

**PERBANDINGAN PENENTUAN HIPOSENTER GEMPA VULKANIK
GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *GEIGER'S WITH
ADAPTIVE DAMPING (GAD)* DAN *NONLINLOC* PERIODE MARET 2023**

SKRIPSI

Oleh:
FATIH RAHMASARI
NIM.210604110043



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

**PERBANDINGAN PENENTUAN HIPOSENTER GEMPA VULKANIK
GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *GEIGER'S WITH
ADAPTIVE DAMPING (GAD)* DAN *NONLINLOC* PERIODE MARET 2023**

SKRIPSI

Oleh :
FATIH RAHMASARI
NIM.210604110043

**Diajukan Kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Penyelesaian Program Sarjana Sains**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

HALAMAN PERSETUJUAN

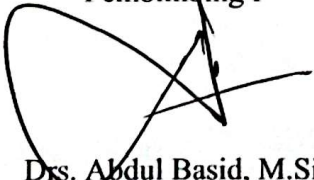
PERBANDINGAN PENENTUAN HIPOCENTER GEMPA VULKANIK
GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *GEIGER'S WITH
ADAPTIVE DAMPING (GAD) DAN NONLINLOC* PERIODE MARET 2023

SKRIPSI

Oleh:
FATIH RAHMASARI
NIM. 210604110043

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
19 Desember 2024

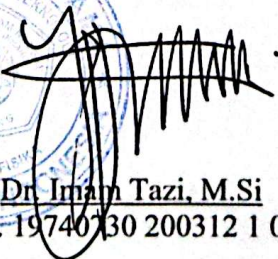
Pembimbing I


Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

Pembimbing II


Wiwis Sasmitaninghidayah, S.Si., M.Si
NIP. 19870215 202321 2 031

Mengetahui
Ketua Program Studi



Dr. Imam Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

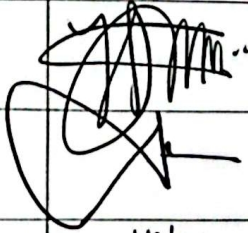
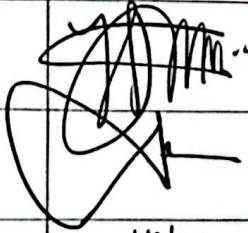
HALAMAN PENGESAHAN

PERBANDINGAN PENENTUAN HIPOSENTER GEMPA VULKANIK
GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *GEIGER'S WITH
ADAPTIVE DAMPING (GAD)* DAN *NONLINLOC* PERIODE MARET 2023

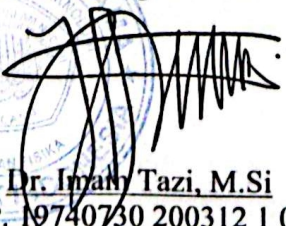
SKRIPSI

Oleh:
FATIH RAHMASARI
NIM. 210604110043

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Diterima sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal, 23 Desember 2024

Penguji Utama	<u>Ahmad Luthfin, S.Si., M.Si</u> NIP. 19860504 201903 1 009	
Ketua Penguji	<u>Dr. Imam Tazi, M.Si</u> NIP. 19740730 200312 1 002	
Sekretaris Penguji	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	
Anggota Penguji	<u>Wiwis Samitaninghidayah, S.Si., M.Si</u> NIP. 19870215 202321 2 031	

Mengetahui
Ketua Program Studi



Dr. Imam Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002



PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : FATIH RAHMASARI

NIM : 210604110043

Program Studi :FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : Perbandingan Penentuan Hiposenter Gempa Vulkanik
Gunung Merapi Menggunakan Metode *Geiger's With
Adaptive Damping* (GAD) dan *NonLinLoc* Periode Maret
2023

Menyatakan dengan sebesar – besarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur – unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur – unsur jiplakan maka saya bersedia untuk mempertanggung jawabkan, serta diproses sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 19 Desember 2024
Yang Membuat Pernyataan,



Fatih Rahmasari
NIM. 210604110043

MOTTO

*“Meski langkahku goyah dan hatiku tak menentu, aku percaya bahwa keraguan
hari ini akan menjadi kekuatan di hari esok”*

*“Between the lines of uncertainty and hope, lies the beautiful journey of becoming
who we're meant to be”*

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Swt. penulis panjatkan atas segala limpahan rahmat dan kenikmatan-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dan penulis persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua, Ayah Alm. Adi Santoso dan Ibu Firianti Fatmasari.

Gelar sarjana ini saya persembahkan khusus untuk kalian. Terima kasih atas segala pengorbanan dan kasih sayang tulus yang telah diberikan. Ayah, meski telah tiada, nasehat dan bimbingan Ayah tetap menjadi kekuatan saya hingga saat ini. Ibu, terima kasih atas perhatian dan dukungan yang tak pernah berhenti. Ucapan terima kasih takkan cukup untuk menggambarkan rasa syukur saya. Semoga Allah melimpahkan kebaikan di dunia dan akhirat untuk Ayah dan Ibu. Semoga Ayah mendapat tempat terbaik di sisi-Nya, dan Ibu selalu diberi kesehatan serta umur panjang.

2. Kakak dan Adik penulis, Kak Fadiyah Setyaningrum dan Dek Rahmat Santoso terima kasih terima kasih telah menjadi sumber semangat dan

kebahagiaan dalam hidupku. Dukungan dan keceriaanmu selalu menguatkanmu di setiap langkah. Semoga kita terus saling mendukung dan tumbuh bersama menuju masa depan yang lebih baik. Semoga kita menjadi anak yang membanggakan serta berbakti kepada kedua orang tua.

3. Sahabat Farah Handayani Ibrahim S.Si yang telah menjadi sahabat seperjuanganku, Yang telah memberikan warna dalam perjalanan

akademikku, berbagi suka dan duka, serta saling menguatkan dalam meraih mimpi.

4. Kepada pemilik NIM 210604110050 terima kasih telah memberikan dukungan dan semangat. Kehadiranmu menjadi sumber kekuatan tersendiri, terutama di saat-saat sulit ketika saya membutuhkan tempat untuk berbagi cerita dan berkeluh kesah. Terima kasih telah menjadi pendengar yang baik, seorang spesial yang selalu ada, dan penyemangat yang tak pernah lelah memberikan motivasi. Kehadiranmu benar-benar berarti dalam perjalanan saya hingga mencapai titik ini.
5. Teman – teman Program Studi Fisika 2021 terkhusus Royani, Ummimatus Sa'diyah, Nur Maulida Sari yang selalu menemani dan memberikan semangat penulis hingga saat ini.
6. Terima kasih untuk Fatih Rahmasari, diri saya sendiri yang telah berjuang dan bekerja keras sejauh ini. Meski perjalanan ini belum selesai dan masih banyak hal yang harus dipelajari serta dipahami, kamu telah menunjukkan kekuatan dan ketekunan luar biasa. Banggalah pada dirimu sendiri karena mampu melewati setiap tantangan dengan baik. Tetaplah melangkah dengan semangat, karena setiap usaha kecil hari ini adalah pijakan menuju pencapaian besar di masa depan. Kamu sudah hebat, dan kamu akan terus menjadi lebih baik!.

Skripsi ini didedikasikan untuk semua orang yang telah mendampingi penulis, baik yang telah disebutkan sebelumnya maupun yang tidak disebutkan, sebagai penghargaan atas peran dan kontribusi mereka dalam menemani penulis selama proses studi.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Perbandingan Penentuan Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Merapi Menggunakan Metode *Geiger’s With Adaptive Damping* (GAD) Dan *Nonlinloc* Periode Maret 2023**”. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun manusia menuju zaman zakiyyah, yakni Addinul Islam Wal Iman.

Penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah berpartisipasi dan membantu dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi. Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. H.M. Zainuddin, M.A selaku Rektor Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Imam Tazi, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Andika Bayu Aji, S.T, M.Eng,Ph.D selaku Pembimbing lapangan yang telah memberikan bimbingan serta arahan untuk penulisan skripsi yang dilakukan di Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG).
5. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Dosen pembimbing skripsi, yang bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dalam penyusunan

skripsi serta memberikan motivasi dalam setiap melakukan revisi.

6. Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si selaku Dosen pembimbing agama, yang bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dalam bidang integrasi sains dan Al-Qur'an
7. Erna Hastuti, M.Si selaku Dosen wali yang senantiasa memberikan bimbingan, pengarahan, motivasi dan ilmu pengetahuan.
8. Segenap dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan pengarahan dan ilmu pengetahuan.
9. Para Peneliti, karyawan dan teman-teman di Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG), yang telah banyak membantu selama proses penelitian dan memberikan pengetahuan serta wawasan kepada penulis.
10. Bapak, Ibu, adik serta keluarga di rumah yang selalu memberi doa dan dukungan, baik riil maupun materiil selama proses penelitian.
11. Teman-teman angkatan 2021, khususnya pada peminatan GeoFisika yang senantiasa memberi semangat dan dukungan kepada penulis.
12. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dalam penulisan skripsi ini.

Teriring do'a serta harapan semoga apa yang telah mereka berikan kepada penulis mendapatkan balasan yang baik dari Allah SWT. Jazakumullah khoiron katsir. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dan kekeliruan. Untuk itu, penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Terlepas dari segala kekurangan, semoga

skripsi penelitian ini dapat memberikan informasi dan kontribusi positif serta bermanfaat kepada para pembaca terutama kepada penulis sendiri. Aamiin.

Malang, 24 Desember 2024

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
أبستراك	xix
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 7
2.1 Gunung Merapi	7
2.2 Gelombang Seismik	8
2.1.1 Gelombang Badan (Body Wave)	8
2.2.2 Gelombang Permukaan (<i>Surface Wave</i>)	10
2.3 Gempa Vulkanik	11
2.3.1 Klasifikasi Gempa Vulkanik	11
2.3.2 Karakteristik Vulkanik Gunung Merapi	15
2.4 Parameter Fisis Gelombang Gempa	16
2.5 Hiposenter	17
2.6 Metode Geiger's with Adaptive Damping (GAD)	17
2.7 Metode <i>NonLinLoc</i> (NLLoc)	20
 BAB III METODE PENELITIAN	 26
3.1 Jenis Penelitian	26
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.3 Alat dan Data Penelitian	27
3.3.1 Alat Penelitian	27

3.3.2 Data Penelitian	29
3.4 Prosedur Penelitian.....	31
3.4.1 Pengumpulan data	32
3.4.2 Pengolahan data pada <i>Software</i> GAD	32
3.4.3 Pengolahan data <i>Cendana15</i>	33
3.4.4 Pengolahan data pada MATLAB	33
3.4.5 Interpretasi data	33
3.5 Rencana Analisis.....	34
3.5.1 Analisis data hasil <i>picking</i> gempa	34
3.5.2 Analisis data model kecepatan 1D	36
3.5.3 Analisis hasil data koordinat stasiun pencatat gempa	37
3.5.4 Analisis hiposenter metode GAD dan NonLinLoc	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Data Hasil Penelitian.....	40
4.1.1 Pengolahan data <i>SeisComp3</i> dan GAD	40
4.1.2 Pengumpulan data koordinat hiposenter pada <i>Web Cendana15</i>	44
4.1.3 Visualisasi hiposenter metode GAD	45
4.1.4 Visualisasi hiposenter metode <i>NonLinLoc</i>	47
4.2 Pembahasan.....	49
4.2.1 Sebaran Hiposenter Metode GAD	49
4.2.2 Sebaran hiposenter metode NonLinLoc (<i>Non – Linier Location</i>)	51
4.2.3 Perkiraan keberadaan kantong magma gunung merapi.....	53
4.2.4 Perbandingan sebaran hiposenter dari Metode GAD dan <i>NonLinLoc</i>	57
4.3 Integrasi Sains dan Islam	61
BAB V PENUTUP	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN.....	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perubahan puncak Merapi	7
Gambar 2.2 Gelombang P	9
Gambar 2.3 Gelombang S	10
Gambar 2.4 Gelombang Love	10
Gambar 2.5 Gelombang Rayleigh	11
Gambar 2.6 Contoh rekaman seismik gempa vulkanik dalam (VTA)	12
Gambar 2.7 Contoh rekaman seismik gempa vulkanik dangkal (VTB).....	12
Gambar 2.8 Contoh rekaman seismik gempa LF	13
Gambar 2.9 Contoh rekaman seismik gempa hybrid	13
Gambar 2.10 Contoh rekaman seismik gempa MP	13
Gambar 2.11 Contoh rekaman seismik gempa hembusan.....	14
Gambar 2.12 Contoh rekaman seismik gempa guguran.....	14
Gambar 2.13 Contoh rekaman seismik gempa letusan.....	14
Gambar 2.14 Contoh rekaman seismik gempa tremor	15
Gambar 2.15 Model Sederhana Bawah permukaan Gunung Merapi	16
Gambar 2.16 Visualisasi sederhana Metode Geiger's	19
Gambar 3.1 Lokasi stasiun pengamatan gunung merapi.....	26
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 4.1 Tampilan Data Arrival Time pada Software SeisComp3.....	41
Gambar 4.2 Tampilan Awal Software GAD	41
Gambar 4.3 Tampilan GAD.exe	43
Gambar 4.4 Tampilan data hiposenter VTA pada Cendana15.....	45
Gambar 4.5 Tampilan jendela awal Software Matlab	46
Gambar 4.6 Hasil plotting pada peta kontur hiposenter metode GAD.....	47
Gambar 4.7 Hasil plotting pada peta 3D hiposenter metode GAD	47
Gambar 4.8 Hasil plotting pada peta kontur Metode NonLinLoc.....	48
Gambar 4.9 Hasil plotting peta 3D metode NonLinLoc	49
Gambar 4.10 Hasil plotting pada peta kontur hiposenter metode GAD.....	50
Gambar 4.11 Hasil plotting pada peta kontur hiposenter metode GAD.....	51
Gambar 4.12 Hasil plotting pada peta kontur Metode NonLinLoc.....	52
Gambar 4.13 Hasil plotting peta 3D metode NonLinLoc	53
Gambar 4.14 Asumsi keberadaan kantong magma gunung merapi (GAD).....	54
Gambar 4.15 Asumsi keberadaan kantong magma gunung merapi (GAD).....	54
Gambar 4.16 Estimasi kantong magma gunung merapi.....	55
Gambar 4.17 Estimasi kantong magma gunung merapi.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Alat Penelitian	27
Tabel 3.2 Contoh arrival time pada SeisComp3.....	34
Tabel 3.3 Format koordinat hiposenter GAD pada Software Excel.....	38
Tabel 3.4 Format koordinat hiposenter cendana15 di Software Excel.....	39
Tabel 4.1 Contoh penulisan Arrival Time pada format Arrival.dat di GAD	42
Tabel 4.2 Contoh penulisan data stasiun pada format Station.dat di GAD.....	42
Tabel 4.3 Contoh penulisan data kecepatan gelombang di GAD.....	43
Tabel 4.4 Contoh hasil Running GAD.exe berupa Result.dat.....	43
Tabel 4.5 Format data koordinat hiposenter GAD pada Excel	45
Tabel 4.6 Tabel data hiposenter metode NonLinLoc pada excel	48
Tabel 4.7 Perbandingan posisi hiposenter VTA untuk GAD dan NonLinLoc.....	58
Tabel 4.8 Selisih posisi hiposenter VTA metode GAD dan NonLinLoc	59
Tabel 4.9 Perbandingan posisi hiposenter VTB untuk GAD dan NonLinLoc.....	59
Tabel 4.10 Selisih posisi hiposenter VTB metode GAD dan NonLinLoc	60

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Tabel data input Arrival.dat (VTA) pada Software GAD	71
Lampiran 2.	Tabel data input Arrival.dat (VTB) di Software GAD	84
Lampiran 3.	Tabel data input Station.dat pada Notepad di Software GAD	90
Lampiran 4.	Tabel data input Velocity.dat pada Notepad di Software GAD	90
Lampiran 5.	Tabel data koordinat stasiun yang telah dikonversi.....	91
Lampiran 6.	Tabel koordinat gempa (VTA) GAD-MATLAB.....	92
Lampiran 7.	Tabel koordinat gempa (VTB) GAD-MATLAB.....	94
Lampiran 8.	Tabel koordinat gempa VTA (NonLinLoc-MATLAB).....	95
Lampiran 9.	Tabel koordinat gempa VTB (NonLinLoc-MATLAB).....	98
Lampiran 10.	Coding visualisasi 2D VTA dan VTB (GAD).....	103
Lampiran 11.	Coding visualisasi 2D VTA dan VTB (NonLinLoc).....	107
Lampiran 12.	Coding visualisasi 3D VTA dan VTB (GAD).....	111
Lampiran 13.	Coding visualisasi 3D VTA dan VTB (NonLinLoc).....	114

ABSTRAK

Rahmasari, Fatih. 2024. **Perbandingan Penentuan Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Merapi Menggunakan Metode *Geiger's With Adaptive Damping* (GAD) dan *Nonlinloc* Periode Maret 2023**. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Drs. Abdul Basid, M.Si (II) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si

Kata Kunci: Gunung Merapi, Hiposenter, GAD, Nonlinloc

Gunung Merapi adalah gunung berapi aktif yang terletak di antara Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah, dengan tinggi sekitar 2.910 mdpl. Sejak 5 November 2020, statusnya meningkat menjadi Level III (Siaga) karena peningkatan aktivitas vulkanik. Penelitian dilakukan untuk membandingkan dua metode penentuan hiposenter, *Geiger's Adaptive Damping* (GAD) dan *NonLinLoc*, guna mengetahui perbedaan pola distribusi penentuan hiposenter gempa vulkanik di Gunung Merapi. Data yang digunakan adalah rekaman seismik dari 01 hingga 31 Maret 2023, di mana aktivitas vulkanik meningkat. Jenis gempa yang dianalisis mencakup tipe A (VTA) dan tipe B (VTB), yang berbeda berdasarkan kedalaman sumbernya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif, dengan data sekunder dari rekaman seismogram digital dan informasi koordinat hiposenter. Hasil hiposenter dari kedua metode akan dibandingkan berdasarkan posisi latitude, longitude, dan kedalaman. Penelitian ini juga mengasumsikan adanya zona aseismik yang diduga sebagai kantong magma di kedalaman 1400 mdpl hingga 400 mbpl dari puncak Gunung Merapi.

ABSTRACT

Rahmasari, Fatih. 2024. **Comparison of Hypocenter Determination of Mount Merapi Volcanic Earthquakes Using *Geiger's With Adaptive Damping (GAD)* and *Nonlinloc* Methods for the March 2023 Period**. Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University Malang. Advisors: (I) Drs. Abdul Basid, M.Si (II) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si

Keywords: Mount Merapi, Hypocenter, GAD, Nonlinloc

Mount Merapi is an active volcano located between the Special Region of Yogyakarta and Central Java, with a height of about 2,910 meters above sea level. Since November 5, 2020, its status has increased to Level III (Alert) due to increased volcanic activity. The research was conducted to compare two hypocenter determination methods, Geiger's Adaptive Damping (GAD) and NonLinLoc, in order to find out the differences in the distribution patterns of volcanic earthquake hypocenter determination at Mount Merapi. The data used are seismic records from 01 to 31 March 2023, where volcanic activity increased. The types of earthquakes analyzed include type A (VTA) and type B (VTB), which differ based on the depth of the source. The method used in this study is quantitative, with secondary data from digital seismogram recordings and hypocenter coordinate information. The hypocenter results from both methods will be compared based on latitude, longitude and depth. This research also assumes the existence of an aseismic zone that is thought to be a magma pocket at a depth of 1400 meters above sea level to 400 meters above sea level from the summit of Mount Merapi.

أبستراك

رحماساري، فاتح 2024. مقارنة بين تحديد مركز الهبوط في جبل ميرابي البركاني باستخدام طريقة جيجر، وطريقة النونلينوك لفترة مارس 2023. الأطروحة. قسم الفيزياء (GAD) مع التخميد التكيفي: كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المستشارون (الأول) د. عبد الباسط، م. سي (الثاني) ويويس ساسميتانينغ هداية، م. سي

الكلمات المفتاحية: جبل ميرابي، هاييوسنتر، غاد، نونلينوك

جبل ميرابي هو بركان نشط يقع بين منطقة يوجياكارتا الخاصة وجاوة الوسطى، ويبلغ ارتفاعه حوالي 2,910 أمتار فوق مستوى سطح البحر. منذ 5 نوفمبر 2020، ارتفعت حالته إلى المستوى الثالث (إنذار) بسبب زيادة النشاط البركاني. أجري البحث للمقارنة بين طريقتين لتحديد مركز الهبوط، وهما من أجل معرفة الاختلافات في نمط توزيع تحديد NonLinLoc و (GAD) التخميد التكيفي لجيجر مركز الهبوط للزلازل البركانية على جبل ميرابي. البيانات المستخدمة هي السجلات الزلزالية من 01 إلى A (VTA) مارس 2023، حيث ازداد النشاط البركاني. تشمل أنواع الزلازل التي تم تحليلها النوع 31 والتي تختلف بناءً على عمق المصدر. الطريقة المستخدمة في هذه الدراسة كمية، مع B (VTB) والنوع بيانات ثانوية من تسجيلات المخططات الزلزالية الرقمية ومعلومات إحداثيات المركز الفوقي. ستنم مقارنة نتائج البؤر الخافضة من كلتا الطريقتين بناءً على خط العرض وخط الطول والعمق. ويفترض هذا البحث أيضاً وجود منطقة زلزالية يُعتقد أنها جيب صهارة على عمق 1400 متر إلى 400 متر من قمة جبل ميرابي.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Gunung Merapi adalah salah satu gunung berapi paling aktif di Indonesia dan terletak diantara Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah dengan daerah perbatasan yaitu Kabupaten Sleman, Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali, Kabupaten Klaten. Dengan ketinggian berkisar 2.910 mdpl dengan posisi geografis yaitu Latitude -7.54139° LS serta Longitude 110.44611° BT. Berdasarkan pengamatan dan analisis dari Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG), Gunung Merapi saat ini berada dalam status Level III (Siaga) sejak 5 November 2020. Status ini menunjukkan adanya peningkatan aktivitas vulkanik yang signifikan, sehingga diperlukan pemantauan secara intensif guna memberikan peringatan dini apabila terjadi peningkatan lebih lanjut. Salah satu indikasi peningkatan aktivitas vulkanik Gunung Merapi adalah adanya peningkatan jumlah gempa vulkanik. Pada Maret 2023, tercatat 834 *event* gempa vulkanik tipe A (VTA) dengan jumlah maksimal 83 *event* gempa (VTA) per-hari, serta 161 *event* gempa vulkanik tipe B (VTB) dengan jumlah maksimal 25 *event* gempa (VTB) per-hari. Jumlah gempa vulkanik yang signifikan ini menunjukkan adanya peningkatan aktivitas vulkanik Gunung Merapi pada periode tersebut. Penelitian ini akan menggunakan data katalog BPPTKG yang diakses melalui *web cendana15* yang menggunakan metode NonLinLoc.

Salah satu metode penting dalam pemantauan aktivitas vulkanik adalah analisis hiposenter, yaitu titik pusat gempa di dalam bumi yang dapat diidentifikasi melalui gelombang seismik. Penentuan hiposenter yang akurat penting untuk memahami

kedalaman dan distribusi sumber gempa, serta memprediksi jalur pergerakan magma menuju permukaan. Hiposenter sendiri merupakan fokus gempa atau pusat gempa yang berada di dalam bumi, hiposenter dapat dicari melalui gelombang seismik yang didapatkan dari gempa vulkanik (Bulo & Hendrawanto, 2020)

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan dua metode penentuan hiposenter, yaitu *Geiger's Adaptive Damping* (GAD) dan *NonLinLoc*, dengan tujuan mengetahui tingkat akurasi penentuan hiposenter gempa vulkanik Gunung Merapi. Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa rekaman seismik dari 01 – 31 Maret 2023, dimana pada periode ini adanya tren yang konsisten meningkat pada aktivitas vulkanik. Data gempa yang dianalisis mencakup jenis Gempa Vulkano-Tektonik (VT) yang terdiri dari tipe A (VTA) dan tipe B (VTB), yang berbeda berdasarkan kedalaman sumbernya. penelitian terdahulu telah menerapkan metode-metode tersebut dalam konteks pemantauan aktivitas gunung api, yang dapat menjadi rujukan untuk penelitian ini.

Merujuk pada penelitian yang menerapkan metode GAD yaitu milik (Hamdiyessi et al., 2022a) dengan judul “Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Marapi Menggunakan Metode *Geiger's with Adaptive Damping* (GAD)” bahwa peneliti tersebut menunjukkan adanya peningkatan aktivitas Gunung Marapi selama bulan Mei 2019 dengan hiposenter dan episenter memiliki sebaran yang tidak beraturan dimana hiposenter tersebar pada kedalaman 2600 – 4700 m dan episenter gempa tersebar mengelilingi puncak Gunung Marapi. Keberhasilan metode GAD dalam mengidentifikasi sebaran hiposenter di Gunung Marapi menjadi landasan yang kuat untuk menerapkan metode serupa dalam analisis aktivitas seismik di Gunung Merapi.

Sedangkan, untuk metode NonLinLoc merujuk pada penelitian milik (Kokowski et al., 2023) dengan judul “Analysis of the epicenter location accuracy for the local seismic network operated in the mining area towards the automation of location procedures” yang membandingkan metode Nonlinloc, LocSAT dan BackTrackBB. Dalam penelitian tersebut disebutkan bahwa NonLinLoc dapat beroperasi secara efektif bahkan dengan data yang terbatas, menunjukkan keefektifannya dalam berbagai kondisi. Penelitian ini ditemukan bahwa hasil penentuan lokasi hiposenter tetap akurat bahkan ketika data yang digunakan terbatas. Penelitian tersebut sangat relevan dengan penelitian ini mengingat karakteristik data seismik Gunung Merapi yang serupa, di mana ketersediaan data yang terbatas tetap dapat memberikan informasi terkait hiposenter. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan gelombang-P saja dalam metode NonLinLoc dapat menghasilkan akurasi yang lebih baik, yang menjadi pertimbangan penting dalam pengolahan data seismik Gunung Merapi.

Sebagaimana telah disebutkan dalam Al-Qur'an surah Ar-Rahman ayat 33:

مَعَشَرَ الْجِنِّ وَالْإِنسِ إِنِ اسْتَطَعْتُمْ أَنْ تَنْفُذُوا مِنْ أَقْطَارِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ فَانْفُذُوا لَا تَنْفُذُونَ إِلَّا بِسُلْطَانٍ ﴿٣٣﴾

Artinya: “Wahai segenap jin dan manusia, jika kamu sanggup menembus (melintasi) penjuru langit dan bumi, tembuslah. Kamu tidak akan mampu menembusnya, kecuali dengan kekuatan (dari Allah) (Ar-Rahman [55]:33).”

Secara garis besar ayat tersebut menerangkan tentang tantangan Allah SWT yang ditunjukkan kepada jin dan manusia atas kemampuannya menembus langit dan bumi. Dalil ini menunjukkan bahwa manusia memiliki kemungkinan dan kemampuan untuk melampaui batas – batas bumi sehingga dapat memasuki kosmos (Wijaya & Sholihatun Malikah, 2021). Menurut Buya Hamka dalam tafsirnya yaitu

tafsir Al-Azhar yang memulai pembahasan dengan tema “*Jika sanggup melintasi penjuru langit*”. Buya Hamka menjelaskan bahwa pada ayat tersebut diantara Rahman-Nya Allah kepada manusia dan jin yaitu dengan memberikan kebebasan kepada manusia dan jin untuk melintasi alam raya dengan tenaga dalam diri mereka yaitu berupa kemampuan dalam mengelola pengetahuannya, namun dalam pernyataan pada akhir ayat pada surah Ar-Rahman ayat 33 memberi peringatan bahwasannya kekuatan manusia dan juga jin memiliki batas kecuali dengan kuasa Allah SWT (Wijaya & Sholihatun Malikah, 2021).

Menurut Ibnu Qayyim ayat ini dapat dipahami dalam dua cara. Yang pertama adalah apabila kamu memiliki kemampuan untuk menganggap semua yang ada di bumi dan di langit sebagai ilmu, dan jika kamu mneegtahui mengetahui apa yang berada di dalamnya, ketahuilah bahwa kamu tidak akan mengetahuinya kecuali dengan “*sulthan*” yang memiliki makna bukti dari Allah SWT. Yang kedua adalah jika kamu bisa keluar dari tempat kekuasaan dan kerajaan-Nya dengan pengaruhmu dari tanah dan langit, maka lakukanlah. Dan ketahuilah bahwa hal ini tidak mungkin bagi kalian, karena kalian berada dalam naungan Allah beserta kekuatan Allah dimanapun berada (Wijaya & Sholihatun Malikah, 2021).

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, maka dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana sebaran hiposenter gempa vulkanik gunung merapi menggunakan metode GAD dan NonLinLoc?
2. Bagaimana perbandingan hasil penentuan hiposenter gempa vulkanik gunung merapi antara metode GAD dan NonLinLoc?
3. Bagaimana geometri dari kantung magma gunung merapi berdasarkan

karakteristik vulkanik gunung merapi?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu:

1. Menentukan sebaran hiposenter gempa vulkanik gunung merapi Menggunakan Metode GAD (*Geiger's with Adaptive Damping*) dan *NonLinLoc*.
2. Membandingkan hasil penentuan hiposenter gempa vulkanik gunung merapi antara metode GAD dan *NonLinLoc*.
3. Mengetahui geometri kantung magma gunung merapi berdasarkan karakteristik dari gunung merapi.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Data gempa yang digunakan hanya Gempa Vulkanik Dalam (VTA) dan Gempa Vulkanik Dangkal (VTB) dengan periode 01 – 31 Maret 2023.
2. Analisis sebaran hiposenter hanya berfokus pada kedalaman hiposenter dari metode GAD dan Nonlinloc.
3. Analisis perbandingan metode GAD dan NonLinLoc hanya berdasarkan pada pola distribusi hiposenter yang dihasilkan dari kedua metode tersebut.
4. Penentuan geometri dari kantung magma berdasarkan karakteristik vulkanik gunung merapi.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilaksanakannya penelitian ini adalah:

- a. Bagi mahasiswa
 - Sebagai studi literatur terkait hiposenter gunung merapi serta informasi mengenai metode GAD dan NonLinLoc

b. Bagi Masyarakat

- Memberikan informasi kepada masyarakat untuk meningkatkan kesadaran dan kewaspadaan terhadap bencana gempa vulkanik yang belum tentu dapat diprediksi waktu kejadian erupsi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gunung Merapi

Gunung Merapi secara administrasi berada di antara Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. Gunung Merapi berbatasan dengan 4 kabupaten diantaranya pada sisi utara dan timur yaitu Kabupaten Boyolali, pada sisi barat yaitu Kabupaten Magelang, dan pada sisi tenggara yaitu Kabupaten Klaten. Pada tahun 2010 Gunung Merapi mengalami perubahan kubah setelah meletus beberapa kali. Gunung Merapi memiliki rekahan yang semakin besar dan tidak memiliki puncak seperti pada **Gambar 2.1** bagian kanan (Budi, 2014).



Gambar 2.1 Perubahan puncak Merapi

Perubahan permukaan Gunung Merapi pada waktu yang berbeda sebelum letusan tahun 2010 (kiri) dan setelah letusan tahun 2010 (kanan), dilihat dari titik yang sama, yakni dari arah tenggara. Pada letusan tahun 2010, sebagian puncak gunung terkikis sehingga menimbulkan kawah besar berukuran 423 x 374 meter dan kedalaman 140 meter, serta robek sisi tenggara dengan lebar retakan 303 meter. Pada dasarnya terdapat kubah lava tahun 2010 yang menjadi pusat letusan freatik pada periode tersebut. Saat ini ketinggian Gunung Merapi 2.910 mdpl, dengan letak koordinat puncak kepundan adalah -7.54139° LS dan Longitude 110.44611° BT.

Dalam Al-Qur'an telah disampaikan secara langsung bahwa salah satu fungsi dari gunung ialah sebagai pasak bumi. Sebagaimana firman Allah SWT pada QS.

An – Naba ayat 6 - 7:

أَلَمْ نَجْعَلِ الْأَرْضَ مِهْدًا ۖ ﴿٦﴾ وَالْجِبَالَ أَوْتَادًا ۖ ﴿٧﴾

Artinya: “*Bukankah Kami telah menjadikan bumi sebagai hamparan dan gunung-gunung sebagai pasak?*”

Menurut tafsir dari Fakhr al-din al razi yang menjelaskan tentang ayat tersebut “*dan gunung – gunung dijasikan pasak*” ialah untuk tanah agar tidak melebar dan agar bisa ditinggali oleh manusia (Al-Razi, 2000). Dan menurut Muhammad Abduh mengenai ayat tersebut adalah kata “وتد” adalah kata jamak dari “وتد” yang berarti pasak. Gunung-gunung disebut pasak-pasak karena mereka muncul di atas permukaan bumi dengan cara yang mirip dengan pasak-pasak yang ditancapkan ke dalamnya. Selain itu, karena fungsinya untuk memperkuat bumi dan menjaganya stabil. Fungsi pasak adalah untuk memperkuat kemah yang diikatkannya. Maka seolah-olah gunung-gunung membentuk seluruh luas Bumi. Dan seandainya tidak ada gunung-gunung itu, Bumi akan terus bergoyang karena logam tertentu yang bergolak di dalamnya (Abduh, 1999).

2.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat di dalam bumi akibat deformasi tektonik, tekanan, atau tarikan gravitasi akibat sifat elastis kerak bumi. Gelombang ini membawa energi, merambat ke segala arah di bagian bumi, dan dapat direkam oleh seismometer (Siswamidjono, 1996). Perambatan gelombang seismik bergantung pada sifat elastis lapisan (batuan) yang dilalui gelombang seismik (Linda et al., 2019).

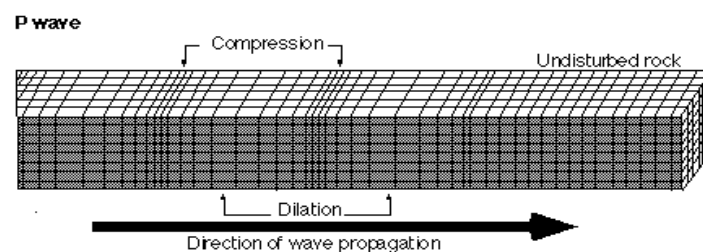
2.1.1 Gelombang Badan (Body Wave)

Gelombang badan atau disebut juga dengan gelombang bebas (*free wave*) merupakan gelombang yang dapat menjalar ke segala arah melalui bagian dalam bumi. Gelombang badan terbagi menjadi dua berdasarkan dari cara gelombangnya merambat yaitu gelombang primer dan gelombang sekunder (Roemaf, 2013)

a. Gelombang Pressure / Gelombang Primer (P)

Gelombang ini disebut gelombang kompresi atau gelombang longitudinal. Gelombang ini menyebabkan pergerakan partikel media dengan arah sejajar dengan arah rambat gelombang. Dalam rekaman seismograf, gelombang ini disebut gelombang primer (P) karena selalu tiba lebih dulu. Gelombang ini merambat melalui media padat atau cair (Siswowijoyo, 1981).

Gelombang primer merupakan gelombang longitudinal yang merambat lebih cepat dan tiba terlebih dahulu pada frekuensi yang lebih tinggi (Haerudin dkk., 2019). **Gambar 2.2** menunjukkan pergerakan partikel dalam gelombang primer. Kecepatan pada gelombang primer atau gelombang *Pressure* adalah $\pm 5 - 7$ km/s di kerak bumi, > 8 km/s di dalam mantel dan inti bumi, $\pm 1,5$ km/s di dalam air, dan $\pm 0,3$ km/s di udara. (Wahyuni dkk., 2017).

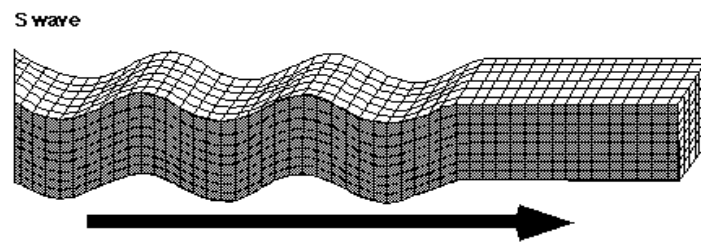


Gambar 2.2 Gelombang P

b. Gelombang Shear / Gelombang Sekunder (S)

Gelombang sekunder, disebut juga gelombang geser, mempunyai kecepatan lebih lambat dibandingkan gelombang P, sehingga gelombang ini tiba lebih lambat dibandingkan gelombang P. Gelombang yang disebut juga gelombang S ini

merupakan salah satu jenis gelombang transversal yang arah gerak partikelnya tegak lurus dengan arah rambat gelombang (Insanul, 2020). Kecepatan gelombang S (VS) adalah $\pm 3 - 4$ km/s di kerak bumi, $> 4,5$ km/s di dalam mantel bumi, dan $2,5 - 3,0$ km/s di dalam inti bumi (Hidayati, 2010).



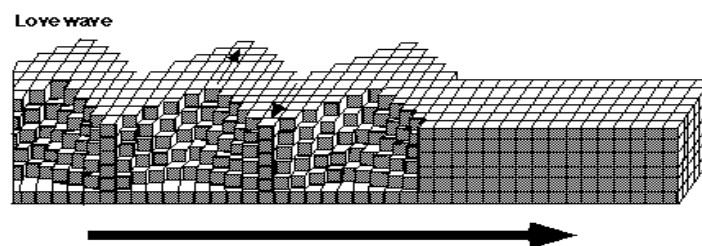
Gambar 2.3 Gelombang S

2.2.2 Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang permukaan adalah gelombang elastis dimana penjalaran gelombangnya disepanjang permukaan bumi. Gelombang permukaan atau *surface wave* terdiri dari gelombang *love* (L) dan gelombang *rayleigh* (R).

a. Gelombang *Love*

Gelombang *love* adalah gelombang permukaan yang menjalar dengan pergerakan transversal. Gelombang *love* memiliki cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan gelombang *rayleigh*.

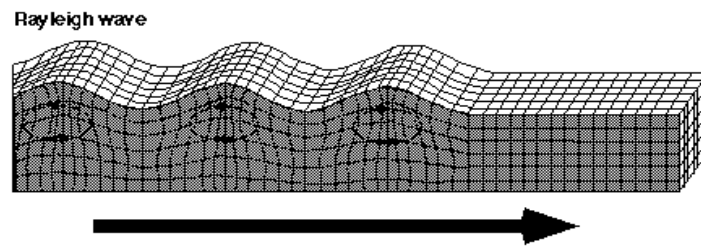


Gambar 2.4 Gelombang Love

b. Gelombang *Rayleigh*

Gelombang permukaan *rayleigh* adalah gelombang dengan pergerakan partikelnya kombinasi dengan gerakan partikel gelombang P dan gelombang S.

Permukaan material dengan arah pergerakan partikelnya berbentuk *elips*.



Gambar 2.5 Gelombang Rayleigh

2.3 Gempa Vulkanik

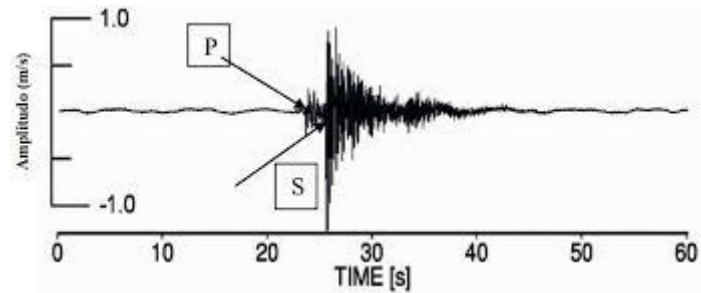
Gempa Vulkanik adalah gempa yang diakibatkan adanya pergerakan atau aktivitas magma yang berada di bawah permukaan gunungapi yang mendapatkan tekanan, sehingga terdapat pelepasan energi secara tiba – tiba sehingga dapat menimbulkan getaran tanah. Gempa vulkanik terjadi karena adanya proses dinamik dari magma dan cairan yang bersifat *hidrotermal*, sehingga dapat dipakai sebagai tanda awal peningkatan aktivitas Gunungapi (Dawid & Pasau, n.d.).

2.3.1 Klasifikasi Gempa Vulkanik

Adapun klasifikasi dari Gempa Vulkanik:

a. Gempa Vulkanik Dalam (Tipe A atau VTA)

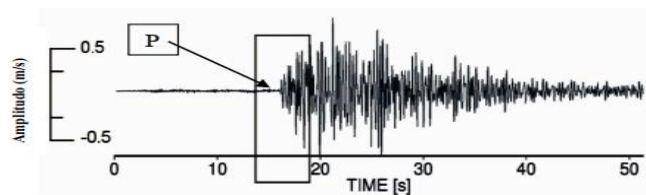
Sumber pada Gempa Vulkanik Dalam terletak di bawah gunungapi pada kedalaman lebih dari 2 km, yang ada pada gunungapi yang aktif. Gempa dengan tipe ini disebabkan karena adanya magma yang naik ke permukaan disertai dengan adanya retakan atau rekahan (Dawid & Pasau, n.d.). Gempa ini memiliki ciri utama, memiliki gelombang P dan S yang mudah digunakan dimana selisih waktu pada gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S) mencapai 5 detik.



Gambar 2.6 Contoh rekaman seismik gempa vulkanik dalam (VTA)

b. Gempa Vulkanik Dangkal (Tipe B atau VTB)

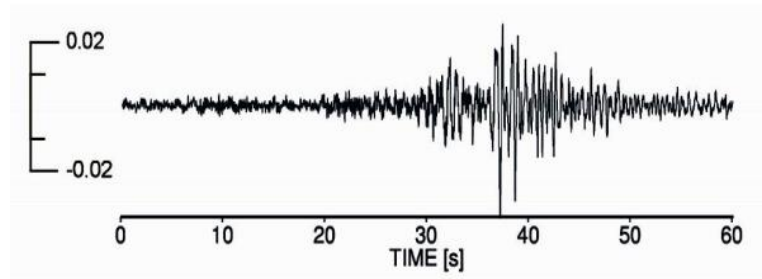
Gempa Vulkanik Dangkal atau VTB adalah gempa yang terjadi pada kedalaman yang kurang dari 2 km serta berasal dari kawah yang masih aktif. Gempa vulkanik tipe B memiliki ciri yaitu waktu tiba gelombang S yang kurang jelas dan bentuknya sama seperti kapak. Untuk selisih waktu tiba antara gelombang P dan gelombang S yaitu kurang dari 1 detik. Dengan nilai magnitude yang kecil (Dawid & Pasau, n.d.)



Gambar 2.7 Contoh rekaman seismik gempa vulkanik dangkal (VTB)

c. Gempa *Low Frequency* (LF)

Gempa LF atau *Low Frequency* adalah gempa yang tidak menunjukkan adanya kedatangan gelombang S, serta terjadi pada kedalaman kurang dari 2 km (dangkal). Gempa LF dapat terjadi karena adanya resonansi crack ketika magma naik ke permukaan (Chouet, 1996).



Gambar 2.8 Contoh rekaman seismik gempa LF

d. Gempa *Hybrid*

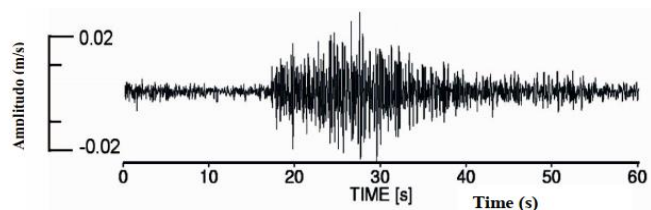
Gempa Hybrid adalah gempa gabungan dari gempa vulkanik dan gempa low frequency. Gempa hybrid memiliki frekuensi yang tinggi pada awal sinyal.



Gambar 2.9 Contoh rekaman seismik gempa hybrid

e. Gempa *Multi-phases (MP)*

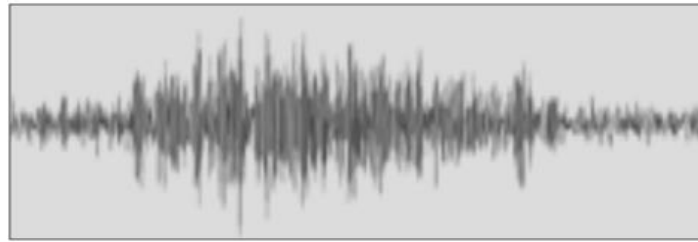
Gempa *Multi-phases* atau Gempa MP adalah gempa yang diakibatkan karena adanya pembentukan kubah lava yang terjadi di puncak kubah lava. Saat kubah lava bertumbuh dengan cepat, maka intensitas gempanya akan semakin tinggi atau menjadi sering terjadi.



Gambar 2.10 Contoh rekaman seismik gempa MP

f. Gempa *Hembusan*

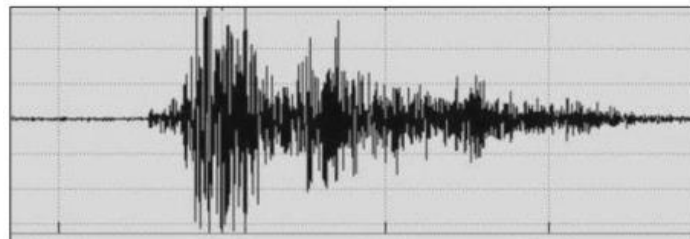
Gempa Hembusan adalah gempa yang mempunyai frekuensi tinggi, dan ditandai adanya hembusan dari kawah gunungapi.



Gambar 2.11 Contoh rekaman seismik gempa hembusan

g. Gempa Guguran

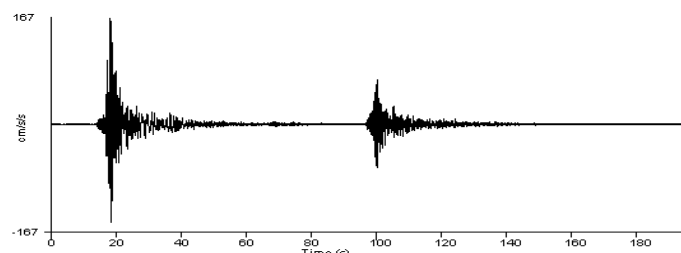
Gempa Guguran adalah gempa yang terjadi akibat gugur dari sebagian kubah lava, kejadiannya terjadi dalam beberapa menit.



Gambar 2.12 Contoh rekaman seismik gempa guguran

h. Gempa Letusan

Gempa Letusan adalah gempa yang terjadi akibat letusan atau erupsi gunungapi yang pada umumnya terjadi di kawah. Berdasarkan hasil pengamatan seismik gempa letusan dapat dikatakan bahwa memiliki gerakan awal adalah *push-up* atau gerakan ke atas, dapat dikatakan pula gempa yang diakibatkan karena sumber tunggal yang positif (Dawid & Pasau, n.d.).

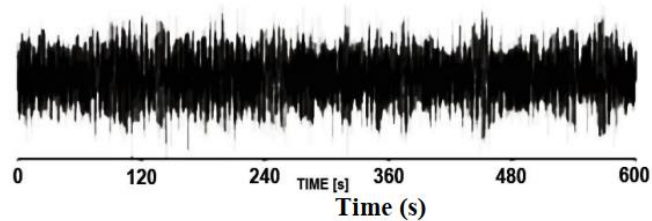


Gambar 2.13 Contoh rekaman seismik gempa letusan

i. Gempa Tremor

Gempa Tremor adalah gempa yang akan terus terjadi secara terus – menerus selama masih ada aktivitas dari gunungapi. Durasi dari Gempa Tremor terjadi

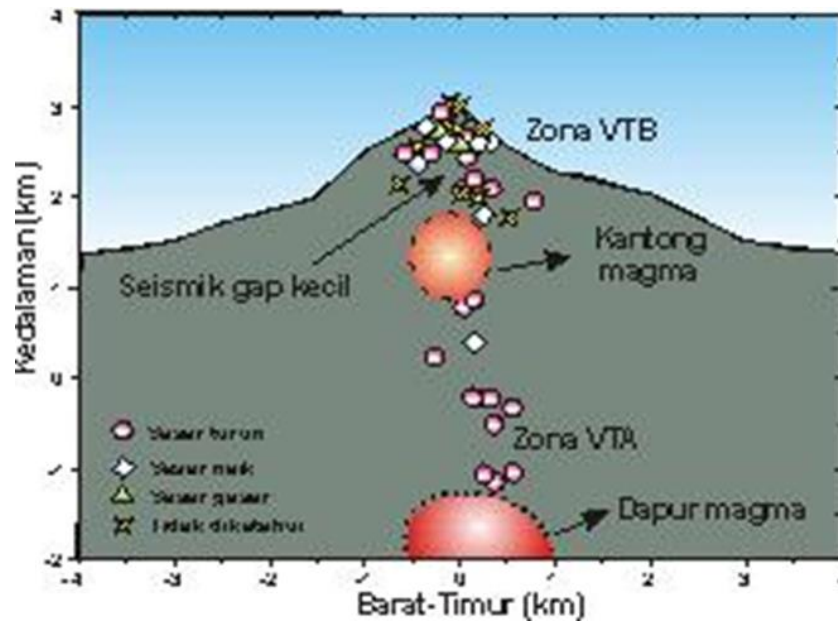
dalam kurun waktu beberapa menit sampai beberapa jam. Gempa Tremor menandakan adanya pergerakan magma menuju ke permukaan. Sinyal gempa ini tidak dapat menunjukkan perbedaan antara gelombang P dan S.



Gambar 2.14 Contoh rekaman seismik gempa tremor

2.3.2 Karakteristik Vulkanik Gunung Merapi

Didasarkan pada data kegempaan Merapi, bahwa gempa vulkanik terjadi tidak jauh dari puncak ke bawah secara vertikal dan tidak tersebar luas. Dari data BPPTKG, pada kedalaman 1,5-2 km di bawah puncak tidak dijumpai adanya hiposenter gempa begitu pula pada kedalaman >5 km. Gempa vulkanik tektonik memerlukan medium yang solid. Zona-zona yang tidak terdapat hiposenter diperkirakan merupakan zona lunak (ductile) karena adanya kehadiran magma. Zona lembek pada kedalaman 1,5-2,5 km diinterpretasikan sebagai kantong magma. Luehr dkk. (2013) membuktikan dengan melakukan seismik topografi dan didapatkan anomali kecepatan rendah pada kedalaman 5 km. Model sederhana bawah permukaan Gunung Merapi ditunjukkan pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15 Model Sederhana Bawah permukaan Gunung Merapi

Di antara dua zona gempa VTA (vulkanik tektonik tipe A) dan VTB (vulkanik tektonik tipe B) diperkirakan sebagai zona aseismik. Zona aseismik yaitu tidak terjadinya gempa di lokasi ini sehingga mengarahkan kepada dugaan atau asumsi keberadaan material yang lebih lunak di antara zona material yang keras. Untuk material yang serupa sifat yang lebih lunak ini berimplikasi suhu yang lebih tinggi. Penghitungan hiposenter dilakukan pada gempa VTA dan VTB dengan pembacaan waktu tiba gelombang P dan S pada seismogram digital. Gempa-gempa yang muncul pada kedalaman 0-1,5 dinamakan gempa vulkanik dangkal (VTB), sedangkan gempa gempa yang muncul pada kedalaman 2,5-5 km merupakan gempa vulkanik dalam (VTA) (Ratdomopurbo, 2000).

2.4 Parameter Fisis Gelombang Gempa

Adapun parameter fisis gelombang gempa bumi, yaitu sebagai berikut (Hidayati, 2010):

- (S-P), adalah selisih waktu anatar gelombang P dan gelombang S pada seismograf yang dinyatakan dalam satuan detik (s).

- Durasi gempa, adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu gelombang gempa dari saat waktu tiba gelombang gempa berhenti yang dinyatakan dalam satuan detik (s).
- Waktu terjadinya gempa (t_0) adalah waktu tiba gelombang P pada seismograf dikurangi hasil perhitungan waktu yang diperlukan oleh getaran untuk dapat mencapai seismograf dari sumber.

2.5 Hiposenter

Hiposenter merupakan pusat terjadinya kejadian gempa yang pada umumnya diasumsikan sebagai sebuah titik, namun pada kenyataannya hiposenter merupakan sebuah bidang yang luasnya bergantung pada besaran energi yang dilepaskan dan dinyatakan dalam lintang – bujur – elevasi (Setiawan, 2017). Hiposenter sendiri merupakan fokus gempa atau pusat gempa yang berada di dalam bumi, hiposenter dapat dicari melalui gelombang seismik yang didapatkan dari gempa vulkanik (Bulo & Hendrawanto, 2020). Hiposenter pada gempa letusan gunungapi mengarah pada gempa yang disebabkan akibat adanya aktivitas vulkanik.

Aktivitas Vulkanik ialah segala fenomena yang berhubungan dengan pergerakan magma yang keluar menuju permukaan bumi melalui rekahan dalam kerak bumi berupa gunungapi. Magma dapat bergerak naik karena memiliki suhu yang tinggi dan juga mengandung gas – gas yang memiliki cukup energi untuk dapat mendorong batuan yang berada di atasnya (Fatma, 2016).

2.6 Metode Geiger's with Adaptive Damping (GAD)

Dalam penentuan hiposenter salah satu metode yang dapat digunakan adalah Metode *Geiger's Adaptive Damping* (GAD). Metode Geiger pertama kali dikembangkan oleh geiger tahun 1910 yang bertujuan untuk menentukan letak

hiposenter gempa dengan mempertimbangkan parameter model awalnya (Arimuko et al., 2019). Metode ini mengasumsikan bahwa bumi terdiri dari lapisan yang homogen, sehingga waktu tiba gelombang dapat dihitung untuk setiap lapisannya karena gelombang tersebut dipantulkan atau dibiaskan.

Penentuan hiposenter dengan metode ini dilakukan dengan perangkat lunak *Geiger's with Adaptive Damping*, yang mana pada program ini emmbutuhkan data input berupa data waktu tiba (*Arrival Time*) gelombang P dan S, koordinat stasiun, dan model kecepatan gelombang tiap lapisan. Prinsip kerja dari metode GAD adalah menghitung selisih antara waktu pengamatan (*observed*) dan waktu perhitungan (*calculated*). Persamaan perhitungan selisih tersebut adalah sebagai berikut (Madrinovella et al., 2012):

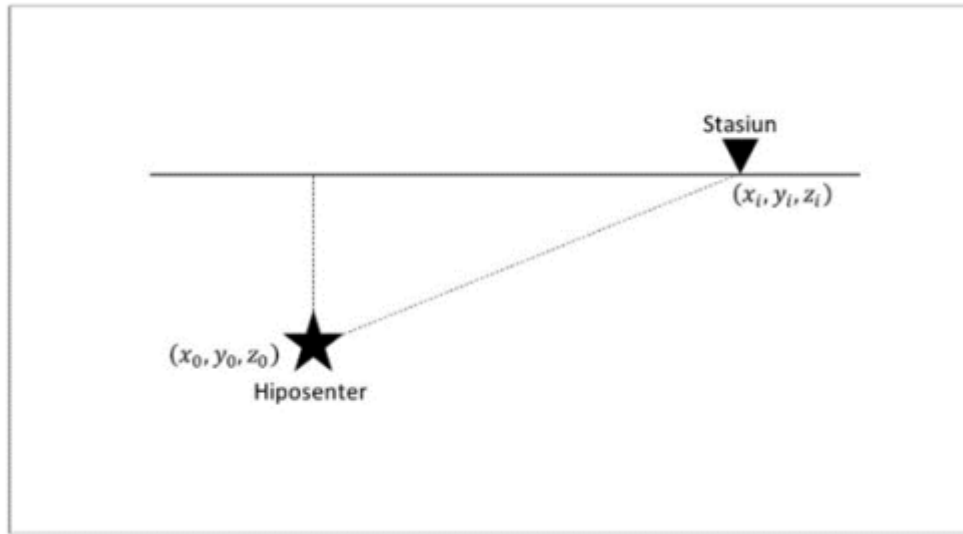
$$t = t_{obs}^i - t_{cal}^i \quad (2.1)$$

Keterangan:

t : Selisih antara waktu observasi dan waktu perhitungan pada stasiun ke-i

t_{obs}^i : Waktu tempuh gelombang seismik pada stasiun ke-i (x_i , y_i , z_i) dari hiposenter.

t_{cal}^i : Waktu tempuh yang dihitung berdasarkan model kecepatan bawah permukaan



Gambar 2.16 Visualisasi sederhana Metode Geiger's

Gambar 2.16 adalah visualisasi sederhana Metode Geiger's yang menggambarkan model bumi homogen sehingga lintasan seismik dapat diasumsikan sebagai garis lurus. Dari persamaan 2.1 untuk memberikan koordinat spasial dengan koordinat kartesian, maka:

$$t_{res} = t_{obs}^i - t_{cal}^i = t_{obs}^i - (t_{tra}^i - t_0) \quad (2.2)$$

Dimana:

$$t_{cal}^i = t_{tra}^i(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0) + t_0 = t_{tra}^i + t_0 \quad (2.3)$$

Untuk fungsi waktu tiba gelombang yang menggambarkan model kecepatan pada lapisan homogen ialah:

$$t_{tra}^i = \frac{1}{v} \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + z_0^2} \quad (2.4)$$

Dasar perhitungan pada metode Geiger yaitu mencari nilai residual terkecil yang merupakan hasil dari turunan parsial antara waktu terhadap posisi dari setiap sumbu koordinat kartesian, juga perbandingan antara waktu tempuh pengamatan dengan waktu tempuh perhitungan. Berikut merupakan persamaan yang

menunjukkan turunan parsial dari komponen – komponen tersebut (Arimuko et al., 2019):

$$t_{res} = \frac{\partial t^{cal}}{\partial x_i} \Delta x + \frac{\partial t^{cal}}{\partial y_i} \Delta y + \frac{\partial t^{cal}}{\partial z_i} \Delta z + \Delta t \quad (2.5)$$

Dimana:

$$\frac{\partial t^{cal}}{\partial x_i}, \frac{\partial t^{cal}}{\partial y_i}, \frac{\partial t^{cal}}{\partial z_i} = \text{turunan parsial dari waktu tempuh perhitungan } (t_{cal})$$

terhadap lokasi hiposenter awal.

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t = \text{perubahan lokasi hiposenter dan waktu tiba}$$

$$t_{res} = \text{selisih antara hasil pengamatan dan hasil perhitungan pada stasiun ke-} i$$

Didapatkan solusi matriks dari persamaan diatas yang menunjukkan hubungan antara data dan model:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1^{tra}}{\partial x_0} & \frac{\partial t_1^{tra}}{\partial y_0} & \frac{\partial t_1^{tra}}{\partial z_0} & 1 \\ \frac{\partial t_2^{tra}}{\partial x_0} & \frac{\partial t_2^{tra}}{\partial y_0} & \frac{\partial t_2^{tra}}{\partial z_0} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial x_0} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial y_0} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial z_0} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.7 Metode *NonLinLoc* (NLLoc)

Penentuan lokasi hiposenter menggunakan metode non linier dengan program NonLinLoc (NLLoc) (Lomax et al., 2000). NonLinLoc adalah algoritma lokasi pencarian global non-linear. Dalam medium yang homogen kecepatan gelombang v didefinisikan sebagai $u = 1/v$, waktu kedatangan adalah t_{obs} , titik pengamatan $(x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$, dan titik asal atau lokasi sumber (x_0, y_0, z_0) . Berikut ini adalah persamaannya (Lomax et al., n.d.):

$$t_{\text{obs}} = t_0 + u \left[(x_{\text{obs}} - x_0)^2 + (y_{\text{obs}} - y_0)^2 + (z_{\text{obs}} - z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan posisi spasial dari sumber menghasilkan perubahan t_{obs} nonlinier, ketika kecepatan v karena u tidak homogen dalam ruang, waktu kedatangan di titik pengamatan menjadi:

$$t_{\text{obs}} = t_0 + \int_{\mathbf{r}_0(s)} u(\mathbf{r}_0) ds \quad (2.8)$$

Dimana, untuk $\mathbf{r}_0(s)$ menunjukkan titik pada jarak s sepanjang lintasan $\mathbf{r}_0$ antara lokasi sumber dan penerima. Persamaan 2.7 adalah persamaan yang memiliki lintasan yang lurus dari sumber ke penerima. Persamaan 2.8 bersifat nonlinier karena perubahan pada lokasi sumber akan mengubah lintasan yang dihitung yang mana direpresentasikan oleh integral. Oleh karena itu, penentuan lokasi gempa yang melibatkan waktu tiba ke dalam lokasi spasial dan waktu asal, pada dasarnya adalah masalah nonlinier.

Dalam menggambarkan pendekatan probabilistik untuk mendapatkan lokasi sumber dengan mempertimbangkan berbagai ketidakpastian pengukuran, data dan model. Ditunjukkan d_{obs} sebagai data pengukuran (catatan waktu kedatangan gelombang), $p(d)$ adalah distribusi probabilitas yang menggambarkan seberapa mungkin data observasi tersebar dalam ruang data. Parameter Sumber ($\mathbf{m}$) sebagai lokasi yang dicari, dan Distribusi Prior $p(\mathbf{m})$ adalah pengetahuan awal lokasi gempa sebelum menganalisis data, dan $(F(d, \mathbf{m}))$ adalah hubungan parameter sumber dengan data yang diprediksi.

$$F(\mathbf{d}, \mathbf{m}) = \delta[\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})] \mu(\mathbf{m}) \quad (2.9)$$

Penyelesaian masalah lokasi gempa dapat ditentukan dengan menggabungkan informasi dalam data yang diamati $p(d)$, prior pdf ($p(\mathbf{m})$) dan prediksi data yang

diamati $F(d,m)$, sehingga didapatkan probabilitas yang disimbolkan Q yang mana menggambarkan keadaan informasi posterior (pasca – eksperimental) yaitu:

$$Q(d, m) = k \frac{p(d)F(d, m)p(m)}{\mu(d, m)} \quad (2.10)$$

Dimana, konstanta k menormalkan Q menjadi integral satuan atas $D \times M$ dan $\mu(d,m)$ adalah distribusi homogen atas data d dan parameter m . persamaan 2.10 berisi semua informasi (pengetahuan awal, data dan fisika) yang dapat mempengaruhi lokasi m , dan mendefinisikan pdf antara parameter m dan data d . kemudian posterior dari informasi tentang parameter lokasi m diberikan dengan mengintegrasikan data d untuk mendapatkan pdf posterior marginal,

$$Q(m) = k p(m) \int_D \frac{p(d)F(d, m)}{\mu(d, m)} dd \quad (2.11)$$

Persamaan 2.11 adalah solusi umum dan probabilistik untuk menggambarkan ketidakpastian di lokasi kejadian m dengan semua informasi yang tersedia. Integral dalam persamaan 2.11 biasanya disebut sebagai fungsi likelihood $L(m)$, yang memberikan ukuran (tidak dinormalisasi) tentang seberapa baik model m dalam menunjukkan data yang diamati $p(d)$. $p(d)$ untuk data yang diamati sering digambarkan dengan distribusi Gaussian, yang dideskripsikan dengan rata – rata (d_0) dan matriks kovariansi (C_d). dengan mengasumsikan bahwa ketidakpastian dalam F yang berhubungan dengan d dan m dapat diabaikan, maka hasil dari F pada persamaan 2.9 dapat diabaikan. Biasanya juga diasumsikan bahwa d dan m adalah independen, maka $\mu(d,m)$ dapat ditulis $\mu(d) \mu(m)$; $\mu(d)$ yang biasanya dianggap konstan. Dengan penyederhanaan ini didapatkan fungsi kemungkinan (tidak dinormalisasi) ditunjukkan:

$$L(\mathbf{m}) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\mathbf{d}_0 - \mathbf{f}(\mathbf{m})]^T \mathbf{C}_d^{-1} [\mathbf{d}_0 - \mathbf{f}(\mathbf{m})] \right\} \quad (2.12)$$

Dengan penyederhanaan tersebut, waktu asal maksimum likelihood, t_0 dapat ditentukan secara analitis dari rata – rata waktu kedatangan yang diamati dan waktu perjalanan yang diprediksi. Jika waktu kedatangan yang diamati dan waktu yang diprediksi tidak berkorelasi maka akan diperoleh fungsi likelihood,

$$L(\mathbf{x}) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_i \frac{[T_i^o - T_i^c(\mathbf{x})]^2}{\sigma_i^2} \right\} \quad (2.13)$$

Dimana, $\mathbf{x}$ adalah bagian spasial dari $\mathbf{m}$, T_i^o adalah waktu tempuh yang diamati, T_i^c adalah waktu tempuh yang dihitung dari sumber ke stasiun ke-I (mempresentasikan waktu tempuh dan tidak mempresentasikan bukan waktu tiba), bagian dari $\mathbf{F}(\mathbf{m})$ dan σ_i meringkas standar deviasi ketidakpastian yang dalam T_i^o dan T_i^c . Meskipun tidak dinormalisasi, $L(\mathbf{x})$ cukup untuk memberikan probabilitas relatif dari setiap lokasi $\mathbf{m}$ sebagai estimasi terbaik dari lokasi kejadian dengan data pengukuran yang tersedia.

Dalam praktik mengintegrasikan seluruh $\mathbf{D} \times \mathbf{M}$ untuk menemukan konstanta normalisasi k pada persamaan 2.11 sering kali sulit dilakukan secara komputasi, maka hasil kali antara informasi lokasi spasial sebelumnya $p(\mathbf{x})$ (yaitu bagian spasial dari $p(\mathbf{m})$) dengan kemungkinan yang tidak dinormalkan $L(\mathbf{x})$ biasanya diambil sebagai fungsi tujuan untuk inversi dan pencarian pada algoritma lokasi pencarian langsung. Jika $L(\mathbf{x})$ ditentukan di seluruh pdf prior $p(\mathbf{x})$ melalui pencarian global, maka persamaan 2.11 dapat dinormalisasi kira – kira setelah lokasi.

Fungsi likelihood pada persamaan 2.11 sepenuhnya ditentukan oleh proses kesalahan probabilistik yang terlibat, namun seringkali dibutuhkan untuk mengubah perkiraan yang digunakan dalam penurunan persamaan 2.12 dan 2.13

dari persamaan 2.11 untuk menghilangkan bias atau ketidakstabilan dalam solusi. Perkiraan pada persamaan 2.12 menggunakan eksponensial dari fungsi misfit fungsi L2 (istilah dalam tanda kurung $\{\}$ pada persamaan 2.12 dan 2.13) untuk menggambarkan pdf dari variasi kesalahan data, namun karena data yang digunakan untuk lokasi sering mengandung *outlier* (gangguan atau kesalahan), maka sering dianggap bahwa fungsi L1 atau fungsi Lp ($p < 2.0$) lebih tepat. Dimana fungsi Lp $|x| = \sqrt[p]{\sum |x|^p}$. masalah lokasi gempa dapat diformulasikan dengan fungsi Lp atau fungsi likelihood lainnya seperti persamaan dibawah, dapat diselesaikan dengan cukup mudah dengan pencarian langsung, daripada metode linier, tidak memerlukan penentuan turunan parsial dari fungsi likelihood atau fungsi obyektif sehubungan dengan lokasi sumber gempa. Sebuah alternatif untuk fungsi Lp-likelihood yang sangat kuat dengan adanya kesalahan maka diberikan formulasi equal differential time (EDT),

$$L(\mathbf{x}) = \left[\sum_{a,b} \frac{1}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}} \cdot \exp \left(- \frac{\{ [T_a^o - T_b^o] - [TT_a^c(\mathbf{x}) - TT_b^c(\mathbf{x})] \}^2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \right) \right]^N \quad (2.13)$$

Dimana, $\mathbf{x}$ adalah bagian spasial dari $\mathbf{m}$, T_a^o dan T_b^o adalah waktu tiba yang diamati dan TT_a^c dan TT_b^c adalah waktu tempuh yang dihitung untuk dua pengamatan a dan b, jumlah tersebut didapat dari keseluruhan sampel pengamatan dan N adalah jumlah total pengamatan. Standar deviasi σ_a dan σ_b menjumlahkan ketidakpastian yang ditetapkan pada waktu tiba yang diamati dan waktu tempuh yang dihitung, dimana diasumsikan bahwa waktu yang diamati dan waktu yang

dihitung tidak berkorelasi.

Pada persamaan 2.13 suku pertama dan kedua dalam tanda kurung pada eksponen, masing – masing adalah perbedaan antara waktu tiba yang diamati dan perbedaan antara waktu tempuh yang dihitung. Eksponen ialah selisih antara kedua suku tersebut, sehingga eksponensial memiliki nilai maks 1 yang terjadi pada titik – titik x dimana dua perbedaanya sama (maka dari itu dinamakan “waktu diferensial yang sama”) secara umum himpunan x dimana eksponen tidak bernilai nol membentuk permukaan lengkung dalam ruang 3D. karena penjumlahan atas pengamatan berada di luar eksponensial, lokasi EDT pdf memiliki nilai terbesar untuk titik x dimana sebagian besar pengamatan terpenuhi dan jauh lebih tidak sensitif terhadap kesalahan dibandingkan dengan fungsi L_p . Pada fungsi likelihood EDT $L(x)$ tidak membutuhkan waktu awal t_0 sehingga dalam penggunaan metode ini tidak memerlukan data yang akurat dalam penentuan hiposenter.

Solusi lengkap untuk penentuan hiposenter secara probabilistik adalah fungsi kepadatan probabilistik posterior (pdf posterior). Fungsi ini memberikan gambaran lengkap tentang ketidakpastian dalam menentukan parameter lokasi gempa (m). hal ini dapat berupa beberapa solusi “optimal-lokal” ini berarti dalam distribusi probabilitas posterior bisa ditemukan beberapa titik yang memiliki nilai probabilitas tinggi, misalnya, $Q(m)$ atau $p(x)$ $L(x)$ dapat memiliki beberapa fungsi dengan probabilitas kompleks karena banyak faktor yang mempengaruhi.

BAB III

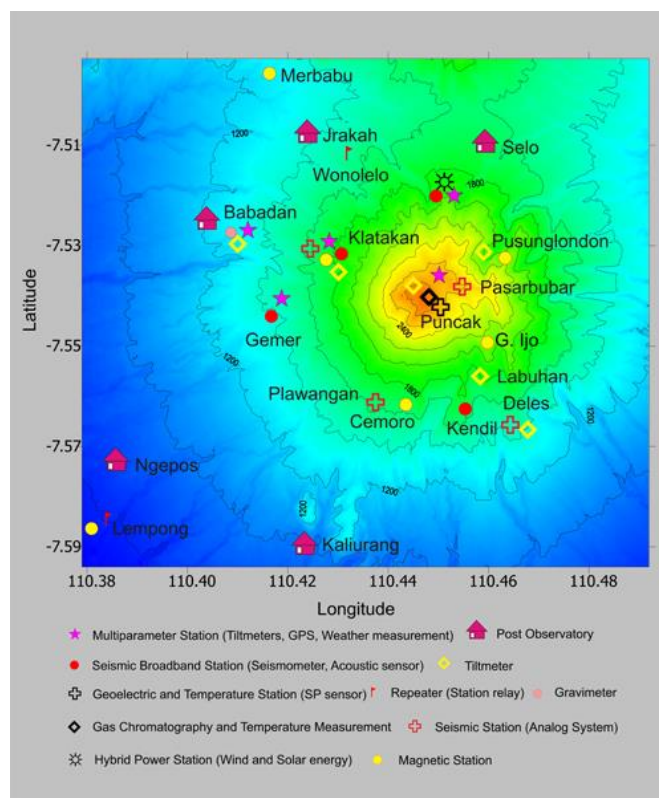
METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam jenis penelitian kuantitatif dengan menggunakan data numerik yang dapat diukur dan dianalisis secara statistik. data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder dari rekaman seismogram digital pada *Software* SeisComp3 serta informasi koordinat hiposenter *Web Cendana15* yang menggunakan metode *NonLinLoc* milik BPPTKG.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dimulai pada bulan September - Oktober 2024, bertempat di BPPTKG (Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi) Jl. Cendana No.15, Semaki, Kec. Umbulharjo, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta 55166.



Gambar 3.1 Lokasi stasiun pengamatan gunung merapi

Pada penelitian ini digunakan 10 data koordinat stasiun diantaranya stasiun MEPAS (Pasarbubar), MEPUS (Pusunglondon), MELAB (Labuhan), MEJRO (Jrakah), MEIJO (gunungijo), MEGRA (Grawah), MEPLA (Plawangan), MEKLA (Klatakan), MEKLS, dan MEMBB (Merbabu).

3.3 Alat dan Data Penelitian

3.3.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu berupa perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*).

Tabel 3.1 Alat Penelitian

No	Alat dan Bahan	Jumlah
1	Laptop	1 buah
2	Komputer	1 buah
3	Printer	1 buah
4	<i>Software SeisComp3</i>	1 set
5	<i>Cendana15</i>	1 set
6	<i>Software GAD</i>	1 set
7	<i>Software Notepad</i>	1 set
8	Peta DEM Merapi	1 set
9	<i>Software MATLAB R2022a</i>	1 set
10	<i>Microsoft Excel 2021</i>	1 set
11	<i>Microsoft Office Word 2021</i>	1 set

- **Sumber data**

Data yang digunakan dalam penelitian yaitu data sekunder yang diperoleh dari rekaman seismogram digital milik BPPTKG yang diakses melalui *Software*

SeisComp3 dan *Web Cendana15* dengan periode 01 – 31 Maret 2023.

- **Perangkat keras (*hardware*)**

Adapun Perangkat Keras (*Hardware*) yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Laptop

Digunakan untuk proses pengolahan data dan penulisan Proposal Skripsi.

- b. Komputer

Digunakan untuk proses klasifikasi dan pengolahan data.

- c. Printer

Digunakan untuk mencetak Proposal Skripsi dan keperluan lainnya terkait keperluan Proposal Skripsi.

- **Perangkat lunak (*software*)**

Perangkat Lunak (*Software*) yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- a. *Software* SeisComp3

Software SeisComp3 digunakan untuk *picking* data gempa dengan menentukan waktu awal tiba gelombang P dan gelombang S, memberikan informasi tentang gelombang seismik yang terekam dari setiap stasiun perekam, polaritas gelombang P dan S, serta keterangan “I” (*Impulsif*) atau “E” (*Emergent*).

- b. *Cendana15*

Cendana15 adalah web yang ada di BPPTKG untuk membaca data waktu gempa vulkanik dangkal (VTB) dan gempa vulkanik dalam (VTA) dari periode 01 – 31 Maret 2023, untuk dibandingkan dengan data waktu gempa di *Software* SeisComp3.

- c. *Software* MATLAB

Software MATLAB digunakan untuk *plotting* koordinat hiposenter pada peta kontur dan 3D gunung Merapi serta peta penampang Utara – Selatan, Barat – Timur. Koordinat hiposenter yang digunakan ialah koordinat yang diperoleh dari *Software* GAD dan *Web Cendana*15 BPPTKG.

d. *Software* Notepad

Software Notepad digunakan untuk input data *Arrival.dat*, *Station.dat*, dan *Velocity.dat* juga menampilkan data hasil *run* pada *Software* GAD berupa *Result.dat* yang berisikan koordinat hiposenter.

e. Peta DEM Merapi

Digunakan untuk membuat peta 2D (kontur), penampang utara – selatan, penampang barat – timur dan peta 3D. Untuk visualisasi gunung merapi beserta sebaran hiposenternya.

f. *Software* GAD

Software GAD digunakan untuk mendapatkan koordinat hiposenter. data yang diperlukan untuk menentukan koordinat hiposenter tersebut yaitu data stasiun, kecepatan dan waktu tiba (Nishi, K, 2005).

g. *Microsoft Excel 2021*

Microsoft Excel 2021 digunakan untuk membuat tabel serta mengolah data, dan untuk file input pada *Software* MATLAB.

h. *Microsoft Office Word 2021*

Microsoft Word 2021 digunakan untuk menulis serta menyusun Skripsi.

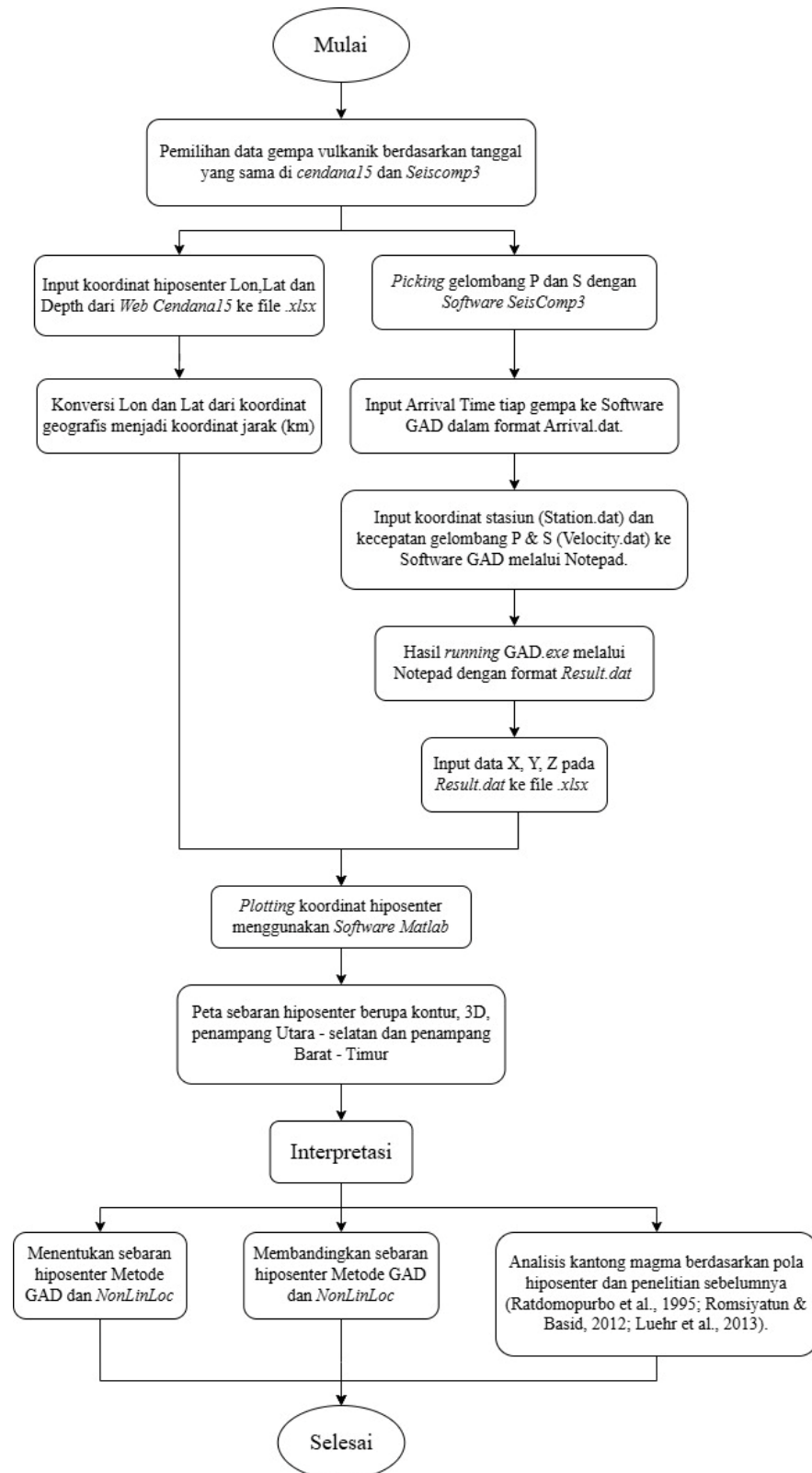
3.3.2 Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa rekaman aktivitas seismik Gunung Merapi periode 01 – 31 Maret 2023. Data diperoleh dari dua sumber yaitu,

seismogram digital dari *Software* SeisComp3 yang akan diolah menggunakan metode *Geiger's with Adaptive Damping* (GAD), dan data koordinat hiposenter dari *Web Cendana15* yang telah diolah menggunakan metode *NonLinLoc*. Kedua hasil pengolahan data tersebut akan dibandingkan untuk mengetahui tingkat akurasi penentuan hiposenter gempa vulkanik gunung merapi.

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun tahapan dalam pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.4.1 Pengumpulan data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan dua cara yaitu, dari *Software* SeisComp3 dilakukan picking gelombang P dan S pada data seismogram. Data picking tersebut kemudian diolah ke dalam beberapa format yang diperlukan untuk metode GAD, yaitu data *arrival time* dalam format *Arrival.dat*, data koordinat dan nama stasiun dalam format *Station.dat*, serta data kecepatan gelombang P dan S dalam format *Velocity.dat*. Untuk data kedua yaitu dengan mengakses data koordinat hiposenter melalui *Web Cendana15* (cendana15.com) yang memuat hasil pengolahan data menggunakan metode *NonLinLoc*. Data dari kedua sumber tersebut diambil pada rentang waktu yang sama yaitu periode 01 -31 Maret 2023. Keseluruhan proses pengumpulan data ini dilakukan untuk memastikan ketersediaan data yang akan digunakan dalam analisis perbandingan penentuan hiposenter menggunakan kedua metode tersebut.

3.4.2 Pengolahan data pada *Software* GAD

Tahap awal pengolahan data yaitu pada SeisComp3 dimana dilakukan *picking* gelombang P dan gelombang S untuk setiap gempa. Dari proses *picking* per gempa akan ditampilkan data *Arrival time*. Data tersebut akan diinput pada *Software* GAD melalui Notepad dengan format *Arrival.dat*, untuk data koordinat stasiun dalam format *Station.dat*. Dan data kecepatan gelombang P dan S dalam format *Velocity.dat*. Data model kecepatan 1D yang digunakan adalah wilayah gunung merapi yang terdiri dari 4 lapisan dengan karakteristik kecepatan gelombang P dan S yang berbeda – beda. Untuk proses lanjutan dilakukan *running* GAD.exe sehingga dihasilkan data koordinat hiposenter dengan format *Result.dat*.

Data X, Y, Z pada *Result.dat* diinput ke file *.xlsx* yang nantinya digunakan untuk data *plotting* hiposenter pada *Software* MATLAB.

3.4.3 Pengolahan data *Cendana15*

Dilakukan akses data koordinat hiposenter dengan periode 01 – 31 Maret 2023 di *Web Cendana15* (*cendana15.com*) yang memuat hasil pengolahan data menggunakan metode *NonLinLoc*. Dilakukan input koordinat Longitude (X), Latitude (Y), Depth (Z) ke *Software Excel*. Untuk pengolahan lanjutan dilakukan konversi dari koordinat geografis menjadi koordinat jarak dalam kilometer pada *Software Excel* dengan cara setiap koordinat hiposenter dikurangkan dengan koordinat puncak gunung merapi, setelah itu hasil tersebut dikalikan dengan 110 (nilai *aproksimasi*).

3.4.4 Pengolahan data pada MATLAB

Tahap terakhir dalam proses pengolahan data yaitu dilakukan *plotting* koordinat hiposenter yang digabungkan dengan data DEM (*Digital Elevation Model*) Merapi menggunakan *Software* MATLAB, sehingga dihasilkan data visualisasi dalam bentuk peta kontur, penampang utara – selatan dan barat – timur, serta peta 3D untuk interpretasi.

3.4.5 Interpretasi data

Dilakukan interpretasi terhadap hasil sebaran hiposenter menggunakan metode GAD dan *NonLinLoc*, serta analisis kantong magma yang diasumsikan berdasarkan dari pola hiposenter serta penelitian terdahulu (Ratdomopurbo et al., 1995; Romsiyatun & Basid, 2012; Luehr et al., 2013). Hasil sebaran hiposenter dari kedua metode ini dibandingkan berdasarkan perbedaan posisi latitude, longitude,

dan kedalaman yang terjadi pada periode yang sama yaitu pada periode 01 – 31 Maret 2023.

3.5 Rencana Analisis

Sumber data yang diperoleh dalam penelitian ini terdiri dari dua sumber, yaitu *Software* SeisComp3 dan *Web Cendana15*. Pertama, data hasil picking gempa mencakup waktu kedatangan (*arrival time*) untuk periode 01–31 Maret 2023, model kecepatan gelombang P dan S, serta koordinat stasiun perekam gempa. Ketiga data tersebut diperoleh dari *Software* SeisComp3, yang digunakan sebagai input untuk *Software* GAD. Dari proses *running* GAD.exe, dihasilkan data koordinat hiposenter yang disimpan dalam file *Result.dat*. Kedua, sumber data dari *Web Cendana15* (*cendana15.com*) mencakup koordinat hiposenter gempa vulkanik dalam (VTA) dan gempa vulkanik dangkal (VTB) berupa longitude (X), latitude (Y), depth (Z), serta Magnitude. Digunakan *Software Excel* untuk konversi koordinat geografis menjadi koordinat jarak dalam satuan kilometer yang nantinya digunakan untuk input data pada *Software* MATLAB.

3.5.1 Analisis data hasil *picking* gempa

Data yang diperoleh pertama adalah data *arrival time*, yaitu hasil picking pada *Software* SeisComp3 untuk periode 01 – 31 Maret 2023. Data ini digunakan sebagai input pada *Software* GAD dan akan dianalisis dalam format *Arrival.dat* melalui Notepad.

Tabel 3.2 Contoh arrival time pada *SeisComp3*

Used	Status	Phase	Polarity	Net	Sta	Loc/Cha	Dis (km)	Az (°)	Time (WIB)	+/- (s)
T	M			VG						
T	M			VG						
T	M			VG						
T	M			VG						

Dari tabel di atas diketahui beberapa kolom yang memberikan informasi yaitu:

- “Used” : Menunjukkan bahwa data gempa tersebut digunakan atau tidak. Huruf “T” (True atau Terpakai). Jika terdapat data yang tidak digunakan ditandai dengan huruf “F” (*False*) atau “N” (*Not Used*).
- “Status” : Menunjukkan data diolah secara manual atau otomatis. Huruf “M” (Manual) menunjukkan bahwa data telah diproses secara langsung. Huruf “A” (*Automatic*) menunjukkan data lokasi default dari sistem SeisComp3 dengan menggunakan algoritma *picking* sesuai dengan batas tertentu untuk mendeteksi sinyal seismik.
- “Phase” : Menunjukkan fase gelombang P (Primer) atau S (Sekunder). Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.
- “Polarity” : Menunjukkan arah pergerakan gelombang awal. Bertanda (+) jika gelombang awal ke atas, sedangkan akan bertanda (-) jika gelombang awal ke bawah. Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.
- “Net” : Menunjukkan kode seismometer, bertuliskan “VG” adalah kode jaringan seismometer milik PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi). PVMBG mengoperasikan jaringan seismik ini untuk memantau aktivitas vulkanik dan tektonik diberbagai gunung api di indonesia salah satunya di gunung merapi.
- “Sta” : Menunjukkan kode stasiun yang merekam gempa tersebut. Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.
- “Loc/Cha” : (*Location/Channel*) Menunjukkan lokasi spesifik atau jenis *channel* yang digunakan oleh stasiun. Misalnya untuk kode lokasi bertuliskan

“00” berarti sensor berada diposisi utama, sedangkan *channel* adalah jenis data yang direkam oleh sensor (vertikal atau horizontal), contohnya HHZ (Broadband Vertikal), HHN (Broadband Horizontal Utara - Selatan), dan HHE (Broadband Horizontal Timur - Barat). Contoh *Loc/Cha*: 00.HHZ berarti saluran vertikal dari sensor broadband yang dipasang di lokasi 00. Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.

- “Dis (km)” : Distance (jarak) menunjukkan jarak dari sumber data ke stasiun dalam kilometer. Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.
- “Az(°)” : Azimuth menunjukkan sudut arah sumber data relatif terhadap stasiun. Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.
- “Time (WIB)” : Menunjukkan waktu pencatatan dalam zona waktu WIB (Waktu Indonesia Barat). Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.
- “+/- (s)” : Menunjukkan ketidakpastian atau tingkat keakuratan dalam satuan detik (*seconds*). Berarti rentang kesalahan dalam pencatatan waktu tiba gelombang seismik. Semakin kecil angkanya semakin akurat atau tepat waktu yang tercatat dibandingkan dengan waktu sebenarnya. Contoh jika tertulis 0,01 s, berarti waktu tiba memiliki kesalahan $\pm 0,01$ detik. Kolom akan terisi jika sudah dilakukan *picking*.

3.5.2 Analisis data model kecepatan 1D

Data kedua yang dibutuhkan dalam penentuan hiposenter adalah data model kecepatan awal gelombang seismik 1D wilayah gunung merapi. Model kecepatan awal gelombang seismik 1-D biasa digunakan sebagai prosedur dalam penentuan lokasi gempa dan sebagai inisial model untuk seismik tomografi. Data ini akan

diinput dan dianalisis menggunakan *software* GAD dengan format *Velocity.dat*.

Cara penulisan pada Notepad dalam file *Velocity.dat* seperti berikut :

- Baris pertama : Jumlah lapisan (berapa banyak lapisan yang digunakan dalam model)
- Baris kedua : Koordinat Z dari diskontinuitas (Jika jumlah lapisan hanya satu baris ini akan dilewati oleh program, tetapi harus tetap ada baris kosong). Koordinat Z menunjukkan kedalaman atau ketinggian dari setiap lapisan.
- Baris ketiga : Nilai kecepatan gelombang P (dalam format f8.3 untuk setiap lapisan), f8.3 adalah bilangan *floating point* dengan total 8 digit atau 8 karakter termasuk 3 angka dibelakang koma.
- Baris keempat : Nilai kecepatan gelombang S (dalam format f8.3 untuk setiap lapisan), f8.3 adalah bilangan *floating point* dengan total 8 digit atau 8 karakter termasuk 3 angka dibelakang koma.

3.5.3 Analisis hasil data koordinat stasiun pencatat gempa

Data ketiga yang dibutuhkan untuk analisis data penentuan hiposenter adalah data stasiun yang diinput dalam *Software* GAD dengan format *Station.dat*. Pada data stasiun, parameter yang digunakan adalah nama stasiun, lintang (*latitude*) dan bujur (*longitude*). Cara penulisan *Station.dat* pada *Software* GAD :

- Baris pertama : Jumlah stasiun (dituliskan berapa banyak stasiun seismik yang digunakan)
- Baris kedua dan seterusnya : Kode stasiun dituliskan dengan 3 karakter. Koordinat X, Y, dan Z (koordinat X menunjukkan koordinat bujur (lon), koordinat Y menunjukkan koordinat lintang (lat), dan koordinat Z menunjukkan ketinggian atau *elevasi* stasiun. Koordinat X, Y, Z dituliskan

dalam satuan km (kilometer).

3.5.4 Analisis hiposenter metode GAD dan NonLinLoc

Pengolahan data pada Software GAD memerlukan tiga file input: *Arrival.dat* yang berisi data waktu tiba gelombang, *Velocity.dat* yang memuat model kecepatan, dan *Station.dat* yang berisi koordinat stasiun. *Software* ini menghasilkan data koordinat hiposenter dalam format *Result.dat*. Data *Result.dat* memuat informasi waktu kejadian gempa (tahun, tanggal, hari, jam, dan menit), koordinat X, Y, Z, serta *origin time* hiposenter. Untuk menilai akurasi penentuan lokasi, diperoleh juga *probable error*, *travel time* residual RMS (*root mean square* residual waktu tempuh), P observasi, S kalkulasi, dan residual (Obs - Cal). Residual positif menunjukkan waktu observasi lebih besar dari kalkulasi, sedangkan residual negatif menunjukkan waktu observasi lebih kecil dari kalkulasi. RMS residual memberikan indikasi keakuratan penentuan lokasi dengan menghitung rata-rata perbedaan antara waktu observasi dan kalkulasi. Data koordinat yang diperlukan untuk visualisasi menggunakan *Software* MATLAB adalah lon (X), lat (Y), dan depth (Z) yang sudah dalam satuan kilometer dari *Result.dat*.

Tabel 3.3 Format koordinat hiposenter GAD pada Software Excel

lon_km	lat_km	depth_km

Pengolahan data menggunakan metode NonLinLoc dilakukan melalui akses ke *Web Cendana15*. Data koordinat hiposenter dari *Cendana15* yang diperoleh berupa longitude (X), latitude (Y), depth (Z) dalam koordinat geografis, dan magnitude. Untuk pengolahan lanjutan pada *Software* MATLAB, koordinat

geografis longitude dan latitude dikonversi menjadi koordinat jarak dalam satuan kilometer menggunakan *Software Excel*, sementara nilai depth sudah dalam satuan kilometer. Berikut adalah contoh penulisan koordinat hiposenter *cendana15* pada *Software Excel*.

Tabel 3.4 Format koordinat hiposenter *cendana15* di *Software Excel*

lon_km	lat_km	depth_km	magnitude	LAT_puncak	LON_puncak	H_LAT	H_LON	pengali	LAT	LON
				-7,54139	110,44611			110		
				-7,54139	110,44611			110		
				-7,54139	110,44611			110		
				-7,54139	110,44611			110		

Dari tabel di atas data yang telah diketahui ialah koordinat geografis dari puncak gunung merapi serta nilai pendekatan (*aproksimasi*) jarak dalam kilometer untuk 1 derajat dipermukaan bumi. *Aproksimasi* adalah pendekatan nilai yang sebenarnya. Contoh dalam tabel ialah pada kolom “pengali” dimana nilai sebenarnya ialah 111,32 km yang didapatkan dari keliling bumi di ekuator 40,075 km dibagi 360 derajat (satu putaran penuh) untuk perhitungan praktis maka nilai *aproksimasi* dari 111,32 km adalah 110 km.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

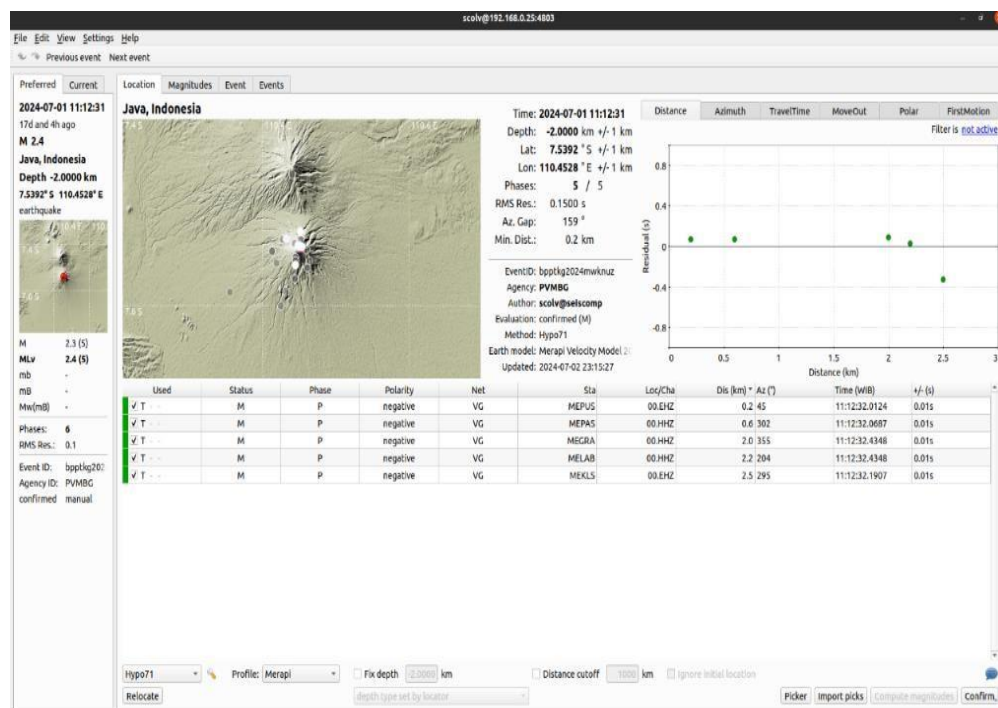
Penelitian ini dilakukan dengan empat tahapan utama dalam pengolahan data. Tahap pertama pengolahan data menggunakan *Software* SeisComp3 dan GAD, dimana data sekunder gempa vulkanik dari rekaman seismogram digital BPPTKG diproses untuk mendapatkan informasi *Arrival Time*, stasiun perekam dan *Polarity* gelombang. Data tersebut diolah menggunakan *Software* GAD untuk mendapatkan koordinat hiposenter. Tahap kedua pengumpulan data katalog BPPTKG melalui *Web Cendana15*, yang memuat data seismik untuk hiposenter (VTA) dan (VTB) pada periode yang sama. Tahap ketiga merupakan visualisasi hiposenter menggunakan metode GAD, dimana hasil pengolahan data tersebut divisualisasikan menggunakan MATLAB untuk menghasilkan peta kontur (2D), penampang Utara-Selatan, penampang Barat-Timur, dan peta 3D Merapi. Tahap terakhir dilakukan visualisasi hiposenter dari katalog BPPTKG menggunakan metode *NonLinLoc*, yang menampilkan hasil pengolahan data dari *Web Cendana15* dalam bentuk visualisasi serupa untuk tujuan perbandingan dengan metode GAD.

4.1.1 Pengolahan data *SeisComp3* dan GAD

Pada penelitian ini digunakan data sekunder Gempa Vulkanik dengan periode 01 – 31 Maret 2023. Data sekunder diperoleh dari hasil rekaman seismogram digital dari stasiun yang dimiliki oleh Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) melalui *Software* *SeisComp3*. Dilakukan pemilihan tanggal dan waktu yang sama dengan *web cendana15*, karena akan dilakukan perbandingan hasil *plot* antara *Software* GAD

yang menggunakan metode GAD dan *web cendana15* yang menggunakan metode *Nonlinloc*.

Pengambilan data dimulai dari *picking* gelombang P dan S menggunakan *Software SeisComp3* yang ada pada kantor BPPTKG. Dari hasil *picking* tersebut diperoleh data berupa *Arrival Time* (waktu tiba) gelombang P dan S, stasiun perekam gempa, *Polarity* atau arah gelombang P dan S. Tampilan data Arrival time pada *Software SeisComp3* yaitu pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1 Tampilan Data Arrival Time pada Software SeisComp3

arrival.dat	06/11/2017 15:32	DAT File	1 KB
gad.exe	11/05/2005 14:47	Application	245 KB
gad.f90	05/05/2006 03:50	F90 File	71 KB
GAD.rar	01/10/2024 08:20	WinRAR archive	93 KB
GADManual.doc	12/05/2005 12:00	Microsoft Word 97 - ...	50 KB
Results.dat	24/11/2018 11:35	DAT File	1 KB
station.dat	06/11/2017 15:40	DAT File	1 KB
velocity.dat	31/10/2011 14:06	DAT File	1 KB

Gambar 4.2 Tampilan Awal Software GAD

Dari data *Arrival Time* dituliskan pada Notepad dengan urutan pada baris 1-10 adalah tahun, bulan, tanggal, jam, dan menit. Pada baris ke-11 digunakan simbol “,” atau *blank*. Pada baris ke 12-14 kode atau nama stasiun (3 Karakter). Pada baris ke-15 digunakan simbol “,” atau *blank*. Pada baris ke 16-21 waktu tiba gelombang (detik) jika data tidak ada maka boleh dituliskan “99.990”. pada baris ke-22 digunakan simbol “,” atau *blank*. Pada baris ke-23 polarisasi gelombang P “+” jika arah gerakan awal gelombang ke atas atau “-” jika arah gerakan awal gelombang ke bawah. Pada baris ke-24 digunakan simbol “,” atau *blank*. Pada baris ke 25 keterangan “I” (*Impulsif*) jika gelombang terlihat jelas (*clear*) atau “E” (*Emergent*) jika gelombang landai atau tidak tampak jelas. Pada baris ke-26 digunakan simbol “,” atau *blank*. Pada baris ke 27-32 waktu awal gelombang S datang (detik), jika tidak ada data maka dituliskan “99.990”. pada baris ke-33 digunakan simbol “,” atau *blank*. Pada baris ke-34 keterangan “I” atau “E” untuk gelombang S.

Tabel 4.1 Contoh penulisan *Arrival Time* pada format *Arrival.dat* di GAD

2303010303	PUS	53.384	+	I	99.990	I
2303010303	PAS	53.525	+	I	99.990	I
2303010303	LAB	53.412	+	I	99.990	I
2303010303	KLS	53.497	+	I	99.990	I
2303010303	KLA	53.723	+	I	99.990	I
2303010303	MBB	56.475	+	I	99.990	I
2303010303	PLA	55.502	-	I	99.990	I

Dilakukan Input data koordinat stasiun pada Notepad dengan Format *Station.dat* dengan penulisan nama stasiun (3 karakter), koordinat stasiun (X, Y, dan Z). Untuk koordinat Z stasiun bernilai “-” jika berada pada ketinggian diatas 0 mdpl dan bernilai “+” jika berada dibawah 0 mdpl.

Tabel 4.2 Contoh penulisan data stasiun pada format *Station.dat* di GAD

10				(i2)
GRA	0.592	2.173	-2.046	(a3,2x,3f10.3)
IJO	1.982	-1.237	-2.048	
JRO	-2.951	-1.536	-1.354	

10				(i2)
KLA	-1.519	0.989	-1.924	
LAB	-0.118	-1.722	-1.845	
MBB	-0.599	8.951	-2.886	
PAS	0.338	0.641	-2.693	
PLA	-1.607	-4.870	-1.276	
PUS	0.773	0.306	-2.653	
KLS	-1.519	0.989	-1.924	

Dilakukan input pada data kecepatan gelombang P dan S pada format *Velocity.dat* melalui Notepad.

Tabel 4.3 Contoh penulisan data kecepatan gelombang di GAD

nzLayer :	4				(15x,i4)
zLayer :	0.00	1.00	13.00		(15x,5f8.3)
VpL(nzLayer+1) :	2.80	3.00	6.00	10.00	(15x,6f8.3)
VsL(nzLayer+1) :	1.61	1.72	3.23	5.38	(15x,6f8.3)

Dilakukan *Run* dengan cara klik *GAD.exe*

gad.exe	11/05/2005 14:47	Application	245 KB
---------	------------------	-------------	--------

Gambar 4.3 Tampilan *GAD.exe*

Setelah dilakukan *Running* maka akan dihasilkan data berupa *Result.dat* yang memuat informasi koordinat hiposenter.

Tabel 4.4 Contoh hasil Running *GAD.exe* berupa *Result.dat*

nst :	10			
Station List				
GRA	.592	2.173	-2.046	
IJO	1.982	-1.237	-2.048	
JRO	-2.951	-1.536	-1.354	
KLA	-1.519	.989	-1.924	
LAB	-.118	-1.722	-1.845	
MBB	-.599	8.951	-2.886	
PAS	.338	.641	-2.693	
PLA	-1.607	-4.870	-1.276	
PUS	.773	.306	-2.653	
KLS	-1.519	.989	-1.924	
nZLayer	4			
zLayer	.000	1.000	13.000	
Vp	2.800	3.000	6.000	10.000
Vs	1.610	1.720	3.230	5.380
Hypocenter				
Date 23 3 1 Time 3: 3				
Focal Element		Probable Error		

X	-.081	.567		
Y	.130	.404		
Z	-2.081	.902		
T	53.128	.115		
Travel time residual rms =	.285sec.			
ST	P	S	Cal	Obs - Cal
KLA	53.723		53.729	-.006
LAB	53.412		53.795	-.383
MBB	56.475		56.297	.178
PAS	53.525		53.450	.075
PLA	55.502		55.017	.485
PUS	53.384		53.501	-.117
KLS	53.497		53.729	-.232

Hasil pengolahan data pada *Result.dat* memberikan informasi berupa data hiposenter atau pusat gempa ditampilkan dalam *Focal Element* yaitu koordinat X, Y, Z disertai waktu kejadian (T) dan *Probable Error* yang menunjukkan kemungkinan kesalahan dalam penentuan koordinat dan waktu. *Result.dat* juga menyajikan informasi *travel time* dengan nilai residual rms, serta rincian data per stasiun yang memuat waktu tiba gelombang P dan S, waktu kalkulasi (Cal), dan selisih antara waktu observasi dan kalkulasi (Obs-Cal). Informasi yang dibutuhkan untuk visualisasi data yaitu *Focal Element* yaitu lokasi pusat gempa bumi yang ditentukan oleh koordinat tiga dimensi (X, Y, Z).

4.1.2 Pengumpulan data koordinat hiposenter pada *Web Cendana15*

Cendana15 adalah *Website* milik BPPTKG yang mana memuat salah satunya adalah data seismik. Untuk penelitian ini digunakan data seismik untuk hiposenter dengan periode 01 – 31 Maret 2023 yang berupa gempa vulkanik dalam (VTA) dan gempa vulkanik dangkal (VTB). Berikut ialah tampilan data hiposenter pada *cendana15* untuk *event* gempa vulkanik dalam (VTA), ditampilkan data yang sama untuk event gempa vulkanik dangkal (VTB).

Event Date	Event Type	Duration (s)	Amplitude	SeisComP Magnitude	Magnitude	Longitude (°)	Latitude (°)	Depth (km)
2023-03-01 03:03:53	VTA	7.64	15mm	2.29081	1.9231114983558655	110.44446	-7.54424	-1.5
2023-03-07 11:29:10	VTA	10.52	17mm	2.66914	1.9149060249328613	110.41634	-7.56235	-1.9
2023-03-07 12:56:01	VTA	10.16	11mm	2.6278	1.7009221315383911	110.37642	-7.55782	9.2
2023-03-07 14:07:42	VTA	10.08	11mm	2.60922	1.8560389280319214	110.44446	-7.54424	-2.1
2023-03-07 14:58:10	VTA	10.76	15mm	2.53683	1.8977180123329163	110.44809	-7.54334	-1.4

Gambar 4.4 Tampilan data hiposenter VTA pada Cendana15

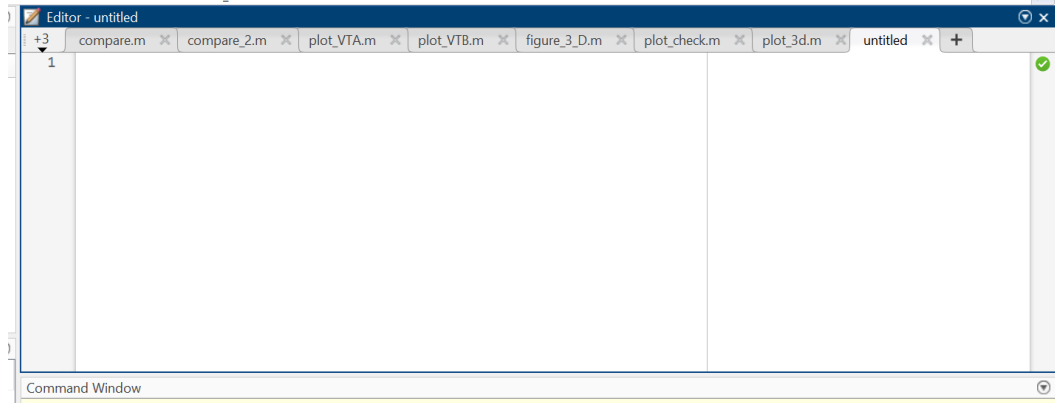
4.1.3 Visualisasi hiposenter metode GAD

Langkah pengolahan data lanjutan digunakan *Software Matlab* untuk mengetahui persebaran hiposenter gempa vulkanik dari data *Result.dat*. Digunakan *Software Excel* untuk menuliskan data yang akan dibaca oleh *Software Matlab* yang memuat koordinat hiposenter (X, Y, dan Z). Contoh penulisan pada *Excel* seperti:

Tabel 4.5 Format data koordinat hiposenter GAD pada Excel

lon km	lat km	depth km
-0,081	0,130	-2,081
0,759	-0,083	-1,181
-0,765	0,102	-1,430
0,550	-0,050	-0,288
0,306	0,231	-0,954
0,977	0,343	-0,390
0,615	0,135	-1,125
0,871	0,506	0,632
0,505	0,342	-0,834
1,131	0,012	-0,861

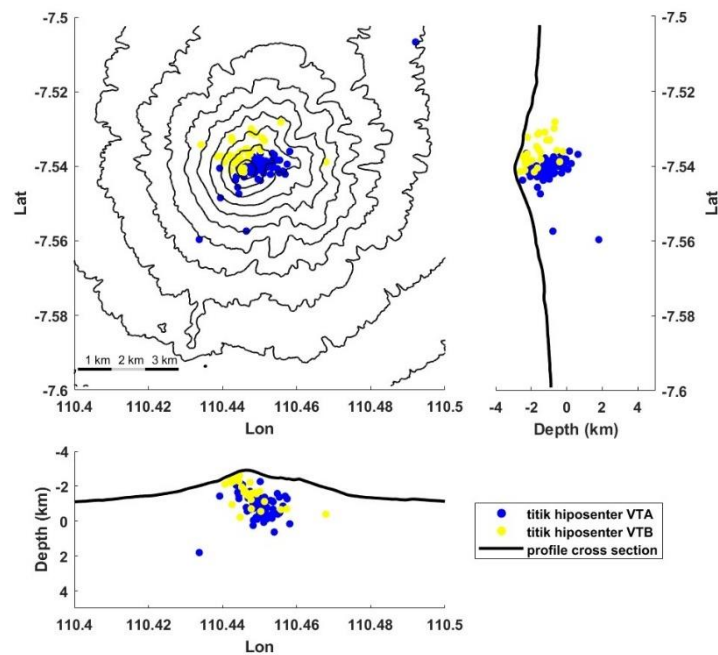
Pada *Software Matlab* digunakan input berupa peta DEM Merapi dengan format *.tif* serta data yang akan dibaca yaitu data koordinat hiposenter Gempa Vulkanik Dalam (VTA) dan Gempa Vulkanik Dangkal (VTB) yang tersimpan dalam file *.xlsx*. dilakukan *Running* pada *Software Matlab*, dihasilkan peta berupa kontur 2D Merapi, penampang Utara – Selatan, penampang Barat – Timur, dan 3D Merapi.



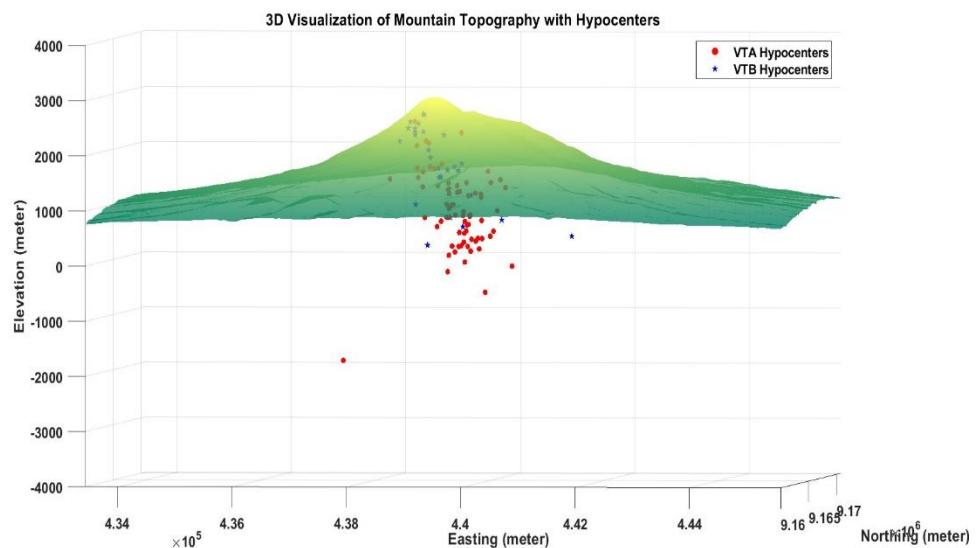
Gambar 4.5 Tampilan jendela awal Software Matlab

Hasil dari penentuan koordinat hiposenter menggunakan Metode GAD akan dibandingkan dengan koordinat hiposenter *cendana15* dengan Metode Nonlinloc milik BPPTKG yang mana koordinat tersebut dikonversi ke satuan jarak (km) dan disimpan dalam file *.xlsx* yang akan diinput pada *Software Matlab* sehingga menghasilkan peta kontur 2D, penampang Utara – Selatan, penampang Barat – Timur, dan peta 3D Merapi.

Hasil *plotting* hiposenter gempa vulkanik dengan periode 01 – 31 Maret 2023 menggunakan Metode GAD pada peta kontur serta peta 3D Merapi ditunjukkan pada **Gambar 4.6** dan **Gambar 4. 7**



Gambar 4.6 Hasil plotting pada peta kontur hiposenter metode GAD



Gambar 4.7 Hasil plotting pada peta 3D hiposenter metode GAD

4.1.4 Visualisasi hiposenter metode *NonLinLoc*

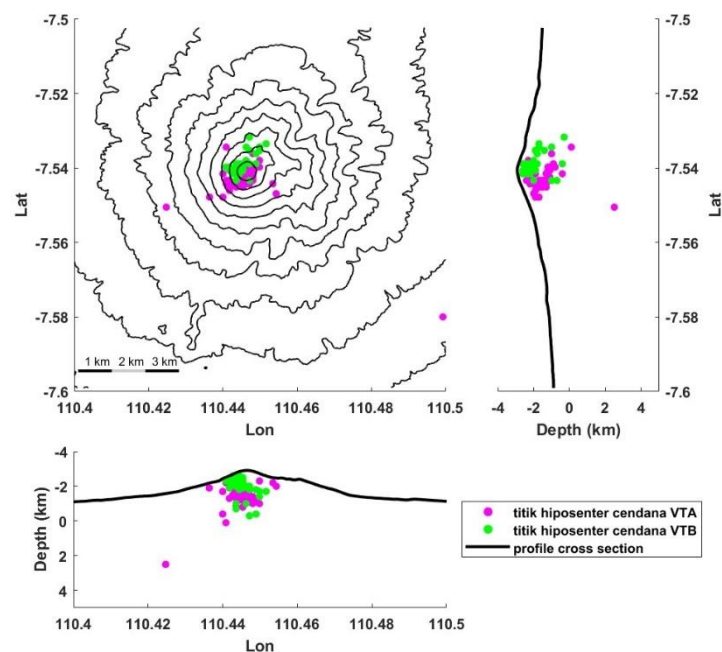
Data input yang dibutuhkan untuk *running* pada *Matlab* ialah longitude, latitude, dan depth (km) yang disimpan dalam file *.xlsx*, pada data koordinat *cendana15* digunakan koordinat geografis sehingga dilakukan konversi menjadi satuan jarak (km) dengan cara koordinat hiposenter dikurangi koordinat puncak

merapi kemudian hasilnya dikalikan 110 (Merupakan pendekatan/approximasi untuk wilayah Indonesia).

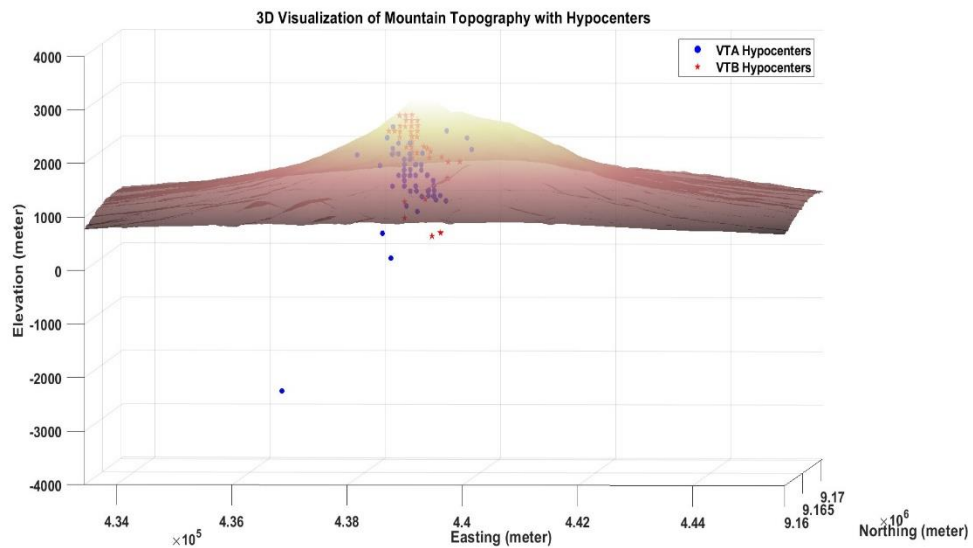
Tabel 4.6 Tabel data hiposenter metode NonLinLoc pada excel

lon_km	lat_km	depth_km	magnitude	LAT_puncak	LON_puncak	H_LAT	H_LON	Pengali	LAT	LON
110,44446	-	-	-	-	-	-	-	110	-	-
110,44446	7,54424	-1,5	1,92	-7,54139	110,44611	0,00285	-0,00165	110	0,3135	-0,1815
110,37642	-	9,2	1,70	-7,54139	110,44611	-	-0,06969	110	-	-7,6659
110,44446	7,55782	-	-	-	-	0,01643	-	-	1,8073	-
110,44446	7,54424	-2,1	1,86	-7,54139	110,44611	0,00285	-0,00165	110	0,3135	-0,1815
110,44809	-	-1,4	1,89	-7,54139	110,44611	-	0,00198	110	-	0,2178
110,44809	7,54334	-	-	-	-	0,00195	-	-	0,2145	-
110,44719	-	-1,5	1,81	-7,54139	110,44611	0,00285	0,00108	110	0,3135	0,1188
110,44719	7,54424	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110,44719	7,54243	-1,2	1,77	-7,54139	110,44611	0,00104	0,00108	110	0,1144	0,1188
110,45354	-	-2,2	2,14	-7,54139	110,44611	-	-	110	-	0,8173
110,45354	7,54424	-	-	-	-	0,00285	0,00743	-	0,3135	-
110,44356	-	-0,9	2,03	-7,54139	110,44611	0,00258	-0,00255	110	0,2838	-0,2805
110,44356	7,53881	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110,44174	-	-1,9	2,01	-7,54139	110,44611	0,00466	-0,00437	110	0,5126	-0,4807
110,44174	7,54605	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110,44537	-	-1,7	2,13	-7,54139	110,44611	-	-0,00074	110	-	-0,0814
110,44537	7,54515	-	-	-	-	0,00376	-	-	0,4136	-

Hasil visualisasi koordinat hiposenter menggunakan metode *Nonlinloc* dapat dilihat pada **Gambar 4.8** yang menunjukkan peta kontur dengan sebaran hiposenter gempa vulkanik dalam (VTA) dan gempa vulkanik dangkal (VTB), serta **Gambar 4.9** yang menunjukkan visualisasi dalam bentuk peta 3D Gunung Merapi.



Gambar 4.8 Hasil plotting pada peta kontur Metode NonLinLoc



Gambar 4.9 Hasil plotting peta 3D metode NonLinLoc

4.2 Pembahasan

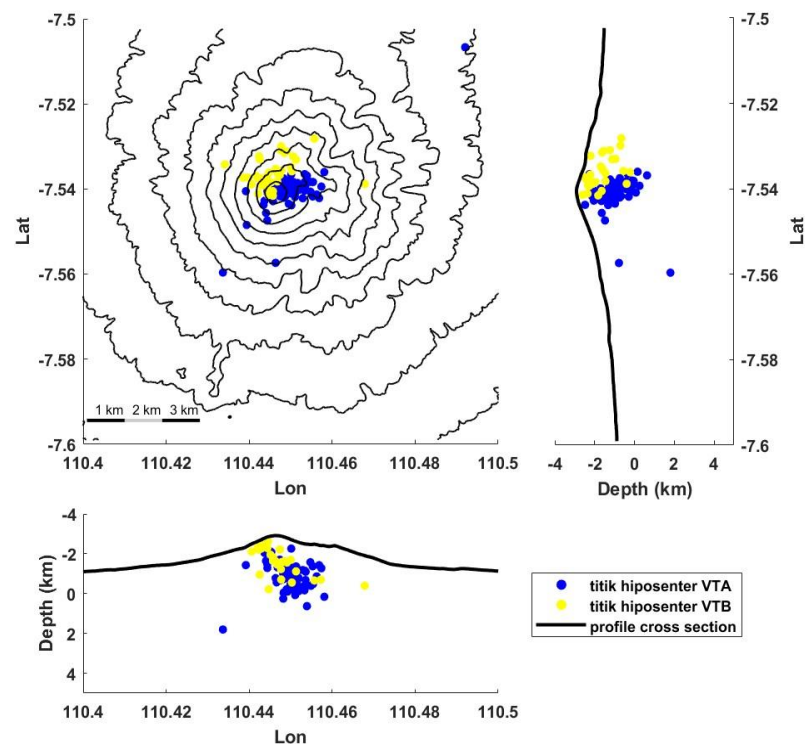
Seismisitas Gunung Merapi pada periode 01 – 31 Maret 2023 ditandai dengan 157 *event* gempa, diantaranya ialah gempa VTA sebanyak 87 *event*, dan gempa VTB sebanyak 70 *event* yang merupakan data katalog waktu tiba gelombang P dan gelombang S serta koordinat dari stasiun perekam gempa berjumlah 10 stasiun. Gempa VTA yang terekam dikarenakan adanya migrasi magma dari dapur magma menuju kantong magma, sedangkan gempa VTB terjadi karena adanya peningkatan tekanan kantong magma. Gempa VTA dan VTB dapat terjadi pada waktu yang relatif sama.

4.2.1 Sebaran Hiposenter Metode GAD

Berdasarkan Sebaran hiposenter gempa vulkanik dangkal dan gempa vulkanik dalam gunung merapi dengan periode 01 – 31 Maret 2023 menggunakan metode GAD, didapatkan kedalaman hiposenter untuk gempa vulkanik dalam (VTA) berkisar antara 2,483 km atau 2483 mdpl sampai -1,806 km atau 1806 mbpl sedangkan untuk gempa vulkanik dangkal (VTB) 2,609 km atau 2609 mdpl sampai -1,001 km atau -1001 mbpl dengan posisi hiposenter terdistribusi ke arah barat –

barat daya. Distribusi hiposenter gempa VTA dan VTB dengan visualisasi peta kontur (2D) dan peta 3D ditunjukkan pada **Gambar 4.10** dan **Gambar 4.11**.

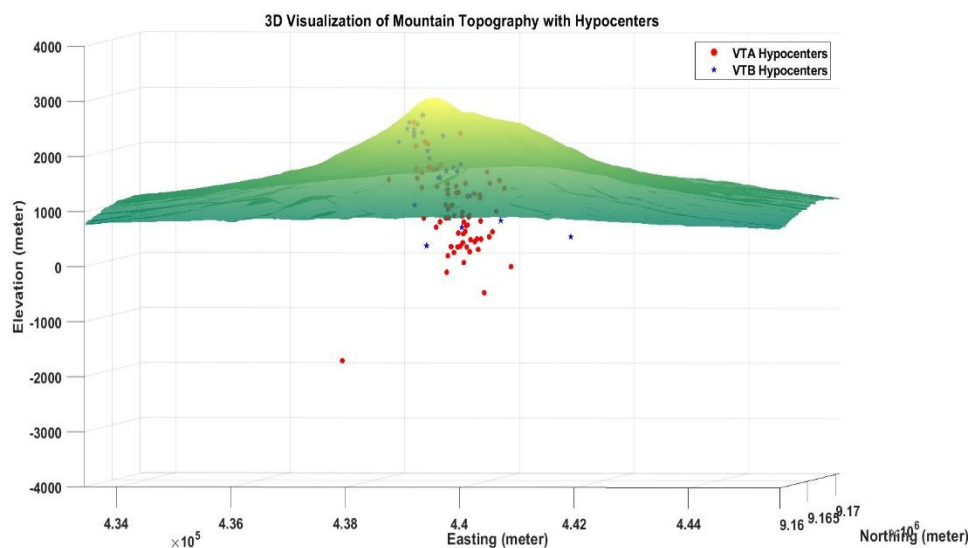
Dari data seismisitas gunung merapi didapatkan magnitude dari gempa. Magnitude dalam aktivitas vulkanik merupakan seberapa besar energi yang dilepaskan dari aktivitas magma. Dari penelitian ini diketahui nilai magnitude untuk gempa (VTA) yaitu 1,70 SR hingga 2,13 SR sedangkan untuk gempa (VTB) diperoleh nilai magnitude 1,67 SR hingga 3,35 SR.



Gambar 4.10 Hasil plotting pada peta kontur hiposenter metode GAD

Dari peta kontur (2D) hiposenter menggunakan metode GAD ditunjukkan **Gambar 4.10** kontur Gunung Merapi dengan koordinat geografis yang mana Lat mewakili garis lintang yang membentang secara horizontal (Utara – Selatan) dan Lon yang mewakili garis bujur yang membentang secara vertikal (Barat - Timur). Serta sebaran hiposenter gempa vulkanik dalam (VTA) dengan titik berwarna biru

dan sebaran hiposenter gempa vulkanik dangkal (VTB) berwarna kuning. Di sisi kanan ada penampang Utara – Selatan dengan koordinat latitude (Y) serta depth atau kedalaman dalam satuan km. Pada bagian bawah kontur Merapi ada penampang Barat – Timur dengan koordinat longitude (X) serta depth dalam satuan km.



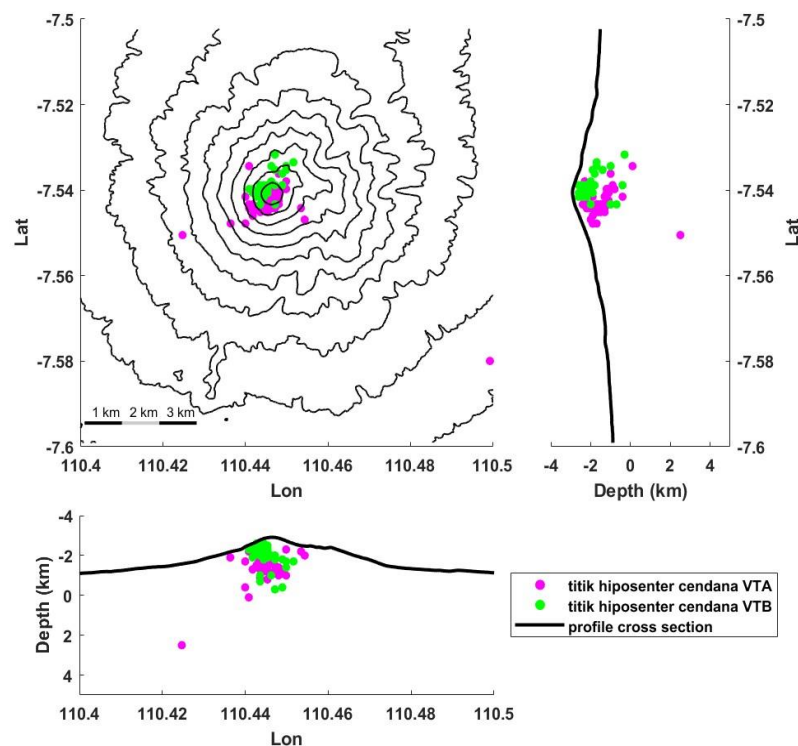
Gambar 4.11 Hasil plotting pada peta kontur hiposenter metode GAD

Dari **Gambar 4.11** hasil *plotting* tersebut menggambarkan peta 3D gunung merapi dari arah selatan yang jika dibandingkan dengan peta 2D maka menggambarkan penampang barat – timur. Untuk *event* gempa VTA menunjukkan persebaran hiposenter berada pada kedalaman berkisar antara 2,483 km atau 2483 mdpl sampai -1,806 km atau 1806 mbpl sedangkan untuk gempa vulkanik dangkal (VTB) 2,598 km atau 2598 mdpl sampai -0,219 km atau -219 mbpl yang mana kedalaman tersebut lebih dangkal dari gempa vulkanik dalam (VTA). Dari distribusi hiposenter tersebut diketahui bahwa posisi hiposenter VTA maupun VTB tersebar meluas yang mengarah ke barat – barat daya.

4.2.2 Sebaran hiposenter metode NonLinLoc (*Non – Linier Location*)

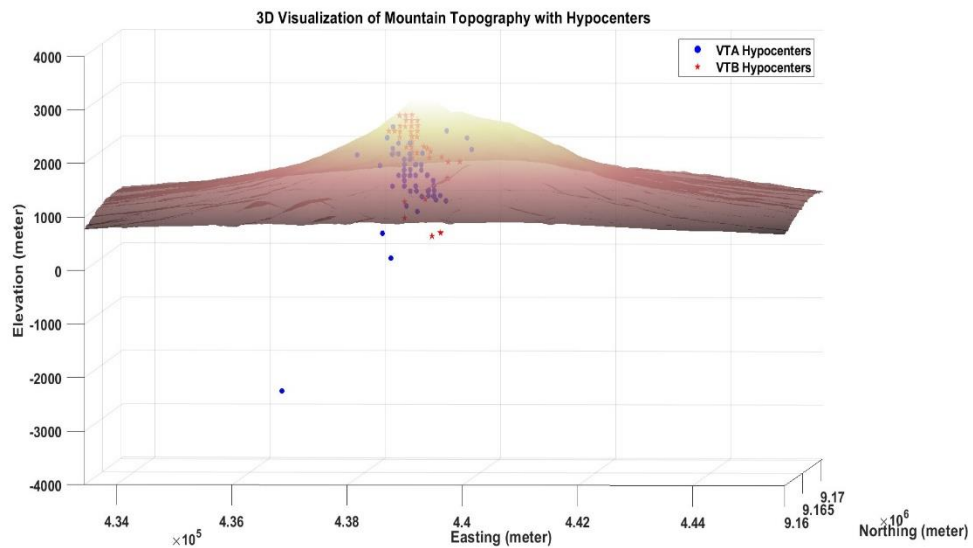
Berdasarkan visualisasi data hiposenter yang menggunakan metode

NonLinLoc didapatkan kedalaman hiposenter untuk gempa vulkanik dalam (VTA) tersebar pada kedalaman 2,4 km atau 2400 mdpl sampai -2,5 km atau 2500 mbpl, sedangkan untuk hiposenter gempa vulkanik dangkal (VTB) tersebar pada kedalaman 2,6 km atau 2600 mdpl sampai -0,3 km atau 300 mbpl. Distribusi hiposenter ditunjukkan pada **Gambar 4.12** dan **Gambar 4.13**



Gambar 4.12 Hasil plotting pada peta kontur Metode *NonLinLoc*

Dari peta kontur hiposenter menggunakan metode *Nonlinloc* ditunjukkan **Gambar 4.12** kontur Gunung Merapi dengan koordinat geografis serta sebaran hiposenter gempa vulkanik dalam (VTA) dengan titik berwarna magenta dan sebaran hiposenter gempa vulkanik dangkal (VTB) berwarna hijau. Di sisi kanan ada penampang Utara – Selatan dengan koordinat latitude (Y) serta depth atau kedalaman dalam satuan km. Pada bagian bawah kontur Merapi ada penampang Barat – Timur dengan koordinat longitude (X) serta depth dalam satuan km.

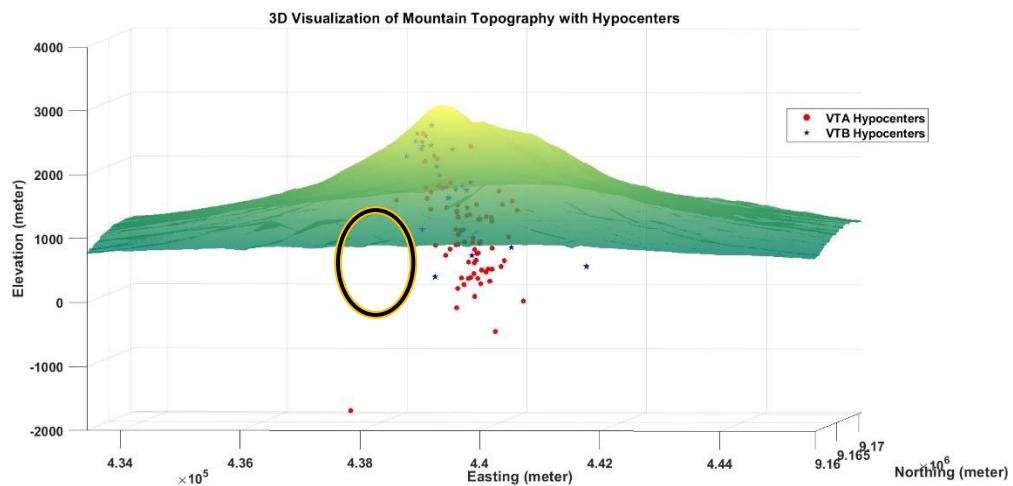


Gambar 4.13 Hasil plotting peta 3D metode NonLinLoc

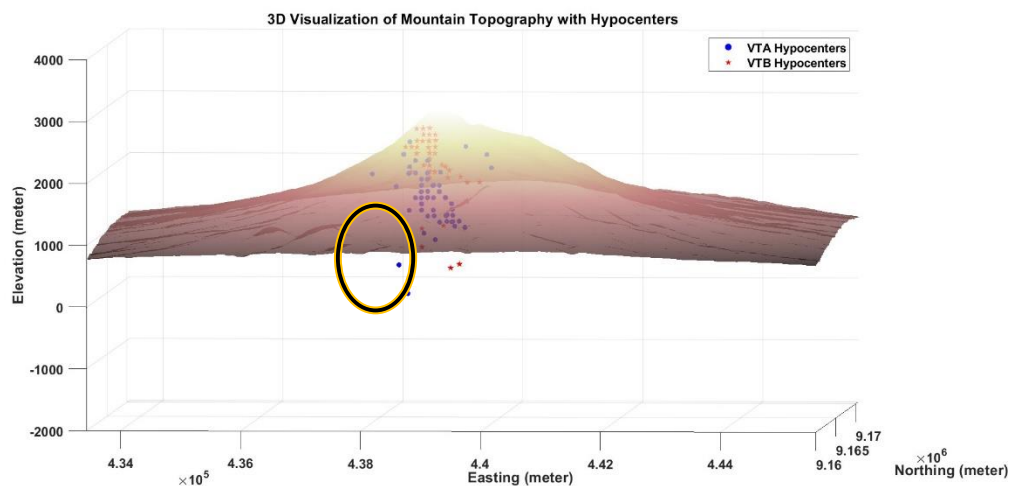
Pada **Gambar 4.13** merupakan peta 3D sebaran hiposenter menggunakan Metode *Nonlinloc* dilihat dari arah timur yang mana menggambarkan penampang barat – timur jika dibandingkan dengan peta 2D. Sebaran hiposenter untuk gempa vulkanik dalam (VTA) dan gempa vulkanik dangkal (VTB) mengarah ke barat – barat daya. Dari gambar tersebut diketahui bahwa distribusi dari gempa vulkanik dalam (VTA) berkisar pada kedalaman 2,4 km atau 2400 mdpl sampai -2,5 km atau 2500 mbpl, sedangkan untuk hiposenter gempa vulkanik dangkal (VTB) lebih terpusat pada bagian puncak gunung yang tersebar pada kedalaman 2,6 km atau 2600 mdpl sampai -0,3 km atau 300 mbpl.

4.2.3 Perkiraan keberadaan kantong magma gunung merapi

Pada penelitian ini diberikan asumsi keberadaan kantong magma gunung merapi berdasarkan karakteristik vulkanik gunung merapi dari data BPPTKG dan berdasarkan dari penelitian terdahulu yang ditunjukkan pada peta 3D sebagai visualisasi dari hiposenter beserta asumsi keberadaan kantong magma yaitu pada **Gambar 4.14** dan **Gambar 4.15**.



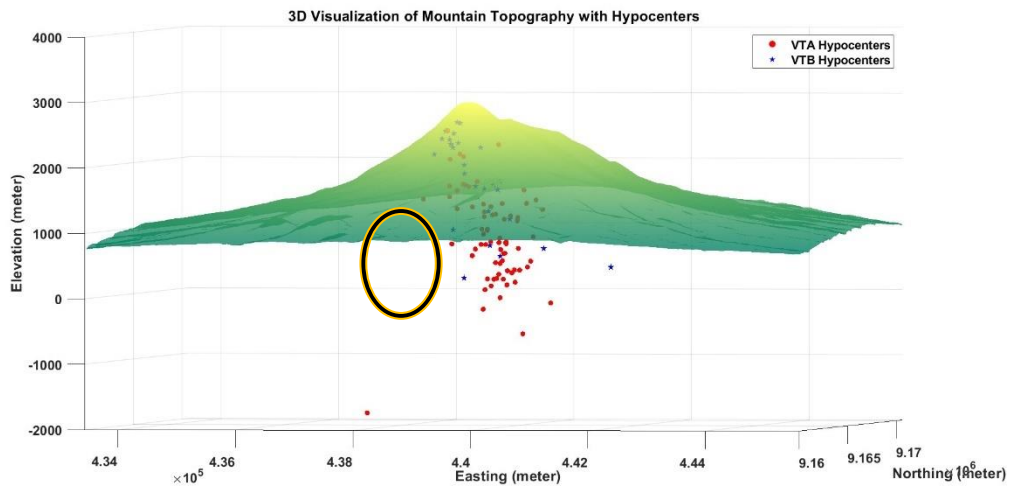
Gambar 4.14 Asumsi keberadaan kantong magma gunung merapi (GAD)



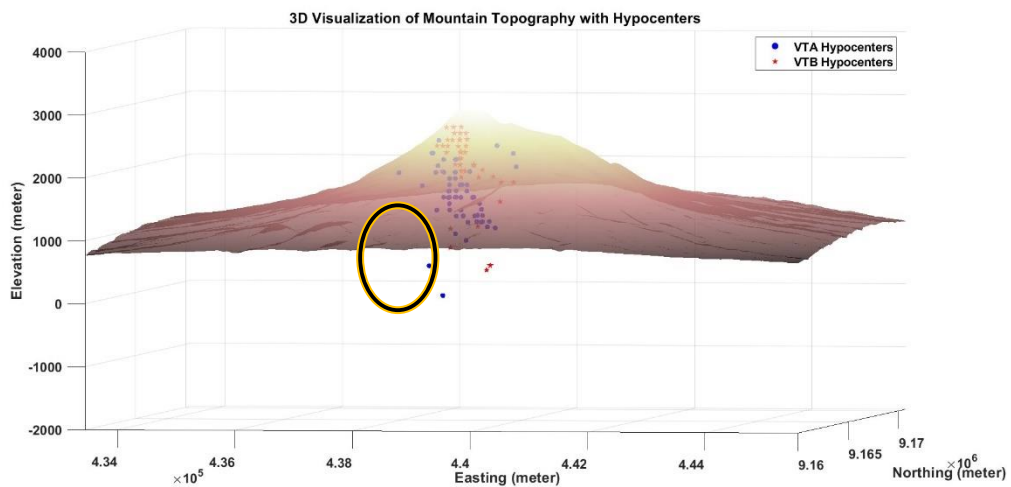
Gambar 4.15 Asumsi keberadaan kantong magma gunung merapi (GAD)

Pada **Gambar 4.14** dan **Gambar 4.15** ditunjukkan bahwa kantong magma diinterpretasikan dari arah selatan yang mana arah tersebut dapat menggambarkan penampang arah barat – timur. Untuk estimasi kantong magma diinterpretasikan berada di barat – barat daya dengan kedalaman berkisar 1400 mdpl sampai 400 mbpl. Asumsi ini didasarkan pada penelitian terdahulu penelitian milik (Ratdomopurbo dan Poupinet, 1995) yang mengatakan bahwa "Zona yang lunak pada kedalaman 1,5 – 2,5 km atau 1500 meter – 2500 meter diinterpretasikan kantong magma. Jika dihitung dari puncak merapi 1500 mdpl adalah 1400 mdpl dan 2500 mdpl adalah 400 mbpl. Jika di lihat dari arah selatan yang mana dapat

menunjukkan penampang arah barat – timur gunung merapi, pada penelitian ini di tunjukkan pada **Gambar 4.16** dan **Gambar 4.17** dengan estimasi kantong magma berada pada barat – barat daya.



Gambar 4.16 Estimasi kantong magma gunung merapi



Gambar 4.17 Estimasi kantong magma gunung merapi

Merujuk pada karakteristik vulkanik gunung merapi berdasarkan data BPPTKG “pada kedalaman 1,5 – 2 km di bawah puncak tidak dijumpai adanya hiposenter gempa begitu pula pada kedalaman >5 km. Gempa vulkanik tektonik memerlukan medium yang solid.” Zona yang lunak pada kedalaman 1,5 – 2,5 km atau 1500 meter – 2500 meter diinterpretasikan kantong magma oleh (Ratdomopurbo dan Poupinet, 1995).

Pada penelitian dari Romsiyatun dan Abdul Basid (2012) membuktikan bahwa pada kedalaman 1,5 – 2 km di bawah puncak tidak terdapat hiposenter gempa, begitu juga pada kedalaman >5 km dalam penentuan sebaran hiposenter gunungapi merapi berdasarkan data gempa vulkanik. Gempa VT membutuhkan medium yang solid dan (*brittle*) atau mudah patah sehingga zona yang tidak ada hiposenter diasumsikan sebagai zona yang lembek (*ductile*) dikarenakan adanya pengaruh dari suhu yang tinggi dari magma (Romsiyatin & Basid, n.d.).

Dibuktikan juga pada penelitian Luehr dkk. (2013) yang menunjukkan dengan melakukan seismik topografi dan didapatkan anomali kecepatan rendah pada kedalaman 5 km. Dari penjabaran tersebut dapat diasumsikan keberadaan kantong magma pada penelitian ini dengan merujuk pada penelitian terdahulu serta data dari BPPTKG, yang mana disebutkan bahwa zona lunak berada pada kedalaman 1,5 – 2,5 km atau 1500 – 2500 m dari puncak, sehingga untuk penentuan zona aseismik pada gunung merapi pada penelitian ini ialah pada kedalaman 1.400 mdpl – 400 mbpl yang mana diberikan tanda lingkaran seperti pada **Gambar 4.16** dan **Gambar 4.17** untuk memperkirakan kedalaman kantong magma yang mana dapat disebut sebagai zona aseismik.

Zona aseismik ini merupakan wilayah di mana aktivitas gempa atau seismik sangat minim atau hampir tidak ada. Hal ini terjadi karena sebagian besar material di daerah ini bersifat lebih lunak atau *ductile*, bukan solid. Dalam konteks geologi, zona aseismik adalah area di mana energi seismik yang seharusnya dilepaskan dalam bentuk gempa lebih banyak disalurkan melalui proses magmatik, seperti pergerakan magma atau gas, daripada melalui retakan atau pergeseran lapisan batuan yang menyebabkan gempa. Sehingga dalam penelitian ini diinterpretasikan

kedalaman kantong magma di bagian barat – barat daya dengan kedalaman 1400 mdpl – 400 mbpl karena distribusi hiposenter seringkali berkorelasi dengan arah pergerakan magma di bawah permukaan menuju ke permukaan. Distribusi hiposenter menunjukkan bahwa hiposenter gempa yang tercatat lebih banyak terkonsentrasi pada kedalaman yang lebih dangkal, mengarah ke barat-barat daya, yang mengindikasikan bahwa magma yang terbentuk di dalam perut bumi kemungkinan besar bergerak atau terakumulasi di wilayah tersebut.

4.2.4 Perbandingan sebaran hiposenter dari Metode GAD dan *NonLinLoc*

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan antara kedua metode yaitu metode GAD dan metode *NonLinLoc* (*Non-Linier Location*). Untuk metode GAD dalam penentuan hiposenter dari 157 *event* gempa VTA dan VTB hanya bisa menganalisis 113 *event* gempa VTA dan VTB, untuk hal yang dapat mempengaruhi hasil tersebut ialah perbedaan waktu tiba gelombang P dan S yang terekam pada setiap stasiun yang dikarenakan perbedaan jarak antar stasiun, selain itu karena metode ini memiliki anggapan bahwa lapisan bumi sama atau homogen sehingga kecepatan gelombang untuk tiap lapisan dikatakan sama, maka dari itu metode GAD membuat *event* gempa yang dapat diolah berkurang. Asumsi ini dikuatkan oleh penelitian milik arisalwadi dkk yang menyebutkan bahwa metode ini belum memperhitungkan struktur kecepatan tiap lapisan di bawah permukaan dari kondisi geologi gunungapi (Arisalwadi et al., 2024).

Metode Geiger's yang menggunakan *Software GAD* (*Geiger's With Adaptive Damping*) adalah *software* yang umum dimanfaatkan dalam penentuan lokasi hiposenter dari gempa pada daerah gunungapi atau di daerah yang jaraknya lebih dekat antara penerima atau *receiver* dengan sumber gempa yang terjadi (Meiliana

et al., n.d.). Keterbatasan yang dimiliki metode GAD ialah dalam pengolahan keseluruhan data gempa vulkanik. Tetapi, kelebihan dari metode GAD adalah metode yang lebih cocok untuk jaringan antar stasiun yang tidak terlalu jauh (Hamdiyessi et al., 2022).

Pada metode kedua dalam penentuan hiposenter yang menggunakan metode *NonLinLoc* (*Non-Linear Location*), dimana *NonLinLoc* adalah perangkat lunak dengan algoritma lokasi probabilistik pencarian global yang non-linier, sehingga memungkinkan penggunaan model kecepatan 1 – 3D (Lomax et al, 2000). Dalam hal ini setiap lapisan bumi dianggap heterogen sehingga kecepatan gelombang pada tiap lapisan juga berbeda. Pencarian global pada umumnya dikatakan sama dengan pencarian grid yang lengkap, maka metode ini memiliki keterbatasan dalam prosesnya yaitu membutuhkan waktu yang cukup lama. Kelebihan dari metode ini ialah dimungkinkan penggunaan waktu tiba gelombang P saja (Kokowski & Rudziński, 2023). Dari hasil visualisasi menggunakan metode ini yang mana dari data katalog hiposenter gempa VTA dan VTB sebanyak 157 *event* hanya bisa dianalisis sebanyak 114 *event*.

Dari kedua metode tersebut diberikan contoh 5 data koordinat hiposenter dengan periode yang sama untuk metode yang berbeda yaitu metode GAD dan metode *NonLinLoc* serta data hiposenter yang digunakan ialah hiposenter gempa vulkanik dalam atau VTA dan gempa vulkanik dangkal atau VTB.

Tabel 4.7 Perbandingan posisi hiposenter VTA untuk GAD dan *NonLinLoc*

Date	Time	GAD			NonLinLoc		
		Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)	Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)
07/03/2023	14:07	-0,765	0,102	-1,430	-0,181	-0,313	-2,1
07/03/2023	14:58	0,550	-0,050	-0,288	0,218	-0,214	-1,4
07/03/2023	19:08	0,977	0,343	-0,390	0,119	-0,313	-1,5
07/03/2023	20:51	0,871	0,506	0,632	0,119	-0,114	-1,2

Date	Time	GAD			NonLinLoc		
		Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)	Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)
08/03/2023	02:37	0,505	0,342	-0,834	-0,280	0,284	-0,9

Tabel 4.8 Selisih posisi hiposenter VTA metode GAD dan NonLinLoc

Selisih posisi hiposenter GAD dan NonLinLoc				
Date	Time	Δ Lon	Δ Lat	Δ Depth
07/03/2023	14:07	-0.584	0.415	0.670
07/03/2023	14:58	0.332	0.164	1.112
07/03/2023	19:08	0.858	0.656	1.110
07/03/2023	20:51	0.752	0.620	1.832
08/03/2023	02:37	0.785	0.058	0.066

Dari data yang ada pada tabel 3.6 didapatkan selisih posisi hiposenter antara metode GAD dan NonLinLoc dalam tiga parameter yaitu longitude (Lon), latitude (Lat), dan kedalaman (Depth). Perbedaan tersebut diukur dalam satuan kilometer (km) dan dihitung sebagai hasil pengurangan nilai dari metode GAD dengan metode NonLinLoc. Dalam koordinat longitude dan latitude, kedua metode menggunakan sistem kartesian standar, sehingga nilai positif menunjukkan pergeseran ke timur (longitude) atau utara (latitude). Namun, terdapat perbedaan pada arah kedalaman untuk metode GAD menggunakan arah positif ke bawah, sedangkan NonLinLoc menggunakan arah positif ke atas. Diambil contoh pada tanggal 07/03/2023 pukul 14:07, perbedaan longitude sebesar -0,584 km menunjukkan bahwa hiposenter metode GAD lebih ke arah barat dibandingkan NonLinLoc, sementara latitude lebih ke utara dengan selisih 0,415 km. Kedalaman menunjukkan bahwa GAD lebih dangkal dengan nilai sebesar 0,670 km.

Tabel 4.9 Perbandingan posisi hiposenter VTB untuk GAD dan NonLinLoc

Date	Time	GAD			NonLinLoc		
		Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)	Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)
01/03/2023	09:32	-0,150	0,591	-0,219	-0,280	0,084	-2,6
12/03/2023	00:54	-0,351	0,438	-2,264	-0,181	0,283	-2,2
12/03/2023	04:11	2,417	0,286	-0,394	-0,280	-0,214	-1
12/03/2023	14:12	1,249	4,807	-0,697	-0,181	-0,015	-2,3

Date	Time	GAD			NonLinLoc		
		Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)	Lon (km)	Lat (km)	Depth (km)
12/03/2023	14:45	0,145	0,528	-2,216	-0,181	0,084	-2,4

Tabel 4.10 Selisih posisi hiposenter VTB metode GAD dan NonLinLoc

Selisih posisi hiposenter GAD dan NonLinLoc				
Date	Time	Δ Lon	Δ Lat	Δ Depth
01/03/2023	09:32	0,130	0,507	2,381
12/03/2023	00:54	-0,170	0,155	-0,064
12/03/2023	04:11	2,697	0,500	0,606
12/03/2023	14:12	1,430	4,822	1,603
12/03/2023	14:45	0,326	0,444	0,184

Pada data VTB, untuk kedua metode juga memiliki pola yang sama dimana untuk kedalaman pada GAD cenderung lebih dangkal dibandingkan NonLinLoc. Diambil contoh pada data tanggal 12/03/2023 pukul 00:54, dengan selisih longitude (Δ Lon) sebesar -0,170 km. Nilai negatif pada longitude ini menunjukkan bahwa hiposenter berdasarkan metode GAD lebih barat dibandingkan dengan NonLinLoc pada waktu tersebut.

Perbandingan antara metode *Geiger's dengan Adaptive Damping* dan metode *NonLinLoc* menunjukkan perbedaan signifikan dalam pendekatan dan hasil yang diperoleh. Metode GAD memiliki keunggulan dalam pengolahan yang lebih cepat dalam komputasi namun serta cukup baik dalam penentuan hiposenter yang menggunakan jarak stasiun dengan pusat gempa lebih dekat, memiliki keterbatasan dalam menangani variasi lateral dari struktur geologi, karena didasarkan pada model kecepatan 1D yang mengasumsikan homogenitas lapisan. Akibatnya, hasil dari metode GAD mungkin kurang akurat dalam merepresentasikan lokasi hiposenter gempa vulkanik dengan lapisan yang lebih kompleks serta beberapa jarak jarak stasiun yang cukup jauh dari posisi terjadinya gempa. Sebaliknya, metode NonLinLoc, yang menggunakan pendekatan nonlinier dengan

mendapatkan nilai probabilitas paling tinggi, serta mempertimbangkan model kecepatan yang kompleks dan heterogen sehingga untuk setiap kecepatan gelombang pada lapisan dianggap berbeda. Kekurangan dari proses pengolahan data dengan NonLinLoc lebih rumit dan memakan waktu lebih lama, Dari hasil tersebut penting untuk mempertimbangkan kondisi geologi yang sebenarnya dalam penerapan kedua metode tersebut.

4.3 Integrasi Sains dan Islam

Dalam Al – Qur'an telah dijelaskan bahwa gunung itu digambarkan sebagai stabilisator bumi yang mana mampu menjaga permukaan bumi agar tidak berguncang bersama dengan penghuninya, dengan kata lain gunung sebagai pasak permukaan bumi ke bawah. Hal ini telah dijelaskan dalam Al – Qur'an surah

An – Naba ayat 6 – 7:

أَلَمْ نَجْعَلِ الْأَرْضَ مِهْدًا ۖ
وَالْجِبَالَ أَوْتَادًا ۚ

Artinya: “*Bukankah Kami telah menjadikan bumi sebagai hamparan dan gunung-gunung sebagai pasak?*”

Menurut tafsir dari Fakhr al-din al razi yang menjelaskan tentang ayat tersebut “*dan gunung – gunung dijasikan pasak*” ialah untuk tanah agar tidak melebar dan agar bisa ditinggali oleh manusia (Al-Razi, 2000). Dan menurut Muhammad Abduh mengenai ayat tersebut adalah kata “*أوتد*” adalah kata jamak dari “*وتد*” yang berarti pasak. Gunung-gunung disebut pasak-pasak karena mereka muncul di atas permukaan bumi dengan cara yang mirip dengan pasak-pasak yang ditancapkan ke dalamnya. Selain itu, karena fungsinya untuk memperkuat bumi dan menjaganya stabil (Abduh, 1999). Dari penjelasan tersebut dibuktikan dengan fakta bahwa benua saling bertubrukan sehingga terbentuk gunung, tanpa adanya gunung

maka lempeng *lithosfer* akan bergerak lebih cepat. Selain itu, dari pembentukan gunung kerak bumi secara periodik menjadi muda kembali dan benua secara bertahap tumbuh serta kekayaan mineral akan semakin bertambah (Samsul, 2015).

Dari akar gunung yang menjunjam ke bawah permukaan maupun ke atas permukaan, diibaratkan gunung – gunung itu mengenggam lempeng – lempeng kerak bumi yang berbeda seolah seperti pasak. Kerak bumi terdiri dari lempeng – lempeng yang selalu bergerak. Fungsi dari gunung sebagai pasak ialah mencegah permukaan bumi dari guncangan dengan cara memancangkan kerak bumi yang memiliki struktur yang mudah bergerak. Telah dijelaskan pula pada Al – Qur'an surah An – Nazi'at ayat 31 – 32 (Nandang, 2009):

أَخْرَجَ مِنْهَا مَاءَهَا وَمَرْعَاهَا ۚ وَالْجِبَالِ أَرْسَاهَا ۚ (٣٢)

Artinya: “*Darinya (bumi) Dia mengeluarkan air dan (menyediakan) tempat penggembalaan Gunung-gunung Dia pancangkan dengan kukuh*”

Menurut Syaikh Muhammad bin Shalih al – Utsaimin, ualam besar pada abad 14 H dalam tafsir Juz ‘Ammah, وَالْجِبَالِ أَرْسَاهَا, : “Dan gunung-gunung dipancangkan-Nya dengan teguh,” Allah menjadikan gunung-gunung kokoh di bumi, tidak dapat terhempas angin seberapa pun kuatnya angin, juga mengokohkan bumi agar menggoncang manusia. Dalam ayat tersebut fungsi dari gunung ialah mencegah guncangan di permukaan bumi. Hal ini mencegah kerak bumi terombang – ambing di atas lapisan magma atau di antara lempeng – lempeng. Gunung diibaratkan sebagai paku yang menjadikan lembaran – lembaran kayu tetap menyatu (Harun, 2017). Menurut geologi modern gunung – gunung muncul diakibatkan dari gerakan dan tumbukan dari lempeng – lempeng raksasa sehingga membentuk permukaan bumi. Ketika dua lempeng bertumbukan, lempengan yang lebih kuat akan

menunjam ke bawah lempengan yang satunya, sedangkan yang di atas akan melipat dan membentuk dataran tinggi termasuk gunung. Dapat dikatakan bahwa gunung memiliki bagian yang menghujam jauh ke bawah yang tak berbeda besarnya dengan yang tampak pada permukaan bumi (Yuneldi et al., 2017).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sebaran Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Merapi

Pada penelitian ini digunakan data sekunder yang didapatkan dari *Software Seiscomp3* dan *Cendana15* milik BPPTKG dengan periode 01 – 31 Maret 2023. Dari analisis hiposenter menggunakan kedua metode berbeda, yaitu GAD dan *NonLinLoc* hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat 157 *event* gempa vulkanik dalam dan vulkanik dangkal, yang terdiri dari 87 *event* gempa (VTA) dan 70 *event* gempa (VTB), dengan distribusi yang mayoritas mengarah pada barat – barat daya. Kedua metode menunjukkan perbedaan kedalaman hiposenter yang bervariasi, dengan metode GAD ditunjukkan adanya hiposenter VTA pada kedalaman 2,483 km atau 2483 mdpl sampai -1,806 km atau 1806 mbpl sedangkan untuk gempa vulkanik dangkal (VTB) 2,598 km atau 2598 mdpl sampai -0,219 km atau -219 mbpl, sedangkan metode *NonLinLoc* untuk gempa vulkanik dalam (VTA), rata-rata terpusat pada kedalaman 2,4 km atau 2400 mdpl sampai -2,5 km atau 2500 mbpl, sedangkan untuk hiposenter gempa vulkanik dangkal (VTB) lebih terpusat pada bagian puncak gunung yang tersebar pada kedalaman 2,6 km atau 2600 mdpl sampai -0,3 km atau 300 mbpl.

2. Perbandingan Hasil Penentuan Hiposenter Metode GAD dan NonLinLoc

Kedua metode memiliki karakteristik unik dalam pengolahan data. Metode GAD lebih cepat dalam komputasi dan cocok untuk jaringan stasiun yang

berdekatan, namun memiliki keterbatasan dalam menangani variasi lateral struktur geologi. Sebaliknya, metode NonLinLoc menggunakan pendekatan nonlinier yang kompleks, mempertimbangkan model kecepatan heterogen, namun membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama. Kedua metode hanya mampu menganalisis sebagian dari total event gempa, dengan GAD menganalisis 113 event dan NonLinLoc 114 event.

3. Penentuan Keberadaan Kantong Magma

Pada penelitian ini diasumsikan zona aseismik yang diduga sebagai kantong magma, terletak pada kedalaman 1,5 – 2,5 km dari puncak gunung merapi, sehingga kedalaman kantong magma diperkirakan berada pada kedalaman 1,4 km atau 1400 meter diatas permukaan air laut sampai -0,4 km atau 400 meter di bawah permukaan air laut. Asumsi tersebut dilakukan berdasarkan penelitian terdahulu “Zona yang lunak pada kedalaman 1,5 – 2,5 km atau 1500 meter – 2500 meter diinterpretasikan kantong magma oleh (Ratdomopurbo dan Poupinet, 1995).” Yang menunjukkan bahwa zona lunak ini merupakan area dengan aktivitas seismik minimal, kemungkinan disebabkan oleh suhu tinggi magma yang membuat materi di zona tersebut kurang solid.

5.2 Saran

Penelitian mendatang tentang Gunung Merapi memerlukan pendekatan yang lebih baik dan komprehensif. Fokus utamanya adalah menyempurnakan metode penentuan lokasi gempa (hiposenter) dengan menggabungkan keunggulan metode GAD dan NonLinLoc. Hal ini dapat dilakukan dengan membuat model perhitungan yang lebih akurat, yang secara mendalam mempertimbangkan kompleksitas struktur geologi Gunung Merapi.

Untuk meningkatkan kualitas hasil penelitian, perlu dilakukan koreksi topografi dan pengembangan model kecepatan dari satu dimensi (1D) menjadi model yang lebih kompleks. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan data hiposenter yang lebih presisi dan memungkinkan dilakukannya relokasi hiposenter menggunakan metode alternatif lainnya. Dengan demikian, akan diperoleh gambaran yang lebih akurat tentang aktivitas seismik di bawah permukaan Gunung Merapi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abduh, Muhammad, Tafsir Juz Amma Penerjemah Muhammad Bagir Bandung:
- Agus Budi Santoso, "The Seismic Activity Associated With The Large 2010 Eruption Of Merapi Volcano, Java: Source Location, Velocity Variation, And Forecasting", Thesis, Université Grenoble Alpes, Grenoble, 2006
- al-Rāzī, Fakhr al-Dīn, Mafātīh al-Ghaīb, Beirūt: Dār al-Kitab al-‘Alamiah, 2000.
- Arifin, Samsul, Gunung Dalam Al Quran. Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta (2015)
- Arisalwadi, M., Dedi Sastrawan, F., Basuki, A., Arisalwadi, M., Sastrawan, F. D., & Basuki, A. (2024). Hypocenter Distribution Analysis of Sinabung Volcano Eruption In 2021 Using Geiger’s with Adaptive Damping (GAD) Method. *Indonesian Physical Review*, 7(2), 209–219. <https://doi.org/10.29303/ip>
- Arimuko, A., Surya, A., Wibawa, W., Firmansyah, D. A., Program, S., Geofisika, S., Tinggi, M., Klimatologi, D., Geofisika, T., & Selatan, I. (2019). *DIFFRACTION: Journal for Physics Education and Applied Physics Analisis Perbandingan Penentuan Hiposentrum Menggunakan Metode Grid Search, Geiger, dan Random Search: Studi Kasus pada Letusan Gunung Sinabung 2017*. 1(2). <http://jurnal.unsil.ac.id/index.php/Diffraction>
- Bulo, D., & Hendrawanto, B. (2020). PENENTUAN TITIK EPICENTER DAN HYPOCENTER SERTA PARAMETER MAGNITUDE GEMPABUMI BERDASARKAN DATA SEISMOGRAM. *Jurnal Geosains Kutai Basin*, 3(1).
- Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG). 2016. Sejarah Merapi. www.merapi.bgl.esdm.go.id/informasi. Diakses pada tanggal 25 Agustus pada pukul 14.00 WIB.
- Budi Joko Purnomo, "Analisa Deformasi Kawasan Vulkanik Aktif dengan menggunakan Data GPS September 2012-Maret 2014 (Studi Kasus: Gunung Merapi, DIY)", Tugas Akhir, Program S1 Teknik Geomatika FTSP-ITS, Surabaya, 2014
- Burhanudin, Nandang, Al Quran Tajwid dan Terjemah. Ziyad Books, Banyuanyar Surakarta (2009)
- D. Fatma, "Ilmugeografi.com: Pengertian Vulkanisme dan Contohnya," 31 Oktober 2016. [Online]. Available: <https://ilmugeografi.com/ilmu-bumi/gunung/pengertian-vulkanisme>. [Accessed 20 Januari 2022].
- Dawid, S., & Pasau, G. (n.d.). PENENTUAN LOKASI PERGERAKAN MAGMA

GUNUNG API SOPUTAN BERDASARKAN STUDI SEBARAN HIPOSENTER GEMPA VULKANIK PERIODE MEI 2013-MEI 2014.
<http://www.soputan.bgl.esdm.go.id>

Hamdiyessi, S., Marzuki, M., Putra, A., & Indrastuti, N. (2022). Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Marapi Menggunakan Metode Geiger's with Adaptive Damping (GAD). *Jurnal Fisika Unand*, 11(4), 414–420. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.4.414-420.2022>

Hamka, Tafsir Al-Azhar (Singapura: Pustaka Nasional PTE LTD Singapura)

Hidayati, S. 2010. *Pengenalan Seismologi Gunung Api*. Bandung: Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunungapi Baru, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.

Jauziyyah, Ibnu Qayyim, Badaai'u At-Tafsir (Riyadh: Dar Ibnu Al-Jauzi)

Kokowski, J., & Rudziński, Ł. (2023). *Analysis of the epicenter location accuracy for the local seismic network operated in the mining area towards the automation of location procedures*. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 2561–2575. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03315-w>

Linda, A., Susanto, B., & Prakoso, C. (2019). *Analisis perambatan gelombang seismik pada lapisan batuan*. *Jurnal Geofisika Indonesia*, 15(2), 78-92.

Lomax, A., J. Virieux, P. Volant and C. Berge, 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances in Seismic Event Location* Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134..

Lomax, A., Michelini, A., & Curtis, A. (n.d.). *Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods*.

Luehr, Birger-G., Koulakov, I., Rabbel, W., Zschau, J., Ratdomopurbo, A., Brotopuspito, K.S., Fauzi, dan Sahara, D.P. 2013. Fluid Ascent and Magma Storage Beneath Gunung Merapi Revealed by Multi-scale Seismic Imaging. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261 (2013), 7-19.

Madrinovella, Iktri, Widiyantoro, S., Nugraha, A. D. dan Triastuty, H., 2012, Studi Penentuan dan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Sekitar Cekungan Bandung, *Jurnal Geofisika*, No. 13, hal 80-88.

Meiliana, R., Rizki, R., & Fattah, E. I. (n.d.). *Analisis Model Kecepatan Seismik 1-D Dan Relokasi Hiposenter Gempa Sumatera Utara 19 Mei-31 Agustus 2008*. <http://eida.gfz->

Nishi, K., “*Hypocenter Calculation Software GAD (Geoger's method with*

Adaptive Damping)” GAD Manual Guide, 2005.

- R. Wijayanti, "*Analisis Model Kecepatan Seismik 1-D dan Relokasi Gempa Gunung Api Merapi*," Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung, p. 54, 2010.
- Ratdomopurbo, A. & G. Poupinet, 2000, An Overview of the Seismicity of Merapi Volcano (Java, Indonesia) 1983 – 1994, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 193 – 214.
- Romsiyatin, O. :, & Basid, A. (n.d.). *PENENTUAN SEBARAN HIPOSENTER GUNUNGAPI MERAPI BERDASARKAN DATA GEMPA VULKANIK TAHUN 2006*. <http://www.merapi.bgl.esdm.go.id>
- Setiawan, A., “*Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro dan Poisson’s Ratio, Studi Kasus: Hydroshearing Pada Lapangan Enhanced Geothermal System Newberry, Oregon*,” skripsi. Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bandar Lampung, 2017.
- Siswowidjojo, S. S. 1996. *Pengantar Seismologi Gunungapi dan Hubungannya dengan Kegiatan Gunungapi*. Kursus Pengamat Gunungapi TK.II. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.
- Subandriyo. 2014. *Aktivitas Gunung Merapi Pasca Erupsi 2010, Antisipasi Terhadap Erupsi Freatik Vulkanian*. Pertemuan Kelompok Studi Kawasan Merapi, Sleman 4 Januari 2014.
- Wahyunia, S. (2021). *Klasifikasi jenis gempa dan penentuan hiposenter gempa VT Gunung Sinabung* [Skripsi]. Universitas Hasanuddin.
- Wijaya UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, R., & Sholihatun Malikah, S. (2021). Interpretasi kata Sulthan (Kajian Ma’na Cum Maghza Terhadap Q.S. Ar-Rahman (55): 33). *Desember Tahun*, 15(2), 239–258. <https://doi.org/10.24042/a>
- Yahya, Harun oleh Hermawan, Rika, Keajaiban Al Quran Ilmu Pengetahuan Modern Mengungkap Keajaiban Al Quran. Diakses Pada Jumat 28 April Pukul 21.00 WIB (2017)
- Yuneldi, A., Hendrajaya, L., Bumi, L. F., Keilmuan, K., Bumi, F., & Kompleks, S. (2017). *Fisika Gunung Api: Meletusnya Gunung Talang Berdasarkan Perspektif Al Quran dan Sains-fisika*.
- N. K. T. Suandayani, "*Penentuan Sebaran Hiposenter dan Episenter Gunung Guntur Berdasarkan Data Seismik*," Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Denpasar, 2018.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel data input *Arrival.dat* (VTA) pada *Software GAD*

2303010303,PUS,53.384,+,I,99.990,I
2303010303,PAS,53.525,+,I,99.990,I
2303010303,LAB,53.412,+,I,99.990,I
2303010303,KLS,53.497,+,I,99.990,I
2303010303,KLA,53.723,+,I,99.990,I
2303010303,MBB,56.475,+,I,99.990,I
2303010303,PLA,55.502,-,I,99.990,I
2303071256,PUS,01.753,+,I,99.990,I
2303071256,IJO,01.885,-,I,99.990,I
2303071256,KLS,02.161,+,I,99.990,I
2303071256,KLA,02.132,+,I,99.990,I
2303071256,GRA,02.074,+,I,99.990,I
2303071407,PAS,42.835,+,I,99.990,I
2303071407,PUS,42.959,-,I,99.990,I
2303071407,LAB,43.000,+,I,99.990,I
2303071407,KLS,43.168,+,I,99.990,I
2303071407,KLA,42.141,+,I,99.990,I
2303071407,IJO,43.231,-,I,99.990,I
2303071407,GRA,43.195,+,I,99.990,I
2303071458,PUS,10.036,-,I,99.990,I
2303071458,PAS,10.131,-,I,99.990,I
2303071458,LAB,10.169,+,I,99.990,I
2303071458,GRA,10.286,-,I,99.990,I
2303071458,KLA,10.236,+,I,99.990,I
2303071458,KLS,10.274,+,I,99.990,I
2303071458,JRO,10.629,-,I,99.990,I
2303071458,PLA,11.125,-,I,99.990,I
2303071703,PAS,27.253,-,I,99.990,I
2303071703,PUS,27.275,+,I,99.990,I
2303071703,GRA,27.430,-,I,99.990,I
2303071703,LAB,27.408,-,I,99.990,I
2303071703,KLS,27.434,-,I,99.990,I
2303071703,KLA,27.403,-,I,99.990,I
2303071908,PUS,09.114,+,I,99.990,I
2303071908,PAS,09.151,+,I,99.990,I
2303071908,GRA,09.135,+,I,99.990,I
2303071908,LAB,09.226,-,I,99.990,I
2303071908,KLA,09.338,+,I,99.990,I
2303071908,KLS,09.366,+,I,99.990,I

2303071908,PLA,10.359,-,I,99.990,I

2303072011,PUS,48.398,-,I,99.990,I

2303072011,PAS,48.330,+,I,99.990,I

2303072011,GRA,48.554,+,I,99.990,I

2303072011,IJO,48.588,+,I,99.990,I

2303072011,LAB,48.500,+,I,99.990,I

2303072011,KLA,48.680,-,I,99.990,I

2303072011,KLS,48.700,-,I,99.990,I

2303072051,PAS,11.727,-,I,99.990,I

2303072051,PUS,11.734,-,I,99.990,I

2303072051,GRA,12.036,+,I,99.990,I

2303072051,LAB,12.075,+,I,99.990,I

2303072051,KLS,12.026,+,I,99.990,I

2303072051,KLA,12.017,+,I,99.990,I

2303072051,IJO,12.160,+,I,99.990,I

2303072051,JRO,12.599,-,I,99.990,I

2303072051,PLA,12.242,+,I,99.990,I

2303080237,PUS,00.720,+,I,99.990,I

2303080237,PAS,00.784,+,I,99.990,I

2303080237,GRA,00.844,+,I,99.990,I

2303080237,LAB,00.842,-,I,99.990,I

2303080237,KLS,00.881,-,I,99.990,I

2303080237,KLA,00.860,-,I,99.990,I

2303080237,JRO,01.573,-,I,99.990,I

2303080237,PLA,02.072,-,I,99.990,I

2303080742,PUS,55.657,+,I,99.990,I

2303080742,PAS,55.657,-,I,99.990,I

2303080742,LAB,55.803,-,I,99.990,I

2303080742,GRA,55.860,+,I,99.990,I

2303080742,KLS,56.066,-,I,99.990,I

2303080742,KLA,56.021,-,I,99.990,I

2303080742,PLA,56.947,+,E,99.990,I

2303080838,PAS,59.709,+,I,99.990,I

2303080838,GRA,00.118,-,I,99.990,I

2303080838,IJO,00.368,-,I,99.990,I

2303080838,KLA,00.364,+,I,99.990,I

2303080838,KLS,00.388,+,I,99.990,I

2303080838,PLA,01.581,-,E,99.990,I

2303081213,PAS,16.776,-,I,99.990,I

2303081213,PUS,16.925,-,I,99.990,I

2303081213,LAB,16.853,+,I,99.990,I
 2303081213,KLS,16.891,+,I,99.990,I
 2303081213,KLA,16.863,+,I,99.990,I
 2303081213,GRA,16.947,+,I,99.990,I
 2303081213,IJO,17.083,-,I,99.990,I

2303081923,PAS,24.134,+,I,99.990,I
 2303081923,PUS,24.190,+,I,99.990,I
 2303081923,LAB,24.311,-,I,99.990,I
 2303081923,KLA,24.394,+,I,99.990,I
 2303081923,KLS,24.432,+,I,99.990,I
 2303081923,JRO,24.850,+,I,99.990,I
 2303081923,PLA,25.539,-,I,99.990,I

2303020010,PUS,36.376,-,I,99.990,I
 2303020010,PAS,36.351,+,I,99.990,I
 2303020010,GRA,36.513,+,I,99.990,I
 2303020010,LAB,36.418,-,I,99.990,I
 2303020010,IJO,36.438,+,I,99.990,I
 2303020010,KLS,36.565,+,I,99.990,I
 2303020010,KLA,36.539,+,I,99.990,I
 2303020010,JRO,37.108,-,I,99.990,I
 2303020010,PLA,37.648,-,I,99.990,I

2303020026,PAS,43.309,+,I,99.990,I
 2303020026,PUS,43.379,-,I,99.990,I
 2303020026,LAB,43.475,+,I,99.990,I
 2303020026,KLA,43.550,+,I,99.990,I
 2303020026,GRA,43.575,+,I,99.990,I

2303090544,PAS,20.565,-,I,99.990,I
 2303090544,PUS,20.612,-,I,99.990,I
 2303090544,LAB,20.615,+,I,99.990,I
 2303090544,KLA,20.739,-,I,99.990,I
 2303090544,KLS,20.739,-,I,99.990,I
 2303090544,JRO,21.219,+,I,99.990,I
 2303090544,PLA,21.759,+,I,99.990,I

2303090636,PAS,53.176,+,I,99.990,I
 2303090636,PUS,53.215,+,I,99.990,I
 2303090636,LAB,53.248,+,I,99.990,I
 2303090636,KLA,53.204,-,I,99.990,I
 2303090636,KLS,53.202,-,I,99.990,I
 2303090636,JRO,53.648,-,I,99.990,I
 2303090636,PLA,54.168,-,I,99.990,I

2303090922,PAS,52.115,-,I,99.990,I
 2303090922,PUS,52.143,+,I,99.990,I
 2303090922,LAB,52.239,+,I,99.990,I
 2303090922,KLA,52.317,-,I,99.990,I
 2303090922,KLS,52.347,-,I,99.990,I
 2303090922,IJO,52.475,-,I,99.990,I
 2303090922,JRO,52.794,+,I,99.990,I
 2303090922,PLA,53.403,+,I,99.990,I

2303091019,PAS,35.560,+,I,99.990,I
 2303091019,PUS,35.629,-,I,99.990,I
 2303091019,KLS,35.793,+,I,99.990,I
 2303091019,KLA,35.761,+,I,99.990,I
 2303091019,LAB,35.734,+,I,99.990,I
 2303091019,IJO,35.972,+,I,99.990,I
 2303091019,JRO,36.365,-,I,99.990,I

2303091111,PAS,55.624,+,I,99.990,I
 2303091111,PUS,55.670,-,I,99.990,I
 2303091111,KLA,55.782,+,I,99.990,I
 2303091111,LAB,55.782,+,I,99.990,I
 2303091111,KLS,55.833,+,I,99.990,I
 2303091111,IJO,55.968,-,I,99.990,I
 2303091111,JRO,56.341,-,I,99.990,I
 2303091111,PLA,56.928,+,I,99.990,I

2303091452,LAB,26.745,-,I,99.990,I
 2303091452,IJO,27.214,+,I,99.990,I
 2303091452,JRO,27.447,-,I,99.990,I
 2303091452,PLA,27.622,+,I,99.990,I
 2303091719,PAS,20.879,+,I,99.990,I
 2303091719,PUS,20.934,-,I,99.990,I
 2303091719,LAB,21.133,-,I,99.990,I
 2303091719,KLS,21.147,+,I,99.990,I
 2303091719,KLA,21.165,+,I,99.990,I
 2303091719,JRO,21.718,-,I,99.990,I

2303091837,PUS,39.299,+,I,99.990,I
 2303091837,PAS,39.332,+,I,99.990,I
 2303091837,IJO,39.565,-,I,99.990,I
 2303091837,LAB,39.564,+,I,99.990,I
 2303091837,KLA,39.653,-,I,99.990,I
 2303091837,KLS,39.680,-,I,99.990,I
 2303091837,JRO,40.214,+,I,99.990,I
 2303091837,PLA,40.755,+,I,99.990,I
 2303092005,PAS,15.289,+,I,99.990,I

2303092005,PUS,15.331,-,I,99.990,I
 2303092005,IJO,15.506,-,I,99.990,I
 2303092005,KLA,15.548,-,I,99.990,I
 2303092005,KLS,15.594,-,I,99.990,I
 2303092005,LAB,15.432,+,I,99.990,I
 2303092005,JRO,16.040,-,I,99.990,I
 2303092005,PLA,16.695,+,I,99.990,I

2303092006,PAS,13.894,+,I,99.990,I
 2303092006,PUS,14.041,-,I,99.990,I
 2303092006,LAB,14.119,+,I,99.990,I
 2303092006,KLA,14.100,+,I,99.990,I
 2303092006,KLS,14.110,+,I,99.990,I
 2303092006,IJO,14.159,+,I,99.990,I
 2303092006,JRO,14.581,-,I,99.990,I
 2303092006,PLA,15.189,+,I,99.990,I

2303092026,PAS,08.497,+,I,99.990,I
 2303092026,PUS,08.563,+,I,99.990,I
 2303092026,LAB,08.629,+,I,99.990,I
 2303092026,KLA,08.704,-,I,99.990,I
 2303092026,KLS,08.731,-,I,99.990,I
 2303092026,JRO,09.218,-,I,99.990,I
 2303092026,PLA,09.725,+,I,99.990,I

2303092253,PAS,30.491,-,I,99.990,I
 2303092253,PUS,30.610,-,I,99.990,I
 2303092253,LAB,30.679,-,I,99.990,I
 2303092253,GRA,30.795,+,I,99.990,I
 2303092253,KLA,30.803,+,I,99.990,I
 2303092253,KLS,30.803,+,I,99.990,I
 2303092253,IJO,30.879,+,I,99.990,I
 2303092253,PLA,31.944,-,I,99.990,I

2303100655,PUS,36.236,+,I,99.990,I
 2303100655,PAS,36.209,+,I,99.990,I
 2303100655,GRA,36.349,-,I,99.990,I
 2303100655,LAB,36.339,-,I,99.990,I
 2303100655,IJO,36.385,+,I,99.990,I
 2303100655,KLA,36.439,+,I,99.990,I
 2303100655,KLS,36.470,+,I,99.990,I

2303101437,PAS,41.205,-,I,99.990,I
 2303101437,PUS,41.254,-,I,99.990,I
 2303101437,GRA,41.637,+,I,99.990,I
 2303101437,IJO,41.883,-,I,99.990,I

2303101437,KLS,41.735,-,I,99.990,I
 2303101437,KLA,41.824,-,I,99.990,I

 2303101722,PUS,02.529,-,I,99.990,I
 2303101722,IJO,02.604,-,I,99.990,I
 2303101722,GRA,02.638,+,I,99.990,I
 2303101722,LAB,02.647,+,I,99.990,I
 2303101722,KLA,02.697,+,I,99.990,I
 2303101722,KLS,02.720,+,I,99.990,I

 2303110659,PUS,36.443,+,I,99.990,I
 2303110659,IJO,36.549,+,I,99.990,I
 2303110659,LAB,36.729,-,I,99.990,I
 2303110659,GRA,36.807,+,I,99.990,I
 2303110659,KLA,37.054,-,I,99.990,I
 2303110659,KLS,37.059,-,I,99.990,I
 2303110659,PLA,37.926,-,I,99.990,I

 2303110713,PUS,23.216,+,I,99.990,I
 2303110713,GRA,23.465,-,I,99.990,I
 2303110713,LAB,23.449,+,I,99.990,I
 2303110713,KLS,23.620,-,I,99.990,I
 2303110713,KLA,23.579,-,I,99.990,I

 2303020509,PUS,57.298,+,I,99.990,I
 2303020509,PAS,57.199,+,I,99.990,I
 2303020509,GRA,57.322,+,I,99.990,I
 2303020509,KLA,57.341,+,I,99.990,I
 2303020509,KLS,57.363,+,I,99.990,I
 2303020509,LAB,57.266,-,I,99.990,I

 2303111834,PAS,59.004,+,I,99.990,I
 2303111834,LAB,59.113,+,I,99.990,I
 2303111834,GRA,59.175,-,I,99.990,I
 2303111834,KLS,59.149,+,I,99.990,I
 2303111834,KLA,59.119,+,I,99.990,I
 2303111834,IJO,59.158,-,I,99.990,I

 2303020756,KLS,54.056,+,I,99.990,I
 2303020756,PAS,53.729,+,I,99.990,I
 2303020756,PUS,53.752,+,I,99.990,I
 2303020756,GRA,53.972,+,I,99.990,I
 2303020756,LAB,53.999,+,I,99.990,I
 2303020756,KLA,54.025,+,I,99.990,I
 2303020756,JRO,54.514,-,I,99.990,I
 2303021017,PAS,51.518,-,I,99.990,I

2303021017,PUS,51.594,+,I,99.990,I
 2303021017,GRA,51.659,+,I,99.990,I
 2303021017,LAB,51.600,+,I,99.990,I
 2303021017,KLA,51.690,-,I,99.990,I
 2303021017,KLS,51.719,-,I,99.990,I
 2303021017,JRO,52.173,-,I,99.990,I

 2303021725,PAS,42.069,+,I,99.990,I
 2303021725,PUS,42.072,-,I,99.990,I
 2303021725,KLA,42.185,+,I,99.990,I
 2303021725,KLS,42.200,+,I,99.990,I
 2303021725,GRA,42.274,+,I,99.990,I
 2303021725,JRO,42.614,+,I,99.990,I

 2303021814,PAS,52.266,-,I,99.990,I
 2303021814,PUS,52.306,+,I,99.990,I
 2303021814,GRA,52.415,-,I,99.990,I
 2303021814,LAB,52.385,+,I,99.990,I
 2303021814,KLS,52.489,-,I,99.990,I
 2303021814,KLA,52.450,-,I,99.990,I
 2303021814,JRO,52.968,+,I,99.990,I
 2303021814,PLA,53.529,+,I,99.990,I

 2303021933,PAS,48.060,-,I,99.990,I
 2303021933,PUS,48.191,-,I,99.990,I
 2303021933,GRA,48.156,+,I,99.990,I
 2303021933,KLA,48.111,+,I,99.990,I
 2303021933,KLS,48.137,+,I,99.990,I
 2303021933,LAB,48.112,+,I,99.990,I
 2303021933,JRO,48.476,+,I,99.990,I

 2303022313,LAB,27.721,-,I,99.990,I
 2303022313,PLA,27.730,+,I,99.990,I
 2303022313,KLS,27.981,+,I,99.990,I
 2303022313,KLA,27.949,+,I,99.990,I

 2303030032,PAS,01.669,-,I,99.990,I
 2303030032,LAB,01.749,+,I,99.990,I
 2303030032,KLA,01.876,+,I,99.990,I
 2303030032,KLS,01.866,+,I,99.990,I
 2303030032,JRO,02.139,+,I,99.990,I
 2303030032,GRA,02.138,-,I,99.990,I
 2303030055,PUS,12.924,+,I,99.990,I
 2303030055,PAS,13.049,+,I,99.990,I
 2303030055,LAB,13.504,-,I,99.990,I
 2303030055,KLS,13.594,+,I,99.990,I

2303030055,KLA,13.563,+,I,99.990,I
 2303030055,JRO,14.092,-,I,99.990,I

 2303030349,PUS,05.652,-,I,99.990,I
 2303030349,IJO,05.779,-,I,99.990,I
 2303030349,LAB,05.756,+,I,99.990,I
 2303030349,KLA,05.809,+,I,99.990,I
 2303030349,KLS,05.815,+,I,99.990,I
 2303030349,JRO,06.342,-,I,99.990,I
 2303030349,PLA,06.946,+,I,99.990,I

 2303030520,PUS,36.709,-,I,99.990,I
 2303030520,GRA,36.878,-,I,99.990,I
 2303030520,LAB,36.966,+,I,99.990,I
 2303030520,KLA,37.010,+,I,99.990,I
 2303030520,KLS,37.061,+,I,99.990,I
 2303030520,JRO,37.498,+,I,99.990,I

 2303030722,PUS,03.304,+,I,99.990,I
 2303030722,PAS,03.397,-,I,99.990,I
 2303030722,LAB,03.537,-,I,99.990,I
 2303030722,KLS,03.648,+,I,99.990,I
 2303030722,KLA,03.604,+,I,99.990,I
 2303030722,JRO,04.127,-,I,99.990,I
 2303030722,PLA,04.656,-,I,99.990,I

 2303030930,PAS,54.999,+,I,99.990,I
 2303030930,PUS,55.015,-,I,99.990,I
 2303030930,GRA,55.091,+,I,99.990,I
 2303030930,KLA,55.082,+,I,99.990,I
 2303030930,KLS,55.108,+,I,99.990,I
 2303030930,LAB,55.189,+,I,99.990,I
 2303030930,JRO,55.651,-,I,99.990,I

 2303011221,PAS,24.890,+,I,99.990,I
 2303011221,LAB,25.029,+,I,99.990,I
 2303011221,IJO,25.152,+,I,99.990,I
 2303011221,GRA,25.008,+,I,99.990,I
 2303011221,KLS,25.149,-,I,99.990,I
 2303011221,PUS,24.908,-,I,99.990,I
 2303011221,KLA,25.170,-,I,99.990,I
 2303011221,JRO,25.565,-,I,99.990,I
 2303031340,PUS,14.067,-,I,99.990,I
 2303031340,PAS,14.140,+,I,99.990,I
 2303031340,IJO,14.099,+,I,99.990,I
 2303031340,LAB,14.259,+,I,99.990,I

2303031340,KLS,14.329,+,I,99.990,I
 2303031340,KLA,14.298,+,I,99.990,I
 2303031340,JRO,14.810,-,I,99.990,I

 2303031619,PAS,07.915,-,I,99.990,I
 2303031619,PUS,08.063,+,I,99.990,I
 2303031619,LAB,07.965,-,I,99.990,I
 2303031619,KLS,08.103,+,I,99.990,I
 2303031619,KLA,08.049,+,I,99.990,I
 2303031619,GRA,08.164,+,I,99.990,I
 2303031619,JRO,08.482,+,I,99.990,I

 2303031701,PAS,41.227,-,I,99.990,I
 2303031701,PUS,41.362,-,I,99.990,I
 2303031701,KLA,41.332,+,I,99.990,I
 2303031701,KLS,41.345,+,I,99.990,I
 2303031701,LAB,41.352,-,I,99.990,I
 2303031701,GRA,41.515,-,I,99.990,I
 2303031701,IJO,41.683,+,I,99.990,I

 2303031919,PAS,29.959,-,I,99.990,I
 2303031919,PUS,30.081,-,I,99.990,I
 2303031919,GRA,30.019,-,I,99.990,I
 2303031919,LAB,30.015,+,I,99.990,I
 2303031919,KLS,30.001,+,I,99.990,I
 2303031919,KLA,29.992,+,I,99.990,I
 2303031919,IJO,30.112,+,I,99.990,I
 2303031919,JRO,30.553,-,I,99.990,I

 2303032204,PAS,47.497,-,I,99.990,I
 2303032204,PUS,47.729,-,I,99.990,I
 2303032204,LAB,47.507,+,I,99.990,I
 2303032204,KLS,47.774,+,I,99.990,I
 2303032204,KLA,47.755,+,I,99.990,I
 2303032204,IJO,47.876,+,I,99.990,I
 2303032204,GRA,48.019,-,I,99.990,I
 2303032204,JRO,48.077,-,I,99.990,I
 2303032204,PLA,48.669,-,I,99.990,I

 2303032227,PUS,27.556,-,I,99.990,I
 2303032227,IJO,27.688,+,I,99.990,I
 2303032227,KLA,27.773,+,I,99.990,I
 2303032227,KLS,27.802,+,I,99.990,I
 2303032227,GRA,27.855,-,I,99.990,I

 2303040640,PAS,24.946,+,I,99.990,I

2303040640,PUS,25.028,-,I,99.990,I
 2303040640,LAB,25.248,+,I,99.990,I
 2303040640,KLA,25.330,-,I,99.990,I
 2303040640,KLS,25.220,+,I,99.990,I
 2303040640,IJO,25.413,+,I,99.990,I
 2303040640,JRO,26.213,+,I,99.990,I
 2303040640,PLA,25.939,+,I,99.990,I

2303041452,PAS,10.810,+,I,99.990,I
 2303041452,PUS,10.841,-,I,99.990,I
 2303041452,LAB,10.849,-,I,99.990,I
 2303041452,IJO,10.918,-,I,99.990,I
 2303041452,KLA,10.919,+,I,99.990,I
 2303041452,KLS,10.973,+,I,99.990,I
 2303041452,JRO,11.318,+,I,99.990,I

2303011420,PAS,16.493,+,I,99.990,I
 2303011420,KLA,16.668,+,I,99.990,I
 2303011420,KLS,16.713,+,I,99.990,I
 2303011420,GRA,16.672,-,I,99.990,I
 2303011420,JRO,17.252,-,I,99.990,I
 2303011420,PLA,17.994,-,I,99.990,I

2303041903,PUS,24.599,-,I,99.990,I
 2303041903,PAS,24.728,+,I,99.990,I
 2303041903,IJO,24.836,-,I,99.990,I
 2303041903,LAB,24.966,-,I,99.990,I
 2303041903,GRA,24.986,-,I,99.990,I
 2303041903,KLA,25.145,+,I,99.990,I
 2303041903,KLS,25.173,+,I,99.990,I
 2303041903,JRO,25.735,+,I,99.990,I

2303041912,PAS,11.319,+,I,99.990,I
 2303041912,PUS,11.365,+,I,99.990,I
 2303041912,GRA,11.474,+,I,99.990,I
 2303041912,KLA,11.531,-,I,99.990,I
 2303041912,LAB,11.537,+,I,99.990,I
 2303041912,KLS,11.570,-,I,99.990,I
 2303041912,JRO,11.967,+,I,99.990,I
 2303041912,PLA,12.574,+,I,99.990,I

2303042015,PUS,19.909,-,I,99.990,I
 2303042015,LAB,20.001,+,I,99.990,I
 2303042015,KLA,20.075,+,I,99.990,I
 2303042015,KLS,20.102,+,I,99.990,I
 2303042015,JRO,20.479,+,I,99.990,I

2303042015,PLA,21.013,+,I,99.990,I

2303042119,PAS,23.395,+,I,99.990,I

2303042119,GRA,23.482,+,I,99.990,I

2303042119,IJO,23.540,-,I,99.990,I

2303042119,KLA,23.600,+,I,99.990,I

2303042119,KLS,23.601,+,I,99.990,I

2303042119,PLA,24.547,+,I,99.990,I

2303050126,PAS,23.252,-,I,99.990,I

2303050126,PUS,23.261,+,I,99.990,I

2303050126,GRA,23.413,+,I,99.990,I

2303050126,LAB,23.493,+,I,99.990,I

2303050126,KLA,23.584,-,I,99.990,I

2303050126,KLS,23.604,-,I,99.990,I

2303050126,JRO,24.212,-,I,99.990,I

2303050126,PLA,24.760,+,I,99.990,I

2303050301,PAS,52.040,+,I,99.990,I

2303050301,PUS,52.169,-,I,99.990,I

2303050301,GRA,52.175,+,I,99.990,I

2303050301,LAB,52.199,+,I,99.990,I

2303050301,KLA,52.308,+,I,99.990,I

2303050301,KLS,52.318,+,I,99.990,I

2303050301,IJO,52.323,-,I,99.990,I

2303050301,JRO,52.844,-,I,99.990,I

2303050301,PLA,53.321,+,I,99.990,I

2303011604,PUS,15.698,+,I,99.990,I

2303011604,PAS,15.762,+,I,99.990,I

2303011604,IJO,15.787,+,I,99.990,I

2303011604,GRA,16.045,+,I,99.990,I

2303011604,KLS,16.179,+,I,99.990,I

2303011604,JRO,16.727,-,I,99.990,I

2303050456,PUS,16.733,-,I,99.990,I

2303050456,GRA,16.747,+,I,99.990,I

2303050456,PAS,16.770,-,I,99.990,I

2303050456,IJO,16.786,-,I,99.990,I

2303050456,LAB,16.794,+,I,99.990,I

2303050456,KLA,16.849,+,I,99.990,I

2303050456,KLS,16.896,+,I,99.990,I

2303050456,JRO,17.256,+,I,99.990,I

2303050456,PLA,17.777,+,I,99.990,I

2303011615,LAB,28.463,+,I,99.990,I

2303011615,PAS,28.440,+,I,99.990,I
 2303011615,PUS,28.414,+,I,99.990,I
 2303011615,IJO,28.527,+,I,99.990,I
 2303011615,KLA,28.550,-,I,99.990,I
 2303011615,KLS,28.580,-,I,99.990,I
 2303011615,GRA,28.588,-,I,99.990,I
 2303011615,PLA,29.325,-,I,99.990,I

2303051025,PAS,48.707,+,I,99.990,I
 2303051025,PUS,48.799,+,I,99.990,I
 2303051025,KLA,48.829,+,I,99.990,I
 2303051025,LAB,48.867,+,I,99.990,I
 2303051025,KLS,48.869,+,I,99.990,I
 2303051025,GRA,49.067,+,I,99.990,I

2303060434,PAS,18.635,+,I,99.990,I
 2303060434,PUS,18.693,-,I,99.990,I
 2303060434,KLA,18.829,+,I,99.990,I
 2303060434,LAB,18.850,+,I,99.990,I
 2303060434,KLS,18.872,+,I,99.990,I
 2303060434,JRO,19.399,-,I,99.990,I
 2303060434,PLA,19.900,+,I,99.990,I

2303060455,PUS,35.858,-,I,99.990,I
 2303060455,PAS,35.859,-,I,99.990,I
 2303060455,LAB,35.909,+,I,99.990,I
 2303060455,KLA,35.932,+,I,99.990,I
 2303060455,KLS,35.961,+,I,99.990,I
 2303060455,JRO,36.315,+,I,99.990,I
 2303060455,PLA,36.924,+,I,99.990,I

2303061516,PAS,25.584,+,I,99.990,I
 2303061516,PUS,25.775,+,I,99.990,I
 2303061516,LAB,25.949,-,I,99.990,I
 2303061516,KLS,25.960,+,I,99.990,I
 2303061516,GRA,26.013,-,I,99.990,I
 2303061516,IJO,26.084,+,I,99.990,I

2303011910,LAB,32.395,+,I,99.990,I
 2303011910,KLA,32.406,+,I,99.990,I
 2303011910,KLS,32.438,+,I,99.990,I
 2303011910,JRO,32.981,+,I,99.990,I
 2303011910,PUS,32.178,-,I,99.990,I
 2303011910,PAS,32.267,-,I,99.990,I
 2303011910,GRA,32.337,-,I,99.990,I
 2303061709,PUS,03.256,+,I,99.990,I

2303061709,PAS,03.304,-,I,99.990,I
 2303061709,IJO,03.351,+,I,99.990,I
 2303061709,GRA,03.498,-,I,99.990,I
 2303061709,KLA,03.755,-,I,99.990,I
 2303061709,KLS,03.779,-,I,99.990,I

2303061857,PUS,40.620,+,I,99.990,I
 2303061857,PAS,40.676,+,I,99.990,I
 2303061857,IJO,40.686,-,I,99.990,I
 2303061857,LAB,40.726,-,I,99.990,I
 2303061857,GRA,40.782,-,I,99.990,I
 2303061857,KLA,40.817,+,I,99.990,I
 2303061857,KLS,40.859,+,I,99.990,I
 2303061857,PLA,41.700,-,I,99.990,I

2303062219,PAS,20.840,+,I,99.990,I
 2303062219,LAB,20.979,+,I,99.990,I
 2303062219,KLA,20.998,+,I,99.990,I
 2303062219,KLS,21.019,+,I,99.990,I
 2303062219,IJO,21.283,-,I,99.990,I
 2303062219,GRA,21.320,+,I,99.990,I
 2303062219,PLA,22.207,+,I,99.990,I

2303070056,PAS,17.720,+,I,99.990,I
 2303070056,PUS,17.837,-,I,99.990,I
 2303070056,LAB,17.861,-,I,99.990,I
 2303070056,GRA,17.951,-,I,99.990,I
 2303070056,KLA,17.960,+,I,99.990,I
 2303070056,KLS,17.975,+,I,99.990,I
 2303070056,IJO,18.079,+,I,99.990,I
 2303070056,PLA,19.013,-,I,99.990,I

2303070233,PUS,31.001,+,I,99.990,I
 2303070233,PAS,31.080,+,I,99.990,I
 2303070233,LAB,31.136,-,I,99.990,I
 2303070233,IJO,31.262,+,I,99.990,I
 2303070233,GRA,31.384,+,I,99.990,I
 2303070233,KLA,31.399,+,I,99.990,I
 2303070233,KLS,31.412,+,I,99.990,I
 2303070233,PLA,32.219,-,I,99.990,I

2303070348,PUS,53.762,-,I,99.990,I
 2303070348,KLA,53.881,+,I,99.990,I
 2303070348,KLS,53.926,+,I,99.990,I
 2303070348,IJO,53.993,+,I,99.990,I
 2303070348,GRA,54.175,-,I,99.990,I

2303070348,JRO,54.200,+,I,99.990,I
2303070348,PLA,54.665,-,I,99.990,I
9999999999

Lampiran 2. Tabel data input *Arrival.dat* (VTB) di *Software GAD*

2303010932,JRO,18.871,+,I,99.990,I
2303010932,LAB,18.410,+,I,99.990,I
2303010932,IJO,18.742,+,I,99.990,I
2303010932,GRA,18.498,-,I,99.990,I
2303010932,PLA,19.644,-,I,99.990,I
2303010932,MBB,20.349,-,I,99.990,I
2303120054,PAS,52.968,+,I,99.990,I
2303120054,PUS,53.107,-,I,99.990,I
2303120054,KLA,53.121,-,I,99.990,I
2303120054,KLS,53.177,-,I,99.990,I
2303120054,GRA,53.386,-,I,99.990,I
2303120054,LAB,53.469,-,I,99.990,I
2303120054,IJO,53.693,+,I,99.990,I
2303120411,GRA,49.882,+,I,99.990,I
2303120411,KLA,49.504,+,I,99.990,I
2303120411,LAB,49.666,+,I,99.990,I
2303120411,JRO,51.126,+,I,99.990,I
2303120411,PLA,50.695,+,I,99.990,I
2303120411,PAS,49.707,-,I,99.990,I
2303120411,IJO,49.342,-,I,99.990,I
2303121412,PUS,38.308,+,I,99.990,I
2303121412,PAS,38.295,+,I,99.990,I
2303121412,IJO,38.974,+,I,99.990,I
2303121412,KLA,38.417,+,I,99.990,I
2303121412,JRO,39.123,+,I,99.990,I
2303121412,PLA,39.530,+,I,99.990,I
2303121412,KLS,38.417,-,I,99.990,I
2303121412,MBB,38.454,-,I,99.990,I
2303121442,GRA,19.131,+,I,99.990,I
2303121442,PAS,18.725,+,I,99.990,I
2303121442,PUS,18.698,+,I,99.990,I
2303121442,IJO,19.402,+,I,99.990,I
2303121442,LAB,19.253,+,I,99.990,I
2303121442,JRO,19.646,+,I,99.990,I
2303121442,PLA,20.187,+,I,99.990,I

2303121442,KLS,18.901,-,I,99.990,I
 2303121442,KLA,19.010,-,I,99.990,I

2303121445,PUS,22.871,+,I,99.990,I
 2303121445,IJO,23.406,+,I,99.990,I
 2303121445,PAS,22.770,+,I,99.990,I
 2303121445,LAB,23.189,+,I,99.990,I
 2303121445,JRO,24.434,+,I,99.990,I
 2303121445,GRA,23.318,-,I,99.990,I
 2303121445,KLA,23.013,-,I,99.990,I
 2303121445,KLS,22.973,-,I,99.990,I

2303121524,PUS,24.036,+,I,99.990,I
 2303121524,PAS,23.939,+,I,99.990,I
 2303121524,LAB,24.258,+,I,99.990,I
 2303121524,JRO,25.063,+,I,99.990,I
 2303121524,KLS,24.119,-,I,99.990,I
 2303121524,KLA,24.133,-,I,99.990,I

2303020958,PUS,29.936,+,I,99.990,I
 2303020958,PAS,30.098,+,I,99.990,I
 2303020958,LAB,30.449,+,I,99.990,I
 2303020958,GRA,30.530,+,I,99.990,I
 2303020958,KLA,30.287,+,I,99.990,I
 2303020958,JRO,31.016,+,I,99.990,I
 2303020958,PLA,31.610,+,I,99.990,I
 2303020958,KLS,30.139,-,I,99.990,I

2303140759,PUS,06.164,+,I,99.990,I
 2303140759,LAB,06.523,+,I,99.990,I
 2303140759,JRO,06.887,+,I,99.990,I
 2303140759,PLA,07.639,+,I,99.990,I
 2303140759,PAS,06.123,-,I,99.990,I

2303142204,GRA,43.498,+,I,99.990,I
 2303142204,JRO,44.032,+,I,99.990,I
 2303142204,PLA,44.144,+,I,99.990,I
 2303142204,PUS,43.028,-,I,99.990,I
 2303142204,PAS,43.071,-,I,99.990,I
 2303142204,LAB,43.428,-,I,99.990,I
 2303142204,KLA,43.148,-,I,99.990,I

2303150514,GRA,48.525,+,I,99.990,I
 2303150514,JRO,49.310,+,I,99.990,I
 2303150514,MBB,50.348,+,I,99.990,I
 2303150514,PUS,48.053,-,I,99.990,I

2303150514,IJO,48.755,-,I,99.990,I
 2303150514,PLA,50.051,-,I,99.990,I

 2303150533,PUS,28.743,+,I,99.990,I
 2303150533,PAS,28.593,+,I,99.990,I
 2303150533,LAB,29.151,+,I,99.990,I
 2303150533,IJO,29.301,+,I,99.990,I
 2303150533,GRA,29.097,+,I,99.990,I
 2303150533,KLA,28.825,+,I,99.990,I
 2303150533,MBB,30.961,+,I,99.990,I
 2303150533,KLS,28.798,-,I,99.990,I

 2303161002,PAS,15.037,+,I,99.990,I
 2303161002,KLA,15.230,+,I,99.990,I
 2303161002,KLS,15.286,+,I,99.990,I
 2303161002,PUS,15.078,-,I,99.990,I
 2303161002,LAB,15.451,-,I,99.990,I
 2303161002,JRO,15.907,-,I,99.990,I

 2303161815,PUS,44.603,+,I,99.990,I
 2303161815,KLA,44.741,+,I,99.990,I
 2303161815,JRO,45.336,+,I,99.990,I
 2303161815,LAB,44.769,-,I,99.990,I
 2303161815,PAS,44.561,-,I,99.990,I

 2303210411,GRA,51.667,+,I,99.990,I
 2303210411,LAB,51.437,+,I,99.990,I
 2303210411,IJO,51.640,+,I,99.990,I
 2303210411,PLA,52.613,+,I,99.990,I
 2303210411,KLA,51.220,-,I,99.990,I

 2303210607,KLA,06.379,+,I,99.990,I
 2303210607,PAS,06.056,+,I,99.990,I
 2303210607,LAB,06.553,+,I,99.990,I
 2303210607,IJO,06.835,+,I,99.990,I
 2303210607,KLS,06.231,-,I,99.990,I
 2303210607,PUS,06.150,-,I,99.990,I
 2303210607,GRA,06.486,-,I,99.990,I

 2303210805,PAS,13.857,+,I,99.990,I
 2303210805,PUS,13.843,+,I,99.990,I
 2303210805,GRA,14.235,+,I,99.990,I
 2303210805,KLS,13.958,+,I,99.990,I
 2303210805,KLA,13.944,+,I,99.990,I
 2303210805,IJO,14.566,+,I,99.990,I
 2303210805,LAB,14.363,-,I,99.990,I

2303031257,LAB,21.612,+,I,99.990,I
 2303031257,KLS,21.315,+,I,99.990,I
 2303031257,JRO,22.409,+,I,99.990,I
 2303031257,PUS,21.221,-,I,99.990,I
 2303031257,KLA,21.342,-,I,99.990,I

2303220235,LAB,54.281,+,I,99.990,I
 2303220235,JRO,54.753,+,I,99.990,I
 2303220235,PUS,53.971,-,I,99.990,I
 2303220235,KLS,54.092,-,I,99.990,I
 2303220235,KLA,54.052,-,I,99.990,I
 2303220235,GRA,54.335,-,I,99.990,I

2303232121,GRA,43.003,+,I,99.990,I
 2303232121,LAB,42.814,+,I,99.990,I
 2303232121,JRO,43.418,+,I,99.990,I
 2303232121,KLA,42.625,-,I,99.990,I
 2303232121,IJO,43.428,-,I,99.990,I

2303241644,LAB,02.739,+,I,99.990,I
 2303241644,PUS,02.492,+,I,99.990,I
 2303241644,IJO,02.888,+,I,99.990,I
 2303241644,KLS,02.619,-,I,99.990,I
 2303241644,PAS,02.428,-,I,99.990,I

2303241753,PUS,46.690,+,I,99.990,I
 2303241753,IJO,47.272,+,I,99.990,I
 2303241753,JRO,47.881,+,I,99.990,I
 2303241753,PLA,48.043,+,I,99.990,I
 2303241753,PAS,46.650,-,I,99.990,I
 2303241753,LAB,47.048,-,I,99.990,I
 2303241753,KLA,46.696,-,I,99.990,I
 2303241753,KLS,46.744,-,I,99.990,I

2303242243,PAS,23.401,+,I,99.990,I
 2303242243,IJO,23.964,+,I,99.990,I
 2303242243,JRO,24.367,+,I,99.990,I
 2303242243,PLA,25.048,+,I,99.990,I
 2303242243,PUS,23.492,-,I,99.990,I
 2303242243,KLA,23.665,-,I,99.990,I
 2303242243,KLS,23.693,-,I,99.990,I
 2303242243,LAB,23.964,-,I,99.990,I

2303242244,PAS,26.312,+,I,99.990,I
 2303242244,PUS,26.394,-,I,99.990,I

2303242244,KLS,26.573,-,I,99.990,I
 2303242244,KLA,26.518,-,I,99.990,I

 2303250100,KLA,15.332,+,I,99.990,I
 2303250100,KLS,15.413,+,I,99.990,I
 2303250100,LAB,15.603,+,I,99.990,I
 2303250100,PUS,15.169,+,I,99.990,I
 2303250100,MBB,17.477,+,I,99.990,I
 2303250100,PAS,15.101,-,I,99.990,I
 2303250100,IJO,15.793,-,I,99.990,I

 2303250246,PAS,24.543,+,I,99.990,I
 2303250246,KLA,24.625,+,I,99.990,I
 2303250246,PUS,24.679,+,I,99.990,I
 2303250246,IJO,25.429,+,I,99.990,I
 2303250246,JRO,25.184,+,I,99.990,I
 2303250246,PLA,26.056,+,I,99.990,I
 2303250246,KLS,24.557,-,I,99.990,I
 2303250246,LAB,24.857,-,I,99.990,I
 2303250246,MBB,26.847,-,I,99.990,I

 2303250454,KLS,18.967,+,I,99.990,I
 2303250454,PUS,19.104,+,I,99.990,I
 2303250454,IJO,19.883,+,I,99.990,I
 2303250454,LAB,19.391,+,I,99.990,I
 2303250454,JRO,20.129,+,I,99.990,I
 2303250454,KLA,18.967,-,I,99.990,I
 2303250454,PAS,18.967,-,I,99.990,I

 2303250518,PAS,32.833,+,I,99.990,I
 2303250518,LAB,33.330,+,I,99.990,I
 2303250518,IJO,33.661,+,I,99.990,I
 2303250518,JRO,33.716,+,I,99.990,I
 2303250518,KLA,33.150,-,I,99.990,I
 2303250518,KLS,33.137,-,I,99.990,I
 2303250518,MBB,35.164,-,I,99.990,I

 2303251031,PUS,39.859,+,I,99.990,I
 2303251031,GRA,40.270,+,I,99.990,I
 2303251031,KLA,39.987,+,I,99.990,I
 2303251031,JRO,40.264,+,I,99.990,I
 2303251031,PLA,41.312,+,I,99.990,I
 2303251031,PAS,39.831,-,I,99.990,I
 2303251031,KLS,39.927,-,I,99.990,I

 2303251055,LAB,10.257,+,I,99.990,I

2303251055,PAS,09.878,+,I,99.990,I
 2303251055,KLS,10.229,+,I,99.990,I
 2303251055,PUS,09.939,-,I,99.990,I

 2303251201,LAB,07.973,+,I,99.990,I
 2303251201,PAS,07.851,+,I,99.990,I
 2303251201,JRO,08.382,+,I,99.990,I
 2303251201,KLA,07.974,+,I,99.990,I
 2303251201,KLS,07.647,+,I,99.990,I
 2303251201,MBB,10.015,+,I,99.990,I
 2303251201,PUS,07.565,-,I,99.990,I

 2303251233,PUS,08.252,+,I,99.990,I
 2303251233,PAS,08.320,+,I,99.990,I
 2303251233,IJO,08.835,+,I,99.990,I
 2303251233,LAB,08.686,+,I,99.990,I
 2303251233,PLA,09.648,+,I,99.990,I
 2303251233,MBB,10.542,+,I,99.990,I
 2303251233,GRA,08.848,-,I,99.990,I
 2303251233,KLS,08.435,-,I,99.990,I
 2303251233,KLA,08.421,-,I,99.990,I
 2303251233,JRO,09.458,-,I,99.990,I

 2303251234,KLA,42.202,+,I,99.990,I
 2303251234,PAS,41.991,+,I,99.990,I
 2303251234,PUS,42.013,+,I,99.990,I
 2303251234,IJO,42.667,+,I,99.990,I
 2303251234,PLA,43.455,+,I,99.990,I
 2303251234,KLS,42.188,-,I,99.990,I

 2303251304,PUS,50.230,+,I,99.990,I
 2303251304,PAS,50.223,+,I,99.990,I
 2303251304,LAB,50.677,+,I,99.990,I
 2303251304,JRO,51.214,+,I,99.990,I
 2303251304,KLA,50.432,-,I,99.990,I

 2303282334,PUS,32.500,+,I,99.990,I
 2303282334,PAS,32.487,+,I,99.990,I
 2303282334,JRO,33.465,+,I,99.990,I
 2303282334,PLA,34.050,+,I,99.990,I
 2303282334,MBB,35.096,+,I,99.990,I
 2303282334,LAB,32.868,-,I,99.990,I
 2303282334,GRA,33.126,-,I,99.990,I
 2303282334,KLS,32.854,-,I,99.990,I
 2303282334,KLA,32.868,-,I,99.990,I

```

2303041414,PUS,55.686,-,I,99.990,I
2303041414,LAB,56.149,-,I,99.990,I
2303041414,PAS,55.557,-,I,99.990,I
2303041414,GRA,56.115,-,I,99.990,I
2303041414,KLA,55.850,-,I,99.990,I
2303041414,KLS,55.870,-,I,99.990,I
2303041414,JRO,56.776,-,I,99.990,I

2303060719,PAS,36.536,+,I,99.990,I
2303060719,PUS,36.753,+,I,99.990,I
2303060719,KLA,36.848,+,I,99.990,I
2303060719,IJO,37.624,+,I,99.990,I
2303060719,LAB,37.188,+,I,99.990,I
2303060719,PLA,38.032,+,I,99.990,I
2303060719,KLS,36.794,-,I,99.990,I

999999999

```

Lampiran 3. Tabel data input Station.dat pada Notepad di Software GAD

10				(i2)
GRA	0.592	2.173	-2.046	(a3,2x,3f10.3)
IJO	1.982	-1.237	-2.048	
JRO	-2.951	-1.536	-1.354	
KLA	-1.519	0.989	-1.924	
LAB	-0.118	-1.722	-1.845	
MBB	-0.599	8.951	-2.886	
PAS	0.338	0.641	-2.693	
PLA	-1.607	-4.870	-1.276	
PUS	0.773	0.306	-2.653	
KLS	-1.519	0.989	-1.924	

Lampiran 4. Tabel data input Velocity.dat pada Notepad di Software GAD

nzLayer :	4				(15x,i4)
zLayer :	0.00	1.00	13.00		(15x,5f8.3)
VpL(nzLayer+1):	2.80	3.00	6.00	10.00	(15x,6f8.3)
VsL(nzLayer+1):	1.61	1.72	3.23	5.38	(15x,6f8.3)

Lampiran 5. Tabel data koordinat stasiun yang telah dikonversi

STA	LAT (y)	LON (x)	depth (km)	LAT puncak	LON puncak	elevasi puncak	H.LAT	H.LON	pengali	I.LAT	I.LON
MEPAS	- 7,53557	110,4492	2693	- 7,54139	110,44611	-2910	0,005823	0,003075	110	0,641	0,338
MEPUS	- 7,53861	110,4531	2653	- 7,54139	110,44611	-2910	0,002778	0,007024	110	0,306	0,773
MEIJO	- 7,55264	110,4641	2048	- 7,54139	110,44611	-2910	-0,01125	0,01802	110	-1,237	1,982
MEJRO	- 7,55536	110,4193	1354	- 7,54139	110,44611	-2910	-0,01397	-0,02682	110	-1,536	-2,951
MEGRA	- 7,52163	110,4515	2046	- 7,54139	110,44611	-2910	0,019759	0,005383	110	2,173	0,592
MELAB	- 7,55704	110,445	1845	- 7,54139	110,44611	-2910	-0,01565	-0,00107	110	-1,722	-0,118
MEKLA	- -7,5324	110,4323	1924	- 7,54139	110,44611	-2910	0,008993	-0,01381	110	0,989	-1,519
MEPLA	- 7,58567	110,4315	1276	- 7,54139	110,44611	-2910	-0,04428	-0,01461	110	-4,870	-1,607
MEMBB	- 7,46002	110,4407	2886	- 7,54139	110,44611	-2910	0,081373	-0,00545	110	8,951	-0,599

Lampiran 6. Tabel koordinat gempa (VTA) GAD-MATLAB

lon_km	lat_km	depth_km
-0,081	0,130	-2,081
0,759	-0,083	-1,181
-0,765	0,102	-1,430
0,550	-0,050	-0,288
0,306	0,231	-0,954
0,977	0,343	-0,390
0,615	0,135	-1,125
0,871	0,506	0,632
0,505	0,342	-0,834
1,131	0,012	-0,861
-69,336	-49,965	16,892
0,058	0,178	-0,566
-0,293	-0,260	-2,483
0,648	0,131	-0,779
0,274	0,110	-1,164
0,287	-0,038	-0,900
0,246	0,365	-0,043
-0,038	-0,160	-1,662
0,023	0,029	-1,623
0,084	0,039	-1,314
0,029	-1,777	-0,778
-0,118	-0,040	-2,126
0,581	0,116	-1,364
0,427	0,046	-1,193
0,430	0,346	-0,457
0,765	0,285	-0,349
0,264	0,101	-1,356
0,866	0,055	-3,356
0,624	0,210	-0,765
0,451	0,540	-2,260
0,731	0,228	-0,305
1,197	-0,080	-1,425
0,836	0,134	-1,100
0,481	0,171	-0,221
0,380	0,149	-0,779
0,457	0,200	-1,202
4,105	10,856	-1,542
0,539	0,154	-0,449
0,251	-0,072	-0,743
0,543	0,188	-0,661
0,237	0,235	0,253
-1,381	-2,027	1,806

-0,744	-0,782	-4,721
18,976	4,833	-37,449
0,597	0,303	-0,602
0,833	0,269	-0,678
1,034	0,341	-0,481
0,249	0,434	-0,734
0,507	0,227	-0,768
1,335	0,601	0,159
0,148	-0,032	-0,671
-0,189	0,096	-1,287
0,352	0,371	-0,103
-0,226	-0,471	-1,642
0,383	-0,231	-0,978
5,108	3,867	-25,950
0,448	0,070	-0,208
0,227	0,402	-1,232
0,962	0,088	-1,573
0,562	0,255	-0,489
0,600	0,131	-0,208
0,660	0,199	-0,338
0,813	0,345	-1,149
0,577	0,278	-0,594
1,024	-0,039	-1,372
0,643	0,236	-0,120
0,555	0,060	0,073
-0,178	0,027	-1,563
0,812	0,546	-0,341
0,326	0,140	-0,214
0,144	0,166	-1,702
0,619	0,315	-0,750
1,256	0,221	-1,275
0,804	0,114	-0,163
-0,266	-0,151	-2,044
0,235	0,102	-0,974
0,453	-0,268	-1,324
-0,192	-0,667	-1,478

Lampiran 7. Tabel koordinat gempa (VTB) GAD-MATLAB

lon_km	lat_km	depth_km
-0,150	0,591	-0,219
-0,351	0,438	-2,264
2,417	0,286	-0,394
1,249	4,807	-0,697
-0,486	0,500	-4,491
0,145	0,528	-2,216
0,579	0,927	-1,116
-0,569	-0,144	-2,644
-0,189	0,226	-2,288
-0,552	0,466	-3,000
0,182	1,282	-0,706
-0,041	-0,017	-1,822
0,509	1,007	-4,450
-0,838	0,456	-4,407
-0,106	0,330	-1,950
-0,039	0,102	-1,645
-0,436	0,031	-2,356
-0,295	0,414	-2,430
-0,439	0,439	-2,464
10,473	10,072	1,001
-0,340	0,248	-2,338
-0,609	0,284	-2,113
0,078	0,357	-1,457
0,032	0,684	-1,618
0,193	0,645	-1,581
0,270	1,103	-1,628
0,337	1,142	-1,559
0,438	0,741	-1,693
-0,394	0,936	-0,950
-0,411	1,016	-2,206
0,174	1,165	-1,231
-0,172	0,000	-2,609
0,467	0,622	-0,554
0,088	0,560	-1,457
-0,711	0,462	-4,514
1,070	1,475	-0,658
-0,169	0,040	-4,009
-0,198	0,491	-2,588
-1,327	0,804	-4,953

Lampiran 8. Tabel koordinat gempa VTA (NonLinLoc-MATLAB)

lat_km	depth_km	magnitude	LAT_puncak	LON_puncak	H_LAT	H_LON	Pengali	LAT	LON
-7,54424	-1,5	1,92	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00165	110	-0,3135	-0,1815
-7,56235	-1,9	1,91	-7,54139	110,44611	-0,02096	-0,02977	110	-2,3056	-3,2747
-7,55782	9,2	1,70	-7,54139	110,44611	-0,01643	-0,06969	110	-1,8073	-7,6659
-7,54424	-2,1	1,86	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00165	110	-0,3135	-0,1815
-7,54334	-1,4	1,89	-7,54139	110,44611	-0,00195	0,00198	110	-0,2145	0,2178
-7,54605	-2,5	1,82	-7,54139	110,44611	-0,00466	0,00743	110	-0,5126	0,8173
-7,54424	-1,5	1,81	-7,54139	110,44611	-0,00285	0,00108	110	-0,3135	0,1188
-7,54605	-2,8	1,94	-7,54139	110,44611	-0,00466	-0,00346	110	-0,5126	-0,3806
-7,54243	-1,2	1,77	-7,54139	110,44611	-0,00104	0,00108	110	-0,1144	0,1188
-7,54424	-2,2	2,14	-7,54139	110,44611	-0,00285	0,00743	110	-0,3135	0,8173
-7,53881	-0,9	2,03	-7,54139	110,44611	0,00258	-0,00255	110	0,2838	-0,2805
-7,54605	-1,9	2,01	-7,54139	110,44611	-0,00466	-0,00437	110	-0,5126	-0,4807
-7,54515	-2,8	2,04	-7,54139	110,44611	-0,00376	-0,00346	110	-0,4136	-0,3806
-7,54605	-2,8	1,88	-7,54139	110,44611	-0,00466	-0,0089	110	-0,5126	-0,979
-7,54515	-1,7	2,13	-7,54139	110,44611	-0,00376	-0,00074	110	-0,4136	-0,0814
-7,54334	-2,8	2,05	-7,54139	110,44611	-0,00195	0,00017	110	-0,2145	0,0187
-7,54062	-1,1	1,96	-7,54139	110,44611	0,00077	0,00198	110	0,0847	0,2178
-7,54153	-1,3	1,79	-7,54139	110,44611	-0,00014	0,00198	110	-0,0154	0,2178
-7,54424	-1,8	2,05	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00165	110	-0,3135	-0,1815
-7,55058	2,5	1,82	-7,54139	110,44611	-0,00919	-0,02161	110	-1,0109	-2,3771
-7,54062	-1,1	1,75	-7,54139	110,44611	0,00077	0,00108	110	0,0847	0,1188
-7,54424	-1,7	1,88	-7,54139	110,44611	-0,00285	0,00017	110	-0,3135	0,0187
-7,53791	-2,3	1,98	-7,54139	110,44611	0,00348	0,0038	110	0,3828	0,418
-7,54605	-2,7	1,96	-7,54139	110,44611	-0,00466	-0,00074	110	-0,5126	-0,0814
-7,53972	-0,8	1,99	-7,54139	110,44611	0,00167	-0,00074	110	0,1837	-0,0814

-7,53972	-1,2	2,10	-7,54139	110,44611	0,00167	0,00108	110	0,1837	0,1188
-7,54787	-2,7	1,95	-7,54139	110,44611	-0,00648	-0,01526	110	-0,7128	-1,6786
-7,54062	-1,2	2,11	-7,54139	110,44611	0,00077	0,00198	110	0,0847	0,2178
-7,54334	-1,6	1,95	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00165	110	-0,2145	-0,1815
-7,54243	-1,1	1,97	-7,54139	110,44611	-0,00104	0,00198	110	-0,1144	0,2178
-7,54062	-1,1	1,89	-7,54139	110,44611	0,00077	0,00108	110	0,0847	0,1188
-7,53972	-1	1,94	-7,54139	110,44611	0,00167	0,0038	110	0,1837	0,418
-7,54787	-2,8	1,81	-7,54139	110,44611	-0,00648	-0,00255	110	-0,7128	-0,2805
-7,54153	-1,3	1,84	-7,54139	110,44611	-0,00014	0,00198	110	-0,0154	0,2178
-7,53609	-1	2,06	-7,54139	110,44611	0,0053	0,00198	110	0,583	0,2178
-7,54153	-1,9	2,11	-7,54139	110,44611	-0,00014	0,00017	110	-0,0154	0,0187
-7,54424	-1,9	2,14	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00165	110	-0,3135	-0,1815
-7,54243	-1,2	2,08	-7,54139	110,44611	-0,00104	-0,00074	110	-0,1144	-0,0814
-7,54424	-2,1	2,01	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00346	110	-0,3135	-0,3806
-7,54424	-1,9	1,81	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00346	110	-0,3135	-0,3806
-7,54424	-1,3	2,06	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00074	110	-0,3135	-0,0814
-7,54424	-1,7	1,83	-7,54139	110,44611	-0,00285	0,00017	110	-0,3135	0,0187
-7,54877	-2,8	1,99	-7,54139	110,44611	-0,00738	-0,00709	110	-0,8118	-0,7799
-7,54334	-1,2	1,71	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00165	110	-0,2145	-0,1815
-7,54424	-1,8	2,11	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00255	110	-0,3135	-0,2805
-7,54877	-2,4	1,99	-7,54139	110,44611	-0,00738	-0,0089	110	-0,8118	-0,979
-7,54334	-2,4	1,94	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00437	110	-0,2145	-0,4807
-7,55058	-2,1	1,92	-7,54139	110,44611	-0,00919	-0,00981	110	-1,0109	-1,0791
-7,54424	-1,9	1,79	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00165	110	-0,3135	-0,1815
-7,54424	-1,3	1,89	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00255	110	-0,3135	-0,2805
-7,54515	-1,7	1,93	-7,54139	110,44611	-0,00376	-0,00074	110	-0,4136	-0,0814
-7,54515	-1,6	1,94	-7,54139	110,44611	-0,00376	-0,00255	110	-0,4136	-0,2805
-7,52342	-2,8	1,74	-7,54139	110,44611	0,01797	-0,00074	110	1,9767	-0,0814

-7,54424	-1,6	2,04	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00255	110	-0,3135	-0,2805
-7,54515	-1,3	2,13	-7,54139	110,44611	-0,00376	-0,00437	110	-0,4136	-0,4807
-7,55149	-2,2	1,77	-7,54139	110,44611	-0,0101	0,00289	110	-1,111	0,3179
-7,61667	-0,8	2,06	-7,54139	110,44611	-0,07528	-0,106	110	-8,2808	-11,66
-7,54424	-1,6	1,89	-7,54139	110,44611	-0,00285	0,00017	110	-0,3135	0,0187
-7,54424	-1,5	1,86	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00255	110	-0,3135	-0,2805
-7,54515	-1,5	1,86	-7,54139	110,44611	-0,00376	-0,00255	110	-0,4136	-0,2805
-7,53428	0,1	1,94	-7,54139	110,44611	0,00711	-0,00528	110	0,7821	-0,5808
-7,58046	9,2	1,84	-7,54139	110,44611	-0,03907	0,0537	110	-4,2977	5,907
-7,54334	-2,1	2,02	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00165	110	-0,2145	-0,1815
-7,54334	-2,2	1,78	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00528	110	-0,2145	-0,5808
-7,54334	-1,5	1,88	-7,54139	110,44611	-0,00195	0,00108	110	-0,2145	0,1188
-7,54787	-1,9	2,04	-7,54139	110,44611	-0,00648	-0,00981	110	-0,7128	-1,0791
-7,53972	-1,1	1,94	-7,54139	110,44611	0,00167	0,00289	110	0,1837	0,3179
-7,54153	-0,4	1,99	-7,54139	110,44611	-0,00014	-0,00618	110	-0,0154	-0,6798
-7,54424	-1,5	2,00	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00346	110	-0,3135	-0,3806
-7,54787	-1,7	1,78	-7,54139	110,44611	-0,00648	-0,00618	110	-0,7128	-0,6798
-7,54515	-2,8	1,93	-7,54139	110,44611	-0,00376	-0,00437	110	-0,4136	-0,4807
-7,55601	-2,5	1,97	-7,54139	110,44611	-0,01462	-0,02342	110	-1,6082	-2,5762
-7,54605	-2,8	2,09	-7,54139	110,44611	-0,00466	-0,00437	110	-0,5126	-0,4807
-7,54424	-1,5	2,12	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00074	110	-0,3135	-0,0814
-7,54424	-1,4	2,05	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00255	110	-0,3135	-0,2805
-7,54424	-2,2	2,09	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00528	110	-0,3135	-0,5808
-7,54334	-2,8	1,92	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00346	110	-0,2145	-0,3806
-7,54424	-2	1,91	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00437	110	-0,3135	-0,4807
-7,54696	-2,8	1,95	-7,54139	110,44611	-0,00557	-0,00074	110	-0,6127	-0,0814
-7,54787	-2,8	1,91	-7,54139	110,44611	-0,00648	-0,008	110	-0,7128	-0,88
-7,54334	-1,5	2,06	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00165	110	-0,2145	-0,1815

-7,54696	-2	1,77	-7,54139	110,44611	-0,00557	0,00833	110	-0,6127	0,9163
-7,54968	-2,7	2,09	-7,54139	110,44611	-0,00829	-0,00618	110	-0,9119	-0,6798
-7,54424	-1,7	2,05	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00255	110	-0,3135	-0,2805
-7,54334	-1,1	1,81	-7,54139	110,44611	-0,00195	0,00017	110	-0,2145	0,0187
-7,54424	-1,6	1,92	-7,54139	110,44611	-0,00285	-0,00255	110	-0,3135	-0,2805
-7,54334	-1,7	1,93	-7,54139	110,44611	-0,00195	-0,00074	110	-0,2145	-0,0814

Lampiran 9. Tabel koordinat gempa VTB (NonLinLoc-MATLAB)

lon_km	lat_km	depth_k m	magnitud e	LAT_punca k	LON_punca k	H_LAT	H_LON	Pengal i	LAT	LON
110,4435 6	-7,54062	-2,6	3,35	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00255	110	0,0847	- 0,2805
110,4408 3	-7,54243	-2,6	1,68	-7,54139	110,44611	-0,00104	- 0,00528	110	- 0,1144	- 0,5808
110,4453 7	-7,53972	-2,3	2,43	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00074	110	0,1837	- 0,0814
110,4444 6	-7,53881	-2,2	2,13	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00165	110	0,2838	- 0,1815
110,4444 6	-7,53881	-1,8	1,75	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00165	110	0,2838	- 0,1815
110,4435 6	-7,54334	-1	1,92	-7,54139	110,44611	-0,00195	- 0,00255	110	- 0,2145	- 0,2805
110,4435 6	-7,54334	-0,7	2,26	-7,54139	110,44611	-0,00195	- 0,00255	110	- 0,2145	- 0,2805
110,4444 6	-7,54153	-2,3	2,83	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00165	110	- 0,0154	- 0,1815
110,4444 6	-7,53972	-2,4	2,92	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00165	110	0,1837	- 0,1815

110,4444 6	-7,54062	-2,4	2,51	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00165	110	0,0847	- 0,1815
110,4408 3	-7,54424	-2,8	2,17	-7,54139	110,44611	-0,00285	- 0,00528	110	- 0,3135	- 0,5808
110,449	-7,53881	-0,4	2,16	-7,54139	110,44611	0,00258	0,00289	110	0,2838	0,3179
110,4426 5	-7,54153	-2,2	2,63	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00346	110	- 0,0154	- 0,3806
110,4453 7	-7,54062	-2,2	1,69	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00074	110	0,0847	- 0,0814
110,4426 5	-7,54062	-2,4	2,7	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00346	110	0,0847	- 0,3806
110,4426 5	-7,54334	-2,8	1,82	-7,54139	110,44611	-0,00195	- 0,00346	110	- 0,2145	- 0,3806
110,4417 4	-7,54062	-1,9	1,88	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00437	110	0,0847	- 0,4807
110,4435 6	-7,53881	-2	1,86	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00255	110	0,2838	- 0,2805
110,4444 6	-7,53881	-2,6	2,12	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00165	110	0,2838	- 0,1815
110,4435 6	-7,53972	-2,8	2,33	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00255	110	0,1837	- 0,2805
110,4471 9	-7,54334	-2	1,55	-7,54139	110,44611	-0,00195	0,00108	110	- 0,2145	0,1188
110,4417 4	-7,54243	-2,8	2,18	-7,54139	110,44611	-0,00104	- 0,00437	110	- 0,1144	- 0,4807
110,4426 5	-7,54062	-2,7	1,84	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00346	110	0,0847	- 0,3806
110,4426 5	-7,53881	-2,8	1,84	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00346	110	0,2838	- 0,3806
110,4453	-7,54062	-1,9	2,3	-7,54139	110,44611	0,00077	-	110	0,0847	-

7							0,00074			0,0814
110,4426 5	-7,54062	-2,3	2,03	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00346	110	0,0847	- 0,3806
110,4426 5	-7,53881	-2,8	2,63	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00346	110	0,2838	- 0,3806
110,4435 6	-7,53972	-2,5	2,04	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00255	110	0,1837	- 0,2805
110,4453 7	-7,53972	-2,5	1,85	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00074	110	0,1837	- 0,0814
110,4435 6	-7,54153	-2,8	2,48	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00255	110	- 0,0154	- 0,2805
110,3854 9	-7,55511	7,2	2,09	-7,54139	110,44611	-0,01372	- 0,06062	110	- 1,5092	- 6,6682
110,4453 7	-7,53881	-2,4	2,23	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00074	110	0,2838	- 0,0814
110,4444 6	-7,53972	-2,2	2,77	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00165	110	0,1837	- 0,1815
110,4417 4	-7,53881	-2,7	1,94	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00437	110	0,2838	- 0,4807
110,4444 6	-7,53881	-1,9	1,96	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00165	110	0,2838	- 0,1815
110,4435 6	-7,53972	-2,8	2,38	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00255	110	0,1837	- 0,2805
110,4444 6	-7,53972	-2,5	3,18	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00165	110	0,1837	- 0,1815
110,4426 5	-7,54243	-2,8	1,73	-7,54139	110,44611	-0,00104	- 0,00346	110	- 0,1144	- 0,3806
110,4435 6	-7,54153	-2,4	2,5	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00255	110	- 0,0154	- 0,2805
110,4453	-7,54062	-2,2	1,8	-7,54139	110,44611	0,00077	-	110	0,0847	-

7							0,00074			0,0814
110,4444 6	-7,54062	-2,1	2,39	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00165	110	0,0847	- 0,1815
110,4444 6	-7,53972	-2	1,81	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00165	110	0,1837	- 0,1815
110,4499 1	-7,53519	-1,4	1,98	-7,54139	110,44611	0,0062	0,0038	110	0,682	0,418
110,4471 9	-7,53519	-1,9	1,96	-7,54139	110,44611	0,0062	0,00108	110	0,682	0,1188
110,4517 2	-7,53338	-1,7	1,82	-7,54139	110,44611	0,00801	0,00561	110	0,8811	0,6171
110,4417 4	-7,53972	-2,3	1,94	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00437	110	0,1837	- 0,4807
110,4499 1	-7,53428	-1,7	2,54	-7,54139	110,44611	0,00711	0,0038	110	0,7821	0,418
110,4471 9	-7,53519	-1,9	2,51	-7,54139	110,44611	0,0062	0,00108	110	0,682	0,1188
110,4462 8	-7,53791	-2	1,67	-7,54139	110,44611	0,00348	0,00017	110	0,3828	0,0187
110,4462 8	-7,53428	-1	2,27	-7,54139	110,44611	0,00711	0,00017	110	0,7821	0,0187
110,4471 9	-7,53157	-0,3	2,44	-7,54139	110,44611	0,00982	0,00108	110	1,0802	0,1188
110,449	-7,53609	-1,8	3,16	-7,54139	110,44611	0,0053	0,00289	110	0,583	0,3179
110,4471 9	-7,53881	-1,8	1,85	-7,54139	110,44611	0,00258	0,00108	110	0,2838	0,1188
110,4417 4	-7,54062	-2,7	2,24	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00437	110	0,0847	- 0,4807
110,4444 6	-7,54243	-2,8	2,45	-7,54139	110,44611	-0,00104	- 0,00165	110	- 0,1144	- 0,1815

110,4453 7	-7,54153	-2,7	1,77	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00074	110	- 0,0154	- 0,0814
110,4426 5	-7,53972	-2,8	2,43	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00346	110	0,1837	- 0,3806
110,4426 5	-7,54153	-2,6	2,34	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00346	110	- 0,0154	- 0,3806
110,4426 5	-7,54062	-2,8	2,56	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00346	110	0,0847	- 0,3806
110,4426 5	-7,54062	-2,7	2,35	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00346	110	0,0847	- 0,3806
110,4435 6	-7,54153	-2,8	2,59	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00255	110	- 0,0154	- 0,2805
110,4435 6	-7,54153	-2,7	2,74	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00255	110	- 0,0154	- 0,2805
110,4444 6	-7,54062	-2,8	2,31	-7,54139	110,44611	0,00077	- 0,00165	110	0,0847	- 0,1815
110,4444 6	-7,53972	-2,8	1,65	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00165	110	0,1837	- 0,1815
110,4435 6	-7,54153	-2,7	2,56	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00255	110	- 0,0154	- 0,2805
110,4435 6	-7,54153	-2,8	1,85	-7,54139	110,44611	-0,00014	- 0,00255	110	- 0,0154	- 0,2805
110,4453 7	-7,54243	-2,8	3,3	-7,54139	110,44611	-0,00104	- 0,00074	110	- 0,1144	- 0,0814
110,4435 6	-7,53972	-2,8	1,91	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00255	110	0,1837	- 0,2805
110,4408 3	-7,53972	-2,3	1,69	-7,54139	110,44611	0,00167	- 0,00528	110	0,1837	- 0,5808
110,4444 6	-7,53881	-2,1	2,34	-7,54139	110,44611	0,00258	- 0,00165	110	0,2838	- 0,1815

Lampiran 10. Coding visualisasi 2D VTA dan VTB (GAD)

```
clear
close all
restoredefaultpath
clc
rng('default')
tic

%% Baca File Hypocenter

data_hypoc_VTA = readtable("data_hypo_VTA_10.xlsx");
data_hypoc_VTB = readtable("data_hypo_VTB_10.xlsx");

% Konversi data lat lon dari km ke degree
lond_gad_VTA = km2deg(data_hypoc_VTA.lon_km);
latd_gad_VTA = km2deg(data_hypoc_VTA.lat_km);
lond_gad_VTB = km2deg(data_hypoc_VTB.lon_km);
latd_gad_VTB = km2deg(data_hypoc_VTB.lat_km);

% Koordinat Puncak
lat_summit = -7.54139;
lon_summit = 110.44611;
z_summit = -2910;

% Lat dan Lon untuk plotting
lat_plot_gad_VTA = lat_summit + latd_gad_VTA;
lon_plot_gad_VTA = lon_summit + lond_gad_VTA;
```

```

z_plot_gad_VTA = data_hypoc_VTA.depth_km;

lat_plot_gad_VTB = lat_summit + latd_gad_VTB;
lon_plot_gad_VTB = lon_summit + lond_gad_VTB;
z_plot_gad_VTB = data_hypoc_VTB.depth_km;

% Konversi lat dan lon plot ke UTM

[x_utm_gad_VTA,y_utm_gad_VTA] = ll2utm(lat_plot_gad_VTA,lon_plot_gad_VTA);

[x_utm_gad_VTB,y_utm_gad_VTB] = ll2utm(lat_plot_gad_VTB,lon_plot_gad_VTB);

%% Read DEM File

file_dem = 'clipped_export_merapi.tif';

[A1_m,R1] = readgeoraster(file_dem,'OutputType','double');
A1_km = A1_m./1E3;
[lat,lon] = geographicGrid(R1);
[xgrid,ygrid,zone] = ll2utm(lat,lon);

[rw,clm,valmax] = find(A1_m == max(max(A1_m)));
x_cross = xgrid(rw,:);
y_cross = ygrid(:,clm);

lat_tick = -7.60:0.02:-7.50;
lon_tick = 110.40:0.02:110.50;

[x_tick,y_tick,~] = ll2utm(lat_tick,lon_tick);

```

```

x_tick_labels = string(lon_tick);
y_tick_labels = string(lat_tick);

%% Plot Hypocenters Based on Time Series (ID_Seq)

figure();
set(gcf,'Position',[156 127 746 720])
subplot(3,3,[1,2,4,5])
scatter(x_utm_gad_VTA,y_utm_gad_VTA,25,'filled','MarkerFaceColor','blue')
axis('equal')
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlim([min(x_tick) max(x_tick)])
ylim([min(y_tick) max(y_tick)])
xticks(x_tick)
yticks(y_tick)
xticklabels(x_tick_labels)
yticklabels(y_tick_labels)
xlabel('Lon')
ylabel('Lat')
hold on
scatter(x_utm_gad_VTB,y_utm_gad_VTB,25,'filled','MarkerFaceColor','yellow')
contour(xgrid,ygrid,A1_m,'LineWidth',1,'EdgeColor','black')
plot([x_tick(1)+100 x_tick(1)+1100],[y_tick(2)-1600 y_tick(2)-1600],'-k','LineWidth',2)
plot([x_tick(1)+1100 x_tick(1)+2100],[y_tick(2)-1600 y_tick(2)-1600],'-','LineWidth',2,'Color',...
[0.8 0.8 0.8])
plot([x_tick(1)+2100 x_tick(1)+3100],[y_tick(2)-1600 y_tick(2)-1600],'-k','LineWidth',2)
text(x_tick(1)+300,y_tick(2)-1300,'1 km','FontSize',8)
text(x_tick(1)+1300,y_tick(2)-1300,'2 km','FontSize',8)
text(x_tick(1)+2300,y_tick(2)-1300,'3 km','FontSize',8)

```

```

hold off

subplot(3,3,[3,6])
scatter(z_plot_gad_VTA,y_utm_gad_VTA,25,'filled','MarkerFaceColor','blue')
xlim([-4 5])
ylim([min(y_tick) max(y_tick)])
yticks(y_tick)
yticklabels(y_tick_labels)
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold','XAxisLocation','bottom','YAxisLocation','right')
xlabel('Depth (km)')
ylabel('Lat')
hold on
scatter(z_plot_gad_VTB,y_utm_gad_VTB,25,'filled','MarkerFaceColor','yellow')
plot(A1_km(:,clm)*(-1),y_cross,'-k','LineWidth',2)
hold off
legend('titik hiposenter VTA','titik hiposenter VTB',...
'profile cross section')

subplot(3,3,[7,8])
scatter(x_utm_gad_VTA,z_plot_gad_VTA,25,'filled','MarkerFaceColor','blue')
xlim([min(x_tick) max(x_tick)])
ylim([-4 5])
xticks(x_tick)
xticklabels(x_tick_labels)
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold','XAxisLocation','bottom','YAxisLocation','left',...
'YDir','reverse')
xlabel('Lon')
ylabel('Depth (km)')

```

```

hold on
scatter(x_utm_gad_VTB,z_plot_gad_VTB,25,'filled','MarkerFaceColor','yellow')
plot(x_cross,A1_km(rw,:)*(-1),'-k','LineWidth',2)
hold off

```

Lampiran 11. Coding visualisasi 2D VTA dan VTB (NonLinLoc)

```

clear
% close all
restoredefaultpath
clc
rng('default')
tic

%% Baca File Hypocenter

data_hypoc_cendana_VTA = readtable("data_cendana_VTA.xlsx");
data_hypoc_cendana_VTB = readtable("data_cendana_VTB.xlsx");

% Konversi data lat lon dari km ke degree
lond_cendana_VTA = km2deg(data_hypoc_cendana_VTA.LON);
latd_cendana_VTA = km2deg(data_hypoc_cendana_VTA.LAT);
lond_cendana_VTB = km2deg(data_hypoc_cendana_VTB.LON);
latd_cendana_VTB = km2deg(data_hypoc_cendana_VTB.LAT);

% Koordinat Puncak
lat_summit = -7.54139;
lon_summit = 110.44611;
z_summit = -2910;

```

```

% Lat dan Lon untuk plotting
lat_plot_cendana_VTA = lat_summit + latd_cendana_VTA;
lon_plot_cendana_VTA = lon_summit + lond_cendana_VTA;
z_plot_cendana_VTA = data_hypoc_cendana_VTA.depth_km;

lat_plot_cendana_VTB = lat_summit + latd_cendana_VTB;
lon_plot_cendana_VTB = lon_summit + lond_cendana_VTB;
z_plot_cendana_VTB = data_hypoc_cendana_VTB.depth_km;

% Konversi lat dan lon plot ke UTM

[x_utm_cendana_VTA,y_utm_cendana_VTA] = ll2utm(lat_plot_cendana_VTA,lon_plot_cendana_VTA);

[x_utm_cendana_VTB,y_utm_cendana_VTB] = ll2utm(lat_plot_cendana_VTB,lon_plot_cendana_VTB);

%% Read DEM File

file_dem = 'clipped_export_merapi.tif';

[A1_m,R1] = readgeoraster(file_dem,'OutputType','double');
A1_km = A1_m./1E3;
[lat,lon] = geographicGrid(R1);
[xgrid,ygrid,zone] = ll2utm(lat,lon);

[rw,clm,valmax] = find(A1_m == max(max(A1_m)));
x_cross = xgrid(rw,:);
y_cross = ygrid(:,clm);

```

```

lat_tick = -7.60:0.02:-7.50;
lon_tick = 110.40:0.02:110.50;

[x_tick,y_tick,~] = ll2utm(lat_tick,lon_tick);
x_tick_labels = string(lon_tick);
y_tick_labels = string(lat_tick);

%% Plot Hypocenters Based on Time Series (ID_Seq)

figure();
set(gcf,'Position',[156 127 746 720])
subplot(3,3,[1,2,4,5])
scatter(x_utm_cendana_VTA,y_utm_cendana_VTA,25,'filled','MarkerFaceColor','magenta')
axis('equal')
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlim([min(x_tick) max(x_tick)])
ylim([min(y_tick) max(y_tick)])
xticks(x_tick)
yticks(y_tick)
xticklabels(x_tick_labels)
yticklabels(y_tick_labels)
xlabel('Lon')
ylabel('Lat')
hold on
scatter(x_utm_cendana_VTB,y_utm_cendana_VTB,25,'filled','MarkerFaceColor','green')
contour(xgrid,ygrid,A1_m,'LineWidth',1,'EdgeColor','black')
plot([x_tick(1)+100 x_tick(1)+1100],[y_tick(2)-1600 y_tick(2)-1600],'-k','LineWidth',2)
plot([x_tick(1)+1100 x_tick(1)+2100],[y_tick(2)-1600 y_tick(2)-1600],'-','LineWidth',2,'Color',...

```

```

[0.8 0.8 0.8])
plot([x_tick(1)+2100 x_tick(1)+3100],[y_tick(2)-1600 y_tick(2)-1600],'-k','LineWidth',2)
text(x_tick(1)+300,y_tick(2)-1300,'1 km','FontSize',8)
text(x_tick(1)+1300,y_tick(2)-1300,'2 km','FontSize',8)
text(x_tick(1)+2300,y_tick(2)-1300,'3 km','FontSize',8)
hold off

subplot(3,3,[3,6])
scatter(z_plot_cendana_VTA,y_utm_cendana_VTA,25,'filled','MarkerFaceColor','magenta')
xlim([-4 5])
ylim([min(y_tick) max(y_tick)])
yticks(y_tick)
yticklabels(y_tick_labels)
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold','XAxisLocation','bottom','YAxisLocation','right')
xlabel('Depth (km)')
ylabel('Lat')
hold on
scatter(z_plot_cendana_VTB,y_utm_cendana_VTB,25,'filled','MarkerFaceColor','green')
plot(A1_km(:,clm)*(-1),y_cross,'-k','LineWidth',2)
hold off
legend('titik hiposenter cendana VTA','titik hiposenter cendana VTB',...
'profile cross section')

subplot(3,3,[7,8])
scatter(x_utm_cendana_VTA,z_plot_cendana_VTA,25,'filled','MarkerFaceColor','magenta')
xlim([min(x_tick) max(x_tick)])
ylim([-4 5])
xticks(x_tick)
xticklabels(x_tick_labels)

```

```

set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold','XAxisLocation','bottom','YAxisLocation','left',...
'YDir','reverse')
xlabel('Lon')
ylabel('Depth (km)')
hold on
scatter(x_utm_cendana_VTB,z_plot_cendana_VTB,25,'filled','MarkerFaceColor','green')
plot(x_cross,A1_km(rw,:)*(-1),'-k','LineWidth',2)
hold off

```

Lampiran 12. Coding visualisasi 3D VTA dan VTB (GAD)

```

clear
% close all
restoredefaultpath
clc
rng('default')
tic

%% Baca File Hypocenter
data_hypoc_VTA = readtable("data_hypo_VTA_10.xlsx");
data_hypoc_VTB = readtable("data_hypo_VTB_10.xlsx");

% Konversi data lat lon dari km ke degree
lond_gad_VTA = km2deg(data_hypoc_VTA.lon_km);
latd_gad_VTA = km2deg(data_hypoc_VTA.lat_km);
lond_gad_VTB = km2deg(data_hypoc_VTB.lon_km);
latd_gad_VTB = km2deg(data_hypoc_VTB.lat_km);

% Koordinat Puncak

```

```

lat_summit = -7.54139;
lon_summit = 110.44611;
z_summit = -2910;

% Lat dan Lon untuk plotting
lat_plot_gad_VTA = lat_summit + latd_gad_VTA;
lon_plot_gad_VTA = lon_summit + lond_gad_VTA;
z_plot_gad_VTA = data_hypoc_VTA.depth_km * 1000;
lat_plot_gad_VTB = lat_summit + latd_gad_VTB;
lon_plot_gad_VTB = lon_summit + lond_gad_VTB;
z_plot_gad_VTB = data_hypoc_VTB.depth_km * 1000;

% Konversi lat dan lon plot ke UTM
[x_utm_gad_VTA,y_utm_gad_VTA] = ll2utm(lat_plot_gad_VTA,lon_plot_gad_VTA);
[x_utm_gad_VTB,y_utm_gad_VTB] = ll2utm(lat_plot_gad_VTB,lon_plot_gad_VTB);

%% Read DEM File dan Downsample untuk performa
file_dem = 'clipped_export_merapi.tif';
[A1_m,R1] = readgeoraster(file_dem,'OutputType','double');
[lat,lon] = geographicGrid(R1);
[xgrid,ygrid,zone] = ll2utm(lat,lon);

% Downsample DEM untuk meringankan visualisasi
downsample_factor = 4; % Bisa diubah ke 3 atau 4 jika masih terlalu berat
A1_m = A1_m(1:downsample_factor:end, 1:downsample_factor:end);
xgrid = xgrid(1:downsample_factor:end, 1:downsample_factor:end);
ygrid = ygrid(1:downsample_factor:end, 1:downsample_factor:end);

% Create meshgrid for 3D surface

```

```

[X,Y] = meshgrid(xgrid(1,:), ygrid(:,1));

%% Create 3D Visualization
figure('Position', [100 100 800 600]);

% Plot 3D Surface dengan optimasi
s1 = surf(X, Y, A1_m, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.8);
colormap('summer')
xlim([min(min(X)) max(max(X))])
ylim([min(min(Y)) max(max(Y))])
zlim([-2000 4000])
hold on

% Plot VTA hypocenters
s2 = scatter3(x_utm_gad_VTA, y_utm_gad_VTA, -z_plot_gad_VTA, 20, 'filled',...
'o','MarkerFaceColor', 'red', 'MarkerEdgeColor', 'none');

% Plot VTB hypocenters
s3 = scatter3(x_utm_gad_VTB, y_utm_gad_VTB, -z_plot_gad_VTB, 40, 'filled',...
'p','MarkerFaceColor', 'blue', 'MarkerEdgeColor', 'none');

% Customize the plot
xlabel('Easting (meter)')
ylabel('Northing (meter)')
zlabel('Elevation (meter)')
title('3D Visualization of Mountain Topography with Hypocenters')
grid on

% Add colorbar

```

```

% c = colorbar;
% c.Label.String = 'Elevation (meter)';

% Rotate view for better visualization
view(45, 30)

% Add legend
legend([s2 s3], {'VTA Hypocenters', 'VTB Hypocenters'}, 'Location', 'northeast')

% Adjust figure properties
set(gcf, 'Color', 'white')
set(gca, 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')

% Mengaktifkan OpenGL renderer untuk performa lebih baik
set(gcf, 'Renderer', 'opengl')

% Display rendering time
toc

```

Lampiran 13. Coding visualisasi 3D VTA dan VTB (NonLinLoc)

```

clear
% close all
restoredefaultpath
clc
rng('default')
tic

%% Baca File Hypocenter

```

```

data_hypoc_VTA_cendana = readtable("data_cendana_VTA.xlsx");
data_hypoc_VTB_cendana = readtable("data_cendana_VTB.xlsx");

% Konversi data lat lon dari km ke degree
lond_cendana_VTA = km2deg(data_hypoc_VTA_cendana.LON);
latd_cendana_VTA = km2deg(data_hypoc_VTA_cendana.LAT);
lond_cendana_VTB = km2deg(data_hypoc_VTB_cendana.LON);
latd_cendana_VTB = km2deg(data_hypoc_VTB_cendana.LAT);

% Koordinat Puncak
lat_summit = -7.54139;
lon_summit = 110.44611;
z_summit = -2910;

% Lat dan Lon untuk plotting
lat_plot_cendana_VTA = lat_summit + latd_cendana_VTA;
lon_plot_cendana_VTA = lon_summit + lond_cendana_VTA;
z_plot_cendana_VTA = data_hypoc_VTA_cendana.depth_km * 1000;
lat_plot_cendana_VTB = lat_summit + latd_cendana_VTB;
lon_plot_cendana_VTB = lon_summit + lond_cendana_VTB;
z_plot_cendana_VTB = data_hypoc_VTB_cendana.depth_km * 1000;

% Konversi lat dan lon plot ke UTM
[x_utm_cendana_VTA,y_utm_cendana_VTA] = ll2utm(lat_plot_cendana_VTA,lon_plot_cendana_VTA);
[x_utm_cendana_VTB,y_utm_cendana_VTB] = ll2utm(lat_plot_cendana_VTB,lon_plot_cendana_VTB);

%% Read DEM File dan Downsample untuk performa
file_dem = 'clipped_export_merapi.tif';
[A1_m,R1] = readgeoraster(file_dem,'OutputType','double');

```

```

[lat,lon] = geographicGrid(R1);
[xgrid,ygrid,zone] = ll2utm(lat,lon);

% Downsample DEM untuk meringankan visualisasi
downsample_factor = 4; % Bisa diubah ke 3 atau 4 jika masih terlalu berat
A1_m = A1_m(1:downsample_factor:end, 1:downsample_factor:end);
xgrid = xgrid(1:downsample_factor:end, 1:downsample_factor:end);
ygrid = ygrid(1:downsample_factor:end, 1:downsample_factor:end);

% Create meshgrid for 3D surface
[X,Y] = meshgrid(xgrid(1,:), ygrid(:,1));

%% Create 3D Visualization
figure('Position', [100 100 800 600]);

% Plot 3D Surface dengan optimasi
s1 = surf(X, Y, A1_m, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.8);
colormap('copper')
xlim([min(min(X)) max(max(X))])
ylim([min(min(Y)) max(max(Y))])
zlim([-2000 4000])
hold on

% Plot VTA hypocenters
s2 = scatter3(x_utm_cendana_VTA, y_utm_cendana_VTA, -z_plot_cendana_VTA, 20, 'filled',...
'o','MarkerFaceColor', 'magenta', 'MarkerEdgeColor', 'none');

% Plot VTB hypocenters
s3 = scatter3(x_utm_cendana_VTB, y_utm_cendana_VTB, -z_plot_cendana_VTB, 40, 'filled',...

```

```

'p', 'MarkerFaceColor', 'green', 'MarkerEdgeColor', 'none');

% Customize the plot
xlabel('Easting (meter)')
ylabel('Northing (meter)')
zlabel('Elevation (meter)')
title('3D Visualization of Mountain Topography with Hypocenters')
grid on

% Add colorbar
% c = colorbar;
% c.Label.String = 'Elevation (meter)';

% Rotate view for better visualization
view(45, 30)

% Add legend
legend([s2 s3], {'VTA Hypocenters', 'VTB Hypocenters'}, 'Location', 'northeast')

% Adjust figure properties
set(gcf, 'Color', 'white')
set(gca, 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')

% Mengaktifkan OpenGL renderer untuk performa lebih baik
set(gcf, 'Renderer', 'opengl')

% Display rendering time
toc

```



JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 210604110043
Nama : FATIH RAHMASARI
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : Drs. ABDUL BASID, M.Si
Dosen Pembimbing 2 : WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : Perbandingan penentuan hiposenter gempa vulkanik gunung Merapi menggunakan metode geiger's with adaptive damping dan non lokasi linier periode Maret 2023

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	21 Agustus 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Judul Skripsi	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
2	23 Agustus 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi BAB I	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
3	26 Agustus 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi BAB II	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
4	29 Agustus 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi BAB III	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
5	02 September 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi BAB I, II, III	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
6	12 September 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Seminar Proposal	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
7	16 September 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Revisi Seminar Proposal	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
8	17 September 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Penelitian di Lapangan	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
9	28 Oktober 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Data Penelitian di Lapangan	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
10	30 Oktober 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Hasil Penelitian	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
11	04 November 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi BAB IV dan V	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
12	15 November 2024	Drs. ABDUL BASID, M.Si	Konsultasi Ujian Komprehensif	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
13	18 November 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Konsultasi Integrasi BAB IV	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
14	26 November 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Konsultasi Revisi Integrasi BAB IV	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi

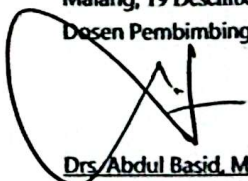
Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2


Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si
NIP. 19870215 202321 2 031

Malang, 19 Desember 2024

Dosen Pembimbing 1


Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

Kajur / Kaprodi,


Dr. Imam Tazi, M.Si
NIP. 19740710 200312 1 002