

*Skripsi Geofisika*

**SEISMISITAS GEMPABUMI DI KEPULAUAN SELAYAR  
DAN SEKITARNYA MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE  
DIFFERENCE* DAN *FOCAL MECHANISM***



**OLEH:**

**DAHLIA**

**H061191067**

**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2023**

**HALAMAN JUDUL**

**SEISMISITAS GEMPABUMI DI KEPULAUAN SELAYAR  
DAN SEKITARNYA MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE  
DIFFERENCE* DAN *FOCAL MECHANISM***

**SKRIPSI**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains*

*Pada Program Studi Geofisika*

*Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*

*Universitas Hasanuddin*

**Disusun dan diajukan oleh:**

**DAHLIA**

**H061191067**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2023**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**SEISMISITAS GEMPABUMI DI KEPULAUAN SELAYAR  
DAN SEKITARNYA MENGGUNAKAN METODE DOUBLE  
DIFFERENCE DAN FOCAL MECHANISM**

**Disusun dan Diajukan Oleh:**

**DAHLIA  
H061191067**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Pada 23 November 2023  
Dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

**Pembimbing Utama**

**Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T**  
NIP. 199111092019031010

**Pembimbing Pertama**

**Armansyah, S.Tr., M.Si**  
NIP. 199401142013121001

**Ketua Departemen Geofisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin**

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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dahlia  
NIM : H061191067  
Program Studi : Geofisika  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya saya berjudul:

### **SEISMISITAS GEMPABUMI DI KEPULAUAN SELAYAR DAN SEKITARNYA MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE DIFFERENCE* DAN *FOCAL MECHANISM***

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain, bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau seluruh skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 23 November 2023

Yang membuat pernyataan,



Dahlia

## ABSTRAK

### **Seismisitas Gempabumi di Kepulauan Selayar dan Sekitarnya Menggunakan Metode *Double Difference* Dan *Focal Mechanism***

Daerah Kabupaten Kepulauan Selayar tergolong daerah yang rawan gempabumi karena terletak dekat dengan sumber gempabumi yaitu sesar aktif berupa sesar mendatar dan *Flores Back Arc Thrust*. Dalam penentuan lokasi hiposenter gempabumi seringkali memiliki tingkat kesalahan yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti model struktur kecepatan gelombang seismik dan lain-lain. Model kecepatan gelombang seismik merupakan parameter penting yang sangat berperan dalam penentuan hiposenter. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pola distribusi hiposenter gempabumi setelah direlokasi dan mengetahui jenis sesar di Kepulauan Selayar dan sekitarnya. Daerah Kepulauan Selayar dan sekitarnya dibatasi oleh koordinat  $5,7^{\circ}$ - $7,9^{\circ}$  LS dan  $120^{\circ}$ - $123^{\circ}$  BT. Data penelitian yang digunakan berupa data katalog yang diperoleh dari BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika). Data ini diolah dengan menggunakan *software Velest 3.3* untuk mendapatkan model kecepatan lokal yang merupakan input pada metode *Double Difference* dengan menggunakan *software HypoDD*. Sedangkan data polaritas gelombang P digunakan untuk penentuan *Focal Mechanism* dengan menggunakan *software AZMTAK*. Hasil relokasi dari daerah penelitian menunjukkan hasil yang baik dengan nilai residual waktu tempuh sebelum relokasi  $-1$  sampai  $>1$  s dan setelah relokasi  $-0,6$  sampai  $0,6$  s serta *cluster-cluster* gempabumi semakin mendekati struktur penyebab gempabumi. Hasil penelitian *Focal Mechanism* menunjukkan *cluster-cluster* sebaran gempabumi di daerah penelitian memiliki mekanisme fokus berbeda-beda yang didominasi oleh sesar mendatar. Sesar tersebut diduga adalah Sesar Kalaotoa yang terletak di daerah pulau-pulau kecil di selatan Pulau Selayar. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai langkah awal mitigasi bencana alam di daerah penelitian.

**Kata kunci:** Double Difference, Focal Mechanism, Model kecepatan, Selayar, Relokasi

## ABSTRACT

### **Earthquake Seismicity in the Selayar Islands and its Neighbourhood Using the Double Difference and Focal Mechanism Methods**

*The Selayar Islands Regency area is classified as an earthquake-prone area because it is located close to the earthquake source, namely active faults in the form of horizontal faults and the Flores Back Arc Thrust. In determining the location of earthquake hypocentres, there is often a level of error caused by several factors such as the seismic wave velocity structure model and others. The seismic wave velocity model is an important parameter that plays a very important role in determining the hypocenter. The purpose of this study is to determine the distribution pattern of earthquake hypocentres after being relocated and to determine the type of faults in the Selayar Islands and its surroundings. The Selayar Islands and surrounding areas are bounded by the coordinates 5.7°-7.9° N and 120°-123° East. The research data used is catalogue data obtained from BMKG (Meteorology Climatology and Geophysics Agency). This data is processed using Velest 3.3 software to obtain a local velocity model which is an input to the Double Difference method using HypoDD software. While the P wave polarity data is used to determine the Focal Mechanism using AZMTAK software. The relocation results from the study area show good results with residual travel time values before relocation of -1 to >1 s and after relocation of -0.6 to 0.6 s and earthquake clusters getting closer to the earthquake-causing structure. Focal Mechanism research results show that earthquake distribution clusters in the study area have different focal mechanisms dominated by horizontal faults. The fault is thought to be the Kalaotoa Fault located in the small islands south of Selayar Island. The results of this study can be used as an initial step in mitigating natural disasters in the study area.*

**Keywords:** *Double Difference, Focal Mechanism, Relocation, Selayar, Velocity model*

## KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Assalamualaikum warahmatullah wabarakatuh*

*Alhamdulillah* rabbil 'alamin, dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah *subhanahu wa ta'ala*, atas segala nikmat dan rahmat yang diberi-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Shalawat dan salam selalu tercurahkan kepada Baginda Rasulullah Muhammad *shallallahu alaihi wasallam*, sebagai teladan umat Islam di dunia, beserta keluarganya, para sahabat dan juga kepada para pengikutnya yang istiqamah di jalan Islam hingga datangnya akhir zaman, *insyaaAllah*.

Skripsi dengan judul "**Seismisitas Gempabumi di Kepulauan Selayar dan Sekitarnya Menggunakan Metode Double Difference dan Focal Mechanism**" dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S1) pada Program Studi Geofisika Departemen Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Dalam penyelesaian skripsi ini tak terlepas dari berbagai rintangan dan hambatan serta keterbatasan penulis, namun berkat bantuan dan dorongan dari berbagai pihak serta doa yang selalu terpanjatkan, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Namun masih terdapat banyak kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan dalam peningkatan kualitas penelitian ke depannya.

Dalam kesempatan ini, tak ada kata yang pantas penulis ucapkan selain kata terima kasih yang setulus-tulusnya dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada orangtua tercinta: **Bapak Mashuri** dan **Ibu Mardimawati** yang selalu memberikan dukungan dan doa-doa yang tulus kepada penulis, **Nenek Makkamette** dan juga kedua adik Ismail dan Nirwana sebagai penyemangat terbesar penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih pula kepada seluruh keluarga penulis yang senantiasa memberikan semangat dan doanya kepada penulis.

Penulis juga ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada orang-orang baik dan berjasa dalam menyelesaikan skripsi ini dan sudah menjadi teman baik penulis selama ini.

Terima kasih kepada:

1. **Bapak Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T** dan **Bapak Armansyah, S.Tr., M.Si** selaku pembimbing penulis, terima kasih karena sudah dengan sabar membimbing penulis dan membagikan ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis.
2. **Bapak Ir. Bambang Harimei, M.Si** dan **Ibu Dra. Maria, M.Si** selaku dosen penguji, terima kasih atas saran, kritik, dan masukan yang membangun kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. **Ibu Makharani S.Si, M.Si** selaku penasehat akademik penulis yang selalu memberikan arahan dan dukungan selama mengenyam pendidikan di Departemen Geofisika FMIPA Universitas Hasanuddin.
4. **Bapak Dr. Alimuddin Hamzah, M.Eng** dan **Bapak Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Geofisika FMIPA Unhas.

5. **Bapak dan Ibu Dosen** serta **Staf Akademik Departemen Geofisika FMIPA Unhas** yang telah memberikan ilmu, arahan dan bantuannya selama penulis menempuh pendidikan.
6. Terima kasih kepada Keluarga Besar **BBMKG Wilayah IV Makassar** dan **BMKG Stasiun Geofisika Gowa** yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. **Bapak Karnaen dan Ibu Marniati** yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
8. **Kak Ramadhan Priadi** yang telah banyak membantu penulis dan membagikan ilmunya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
9. **Kak Onding, Kak Harmita, Kak Hikma, Kak Marni dan Kak Safira** yang juga telah banyak mengajar dan membagikan ilmunya kepada penulis.
10. **Partner Hesti Ayu Lestari** yang sudah sabar dan senantiasa kebersamai penulis
11. **Teman-teman** penghuni Lab Padat dan Lab Gis
12. Sahabat penulis **Asfi dan Yuli**, terima kasih sudah menjadi teman cerita, curhat dan pendengar segala keluh kesah penulis
13. Kepada *Squad Kuat Kita Bersama (Pipit, Atul, Atti)* yang senantiasa kebersamai selama jadi pengurus di MI sampai hari ini, dan juga *Squad Ughteea* tentunya (**Nur, Salsa, Inna, Yasmin**) syukron jazakunnallahu khair.
14. Kepada **Mujahidah-Mujahidah MI** yang tidak bisa penulis sebutkan satu-satu, cukup Allah yang tahu dan membalas kebaikan-kebaikanta
15. Kepada teman-teman **Geofisika 2019** yang tidak dapat penulis tulis satu-satu

16. Kepada teman-teman **SEG UNHAS SC**

17. Kepada teman-teman **KKN 107 Takalar 5** terutama posko Pattopakang yang telah memberikan rasa kekeluargaan yang baru walau singkat (*see u on top*)

18. Kepada keluarga besar **HMGF** dan **HIMAFI**, serta **KMFMIPA UNHAS**

Serta terima kasih kepada orang-orang yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Semoga apa yang telah dituliskan oleh penulis pada skripsi ini dapat bermanfaat bagi sesama dan berguna untuk semua pihak.

Makassar, 23 November 2023

Penulis

## DAFTAR ISI

SAMPUL .....	
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	3
I.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
I.4 Tujuan Penelitian .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Geologi Regional Kepulauan Selayar.....	5
II.2 Gempabumi .....	7
II.2.1 Jenis Gempabumi .....	8
II.2.2 Parameter Gempabumi .....	10
II.2.3 Penyebab Gempabumi .....	12
II.3 Model Kecepatan .....	13
II.4 Metode <i>Double Difference</i> .....	15
II.5 Mekanisme Fokus Gempabumi ( <i>Focal Mechanism</i> ) .....	19
II.6 Sesar.....	22
II.6.1 Jenis Sesar .....	22
II.6.2 Parameter Sesar .....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	26

III.1 Lokasi Penelitian .....	26
III.2 Alat dan Bahan .....	27
III.2.1 Alat .....	27
III.2.2 Bahan .....	27
III.3 Metode Pengolahan Data.....	28
III.3.1 Pengolahan Data Model Kecepatan Lokal .....	28
III.3.2 Pengolahan Data <i>Double Difference (HypoDD)</i> .....	29
III.3.3 Pengolahan data <i>Focal Mechanism</i> dengan <i>Software AZMTAK</i> ..	30
III.4 Bagan Alir Penelitian .....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	32
IV.1. Distribusi Hiposenter Gempabumi .....	32
IV.1.1 Perbandingan Kecepatan Lokal dengan IASP91.....	32
IV.1.2 Persebaran Hiposenter Gempabumi Setelah Direlokasi .....	34
IV.1.3 Validasi Residual Waktu Tempuh .....	39
IV.2 Persebaran <i>Focal Mechanism</i> (Mekanisme Fokus) Gempabumi .....	41
BAB V PENUTUP.....	45
V.1. Kesimpulan.....	45
V.2. Saran .....	45
DAFTAR PUSTAKA .....	46
LAMPIRAN.....	50

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Geologi Sulawesi Selatan.....	5
Gambar 2.2 Grafik Wadati (Hurukawa, 2008).....	10
Gambar 2.3 Jarak hiposenter (Hurukawa, 2008) .....	11
Gambar 2.4 Ilustrasi <i>double difference</i> (Waldhauser dan Ellsworth, 2000) .....	16
Gambar 2.5 <i>First motion</i> gelombang P yang tercatat pada seismometer (Stein dan Wysession, 2003) .....	20
Gambar 2.6 Diagram skema dari mekanisme fokus gempa bumi (Cronin, 2010)..	21
Gambar 2.7 Skema pembentukan bola fokus (Cronin, 2010).....	21
Gambar 2.8 Struktur sesar secara umum (Mubarok, 2017) .....	22
Gambar 2.9 Sesar turun ( <i>Normal fault</i> ) (Stein dan Wysession, 2003) .....	23
Gambar 2.10 Sesar naik ( <i>Reverse fault</i> ) (Stein dan Wysession, 2003) .....	23
Gambar 2.11 Sesar mendatar ( <i>Strike – slip fault</i> ) (Stein dan Wysession, 2003) ...	23
Gambar 2.12 Geometri sesar (Stein dan Wysession, 2003).....	24
Gambar 3.1 Peta lokasi penelitian .....	26
Gambar 3.2 Peta Seismisitas Daerah Penelitian .....	27
Gambar 3.3 Bagan alir penelitian .....	31
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Model Kecepatan Lokal dengan IASP91.....	33
Gambar 4.2 (a) Peta sebaran hiposenter gempa bumi sebelum relokasi wilayah Kepulauan Selayar dan sekitarnya. (b) Peta sebaran hiposenter gempa bumi setelah relokasi wilayah Kepulauan Selayar dan sekitarnya .....	36
Gambar 4.3 (a) Hasil penampang <i>Cross Section A-A'</i> hiposenter gempa bumi sebelum relokasi dan (b) setelah relokasi .....	37
Gambar 4.4 Diagram Rose pergeseran gempa bumi.....	39
Gambar 4.5 (a) Histogram residual waktu tempuh sebelum relokasi, (b) Histogram residual waktu tempuh setelah relokasi.....	40
Gambar 4.6 Sebaran <i>Focal Mechanism</i> di wilayah Kepulauan Selayar .....	41
Gambar 4.7 Bola <i>focal</i> di daerah Laut Flores dari katalog Global CMT.....	43

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Perbandingan model kecepatan IASP91 dan kecepatan lokal .....	32
Tabel 4.2 Event gempabumi yang mewakili sumber gempabumi setelah relokasi .....	42

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data katalog BMKG dalam bentuk (.pha).....	51
Lampiran 2. Parameter Masukan Ph2dt dan HypoDD.....	52
Lampiran 3. Hasil Running Ph2dt dan HypoDD .....	53
Lampiran 4. Data Masukan Program Velest 3.3 .....	54
Lampiran 5. Parameter Kontrol Program Velest 3.3.....	55
Lampiran 6. Data gempabumi terpilih dan analisis Mekanisme Fokus pada AZMTAK.....	55
Lampiran 7. Validasi data focal mechanism dari CMT .....	57

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Kabupaten Kepulauan Selayar berada di Laut Flores namun secara administrasi merupakan bagian dari Provinsi Sulawesi Selatan. Terdapat 11 kecamatan yang terdiri dari 81 desa dan 5 kelurahan di Kabupaten Kepulauan Selayar (Agusi dan Ridwan, 2019). Adapun batas-batas wilayah Kabupaten Kepulauan Selayar yakni; sebelah Utara berbatasan dengan Kabupaten Bulukumba (Selat Bira); sebelah Timur berbatasan dengan Laut Flores; sebelah Barat berbatasan dengan Selat Makassar; sebelah Selatan dengan Laut Flores dan Nusa Tenggara Timur.

Daerah Kabupaten Kepulauan Selayar tergolong rawan gempa bumi karena terletak dekat dengan sumber gempa bumi yaitu sesar aktif berupa sesar mendatar dan sesar naik busur belakang Flores (*Flores Back Arc Thrust*) di Laut Flores, dan diketahui bahwa sumber gempa bumi Flores *Back Arc Thrust* pernah mengakibatkan gempa bumi dan tsunami pada tahun 1992 (Setiyono, 2018).

Pada tanggal 14 Desember 2021, Kepulauan Selayar mengalami gempa bumi dengan gempa bumi utama Mw 7,3 yang terjadi di bawah Laut Flores dengan rangkaian guncangan susulan. Berdasarkan informasi dari Badan Meterologi Klimatologi dan Geofisika, tercatat gempa bumi susulan sebanyak 1.456 dengan rentang magnitudo antara M 1,9 – M 7,3 (Supendi dkk., 2022). Dari penelitian sebelumnya Supendi dkk. (2022) mengungkapkan bahwa penyebab dari

gempabumi di Kepulauan Selayar pada tahun 2021 adalah adanya sesar yang sebelumnya belum terdeteksi.

Model kecepatan gelombang seismik adalah parameter penting yang sangat berperan dalam penentuan hiposenter. Semakin tepat model kecepatan yang digunakan, maka hiposenter yang didapatkan akan menjadi lebih akurat (Rachman dan Nugraha, 2012). Penentuan lokasi hiposenter gempabumi dilakukan guna untuk menganalisis struktur tektonik secara detail, seperti identifikasi zona sesar maupun pola zona subduksi. Akurasi penentuan lokasi titik hiposenter gempabumi memiliki tingkat kesalahan (*error*) yang berbeda yang dapat disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya seperti jaringan stasiun seismik, pembacaan waktu tiba gempabumi dan model struktur kecepatan gelombang seismik. Diperlukan perhitungan ulang dengan teknik relokasi hiposenter untuk memperbaiki akurasi, ketelitian dan ketepatan dalam penentuan posisi hiposenter tersebut. Salah satunya yaitu dengan menggunakan metode *Double Difference*. Metode ini dipilih karena mampu merelokasi gempabumi meskipun dengan jumlah data yang banyak sekalipun namun model kecepatan yang digunakan dapat disesuaikan (Dewi dkk., 2019).

Karakteristik sesar dari gempabumi dapat diketahui melalui analisis mekanisme fokus atau mekanisme sumber gempabumi. Mekanisme fokus merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis sesar dan pergerakannya dengan cara menentukan parameter-parameter sesar berupa *strike*, *dip* dan *rake* sehingga diharapkan dapat meminimalisir kerusakan yang akan terjadi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini menggunakan metode *Double Difference* untuk relokasi gempabumi dan metode *Focal Mechanism* untuk mengetahui jenis sesar dari

gempabumi yang terjadi. Diharapkan dari penelitian ini, pemerintah daerah dan masyarakat Kab. Kepulauan Selayar bisa mendapatkan informasi tambahan terkait daerah-daerah yang rawan terjadi gempabumi dilihat dari peta seismisitas yang diperoleh agar dapat meminimalisir kerusakan dan korban jiwa di Kepulauan Selayar.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana distribusi hiposenter gempabumi di Kepulauan Selayar dan sekitarnya setelah direlokasi dengan menggunakan metode *Double Difference*?
2. Apa jenis sesar yang terdapat di Kepulauan Selayar dan sekitarnya berdasarkan *Focal Mechanism* gempabumi?

## **I.3 Ruang Lingkup Penelitian**

Ruang lingkup pada penelitian ini yaitu di Kepulauan Selayar dan sekitarnya dengan titik koordinat wilayah  $5,7^{\circ} - 7,9^{\circ}$  LS dan  $120^{\circ} - 123^{\circ}$  BT. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data sekunder dari katalog BMKG pada Januari 2021- Februari 2023. Data katalog tersebut memuat data *arrival time* dan *first polarity* gelombang P dan S, magnitudo, hiposenter dan *residual time* nya. Setelah itu memodelkan profil kecepatan gelombang seismik 1D menggunakan *Velost* sebagai masukan proses relokasi. Data tersebut direlokasi menggunakan software *HypoDD* dengan metode *Double Difference*. Pengolahan data untuk mendapatkan *beachball focal mechanism* menggunakan data gempabumi hasil relokasi untuk beberapa gempabumi terpilih yang diolah menggunakan software

*AZMTAK*. Data tersebut diolah menjadi peta distribusi hiposenter gempa bumi dan *focal mechanism* menggunakan nilai *strike*, *dip* dan *rake*.

#### **I.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian ini, sebagai berikut:

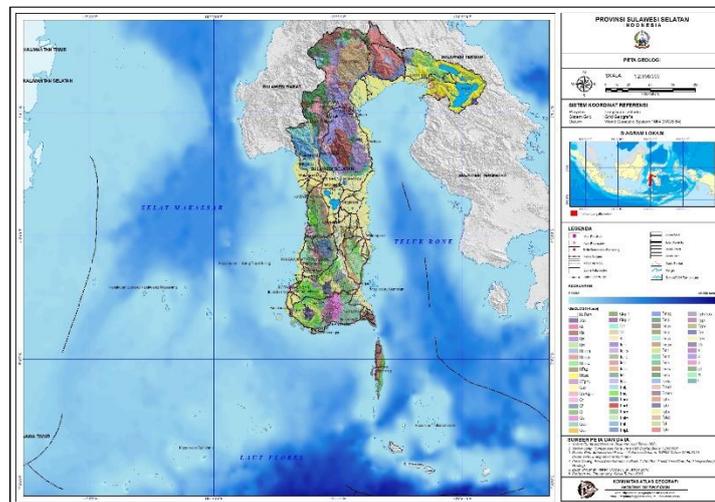
1. Memetakan distribusi hiposenter gempa bumi di Kepulauan Selayar dan sekitarnya setelah direlokasi dengan menggunakan metode *Double Difference*.
2. Memetakan jenis sesar yang terdapat di Kepulauan Selayar dan sekitarnya berdasarkan *Focal Mechanism*.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1 Geologi Regional Kepulauan Selayar

Kondisi geologi Kabupaten Kepulauan Selayar dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu geologi Pulau Selayar dan geologi pulau-pulau kecil yang termasuk wilayah administratif Kabupaten Kepulauan Selayar. Geologi Pulau Selayar masih berhubungan dengan geologi Sulawesi Selatan bagian Selatan. Sedang geologi pulau-pulau kecil di kabupaten ini, yang terletak di Laut Flores, kemungkinan berhubungan dengan geologi Pulau Buton. Pada gambar 2.1 memperlihatkan kondisi geologi Sulawesi Selatan mencakup daerah Kepulauan Selayar di sebelah selatan.



**Gambar 2.1** Peta Geologi Sulawesi Selatan

Batuan tertua yang menyusun Pulau Selayar adalah batuan gunung api Formasi Camba yang berumur Miosen Tengah hingga Miosen Akhir. Bagian bawah dari Formasi Camba tersusun oleh breksi, lava, konglomerat dan tufa. Di atasnya dijumpai batuan sedimen laut yang berselingan dengan batuan gunung api. Batuan-

batuan Formasi Camba dijumpai di bagian tengah pulau dengan arah penyebaran utara-selatan. Di atas Formasi Camba dijumpai Formasi Walanae yang menjemari dengan batugamping Selayar. Formasi Walanae terdiri dari batu pasir yang berselingan dengan batulanau, tufa, napal, batulempung, konglomerat, dan batugamping. Formasi ini berumur dari Miosen Tengah hingga Pliosen.

Penyebaran batuan Formasi Walanae memanjang di bagian barat Pulau Selayar dari utara ke selatan. Batu gamping Selayar penyebarannya terutama di bagian utara dan barat, dan terdiri dari batugamping pejal, batugamping koral, dan kalkarenit dengan sisipan napal dan batupasir gampingan.

Umur dari batugamping Selayar adalah Miosen Akhir sampai Pliosen Awal. Batuan termuda yang tersingkap di Pulau Selayar adalah endapan aluvial dan terumbu karang. Endapan aluvial yang merupakan sedimen pantai dan terdiri dari hasil rombakan batuan yang tersingkap di daratan, dijumpai di sepanjang pantai barat bagian tengah dan utara pulau. Endapan aluvial terdiri dari kerikil, pasir, lempung, lumpur dan rombakan terumbu karang. Terumbu karang dijumpai hampir di sepanjang pantai Pulau Selayar, baik di bagian barat maupun bagian timur pulau.

Pada umumnya pulau-pulau kecil di Kabupaten Kepulauan Selayar disusun oleh terumbu karang. Beberapa pulau menunjukkan kondisi geologi yang sangat berbeda dengan daratan Pulau Selayar. Beberapa pulau disusun oleh batuan beku yang berasal dari kerak kontinen seperti halnya Pulau Buton. Pulau-pulau ini adalah Pulau Jampea yang disusun oleh batuan beku granit, Pulau Kayuadi bagian utara disusun oleh batuan beku yang bersifat menengah. Keberadaan pulau-pulau ini

sampai sekarang masih menjadi obyek penelitian yang menarik bagi pakar geologi. Batuan-batuan yang menyusun Pulau Selayar pada umumnya terlihat lemah sampai sedang dengan kemiringan batuan ke arah barat dan jurus perlapisannya relatif utara-selatan.

Selain kondisi geologi Kepulauan Selayar, terdapat pula beberapa aktivitas tektonik yang disebabkan oleh sesar-sesar yang ada daerah Kepulauan Selayar, terdapat dua sesar dibagian timur Kepulauan Selayar yaitu Sesar Selayar *West* dan Sesar Selayar *East* yang keduanya memiliki tipe sesar normal (*normal fault*). Sesar Selayar *West* memiliki panjang 152 km yang memanjang dari arah utara barat daya ke tenggara melalui bagian selatan Bulukumba ke bagian timur Pulau Selayar. Sedangkan Sesar Selayar *East* memiliki panjang 156 km yang memanjang dari arah utara barat daya ke tenggara melalui bagian selatan Bulukumba ke bagian timur Pulau Selayar (Santoso dkk., 2021).

Selain itu, baru-baru ini telah diidentifikasi sistem sesar baru yakni Sesar Kalaotoa yang termasuk *dextral strikeslip* di bagian selatan Pulau Selayar mengarah ke arah tenggara, tepatnya ke Pulau Kalaotoa. Sesar ini tampaknya terdiri dari tiga segmen, dengan masing-masing segmen memiliki panjang ~100, ~50, dan ~40 km (Supendi dkk., 2022).

## **II.2 Gempabumi**

Gempabumi merupakan getaran dari dalam bumi yang kemudian merambat ke permukaan bumi akibat rekahan bumi yang pecah dan bergeser dengan keras. Penyebab gempabumi dapat berupa dinamika bumi (tektonik), aktivitas gunungapi,

akibat meteor jatuh, longsor (di bawah muka air laut), dan ledakan bom nuklir di bawah permukaan. Gempabumi yang paling umum terjadi adalah gempabumi tektonik yang merupakan getaran yang dihasilkan dari peristiwa pematahan batuan akibat benturan dua lempeng secara perlahan-lahan yang akumulasi energi benturan tersebut melampaui kekuatan batuan, maka batuan di bawah permukaan akan mengalami patahan (Nur, 2010).

### **II.2.1 Jenis Gempabumi**

Gempabumi dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan kedalaman hiposenter gempabumi, yaitu sebagai berikut (Hartuti, 2009):

- a) Gempabumi dalam yaitu gempabumi yang terjadi dengan kedalaman hiposenter >300 km di bawah permukaan bumi.
- b) Gempabumi menengah yaitu gempabumi yang terjadi dengan kedalaman hiposenter berkisar antara 60 km sampai 300 km di bawah permukaan bumi.
- c) Gempabumi dangkal yaitu gempabumi yang terjadi dengan kedalaman hiposenter <60 km di bawah permukaan bumi.

Menurut proses terjadinya, gempabumi dapat diklasifikasikan menjadi lima, yaitu sebagai berikut (Hartuti, 2009):

- a. Gempabumi tektonik, yaitu gempabumi yang diakibatkan oleh adanya tumbukan lempeng-lempeng di lapisan litosfer bumi oleh tenaga tektonik.
- b. Gempa vulkanik, yaitu gempabumi yang diakibatkan oleh aktivitas gunung berapi, sehingga hanya dapat dirasakan di sekitar gunung berapi saat akan meletus, saat meletus, dan setelah terjadi letusan.
- c. Gempabumi runtuh atau longsor, yaitu gempabumi yang diakibatkan

karena adanya runtuh tanah atau batuan.

- d. Gempa jatuhan, yaitu gempabumi yang diakibatkan karena adanya benda langit yang jatuh ke bumi, misalnya meteor.
- e. Gempabumi buatan, yaitu gempabumi yang diakibatkan oleh aktivitas manusia. Misalnya suatu percobaan peledakan nuklir bawah tanah atau laut yang menimbulkan getaran.

Berdasarkan urutan waktu terjadinya Mogi (1967) membagi gempabumi menjadi tiga tipe yaitu (Salsabil dkk., 2019):

a. Gempabumi tipe I

Yaitu gempabumi utama diikuti oleh aktivitas gempabumi susulan yang menurun terhadap waktu tanpa didahului gempabumi pendahuluan (*Mainshock* – *Aftershock*). Tipe ini terjadi pada daerah pusat gempabumi dengan struktur batuan yang homogen dan tegangan yang tersebar merata.

b. Gempabumi tipe II

Yaitu gempabumi utama (*Mainshock*) diawali aktivitas gempabumi pendahuluan (*Foreshock*) dan diikuti oleh gempabumi susulan (*Aftershock*). Tipe ini terjadi pada daerah pusat gempabumi dengan struktur batuan yang tidak homogen dan distribusi tegangan yang tidak merata.

c. Gempabumi tipe III

Yakni gempabumi yang tidak memiliki gempabumi utama dengan waktu terjadinya gempabumi yang terus menerus atau berkepanjangan. Gempabumi ini disebut sebagai gempabumi *swarm* yang terjadi pada pusat gempabumi dengan struktur batuan yang sangat tidak homogen. Penyebab utama

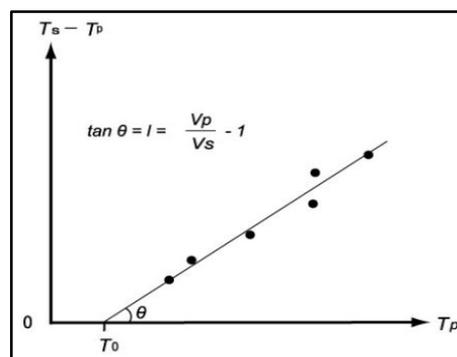
gempabumi *swarm* adalah aktivitas magma disekitar gunung berapi.

## II.2.2 Parameter Gempabumi

Parameter gempabumi adalah acuan nilai besaran dan letak kejadian suatu gempabumi. Besaran gempabumi merupakan suatu ukuran kekuatan yang dihitung berdasarkan data dari alat perekam gempabumi atau seismograf. Parameter gempabumi tersebut meliputi (Shohaya dkk., 2013):

### 1) Waktu kejadian gempa bumi/ *Origin Time*

*Origin time* merupakan waktu dimana pelepasan energi pertama kali terjadi pada lempeng tektonik bumi yang mengalami tekanan akibat tumbukan atau gesekan. Untuk menentukan *origin time*, secara sederhana dapat menggunakan grafik Wadati (Jannah dkk., 2016). Penentuan *origin time* gempabumi bisa didapatkan dengan diagram wadati yaitu dengan memplot antara selisih waktu tiba gelombang P dan S ( $T_s - T_p$ ), terhadap waktu tiba gelombang P ( $T_p$ ). Selisih waktu antar gelombang P dan S yaitu nol ( $T_s - T_p = 0$ ) merupakan pendekatan waktu terjadinya gempabumi (Rasmid dan Ramdhan, 2014).



**Gambar 2.2** Grafik Wadati (Hurukawa, 2008)

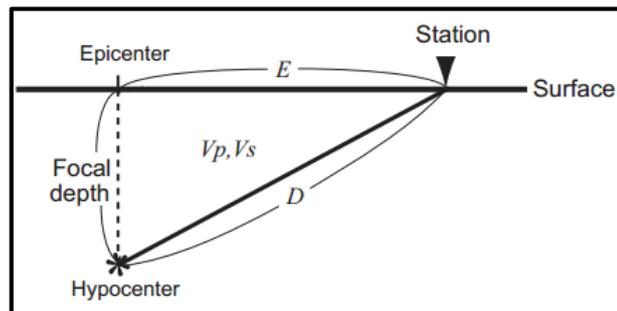
Keterangan:

$T_p$  = waktu tiba gelombang P (s)

- Ts = waktu tiba gelombang S (s)
- To = waktu kejadian/ origin time (s)
- Tpo = waktu tempuh gelombang P (=Tp-To) (s)
- Tso = waktu tempuh gelombang S (=Ts-To) (s)
- Tsp = waktu S-P (=Ts-Tp) (s)
- Vp = kecepatan gelombang P (km/s)
- Vs = kecepatan gelombang S (km/s)

## 2) Hiposenter

Hiposenter merupakan pusat gempa bumi yang berada di dalam permukaan bumi. Untuk memudahkan seseorang terkadang hiposenter diasumsikan sebagai sebuah titik namun pada kenyataannya hiposenter merupakan sebuah bidang yang luasnya tergantung pada besarnya energi yang dilepaskan. Penentuan hiposenter juga dapat menggunakan grafik Wadati, dengan mengasumsikan bahwa lapisan bumi adalah homogen (Jannah dkk., 2016).



**Gambar 2.3** Jarak hiposenter (Hurukawa, 2008)

D adalah jarak hiposenter dengan stasiun pencatat (km), dan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Jannah dkk, 2016):

$$D = T_{po} \cdot V_p \tag{2.1}$$

$$D = T_{so} \cdot V_s \tag{2.2}$$

$$D = T_s - T_o \cdot V_s \quad 2.3$$

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

$$D = T_{sp} + T_{po} \cdot V_s \quad 2.5$$

dengan  $T_{sp}$  adalah  $T_s - T_p$ ,  $T_{po}$  adalah  $T_p - T_o$  dan  $T_{so}$  adalah  $T_s - T_o$

3) Kedalaman sumber gempa bumi atau *depth*

4) Kekuatan gempa bumi atau magnitudo

Magnitudo merupakan parameter mengenai kekuatan gempa bumi berdasarkan energi yang dilepaskan dari hiposenter. Magnitudo yang besar menandakan bahwa energi yang dibawa besar sehingga guncangan yang dirasakan juga lebih besar dan dapat merusak infrastruktur. Banyaknya kejadian gempa bumi/ frekuensi yang terjadi dengan magnitudo yang besar maupun kecil menyebabkan energi yang terakumulasi terlepas (Dwiyanti dkk., 2020).

### II.2.3 Penyebab Gempabumi

Secara khusus gempa bumi terjadi pada sesar-sesar yang teridentifikasi dari pemetaan geologi. Gempabumi-gempabumi yang terjadi di darat yang dekat dengan permukaan sering memperlihatkan bukti-bukti dalam bentuk dislokasi tanah (Hartuti, 2009).

Konsep klastik mengenai mekanisme gempa bumi yang diusulkan oleh Reid (1910) adalah teori bingkai elastik (*elastic rebound theory*) yang pada dasarnya menyatakan bahwa gempa bumi dihasilkan atau disebabkan oleh proses penyesaran (pergeseran pada sesar yang sudah ada) di dalam kerak bumi sebagai akibat dari pelepasan mendadak dari regangan elastik yang melampaui kekuatan batuan. Regangan elastik terakumulasi bila batuan mengalami deformasi yang menerus dan

semakin besar. Bila sesar terjadi, bagian yang berseberangan dengan sesar meloncat ke posisi kesetimbangan yang baru dan energi yang dilepaskan akan berbentuk panas atau vibrasi gelombang elastik, yang menjalar di dalam bumi dan dirasakan sebagai gempabumi. Dalam teori bingkai elastik, proses penyesaranlah yang mengakibatkan gempabumi, bukan gempabumi yang menyebabkan terjadinya sesar (Kiswiranti, 2019).

### **II.3 Model Kecepatan**

Model kecepatan gelombang seismik adalah parameter penting yang sangat berperan dalam penentuan hiposenter. Semakin tepat model kecepatan yang digunakan, maka hiposenter yang didapatkan akan menjadi lebih akurat (Rachman & Nugraha, 2012).

Model kecepatan gelombang primer merupakan suatu fungsi dari kedalaman ( $h$ ) dan kecepatan gelombang primer ( $V_p$ ). Gelombang primer merupakan gelombang yang tercatat pertama kali di seismogram. Gelombang ini mempunyai kecepatan rambat 7 km/s sampai 14 km/s (Puspito, 1996).

Model kecepatan yang banyak digunakan dalam penentuan posisi hiposenter saat ini, masih menggunakan model kecepatan gelombang seismik global, seperti IASP91, AK135, dan lain-lain. Kecepatan gelombang dipengaruhi oleh struktur lapisan bawah permukaan yang dilalui oleh gelombang seismik sehingga menunjukkan bahwa kecepatan gelombang seismik di setiap tempat berbeda-beda. Hal tersebut disebabkan karena adanya perbedaan struktur lapisan bawah permukaan yang berbeda. Oleh karena itu, penggunaan model kecepatan

gelombang seismik global kurang tepat untuk penentuan hiposenter yang lebih akurat (Priadi dkk., 2018).

Model kecepatan lokal gelombang seismik 1-Dimensi dengan menggunakan metode inversi Coupled Hypocenter-Velocity pada perangkat lunak *Velost 3.3* diharapkan dapat menjadi acuan dalam penentuan hiposenter yang lebih akurat (Priadi dkk., 2018).

Pada metode ini dianggap bahwa bumi terdiri dari lapisan datar yang homogen isotropik, hal ini dilakukan agar waktu tiba gelombang yang terjadi karena pemantulan dan pembiasan pada setiap lapisan dapat dihitung. Dalam melakukan pengamatan waktu tiba gelombang dapat dinyatakan dalam suatu formula  $t_{obs}$ , yaitu  $t_{obs} = f(s, h, m)$ , dimana  $s$ ,  $h$ , dan  $m$  adalah koordinat stasiun, parameter hiposenter (origin time dan lokasi koordinat hiposenter) dan model kecepatan, sedangkan fungsi  $f$  adalah fungsi nonlinear dari parameter  $h$  dan  $m$  yang tidak diketahui sebelumnya. Dengan dapat dihitungnya waktu tiba gelombang  $t_{cal}$  untuk setiap stasiun, maka di peroleh pembaharuan model kecepatan menggunakan persamaan Kissling dimana  $k$ ,  $i$  dan  $e$  adalah jumlah hiposenter, jumlah stasiun, dan koreksi stasiun (Azizah dkk, 2019):

$$t^{res} = t^{obs} - t^{cal} \quad 2.6$$

$$t^{res} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \quad 2.7$$

Keterangan:

$t^{res}$  = residual waktu tempuh observasi dan waktu tempuh kalkulasi (sec)

$t_{obs}$  = waktu tempuh observasi (sec);

$t_{cal}$  = waktu tempuh kalkulasi (sec);

- f = fungsi terhadap lokasi stasiun (s), lokasi hiposenter dan waktu tiba/ origin time (h), dan model kecepatan (m)
- e = koreksi stasiun
- k = jumlah hiposenter
- i = jumlah stasiun

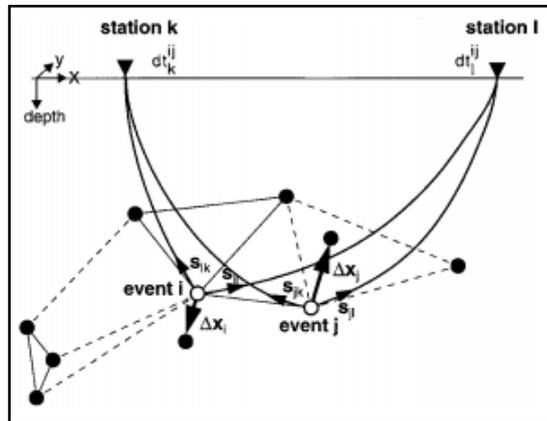
dengan  $n$  merupakan jumlah parameter model kecepatan dan mewakili semua kesalahan, termasuk kesalahan pengamatan, kesalahan perhitungan, dan kesalahan dalam model kecepatan. Persamaan (2.7) di atas merupakan persamaan Coupled Velocity Hypocenter (Rachman dan Nugraha, 2012).

#### **II.4 Metode *Double Difference***

Metode *double difference* merupakan bentuk pengembangan dari metode Geiger menggunakan data relatif waktu tempuh antar dua titik hiposenter. Prinsip dari metode ini adalah jika terdapat dua gempa bumi yang memiliki jarak lebih dekat satu sama lainnya dibandingkan dengan jarak gempa bumi tersebut ke stasiun pencatatnya, maka *raypath* atau penjalaran lintasan dari kedua gempa bumi tersebut dapat dianggap sama (Dewi dkk., 2019). Metode *Double Difference* menggunakan data katalog gempa bumi dan juga *waveform crosscorrelation*.

Metode *Double Difference* pertama kali kemukakan oleh Waldhauser dan Ellsworth pada tahun 2000. Model ini masih memiliki kesalahan (*error*) ketika adanya variasi kecepatan yang tidak dimodelkan, contohnya seperti stasiun yang terletak lebih tinggi atau lebih rendah dan adanya kontras kecepatan dekat stasiun. Dengan menggunakan metode *Double Difference*, kesalahan akibat hal tersebut dapat dikurangi tanpa membutuhkan koreksi stasiun. Kelebihan Metode Double-

Difference yaitu dapat merelokasikan hiposenter sehingga tampak pola seismisitas yang lebih jelas (Jannah dkk., 2016).



**Gambar 2.4** Ilustrasi *double difference* (Waldhauser dan Ellsworth, 2000)

Pada gambar 2.4 terdapat lingkaran berwarna hitam dan putih yang merupakan titik sebaran hiposenter gempa bumi yang dihubungkan dengan *event* gempa bumi disekitarnya oleh data *cross-correlation* (ditunjukkan dengan garis tebal) atau katalog (ditunjukkan dengan garis putus-putus). Gempabumi *i* dan gempabumi *j* yang ditunjukkan dengan lingkaran putih terekam pada stasiun yang sama (stasiun k dan stasiun l) dengan selisih waktu tempuh  $d_k^i$  dan  $d_l^i$ . Karena dekatnya posisi antara kedua gempabumi tersebut, maka *raypath* keduanya dianggap sama yakni melewati medium dengan kecepatan yang sama. Arah panah  $\Delta x_i$  dan  $\Delta x_j$  menunjukkan vektor relokasi gempa bumi yang akan terjadi (Dewi dkk., 2019).

Dengan menggunakan teori penjalaran sinar, maka persamaan waktu tiba gelombang badan untuk gempa bumi *i* dari stasiun k dapat didefinisikan sebagai sebuah integral lintasan (Waldhauser dan Ellsworth, 2000) :

$$\tau_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \quad 2.8$$

Keterangan:

$\tau^i$  = waktu kejadian dari gempa bumi  $i$  (sec);

$u$  = *slowness field* (s/km); dan

$ds$  = elemen panjang lintasan (km).

Hubungan antara waktu tiba dan lokasi gempa bumi tidak linier, sehingga digunakan ekspansi deret Taylor untuk melinierkan pada persamaan (2.8).

Kemudian didapatkan residual gempa bumi dimana secara linier menghubungkan waktu tiba observasi dan waktu tiba teoritis  $\tau_k^i$  yang sesuai dengan hiposenter dan parameter gempa bumi  $i$  :

$$\tau_k^i = \frac{\partial \tau_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i \quad 2.9$$

Persamaan (2.9) merupakan persamaan dimana gempa bumi  $i$  yang terekam pada stasiun  $k$ . Dalam metode relokasi double difference ini, persamaan tersebut dihubungkan dengan gempa bumi lain. Sedangkan untuk gempa bumi  $j$  yang teramati pada stasiun  $k$  yaitu:

$$\tau_k^j = \frac{\partial \tau_k^j}{\partial x} \Delta x^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial y} \Delta y^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial z} \Delta z^j + \Delta \tau^j \quad 2.10$$

Sehingga selisih antara gempa bumi  $i$  dan gempa bumi  $j$  didapatkan:

$$\tau_k^i - \tau_k^j = \frac{\partial \tau_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial x} \Delta x^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial y} \Delta y^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial z} \Delta z^j + \Delta \tau^j \quad 2.11$$

Dengan asumsi bahwa gempa bumi terjadi tersebut berdekatan, maka lintasan dari gempa bumi ke stasiun dianggap sama. Persamaan (2.11) adalah selisih waktu tiba dari gempa bumi  $i$  dan  $j$  terhadap masing-masing parameter ( $x, y, z, t$ ). Persamaan diatas dapat ditulis sederhana dalam persamaan :

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad 2.12$$

Keterangan:

$dr_k^{ij}$  = waktu tempuh residual ke stasiun k akibat pasangan event i dan j (sec);

i dan j = dua hiposenter yang berdekatan

k dan l = dua stasiun yang merekam kejadian gempabumi

$t_k^i$  = waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun gempa i (sec)

$t_k^j$  = waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun gempa j (sec)

Selanjutnya persamaan (2.12) dapat ditulis dalam bentuk:

$$\Delta d = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \quad 2.13$$

Persamaan (2.13) dapat ditulis menjadi :

$$\begin{aligned} \Delta d = & \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta t_k^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j + \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j \\ & + \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j + \Delta t_k^j \end{aligned} \quad 2.14$$

Apabila dinyatakan dalam bentuk matriks maka persamaannya akan menjadi :

$$\begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x_1} & \frac{\partial t_1}{\partial y_1} & \frac{\partial t_1}{\partial z_1} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x_2} & \frac{\partial t_2}{\partial y_2} & \frac{\partial t_2}{\partial z_2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x_n} & \frac{\partial t_n}{\partial y_n} & \frac{\partial t_n}{\partial z_n} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{pmatrix} \quad 2.15$$

atau

$$W\Delta d = WG\Delta m \quad 2.16$$

dengan  $\Delta d$  merupakan matriks waktu residu berdimensi  $M \times 1$ , dimana M merupakan jumlah data observasi *double-difference* dan G merupakan matriks

Jacobi yang berdimensi  $M \times 4N$ ,  $N$  dan  $\Delta m$  berturut-turut adalah jumlah gempabumi dan matriks perubahan model yang berdimensi  $4N \times 1$ , sedangkan  $W$  merupakan matriks diagonal yang menjadi pembobotan dalam persamaan perhitungan waktu tempuh gelombang.

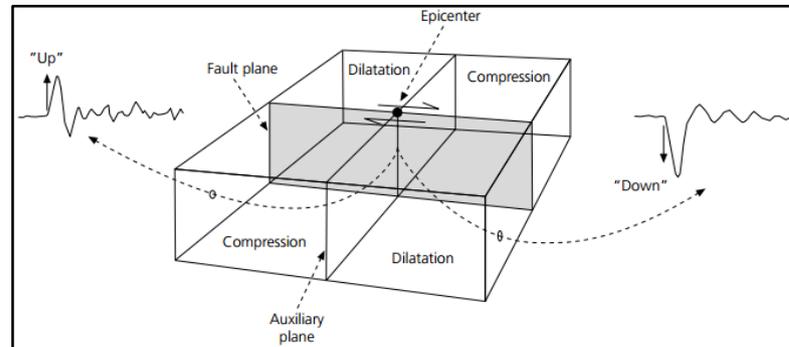
Dalam relokasi dengan metode *double-difference* ini menggunakan model kecepatan gelombang P yang berasal dari interpolasi model Wagner untuk kedalaman hingga 20 km dan model kecepatan *IASP91* (Kennett & Engdahl, 1991) untuk kedalaman lebih dari 20 km. Sedangkan untuk model kecepatan gelombang S menggunakan nilai rasio  $V_p/V_s$  sebesar 1,78 (Dewi dkk., 2019).

## **II.5 Mekanisme Fokus Gempabumi (*Focal Mechanism*)**

*Focal Mechanism* adalah hasil dari analisis *waveform* yang dihasilkan dari gempabumi dan rekaman seismograf (Cronin, 2010). *Focal Mechanism* digunakan untuk menerangkan sifat penjalaran energi gempabumi yang berpusat pada hiposenter gempabumi. *Focal Mechanism* sangat berkaitan dengan sesar karena sering dianggap sebagai mekanisme penjalaran energi gelombang elastis pada fokus tersebut, jika arah gerakan sesar dan arah bidang sesar diperoleh maka dapat dianalisa mekanisme fokus gempabuminya (Mubarok, 2017).

Seismogram yang terekam pada lokasi yang berbeda, dapat digunakan untuk studi geometri pensesaran selama terjadi gempabumi yang dikenal sebagai mekanisme fokus. Hal ini bisa dilakukan karena pola radiasi gelombang seismik tergantung pada geometri dasar. Salah satu cara sederhana untuk melakukannya adalah studi polarisasi gelombang badan. Mekanisme fokus yang ditentukan dari *first motion*,

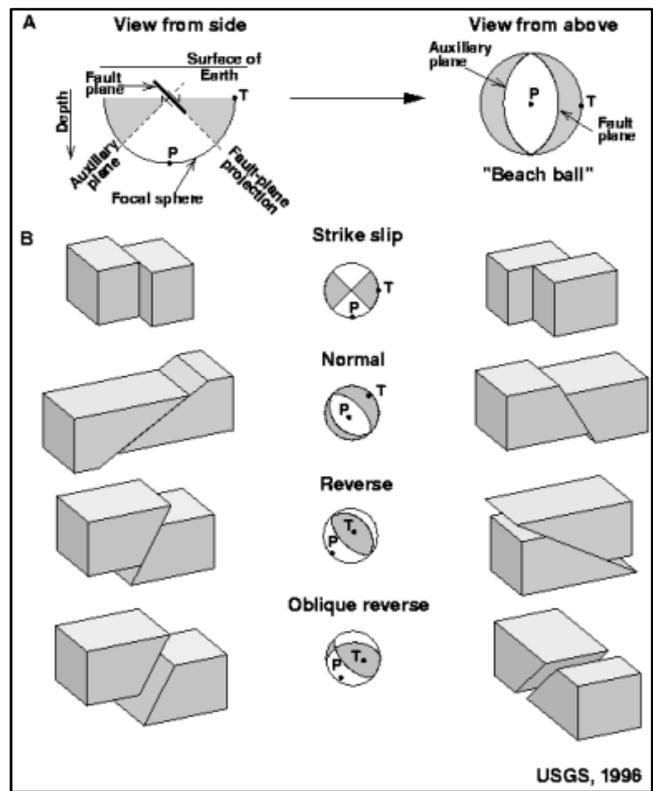
menggunakan polaritas gelombang langsung akan bervariasi dari stasiun ke stasiun karena azimut yang bervariasi terhadap episenter.



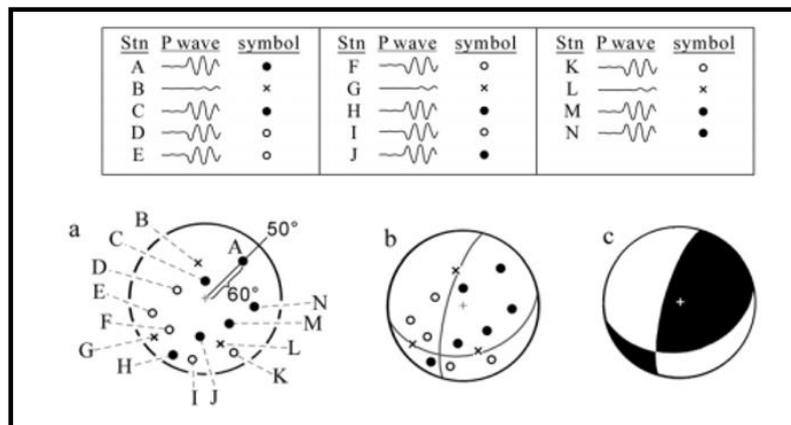
**Gambar 2.5** *First motion* gelombang P yang tercatat pada seismometer (Stein dan Wysession, 2003).

Studi mekanisme sumber gempa bumi dengan gerak awal gelombang P bertujuan untuk menentukan sesar gempa bumi 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 paling besar dibanding gelombang lainnya. Adapun sistematika distribusi gelombang P adalah (Afnimar, 2009):

1. Gerakan tanah yang menyebabkan gempa bumi dipolaritaskan sebagai gerakan replusif (kompresi) 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 2.6** Diagram skema dari mekanisme fokus gempa bumi (Cronin, 2010)

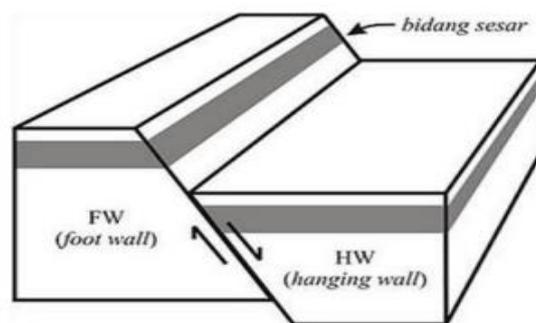


**Gambar 2.7** Skema pembentukan bola fokus (Cronin, 2010)

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

## II.6 Sesar

Sesar adalah struktur rekahan yang telah mengalami pergeseran. Sesar mempunyai bentuk dan dimensi yang bervariasi. Ukuran dimensi sesar mungkin dapat mencapai ratusan kilometer panjangnya atau hanya beberapa sentimeter saja. Arah singkapan suatu sesar dapat lurus atau berliku-liku. Pengenalan sesar dilapangan dapat dilihat melalui kelurusan bentang alam (gawir, lembah, jalur vegetasi, rona), ketidakselarasan bentang alam (pembelokan sungai yang tajam), bidang atau jalur sesar, sumber air, penyimpangan pada struktur (hilangnya lapisan, berhenti secara mendadak dan adanya perulangan dan sebagainya). Sesar dapat berupa bidang sesar (*fault plane*), atau rekahan tunggal, jalur sesar (*fault zone*) yang terdiri dari lebih dari satu sesar, jalur sesar atau jalur penggerusan (*shear zone*), mempunyai dimensi panjang dan lebar yang beragam, dari skala minor sampai puluhan kilometer (Fattaah dkk., 2020).



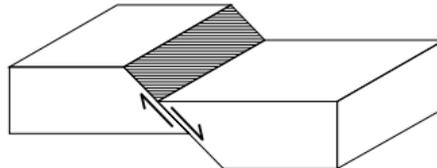
**Gambar 2.8** Struktur sesar secara umum (Mubarok, 2017)

### II.6.1 Jenis Sesar

Sesar (*fault*) adalah celah pada kerak bumi yang berada di perbatasan antara dua lempeng tektonik. Ada tiga jenis sesar yaitu sesar turun, sesar naik, dan sesar mendatar (Hartuti, 2009):

1. Sesar turun (*normal fault*)

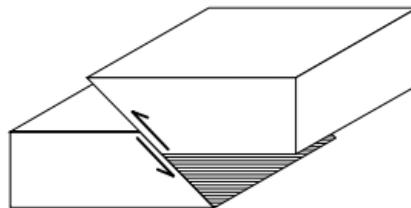
Dikatakan sesar normal atau sesar turun apabila batuan yang menumpu merosot ke bawah akibat batuan penumpu di kedua sisinya bergerak saling menjauh.



**Gambar 2.9** Sesar turun (*Normal fault*) (Stein dan Wysession, 2003)

2. Sesar naik (*reverse fault*)

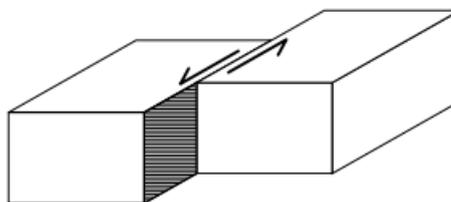
Dikatakan sesar naik (*reverse fault*) apabila batuan yang menumpu terangkat ke atas akibat batuan penumpu di kedua sisinya bergerak saling mendorong.



**Gambar 2.10** Sesar naik (*Reverse fault*) (Stein dan Wysession, 2003)

3. Sesar mendatar (*strike-slip fault*)

Dikatakan sesar mendatar (*strike-slip fault*) apabila kedua batuan pada sesar bergerak saling menggeser.



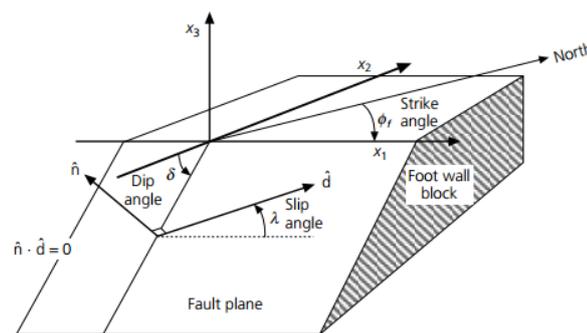
**Gambar 2.11** Sesar mendatar (*Strike – slip fault*) (Stein dan Wysession, 2003)

Sesar normal dan sesar terbalik, keduanya menghasilkan perpindahan vertikal (*vertical displacement*). Sedangkan sesar geseran-jurus menghasilkan perpindahan horizontal (*horizontal displacement*) (Hartuti, 2009). Selain ketiga jenis sesar

tersebut, dikenal pula sesar yang merupakan kombinasi antara sesar mendatar dan sesar naik/ turun yang disebut *oblique fault*.

## II.6.2 Parameter Sesar

Bila terdapat sesar maka perlu ditentukan parameter-parameter sesar tersebut, kemudian ditentukan jenisnya. Orientasi sesar ditentukan dengan *strike* (jurus)  $\Phi$ , dan *dip* (kemiringan)  $\delta$ . Kemudian salah satu dari *plunge* atau *rake* digunakan untuk menentukan arah *slip*. Sesar memiliki dua permukaan yaitu *footwall* dan *hanging wall*, dengan slip sebagai arah *hanging wall* relatif terhadap *footwall*. *Rake* ( $\lambda$ ) sudut antara arah *strike* dan *slip*.



**Gambar 2.12** Geometri sesar (Stein dan Wysession, 2003).

Geometri sesar dapat dideskripsikan dalam orientasi bidang sesar dan arah slip sepanjang bidang tersebut seperti terlihat pada gambar 2.8. Bidang sesar dikarakterisasi oleh vektor normal  $\hat{n}$  dan vektor slip  $\hat{d}$ . Vektor slip merupakan arah gerakan *hanging wall* (bagian atas) terhadap *foot wall* (bagian bawah). Vektor slip selalu terletak pada bidang sesar dan karena itu tegak lurus terhadap  $\hat{n}$ .

Sudut kemiringan sesar (dip)  $\delta$  adalah sudut antara permukaan atau bidang horizontal dan bidang sesar yang bervariasi antara  $0^\circ$  dan  $90^\circ$  (Kiswiranti, 2019).

Garis strike didefinisikan sebagai garis perpotongan antara bidang horizontal

dengan bidang sesar. Arah strike mengikuti akidah tangan kiri, dengan jari telunjuk ke arah strike dan jari jempol ke arah dip. Sudut strike  $\Phi_f$  adalah sudut yang dihitung searah jarum jam dari arah utara geografis ke arah strike. Arah gerak *hanging wall* dinyatakan oleh sudut slip  $\lambda$  yang diukur berlawanan arah jarum jam dari satu garis pada bidang sesar yang sejajar dengan arah strike (Kiswiranti, 2019).