

Skripsi Geofisika

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE
DOUBLE DIFFERENCE SERTA IDENTIFIKASI *FOCAL MECHANISM*
DI WILAYAH SULAWESI TENGGARA DAN SEKITARNYA PERIODE
TAHUN 2019-2022**



OLEH:

HESTI AYU LESTARI

H061191012

PROGRAM STUDI GEOFISIKA

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2023



HALAMAN JUDUL

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE
DOUBLE DIFFERENCE SERTA IDENTIFIKASI *FOCAL MECHANISM*
DI WILAYAH SULAWESI TENGGARA DAN SEKITARNYA PERIODE
TAHUN 2019-2022**

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:

HESTI AYU LESTARI

H061191012

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023



HALAMAN PENGESAHAN

RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE DIFFERENCE* SERTA IDENTIFIKASI *FOCAL MECHANISM* DI WILAYAH SULAWESI TENGGARA DAN SEKITARNYA PERIODE TAHUN 2019-2022

Disusun dan Diajukan Oleh:

Hesti Ayu Lestari

H061191012

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

Pembimbing Pertama

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

Marniati, S.Si, M.T
NIP. 197603012006042001

**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 : Hesti Ayu Lestari

NIM : H061191012

Program Studi : Geofisika

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya ilmiah saya berjudul:

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE
DOUBLE DIFFERENCE SERTA IDENTIFIKASI *FOCAL MECHANISM*
DI WILAYAH SULAWESI TENGGARA DAN SEKITARNYA PERIODE
TAHUN 2019-2022**

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 Menyatakan


METERAI
TEMPEL
6AKX705091080

Hesti Ayu Lestari



SARI BACAAN

Banyaknya gempa bumi di Sulawesi Tenggara mengindikasikan adanya sesar-sesar aktif diantaranya Sesar Lawanopo, Tolo Thrust, Sesar Matano, dan lainnya. Sesar-sesar ini menyebabkan wilayah penelitian memiliki kerentanan seismik yang cukup tinggi. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pola sebaran hiposenter dan jenis sesar yang memengaruhi gempa bumi di Sulawesi Tenggara dan sekitarnya pada tahun 2019-2022. Data diperoleh dari katalog Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), data kecepatan gelombang dari *The International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior* (IASPEI), serta data polaritas gerakan pertama gelombang P dari *International Seismological Center* (ISC). Data katalog digunakan untuk mencari kecepatan gelombang 1D di *software* Velest dengan masukan data kecepatan gelombang IASP91. Data katalog juga digunakan untuk merelokasi hiposenter menggunakan metode *Double Difference* di *software* HypoDD dengan masukan kecepatan gelombang 1D hasil olahan sebelumnya. Gerakan pertama gelombang P gempa bumi digunakan untuk penentuan mekanisme fokus yang dianalisis dengan *software* Azmtak. Hasil relokasi hiposenter memperlihatkan hasil yang lebih baik daripada sebelum direlokasi. Berdasarkan struktur dan statistik, hasil setelah relokasi tidak terfokus lagi pada *fixed depth* sehingga lebih mendekati pada struktur wilayah penelitian dan nilai statistik residual waktu tempuh lebih mendekati nol. Nilai residual awal pada rentang -2,317 s hingga 2,371 s dan nilai akhir pada rentang -0,468 s hingga 0,475 s. Sebaran gempa bumi yang mengklaster pada beberapa struktur dipilih untuk mewakili jenis sesar. Dari mekanisme fokus didapatkan bahwa wilayah Sulawesi Tenggara dan sekitarnya di dominasi oleh jenis Sesar Naik dan Sesar Geser Mengiri. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi awal mengenai estimasi bahaya seismik.

Kata Kunci: *Double Difference*, Mekanisme Fokus, Model Kecepatan Lokal, Sesar Naik, Sesar Geser Mengiri, Sulawesi Tenggara



ABSTRACT

The high number of earthquakes in Southeast Sulawesi indicates the presence of active faults including the Lawanopo Fault, Tolo Thrust, Matano Fault, and others. These faults cause the research area to have a high seismic vulnerability. The purpose of this study is to determine the pattern of hypocenter distribution and types of faults that affect earthquakes in Southeast Sulawesi and its surroundings in 2019-2022. Data were obtained from the catalog of the Meteorology, Climatology and Geophysics Agency (BMKG), wave velocity data from The International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), and P-wave first motion polarity data from the International Seismological Center (ISC). The catalog data was used to find the 1D wave velocity in Velest software with the input of IASP91 wave velocity data. The catalog data was also used to relocate the hypocenter using the Double Difference method in HypoDD software with the input of the previously processed 1D wave velocity. The first motion of the earthquake P wave is used to determine the focal mechanism analyzed with Azmtak software. The hypocenter relocation results show better results than before relocation. Based on the structure and statistics, the results after relocation are no longer focused on a fixed depth so that they are closer to the structure of the study area and the statistical value of travel time residuals is closer to zero. The initial residual value is in the range of -2.317 s to 2.371 s and the final value is in the range of -0.468 s to 0.475 s. The distribution of earthquakes that cluster on several structures is chosen to represent the type of fault. From the focal mechanism, it is found that the Southeast Sulawesi region and its surroundings are dominated by the types of reserve fault and left lateral strike-slip fault. The results of this study can be used as an initial reference on seismic hazard estimation.

Keywords: *Double Difference, Focal Mechanism, Local Velocity Model, Reserve Fault, Strike-Slip Fault, Southeast Sulawesi*



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillah rabbil 'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkah, Rahmat, dan hidayah-Nya yang telah dan senantiasa Ia limpahkan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul “Relokasi Hiposenter Gempabumi menggunakan Metode *Double Difference* serta Identifikasi Focal Mechanism di Wilayah Sulawesi Tenggara dan Sekitarnya Periode Tahun 2019-2022” sebagai syarat dalam menyelesaikan Program Sarjana (S1) pada Program Sarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Geofisika Universitas Hasanuddin. Shalawat serta salam senantiasa terkirim kepada Rasulullah SAW. Dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari hambatan serta rintangan yang penulis hadapi, namun pada akhirnya dapat melaluinya berkat Ridho Allah SWT dan bimbingan dari berbagai pihak baik secara moral maupun spiritual. Izinkan pula penulis mengucapkan terima kasih sedalam-dalamnya kepada Orang Tua tercinta Ayahanda **Yayat Supriatno** dan Ibunda **Salamah** yang telah membesarkan Penulis dengan penuh kasih sayang, membimbing, mendukung, serta doa-doa yang selalu dipanjatkan untuk keberhasilan dan kesuksesan Penulis. Semoga Allah SWT meninggikan derajat dan membalas segala kebaikan kedua orang tua Penulis. Kakak **Haris Munandar**, adik **Haikal Novansyah** senantiasa mendoakan dan memberikan



1 kepada penulis. Keluarga Besar Bapak **H. Maryono** dan **Alm Bapak** ang telah memberikan semangat dan dukungan. Terkhusus juga kepada **oto's Family** yang telah memberikan kelayakan penghidupan, yang

menjadi keluarga utama Penulis selama Penulis berkuliah di Makassar. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikannya. Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik tanpa adanya dukungan dan bantuan dari berbagai pihak baik moril maupun materil. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Bapak **Muhammad Fawzy Ismullah Massinai, S.Si., M.Si** selaku pembimbing Utama yang telah berkenan memberikan tambahan ilmu dan solusi dalam setiap permasalahan dalam penulisan skripsi, memberikan bimbingan, kepercayaan yang sangat berarti serta motivasi kepada penulis sehingga terselesaikannya skripsi ini dengan baik
2. Ibu **Marniati, S.Si., M.T** selaku pembimbing Pertama yang telah bersedia membimbing dan mengarahkan penulis selama penyusunan skripsi ini.
3. Bapak **Ir. Bambang Harimei, M.Si** dan Ibu **Dra. Maria, M.Si** selaku tim penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang bersifat membangun kepada penulisan skripsi.
4. **Balai BMKG Wilayah 4 Makassar dan BMKG Stasiun Geofisika Kelas II Gowa**, atas bantuan dan memberikan izin dalam pengambilan data tugas akhir penulis. Maka dari itu, penulis mengucapkan terima kasih atas segala bantuan dan kontribusinya.
5. Bapak **Armansyah**, Bapak **Karnaen** (Balai BMKG Wilayah 4 Makassar) dan Bapak **Ramadhan Priadi** (BMKG Stasiun Geofisika Kelas II Gowa) atas bimbingan, waktu, dan pikiran dalam membantu serta menyelesaikan pengolahan data penelitian penulis.



6. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si., M.Si** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
7. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
8. Kepada Ibu **Dra. Maria, M.Si** selaku penasehat akademik yang telah memberikan masukan dan arahan terkait akademik kepada penulis.
9. Seluruh **Dosen Departemen Geofisika, Staf FMIPA UNHAS, Staf Departemen Geofisika, Staf Laboratorium, Staf Perpustakaan FMIPA UNHAS dan Staf Perpustakaan Umum** atas semua bantuan dan ilmu yang telah diajarkan, pelayanan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.
10. **Restu Fauzi, S.Pd** yang selalu memberikan dukungan kepada Penulis untuk terus belajar, semangat bertumbuh dan berkembang mengejar cita-cita, serta memberikan kebahagiaan dan motivasi yang baik agar semangat dan tidak malas dalam mengerjakan sesuatu. Terimakasih telah mendengarkan segala keluh kesah sampai ikut berkontribusi dalam penyelesaian skripsi.
11. Kepada **Dahlia** selaku teman perjuangan yang membersamai Penulis dari awal perancangan hingga terselesaikannya skripsi.
12. Kak **Indrawati Onding S.Si**, Kak **Harmita Lestari S.Si., M.T**, Kak **Hikma, S.Si** Kak **Marniati Ramli, S.Si** dan Kak **Safira Fauzianingsih, S.Si** yang sudah membagi ilmu dan pengalaman olah data penelitian.



Sucofindo Makassar Tbk yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan Kuliah Praktek

14. **Kampus Merdeka** dengan salah satu programnya yakni **Magang Merdeka Studi Independent Batch 4** sehingga Penulis mendapatkan kesempatan untuk belajar di **PT. MariBelajar Indonesia Cerdas** dalam Program Studi *Data Analyst & AI*
15. Teruntuk teman-teman seperjuangan di Geofisika 2019 **Afika, Akbar, Alif, Andry, Arsyih, Ashar, Asyifah, Caca, Cindy, Dahlia, Devi, Dian, Diky, Huda, Fausta, Fatihah, Habib, Haerul, Haidir, Haikal, Haqqul, Ikki, Indah, Ita, Ismi, Jack, Jinaan, Liani, Lovely, Mey, Muji, Mulki, Muly, Nanda, Nanov, Nismul, Nudia, Nur, Nurzakiah, Pipit, Reika, Riman, Risda, Rodjil, Sarni, Sekar, Sindy, Suleha, Tiara, William, Wily, Yuli, Zakiah, Rahmat, Amirul, Rafky, Nisa, Inna dan Fera** yang telah memberikan dukungan dan berbagi ilmu selama perkuliahan
16. Temen-temen LAB **Dahlia, Reika, Nismul, Nur, Risda, Nurul, Ita** yang membersamai Penulis dalam menyusun skripsi sampai wisuda bersama
17. Teruntuk saudara **BATU 19 (Bangkit dan Buktikan)** terima kasih atas segala kebersamaan dan bantuannya mulai dari berproses bersama, mengemban amanah kepengurusan hingga menjadi kanda warga.
18. *Society of Petroleum Engineering Hasanuddin University Student Chapter (SPE UNHAS SC)* atas kesempatan dan pengalaman berharga yang diberikan kepada penulis selama menempuh studi. **#TRUSTTOEXPAND!**
19. Kakak-kakak serta adik-adik **HMGF FMIPA Unhas** dan **HIMAFI FMIPA**



...as yang telah memberikan ilmu pengetahuan. Mengajarkan arti
 rsamaan, kekeluargaan serta pengalaman berharga yang didapatkan
 na berproses.

20. Untuk temen-temen **KKN Unhas Gel. 108 Desa Aeng Batu-Batu: Dewi, Lala, Rara, Suci, Devi, Arie, Irsan, Alfa, dan Panji** yang telah memberi semangat dan dukungan kepada penulis
21. Serta kepada semua pihak yang telah membantu penulis namun tidak sempat penulis sebutkan dalam skripsi ini, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik, semoga Allah SWT membalas segala perbuatan baik saudara(i) dan menjadi amal ibadah disisi-Nya.

Last but not least, I wanna thank me. I wanna thank me for believing in me. I wanna thank me for doing all this hard work. I wanna thank me for having no days off. I wanna thank me for never quitting, I wanna thank me for just being me all time.

Wabillahi Taufik Wal Hidayah, Wassalamu alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Makassar, 23 November 2023

Hesti Ayu Lestari



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Ruang Lingkup Penelitian	4
I.4 Tujuan Penelitian	4
BAB II	5
II.1 Tinjauan Kondisi Tektonik Sulawesi Tenggara.....	5
II.1.1 Teori Sesar	5
II.1.2 Tektonik dan Geologi Sulawesi Tenggara	8
II.2 Gempabumi	11
II.2.1 Parameter Gempabumi	11
II.2.2 Jenis-jenis Gempabumi	12
II.3 Penentuan Lokasi Gempabumi	14
II.4 Model Kecepatan Lokal	16
II.5 Metode <i>Double Difference</i>	17
II.6 Mekanisme Fokus	21
BAB III.....	26
Lokasi Penelitian	26
Alat dan Bahan	26



III.2.1 Alat	26
III.2.2 Bahan	27
III.3 Metode Pengolahan Data	27
III.3.1 Pengolahan Data Kecepatan Lokal	27
III.3.2 Pengolahan Data <i>Double Difference</i>	28
III.3.3 Pengolahan Data <i>Focal Mechanism</i>	30
III.4 Diagram Alir Penelitian	31
BAB IV	32
IV.1 Sebaran Gempabumi dari Data Katalog	32
IV.2 Model Kecepatan 1D Gelombang P Wilayah Penelitian	33
IV.3 Relokasi Hiposenter <i>Double Difference</i>	38
IV.3.1 Validasi Residual Waktu Tempuh	38
IV.3.2 Hasil Sebaran Relokasi Metode <i>Double Difference</i>	39
IV.4 Perubahan Koordinat Episenter	45
IV.4 <i>Focal Mechanism</i> Gempabumi Sulawesi Tenggara dan sekitarnya Periode 2019-2022	47
BAB V	51
V.1 Kesimpulan	51
V.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	53
Lampiran	vi



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Geometri bidang sesar (Febyani dkk., 2020).....	6
Gambar 2.2 Sesar Turun (Stein dan Wysession, 2003).....	6
Gambar 2.3 Sesar Naik (Stein dan Wysession, 2003).....	7
Gambar 2.4 Sesar Mendatar (Stein dan Wysession, 2003)	7
Gambar 2.5 Sesar-sesar di wilayah Sulawesi Tenggara.....	10
Gambar 2.6 Ilustrasi Hiposenter dan Episenter (Lowrie, 2007).....	12
Gambar 2.7 Metode tiga lingkaran penentuan lokasi gempa bumi	14
Gambar 2.8 Ilustrasi relokasi gempa bumi <i>Double Different</i>	18
Gambar 2.9 Ilustrasi teori elastic rebound (Lowrie, 2007).....	22
Gambar 2.10 Radiasi sumber gelombang (Stein dan Wysession, 2003).....	23
Gambar 2.11 Pembuatan Mekanisme Fokus (Cronin, 2010)	24
Gambar 2.12 Bentuk beachball dan jenis sesarnya (Cronin, 2010).....	25
Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian.....	26
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 4.1 Sebaran Gempabumi dari Data Katalog BMKG	32
Gambar 4.2 Grafik Iterasi-RMS Residual	33
Gambar 4.3 Grafik Pebandingan Model Kecepatan IASP91 dan Lokal	37
Gambar 4.4 Residual waktu tempuh (a) sebelum relokasi (b) setelah relokasi...	38
Gambar 4.5 Peta Persebaran Hiposenter Gempabumi di Sulawesi Tenggara dan a Periode tahun 2019-2022 (a) Data awal BMKG/Sebelum Relokasi (b) relokasi menggunakan Kecepatan Lokal	41



Gambar 4.6 Penampang <i>Cross Section</i> A B (a) Sebelum Relokasi (b) Setelah Relokasi menggunakan Kecepatan Lokal	42
Gambar 4.7 Penampang Melintang <i>Cross Section</i> C D (a) Sebelum Relokasi (b) Setelah Relokasi menggunakan Kecepatan Lokal	43
Gambar 4.8 Penampang <i>Cross Section</i> A B sampai kedalaman 60 (a) Sebelum Relokasi (b) Setelah Relokasi menggunakan Kecepatan Lokal.....	44
Gambar 4.9 Penampang <i>Cross Section</i> C D sampai kedalaman 60 (a) Sebelum Relokasi (b) Setelah Relokasi menggunakan Kecepatan Lokal.....	44
Gambar 4 10 Diagram Rose	46
Gambar 4 11 Diagram Kompas	46
Gambar 4 12 Peta Persebaran <i>Focal Mechanism</i>	47



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil Kecepatan 1D Gelombang P Wilayah Penelitian	34
Tabel 4.2 Hasil Analisis Jenis Sesar berupa nilai <i>Strike</i> , <i>Dip</i> , dan <i>Rake</i>	48
Tabel 4.3 Validasi nilai <i>Strike</i> , <i>Dip</i> , dan <i>Slip</i> menggunakan Global CMT	49



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Sulawesi Tenggara merupakan salah satu provinsi yang ada di Pulau Sulawesi tepatnya bagian dari lengan tenggara Sulawesi. Struktur geologi yang berkembang di Sulawesi Tenggara dipengaruhi oleh Lempeng Samudera Pasifik dan Lempeng Benua Australia. Kedua jenis lempeng yang berbeda ini bertabrakan dan kemudian bertindih oleh endapan Molasa Sulawesi (Sompotan, 2012). Pergerakan suatu lempeng mampu menyebabkan terjadinya gempa bumi. Banyaknya gempa bumi yang terjadi di wilayah Sulawesi Tenggara dan sekitarnya mengindikasikan bahwa masih terdapat banyak sesar-sesar aktif. Sesar tersebut diantaranya Sesar Lawanopo, Sesar Kolaka, Sesar Konawe, Sesar Tolo, dan sesar-sesar lainnya (Purwanti dan Ilham 2017).

Sejarah mencatat bahwa dari sesar-sesar yang berada di Sulawesi Tenggara dapat menyebabkan terjadinya gempa bumi seperti: pada tanggal 26 Maret 2022 wilayah Konawe dan sekitarnya dilanda gempa bumi dengan magnitudo 5,2 disebabkan oleh aktivitas Sesar Lawanopo (Attamimi, 2022); pada tanggal 11 November 2016 dirasakan dengan intensitas II-III MMI yang disebabkan oleh Sesar Naik Sangi-Sangi; pada tanggal 30 Oktober 2016 Sesar Lawanopo pernah menyebabkan gempa bumi dengan magnitudo 4,3 yang dirasakan di daerah Kendari dan sekitarnya (Purwanti dan Ilham 2017); pada tanggal 11 Juli 2011 pernah terjadi gempa bumi di Kolaka dengan magnitudo 5,4 berdampak pada puluhan rumah di rusak parah (BMKG, 2019); selain itu pada tanggal 25 April 2011, terjadi



gempabumi dengan magnitudo 6,0 bersumber di darat yang memiliki intensitas III-VII MMI, gempabumi ini menyebabkan 487 bangunan rusak di Kabupaten Konawe Selatan serta menyebabkan bangunan Menara Masjid Agung Kendari retak dan miring (Sulaeman, 2011).

Sesar merupakan salah satu dari aktivitas tektonik. Sesar menyebabkan suatu rekahan pada bagian batuan yang dipisahkan oleh rekahan akan bergerak satu terhadap yang lain. Studi mengenai analisis penentuan jenis dan arah patahan sesar penyebab timbulnya gempabumi sangat penting dilakukan karena berguna untuk pengembangan lebih lanjut mengenai potensi dan kekuatan gempabumi yang terjadi di daerah penelitian (Putri dkk., 2014).

Dalam mempelajari kegempaan yang ada hubungannya dengan sesar, perlu penentuan hiposenter terlebih dahulu. Hiposenter diperlukan untuk mempelajari struktur, rezim tektonik dan proses yang membangkitkan aktivitas kegempaan di suatu lokasi (Masinnai et al., 2017). Penentuan hiposenter awal masih mengabaikan beberapa parameter utama dan beberapa koreksi dikarenakan informasi mengenai hiposenter gempabumi perlu disampaikan dengan cepat kepada masyarakat.

Model kecepatan gelombang seismik merupakan salah satu parameter gempabumi yang sangat berpengaruh terhadap penentuan hiposenter gempabumi. Semakin tepat model kecepatan yang digunakan maka akan semakin akurat pula hiposenter yang didapatkan (Tumangkeng dkk., 2020). Diperlukannya teknik perhitungan

untuk memperbaiki akurasi dalam penentuan hiposenter yakni melakukan hiposenter gempabumi menggunakan metode *Double Difference*. Metode



ini digunakan karena mampu merelokasi gempa bumi dalam jumlah yang banyak serta mampu menurunkan nilai *residual time* mendekati angka nol, hal ini menandakan bahwa relokasi menggunakan metode *Double Difference* memiliki keakuratan hasil yang cukup baik (Rahayu, 2023).

Dengan adanya relokasi hiposenter gempabumi, maka identifikasi zona pensesaran mampu tergambarkan. Karakteristik sesar dari gempabumi dapat diketahui melalui mekanisme fokus. Mekanisme fokus adalah metode digunakan untuk mengidentifikasi jenis sesar serta arah pergerakannya dengan cara menentukan parameter sesar berupa nilai *strike*, *dip*, dan *rake*.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sekaligus menjadi solusi awal untuk meningkatkan ketepatan informasi dalam upaya mitigasi serta dapat menjadi bahan rujukan dalam perencanaan pembangunan di wilayah Sulawesi Tenggara dan sekitarnya. Selain itu diharapkan penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai studi gempabumi juga dapat menjadi bahan pertimbangan dan penelitian lebih lanjut.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, adapun rumusan masalah pada penelitian ini yakni:

1. Bagaimana persebaran hiposenter gempabumi sebelum dan setelah direlokasi pada wilayah penelitian dengan menggunakan metode *Double Different*?



2. Jenis sesar apa saja yang menyebabkan gempabumi tahun 2019-2022 pada daerah penelitian menggunakan mekanisme fokus?

I.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian dibatasi oleh wilayah Sulawesi Tenggara dan sekitarnya yakni dengan koordinat $02^{\circ}45'$ - $06^{\circ}15'$ Lintang Selatan dan $120^{\circ}45'$ - $124^{\circ}30'$ Bujur Timur. Data diperoleh dari BMKG berupa data gempabumi tahun 2019-2022 yang meliputi data berupa data *origin time*, *arrival time* gelombang P dan S, *longitude*, *latitude*, kedalaman, magnitudo, dan *residual time*. *The International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior* (IASPEI / IASP91) dan data polaritas gerakan pertama gelombang P dari *International Seismological Center* (ISC). Data kecepatan IASP91 dan data katalog digunakan sebagai masukan awal untuk mendapatkan model kecepatan gelombang 1D wilayah penelitian. Selain itu data katalog juga digunakan untuk merelokasi gempabumi menggunakan metode *Double Difference* (DD) yang diolah menggunakan *software* HypoDD dengan masukan nilai kecepatan gelombang seismik 1D wilayah penelitian. Dalam pengolahan data mekanisme fokus dipilih beberapa data gempabumi yang akan diolah dalam *software* AZMTAK menggunakan data polaritas gerakan pertama gelombang P gempabumi untuk mendapatkan *beachball*.

I.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan penjelasan di atas tujuan penelitian yakni:

1. Mengetahui pola sebaran hiposenter sebelum dan sesudah direlokasi menggunakan metode *Double Difference*
2. Mengetahui jenis sesar yang mempengaruhi gempabumi pada tahun 2019-2022 di wilayah penelitian menggunakan mekanisme fokus



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Tinjauan Kondisi Tektonik Sulawesi Tenggara

II.1.1 Teori Sesar

Sesar merupakan suatu bidang *fracture* yang memotong tubuh batuan disertai oleh adanya pergeseran dengan bidang pecahannya. Sesar dapat terjadi pada area yang luas bahkan dalam waktu yang singkat. Pergerakan sesar selalu diikuti oleh gempa bumi yang merambatkan gelombang ke segala arah. Semakin besar pergeseran akibat sesar maka semakin luas daerah yang dilalui oleh rambatan gelombang juga semakin besar pula magnitudo gempabumi (Zuhdi, 2019).

Sesar aktif ialah sesar yang bergerak pada kurun waktu 10.000 tahun yang lalu. Sesar yang dapat berpotensi aktif adalah sesar yang bergerak pada kurun 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 (Kurniati, 2017)

Dalam menganalisa orientasi bidang sesar perlu diperhatikan beberapa parameter-parameter sesar yaitu sebagai berikut (Febyani dkk., 2020):

1. *Strike* (ϕ)

Strike atau jurus ialah garis perpotongan antara bidang horizontal dengan bidang sesar. *Strike* diukur dari arah utara ke arah timur serah dengan jarum jam sampai ke jurus sesar. Besarnya sudut *strike* yakni $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$.

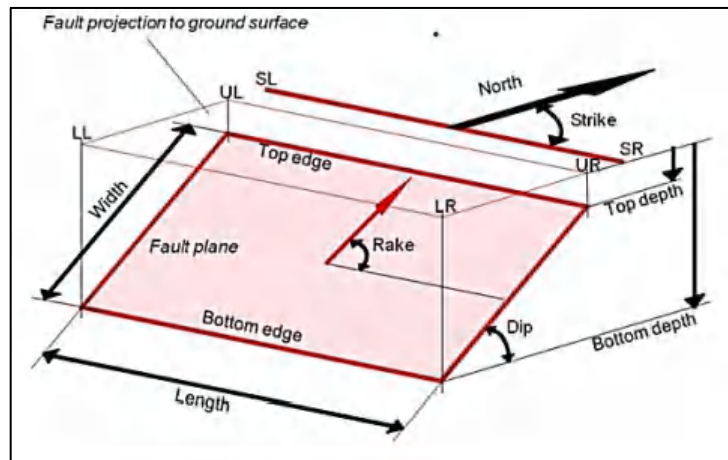
2. *Dip* (δ)

Dip merupakan sudut antara permukaan atau bidang horizontal dan bidang sesar yang memiliki nilai bervariasi dalam rentang 0° sampai 90° .



3. Rake

Rake merupakan sudut yang dibentuk oleh arah *strike* dan *dip*. Slip angle (λ) biasanya dinyatakan sebagai arah gerak *hanging wall*, ($-180^\circ \leq \lambda \leq 180$). Jika sesar *thrust fault* maka slip angle bernilai $\lambda > 0^\circ$ dan jika sesar *normal fault* maka $\lambda < 0^\circ$.

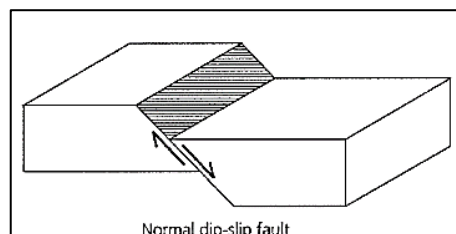


Gambar 2.1 Geometri bidang sesar (Febyani dkk., 2020)

Berdasarkan karakteristik gerakannya, sesar dapat dibedakan menjadi yakni (Zulkarnaen, 2015):

1. Sesar Turun/Sesar Normal/*Normal Fault*

Sesar normal merupakan sesar yang arah pergerakkan *hanging wall* relatif turun terhadap *foot wall*. Sesar turun terjadi apabila nilai δ (dip) $\neq 0$ dan $\delta \neq \pi/2$ serta memiliki nilai λ (rake) dalam rentang $180^\circ \leq \lambda \leq 0^\circ$

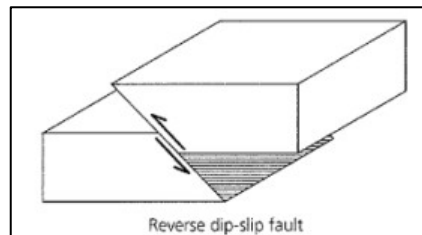


Gambar 2.2 Sesar Turun (Stein dan Wysession, 2003)

Sesar Naik/*Reverse Fault/Thrust Fault*



Sesar naik merupakan sesar yang arah pergerakannya *hanging wall* relatif naik terhadap *foot wall*. Sesar turun terjadi apabila nilai δ (dip) $\neq 0$ dan $\delta \neq \pi/2$ serta memiliki nilai λ (rake) dalam rentang $180^\circ \leq \lambda \leq 0^\circ$



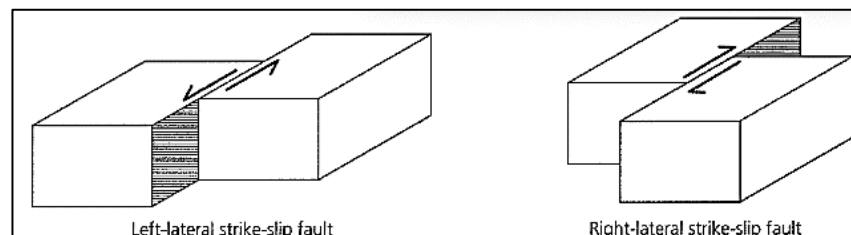
Gambar 2.3 Sesar Naik (Stein dan Wysession, 2003)

3. Sesar *Oblique*

Sesar *oblique* merupakan sesar yang pergerakannya gabungan antara sesar mendatar dan sesar naik/sesar turun sehingga membentuk arah diagonal. Gaya-gaya yang bekerja pada sesar *oblique* meliputi sesar mendatar dan sesar normal dengan $\delta = 90^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ (bergeser ke kiri) $\lambda = 180^\circ$ (bergeser ke kanan).

4. Sesar Mendatar/*Strike-Slip*

Sesar mendatar dimana terdapat dua blok batuan yang bergerak secara horinzontal. Sesar mendatar terbagi menjadi dua yakni *right lateral strike-slip* dimana sesar mendatar yang bergerak ke arah kanan searah dengan jarum jam dan *left lateral strike-slip* yang merupakan sesar mendatar yang bergerak ke arah kiri berlawanan dengan arah jarum jam.



Gambar 2.4 Sesar Mendatar (Stein dan Wysession, 2003)



II.1.2 Tektonik dan Geologi Sulawesi Tenggara

Wilayah Sulawesi Tenggara termasuk dalam pertemuan 2 lempeng tektonik yakni lempeng Samudera Pasifik yang bergerak ke arah barat dan lempeng Benua Australia bergerak ke arah utara, maka litologi daerah Sulawesi Tenggara disusun atas Kepingan Benua, Komplek Ofiolit, dan Molasa Sulawesi (Surono, 2013).

Tektonik lengan tenggara Sulawesi terjadi pada tiga periode yakni periode pra-tumbukan, periode tumbukan, dan periode pasca tumbukan. Periode pra-tumbukan yang terjadi dalam runtutan stratigrafi dan sedimentologi Trias-Oligosen yang merupakan awal dari kepingan Benua Sulawesi Tenggara. Periode tumbukan yang teridentifikasi dari benua dan Ofiolit dari Lajur Ofiolit Sulawesi Timur yang terbentuknya sesar naik, struktur imbrikasi, dan lipatan. Dalam periode pasca tumbukan terekam pada runtunan Molasa Sulawesi, periode ini juga menghasilkan struktur utama berupa sesar geser mengiris yang terdapat pada sesar Metarombeo yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.

Berikut beberapa sesar yang terdapat di wilayah Sulawesi Tenggara dan sekitarnya menurut PusGen (2017):

1. Sesar Matano

Sesar Matano merupakan sesar perpanjangan dari Sesar Palu Koro. Sesar ini memanjang dari arah barat laut hingga ke Tenggara yang memotong Danau Matano. Morfologi Sesar Matano terbagi menjadi 6 segmen yaitu segmen Kulaeana, Pewisai, Matano, Pamsoa, dan Gressa.

Sesar Lawanopo



Sesar Lawanopo merupakan jenis *strike slip fault* yang terletak di Sulawesi Tenggara tepatnya di sebelah selatan Sesar Matano.

3. Sesar Buton

Sesar Buton terletak di bagian selatan Sulawesi Tenggara. Sesar Buton memiliki 2 segmen mekanisme yang berbeda yakni *strike slip* dan *thrust*. Untuk segmen *strike slip* memiliki *length* yang lebih pendek yaitu 29 km dan segmen *thrust* dengan *length* sepanjang 60 km. Dikarenakan keterbatasan data, sesar Buton masih belum diestimasi *sliprate* geodetikanya.

4. Sesar Tolo

Sesar Tolo terletak di utara Laut Banda yang merupakan tempat berlangsungnya subduksi antara lengan tenggara Pulau Sulawesi dengan bagian utara laut Banda. Sekitar Tolo mempunyai seismisitas yang cukup tinggi sehingga dapat diduga bahwa gempa yang terjadi di laut Sulawesi Tenggara disebabkan oleh aktivitas Sesar Tolo yang merupakan sesar laut naik. Laju geser Sesar Tolo dengan segmen *Tolo Thrust* sebesar 2-16 mm/tahun.

5. Sesar Kendari

Sesar Kendari terletak di Sulawesi Tenggara yaitu berada di antara Sesar Tolo, Sesar Lawanopo, dan Sesar Buton.

Selain sesar di atas juga terdapat beberapa sesar lainnya:

1. Sesar Kolaka

Sesar ini terdapat di sepanjang Barat Laut-Tenggara Provinsi Sulawesi Tenggara yang memanjang sekitar 250 km dari pantai barat Teluk Bone sampai Ujung Selatan Lengan Tenggara Sulawesi.



2. Sesar Konaweha

Sesar Konaweha merupakan sesar yang memanjang dari Timur Kolaka Utara kemudian melewati Kabupaten Kolaka hingga berujung di Tenggara Konawe Selatan. Sesar Konaweha yang mengiris batuan sepanjang Sungai Konaweha yang memanjang sekitar 50km. Sesar ini yang mengiris batuan endapan alluvial di Daratan Wawotoli yang mengindikasikan bahwa Sesar Konaeweha merupakan sesar yang masih aktif.

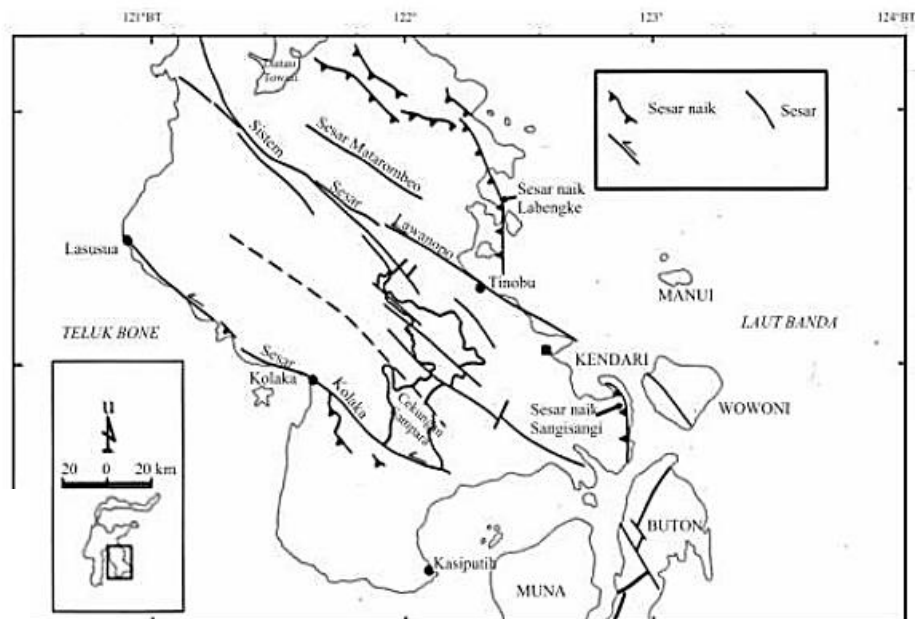
3. Sesar-sesar mikro

a. Sesar Naik Sangi-Sangi

Sesar ini merupakan jenis sesar naik yang terletak di wilayah Konawe Selatan.

b. Sesar Naik Labengke

Jenis sesar naik ini memanjang dari Timur Laut sampai Tenggara Konawe Utara.



2.5 Sesar-sesar di wilayah Sulawesi Tenggara (Zakaria dan Sidarto, 2015)



II.2 Gempabumi

Gempabumi adalah peristiwa bergetar atau berguncangnya bumi yang diakibatkan adanya pergerakan atau pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba. Pergerakan tiba-tiba dari lapisan batuan di dalam bumi inilah yang menghasilkan energi. Energi tersebut dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempabumi atau gelombang seismik (Risnawati dkk, 2021).

Energi gempabumi dinyatakan dalam besarnya *moment magnitude* (M_w) yang tergantung terhadap rata-rata slip bidang sesar, daerah patahan sesar, dan rigiditas batuan yang terdampak. Semakin besar *slip fault* semakin besar area keruntuhannya, dan semakin tinggi rigiditas, semakin besar gempanya, dan semakin tinggi momen magnitudnya (Duarte, 2016).

II.2.1 Parameter Gempabumi

Berikut beberapa parameter-parameter gempabumi:

1. *Origin Time*

Waktu asal kejadian atau biasa disebut dengan *origin time* merupakan waktu terjadinya gempabumi pada sumbernya di kedalaman tertentu dalam suatu lapisan bumi. Dalam pengamatan seismolog, *origin time* merupakan salah satu parameter penting untuk mengidentifikasi gempabumi. *Origin time* dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit dan detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinate*).

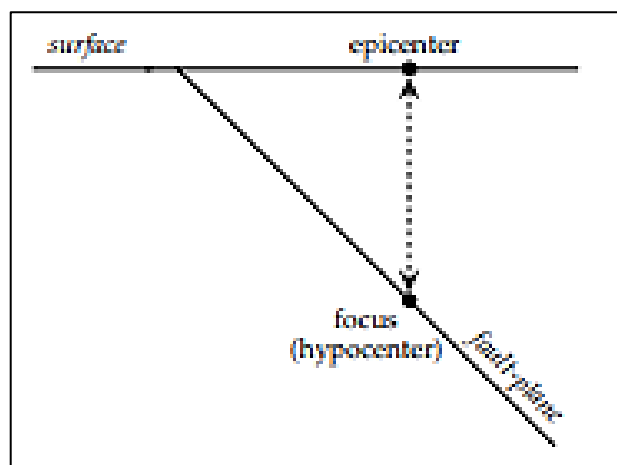
2. Kedalaman



kedalaman sumber gempa yaitu ukuran kedalaman terjadinya gempabumi. Ukuran kedalaman ini berupa gempa dangkal, gempa menengah, dan gempa dalam.

3. Hiposenter

Hiposenter merupakan pusat titik berlangsungnya kejadian gempabumi. Agar mudah diasumsikan, hiposenter terletak di bawah permukaan, yang memiliki bidang yang luasnya tergantung besarnya suatu energi. Dalam hal ini, hiposenter memiliki titik berupa titik koordinat dan kedalaman suatu gempabumi.



Gambar 2.6 Ilustrasi Hiposenter dan Episenter (Lowrie, 2007)

4. Episenter

Episenter adalah garis tegak lurus yang di tarik dari hiposenter sampai ke permukaan bumi. Dalam hal ini, episenter terletak di permukaan bumi yang biasa dituliskan berupa titik koordinat saja.

5. Magnitudo

Magnitudo merupakan kekuatan energi yang dikeluarkan oleh gempabumi yang merupakan hasil pengamatan alat seismograf.

II.2.2. Jenis-jenis Gempabumi



Gempabumi diklasifikasikan berdasarkan dasar terjadinya gempabumi adalah sebagai berikut (Munir, 2006):

1. Gempa Tektonik

Gempa tektonik adalah gempa yang terjadi akibat pergeseran-pergeseran kerak bumi ataupun peristiwa tektonisme. Gempa tektonik mampu mengakibatkan dislokasi (*displacement*) yang merupakan kejadian perpindahan struktur bumi secara tiba-tiba karena adanya tekanan atau tarikan. Gempa tektonik merupakan gempa yang paling sering terjadi dibandingkan gempa lainnya, terdapat sekitar 93% dari semua gempa tergolong kedalam gempa tektonik.

2. Gempa Vulkanik

Gempa vulkanik adalah gempa yang terjadi karena adanya aktivitas gunung api/vulkanisme baik sebelum, sedang, ataupun sebuah letusan. Ketika magma keluar lewat pipa-pipa gunung api akan bergeser bersama sama dengan bataun penyusun gunung api, getarannya diteruskan kesegala arah. Hal itulah penyebab sebelum terjadi letusan gunung api. Demikian saat terjadi letusan, material-material gunung api akan dihempaskan keluar, sedangkan getarannya merambat kesegala arah yang dapat menimbulkan gempabumi di daerah sekitarnya.

3. Gempa Runtuhan

Gempa runtuhan adalah gempa yang terjadi ketika adanya runtuhan termasuk longsor/ *rock fall*, atap gua runtuh, ataupun runtuhan di dalam lubang tambang. Dari runtuhan material tersebut yang menyebabkan getaran di permukaan bumi.



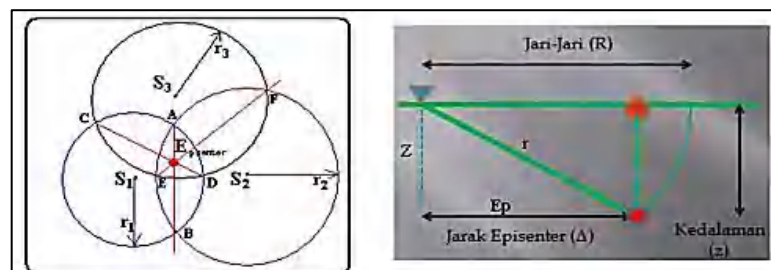
BMKG gempabumi berdasarkan kedalamannya diklasifikasikan sebagai

1. Gempa dangkal yaitu gempabumi yang kedalamannya <60 km di bawah permukaan bumi.
2. Gempa menengah yaitu gempabumi yang kedalamannya antara 60 km – 300 km di bawah permukaan bumi.
3. Gempa dalam yaitu gempabumi yang kedalamannya >300 km di bawah permukaan bumi.

II.3 Penentuan Lokasi Gempabumi

Penentuan lokasi hiposenter diawali dengan informasi yang dibawa oleh waktu tiba (*arrival time*) gelombang pada setiap stasiun pengamatan. Informasi tersebut akan menjadi salah satu parameter dalam menentukan lokasi dan waktu kejadian gempabumi yang tidak diketahui. Metode penentuan lokasi gempa bumi ini disebut sebagai metode *Single Event Determination (SED)* yang lokasi dan waktu kejadian (*origin time*) setiap gempabumi diperhitungkan berdasarkan rekaman gelombang (fase) gempabumi tersebut pada setiap stasiun (Hikmah, 2022).

Salah satu metode yang digunakan dalam penentuan lokasi hiposenter gempabumi yakni dengan metode tiga lingkaran. Metode ini menggunakan selisih waktu tiba gelombang P dan S yang terekam pada masing-masing stasiun gempabumi yang dibuat secara manual menggunakan 3 lingkaran dengan pusat di lokasi stasiun.



· 2.7 Metode tiga lingkaran penentuan lokasi gempabumi (Rasmid, 2014)



Pusat gempa ditunjukkan dalam area yang diarsir dimana ketiga lingkaran tersebut saling tumpang tindih. S1, S2, dan S3 merupakan stasiun-stasiun yang terketak pada masing-masing lingkaran dengan jari jari d_1 , d_2 dan d_3 sebagai jarak hiposenter dengan rumus sebagai berikut:

$$d = (T_p - T_o) * \alpha \quad (2.1)$$

dengan:

α = kecepatan gelombang P (km/s)

T_p = waktu kedatangan gelombang P (s)

T_o = waktu terjadinya gempa di sumber (s)

Koordinat episenter E merupakan perpotongan garis berat ketiga lingkaran tersebut seperti pada **Gambar 2.7**. Garis berat lingkaran 1 dan 2 adalah garis yang menghubungkan perpotongan lingkaran 1 dan 2 (AB). Garis berat lingkaran 1 dan 3 adalah garis yang menghubungkan perpotongan lingkaran 1 dan 3 (CD). Sedangkan garis berat lingkaran 2 dan 3 adalah garis yang menghubungkan perpotongan lingkaran 2 dan lingkaran 3 (EF). Kedalaman (Z) dapat diperoleh dengan rumus phytagoras berikut:

$$Z_1 = \sqrt{(r_1^2 - (Ep_1)^2)} \quad (2.2)$$

$$Z_2 = \sqrt{(r_2^2 - (Ep_2)^2)} \quad (2.3)$$

$$Z_3 = \sqrt{(r_3^2 - (Ep_3)^2)} \quad (2.4)$$

Z merupakan rata-rata dari Z_1 , Z_2 , dan Z_3 dengan satuan km.



II.4 Model Kecepatan Lokal

Model kecepatan gelombang seismik merupakan salah satu parameter gempabumi yang sangat berpengaruh terhadap penentuan hiposenter gempabumi. Semakin tepat model kecepatan yang digunakan maka akan semakin akurat pula hiposenter yang didapatkan (Tumangkeng dkk., 2020).

Model kecepatan 1-D yang digunakan sebagai model awal adalah model kecepatan global IASP91. Model kecepatan 1-D tersebut diperbaharui dengan metode *Couple Velocity-Hypocenter* menggunakan *software* Velest. Secara umum kecepatan 1-D yang sudah diperbaharui lebih bagus dari model kecepatan 1-D awal (Massinai et al, 2017). Model kecepatan awal digunakan untuk memperoleh hasil model kecepatan lokal 1-D yang menunjukkan terdapat perbedaan antara model kecepatan awal dengan model kecepatan lokal.

Metode *Coupled Velocity-Hypocenter* merupakan metode yang digunakan untuk memecahkan permasalahan menentukan model kecepatan 1-D gelombang, relokasi gempa dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode Geiger. Metode ini digunakan untuk gempa lokal serta permasalahan metode tersebut dapat diselesaikan menggunakan *software* Velest (Shohaya, 2014).

Software velest dirancang untuk mendapatkan model kecepatan 1-D dengan koreksi stasiun sebagai referensi awal untuk tomografi sesimik. Pembaharuan model kecepatan, koreksi, dan relokasi gempabumi dapat digunakan menggunakan

ini. Pembaharuan tersebut menggunakan persamaan Kissling (1995) berikut:



$$r = t_{obs} - t_{cal} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \quad (2.5)$$

dengan:

r = residual waktu tempuh (sec)

t_{obs} = waktu tempuh observasi (sec)

t_{cal} = waktu tempuh kalkulasi (sec)

f = fungsi terhadap lokasi stasiun (s), lokasi hiposenter, waktu tiba (h), dan model kecepatan (m)

k = jumlah hiposenter

i = jumlah lapisan

e = koreksi stasiun

II.5 Metode *Double Difference*

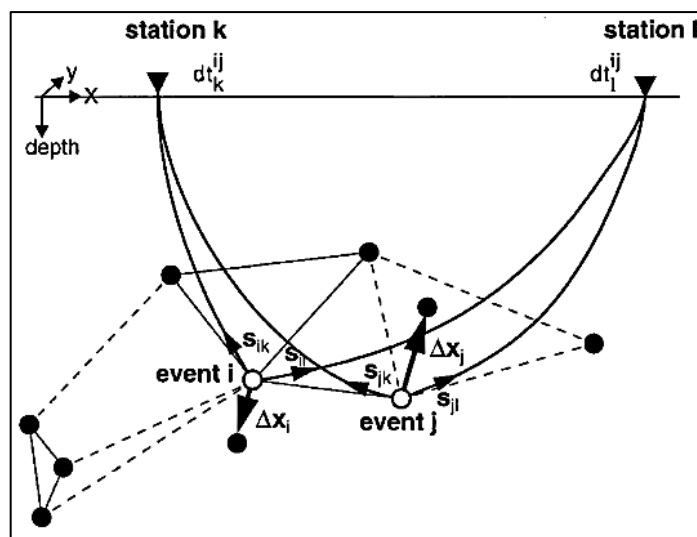
Relokasi gempa bumi yang mempunyai tujuan untuk mendapatkan posisi hiposenter gempa bumi yang lebih akurat yang sesuai dengan data yang didapat. Prinsip relokasi metode *Double Different* (DD) adalah jarak persebaran hiposenter antara dua data gempa bumi yang memiliki *raypath* yang sama antara jarak dan hiposenter stasiun. Pada gempa waktu tempuh hasil perhitungan, dan pengamatan, pada data gempa bumi yang mendekati dengan beberapa stasiun pencatat gempa bumi yang sama. Jarak antara dua data gempa bumi harus lebih kecil dibandingkan jarak stasiun pencatat gempa (Wulandari dkk., 2021).



merupakan program komputer untuk merelokasi gempa metode *Double* e menggunakan algoritma dari Waldhauser dan Ellsworth (2000). Dalam

hal ini dapat menjalankan dan cara menggunakan program ph2dt dan hypoDD untuk menghitung lokasi hiposenter *Double Difference*.

Algoritma *Double Difference* merupakan hasil dari pengembangan Metode Geiger yang menggunakan data perbedaan waktu tiba gelombang. Anggapan yang digunakan adalah bahwa bumi terdiri dari lapisan datar yang homogen isotropik, sehingga waktu tiba gelombang gempa yang karena pemantulan dan pembiasan untuk setiap lapisan dapat dihitung. Cara yang digunakan dengan memberi nilai awal hiposenter, kemudian menghitung waktu rambat gelombang untuk setiap stasiun yang digunakan. Dari perhitungan ini didapatkan residu atau selisih antara waktu observasi dengan waktu perhitungan.



Gambar 2.8 Ilustrasi relokasi gempa bumi double different (Waldhauser dan Ellsworth, 2000)

Pada Gambar 2.8 lingkaran hitam dan lingkaran putih merupakan posisi hiposenter gempa bumi yang terhubung dengan *event* gempa bumi yang ada disekitarnya akan koreksi data silang dan katalog. Data koreksi silang ditunjukkan oleh s sedangkan data katalog ditunjukkan oleh garis putus-putus. Gempa *i* dan



j ditunjukkan oleh lingkaran putih yang terekam pada stasiun k dan l yang sama dengan perbedaan waktu tempuh dt_i^{ij} dan dt_k^{ij} . Panah tebal Δx_i dan Δx_j menunjukkan vektor relokasi untuk setiap *event* i dan j .

Waktu gelombang tiba T untuk *event* gempa i dan stasiun k diperoleh menggunakan rumus penjalaran gelombang:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \quad (2.6)$$

dengan:

T_k^i = waktu tempuh gempa i di stasiun pengamat k (s)

τ^i = waktu kejadian dari gempabumi i (s)

ds = elemen panjang lintasan (km)

u = *slowness field* (s/km)

Hubungan antara waktu tiba gelombang dan lokasi gempabumi tidak linier. Oleh karena itu digunakan persamaan ekspansi deret Taylor untuk melinierkan persamaan 2.6. Setelah itu didapatkan residual gempabumi yang menghubungkan waktu tiba observasi dan kalkulasi.

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} = \Delta m^k \quad (2.7)$$

$\Delta m^{ij} = \Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}, \Delta z^{ij}, \Delta \tau^{ij}$ yakni perubahan relatif hiposenter antara dua *event* gempabumi. Pada persamaan ini sumber gempabumi merupakan pusat dari dua



er dengan asumsi nilai vektor *slowness* yang konstan. Lalu menuliskan residual antara observasi dan kalkulasi adalah selisih waktu tempuh

observasi dan kalkulasi antara dua kejadian gempa bumi i dan j ke persamaan (2.8)

ini dapat dikatakan sebagai persamaan *double different*, berikut:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (2.8)$$

dengan:

dr_k^{ij} = waktu tempuh residual ke stasiun K akibat pasangan gempa i dan j (s)

i dan j = dua hiposenter saling berdekatan

k dan l = dua stasiun yang merekam kejadian gempa bumi

t_k^i = waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun k akibat gempa i (s)

t_k^j = waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun k akibat gempa j (s)

Persamaan (2.8) dapat menggunakan fase waktu tiba yang terukur (*absolute travel time differences*) maupun korelasi silang (*relative travel-time differences*). Dengan mengasumsikan bahwa vector *slowness* konstan hanya dapat berlaku untuk dua gempa bumi yang memiliki jarak yang cukup dekat. Perasamaan umum yang berlaku untuk dua gempa bumi i dan j diperoleh dengan mengambil selisih antara persamaan (2.8) dengan menggunakan vektor *slowness* yang sesuai, sehingga:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \quad (2.9)$$

atau

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta t_k^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta t_k^j \quad (2.10)$$



t merupakan turunan parsial dari waktu tempuh untuk masing-masing gempa i dan j terhadap lokasi (x,y,z) dan waktu asal (τ) dihitung untuk hiposenter saat ini dan lokasi stasiun dimana fase ke- k dicatat $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, dan $\Delta \tau$ adalah perubahan yang diperlukan dalam parameter hiposenter untuk membuat model lebih sesuai dengan data. Jika dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x_1} & \frac{\partial t_1}{\partial y_1} & \frac{\partial t_1}{\partial z_1} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x_2} & \frac{\partial t_2}{\partial y_2} & \frac{\partial t_2}{\partial z_2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x_n} & \frac{\partial t_n}{\partial y_n} & \frac{\partial t_n}{\partial z_n} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

atau

$$W\Delta d = WG\Delta m \quad (2.12)$$

dengan W = matriks diagonal yang menjadi pembobot dalam perhitungan persamaan waktu tempuh gelombang, Δd adalah matriks waktu residual berdimensi $M \times 1$. G mendefinisikan matriks ukuran $M \times 4N$ dimana M merupakan jumlah observasi *double different* dan N jumlah kejadian *event*.

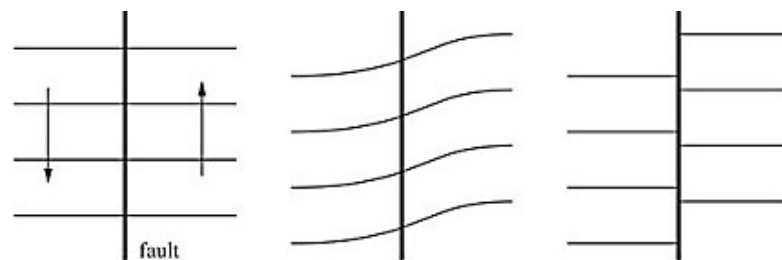
II.6 Mekanisme Fokus

Theory Elastic Rebound merupakan teori yang menjelaskan tentang mekanisme terjadinya gempabumi yang diakibatkan oleh pergeseran oleh sesar pada batuan/lapisan. Teori ini menyatakan jika terjadi gempabumi akibat proses pensesaran dalam kerak bumi yang disebabkan oleh pelepasan energi secara mendadak dari

elastik yang melampaui batas kekuatan batuan. Tegangan elastik ini lasi apabila batuan mengalami deformasi yang terus menerus secara



signifikan dan besarnya akan semakin membesar. Jika tegangan elastik ini melebihi batas elastisitas batuan maka batuan akan terpecah dan membentuk sesar. Dengan proses tersebut maka energi akan dilepaskan dalam bentuk gelombang elastik yang menjalar dalam bumi sehingga dapat dirasakan yakni gempa bumi (Zulkarnaen, 2015).



Gambar 2.9 Ilustrasi teori elastic rebound (Lowrie, 2007)

Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 2.9, gempa bumi terjadi melalui beberapa tahapan berikut: (A) pada situasi ini blok batuan masih dalam kondisi stabil, dengan gerakan yang lambat proses ini terus berlangsung dengan waktu yang lama (B) sampai tekanan yang dihasilkan mampu mendorong kedua blok batuan hingga melebihi ambang elastisitas maka batuan akan pecah, proses ini dikenal dengan *rupture* (C) selama proses *rupture* energi elastik batuan akan dipancarkan segala arah menuju permukaan dalam bentuk gelombang seismik, pecahnya batuan inilah yang terjadinya gempa bumi.

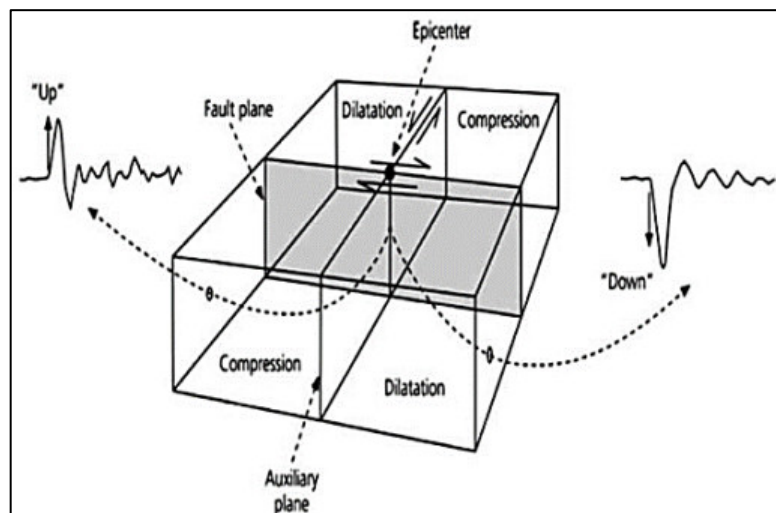
Mekanisme fokus (*focal mechanism*) merupakan parameter yang dapat menggambarkan orientasi bidang sesar serta arah pergerakannya. *Focal mechanism* dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu menggunakan polaritas yang dapat

melalui gerakan pertama gelombang P, melalui amplitudo atau rasio σ bersamaan dengan polaritas dari data gelombang P dan gelombang S,



atau dengan cara menggunakan *complete waveform*, baik forward modeling maupun inverse modeling (Febyani, 2020).

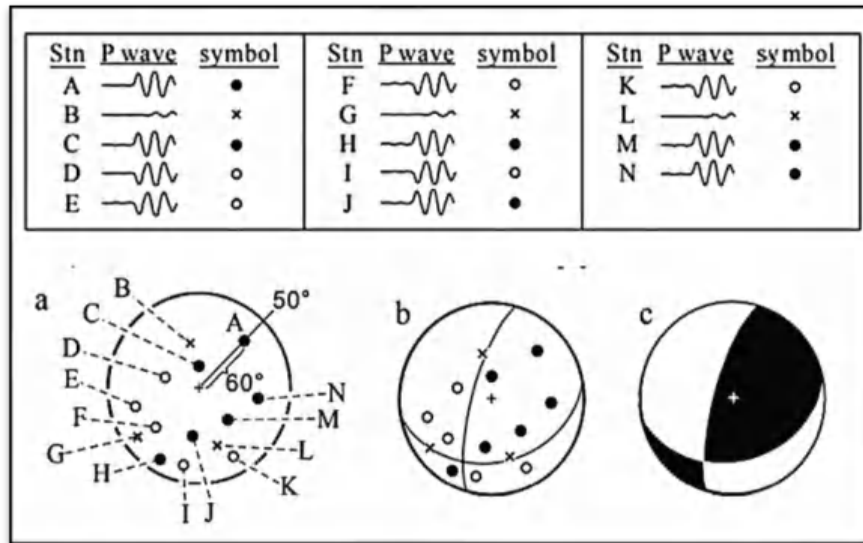
Ketika terjadi gempa bumi, gelombang gempa bumi merambat ke segala arah dalam bentuk phase gelombang. Dikarenakan memiliki kecepatan paling besar dibanding gelombang lainnya, maka gelombang P lebih dahulu terekam oleh seismograf pada arah yang berbeda. Arah gerakan pertama dari gelombang P inilah yang akan diamati untuk mempelajari mekanisme fokus, dikarenakan gelombang P yang sangat jelas pembacaannya.



Gambar 2.10 Radiasi sumber gelombang (Stein dan Wysession, 2003)

Pada Gambar 2.10 menjelaskan bahwa permukaan bumi yang datar terbagi menjadi empat kuadran yang tiap kuadrannya memiliki polaritas yang berbeda. Pada komponen vertikal, gelombang P hanya terekam gerakan *up-down* saja. Untuk menentukan *up* dan *down* dapat dilihat melalui gerakan kompresi (C) dan dilatasi (D).



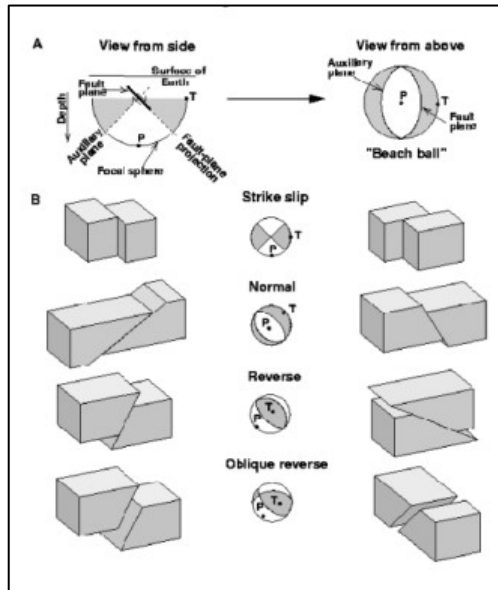


Gambar 2.11 Pembuatan Mekanisme Fokus (Cronin, 2010)

Berdasarkan Gambar 2.11 (a) merupakan hasil dari gelombang pertama yang diterima oleh stasiun-stasiun yang diplot dalam stereonet. Jika gelombang pertama menghadap ke bawah/membentuk lembah maka disimbolkan dengan bulatan kosong (o) atau biasa disebut dilatasi, jika gelombang pertama yang ditangkap oleh stasiun menghadap ke atas atau membentuk puncak maka disimbolkan dengan bulatan penuh (●) atau biasa disebut kompresi, dan jika tidak terdapat gelombang atau gelombang tidak terekam oleh stasiun maka disimbolkan oleh (x). Kemudian pada gambar (b) di kelompokkan sesuai dengan polanya dengan simbol (x) sebagai pemisah dari kompresi dan dilatasi dan pada gambar (c) terbentuk solusi bidang sesar baik sesar geser, sesar naik, sesar turun atau sesar *oblique*.

Teknik pembuatan mekanisme fokus dapat menganalisa jenis sesar dari setiap gempa yang terjadi serta arah jurus dan kemiringannya dapat ditentukan. **Gambar 2.12** menunjukkan jenis-jenis sesar yang diidentifikasi sebagai mekanisme fokus yang digambarkan dalam bentuk bola fokus atau *beachball*.





Gambar 2.12 Bentuk *beachball* dan jenis sesarnya (Cronin, 2010)

