

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN
METODE *DOUBLE DIFFERENCE* : STUDI KASUS
GEMPABUMI CIANJUR 21 NOVEMBER 2022**

(Skripsi)

Oleh

**Dirga Ilham Fahlevi
1915051049**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN
METODE *DOUBLE DIFFERENCE* : STUDI KASUS
GEMPABUMI CIANJUR 21 NOVEMBER 2022**

Oleh

DIRGA ILHAM FAHLEVI

(Skripsi)

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mendapat Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE DIFFERENCE* : STUDI KASUS GEMPABUMI CIANJUR 21 NOVEMBER 2022

Oleh

Dirga Ilham Fahlevi

Indonesia merupakan salah satu negara di Asia Tenggara dengan aktivitas seismik teraktif di dunia. Indonesia merupakan pertemuan tiga antar lempeng yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik yang menjadikan sebagian besar wilayah Indonesia sebagai zona konvergen. Telah terjadi gempa di Kabupaten Cianjur pada 21 November 2022 yang mengakibatkan 268 korban jiwa dan lebih dari 2000 rumah mengalami kerusakan. Penelitian ini berfokus pada relokasi data gempa utama dan gempa susulan dari gempa bumi Cianjur 21 November 2022 dari data yang terekam oleh BMKG – Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara dengan Metode *Double Difference* dan data tiga model kecepatan satu dimensi. Model kecepatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu model *Veleast*, *Crust*, dan *MASW*. Hasil dari relokasi yang telah digunakan dengan program *hypoDD* dan tiga model kecepatan didapatkan bahwa gempa bumi terelokasi sebanyak 29 dari 129 peristiwa gempa, kemudian model *Crust* menghasilkan distribusi kedalaman 5-15 km dengan kerapatan sedang dan sebaran sedikit menyebar, model *Veleast* menghasilkan distribusi kedalaman lebih dalam 5-20 km dengan kerapatan tertinggi, dan model *MASW* menghasilkan kedalaman paling dangkal 5-15 km dengan kerapatan tinggi namun sebaran lebih luas. Berdasarkan hasil kuantitatif dan kualitas relokasi hiposenter, model kecepatan satu dimensi *MASW* dengan *HypoDD* direkomendasikan sebagai model utama untuk mitigasi bencana dikarenakan *MASW* menghasilkan nilai *RMSCT* 0,755 hal tersebut dikarenakan *MASW* didapatkan dari data aktual lapangan yang diambil secara langsung.

Kata Kunci: Gempa Bumi Cianjur 2022, Model Kecepatan, *Double Difference*.

ABSTRACT

**EARTHQUAKE HYPOCENTER RELOCATION USING THE DOUBLE
DIFFERENCE METHOD : CASE STUDY OF THE CIANJUR
EARTHQUAKE ON NOVEMBER 21, 2022**

By

Dirga Ilham Fahlevi

Indonesia is one of the countries in Southeast Asia with the most active seismic activity in the world. Indonesia is located at the meeting point of three tectonic plates, namely the Eurasian, Indo-Australian, and Pacific plates, making most of Indonesia a convergent zone. An earthquake occurred in Cianjur Regency on November 21, 2022, resulting in 268 fatalities and damage to more than 2,000 houses. This study focuses on the relocation of data on the main earthquake and aftershocks from the November 21, 2022 Cianjur earthquake from data recorded by BMKG - North Lampung Class III Geophysical Station using the Double Difference Method and three one-dimensional velocity models. The velocity models used in this study are the Velest, Crust, and MASW models. The results of the relocation using the hypoDD program and three velocity models show that 29 of the 129 earthquake events were relocated, The Crust model produced a depth distribution of 5-15 km with moderate density and a slightly scattered distribution, the Velest model produced a deeper depth distribution of 5-20 km with the highest density, and the MASW model produced the shallowest depth of 5-15 km with high density but a wider distribution. Based on the quantitative results and quality of hypocenter relocation, the one-dimensional MASW velocity model with HypoDD is recommended as the primary model for disaster mitigation because MASW produces an RMSCT value of 0.755. This is because MASW is obtained from actual field data collected directly.

Keywords: *Cianjur Earthquake 2022, Velocity Model, Double Difference.*

Judul Skripsi

**RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI
MENGUNAKAN METODE DOUBLE
DIFFERENCE : STUDI KASUS GEMPABUMI
CIANJUR 21 NOVEMBER 2022**

Nama Mahasiswa

Dirga Ilham Fahlevi

NPM

1915051049

Program Studi

Teknik Geofisika

Fakultas

Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.

Andri Kurniawan, S.T., M.T.

NIP. 197209281999031001

NIP. 199011232024061001

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM.

NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.

Sekretaris : Andri Kurniawan, S.T., M.T.

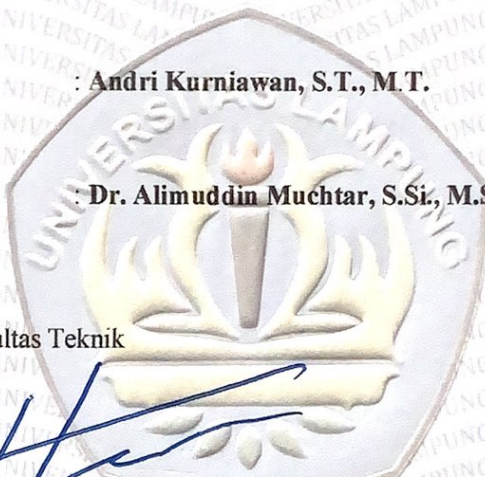
Penguji : Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA.

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 02 Februari 2026



PERNYATAAN

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “**Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Metode Double Difference : Studi Kasus Gempabumi Cianjur 21 November 2022**” merupakan karya saya sendiri dan bukan karya orang lain. Semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti skripsi saya merupakan hasil penjiplakan atau dibuat orang lain, maka bersedia menerima sanksi berupa pencabutan gelar yang telah saya terima.

Bandar Lampung, 23 Februari 2026



Dirga Ilham Fahlevi

NPM. 1915051049

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta, pada tanggal 22 Agustus 2001, sebagai anak tunggal. Penulis menyelesaikan pendidikan formal SDN Cipinang 01 Pagi Jakarta dan selesai pada tahun 2013. Kemudian pendidikan menengah pertama di SMPN 109 Jakarta yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu melanjutkan ke pendidikan menengah atas di SMAN 45 Jakarta yang diselesaikan pada tahun 2019. Pada tahun 2019 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis melakukan beberapa kegiatan antara lain.

1. Menjadi anggota bidang Komunikasi dan Infomrasi Badan Eksekutif Mahasiswa Universitas Lampung periode 2019/2020.
2. Menjadi staff ahli bidang Pergerakan Badan Eksekutif Mahasiswa Universitas Lampung periode 2020/2021.
3. Mengikuti perlombaan Program Kreativitas Mahasiswa pada bidang Artikel Ilmiah pada tahun 2020.
4. Menjadi anggota Bidang Dana dan Usaha Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana Universitas Lampung periode 2021/2022.
5. Mengikuti Program Kampus Merdeka di PT Bisa Artifisial Indonesia pada bulan Agustus – Desember 2022.
6. Melaksanakan Kerja Praktek pada bulan November s.d. Desember periode 2023/2024 di Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirobbilalamin

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat serta Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Kupersembahkan karya ini kepada:

Kedua Orang Tua Tercinta

Yang senantiasa memberikan yang terbaik, dan melantunkan do'a yang selalu menyertai penulis. Penulis ucapkan terima kasih sebesar-besarnya karena telah mendidik dan membesarkan penulis dengan penuh kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang belum bisa terbalaskan.

Seluruh Keluarga Besar Teknik Geofisika 2019

Yang selalu memberikan semangat dan dukungan selama penulis melaksanakan perkuliahan di Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

Almamater Tercinta, Universitas Lampung dan Jurusan Teknik Geofisika

Tempat menimba semua ilmu yang kedepannya akan menjadi bekal hidup bagi penulis.

MOTTO

“Honestly, if you were any slower, you’d be going backward.”

(Draco Malfoy)

“Look at you, worrying so much about things you can't change you'll spend your whole life singing the blues if you keep thinking that way.”

(Taylor Swift)

“Sistem pendidikan yang bijaksana setidaknya akan mengajarkan kita betapa sedikitnya yang belum diketahui oleh manusia, seberapa banyak yang masih harus ia pelajari.”

(Sir John Lubbock)

“Great things are not done by impulse, but by a series of small things brought together.”

(Vincent van Gogh)

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT yang mana kita pada saat ini diberikan banyak kemudahan diberikan kesehatan, diberikan nikmat sehat, nikmat iman dan nikmat Islam. Taklupa juga kita haturkan sholawat serta salam kepada baginda kita nabi besar nabi Muhammad SAW. Syukur Alhamdulillah penulis telah menyelesaikan laporan akhir yang berjudul **“RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE DOUBLE DIFFERENCE : STUDI KASUS GEMPABUMI CIANJUR 21 NOVEMBER 2022** dengan sebaik-baiknya.

Tak lupa juga penulis mengucapkan banyak-banyak terimakasih kepada banyak pihak yang terlibat dalam baik itu saat kerja praktek maupun saat penyusunan laporan ini. Demikian, penulis berusaha dengan semaksimal mungkin demi kesempurnaan penyusunan laporan ini baik dari hasil kegiatan belajar mengajar di perkuliahan, maupun dalam menunaikan praktik kerja di dunia industri.

Penulis menyadari adanya kekurangan dalam laporan ini saran dan kritik yang sifatnya membangun begitu diharapkan oleh penulis demi kesempurnaan dalam penulisan laporan berikutnya.

Bandar Lampung, 23 Februari 2026

Dirga Ilham Fahlevi

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, berkah, dan hidayat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan baik dan lancar skripsi yang berjudul “ Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Metode *Double Difference* : Studi Kasus Gempabumi Cianjur 21 November 2022”, sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan kali ini penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan berperan besar dalam menyusun skripsi ini, antara lain.

1. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM. selaku ketua Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dan selaku pembimbing akademik dari penulis yang selalu mendukung dalam melakukan peningkatan akademik penulis selama berkuliah di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dan juga selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku pembimbing utama yang telah memberikan arahan, kritik serta saran yang bersifat membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
4. Bapak Andri Kurniawan, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua yang juga senantiasa dapat memberikan waktu untuk membimbing penulis dalam memberikan arahan, kritik serta saran untuk dapat menyelesaikan skripsi ini.

5. Bapak Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si., C.EIA. sebagai pembahas yang telah memberikan saran dan masukan yang bermanfaat dalam melakukan perbaikan skripsi ini.
6. Kedua orang tua penulis, yang selalu memberikan kasih sayang, doa, nasehat, serta atas kesabarannya yang luar biasa dalam setiap langkah hidup penulis. Semoga Allah SWT selalu memberikan kebahagiaan dan keberkahan dalam kehidupan kalian di dunia dan akhirat.
7. Bapak dan Ibu Dosen serta Staff Jurusan Teknik Geofisika yang telah memberikan ilmu dan pengalaman hidup untuk menjadi lebih baik.
8. Seluruh Staff Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara yang banyak memberikan ilmu baru selama penulis menjalani program magang.
9. Keluarga Teknik Geofisika 2019 yang selama ini telah memberikan dukungan selama penulis menjalani perkuliahan.

Bandar Lampung, 23 Februari 2026

Dirga Ilham Fahlevi

NPM. 1915051049

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
MOTTO	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Seismo Tektonik.....	4
2.2. Gempa Bumi Cianjur 2022.....	6
2.3. Geologi Regional.....	6
2.4. Stratigrafi Daerah Penelitian	8
III. TEORI DASAR.....	11

3.1. Gelombang Seismik.....	11
3.3. Gempa Bumi.....	14
3.4. Parameter Gempa Bumi.....	16
3.5. Klasifikasi Gempa Bumi	17
3.6. Jenis Gempa.....	19
3.7. Metode <i>Double Difference</i>	21
IV. METODE PENELITIAN.....	25
4.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
4.2. Alat dan Bahan	25
4.3. Tahapan Penelitian	26
4.4. Diagram Alir.....	28
V. HASIL PENELITIAN.....	31
5.1. Parameter Gempa	31
5.2. Proses Relokasi Hiposenter Gempa.....	32
VI. SIMPULAN DAN SARAN	49
6.1. Simpulan.....	49
6.2. Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 Waktu penelitian.....	25
Tabel 2 Perbandingan <i>rmsct</i> setiap model.....	35
Tabel 3 Perbedaan model <i>crust</i> , <i>velest</i> , dan <i>masw</i>	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Peta lokasi daerah penelitian	6
Gambar 2 Peta Geologi daerah penelitian	7
Gambar 3 Ilustrasi bentuk gelombang primer (Gelombang P)	12
Gambar 4 Ilustrasi bentuk gelombang sekunder (Gelombang S).....	12
Gambar 5 Ilustrasi bentuk gelombang <i>Rayleigh</i>	13
Gambar 6 Ilustrasi bentuk gelombang <i>Love</i>	13
Gambar 7 Teori <i>elastic rebound</i>	14
Gambar 8 Letak Indonesia pada zona interaksi tiga lempeng bumi (Sukanto, 2000)	15
Gambar 9 Ilustrasi perbedaan gempa (USGS, 2020)	19
Gambar 10 Diagram elastisitas batuan	21
Gambar 11 Metode <i>double difference</i>	22
Gambar 12 Histogram temporal gempa bumi Cianjur (21 November 2022 s.d. 10 Desember 2022)	27
Gambar 13 Peta relokasi gempa bumi Cianjur 21 November 2022 (Supendi dkk., 2023).....	28
Gambar 14 Diagram alir penelitian	30
Gambar 15 <i>Plot data event</i> dan data stasiun	32
Gambar 16 Model kecepatan <i>crust</i>	34
Gambar 17 Model kecepatan <i>velest</i>	34
Gambar 18 Model kecepatan <i>multichannel analysis of surface waves (masw)</i> ..	35
Gambar 19 (a) Peta hiposenter sebelum relokasi dengan model <i>crust</i> (b) Distribusi <i>cross section</i> sebelum relokasi crust model	36
Gambar 20 (a) Peta hiposenter setelah relokasi dengan model <i>crust</i> (b) Distribusi <i>cross section</i> setelah relokasi dengan crust model	37

Gambar 21 Peta sebaran hiposenter model <i>crust</i>	38
Gambar 22 Histogram interval kedalaman model <i>crust</i>	39
Gambar 23 (a) Peta hiposenter sebelum relokasi dengan model <i>velest</i> (b) Distribusi <i>cross section</i> sebelum relokasi <i>velest</i> model	40
Gambar 24 (a) Peta hiposenter setelah relokasi dengan <i>velest</i> model (b) Distribusi <i>cross section</i> setelah relokasi <i>velest</i> model	41
Gambar 25 Peta sebaran hiposenter model <i>velest</i>	42
Gambar 26 Histogram interval kedalaman model <i>velest</i>	43
Gambar 27 (a) Peta hiposenter sebelum relokasi dengan model <i>masw</i> (b) Distribusi <i>cross section</i> sebelum relokasi <i>masw</i> model	44
Gambar 28 (a) Peta hiposenter setelah relokasi dengan model <i>masw</i> (b) Distribusi <i>cross section</i> setelah relokasi <i>masw</i> model	45
Gambar 29 Peta sebaran hip0,osenter model <i>masw</i>	46
Gambar 30 Histogram interval model <i>masw</i>	47

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara di Asia Tenggara dengan aktivitas seismik teraktif di dunia. Pertemuan tiga lempeng (Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik) menjadikan sebagian besar wilayah Indonesia sebagai zona konvergen. Pulau Sumatera dan Jawa merupakan pulau yang memiliki tingkat gempa bumi dan tsunami yang paling besar dibandingkan dengan pulau yang lain. Hal ini disebabkan karena kedua pulau tersebut terletak dibatas Lempeng Indo-Australia, Eurasia.

Daerah Jawa Barat, khususnya pada bagian selatan merupakan salah satu kawasan yang rawan terjadi gempa bumi. Hal ini disebabkan karena daerah Jawa Barat terdapat sesar aktif, seperti Sesar Cimandiri, Sesar Baribis dan Sesar Lembang (Hilmi dkk., 2019). Menurut Irsyam dkk. (2017), Cianjur merupakan wilayah yang dilintasi oleh Sesar Cimandiri segmen Rajamandala yang memiliki mekanisme sesar geser mengiri. Sesar tersebut memanjang dari Teluk Pelabuhan Ratu di Sukabumi sampai Padalarang di Kabupaten Bandung Barat, dengan panjang sekitar 100 km. Oleh karena itu, wilayah Cianjur merupakan wilayah yang rawan terhadap bahaya gempa bumi.

Gempa bumi merupakan suatu guncangan yang terjadi di permukaan bumi yang terbentuk karena adanya sebuah gelombang seismik yang muncul akibat pelepasan energi secara tiba-tiba dari dalam bumi (Sarkowi dkk., 2022). Gelombang seismik dibagi menjadi yaitu gelombang tubuh yang terbagi menjadi Gelombang P (primer) dan Gelombang S (sekunder) dan gelombang Permukaan yang terbagi menjadi Gelombang *Rayleigh* dan *Love*. Kerusakan yang terjadi dipermukaan bumi dapat terjadi karena adanya gelombang seismik yang menjalar ke permukaan (Larasati dkk., 2022). Menurut Supendi dkk. (2022), Gempa Cianjur bertipe *strike-slip*, dengan karakter *right-lateral* (dextral), dimana gempa utamanya

diikuti dengan rangkaian gempa susulan dengan *mainshock* terjadi di utara Sesar Cimandiri segmen Rajamandala dan gempa susulan terjadi di timur laut *mainshock*. Gempa yang terjadi di Cianjur mengakibatkan 268 korban jiwa dan lebih dari 2.000 rumah mengalami kerusakan.

Sejumlah Metode yang telah digunakan untuk menentukan lokasi hiposenter agar semakin akurat. Salah satunya yaitu Metode *Double Difference* yang diimplementasikan dengan program *HypoDD*. Metode ini dapat memanfaatkan data waktu tempuh antara pasangan gempa dan stasiun pengamatan untuk menghitung perbedaan waktu tiba secara relatif. Prinsip dasar dari Metode ini yaitu apabila jarak antara dua pasang gempa bumi saling berdekatan, maka jalur sinar dan bentuk gelombang kedua gempa dapat dianggap hampir identik. Proses relokasi hiposenter dilakukan untuk memperkecil residual waktu tempuh dan meningkatkan ketelitian posisi relatif antar kejadian gempa. Proses relokasi dilakukan melalui tahapan iterasi untuk meminimalkan selisih waktu tempuh secara bertahap hingga mencapai solusi yang konvergen dan stabil. Selain itu dalam mengimplementasikan proses relokasi hiposenter gempa bumi dengan Metode *Double Difference* digunakan model kecepatan satu dimensi. Dimana model kecepatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu model *Veles*, *Crust*, dan *MASW*. Hasil dari relokasi yang telah digunakan dengan program *hypoDD* dan tiga model kecepatan didapatkan bahwa gempa bumi terelokasi sebanyak 29 dari 129 dan penggunaan model kecepatan *MASW* menghasilkan nilai *RMSCT* terendah dibandingkan model kecepatan *Veles* dan *Crust*. Dengan demikian, harapannya Metode *Double Difference* melalui *HypoDD* dengan memanfaatkan data model kecepatan satu dimensi mampu menghasilkan relokasi hiposenter yang lebih presisi dan representatif terhadap struktur sesar yang terdapat di wilayah Kabupaten Cianjur.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini, sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik hasil relokasi hiposenter gempa bumi menggunakan Metode *Double Difference* (*HypoDD*) pada daerah penelitian?

2. Bagaimana pengaruh penggunaan model kecepatan yang berbeda (model *VELEST*, model *MASW*, dan model *Crust*) terhadap hasil relokasi hiposenter gempa bumi?
3. Bagaimana perbedaan pola sebaran hiposenter sebelum dan sesudah relokasi menggunakan masing-masing model kecepatan?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Merelokasi hiposenter gempa bumi dengan menggunakan Metode *Double Difference*.
2. Menganalisa perbedaan posisi hiposenter gempa bumi sebelum relokasi dan sesudah relokasi dengan menggunakan Metode *Double Difference*.
3. Menginterpretasikan hubungan hasil relokasi hiposenter dengan model kecepatan lokal 1D *MASW* terhadap struktur sesar lokal.

1.4. Batasan Penelitian

Adapun batasan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Data gempa yang digunakan dalam melakukan penentuan hiposenter gempa adalah data katalog gempa bumi Cianjur, 21 November 2022 dengan koordinat 106.55°BT s.d. 107.45°BT dan -6.35°LS s.d. -7.45°LS , yang didapatkan dari Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara.
2. Sistem operasi yang digunakan adalah *Linux* dan *Windows*.
3. Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah *Oracle VM Virtualbox*, *Anaconda Prompt*, *hypoDD*, *Visual Studio Code*, *Generic Mapping Tools*, dan *Python*.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun Manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Memberikan informasi yang akurat dari posisi *mainshock* dan *aftershock* gempa bumi Cianjur 21 November 2022.
2. Memberikan gambaran hubungan antara hasil relokasi hiposenter dan struktur sesar aktif di wilayah Kabupaten Cianjur.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Seismo Tektonik

Seismotektonik merupakan hubungan antara aktivitas tektonik dan kejadian gempa bumi, khususnya keterkaitan antara struktur geologi, mekanisme sumber gempa, serta distribusi hiposenter. Seismotektonik suatu wilayah merupakan hal yang penting dalam mengidentifikasi sumber-sumber gempa aktif dan pola kegempaan yang berkembang akibat interaksi tektonik regional. Di wilayah Jawa Barat, aktivitas seismotektonik dipengaruhi oleh sistem subduksi Lempeng Indo-Australia di selatan Pulau Jawa serta keberadaan sesar-sesar aktif darat, salah satunya Sesar Cimandiri yang berperan dalam kejadian gempa bumi Cianjur 21 November 2022.

2.1.1 Sesar Konjugasi yang Terungkap Akibat Gempa Bumi Destruktif Mw 5.6 (21 November 2022) di Cianjur, Jawa Barat, Indonesia.

Menurut Supendi dkk. (2023), kejadian gempa bumi yang terjadi di Cianjur pada 21 November 2022 dengan magnitude Mw 5,6 apabila dilakukan analisis data seismik antara sebelum dan sesudah terjadinya gempa utama terdapat tiga gempa pendahulu dan ratusan gempa susulan yang membentuk pola sebaran menyerupai dua bidang sesar yang saling berpotongan. Dari penelitian ini terdapat dugaan bahwa sumber gempa berasal dari sistem sesar konjugat baru yang belum terpetakan dengan orientasi baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut. Selain itu, pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa gempa utama memicu peningkatan tegangan di sekitar zona sesar, khususnya ke arah baratlaut dan baratdaya, serta berpotensi menambah tekanan pada Sesar Rajamandala di sebelah selatan wilayah Kabupaten Cianjur. Temuan tersebut memperkuat dugaan bahwa wilayah Kabupaten Cianjur memiliki kompleksitas tektonik tinggi dan perlu diperhitungkan dalam evaluasi bahaya gempa di Jawa Barat.

2.1.2 Kajian Gempa Cianjur Provinsi Jawa Barat 21 November 2022 (M 5,6).

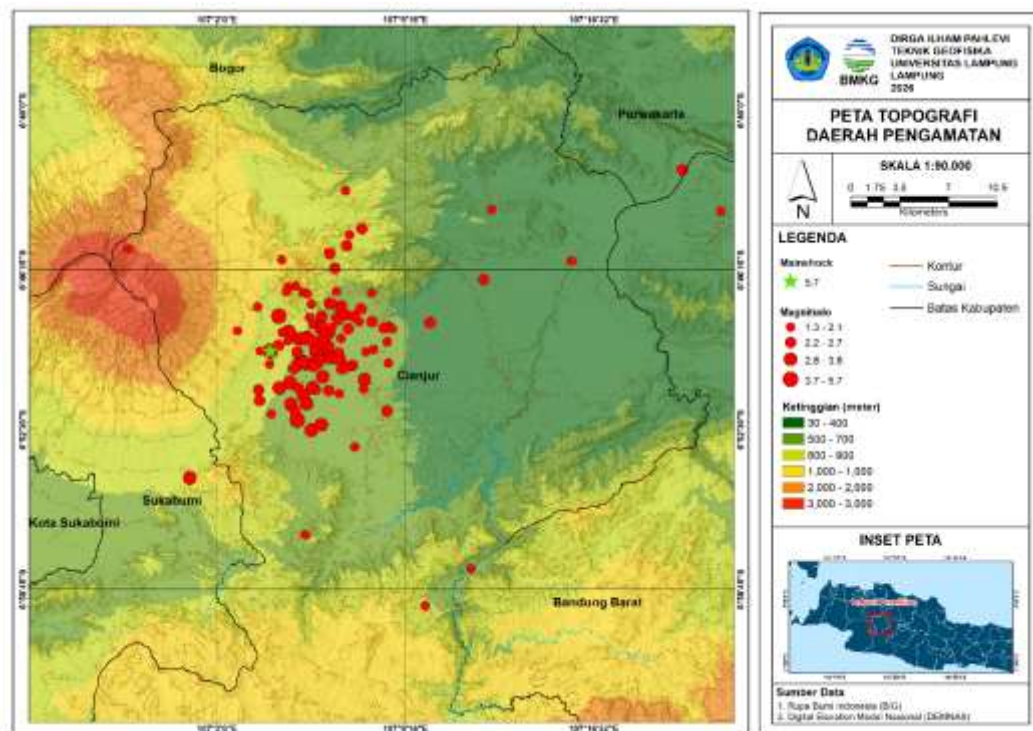
Menurut PuSGeN (2023), melalui kajian berjudul Kajian Gempa Cianjur, Jawa Barat 21 November 2022 (M5,6) meneliti penyebab dan dampak gempa bumi yang mengguncang wilayah Kabupaten Cianjur. Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan data seismik, deformasi permukaan, serta survei geolistrik dan radar tembus tanah (*GPR*) untuk menentukan sumber gempa. Hasil analisis menunjukkan adanya struktur sesar aktif baru di wilayah Kecamatan Cugenang dengan orientasi baratlaut–tenggara yang menjadi sumber utama gempa. Dari hasil relokasi hiposenter dan analisis mekanisme fokus, diperoleh bahwa gempa bersifat geser mendatar (*strike-slip*) dengan kedalaman dangkal sekitar 10 km. Kajian ini menegaskan bahwa karakteristik sumber gempa dan kondisi geologi lokal memiliki pengaruh besar terhadap pola guncangan dan tingkat kerusakan di permukaan.

2.1.3 Relokasi Katalog Gempa Bumi di Pusat Gempa Regional II Tangerang Selatan Menggunakan Metode *Double Difference* (HYPODD).

Penelitian yang dilakukan oleh Tawakal dkk., (2024) menerapkan Metode *Double Difference* (*HypoDD*) untuk melakukan relokasi hiposenter pada katalog gempa bumi wilayah Pusat Gempa bumi Regional II Tangerang Selatan. Metode ini digunakan untuk memperoleh posisi sumber gempa yang lebih akurat dengan cara meminimalkan selisih waktu tiba gelombang seismik P dan S antara dua peristiwa gempa yang berdekatan. Prinsip dasar Metode *Double Difference* adalah bahwa dua gempa yang berdekatan memiliki jalur penjalaran gelombang yang hampir sama, sehingga perbedaan waktu tiba gelombang lebih menggambarkan perbedaan posisi sumber gempa, bukan pengaruh heterogenitas kecepatan batuan di bawah permukaan. penerapan Metode *Double Difference* pada penelitian ini menghasilkan penyebaran hiposenter yang lebih fokus dan sejajar dengan arah subduksi serta jalur sesar aktif di Jawa bagian barat. Hasil histogram waktu tempuh menunjukkan penurunan nilai residual, yang menandakan bahwa posisi hiposenter setelah relokasi lebih mendekati kondisi geologis sebenarnya. Penelitian ini membuktikan bahwa Metode *HypoDD* efektif dalam meningkatkan resolusi struktur bawah permukaan, serta penting diterapkan secara berkala untuk memutakhirkan data seismisitas dan pemetaan sesar aktif di wilayah Indonesia.

2.2. Gempa Bumi Cianjur 2022

Pada penelitian ini lokasi yang digunakan terletak di Kabupaten Cianjur, Jawa Barat, Indonesia. Gempa bumi Cianjur yang terjadi pada 21 November 2022 memiliki letak koordinat 6.82°LS 107.07°BT dimana gempa yang terjadi bernilai 5.8 SR dengan kedalaman 2 km dengan episenter Pusat gempa di darat 7 km BaratLaut Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. Berikut merupakan lokasi dari penelitian yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.

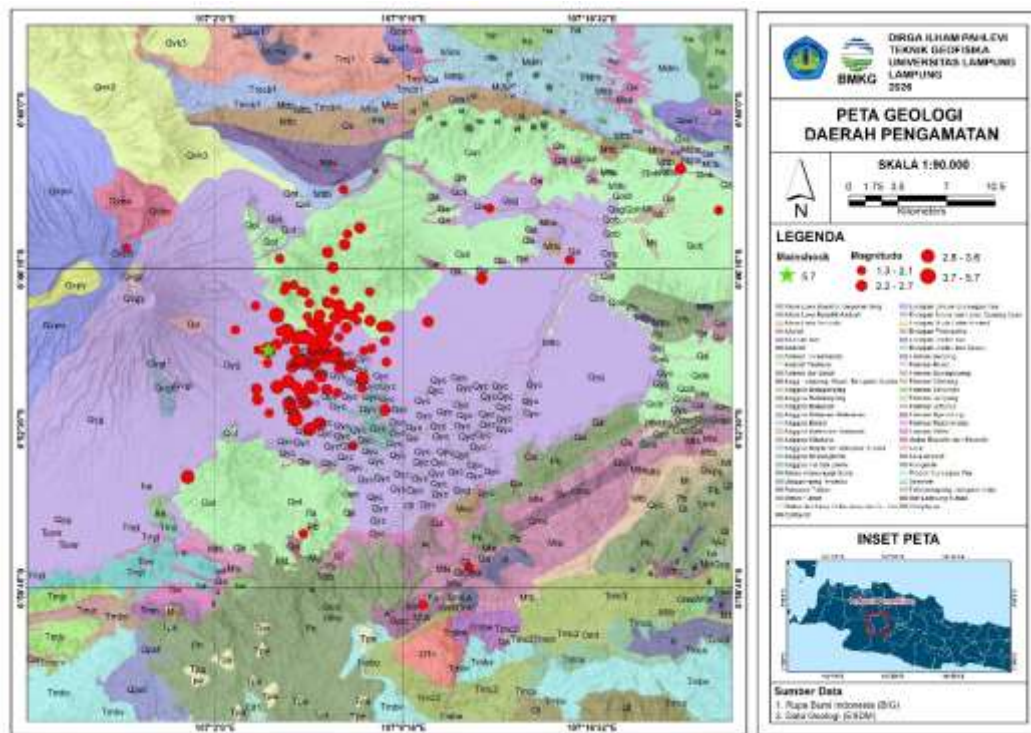


Gambar 1 Peta lokasi daerah penelitian

2.3. Geologi Regional

Kabupaten Cianjur yang terletak di wilayah Jawa Barat merupakan bagian dari tektonik Bagian Barat. Pada umumnya, wilayah tektonik Bagian Barat ini dipengaruhi oleh dua lempeng yaitu lempeng Indo – Australia dan juga lempeng Eurasia. Ciri batas lempeng Bagian Barat berbentuk parit yang sangat dalam dalam *trench* yang berada di selatan pulau Jawa. Secara umum batas lempeng merupakan zona kebencanaan geologi, akan tetapi hal ini dapat juga terjadi karena terbentuknya zonasi-zonasi yang memiliki manfaat maupun kendala dengan ciri-ciri yang berbeda. Zonasi yang terbentuk karena ada nya tumbukan lempeng yang terjadi di

dalam kerak bumi dapat berupa zonasi gempa, zonasi vulkanisme, zonasi, magmatisme, zonasi mineralisasi, zonasi endapan hidrokarbon, dan zonasi gerakan tanah. Dengan adanya hal tersebut dikarenakan letak Kabupaten Cianjur yang berada mulai dari selatan Pulau Jawa sampai ke Pegunungan (Gunung Gede), maka kabupaten ini memiliki potensi tinggi rawan bencana geologi. Adapun peta geologi regional daerah penelitian yang dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Peta Geologi daerah penelitian

Struktur geologi yang terdapat di Kabupaten Cianjur berupa struktur lipatan dan struktur patahan/sesar. Struktur lipatan yang terdapat di Kabupaten Cianjur berupa struktur monoklin/perlapisan yang miring satu arah yang terbentuk karena adanya pergerakan dari *vertical blind fault* yang menyebabkan adanya lapisan yang mengalami rotasi. Sedangkan untuk sesar yang terdapat di Kabupaten Cianjur merupakan Sesar Mandiri, Sesar Baribis, Sesar Semarang, Sesar Opak, Sesar Kendeng, dan Sesar Cugenang. Secara keseluruhan struktur tersebut terbentuk pada kala pliosen awal sampai dengan pliosen dengan arah Utara – Selatan atau $N 15^{\circ} E$ (Supartoyo dkk., 2023).

Geomorfologi Kabupaten Cianjur memiliki keragaman bentuk dikarenakan wilayahnya yang terletak di dataran tinggi. Secara umum daerah Cianjur dapat dikelompokkan ke dalam dataran yang dikelilingi oleh perbukitan terjal dengan kemiringan 4%. Topografi wilayah Cianjur terletak pada ketinggian 350 – 575 mdpl. Ditinjau dari segi topografi dan morfologinya daerah ini dapat difungsikan sebagai lahan pemukiman karena memiliki kontur tanah yang relatif rendah.

2.4. Stratigrafi Daerah Penelitian

Adapun stratigrafi Kabupaten Cianjur, sebagai berikut:

2.4.1 Formasi Rajamandala (Om)

Formasi Rajamandala tersingkap di atas Formasi Citarum yang berumur lebih muda (persentuhan sesar). Formasi Rajamandala tersusun atas batugamping dan napal pasiran (marl), dimana batugamping memiliki warna putih kecoklatan dengan tipe coralline limestones, masih membentuk perbukitan dengan tebal lapisan 9 meter. Batugamping Formasi Rajamandala yang tersingkap di daerah Padalarang yang terbentuk sebagai barrier reef pada umur Oligosen akhir – Miosen awal.

2.4.2 Formasi Citarum (Mt)

Formasi Citarum umumnya terdiri dari greywacke yang berselang seling dengan batulanau atau batu lempung tufaan, konglomerat, dan breksi vulkanik yang ditemukan dibagian bawah. Formasi Citarum temuan bersentuhan secara struktur dengan Formasi Rajamandala yang berumur lebih tua. Terdapat di Lembah S. Citarum, pada S Cinongnang. Formasi ini memiliki ketebalan yang mencapai 1.372 meter.

2.4.3 Formasi Jatiluhur (Mdm)

Formasi Jatiluhur tersusun atas napal dan batu lempung dengan adanya sisipan batupasir gampingan, anggota napal (Mdm) yang berwarna abu abu tua, batu lempung napalan, dan serpih lempungan dengan sisipan batupasir kuarsa, kuarsit, dan batu gamping napalan. Batu pasir kuarsa (Mdq) merupakan lapisan-lapisan tipis sampai tebal, jalur-jalur tipis batubara dan lembar-lembar kecil

muskovit dengan lensa-lensa batu gamping, pada beberapa tempat juga terdapat lapisan-lapisan quarzit yg berwarna abu-abu. Batulempung Formasi Jatiluhur (Tmj) terdiri atas batulempung dengan sisipan batupasir gampingan, berlapis baik dan pada umumnya melapuk menengah. Batulempung berwarna abu-abu kebiruan, agak padu dan agak keras, setempat menyerpih dan mudah hancur, tebal lapisan antara 0,50-2,00 m.

2.4.4 Formasi Cantayan (Mtt)

Formasi Catayan tersusun atas batu gamping koral dibagian selatan Waduk Jatiluhur, batu lempung, serpih tufaan yang mengandung belerang, lignit dan konkresi-konkresi batu lempung, sisipan batu, gamping, batu pasir yang berlapis baik, serpih pasiran, lempung serpihan, breksi laut dan konglomerat. Dibeberapa tempat pada Formasi Cantayan juga ditemukan batuan-batuan yang bersifat intrusif.

2.4.5 Formasi Cimandiri (Tmc)

Formasi Cimandiri terletak secara tidak selaras di atas Formasi Lengkong yang sering ditemukan dibagian barat. Selain itu pada bagian timur Formasi Cimandiri juga ditemukan tidak selaras dengan Formasi Jampang, dan ditemukan tidak selaras dengan Formasi Rajamandala pada bagian barat. Formasi Cimandiri tersusun atas batupasir, batupasir tufan yang berseling dengan konglomerat, batu lempung, dan batu gamping yang ditemukan di bagian utama dari Formasi Cimandiri. Formasi Cimandiri diperkirakan berumur akhir Miosen tengah.

2.4.6 Formasi Beser (Tmbe)

Formasi Beser tersusun oleh breksi andesit, breksi tuf, tuf kristal, dan batu lempung. Formasi Beser ditemukan tidak selaras dan menutupi di atas Formasi Cimandiri dan Formasi Jampang.

2.4.7 Formasi Bentang (Tmb)

Formasi Bentang terbentuk oleh batupasir tufan, kristal tuf, tuf batu apung dengan perselingan batulempung globigerina dimana lapisan atas tersusun oleh

batulempung dan batu lanau. Ditemukan lapisan batubara setebal 20 cm yang tersingkap dibagian utara Katupandak.

2.4.8 Formasi Koleberes (Tmk)

Formasi Koleberes terbentuk oleh batupasir tuf yang melapis dengan baik, tuf kristal dengan sisipan tuf, breksi tuf, breksi apung, dan breksi berususunan andesit. Batupasir berwarna kelabu kecoklatan yang terdiri atas batuan adensit dengan sejumlah batuapung. Formasi Koleberes diperkirakan berumur Miosen Akhir.

III. TEORI DASAR

3.1. Gelombang Seismik

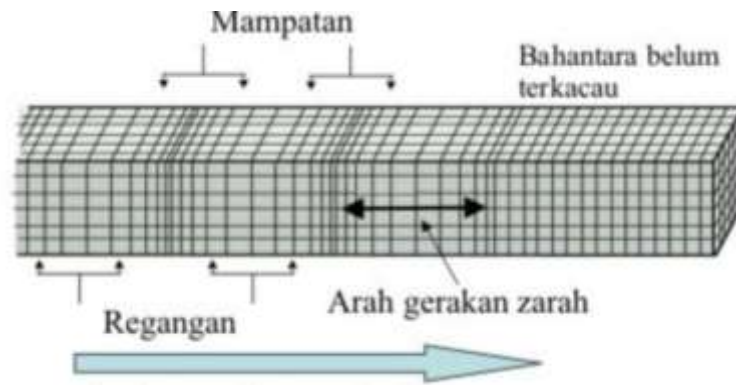
Menurut Utari (2020), gelombang seismik merupakan gelombang yang bersifat elastik yang menjalar dengan medium kulit bumi dari satu lokasi. Kelokasi lainnya. Sifat elastisitas material bumi sangat ditentukan oleh berbagai faktor seperti kompresibilitas dan kekompakan. Selain itu gelombang terbentuk karena adanya perambatan energi osilasi. Berdasarkan arahnya gelombang dibagi menjadi dua yaitu gelombang transversal, gelombang yang menjalar tegak lurus terhadap arah rambat dan gelombang longitudinal, gelombang yang menjalar sejajar dengan arah rambat. Gelombang Seismik dibagi menjadi dua yaitu Gelombang Badan (*body wave*) dan Gelombang Permukaan.

3.1.1. Gelombang Badan (*Body Wave*)

Gelombang Badan merupakan gelombang yang menjalar pada media *elastic* dengan arah rambat keseluruhan bagian bumi. Gelombang Badan atau yang sering dikenal dengan *bodywave* terbagi menjadi dua yaitu Gelombang P (Gelombang Primer) dan Gelombang S (Gelombang Sekunder) (Arintalofa dkk., 2020).

1. Gelombang Primer (Gelombang P)

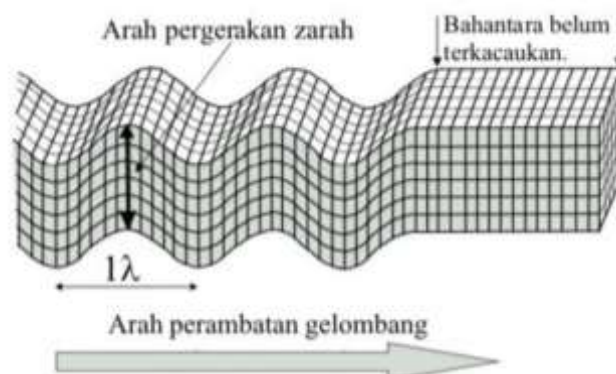
Gelombang Primer adalah salah satu jenis gelombang seismik yang terbentuk karena adanya gempa bumi. Gelombang ini merambat dari zat padat dan cair yang relatif lembut dikarenakan tidak bersifat merusak. Kecepatan dari Gelombang Primer merupakan kecepatan yang tercepat dibandingkan gelombang seismik yang lainnya. Gelombang Primer merupakan jenis gelombang longitudinal partikel dengan arah rambat bolak-balik. Ilustrasi dari Gelombang Primer dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Ilustrasi bentuk gelombang primer (Gelombang P)

2. Gelombang Sekunder (Gelombang S)

Gelombang S atau yang dikenalan dengan *Shear Wave* merupakan Gelombang Badan yang memiliki arah gerak tegak lurus terhadap gerambang rambat gelombangnya. Salah satu ciri dari Gelombang Sekunder adalah gelombang ini tidak dapat merambat pada fluida, sehingga dengan adanya hal tersebut gelombang tidak dapat terdeteksi pada bagian inti bumi. Ilustrasi dari Gelombang Sekunder dapat dilihat pada **Gambar 4**.



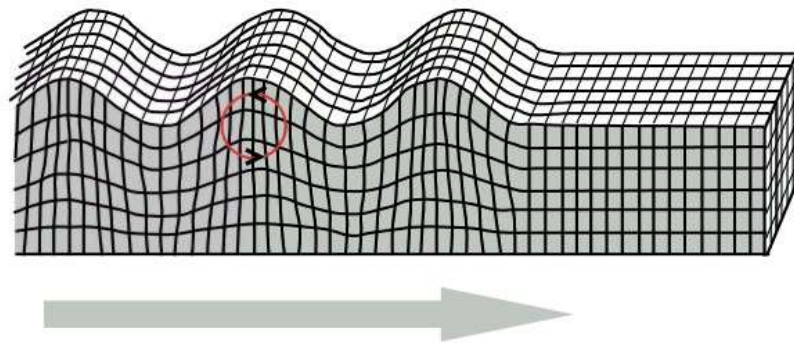
Gambar 4 Ilustrasi bentuk gelombang sekunder (Gelombang S)

3.1.2. Gelombang Permukaan

Gelombang Permukaan adalah gelombang yang terbentuk karena adanya interaksi dari *body wave* dengan permukaan. Gelombang Permukaan atau yang sering dikenal dengan *Surface Wave* terbagi menjadi dua jenis gelombang, sebagai berikut:

1. Gelombang *Rayleigh*

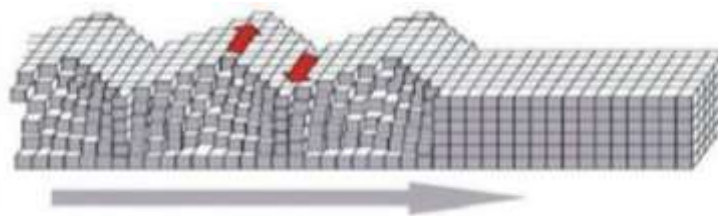
Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang yang memiliki lintasan gerak partikel menyerupai elips. Gelombang R terbentuk karena Gelombang P dan Gelombang S mengalami interaksi pada permukaan bumi dengan arah rambat yang sejajar dengan permukaan. Gelombang R memiliki kecepatan 2.0 km/s s.d. 4.2 km/s dengan arah rambat tegak lurus dengan lintasan dan searah dengan bidang datar. Ilustrasi dari gambaran gelombang *rayleigh* dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Ilustrasi bentuk gelombang *Rayleigh*

2. Gelombang *Love*

Gelombang *Love* adalah gelombang yang terbentuk karena adanya interferensi konstruktif dari pantulan gelombang seismik di permukaan bebas. Pada awalnya Gelombang ini ditemukan oleh A.E.H Love di tahun 1911. Gelombang ini memiliki kecepatan 2.0 km.s s.d. 4.,4 km/s di permukaan bumi. **Gambar 6** merupakan ilustrasi dari gambaran gelombang *love*.



Gambar 6 Ilustrasi bentuk gelombang *Love*

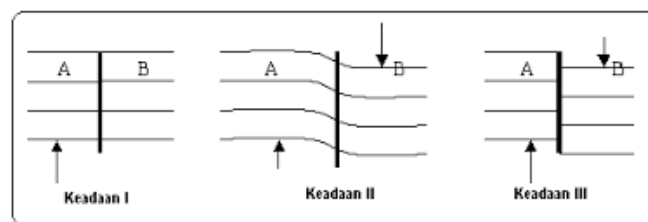
3.2. Teori Elastic Rebound

Seorang seismolog Amerika, Reid mengemukakan suatu teori yang menjelaskan mengenai bagaimana umumnya gempa bumi terjadi. Teori ini dikenal

dengan nama “*Elastic Rebound Theory*”, menurut teori ini gempa bumi terjadi pada daerah atau area yang mengalami deformasi. Energi yang tersimpan dalam deformasi ini berbentuk elastis strain dan akan terakumulasi sampai daya dukung batuan mencapai batas maksimum, hingga akhirnya menimbulkan rekahan atau patahan (Scholz, 2019).

Gempa bumi adalah rangkaian gelombang getaran atau kejutan (*shock wave*) yang berasal dari suatu tempat dalam mantel atau kerak bumi (Adenata & Lepong, 2022). Berdasarkan teori Reid mengenai *elastic rebound*, gempa bumi bermula dari gerakan slip yang terjadi secara tiba-tiba pada sesar aktif karena akumulasi strain elastis dalam periode panjang mencari kestabilan baru.

Prof. H. F. Reid menyatakan, teori ini dapat dipaparkan secara sederhana bahwa di dalam permukaan bumi senantiasa terdapat aktivitas geologis yang mengakibatkan pergerakan relatif suatu massa batuan di dalam permukaan bumi terhadap massa batuan lainnya. Gaya yang menimbulkan pergerakan batuan disebut dengan gaya tektonik (*tectonic forces*). Batuan-batuan ini bersifat elastis dan dapat menimbun regangan apabila ditekan atau ditarik oleh gaya-gaya tektonik. Pada saat terdapat tegangan yang terjadi pada batuan tersebut melewati kekuatannya, maka batuan tersebut akan hancur di daerah terlemah atau yang sering disebut dengan patahan (*fault*). Selanjutnya, batuan yang hancur tersebut akan melepaskan sebagian atau seluruh tegangan untuk kembali ke dalam keadaan semula yang bebas tegangan. Adapun gambaran dari teori *elastic rebound* yang terdapat pada **Gambar 7**.



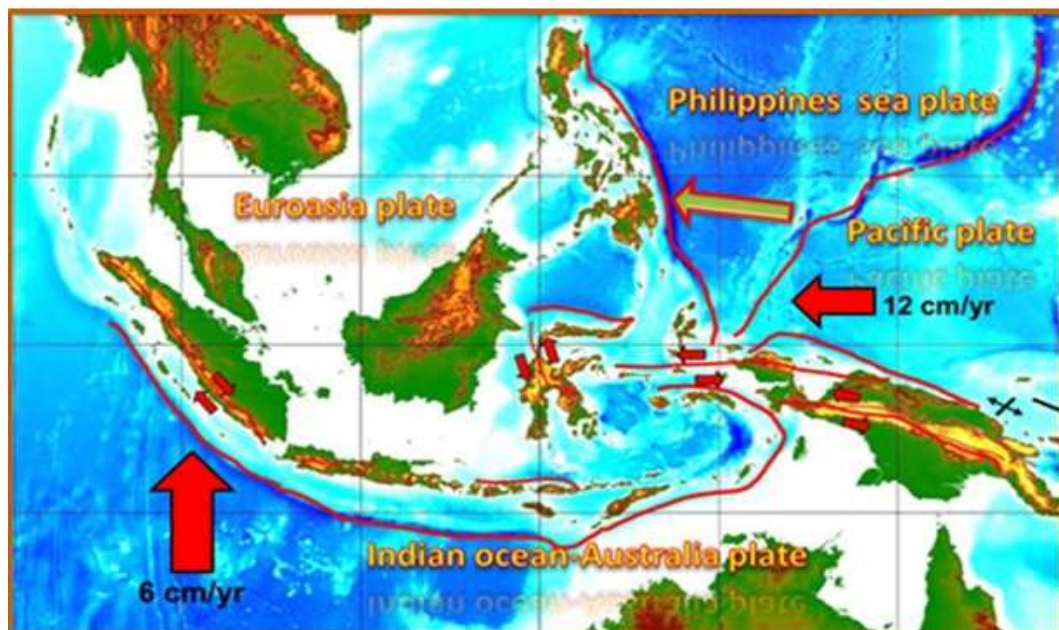
Gambar 7 Teori *elastic rebound*

3.3. Gempa Bumi

Gempa bumi adalah suatu bencana alam yang datang secara tiba-tiba dan dapat menghancurkan semua yang ada di muka bumi baik harta, benda, dan

manusia dalam waktu yang singkat. Sedangkan menurut Lutgens (1982), gempa bumi adalah getaran bumi yang dihasilkan karena adanya percepatan energi yang dilepaskan, kemudian energi tersebut menyebar ke segala arah dari pusat sumber gempa bumi. Gempa bumi adalah suatu gejala alam yang disebabkan karena adanya pelepasan energi elastis batuan yang terjadi karena terdapat deformasi batuan pada lapisan litosfer (Hutasoit dkk., 2021).

Secara geologis Kepulauan Indonesia berada pada jalur penunjaman lempeng bumi, seperti penunjaman Lempeng Samudra Indo-Australia dengan Lempeng Benua Eurasia yang memanjang dari pantai barat Sumatera hingga pantai selatan Jawa terus ke timur sampai Nusa Tenggara seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8 Letak Indonesia pada zona interaksi tiga lempeng bumi (Sukamto, 2000)

Adanya proses penunjaman ini Kepulauan Indonesia terdapat deretan gunung api terutama dari Sumatera, Jawa hingga Nusa Tenggara. Jalur penunjaman lempeng bumi di wilayah Kepulauan Indonesia merupakan jalur penyebab gempa tektonik yang mana bersifat regional dan umumnya kerusakan yang ditimbulkan sangat parah. Jalur gempa tersebut secara geologis berdampingan dengan jalur gempa bumi.

3.4. Parameter Gempa Bumi

Menurut Putri (2022), Parameter dari gempa bumi merupakan suatu informasi yang berisi kejadian gempa bumi yang dapat dibagi menjadi empat klasifikasi. empat klasifikasi parameter-parameter dari gempa bumi berupa:

1. Waktu Kejadian

Origin Time (waktu kejadian gempa) merupakan waktu berlangsungnya aktivitas gempa di hiposenter gempa. Kejadian yang terjadi pada saat ini adanya pelepasan tegangan berupa gelombang gempa yang merambat. Waktu terjadinya gempa dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, dan detik dengan satuan UTC.

2. Kedalaman Sumber gempa

Kedalaman sumber gempa merupakan jarak hiposenter yang dihitung secara tegak lurus dari permukaan bumi dengan satuan km. hiposenter dapat ditentukan dengan menggunakan gelombang seismik apabila didapatkan titik hiposenter gempa di darat maka daerah tersebut akan mengalami kerusakan yang semakin besar, namun apabila hiposenter ditemukan di lautan maka gempa tersebut beresiko menciptakan tsunami. Dalam hal melakukan penentuan kedalaman hiposenter gempa maka kedalaman sumber gempa dapat diklasifikasikan menjadi 3 bagian, yaitu sebagai berikut:

a. Gempa bumi Dangkal

Gempa ini memiliki titik hiposenter kurang dari atau sama dengan 60 km diatas permukaan bumi.

b. Gempa bumi Sedang

Gempa ini memiliki nilai titik hiposenter 60 km sampai dengan 300 km di atas permukaan bumi.

c. Gempa bumi Dalam

Gempa yang memiliki titik hiposenter lebih dari 300 km diatas permukaan bumi.

3. Episenter

Episenter merupakan titik dipermukaan bumi yang merupakan refleksi tegak lurus dengan hiposenter atau sering disebut dengan focus gempa bumi.

Lokasi episenter dibuat dalam sistem koordinat kartesian bola bumi atau sistem koordinat geografis dan dinyatakan dalam derajat lintang dan bujur.

4. Intensitas

Intensitas gempa merupakan ukuran gempa yang pertama kali digunakan untuk menyatakan besar gempa bumi sebelum manusia dapat mengukur besarnya gempa bumi dengan alat. Ukuran ini dapat diketahui dengan cara melakukan pengamatan langsung efek gempa bumi terhadap manusia, struktur bangunan dan lingkungan pada suatu lokasi tertentu. Intensitas gempa bumi dinyatakan dalam skala Mercally yang biasa disebut MMI (*Modified Mercally Intensity*).

3.5. Klasifikasi Gempa Bumi

Menurut Hoernes (1878), gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber kejadian gempa, sebagai berikut:

1. Gempa Bumi Runtuhan

Gempa yang terjadi karena adanya runtuh dari lubang interior bumi. Contohnya terdapat runtuh dinding gua pada daerah pertambangan bawah tanah.

2. Gempa Bumi Vulkanik

Gempa yang terjadi karena adanya aktivitas gunung berapi.

3. Gempa Bumi Buatan

Gempa yang terjadi karena ulah manusia. Sebagai contoh terdapatnya getaran yang terjadi karena adanya ledakan dinamit atau nuklir.

4. Gempa Bumi Tektonik

Gempa yang terjadi karena terdapat kejadian pelepasan sejumlah energi pada saat terjadinya pergeseran lempeng.

Sedangkan menurut Fowler (1990), gempa bumi diklasifikasi berdasarkan kedalaman fokus titik gempa, sebagai berikut:

1. Gempa Dangkal

Gempa bumi yang terjadi dengan kedalaman pusat kurang dari 70 km.

2. Gempa Menengah

Gempa bumi yang terjadi dengan kedalaman pusat kurang dari 300 km.

3. Gempa Dalam,

Gempa bumi yang terjadi dengan kedalaman pusat lebih dari 300 km.

Menurut Hagiwara (1964), gempa dapat diklasifikasi berdasarkan kekuatan gempa tersebut dan dapat dikelompokkan berdasarkan besar *magnitude*, sebagai berikut:

1. Gempa Sangat Besar (*Great Earthquake*)

Gempa ini memiliki nilai *magnitude* lebih besar dari 8.0 SR.

2. Gempa Besar (*Major Earthquake*)

Gempa ini memiliki nilai interval *magnitude* 7 SR sampai dengan 8.0 SR.

3. Gempa Sedang (*Moderate Earthquake*)

Gempa ini memiliki nilai interval *magnitude* 5 SR sampai dengan 7 SR.

4. Gempa Kecil (*Small Earthquake*)

Gempa ini memiliki nilai interval *magnitude* 3 SR sampai dengan 5 SR.

5. Gempa Mikro (*Micro Earthquake*)

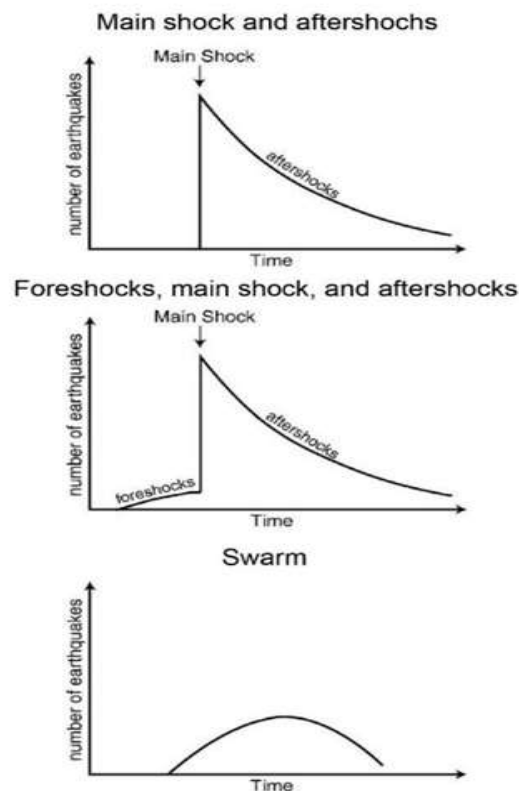
Gempa ini memiliki nilai interval *magnitude* 1 SR sampai dengan 3 SR.

6. Gempa Ultramikro (*Ultramicro Earthquake*)

Gempa ini memiliki nilai *magnitude* kurang dari 1SR sampai dengan 1 SR.

Mogi (1967) mengemukakan bahwa gempa bumi dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe yang dapat dilihat pada **Gambar 9**, sebagai berikut:

1. Tipe 1 : Gempa yang paling umum ditemukan adalah gempa bumi utama (*mainshock*) tanpa didahului gempa awal (*foreshock*), akan tetapi gempa tersebut diikuti dengan adanya gempa susulan (*aftershock*).
2. Tipe II : *mainshock* yang didahului *foreshock* selanjutnya diikuti dengan adanya *aftershock* dengan jumlah yang cukup banyak.
3. Tipe III : Pada tipe ini tidak ditemukannya *mainshock*.



Gambar 9 Ilustrasi perbedaan gempa (USGS, 2020)

3.6. Jenis Gempa

Gempa bumi merupakan fenomena yang disebabkan karena adanya lepasan energi secara tiba-tiba dan menghasilkan radiasi gelombang seismik. Gempa bumi yang terjadi secara umum dapat dibedakan menjadi 3 tipe kejadian, sebagai berikut:

3.6.1. Gempa Bumi Pendahulu (*Foreshock*)

Menurut Putra (2021), *Foreshock* atau gempa bumi pendahulu merupakan gempa yang terjadi sebelum gempa bumi utama dengan energi dan *magnitude* yang lebih kecil dari gempa utama. *Foreshock* ditentukan dengan adanya jarak, mekanisme kejadian, dan waktu kejadian dimana *foreshock* saat ini dapat diketahui 40 % dengan kekuatan menengah dan 60 % dengan kekuatan >7.0 Mw. Gempa bumi pendahulu (*foreshocks*) dapat dianalisa dengan baik apabila terdapat data katalog seismisitas yang lengkap. Adapun data katalog yang dibutuhkan yaitu data keseluruhan kejadian gempa termasuk kejadian dengan amplitudo yang sangat kecil disuatu wilayah (Akbar dkk., 2017).

3.6.2. Gempa Bumi Utama (*Mainshock*)

Mainshock merupakan kejadian gempa dengan energi terbesar dalam satu rangkaian aktivitas seismik yang diawali oleh gempa pendahulu (*foreshock*) dan diikuti oleh gempa susulan (*aftershock*). Secara geofisika, mainshock terjadi ketika proses deformasi pada zona patahan mencapai ambang batas kekuatan batuan, sehingga terjadi pelepasan energi secara tiba-tiba akibat pergeseran bidang sesar. Peristiwa ini menimbulkan gelombang seismik dengan amplitudo dan magnitudo yang umumnya lebih besar dibandingkan *foreshock* maupun *aftershock*.

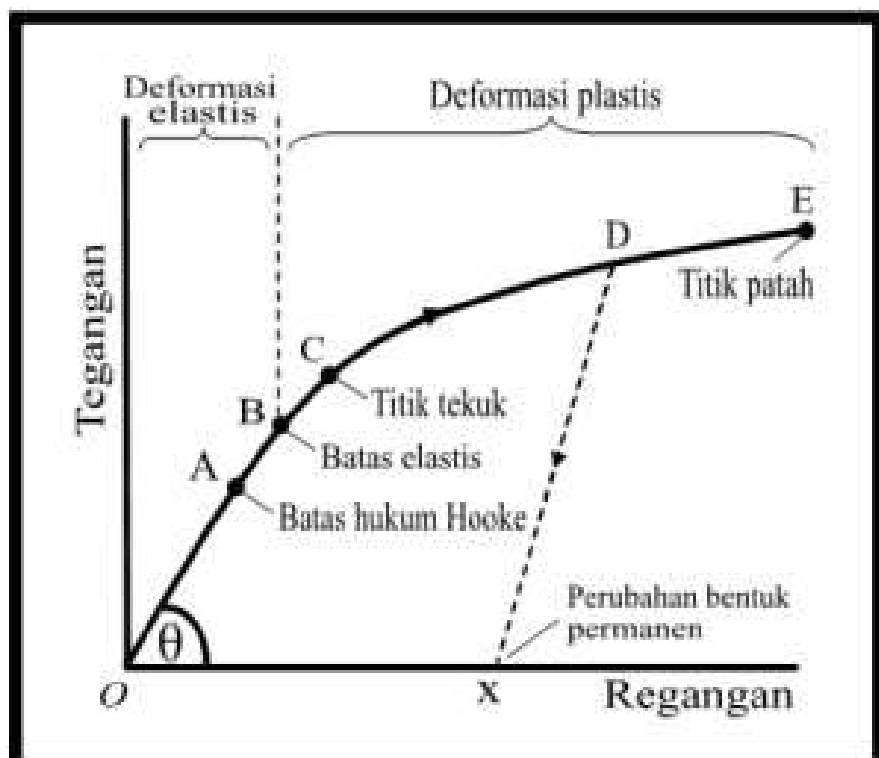
Menurut Supendi dkk. (2021), *mainshock* merupakan tahap pelepasan energi terbesar dari suatu sistem sesar yang telah mengalami peningkatan tegangan akibat aktivitas *foreshock* di sekitarnya. Hal ini dapat dibuktikan pada penelitiannya bahwa gempa bumi utama terjadi setelah adanya gempa pendahulu yang memicu perubahan tegangan Coulomb pada segmen sesar berdekatan, yang kemudian menyebabkan bidang patahan utama mengalami ruptur. Dengan adanya hal tersebut dapat membuktikan bahwa *mainshock* memiliki peranan penting sebagai indikator puncak dari siklus pelepasan energi seismik.

3.6.3. Gempa Bumi Susulan (*Aftershock*)

Gempa bumi susulan merupakan gempa bumi yang timbul setelah terjadinya gempa utama (*Main Shock*). Besar energi yang dilepaskan sama dengan akumulasi tekanan di batuan dasar, hal ini sesuai dengan konsep fisika dasar tentang Hukum oleh usaha pengembalian ke kedudukan setimbang (H.F Reid, 1982). Gempa susulan adalah gempa bumi yang terjadi di wilayah yang sama dengan gempa utama tetapi memiliki magnitudo yang lebih kecil dan muncul dengan pola yang mengikuti Hukum Omori.

Sejak tahun 1894, pakar seismologi Jepang, Fusakichi Omori sudah mengamati adanya pola teratur penyebaran gempa susulan secara global. Perhitungan matematik dari pola penyebaran seismik ini kemudian disebut Hukum Omori. Berdasarkan Hukum Omori. Gempa bumi susulan disebabkan karena pada saat *main shock* energi yang dikeluarkan belum terlepas secara keseluruhan, sehingga hal ini mengakibatkan gempa secara terus menerus setelah *mainshock* (Werner dkk., 2016).

Sedangkan menurut Salsabil, A.K. dkk. (2019), tumbukan lempeng mengakibatkan batuan mendapatkan tekanan atau stress secara terus-menerus. Ketika tekanan sudah melebihi titik elastisitas batuan, maka batuan akan pecah dan terjadilah gempa seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 10**. Proses pengembalian ini yang menyebabkan terjadinya gempa bumi susulan atau *aftershocks* yang terjadi secara bertahap. Penentuan berakhirnya gempa bumi susulan dapat diperkirakan dengan peluruhan gempa bumi menggunakan Metode Omori, Mogi Utsu I dan Mogi Utsu II Newton III yaitu $F_{aksi} = -F_{reaksi}$. Gempa bumi yang besar umumnya disebabkan oleh pemecahan batuan di dalam bumi yang segera diikuti.



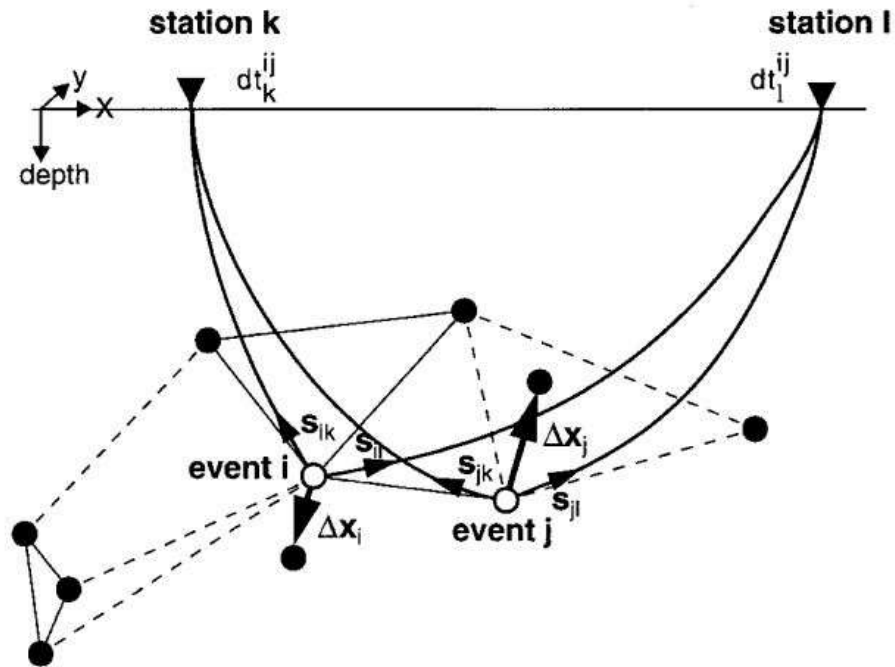
Gambar 10 Diagram elastisitas batuan

3.7. Metode *Double Difference*

Metode *Double Difference* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk melakukan relokasi daerah gempa bumi. Prinsip dasar dari Metode *Double Difference* adalah jika terdapat dua gempa yang saling berdekatan dengan jarak *relative* antar gempa lebih kecil dari jarak *relative* gempa ke stasiun rekam, maka *raypath* dan *waveform* dianggap sama. Dengan asumsi ini, perbedaan waktu tiba gelombang seismik pada stasiun yang sama terutama mencerminkan perbedaan

posisi sumber gempa, bukan pengaruh heterogenitas model kecepatan bawah permukaan (Tian dkk., 2019).

Metode ini dapat memberikan hasil akurat yang dapat ditunjukkan dengan nilai RMS dari hasil relokasi gempa yang jauh lebih baik atau dengan standar mendekati nilai nol dibandingkan nilai RMS sebelum dilakukannya relokasi gempa bumi. Algoritma dari Metode *Double Difference* adalah dapat meningkatkan akurasi lokasi relatif dengan menghilangkan efek yang berhubungan dengan struktur kecepatan yang tidak tergambarkan. **Gambar 11** merupakan ilustrasi dari Metode *Double Difference*.



Gambar 11 Metode *double difference*

Pada **Gambar 11** menurut Waldhausser & Ellsworth (2000), langkah pertama dari Metode ini adalah mencari waktu tempu dan hiposenter ke stasiun seismik dengan menggunakan persamaan rumus sebagai berikut:

$$T_k^i = t^i + \int_i^k u ds \quad (1)$$

dengan,

T : Waktu tiba (*Arrival Time*)

k : Stasiun

i : Banyaknya gempa

t' : *Origin time*

u : Penjalaran gelombang

ds : Panjang elemen lintasan

Dari persamaan tersebut melinearkan antara lokasi gempa dan *travel time* dengan perasamaan rumus sebagai berikut:

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i \quad (2)$$

dengan,

r_k^i : Residual waktu tempuh untuk gempa i

Δm^i : Perubahan parameter hiposenter

Selanjutnya, meminimalkan residual melalui proses inversi dengan persamaan rumus sebagai berikut :

$$r_k^i = (t^{obs} - t^{cal})_k^i \quad (3)$$

dengan,

t^{obs} : Waktu tiba hasil pengamatan

t^{cal} : Waktu tiba hasil perhitungan dari model kecepatan

Selanjutnya melakukan perhitungan *Metode Double Difference* dengan rumus sebagai berikut:

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m^i} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m^j} \Delta m^j = dr_k^{ij} \quad (4)$$

dengan,

dr_k^{ij} : Selisih residual waktu tempuh antara dua gempa I dan j yang direkam pada stasiun yang sama

Δm^{ij} : Perubahan parameter hiposenter relatif antara dua gempa

Dengan menggunakan antara selisih waktu tiba dua gempa, dengan kesalahan akibat heterogeneitas model kecepatan akan berkurang karena kedua gempa memiliki lintasan gelombang yang hamper sama menuju stasiun.

Menurut Wen dkk. (2012), penerapan Metode *Double-Difference* dengan *HypoDD* terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi posisi hiposenter di wilayah Jawa. Sebaran hiposenter menjadi lebih fokus dan konsisten terhadap struktur geologi utama, seperti zona subduksi dan sesar aktif. Sementara itu, penelitian (Tawakal dkk., 2024) di Pusat Gempa Regional II Tangerang Selatan juga memperlihatkan bahwa penggunaan *HypoDD* menghasilkan penurunan nilai *RMS* waktu tempuh secara signifikan, yang berarti peningkatan kualitas data seismisitas.

HypoDD merupakan program yang dapat dimanfaatkan untuk melakukan relokasi hiposenter gempa bumi dengan menggunakan algoritma *Double Difference*. Secara dasar prosedur dalam relokasi *HypoDD* adalah dengan mengidentifikasi setiap stasiun pasangan gempa bumi yang dapat dihubungkan guna melakukan koreksi waktu datang dari setiap stasiun terdeteksinya gempa bumi tersebut dan akhirnya kumpulan tersebut dapat dihubungkan pada satu kluster dan solusi kuadrat terkecil dari setiap kluster tersebut. Dalam melakukan relokasi gempa bumi dengan *HypoDD* dapat dilakukan pembentukan pasangan *event* gempa bumi dan menghubungkan dengan sekitar stasiunnya, kedua melakukan pembentukan kluster-kluster dan yang terakhir dapat melakukan relokasi dengan Metode *Double Difference*.

IV. METODE PENELITIAN

4. 1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara yang beralamat di Jl. Raden Intan No. 219, Kota Alam, Kec. Kotabumi Selatan, Kab. Lampung Utara, Lampung. Waktu penelitian dapat dilihat pada **Tabel 2** berikut.

Tabel 1 Waktu penelitian

No.	Agenda	Bulan															
		Oktober				November				Desember				Januari			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur dan Studi Bimbingan																
2	Pengumpulan Data Awal																
3	Pengolahan Data																
4	Pembuatan Proposal																
5	Seminar Proposal																
6	Penyusunan Hasil																
7	Seminar Hasil																
8	Revisi dan Persiapan Sidang Komprehensif																
9	Ujian Komprehensif																

4. 2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan sebagai penunjang penelitian ini sebagai berikut :

1. Data *event* kurun waktu 1 hari sebanyak 129 *event*.
2. Data *arrival time* sebanyak 1816 *picks*.
3. Data stasiun gempa bumi Cianjur 21 November 2022 sebanyak 22 stasiun.
4. Laptop
5. *Oracle VM Virtualbox*

Pada penelitian ini, *Oracle VM* mendukung untuk menjalankan berbagai program seismologi seperti *ph2dt* dan *hypoDD*.

6. *HypoDD*

HypoDD digunakan untuk melakukan relokasi hiposenter gempa bumi dengan Metode *Double Difference*. Aplikasi ini dapat membandingkan suatu perbedaan waktu tiba antar pasangan gempa yang berdekatan untuk meminimalkan kesalahan model kecepatan.

7. *Python*

Python digunakan sebagai bahasa pemrograman pendukung dalam melakukan proses relokasi hiposenter gempa bumi menggunakan *HypoDD* dan pembuatan peta dengan *GMT*. Dalam penelitian ini, *Python* dimanfaatkan untuk mengolah data input seperti file fase dan hasil relokasi untuk membuat visualisasi pendukung guna melakukan interpretasi.

8. *Generic Mapping Tools (GMT)*

Pada penelitian ini, *GMT* dimanfaatkan untuk membuat peta sebaran hiposenter hasil relokasi, menampilkan garis sesar, serta menyajikan distribusi gempa dalam tampilan dua dan tiga dimensi. Harapannya dengan menggunakan *GMT*, hasil relokasi dari *HypoDD* dapat divisualisasikan secara lebih informatif dan ilmiah.

9. *AnacondaPrompt*

Anaconda Prompt digunakan untuk menjalankan *script python* yang berkaitan dengan proses relokasi hiposenter menggunakan *HypoDD* serta pengolahan dan visualisasi data.

10. *Visual Studio Code*

Visual Studio Code digunakan sebagai editor teks untuk menulis, mengedit, dan menjalankan *script python* untuk relokasi hiposenter gempa bumi dan proses visualisasi data dengan *GMT*.

4. 3. Tahapan Penelitian

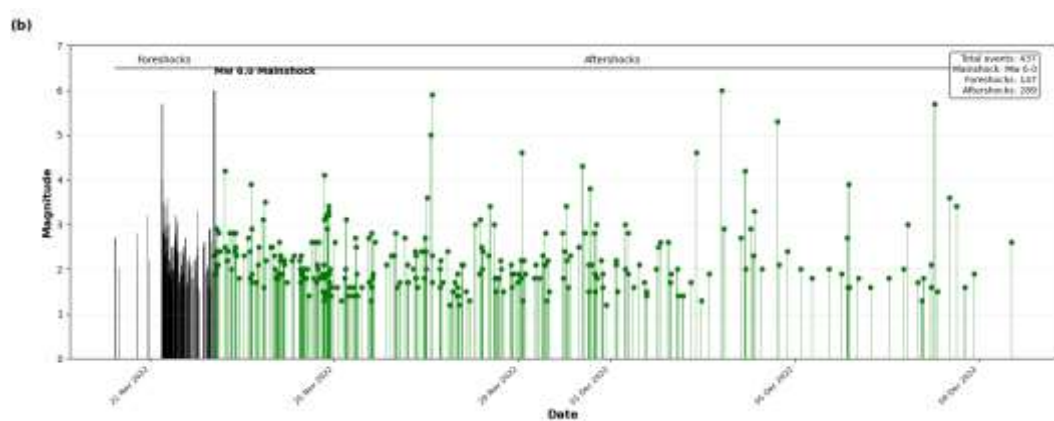
Adapun tahapan penelitian dari penelitian ini sebagai berikut:

4.3.1. Studi Literatur

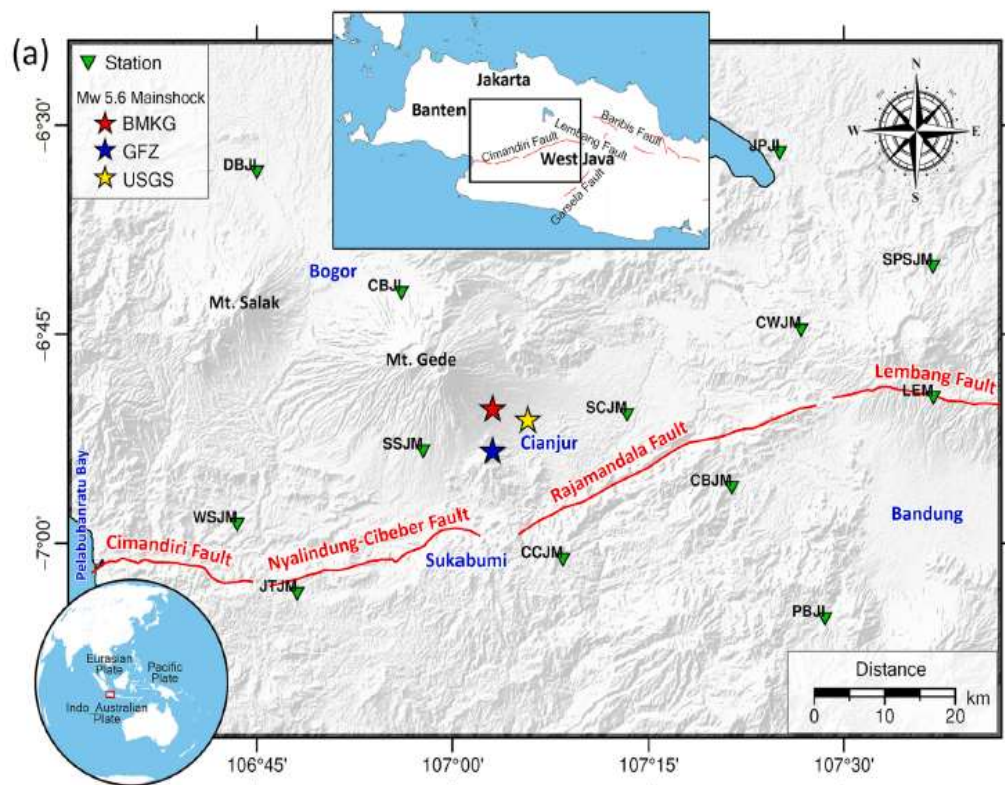
Tahapan awal yang dilakukan dalam penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur merupakan tahapan yang dilakukan untuk memahami konsep dari Metode *Double Difference*, memahami penggunaan dari setiap perangkat lunak yang digunakan yaitu, *Oracle VM Virtualbox*, *Linux*, *Generic Mapping Tools*, *HypoDD*, *Python*, dan *Anaconda Prompt*.

4.3.2. Pengolahan Data

Tahapan selanjutnya adalah tahapan pengolahan data dimana data yang digunakan adalah data *arrival time* dimana data tersebut adalah data waktu datangnya Gelombang P dan Gelombang S serta data stasiun dari gempa bumi Cianjur 21 November 2022. Selanjutnya, data tersebut akan diolah menjadi format *.pha* dan *.dat*. Tahapan berikutnya yaitu, melakukan proses penentuan pasangan gempa (*ph2dt*) dan dilanjut dengan proses relokasi gempa bumi (*hypoDD*). Apabila tahapan tersebut telah selesai maka menghasilkan *output hypoDD.reloc*, dimana file tersebut merupakan hasil dari relokasi hiposenter gempa bumi. Setelah menyelesaikan seluruh proses relokasi gempa bumi (*hypoDD*) tahapan selanjutnya yaitu membuat diagram wadati, histogram, dan peta relokasi dengan *generic mapping tools* yang dapat dilihat pada **Gambar 12** dan **Gambar 13**. Langkah terakhir melakukan proses interpretasi.



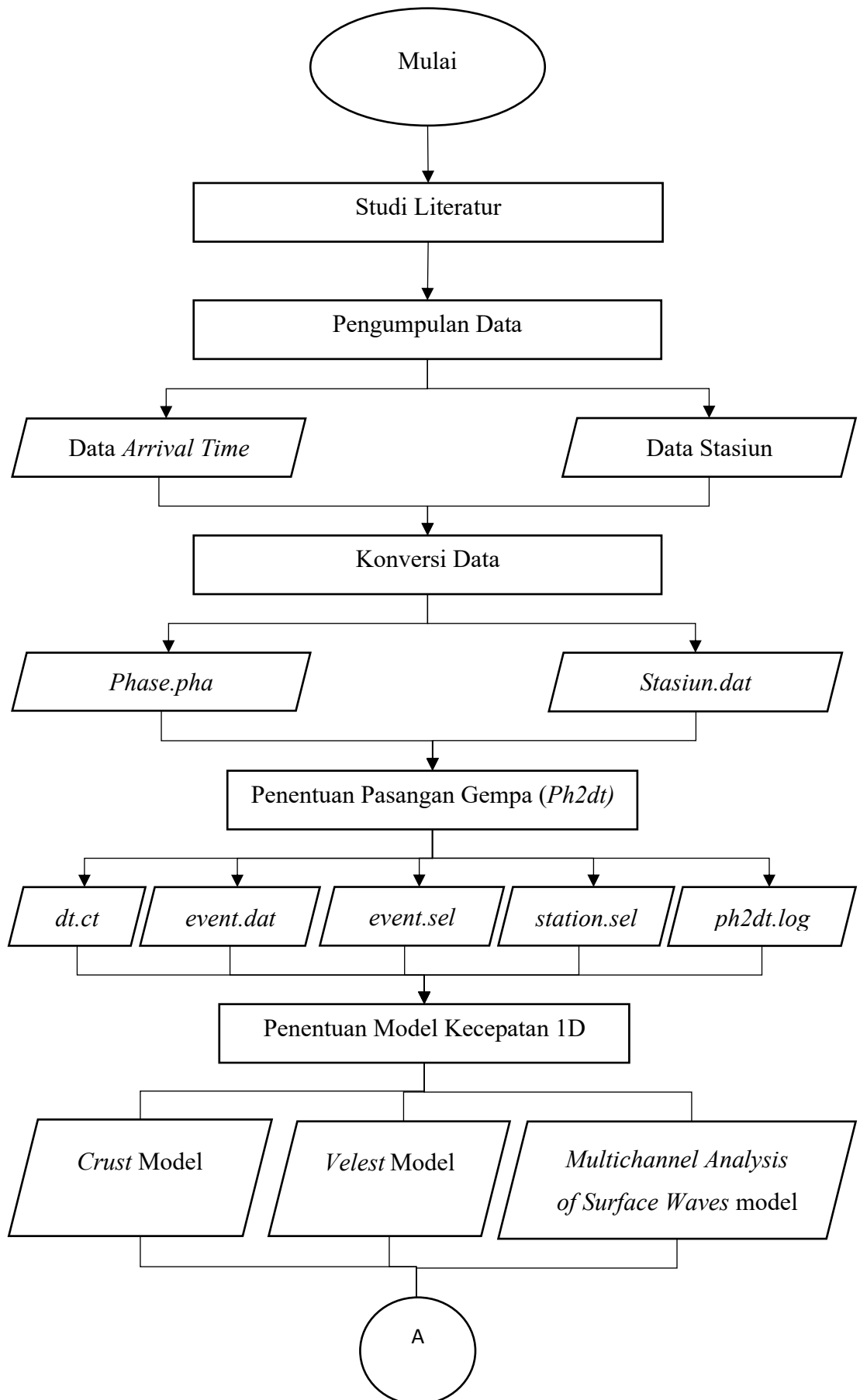
Gambar 12 Histogram temporal gempa bumi Cianjur (21 November 2022 s.d. 10 Desember 2022)

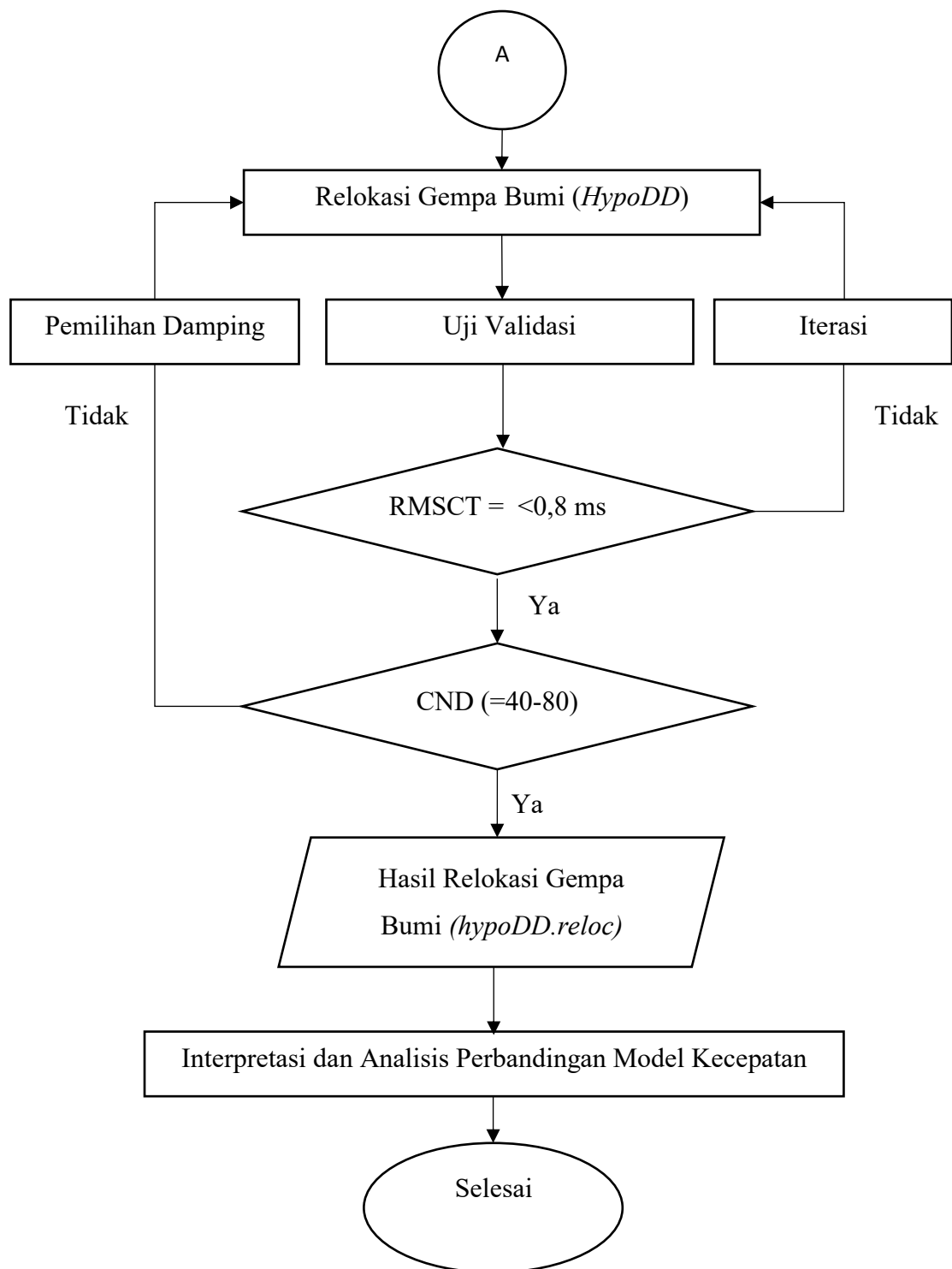


Gambar 13 Peta relokasi gempa bumi Cianjur 21 November 2022 (Supendi dkk., 2023)

4. 4. Diagram Alir

Berikut merupakan diagram alir dari penelitian ini:





Gambar 14 Diagram alir penelitian

VI. SIMPULAN DAN SARAN

6.1. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil penelitian sebagai berikut.

1. Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai *RMST*, jumlah residual, jumlah lapisan dari masing masing model, dimana untuk model *MASW* jumlah lapisan 10, jumlah residual 3468 dengan nilai *RMST* 0,755. Kemudian untuk model *Crust* jumlah lapisan 12, jumlah residual 3468, dan nilai *RMST* 0,756. Selanjutnya untuk model *Velest* jumlah lapisan 8, jumlah residual 3099, dan nilai *RMST* 0,769.
2. Model *Crust* menghasilkan distribusi kedalaman 5-15 km dengan kerapatan sedang dan sebaran sedikit menyebar, model *Velest* menghasilkan distribusi kedalaman lebih dalam (5-20 km) dengan kerapatan tertinggi dan rapat. Sedangkan model *MASW* menghasilkan kedalaman paling dangkal (5-15 km) dengan kerapatan tinggi namun sebaran lebih luas.
3. Berdasarkan hasil kuantitatif dan kualitas relokasi hiposenter, dengan *HypoDD* dan model 1D *MASW* direkomendasikan sebagai model utama untuk penelitian relokasi dan karakterisasi sistem patahan di Cianjur.
4. Berdasarkan proses relokasi yang dilakukan didapatkan bahwa gempa yang terjadi pada 21 November 2022 terjadi karena sesar lokal tunggal yang berorientasi pada Timur Laut – Barat Daya (NE-SW).

6.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, disarankan penggunaan gabungan Metode *Double Difference* dengan model *velocity MASW* untuk memperoleh informasi struktur bawah permukaan dan sebaran hiposenter secara lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- Adenata, P., Lepong, P., & Mislan. (2022). Analisis pergerakan tanah berdasarkan pola kecepatan tanah maksimum akibat gempa bumi Lombok. *Geosains Kutai Basin*, 5(1), 22–30. <https://doi.org/10.30872/geofisunmul.v5i1.780>.
- Akbar, D., Sianipar, D., Sipayung, R., & Adi, S. P. (2017). Identifikasi rangkaian gempa bumi pendahuluan (foreshocks) dengan pendekatan korelasi silang sinyal seismik template (studi kasus rangkaian gempa bumi Karo 2017). *Jurnal Fisika FLUX*, 6(2). <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v6i2.11800>.
- Anggono, T., Syuhada, S., Febriani, F., Handayani, L., Mukti, M. M., & Amran, A. (2020). Crustal shear-wave velocity structure in Western Java, Indonesia from analysis of teleseismic receiver functions. *Journal of Earth System Science*, 129(6), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1288-1>.
- Arintalofa, V., Yulianto, G., & Harmoko, U. (2020). Analisa mikrotremor menggunakan metode HVSr untuk mengetahui karakteristik bawah permukaan manifestasi panas bumi Diwak dan Derekan berdasarkan nilai Vp. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(2), 54–61. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9276>.
- Hilmi, I. L., Sutrisno, S., & Sunarya, D. (2019). Analisis seismisitas berdasarkan data gempa bumi periode 1958–2018 menggunakan b-value pada daerah selatan Jawa Barat dan Banten. *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, 2(1), 10–16. <https://doi.org/10.15408/fiziya.v2i1.10482>.
- Hutasoit, E. Y., Dewi, I. K., & Farid, F. (2021). Identifikasi percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa bumi di Sumatra Barat menggunakan metode Gutenberg–Richter. *Jurnal Geoelebes*, 5(2), 144–158. <https://doi.org/10.20956/geoelebes.v5i2.14056>.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2023). *Kajian gempa Cianjur Provinsi Jawa Barat 21 November 2022 (Mw 5,6)*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Pesicek, J. D., & Ryberg, T. (2024). Reference 1D seismic velocity models for volcano monitoring and imaging: Methods, models, and applications.

- Seismological Research Letters*, 95(5), 2722–2744.
<https://doi.org/10.1785/0220240070>.
- Putra, R. R. (2021). Karakteristik gempa foreshock dan aftershock pada sumber gempa intraplate berdasarkan distribusi kejadian gempa (studi kasus: Gempa Padang 2009 dan Gempa Padang Panjang 2007). *CIVED*, 8(2), 76.
- Putri, C. N. (2022). *Estimasi gempa bumi untuk wilayah Lampung menggunakan model spatial autoregressive (SAR)*.
- Rosalia, S., Widiyantoro, S., Cummins, P. R., Yudistira, T., Nugraha, A. D., Zulfakriza, Z., & Setiawan, A. (2022). Upper crustal shear-wave velocity structure beneath Western Java, Indonesia from seismic ambient noise tomography. *Geoscience Letters*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00208-5>.
- Salsabil, A. K., Ginting, R. A., Q., A., & Kamal, A. M. (2019). Analisis peluruhan gempa bumi menggunakan metode Omori, Mogi–Utsu I dan Mogi–Utsu II (studi kasus gempa bumi Banten 23 Januari 2018). *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF2019)*, 7–14. Universitas Negeri Jakarta.
- Scholz, C. H. (2019). *The mechanics of earthquakes and faulting* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Supartoyo, A., Saputra, S. E., Kurnia, A., Baskoro, S., Heriwaseso, A., Sumaryono, dkk. (2023). *Bumi Cianjur berguncang: Geologi menyelidiki dan memitigasi*. Badan Geologi.
- Supendi, P., Ramdhan, M., Priyobudi, Sianipar, D., Wibowo, A., Gunawan, M. T., dkk. (2021). Foreshock–mainshock–aftershock sequence analysis of the 14 January 2021 (Mw 6.2) Mamuju–Majene (West Sulawesi, Indonesia) earthquake. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 106.
- Supendi, P., Winder, T., Rawlinson, N., Bacon, C. A., Palgunadi, K. H., & Simanjuntak, A. (2023). Pengungkapan sesar konjugasi berdasarkan gempa merusak Mw 5,6 tanggal 21 November 2022 di Cianjur, Jawa Barat. *Geophysical Journal International*, 235(1), 1–15.
- Tawakal, M. I., Rini, V. S., Januarti, Y., & Widjayanti, R. Y. (2024). Relokasi katalog gempa bumi di Pusat Gempa Regional II Tangerang Selatan menggunakan metode Double Difference (HypoDD).
- Tian, D., Helmberger, D. V., & Zhu, L. (2019). Improving earthquake relative location using waveform cross-correlation and double-difference relocation methods. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2), 524–538. <https://doi.org/10.1785/0120180248>.

- USGS. (2020). *Schematic diagram showing differences in earthquake types*. <https://www.usgs.gov/media/images/schematic-diagram-showing-differences-earthquake-types>.
- Wen, L., Chen, Y., & Zhou, S. (2018). High-resolution earthquake relocation using double-difference tomography: Application to active tectonic regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5A), 2558–2573. <https://doi.org/10.1785/0120180015>.
- Werner, M. J., Helmstetter, A., Jackson, D. D., & Kagan, Y. Y. (2016). High-resolution long-term and short-term earthquake forecasts for California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3), 1099–1115. <https://doi.org/10.1785/0120150340>.
- Widiyantoro, S., Ramdhan, M., Métaxian, J.-P., Cummins, P. R., Martel, C., Erdmann, S., dkk. (2018). Seismic imaging and petrology explain highly explosive eruptions of Merapi Volcano, Indonesia. *Scientific Reports*, 8, 13656. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31293-w>.
- Zhang, H., Thurber, C. H., & Shelly, D. R. (2019). Application of double-difference tomography and 1-D velocity models to improve earthquake locations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(3), 2456–2473. <https://doi.org/10.1029/2018JB01668>.