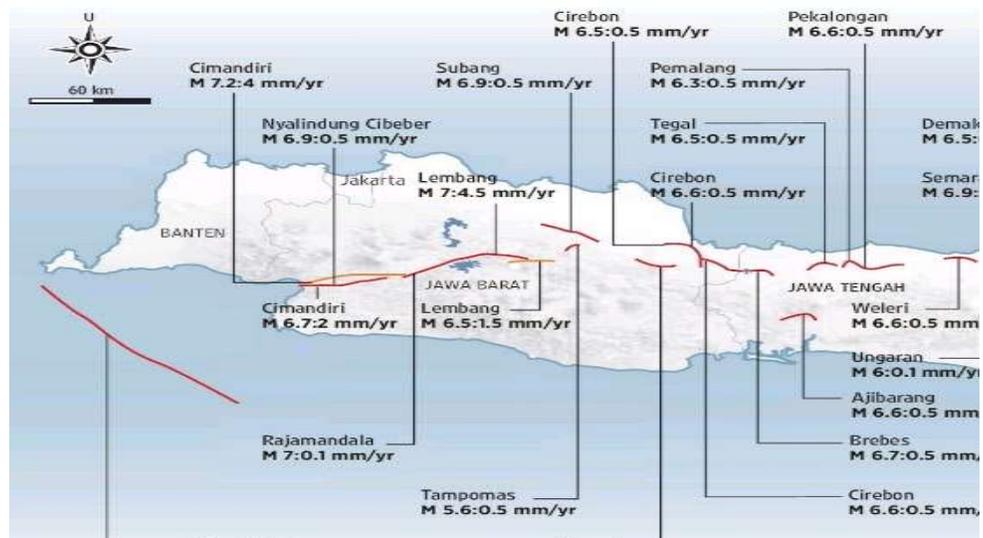
Struktur regionalnya memiliki empat pola struktur akibat adanya empat aktifitas tektonik, struktur pelipatan dan pensesaran yang mempunyai arah barat ke timur. Diakibatkan oleh pengangkatan yang berlangsung selama Miosen tengah struktur pelipatan dan pensesaran yang mempunyai arah sekitar $N45^{\circ}E$. struktur ini diakibatkan oleh pengangkatan yang disertai oleh vulkanisme pada Oligosen akhir sampai Miosen awal.

Struktur di sebelah timur Jawa Barat mempunyai arah sekitar arah sekitar $N315^{\circ}E$, membentang ke barat di utara Bandung berarah timur-barat, semakin ke barat maka struktur berarah umum barat daya. Struktur ini diakibatkan oleh aktivitas tektonik yang berlangsung selama kuartar. Sementara itu di dataran Jakarta

mempunyai struktur dengan arah Utara-Selatan. Di Jawa Barat daerah tengah arah struktur sekitar N75⁰E yang ditunjukkan oleh Tinggian Rajamandala.

Pengangkatan pada Pliosen akhir yang diikuti oleh [erlipatan lemah. Pada formasi Bentang hingga batuan formasi ini relatif memiliki kemiringan lapisan yang landai, selanjutnya diikuti dengan kegiatan tektonik sehingga Zona Cimandiri mengalami pensesaran mendatar yang mempunyai arah sekitar N45⁰E memotong struktur sebelumnya (Sampurno, 1976).

II.1.1 Pola Sesar Jawa Barat



Gambar 2. 2 Sesar di Jawa Barat

Daerah Jawa Barat memiliki jalur sesar yang berarah barat-timur (pola meratus), utara selatan (pola sunda), timurlaut-baratdaya dan baratlaut-tenggara. Struktur sesar dengan arah barat-timur umumnya berjenis sesar naik sedangkan struktur sesar yang lainnya berupa sesar mendatar. Terdapat tiga jalur sesar besar di Jawa Barat, sebagai berikut (Haryanto, 2006):

a) Sesar Cimandiri

Sesar Cimandiri yang merupakan sesar paling tua (umur kapur), berlokasi mulai dari Teluk Pelabuhanratu menerus ke timur melalui lembah Cimandiri. Cipatat-Rajamandala, Gunung Tanggubanperahu-Burangrang dan diduga menerus ke timur laut menuju Subang. Menurut Martodjojo dan Pulunggono (1986) jalur sesar ini berarah timurlaut-baratdaya dengan jenis sesar mendatar hingga *oblique* (miring) dan dikelompokkan kedalam pola Meratus.

Pada segmen Cipatat menyebabkan batuan dari Formasi Citarum dan Formasi Rajamandal terlipat kuat sehingga bidang perlapisan batuan di kedua formasi tersebut umumnya di atas 50° . Kemiringan bidang lapisan batuan ada yang mencapai 80° hingga 90° pada sungai Cibago, Rajamandala, di beberapa segmen adapula telang mengalami pembalikan.

Segmen Rajamandala pada jalur sesar Cimandiri berarah timurlaut-baratdaya. Arah jalur sesarnya relatif sejajar dengan arah jurus perlapisan batuan. Segmen ini dipengaruhi oleh komponen gerak naik atau sesar naik dengan kemiringan lebih besar dari 70° dengan sifat gerak *dip slip* naik.

b) Sesar Baribis

Kelurusan regionalnya berada di barat laut tenggara dengan arah kelurusan berikutnya menerus ke arah tenggara. Di daerah Kadipaten, Desa Baribis ditemukan beberapa bidang sesar dan struktur sesar minor yang memotong batu-gamping, ukurannya relatif besar dengan arah jurus dan sudut kemiringan bidangannya berkisar antara $N 280^{\circ}E - N 300^{\circ}E / 30^{\circ} - 45^{\circ}$,

pitch berkisar $60^{\circ} - 89^{\circ}$. jenis sesar naik berdasarkan nilai *pitch* dan kemiringan bidang sesarnya adalah *thrust right slip fault*. Selain itu, adapula sejumlah bidang sesar pergerakan lateral yang berarah N 320° E – N 335° E / $75^{\circ} - 80^{\circ}$, dengan *pitch* berkisar $5^{\circ} - 15^{\circ}$. Selanjutnya ditemukan sejumlah struktur sesar minor dengan arah yang beragam dan sifat bergeseran naik, normal dan mendatar, di beberapa bidang sesar minor dijumpai adanya dua gores garis yang saling berpotongan.

Singkapan batuan sesar beribis pada Formasi Kaliwangu (Pliosen) dan Formasi Citalang (Pliosen-Plistosen), dengan kemiringan lapisan batuan yang cukup besar yaitu diatas 50° hingga 80° . Selanjutnya pada terdapat batuan yang terlipat kuat ini dijumpai sejumlah sesar minor, seperti yang dijumpai di Sungai Cibayawak, Sungai Cipelang, Sungai Cipanas dan Sungai Cikandung. Besarnya kemiringan lapisan batuan dan ditemukannya sejumlah sesar minor tersebut diyakini sebagai akibat adanya tektonik kompresi yang cukup kuat. Tektonik inilah sebagai penyebab terbentuknya Sesar Baribis di sepanjang jalur tersebut.

c) Sesar Lembang

Di bagian Utara Bandung terdapat sesar Lembang yang membentang dari arah barat-timur sepanjang kurang lebih 30 km. jenis sesarnya merupakan sesar normal (sesar turun) dimana blok bagian utara relative turun membentuk morfologi pedataran atau disebut pedataran Lembang sedangkan *footwall* yang berada di bagian selatan membentuk jalur perbukitan bararah barat-timur. Gawir Sesar Lembang terdiri atas

beberapa bidang yang menangga (steep fault). Walaupun gawir sesarnya berkembang baik namun tidak ada jejak-jejak pergeseran berupa cermin sesar. Pada lokasi ini berkembang pula struktur kekar pada batuan beku andesitic dengan intensitas sangat tinggi.

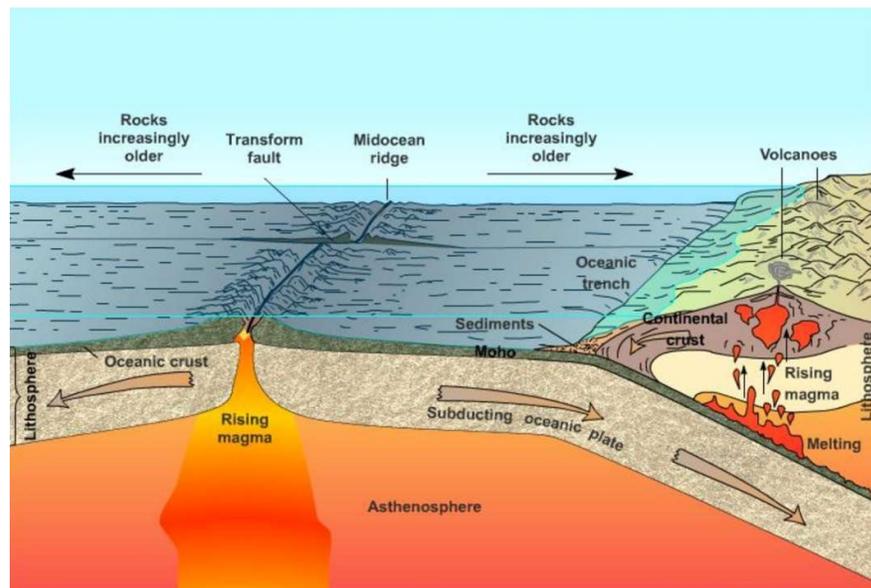
II.2 Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan fenomena bumi yang akan menimbulkan getaran di bumi karena akibat pergerakan lempeng, aktivitas vulkanik dan runtuhannya batuan yang dapat terjadi kapan saja (Rysnawati, dkk., 2017). Terdapat parameter dalam gempa bumi yaitu waktu terjadinya gempa bumi meliputi waktu terjadinya gempa bumi, episenter, kedalaman gempa, magnitudo gempa dan bidang patahan yang meliputi *strike*, *dip* dan *rake*. *Strike* merupakan sudut yang dibentuk oleh jurus sesar dengan arah utara. *Dip* adalah sudut yang dibentuk oleh bidang sesar dengan horizontal dan diukur pada bidang vertikal dengan arahnya tegak lurus pada jurus patahan. *Rake* merupakan sudut yang dibentuk arah slip dan jurus patahan (Pratama dan Santosa, 2018). Ada dua titik terjadinya gempa bumi yaitu titik pusat gempa yang terjadi di dalam bumi disebut hiposenter dan episenter merupakan titik pusat gempa yang terjadi di permukaan bumi.

II.2.1 Penyebab Terjadinya Gempa Bumi

Gempabumi dimanifestasikan sebagai guncangan tanah dan batuan yang disebabkan oleh pelepasan energi secara tiba-tiba di bagian kerak bumi. Energi ini dapat berasal dari sumber yang berbeda, seperti dislokasi kerak, letusan gunung api, runtuhnya rongga bawah tanah pada batuan karst atau oleh ledakan buatan manusia. Namun gempabumi didefinisikan sebagai gangguan alami yang dipicu

oleh dislokasi bagian kerak. Gempabumi menghasilkan getaran dan guncangan yang besarnya beragam. Getaran dan guncangan yang ditimbulkan bisa sangat dahsyat dan mampu meruntuhkan infrastruktur yang dibangun manusia, namun bisa saja berupa getaran kecil tidak dirasakan oleh manusia dan hanya terekam oleh seismometer. Gempa bumi terjadi saat batuan mengalami keretakan di bawah permukaan saat dua lempeng tektonik bergesekan satu sama lain. Hal ini mengakibatkan getaran atau gelombang yang terjadi di bawah permukaan dan menjalar melalui bumi kemudian meyebar ke sepanjang permukaan. Semakin Panjang gelombang kejut yang terjadi maka semakin besar pula gempa yang ditimbulkan (Afnimar, 2009).



Gambar 2.3 Mekanisme terjadinya gempa bumi

Salah satu teori yang menjelaskan mekanisme terjadinya gempa bumi yaitu “*Elastic Rebound Theory*”, menurut Seismolog Amerika, Reid (Bullen dan Bolt, 1985) menyatakan bahwa gempa bumi merupakan gejala alam yang disebabkan

oleh pelepasan energi regangan elastik batuan yang disebabkan adanya deformasi batuan yang terjadi pada lapisan litosfer. Deformasi batuan terjadi akibat adanya tekanan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada lapisan bumi. Tekanan atau regangan yang terus-menerus menyebabkan daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan mulai terjadi pergeseran dan akhirnya terjadi patahan secara tiba-tiba.

II.2.2 Jenis Gempa Bumi

Gempa bumi berdasarkan sumber terjadinya gempa yaitu (Tjasyono H. K., 2003):

- 1) Gempa bumi Tektonik, yaitu gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas pergerakan lempeng tektonik misalnya adanya tumbukan antar lempeng pembentuk kulit bumi.
- 2) Gempa bumi Vulkanik, yaitu gempa bumi yang terjadi karena adanya aktivitas vulkanik misalnya desakan magma dari gunungapi ke permukaan. Gempa bumi ini memiliki kekuatan kurang dari 4 SR dan termasuk gempa bumi sedang.
- 3) Gempa bumi Runtuhan, yaitu gempa bumi yang terjadi karena adanya runtuh atau longsor dari massa batuan. Gempa bumi ini memiliki kekuatan yang sangat kecil sehingga getarannya tidak bisa terasa dan hanya bisa terdeteksi oleh seismograf. Gejala ini disebut dengan tremor dan banyak terjadi di pegunungan.
- 4) Gempa bumi Buatan, yaitu gempa bumi yang sengaja dibuat oleh manusia seperti ledakan dinamit atau ledakan nuklir untuk mencari bahan tambang.

Berdasarkan kedalaman hiposenter gempa bumi dibedakan atas, gempa dalam, sedang, dan dangkal. Sebagia berikut:

- 1) Gempa dalam memiliki kedalaman hiposenter lebih dari 300km, dapat mencapai permukaan tetapi memiliki amplitudo kecil sehingga tidak berbahaya.
- 2) Gempa sedang memiliki kedalaman hiposenter antara 60 dan 300 km.
- 3) Gempa dangkal mempunyai kedalaman hiposenter kurang dari 60km.

Berdasarkan proses terbentuknya, pola umum gempa bumi dibedakan dalam tiga jenis (Tjasyono H. K., 2003):

- 1) Tipe I: yaitu gempabumi utama (*main shock*) yang tanpa didahului gempa pendahuluan (*fore shock*), tetapi diikuti oleh banyak gempa susulan (*after shock*). Gempabumi tipe ini biasanya terjadi di daerah yang mempunyai medium homogen dengan stress yang bekerja hampir merata. Sebagian besar gempabumi tektonik yang terjadi di bumi tergolong jenis ini.
- 2) Tipe II: yaitu sebelum gempabumi utama (*main shock*) terjadi, didahului oleh gempa-gempa pendahuluan (*fore shock*) dan kemudian diikuti oleh gempa susulan yang cukup banyak. Gempabumi tipe ini terjadi pada daerah dengan struktur batuan/medium yang tidak seragam dengan distribusi stress yang bekerja juga tidak seragam.
- 3) Tipe III: yaitu gempa yang tidak mempunyai gempa utama (*main shock*). Gempabumi tipe ini disebut gempabumi "swam" dan gempabumi ini biasanya terjadi dalam daerah yang terbatas. Gempabumi ini terjadi di daerah gunung

api dan pada daerah yang struktur mediumnya tidak seragam dengan stress yang bekerja terkonsentrasi pada area yang terbatas.

II.2.3 *Magnitude* Gempa Bumi

Berdasarkan kekuatan, magnitude (M) merupakan kekuatan gempa bumi atau ledakan yang berdasarkan pengukuran amplitude maksimum pada seismik. Kemudian madnitudo secara skala relative terhadap suatu kekuatan gempa bumi.

Menurut Hagiwara (1964) dapat diklarifikasi menjadi:

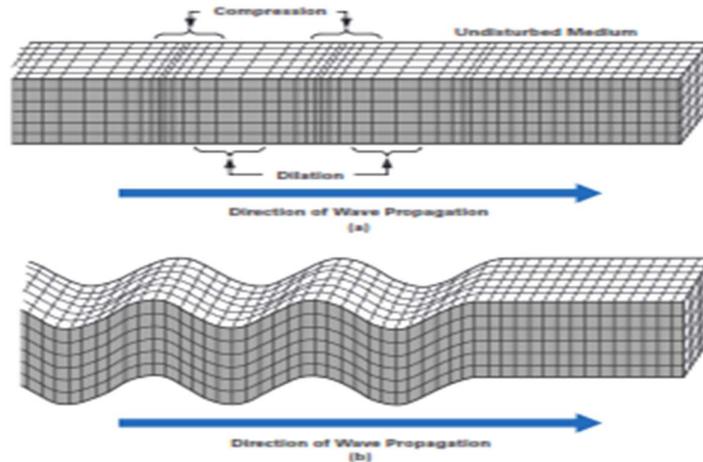
- 1) Gempa sangat besar, $M > 8,0$
- 2) Gempa besar, $7,0 < M < 8,0$
- 3) Gempa sedang, $4,0 < M < 5,0$
- 4) Gempa kecil $3,0 < M < 4,0$
- 5) Gempa mikro, $1,0 < M < 3,0$
- 6) Gempa ultra mikro, $M < 1,0$

Dengan M adalah Magnitudo. Ukuran besar gempa bumi dinyatakan sebagai magnitude sedangkan besaran gempa bumi adalah Skala *Richter* (SR). terdapat empat jenis magnitude yang umum digunakan yaitu *magnitude local*, *magnitude body*, *magnitude* permukaan dan magnitude momen (Subardjo, 2008).

II.2.4 Gelombang Energi Gempa

Gelombang energi gempa atau biasa dikenal gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat di dalam dan dipermukaan bumi yang bersumber dari gempa, ledakan (proses kimia atau nuklir), erupsi gunung api dan longsor. Terdapat dua jenis gelombang, yaitu gelombang yang merambat di permukaan

(*surface waves*) dan gelombang yang merambat di kedalaman bumi (*body waves*) (Gazali, 2017).



Gambar 2. 4 Jenis-Jenis gelombang (Elnashai dan Sarno, 2008)

1. Gelombang Badan (*Body Waves*)

Gelombang badan dibedakan menjadi dua macam, yaitu:

a. Gelombang P atau Gelombang Longitudinal

Gelombang P atau gelombang primer merupakan gelombang dengan penjaran gelombangnya searah dengan medium yang dilewati, Adapun medium yang dilewati dapat berupa gas, cair dan padat.

b. Gelombang S atau Gelombang Transversal

Gelombang S atau gelombang sekunder yang hanya bisa merambat dalam medium padat dengan gerakan partikel yang dilewati adalah tegak lurus terhadap penjaran gelombang S.

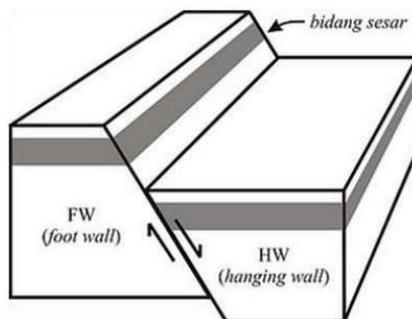
II.3 Sesar

Kejadian ini terjadi ketika batuan mengalami retakan terlebih dahulu yang mendapatkan gaya sehingga timbul adanya retakan (*fracture*). Tekanan yang diberikan akan memberikan perubahan pada batuan dengan waktu yang sangat lama dan hingga memberikan gerakan seperserat sentimeter sampai beberapa meter yang akan menimbulkan gaya yang sangat besar dan akan berdampak getaran bagi sekitarnya saat suatu batuan mengalami patahan atau gempa bumi. Arah pergerakan pada suatu sesar tergantung pada kekuatan batuan.

Sesar aktif adalah sesar yang bergerak pada kurun waktu 10.000 tahun yang lalu. Sesar berpotensi aktif adalah sesar yang bergerak pada kurun waktu waktu 2 juta tahun yang lalu. Sedangkan sesar tidak aktif adalah sesar yang belum atau tidak pernah bergerak dalam kurun waktu 2 juta tahun yang lalu (Massinai, 2015).

II.3.1 Jenis Sesar

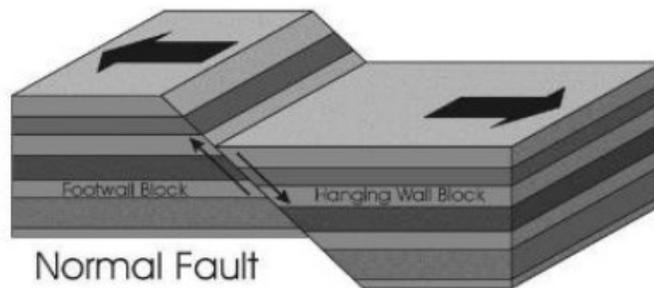
Menurut Anderson (1951) bahwa jenis sesar dibagi berdasarkan atas *principle stress*. *Principle stress* adalah *stress* yang bekerja tegak lurus bidang sehingga nilai komponen *shear stress* pada bidang tersebut adalah nol. Bidang tersebut dikenal sebagai bidang utama.



Gambar 2. 5 Struktur sesar secara umum

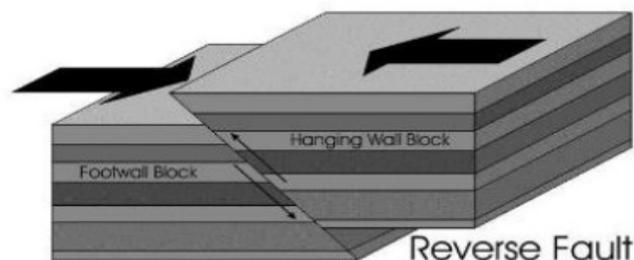
Pergerakan batuan dan lempeng akan sangat mempengaruhi terjadinya gempa bumi. Arah dari pergerakan suatu patah disebut sebagai bidang patahan, apabila bidang patahan tidak tegak, maka batuan yang terletak di atasnya dikenal sebagai *hanging wall* sedangkan bagian bawahnya disebut *foot wall* seperti pada gambar di atas. Adapun jenis sesar, sebagai berikut:

- 1) Sesar normal (*normal fault*) patahan turun yaitu dimana *hanging wall* lebih relative turun daripada *footwall*, arah pergeseran bidang patahan turun seperti yang ditunjukkan pada gambar. Patahan ini termasuk *dip-slip fault* dikarenakan pergeseran patahan tersebut sesuai dengan arah *dip*.



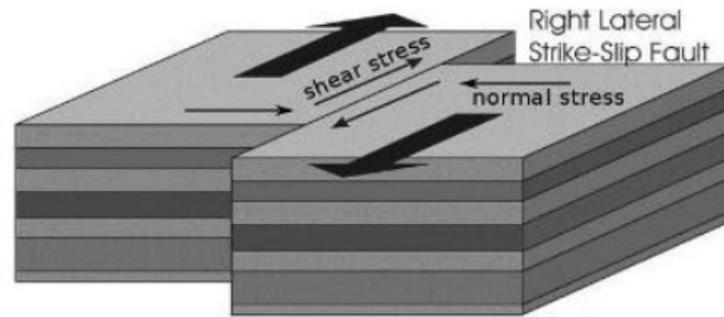
Gambar 2. 6 Ilustrasi *Normal Faults*

- 2) Sesar naik (*reverse fault*) terbentuk apabila *hanging wall* lebih relative naik terhadap *footwall*, arah pergeseran bidang pada patahan naik, patahan ini termasuk *dip-slip faults*.



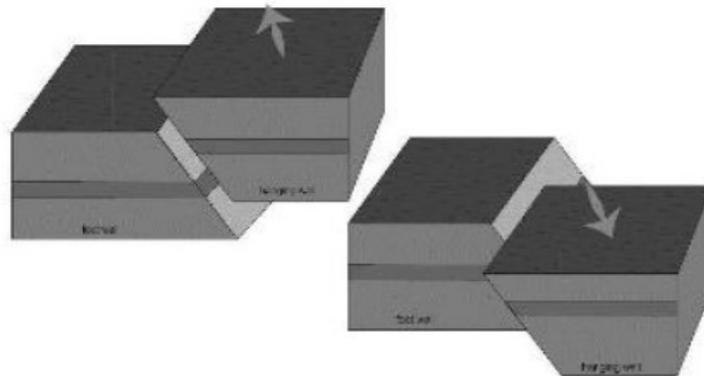
Gambar 2. 7 Ilustrasi *Reverse Faults*

- 3) Sesar mendatar (*strike-slip fault*) merupakan patahan dengan arah pergeseran patahan tersebut sesuai dengan arah *strike* dimana gerakannya mendatar.



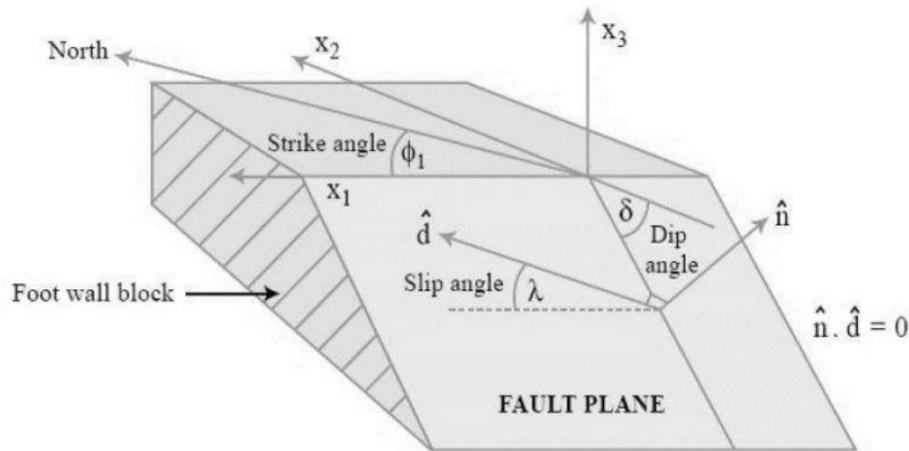
Gambar 2. 8 Ilustrasi *Strike-slip Faults*

- 4) Sesar Miring (*Oblique Faults*) merupakan kombinasi antara *strike-slip fault* dan *dip-slip faults* arah gerakannya bergerak bersamaan ke arah *dip* dan *strike* lapisan batuan.



Gambar 2. 9 Ilustrasi *Oblique Faults*

Dalam penentuan orientasi bidang sesar, ada empat parameter/geometri sesar, yaitu sebagai berikut (Okal, 2011):



Gambar 2. 10 Geometri Sesar

- 1) *Strike* (ϕ) merupakan sudut yang dibentuk antara jurus sesar dengan arah utara, diukur searah jarum jam ($0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$).
- 2) *Dip* (δ) merupakan sudut yang dibentuk oleh bidang sesar dengan bidang horizontal diukur dari permukaan horizontal ($0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$)
- 3) *Rake* merupakan sudut yang dibentuk oleh arah strike dengan arah slip
- 4) Pergerakan *relative (slip)* (λ) adalah pergeseran *relative* pada sesar yang diukur dari satu blok ke blok lain pada bidang sesar. *Slip* merupakan pergeseran titik yang sebelumnya berimpit. *Slip angle* (λ), dimana arah slip didasarkan pada arah gerak *hangingwall*, ($-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$). Jika sesar rupa *thrust fault* $\lambda > 0^\circ$ sedangkan jika sesar normal fault maka $\lambda < 0^\circ$.

II.4 Mekanisme Fokus Gempa (*Focal Mechanism*)

Mekanisme fokus gempa adalah gambaran deformasi inelastik di kawasan sumber yang menghasilkan gelombang seismik (Serhalawan, 2017), mekanisme focus gempa bumi dapat secara otomatis ditentukan menggunakan gelombang

jaringan *seismic local* maupun luas (Ekstrom, dkk, 2012 dalam Uchide, 2020).

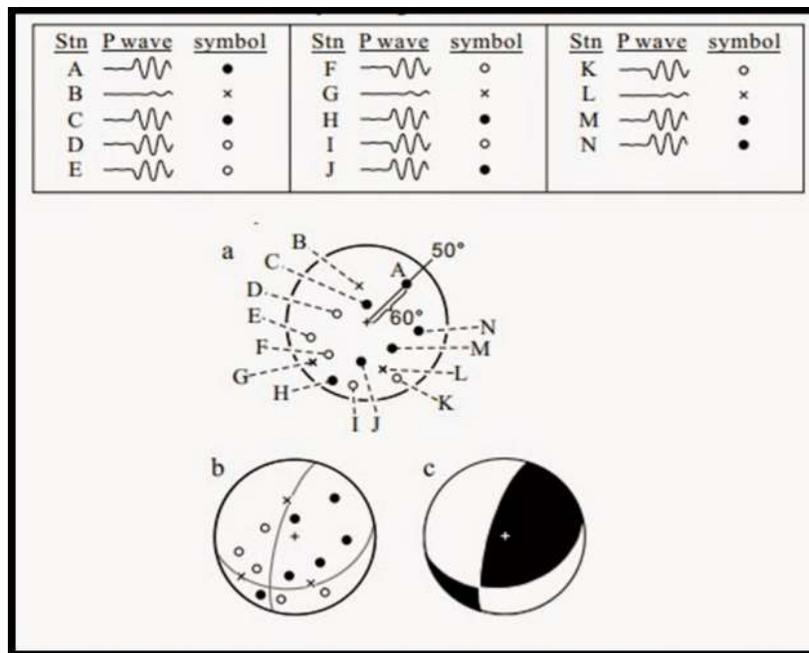
Untuk mengetahui dan menentukan mekanisme sumber gempa yaitu dengan cara membandingkan pola arah gerak awal gelombang seismik yang teramati dengan pola teoritis.

Mekanisme fokus gempa bertujuan untuk menerangkan sifat penjalaran energi gempa bumi yang berpusat di hiposenter atau fokus gempa bumi. Mekanisme fokus sangat berkaitan dengan sesar atau patahan karena jika arah gerakan sesar dan arah bidang sesar diperoleh maka mekanisme fokus gempa tersebut dapat dianalisa (Alamsyah,2017).

Bentuk gelombang seismik tergantung dari sumber gempa yang berupa sesar atau patahan. Oleh sebab itu, informasi mengenai gelombang seismik yang tercatat di dalam seismogram dapat ditentukan karakteristik sesar atau patahannya. Untuk mengetahui karakteristiknya diperlukan analisis tentang mekanisme pusat gempabumi yaitu penentuan orientasi bidang sesar yang meliputi harga *strike* dan *dip*.

Studi mekanisme sumber gempa dengan gerak awal gelombang P bertujuan untuk menentukan sesar gempa berdasarkan bidang dari hasil pengamatan polaritas gelombang P yang dipancarkan oleh hiposenter. Saat gempa bumi terjadi gelombang terpancarkan kesegala arah dengan phase gelombang. *Phase* awal tercatat lebih dahulu adalah gelombang P karena memiliki kecepatan gelombang terbesar dari gelombang lainnya. Sistematika distribusi gelombang P adalah (Afnimar, 2009):

1. Gerakan tanah yang menyebabkan gempa dipolaritaskan sebagai gerakan replusif (kompresi/tekanan) dan gerakan atraktif (dilatasi) atau tarikan hiposenter.
2. Distribusi yang sistematis ini mengakibatkan ruang di sekeliling episenter dapat dibagi menjadi empat kuadran oleh dua garis (disebut garis nodal atau bidang nodal).



Gambar 2. 11 Penentuan mekanisme fokus (Cronin, 2010)

Pada gambar di atas gambar (a) merupakan hasil polarisasi yang diterima stasiun-stasiun, semua diplot di stereonet. Kemudian pada gambar (b) dikelompokkan sesuai polanya. Gambar (c) terbentuk solusi bidang patahan (naik/turun/geser/*oblique*).

II.5 Metode Geiger

Metode Geiger merupakan metode yang prinsipnya yaitu proses iterasi dengan optimasi *least square* untuk menentukan sebaran hiposenter dan episenter. Dasar dari metode ini adalah memungkinkan selisih antara data *travel time* dengan data *travel time* observasi dan kalkulasi yang minim dengan perhitungan menggunakan jaringan stasiun pengamat gempa bumi dengan memanfaatkan model *travel time* bumi yang permukaannya tidak datar atau lengkung (Nugraha *et al.*, 2017).

Metode Geiger dilakukan untuk meminimalisir nilai residual (r^j) anatara waktu tempuh gelombang seismik yang terekam stasiun ke-i dari hiposenter (t^{obs}) dengan waktu tempuh kalkulasi dapat dihitung berdasarkan model kecepatan 1D bawah permukaan. Dalam hal ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$r_i = T_i^{obs} - T_i^{cal} \quad (2.1)$$

perbedaan antara model kecepatan yang sama dengan keadaan sebenarnya menyebabkan sturuktur bawah permukaan yang cukup kompleks, maka dari itu persamaan di atas merupakan persamaan non linear, sehingga persamaan tersebut dilinearkan dengan ekspansi *deret Taylor orde* pertama, dengan persamaan sebagai berikut:

$$dr_i = \frac{\partial r_i}{\partial x} dx + \frac{\partial r_i}{\partial y} dy + \frac{\partial r_i}{\partial t} dt \quad (2.2)$$

Dimana:

r = residual

t = waktu asal

T = waktu tempuh gelombang

i = indeks stasiun pengamatan

x_0, y_0, z_0 = lokasi hiposenter

persamaan 2.2 disusun kedalam bentuk matriks dengan data dari sejumlah stasiun pengamat (persamaan 3,4,5).

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

$$\partial x = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[A]\partial x = dri \quad (2.5)$$

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

Persamaan matriks diselesaikan dengan metode inversi nonlinear dan optimasi least square. Berdasarkan solusi persamaan matriks dan didapatkan persamaan perbaikan lokasi hiposenter, sebagai berikut:

$$x_i = x_0 + dx \quad (2.6)$$

$$y_i = y_0 + dy \quad (2.7)$$

$$z_i = z_0 + dz \quad (2.8)$$

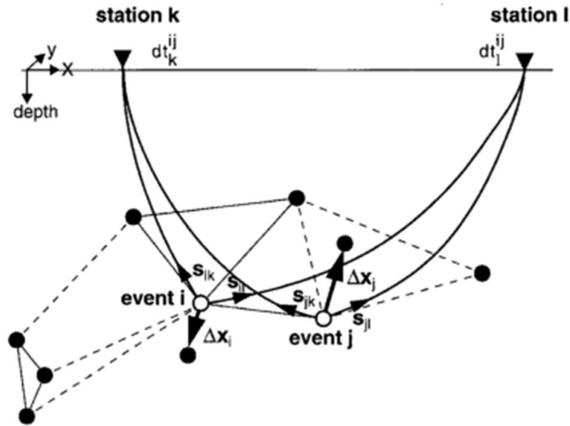
$$t_i = t_o + dt \quad (2.9)$$

Perbaikan letak hiposenter terus dilakukan dengan melakukan iterasi hingga nilai residual waktu tempuh observasi dan kalkulasi yang mendekati nol (Grandis, 2003).

II.6 Metode *Double Difference*

Metode *double difference* adalah metode pengembangan dari metode Geiger dengan menggunakan waktu tempuh mutlak dan pengukuran *cross correlation* dengan pembagian waktu tempuh gelombang P dan S (Waldhauser dan Ellswort, 2000). Prinsip metode ini adalah jika jarak persebaran hiposenter antara dua gempa sangat kecil dibandingkan jarak antar hiposenter stasiun maka *raypath* kedua gempa yang terekam pada stasiun yang sama dapat dianggap hanya sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter. Sehingga kesalahan model kecepatan bisa diminimalisir tanpa menggunakan koreksi stasiun. Maka selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terekam pada suatu stasiun yang sama dapat dianggap sebagai fungsi jarak kedua hiposenter sehingga kesalahan model kecepatan bisa diminimalkan (Waldhauser dan Ellswort, 2000).

Penggambaran tentang metode *double difference*.



Gambar 2. 12 Penggambaran Metode *Double Difference* oleh Waldhauser dan Ellsworth (2000)

Lingkaran di atas merupakan posisi hiposenter gempa bumi yang ditentukan kemudian dihubungkan dengan pusat gempa bumi yang lain berada di sekitarnya. Dengan hubungan antara adanya data korelasi silang dan katalog. Data korelasi silang ditunjukkan oleh garis lurus sedangkan garis putus putus merupakan data katalog. Lingkaran putih menunjukkan *event* gempa i dan j yang terekam pada stasiun I dan k dengan selisih waktu tempuh dt_k^{ij} dan dt_l^{ij} sedangkan Δx_i dan Δx_j merupakan vektor relokasi.

Waktu residu antara pengamatan dan perhitungan (Δd) pada metode *double difference* merupakan perbedaan waktu tempuh observasi dan kalkulasi antara dua event gempa bumi, dinyatakan sebagai berikut:

$$d_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (2.10)$$

Persamaan di atas merupakan *double difference* mengekspresikan waktu tempuh residual (t_k^i) ke stasiun k akibat gempa bumi I dan merupakan waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun k akibat gempa bumi j.

Selanjutnya dapat dituliskan dalam:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \quad (2.11)$$

Kemudian dapat dituliskan:

$$r_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta t_k^i - \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^j - \Delta t_k^j \quad (2.12)$$

Jika dinyatakan dalam bentuk matriks, maka

(G) =

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

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

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

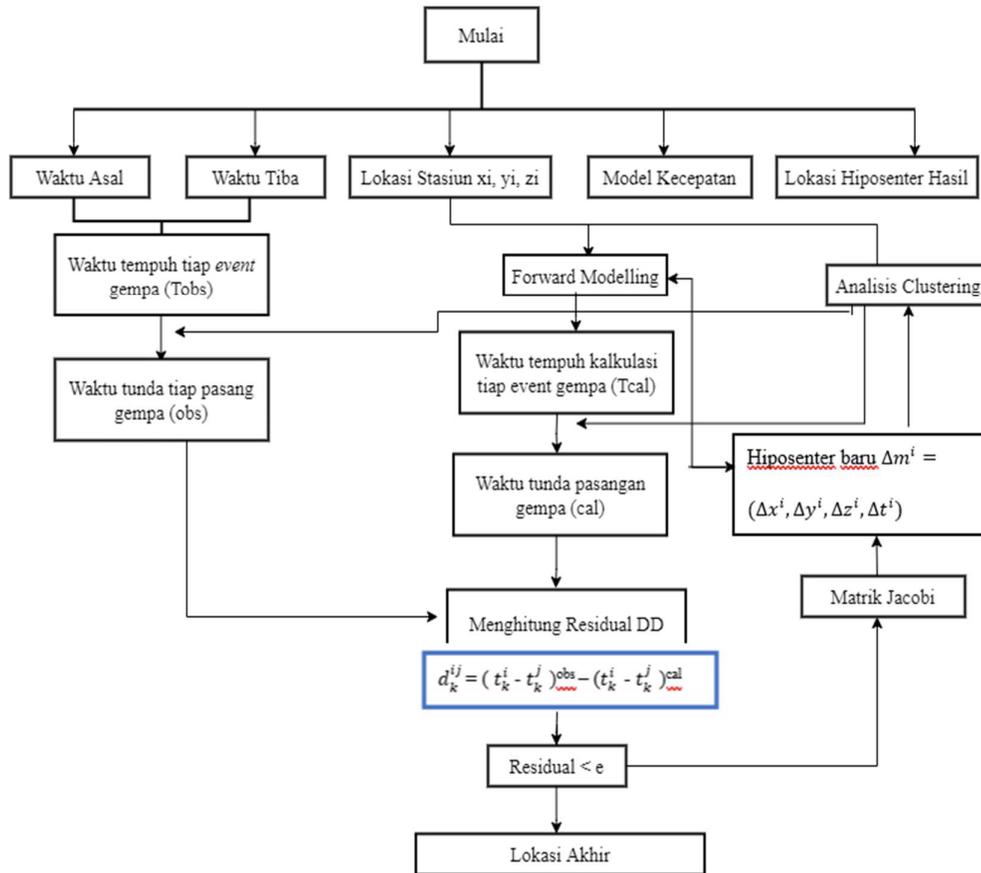
(2.13)

Atau

$$W\Delta d = WG\Delta m \quad (2.14)$$

Δd merupakan matriks waktu residu yang berdimensi $M \times 1$. M dan G berturut-turut merupakan jumlah data observasi double difference dan matriks Jacobi yang berdimensi $M \times 4N$. N dan Δm berturut-turut adalah jumlah gempa bumi dan matriks perubahan model yang berdimensi $4N \times 1$, sedangkan W merupakan matriks diagonal yang menjadi pembobot dalam persamaan perhitungan waktu tempuh gelombang (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).

Prinsip kerja dari HypoDD menurut Waldhauser, 2001 diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 2. 13 Prinsip kerja HypoDD

HypoDD menggunakan analisis fase katalog dan/atau data gelombang untuk mendapatkan perbedaan waktu tempuh untuk pasangan gempa yang selanjutnya dilolah dalam subprogram *ph2dt*. Analisis *cluster* dilakukan untuk mencegah sistem persamaan DD yang tidak berkondisi, *hypoDD* memastikan keterhubungan antar peristiwa dengan mengelompokkan peristiwa ke dalam *cluster*. Matriks Jacobi merupakan matriks dua kolom yang masing-masing berasosiasi dengan turunan parsial fungsi waktu tempuh terhadap posisi episenter gempa yang dicari yaitu x_0 dan y_0 . Baris matrik Jacobi berasosiasi dengan jumlah data untuk memodifikasi model awal secara iteratif sampai dicapai konvergensi menuju model optimum dengan tercapainya *RMS error* (Grandis, 2009). *HypoDD*

memberikan dua pilihan untuk inversi yang digunakan yaitu *singular value decomposition* (SVD) dan *conjugate gradient least square* (LSQR) dengan solusi melalui proses iterasi yang dilakukan untuk memperbaharui lokasi dan meminimalkan residu antara perbedaan waktu tempuh yang diamati dan dihitung. Inversinya harus dipilih untuk menjalankan program *hypoDD*. Parameter lainnya adalah WDCT atau parameter pembobotan yang merupakan jarak maksimum antara dua gempa bumi untuk membentuk pasangan gempa bumi. Umumnya nilai WDCT dan MAXSEP (parameter masukan *ph2dt*) diatur memiliki nilai yang sama. Peredaman hanya digunakan ketika LSQR dipilih untuk proses inversi karena dapat memecahkan masalah kuadrat terkecil teredam, proses iterasi dilakukan sampai 5 kali yang keudian akan dihentikan jika rms residual mencapai batas yang ditentukan atau jumlah maksimum iterasi tercapai. (Ellsworth dan Waldhauser, 2001).