

PENENTUAN HIPOSENTER DAN MEKANISME FOKAL (*FOCAL MECHANISM*) GEMPA *VOLCANOTECTONIC* (VT) PADA GUNUNGAPI AGUNG MENGGUNAKAN *P WAVE FIRST MOTION POLARITY* PERIODE ERUPSI NOVEMBER-DESEMBER 2017

(Skripsi)

Oleh

Deamasari Dwi Rusdiana

NPM 1715051036



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2022

PENENTUAN HIPOSENTER DAN MEKANISME FOKAL (*FOCAL MECHANISM*) GEMPA *VOLCANOTECTONIC* (VT) PADA GUNUNGAPI AGUNG MENGGUNAKAN *P WAVE FIRST MOTION POLARITY* PERIODE ERUPSI NOVEMBER-DESEMBER 2017

Oleh

DEAMASARI DWI RUSDIANA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2022

ABSTRAK

PENENTUAN HIPOSENTER DAN MEKANISME FOKAL (*FOCAL MECHANISM*) GEMPA *VOLCANOTECTONIC* (VT) PADA GUNUNGAPI AGUNG MENGGUNAKAN *P WAVE FIRST MOTION POLARITY* PERIODE ERUPSI NOVEMBER-DESEMBER 2017

Oleh

DEAMASARI DWI RUSDIANA

Gunungapi Agung dengan ketinggian 3014 m terletak secara geografis berada di Kabupaten Karangasem Provinsi Bali mengalami erupsi VEI 5 pada tahun 1963. Pada bulan Agustus 2017 menunjukkan aktivitas gempabumi VT yang cukup tinggi hingga ke November dan Desember. Untuk mengetahui mekanisme tersebut yaitu menganalisis gempabumi VT dengan menentukan hiposenter dan juga nilai polaritas gerak awal gelombang P. Tujuan dari penelitian ini yaitu mendapatkan sebaran hiposenter dominan gempabumi VT, mengetahui jenis mekanisme fokus gempabumi VT menggunakan nilai polaritas gerak awal gelombang P, dan mendapatkan perkiraan kantong magma Agung berdasarkan sebaran hiposenter dan mekanisme fokus. Hasil dari penelitian ini yaitu berupa sebaran hiposenter dominan dengan seismisitas tinggi berada di kedalaman 5-8 km mdpl dan 9-12 km mdpl sehingga gempabumi VT-A lebih mendominasi dibandingkan gempabumi VT-B, pada penentuan mekanisme fokus didapatkan 75 sesar yang sesar geser 55 sesar, sesar naik 16 sesar, sesar normal berjumlah 3 sesar dan sesar kombinasi naik 1 sesar, dan berdasarkan kedalaman hiposenter dominan hanya terdapat direntang kedalaman 5-8 km dan 9-12 km mdpl tersebut diindikasikan adanya kantong magma yang dibuktikan adanya zona seismisitas tinggi dan didominasi sesar geser yang menandakan adanya area atau wadah sebagai tempat terakumulasi fluida. Semua jenis sesar didominasi dengan memiliki arah *strike* relatif tenggara-barat laut dan barat laut-tenggara, dengan titik nodal *T-axis* relatif pada tenggara, dan *P-axis* relatif pada barat, dan berasosiasi terhadap kegiatan magmatisme di bawah permukaan.

Kata kunci: Gunungapi Agung, hiposenter, mekanisme fokus, gempabumi VT, polaritas, kantong magma

ABSTRACT

HYPOCENTER AND FOCAL MECHANISM DETERMINATION OF THE VOLCANOTECTONIC (VT) EARTHQUAKES ON AGUNG VOLCANO USING SEISMIC P WAVE FIRST MOTION POLARITY FROM NOVEMBER-DESEMBER 2017 ERUPTION PERIOD

By

DEAMASARI DWI RUSDIANA

Agung Volcano with a height of 3014 m is geographically located in Karangasem Regency, Bali Province, experiencing a VEI 5 eruption in 1963. In August 2017 it began to show quite high VT earthquake activity. Activity at Agung is generally accompanied by an increase in seismic activity which indicates the movement of fluid towards the surface through the conduit. To find out the mechanism is to analyze the VT earthquake. The aims of this study were to obtain the distribution of the dominant hypocenter of the VT earthquake, to determine the type of focus mechanism for the VT earthquake using the polarity value of the initial P wave motion, and to obtain an estimate of the Agung magma chamber based on the distribution of the hypocenter and the focus mechanism. The results of this study are in the form of a dominant hypocenter distribution with high seismicity at a depth of 5-8 km above sea level and 9-12 km above sea level so that the VT-A earthquake is more dominant than the VT-B earthquake, on the focal mechanism, there are 75 faults with 55 strike slip faults, 16 reverse faults, 3 normal faults and 1 oblique reverse fault, and based on the depth of the dominant hypocenter there is only a depth range of 5-8 km and 9-12 km above sea level, it indicates the presence of magma chamber as evidenced by the seismicity zone high and dominated by strike slip faults indicating the presence of an area or container as a place for fluid accumulation. All of faults are dominated by having strike directions relative to the southeast-northwest and northwest-southeast, with the node point of the T-axis relative to the southeast, and the P-axis relative to the west, and associated with subsurface magmatism activities.

Keywords: *Agung Volcano, hypocenter, focal mechanism, VT earthquake, polarity, magma chamber.*

Judul Skripsi : **PENENTUAN HIPOSENTER DAN
MEKANISME FOKAL (*FOCAL MECHANISM*)
GEMPA *VOLCANOTECTONIC* (VT) PADA
GUNUNGAPI AGUNG MENGGUNAKAN *P*
WAVE FIRST MOTION POLARITY PERIODE
ERUPSI NOVEMBER-DESEMBER 2017**

Nama Mahasiswa : **Deamasari Dwi Rusdiana**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715051036

Program Studi : Teknik Geofisika

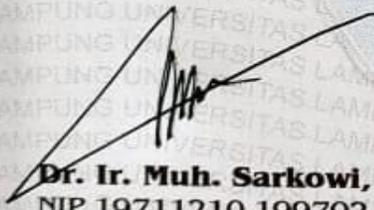
Fakultas : Teknik

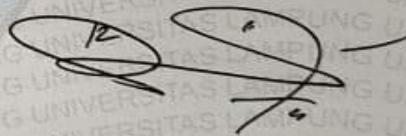
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

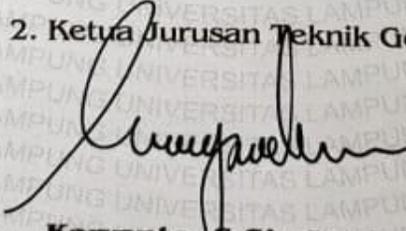
Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Ir. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU.
NIP 19711210 199702 1 001


Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si.
NIP 19661222 199603 1 001

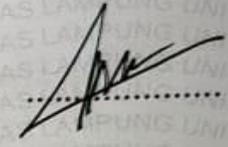
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika


Karyanto, S.Si., M.T.
NIP 19691230 199802 1 001

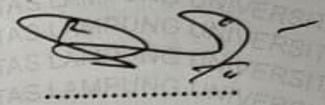
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

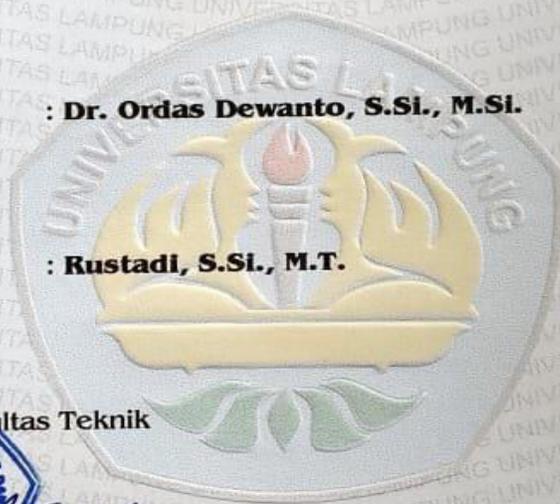
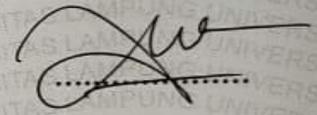
Ketua : Dr. Ir. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU.



Sekretaris : Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si.



Anggota : Rustadi, S.Si., M.T.



Dehan, Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 26 April 2022

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis ini bukan merupakan karya dari orang lain melainkan berdasarkan pemikiran saya sendiri, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana. Adapun kutipan tertentu dalam penulisan skripsi ini terdapat karya atau pendapat orang lain yang ditulis menurut sumbernya sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.



Deamasari Dwi Rusdiana

1715051036

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah pada tanggal 26 November 1998, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, putri dari Bapak Rusdi dan Ibu Sumarni Pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) Pertiwi II di Kabupaten Banjarnegara Jawa Tengah diselesaikan tahun 2005, Pendidikan Sekolah Dasar di SDN Kutajaya II Kab. Tangerang diselesaikan tahun 2011, Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 3 Pasarkemis Kab. Tangerang diselesaikan tahun 2014, dan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 11 Kab. Tangerang diselesaikan pada tahun 2017. Kemudian, penulis melanjutkan pendidikan kejenjang yang lebih tinggi yaitu dengan menempuh Perguruan Tinggi Negeri di Universitas Lampung di Jurusan Teknik Geofisika pada tahun 2017 melalui jalur SBMPTN.

Selama masa kuliah, penulis dapat dikatakan cukup aktif dalam kegiatan organisasi kampus. Pada tahun 2017 menjadi anggota Pansus BEM FT, tahun 2018 merupakan bagian dari Eksekutif Muda dari Kementerian Bendahara Kabinet, BEM Universitas Keluarga Besar Mahasiswa Universitas Lampung (BEM U KBM UNILA), pada tahun 2019 menjadi Staff Ahli Dinas Sosial dan Politik, pada tahun 2020, penulis menjadi Sekretaris di SEG SC UNILA. Pada tahun 2019-2021 menjadi anggota di bidang Kaderisasi HIMA TG BHUWANA. Pada semester enam, penulis melakukan Kerja Praktik (KP) di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi di Bandung, Jawa Barat dengan judul laporan “**IDENTIFIKASI PENINGKATAN AKTIVITAS GUNUNGAPI MELALUI SINYAL SEISMIC DAN *REAL-TIME SEISMIC AMPLITUDE MEASUREMENT (RSAM)* PADA ERUPSI GUNUNGAPI AGUNG BALI PERIODE NOVEMBER 2017**” Pada akhir masa studi, penulis melakukan penelitian untuk memperoleh gelar sarjana teknik dengan judul “**PENENTUAN HIPOSENTER DAN MEKANISME FOKAL (*FOCAL MECHANISM*) GEMPA *VOLCANOTECTONIC (VT)* PADA GUNUNGAPI AGUNG MENGGUNAKAN *P WAVE FIRST MOTION POLARITY* PERIODE ERUPSI NOVEMBER-DESEMBER 2017**”.

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur Allah SWT, skripsi ini dipersembahkan kepada:

**ALLAH SWT.
dan
Nabi Muhammad SAW.**

Ayahanda Rusdi

Ibunda Sumarni

Adik tersayang Ananta Gallant Nurdiansyah

Terimakasih atas segala doa, kasih sayang yang selalu kalian berikan tanpa henti

Terimakasih atas segala jerih payah Ayah dan Ibu sehingga segala kebutuhan dan keinginanku dapat selalu terpenuhi tanpa kekurangan

Semuanya takkan bisa kubalas, namun akan selalu berusaha menjadi anak terbaik sampai kapanpun

Teknik Geofisika Unila 2017

Terimakasih atas semua bantuan, kebaikan, pengalaman, dan semua hal yang sudah menjadi salah satu pembangun pribadi diriku yang sekarang.

**Semua yang terlibat dalam penulisan tugas akhir ini
Aku sayang kalian**

MOTTO HIDUP

“ Allah selalu bersama ku”

“Be Yourself”

“Don’t do your best, but give your best!”

“ Don’t have to be great to start, but you have to start to be great!”

Deamasari Dwi Rusdiana

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, atas segala rahmat, hidayah, dan inayah-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Sholawat serta salam senantiasa selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW yang telah mengantarkan kita melewati masa jahiliyah sampai ke masa sekarang ini.

Skripsi ini mengangkat judul “Penentuan Hiposenter dan Mekanisme Fokal (*Focal Mechanism*) Gempa *Volcanotectonic* (VT) pada Gunungapi Agung Menggunakan *P Wave First Motion Polarity* Periode Erupsi November-Desember 2017”. Skripsi ini merupakan hasil dari Tugas Akhir yang penulis laksanakan di Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Skripsi ini tidak lepas dari kesalahan. Karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dari pembaca untuk kemajuan kita bersama. Semoga skripsi ini dapat berguna dan dapat menunjang perkembangan ilmu pengetahuan serta dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan juga bagi pembaca pada umumnya.

Bandar Lampung, Mei 2022

Penulis,

Deamasari Dwi Rusdiana

SANWACANA

Puji syukur penulis haturkan kepada Allah SWT. yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah serta karunia-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini berjudul “Penentuan Hiposenter dan Mekanisme Fokal (*Focal Mechanism*) Gempa *Volcanotectonic* (VT) pada Gunungapi Agung Menggunakan *P Wave First Motion Polarity* Periode Erupsi November-Desember 2017”. Penulis berharap karya ini dapat bermanfaat di kemudian hari. Banyak pihak yang terlibat langsung dalam memberikan kontribusi ilmiah, spiritual, dan informasi baik secara langsung maupun tidak langsung hingga terbentuk skripsi ini. Pada kesempatan kali ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada :

1. Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa dan Rasullullah Muhammad SAW atas segala rahmat dan hidayah-Nya, segala pertolongan dan kebaikan-Mu yang telah menuntun penulis untuk menjalani Tugas Akhir ini dengan yakin dan selalu berhusnudzon akan adanya rencana terbaik yang sudah Allah siapkan.
2. Kedua orang tua tercinta yang selalu menjadi kebanggaan hidup penulis Bapak Rusdi dan Ibu Sumarni yang telah senantiasa mendoakan, memberi dukungan, mencintai dan menyayangi dengan sepenuh hati, serta adikku Ananta Gallant Nurdiansyah yang selalu memberi semangat tanpa henti.
3. Bapak Karyanto, S.Si. M.T. selaku dosen Pembimbing Akademik dan juga Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ir. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU. selaku pembimbing utama atas ketersediannya untuk memberikan banyak bimbingan, saran, kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini.

5. Bapak Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si. selaku pembimbing kedua dalam Tugas Akhir ini yang telah memberikan banyak bimbingan, saran, serta kritikan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Rustadi, S.Si., M.T. selaku penguji dalam Tugas Akhir ini yang telah memberikan masukan, saran, serta kritikannya.
7. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati, penuh ucap terima kasih untuk segala ilmu yang diberikan.
8. Seluruh Staff Tata Usaha Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan bantuan dalam keperluan administrasi.
9. Kak Bayu Merdeka BMKG dan Kak Anna UGM yang sudah banyak sekali membantu penulis dalam semua hal pengolahan data tugas akhir, kalian adalah Pahlawan TA-ku.
10. Teman-teman SALAK BOR (Fifah, Varen, Lisa, Tiwi, Mia, Risa) yang telah menemani, membantu, dan memberikan semangat dalam menyelesaikan tahun terakhir dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Teman-teman pejuang tugas akhir hingga lulus Kak Ester, Irhaz, Devita, Mia, Alfina, Risa, yang selalu saling menyemangati dan berjuang bersama untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan semangat maksimal di masa akhir kuliah.
12. Kepada TG 17 Varen, Fifah, Devita, Irhaz, Lisa, Aryka, Oca, Jeje, Tiwi, Uti, Mustika, Mesa, Rere, Fe, Risa, Fina Heni, Sukma, Tasya, Deden, Danti, Jijah, Intan, Uli, Vivi, Mia, Alma, Ito, Bryan, Faiq, Fajri, Azhar, Fatur, Acep, Ryas, Adief, Bagus, Baho, Baong, Bima, Faiz, Gede, Guruh, Icun, Madi, Niko, Paulus, dan Tajar.
13. Seluruh Kakak Tingkat TG angkatan 2016, 2015, 2014, 2013, 2012, 2011, 2010, 2009, 2008, 2007 dan Adik Tingkat angkatan 2018, 2019, 2020, 2021 yang telah membantu penulis selama perkuliahan.
14. Kepada “Bets” Fia dan Lina, yang selalu menyemangati dan memberi perintah untuk segera pulang ke tangerang yang memberikan penulis motivasi untuk menyelesaikan tugas perkuliahan.
15. The last but not least, for my fav person. The biggest thanks for always being there for me.

16. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan bahwa Skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Aamiin.

Bandar Lampung, Mei 2022

Penulis,

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	ii
ABSTRACT	iii
PERSETUJUAN	iv
PENGESAHAN.....	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN	viii
MOTTO HIDUP	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xx
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5

2.1. Letak dan Lokasi Penelitian	5
2.2. Geologi dan Morfologi Gunungapi Agung	6
2.3. Sejarah Gunungapi Agung	8
2.4. Kajian Mekanisme Fokus pada Gunungapi	9
III. TEORI DASAR	12
3.1. Teori Gelombang.....	12
3.1.1. Gelombang Primer	12
3.1.2. Gelombang Sekunder	13
3.2. Gempa Vulkanik.....	13
3.2.1. Gempa Vulkanik Dalam (Tipe A/VT A).....	14
3.2.2. Gempa Vulkanik Dangkal (Tipe B/VT B)	14
3.3. Hubungan Aktivitas Vulkanik dengan Gempabumi.....	15
3.4. Hiposenter	16
3.4.1. Metode <i>Geiger's Method with Adaptive Damping (GAD)</i>	17
3.5. Teori Elastisitas	19
3.5.1. Tegangan (<i>stress</i>).....	20
3.5.2. Regangan (<i>strain</i>)	20
3.5.3. Hukum Hooke.....	21
3.6. Sesar Bumi (<i>Earth Fault</i>).....	22
3.7. Polaritas Gelombang Seismik	25
3.8. Mekanisme Sumber Gempabumi	27
IV. METODOLOGI PENELITIAN.....	30
4.1. Tempat dan Waktu Penelitian	30
4.2. Jadwal Penelitian	31
4.3. Perangkat lunak	32
4.4. Data penelitian.....	33
4.5. Prosedur penelitian	34

4.5.1. Sortir data dan <i>register event</i>	34
4.5.2. <i>Picking</i> waktu tiba gelombang P dan S.....	35
4.5.3. <i>Input</i> parameter.....	36
4.5.4. <i>Slicing</i> peta episenter	37
4.5.5. <i>Input</i> parameter.....	37
4.5.6. Plot <i>stereonet</i> pada peta gunungapi Agung.....	38
4.5.7. Sebaran hiposenter dan mekanisme fokus berdasarkan kedalaman dan sesar	38
4.6. Diagram Alir	39
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	40
5.1. Penentuan dan analisis sebaran episenter dan hiposenter	40
5.1.1. Peta episenter gempa bumi VT gunungapi Agung	41
5.1.2. Sayatan pada peta episenter gempa bumi VT gunungapi Agung	43
5.1.2.1. Sayatan AB bagian barat G. Agung dengan arah baratdaya ..	44
5.1.2.2. Sayatan CD dengan arah Barat-Timur memotong G. Agung	47
5.1.2.3. Sayatan EF bagian barat G. Agung dengan arah baratdaya ...	48
5.2. Penentuan dan analisis mekanisme fokus	50
5.2.1. Sebaran mekanisme fokus pada kedalaman <1 km mpdl	52
5.2.2. Sebaran mekanisme fokus pada kedalaman 1-5 km mpdl	53
5.2.3. Sebaran mekanisme fokus pada kedalaman 5-10 km mpdl	55
5.2.4. Sebaran mekanisme fokus pada kedalaman >10 km mpdl	56
5.2.5. Analisis mekanisme fokus berdasarkan kedalaman hiposenter.....	56
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	63
6.1. Kesimpulan	63
6.2. Saran.....	64

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta sebaran pos pengamatan Gunungapi Agung.....	5
2. Peta geologi Gunungapi Agung.....	6
3. Karakteristik bentuk kawah dari gunungapi dengan kawah terbuka (Sutawidjaja, 2006)	7
4. Gelombang primer (Minakami, 1974)	12
5. Gelombang sekunder (Minakami, 1974).....	13
6. Rekaman seismik gempa tipe A (Minakami, 1974).....	14
7. Rekaman seismik gempa tipe B (Minakami, 1974).....	14
8. Pergerakan magma gunungapi yang memicu gempa bumi (Herwanda, 2016).	15
9. Jarak antara hiposenter gempabumi ke stasiun (Saputri dan Pujiastuti, 2020)	17
10. Komponen-komponen tegangan (<i>stress</i>) (Telford, 1990)	20
11. Analisis regangan (<i>strain</i>) dua dimensi (Telford, 1990).....	21
12. Grafik hubungan <i>stress</i> dan <i>strain</i> (Bormann, 2002).....	22
13. Geometri suatu patahan sebagai sumber gempa bumi (Shearer, 2009)	23
14. Jenis-jenis patahan berdasarkan arah pergerakan relatif <i>hanging wall</i> terhadap <i>footwall</i> (Shearer, 2009).....	24
15. Polarisasi gelombang P pada gempa bumi yang disebabkan pergerakan	

patahan geser. Daerah kompresi menghasilkan polarisasi naik sedangkan daerah dilatasi menghasilkan polarisasi turun (Stein dan Wysession, 2003).	26
16. Pola radiasi gelombang P (kiri) dan gelombang S (kanan) pada teori kopel ganda (Aki dan Richard, 2002).....	27
17. Mekanisme fokus gempa bumi pada beberapa sistem patahan dilihat dari <i>lower-half hemisphere</i> (Stein dan Wysession, 2003)	28
18. Proyeksi azimut dan <i>take-off angle</i> pada suatu sumber gempa bumi (Lay dan Wallace, 1995)	29
19. Tampilan data rekaman seismik gunungapi Agung pada 8 pos pengamatan dan terdapat pada 3 komponen alat rekaman data seismmik (EHE, EHN, dan EHZ)	34
20. Data ditampilkan pada software Dimas 2008, dilakukan filtering dengan rentang 1-5 Hz, kemudian data akan mudah untuk dilakukan picking gelombang P dan S.....	34
21. <i>Picking</i> gelombang P dan S, serta memiliki nilai polaritas gelombang P apakah bersifat kompresi (+) atau dilatasi (-).....	34
22. <i>Output</i> yang dihasilkan dari <i>running software Python</i> adalah nilai longitude, latitude, <i>origin time</i> , <i>depth</i> , RMS, ERH, ERZ.	37
23. Hasil dari <i>running</i> berupa bola fokus memiliki nilai parameter sesar yaitu <i>strike</i> , <i>dip</i> , dan <i>rake</i>	37
24. Diagram alir.	39
25. Sebaran episenter gempabumi VT pada area G.Agung periode erupsi November-Desember 2017 dengan variasi kedalaman ditunjukkan melalui skala warna tidak episenter serta sebarannya berada pada bagian baratdaya hingga utara gunung dengan arah sebaran merepresentasikan arah sesar yang ditunjukkan dengan garis hitam	42
26. Sebaran episenter gempabumi VT pada area G. Agung dengan 3 sayatan diantaranya arah Baratdaya (A-B), arah Barat-Timuur (C-D), dan arah Baratdaya (E-F).....	44
27. Sebaran hiposenter gempabumi VT yang direpresentasikan melalui profil longitude dan latitude sayatan AB pada lembar sebaran episenter dengan variasi kedalaman ditunjukkan melalui skala warna dan lingkaran hitam menunjukkan zona seismisitas yang tinggi yaitu pada kedalaman 5-8 km dan 9-11 km dpl.....	46
28. Sebaran hiposenter gempabumi VT yang direpresentasikan melalui profil sayatan CD pada lembar sebaran episenter dengan variasi kedalaman ditunjukkan melalui skala warna dan lingkaran hitam menunjukkan zona	

seismisitas yang tinggi yaitu pada kedalaman 5-8 km.....	47
29. Sebaran hiposenter gempabumi VT yang direpresentasikan melalui profil sayatan EF pada lembar sebaran episenter dengan variasi kedalaman ditunjukkan melalui skala warna dan lingkaran hitam menunjukkan zona seismisitas yang tinggi yaitu pada kedalaman 5-12 km dan 5-10 km mdpl... 48	48
30. Diagram presentase dari jenis patahan yang diproyeksikan melalui mekanisme fokus, dengan jumlah patahan didominasi oleh <i>strike slip</i> (SS) dengan presentase 73%	51
31. Sebaran episenter dengan <i>focal mechanism</i> dengan jenis <i>strike slip fault</i> pada area G. Agung pada kedalaman <1 km pada periode erupsi bulan November-Desember 2017 yang terekam pada tanggal 21 November 2017 tepat pada saat erupsi freatik.....	53
32. Sebaran episenter dengan <i>focal mechanism</i> dengan jenis jumlah 18 sesar geser, 4 sesar jenis <i>reverse fault</i> dan 1 sesar jenis <i>oblique reverse</i> pada masa erupsi G.Agung November-Desember 2017 paa kedalaman 1-5 km mpdl.....	54
33. Sebaran episenter dengan <i>focal mechanism</i> pada kedalaman 5-10 km mpdl berjumlah 30 sesar, diantaranya 17 jenis sesar geser, 11 sesar naik, dan 2 sesar turun pada masa erupsi G.Agung November-Desember 2017....	57
34. Sebaran episenter dengan <i>focal mechanism</i> pada kedalaman >10 km mpdl berjumlah 18 sesar, diantaranya jenis 16 sesar geser dan 2 sesar naik, pada masa erupsi G.Agung November-Desember 2017..	58
35. Grafik sebaran hiposenter gempabumi VT Gunungapi Agung periode November-Desember 2017.....	59
36. Penampang konseptual yang menggambarkan sistem jalur magmatik sepanjang garis sejajar dengan ventilasi vulkanik Pawon, Agung, Abang dan pasca-kaldera kerucut Batur. Dimana sesar aktif yang ditunjukkan pada garis hitam antara gunungapi Agung dan Gunung Abang serta Kaldera Batur tersebut memicu magma untuk melakukan intrusi dan menuju permukaan bumi melalui <i>dike</i> gunung yang juga dipicu oleh sistem akuifer dibawah gunung Agung dan mengakibatkan terjadinya gempa vulakno-tekonik yang didominasi pada kedalaman 5-7 km, dan 10-12 km (Modifikasi dari Syahbana D.K., dkk 2019).....	62

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Catatan erupsi Gunungapi Agung (KESDM, 2014).	8
2. Jadwal kegiatan penelitian.....	31
3. Data koordinat pos pengamatan seismik Gunungapi Agung	33
4. Referensi 1-D P model kecepatan AK135 (Kennet dkk., 1995)	40

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan daerah yang memiliki gunungapi paling aktif di dunia. Banyaknya gunungapi di Indonesia adalah konsekuensi geologis dari posisi geografis yang terletak antara pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Benua Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Di bagian timur wilayah Indonesia terjadi pertemuan 3 lempeng (*triple junction*), sehingga seismisitasnya menjadi salah satu yang paling aktif di dunia. Indonesia termasuk dalam daerah Sabuk Api Pasifik (*ring of fire*), yaitu wilayah melingkar dimana batas-batas lempeng bertemu yang mengakibatkan munculnya banyak gunungapi dan zona seismik aktif (Witton dan Elliot, 2003).

Indonesia merupakan salah satu negara dengan jumlah gunung api terbanyak di dunia. Terdapat 129 gunung api tersebar di seluruh pulau yang ada di Indonesia. Pulau-pulau besar dari busur vulkanik dalam, dengan aktivitas vulkanisme bersifat intermediet yang terdapat di Indonesia terbentuk akibat subduksi lempeng samudera dibawah lempeng benua yang lebih tua dan tebal. Hal ini terungkap dari studi seismik dan profil geologi di sepanjang sistem palung-busur Sumatera, Jawa dan Bali hingga Timor (Katili 1975).

Gunungapi adalah gunung yang terbentuk akibat material hasil erupsi menumpuk di sekitar pusat erupsi atau gunung yang terbentuk dari erupsi magma. Gunungapi hanya terdapat pada tempat-tempat tertentu, yaitu pada jalur punggung tengah samudera, pada jalur pertemuan dua buah lempeng kerak bumi, dan pada titik-titik panas di muka bumi tempat keluarnya magma, di benua maupun di samudera. Salah satunya yaitu Gunungapi Agung, Gunung

Agung merupakan salah satu gunung yang berada di Provinsi Bali tepatnya di Kabupaten Karangasem Provinsi Bali. Gunung Agung dengan ketinggian 3.014 meter di atas permukaan laut merupakan gunung berapi aktif yang bertipe *stratovolcano* dengan kawah yang lebar dan dalam. Sejarah mencatat letusan Gunung Agung terbesar terjadi pada tahun 1963 yang setidaknya menelan korban hingga 1.500 jiwa. Hingga 27 November 2017, tingkat siaga berada pada level tertinggi dan perintah evakuasi telah dikeluarkan. Letusan tersebut menyebabkan sekitar 40.000 orang harus dievakuasi dari 22 desa di sekitar Gunung Agung. Dampak erupsi tersebut menyebabkan beberapa gangguan di berbagai sektor, khususnya sektor penerbangan (Martanto, 2017).

Gempa vulkanik yang terjadi di bawah gunungapi aktif tidak hanya bersumber dari aktivitas zona subduksi, tetapi juga dari sistem sesar aktif di sepanjang Lempeng Samudera Hindia Utara. Hal ini akan dapat diketahui dengan menganalisa mekanisme sumber gempa. Dalam ilmu geofisika, gambaran mengenai mekanisme gempa bumi sangat penting untuk dipelajari. Berbagai cara telah dilakukan oleh para ahli untuk menganalisis mekanisme sumber gempa. Mekanisme sumber gempa (*focal mechanism*) merupakan metode yang digunakan untuk menentukan parameter sesar yang terjadi berupa penentuan nilai *strike* (jurus), *dip* dan *rake*. Sehingga akan didapatkan gambaran tentang medan stress di sekitar sumber gempa. Penentuan mekanisme sumber gempa dapat ditentukan dengan beberapa cara, diantaranya dengan menggunakan kombinasi gelombang P dan gelombang S, data awal arah gelombang P, dengan menggunakan bentuk gelombang lain sebagainya (Daisuke, 1997).

Salah satu penyebab baik buruknya hasil mekanisme fokus dengan menggunakan metode polaritas gelombang P ini adalah ketepatan penentuan awal arah gerakan pertama gelombang P. Penentuan polaritas gelombang P yang selama ini dilakukan dengan menggunakan data-data analog merupakan salah satu penyebab kurang akuratnya metode ini. Kendala tersebut dapat ditanggulangi dengan hadirnya sistem digital pencatat gempabumi di Indonesia yang memberikan hasil digit gempa bumi yang terjadi. Dengan menggunakan

seismogram digital maka kesalahan penentuan awal arah gerakan pertama gelombang P dapat dihindari.

Perlu dilakukan penelitian lebih dalam mengenai struktur-struktur pada bawah permukaan gunungapi. Studi mengenai struktur dapat dilakukan melalui analisis mekanisme sumber gempa vulkanik khususnya pada gempabumi *volcano-tectonic* (VT). Analisis mekanisme fokus gempa tersebut akan memberikan informasi mengenai jenis-jenis sesar apa sajakah yang terjadi selama masa erupsi di Gunungapi Agung periode November-Desember 2017.

1.2. Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan sebaran posisi hiposenter dominan gempa bumi VT gunungapi Agung periode November-Desember 2017.
2. Mengetahui jenis mekanisme fokus gempa bumi VT gunungapi Agung periode November-Desember 2017 menggunakan nilai polaritas gerak awal gelombang P.
3. Mendapatkan perkiraan kantong magma gunungapi Agung pada periode November-Desember 2017 berdasarkan hiposenter dan mekanisme fokus.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu hanya pada rekaman seismik periode di bulan November dan Desember 2017.
2. Data rekaman seismik yang digunakan dalam pengolahan data yaitu berjumlah 799 data dan tercatat pada 8 stasiun pemantauan gunungapi.
3. Metode yang digunakan untuk menganalisis sumber gempa bumi adalah dengan penentuan polaritas awal gelombang P dan dibatasi pada analisis bola fokus.
4. Hasil dari penelitian ini yaitu gambaran mekanisme fokus pada gempabumi vulkanik pada gunungapi Agung periode di bulan November dan Desember 2017.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai sebaran hiposenter dan jenis-jenis mekanisme fokus yang terjadi pada daerah gunungapi Agung erupsi November dan Desember 2017.
2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan hiposenter dan mekanisme fokus pada gunungapi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Letak dan Lokasi Penelitian

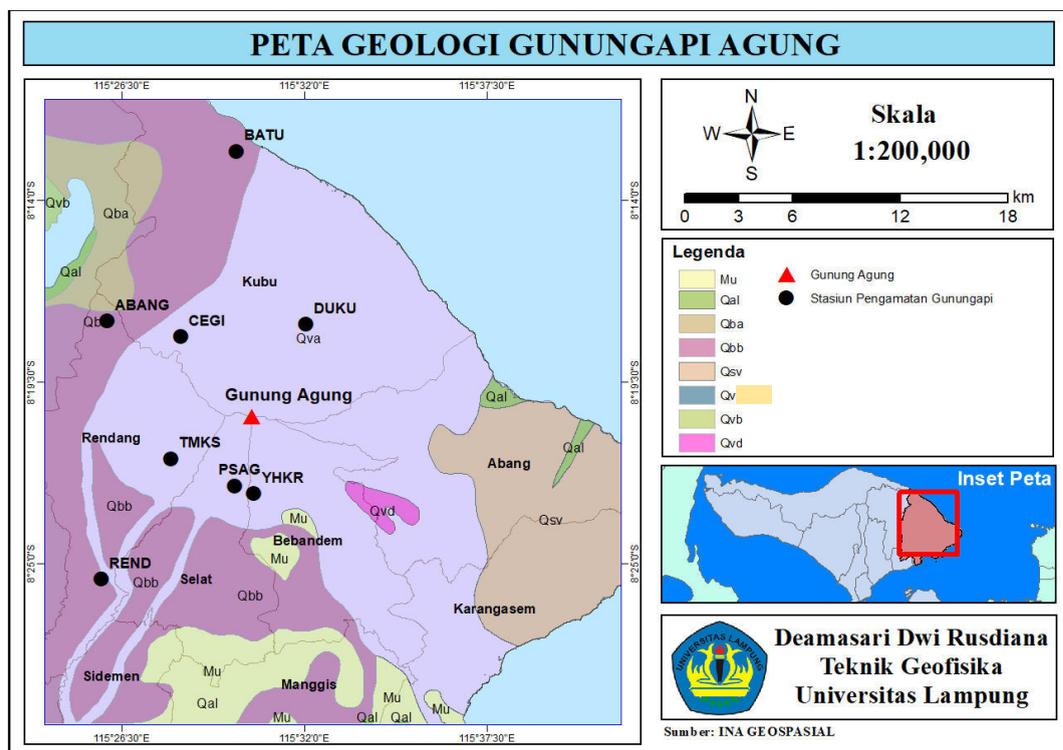


Gambar 1. Peta sebaran pos pengamatan Gunungapi Agung

Gunungapi Agung adalah suatu gunungapi yang terletak di Kabupaten Karangasem Bali, Indonesia dengan puncak 3014 m di atas permukaan laut. Gunungapi Agung berdasarkan posisi astronomis berada pada 08°20.5' Lintang Selatan dan 115° 30.5' Bujur Timur dan berdasarkan koordinat sistem proyeksi UTM WGS84 zona 50S adalah sebuah gunungapi strato komposit yang berbentuk kerucut dengan kawah terbuka dan dengan ukuran 625m x 425 m (Kusumadinata, 1964).

Gunungapi Agung memiliki 8 pos pengamatan gunungapi yang dimana di setiap pos nya terdapat instrumen untuk mendapatkan data rekaman seismik yang disebut dengan seismograf. Lokasi dari pos pengamatan gunungapi agung diantaranya yaitu di Kecamatan Kubu terdapat pos BATU, CEGI, DUKU, pada Kecamatan Rendang terdapat pos ABANG, TMKS, REND, pada Kecamatan Selat terdapat pos PSAG, dan di Kecamatan Bebandem terdapat pos YHKR.

2.2. Geologi dan Morfologi Gunungapi Agung



Gambar 2. Peta geologi Gunungapi Agung

Stratigrafi Gunung Agung didasarkan pada tingkat kesegaran batuan serta hubungan antara satuan batuan. Posisi stratigrafi dari produk yang tertua sampai dengan termuda adalah sebagai berikut:

- Formasi Ulakan (Uvs) terdiri dari batu gamping koral, lava dan breksi vulkanik. Batuan ini diperkirakan *Andesit basaltis*.
- Kelompok batuan Kondangdia (Kv) kelompok batuan ini terdapat pada bagian timur hasil dari aktifitas tua terdiri dari aliran lava tua dengan struktur *sheeting joint*.

- c. Kelompok Batuan Budakeling (Bv) terdapat di bagian tenggara Gunungapi Agung yaitu di daerah Budakeling terdiri dari lava dan breksi vulkanik dengan fragmen-fragmen batuan beku yang beraneka ragam.
- d. Kelompok Batuan Cemara (Cv) terdapat pada bagian selatan, berupa lava dan batuan piroklastik.
- e. Kelompok Batuan Tabis (Tv) terletak di sebelah barat Gunungapi Agung, dibentuk oleh lava dan piroklastik.
- f. Kelompok Batuan Vulkanik Batur (BAv) terdapat pada bagian barat Gunungapi Agung dan merupakan hasil erupsi Gunungapi Batur tua.

(KESDM, 2014).



Gambar 3. Karakteristik bentuk kawah dari gunungapi dengan kawah terbuka (Sutawidjaja, 2006).

Morfologi kaldera Gunung Agung terutama berupa kerucut gunungapi dan parasit gunungapi. Morfologi kerucut gunungapi berbentuk hampir simetri dengan ketinggian 3014 mdpl, lerengnya relatif terjal seperti terlihat pada **Gambar 4**. Satuan morfologi ini dibentuk oleh bahan piroklastik dan lava, bagian puncak ditutupi oleh bahan lepas yang cukup tebal, terutama piroklastik jatuhnya hasil letusan tahun 1963. Sedangkan morfologi parasit gunungapi daerah Gunung Agung terdapat pada lereng tenggara, membentuk kerucut-kerucut gunungapi (*cone shape*), diantaranya Gunung Pawon (800 m dpl). Beberapa kerucut pada bagian timur Gunungapi Agung, diduga bukan merupakan parasit

dari Gunungapi Agung. Bahan pembentuk satuan morfologi ini terdiri dari lava dan bahan lepas berupa skoria atau “cinder” (KESDM, 2014).

2.3. Sejarah Gunungapi Agung

Erupsi Gunungapi Agung yang diketahui sebanyak 4 kali sejak tahun 1800 sebelum pada tahap periode letusan tahun 2017, seperti diperlihatkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Catatan Erupsi Gunungapi Agung (KESDM, 2014).

Tahun letusan	Kegiatan
1808	Dalam tahun ini dilontarkan abu dan batuapung dengan jumlah luar biasa
1821	Terjadi erupsi normal, selanjutnya tidak ada keterangan
1843	Erupsi didahului oleh gempa bumi. Material yang dimuntahkan yaitu abu, pasir, dan batuapung. Selanjutnya dalam tahun 1908, 1915, dan 1917 di berbagai tempat di dasar kawah dan pematangnya tampak tembusan fumarola.
1963	Erupsi dimulai tanggal 18 Februari 1963 dan berakhir pada tanggal 27 Januari 1964. Erupsi bersifat magnatis. Korban tercatat 1.148 orang meninggal dan 296 orang luka.

- Pola dan sebaran hasil erupsi lampau sebelum tahun 1808, 1821, 1843, dan 1963 menunjukkan tipe letusan yang hampir sama, diantaranya adalah bersifat eksplosif (letusan, dengan melontarkan batuan pijar, pecahan lava, hujan piroklastik dan abu), dan efusif berupa aliran awan panas, dan aliran lava. Lava yang meleleh antara 19 Februari dan 17 Maret 1963 mengalir dari kawah utama di puncak ke utara, lewat tepi kawah yang paling rendah, berhenti pada garis ketinggian 505,64 m dan mencapai jarak ± 7.290 m. Di Gunungapi Agung terdapat dua macam awan panas, yakni awan panas letusan dan awan panas guguran. Awan panas letusan terjadi pada waktu ada letusan besar (KESDM, 2014).

2.1. Kajian Mekanisme Fokus pada Gunungapi

Mekanisme fokus (*focal mechanism*) sering disebut sebagai mekanisme sumber atau *fault plane solution*. *Focal mechanism* merepresentasikan sistem stress yang bekerja pada suatu zona gempa bumi atau bidang patahan yang terjadi. Mekanisme fokus menunjukkan arah pergeseran serta orientasi patahan yang dideskripsikan melalui *strike*, *dip*, dan *rake*. Gempa bumi VT terjadi pada tubuh gunung api dan area sekitar tubuh gunung api dan menunjukkan interaksi 2 proses geologi yaitu migrasi magma ke permukaan bumi serta aktivitas tektonik lempeng (Zobin, 2003). Oleh karena itu, penting untuk mempelajari mekanisme fokus gempa bumi VT dan stress yang dilepaskan pada saat gempa bumi VT tersebut terjadi. Beberapa penelitian mengenai mekanisme fokus pada gunung api di Indonesia yang pernah dilakukan diantaranya sebagai berikut:

- (Hidayati dkk, 2008); menganalisis rekaman seismik gempa bumi VT pada gunung api Merapi aktivitas periode tahun 2000 serta menentukan mekanisme 16 fokusnya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menentukan polaritas gelombang P serta asumsi *far-field P-wave displacement* pada 12 data gempa bumi vulkanik dalam (VTA) dan 19 data gempa bumi vulkanik dangkal (VTB). Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui mekanisme sumber gempa bumi VT dan hubungannya dengan proses migrasi magma serta aktivitas erupsinya. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa mekanisme gempa bumi VTA didominasi akibat patahan normal yang diperkirakan berasosiasi dengan meningkatnya tegangan horizontal pada saat pergerakan magma naik ke atas. Mekanisme sumber pada gempa bumi VTB zona lebih dalam memiliki karakteristik yang mirip dengan VTA sedangkan pada zona lebih dangkal berupa patahan naik dan normal yang diperkirakan akibat pertumbuhan kubah lava.
- (Kriswati dkk, 2010); meneliti tentang mekanisme gempa bumi vulkanik Gunung Api Talang pasca gempa bumi tektonik Mentawai, Sumatera Barat tahun 2007-2009. Penelitian tersebut bertujuan untuk

menganalisis hubungan antara kejadian erupsi dan gempa bumi di daerah penelitian berdasarkan catatan sejarah, perekaman gempa bumi di 4 stasiun seismik dan menganalisis mekanisme sumber gempa bumi vulkanik Gunung Api Talang. Penelitian ini menunjukkan gempa vulkanik tahun 2007 hingga 2009 memperlihatkan pola yang berarah tenggara-barat laut dengan mekanisme sesar geser mengangan (*dextral strike-slip fault*) dan sesar turun (*normal fault*). Aktivitas kegempaan di Gunung Talang didominasi oleh pergerakan struktur lokal yang terpengaruh oleh pergerakan tektonik regional.

- (Hidayati dkk, 2011); melakukan penelitian mengenai mekanisme dan parameter sumber gempa bumi VT di Gunung Api Guntur, Jawa Barat periode Juli-Oktober 2009. Tujuan utama dari penelitian ini adalah menganalisis parameter sumber gempa, momen seismik, *corner frequency*, dan *stress drop* untuk mengetahui dimensi sumber gempa dan slip rerata sesar (*displacement*). Penelitian ini menunjukkan mekanisme sumber gempa di daerah Gunung Guntur-Gunung Gandapura yang tidak unik (sesar turun *oblique*, sesar naik *oblique*, dan sesar geser) ini kemungkinan disebabkan oleh struktur yang cukup 17 rumit di area kompleks Gunung Guntur. *T-axis* sesar turun *oblique*, satu garis nodal sesar geser, dan *P-axis* sesar naik *oblique* berarah barat laut-tenggara relatif searah dengan struktur dominan di daerah puncak Guntur.
- (Iguchi dkk, 2015); menganalisis distribusi hiposenter serta *focal mechanisms* pada beberapa gunung api di Indonesia menggunakan data yang diperoleh dari data loggers (DATAMARK LS8000-SH) serta data dari stasiun permanen pada daerah sekitar gunung api. Gunungapi yang termasuk dalam penelitian ini yaitu, Gunungapi Guntur, Anak Krakatau, Gede, Sangeanapi, Ili Lewotolo, Slamet, dan Papandayan. Jenis gempa bumi vulkanik yang digunakan dalam penelitian ini merupakan gempa bumi *volcanotectonic* tipe A, kecuali pada gunungapi Slamet dan Papandayan menggunakan gempa bumi Multifase (MP) dan gempa

bumi vulkanik frekuensi rendah (LF). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa gempa bumi vulkanik terkonsentrasi pada zona di bawah kawah aktif atau kawah yang sebelumnya mengalami erupsi dengan kedalaman hiposenter yang dangkal yaitu kurang dari 5 km. Mekanisme sumber pada seluruh gunung api ini sebagian besar berupa patahan normal atau patahan naik di bawah kawah, tetapi pada kaldera Kamojang yang terletak 5 km sebelah barat Gunung Api Guntur, gempa bumi vulkanik memiliki kedalaman lebih dalam dengan mekanisme sumber berupa patahan *strike-slip*.

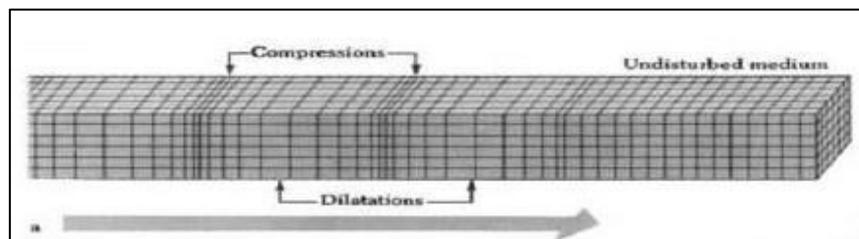
III. TEORI DASAR

3.1. Teori Gelombang

Gelombang adalah suatu gejala terjadinya perambatan suatu gangguan (*disturbance*) melewati suatu medium dimana setelah gangguan ini lewat keadaan medium akan kembali ke keadaan semula, seperti sebelum gangguan itu datang. Gelombang badan merupakan gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi. Gelombang badan terdiri dari gelombang gelombang P dan S.

3.1.1. Gelombang Primer

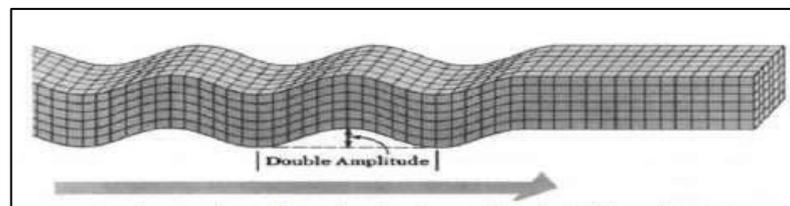
Gelombang Primer atau gelombang kompresi merupakan gelombang badan (*body wave*) yang memiliki kecepatan paling tinggi dari gelombang S. Gelombang ini merupakan gelombang longitudinal partikel yang merambat bolak balik dengan arah rambatnya. Gelombang ini terjadi karena adanya tekanan. Karena memiliki kecepatan tinggi gelombang ini memiliki waktu tiba terlebih dahulu dari pada gelombang S. Kecepatan gelombang P (VP) 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.



Gambar 4. Gelombang Primer (Minakami, 1974).

3.1.2. Gelombang Sekunder

Gelombang S atau gelombang transversal (*shear wave*) adalah salah satu gelombang badan (*body wave*) yang memiliki gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambatnya serta waktu tibanya setelah gelombang P. Gelombang ini tidak dapat merambat pada fluida, sehingga pada inti bumi bagian luar tidak dapat terdeteksi sedangkan pada inti bumi bagian dalam mampu dilewati. Kecepatan gelombang S (V_S) 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 5. Gelombang Sekunder (Minakami, 1974).

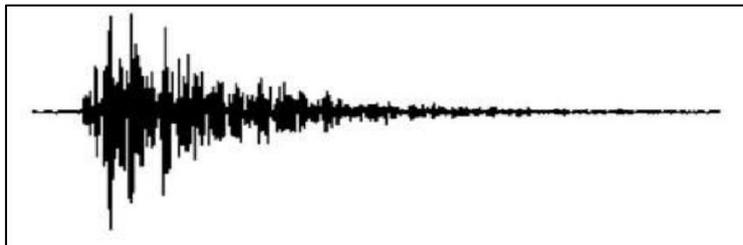
3.2. Gempa Vulkanik

Gempa ini disebabkan oleh kegiatan gunungapi. Magma yang berada pada kantong di bawah gunung tersebut mendapat tekanan dan melepaskan energinya secara tiba-tiba sehingga menimbulkan getaran tanah. Sebenarnya mekanisme gempa tektonik dan vulkanik sama. Naiknya magma ke permukaan juga dipicu oleh pergeseran lempeng tektonik pada sesar bumi. Biasanya ini terjadi pada batas lempeng tektonik yang bersifat konvergen (saling mendesak). Hanya saja pada gempa vulkanik, efek guncangan lebih ditimbulkan karena desakan magma, sedangkan pada gempa tektonik, efek guncangan langsung ditimbulkan oleh benturan kedua lempeng tektonik. Bila lempeng tektonik yang terlibat adalah lempeng benua dengan lempeng samudera, sesarnya berada di dasar laut, karena itu biasanya benturan yang terjadi berpotensi menimbulkan tsunami. Berbagai gempabumi yang diamati oleh pengamatan seismik di gunungapi aktif dan berbagai memberikan informasi penting mengenai aktivitas gunungapi. Klasifikasi gempa vulkanik

dikelompokkan oleh Minakami berdasarkan bentuk rekaman gempa, perkiraan hiposenternya dan perkiraan proses yang terjadi di dalam tubuh gunungapi (Minakami, 1974).

3.2.1. Gempa Vulkanik Dalam (Tipe A/VT A)

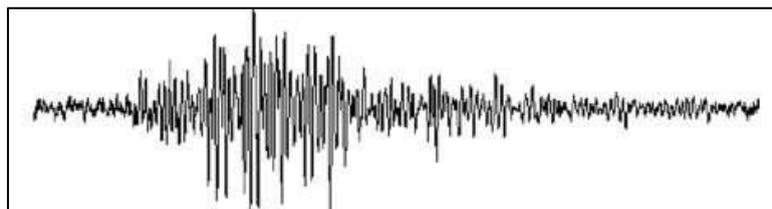
Sumber dari tipe gempa ini terletak di bawah gunungapi pada kedalaman 5 sampai 20 km, biasanya muncul pada gunungapi yang aktif. Gempa tipe A dapat disebabkan oleh adanya magma yang naik ke permukaan yang disertai rekahan-rekahan. Ciri utama dari gempa tipe A ini adalah selisih waktu tiba gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S) sampai 5 detik dan berdasarkan sifat fisisnya, gempa ini bentuknya mirip dengan gempa tektonik.



Gambar 6. Rekaman seismik gempa tipe A (Minakami, 1974).

3.2.2. Gempa Vulkanik Dangkal (Tipe B/VT B)

Sumber gempa vulkanik tipe B diperkirakan pada kedalaman 0-5 km. Gerakan awalnya cukup jelas dengan waktu tiba gelombang S yang tidak jelas dan mempunyai nilai magnitudo yang kecil. Selisih waktu tiba gelombang P dan gelombang S kurang dari 1 detik. Dalam pelaksanaannya, untuk membedakan gempa vulkanik dangkal dan dalam dibedakan dari bisa dibacanya waktu tiba gelombang S. Bila waktu tiba gelombang S tidak dapat dibaca dikategorikan sebagai gempa vulkanik dangkal dan bila dapat dibaca (walau di bawah 1 s) dikategorikan ke dalam gempa vulkanik dalam.



Gambar 7. Rekaman seismik gempa tipe B (Minakami, 1974).

3.3. Hubungan Aktivitas Vulkanik dengan Gempabumi

Gempa bumi pada umumnya disebabkan oleh dua peristiwa, yaitu peristiwa tektonik yang disebut gempa tektonik dan peristiwa vulkanik yang disebut gempa vulkanik. Gempa vulkanik terjadi karena adanya aktivitas gunungapi, baik berupa gerakan magma yang menuju ke permukaan maupun letusan atau hembusan gas yang dikeluarkan dari tubuh gunungapi. Aktivitas gempa bumi di bawah gunungapi akan selalu meningkat sebelum terjadinya erupsi karena magma dan gas gunungapi yang harus terlebih dahulu mendorong ke permukaan melalui rekahan dan lorong-lorong. Ketika magma dan gas vulkanik berpindah akan menyebabkan retakan hingga pecahnya batuan. Retakan atau pun pecahnya batuan ini merupakan sumber getaran. Ketika batu pecah pada frekuensi tinggi, gempa bumi akan timbul seperti pada **Gambar 8.** berikut.



Gambar 8. Pergerakan magma gunungapi yang memicu gempabumi
(Herwanda, 2016).

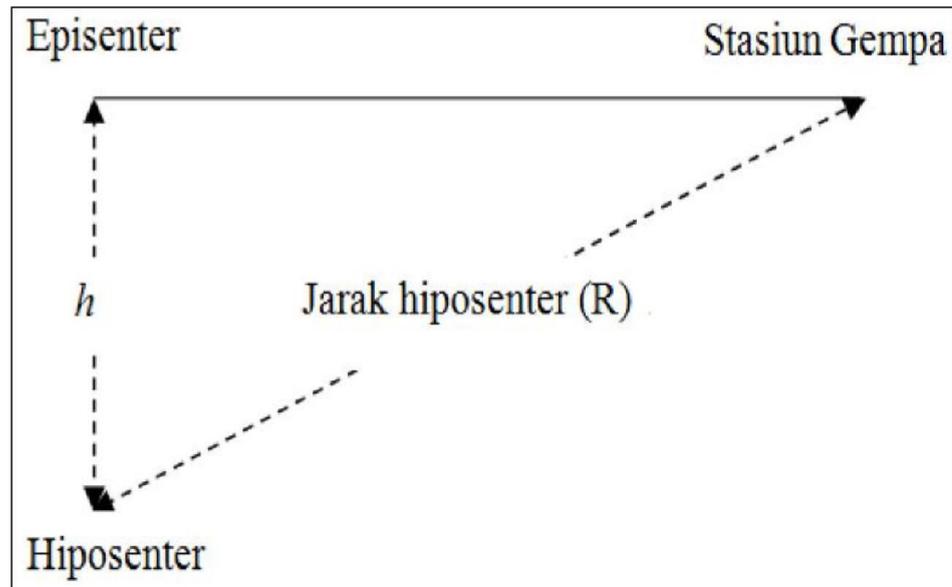
Gempa vulkanik biasa terjadi sebelum, sesaat maupun sesudah letusan. Tetapi gejala tersebut tidak selalu sama pada tiap-tiap gunungapi. Mungkin saja terjadi, gempa vulkanik sebelum letusan jumlahnya lebih banyak dari pada sesudahnya. Suatu kenyataan bahwa meskipun gunungapi itu mempunyai batuan yang sejenis, bahkan pada gunungapi yang sama sekalipun, gejala kegempaan sehubungan dengan letusan tidak selalu sama. Perbedaan

diantaranya disebabkan oleh struktur batuan masing-masing gunungapi. Sedangkan perubahan gejala mungkin karena perubahan kekentalan magma, proses mineralisasi dalam magma ketika terjadi pendinginan dalam perjalanannya menuju kepermukaan bumi yang dapat merubah mekanisma letusan dan masih banyak kemungkinan-kemungkinan lainnya (Herwanda, 2016).

3.4. Hiposenter

Hiposenter merupakan fokus gempa atau pusat gempa yang berada didalam bumi. Hiposenter dapat dicari dengan menggunakan gelombang seismik (gelombang primer dan gelombang sekunder). Hiposenter dapat dihasilkan karena adanya tekanan yang berasal dari dalam bumi yang membuat lapisan bumi mengalami pergetaran (Bulo dkk., 2020). Penentuan hiposenter merupakan salah satu parameter gempa bumi yang penting (Kurniawan dan Saputri, 2019). Dalam melakukan penentuan parameter gempa bumi, maka diperlukan ketelitian sehingga dapat menentukan kualitas data yang baik serta memberikan informasi yang akurat kepada masyarakat. Salah satu cara yang digunakan yaitu dengan menentukan hiposenter gempa (Shohaya dkk., 2014).

Dalam menentukan hiposenter gempa terdapat berbagai metode yang dapat digunakan, seperti metode Geiger (Nishi, 2005). Selain itu, terdapat parameter hiposenter gempa bumi yang terbagi menjadi parameter lokasi dan peristiwa gempa bumi yang terdiri dari longitude, latitude, kedalaman, dan waktu kejadian gempa (Ramdhan dkk., 2020). Gambar 2.15 menunjukkan jarak dari hiposenter gempa ke titik koordinat terpasangnya seismograf (lokasi stasiun gempa) (Saputri dan Pujiastuti, 2020).



Gambar 9. Jarak antara hiposenter gempa bumi ke stasiun (Saputri dan Pujiastuti, 2020).

3.4.1. Metode *Geiger's Method with Adaptive Damping* (GAD)

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan hiposenter gempa yaitu metode Geiger dengan menggunakan software *Geiger's Method with Adaptive Damping* (GAD) (Nishi, 2005). Metode Geiger pertama kali dikembangkan oleh Geiger tahun 1910 yang bertujuan untuk menentukan letak hiposenter gempa dengan mempertimbangkan parameter model awalnya (Arimuko A, dkk., 2019). Prinsip yang digunakan metode Geiger yaitu dengan menghitung residual antara waktu pengamatan (*observed*) dan waktu perhitungan (*calculated*).

Lokasi gempa didefinisikan dengan lokasi hiposenter gempa (x_o, y_o, z_o) dan waktu asal t_o . Hiposenter adalah lokasi fisik dari sumber gempa, biasanya diberikan dalam longitude (x_o), latitude (y_o), dan kedalaman di bawah permukaan (z_o [km]). Saat hiposenter dan waktu asal ditentukan oleh waktu kedatangan fase seismik dimulai oleh gempa pertama, lokasi akan dihitung sesuai dengan titik di mana gempa dimulai. Hal tersebut dilakukan secara iterasi hingga diperoleh model hiposenter yang menghasilkan nilai residual di tiap stasiun mencapai nilai minimum yang telah ditentukan.

Dimulai dari t adalah waktu tiba pertama (*first arrival time*) gelombang seismik di setiap stasiun pengamatan (seismometer) ke- i (x_i, y_i, z_i) dari hiposenter (x_o, y_o, z_o), Ti_{cal} adalah waktu tempuh kalkulasi berdasarkan model kecepatan 1D bawah permukaan yang digunakan dan sedangkan Ti_{obs} adalah waktu tempuh observasi berdasarkan selisih antara waktu tiba di tiap stasiun (t_i) dengan waktu asal (t_o).

Persamaan perhitungan residual tersebut adalah sebagai berikut (Madrinovella I, dkk., 2012).

$$ri = Ti_{obs} - Ti_{cal} \quad (1)$$

Keterangan:

ri = Selisih antara waktu observasi dan waktu perhitungan pada stasiun ke- i
 Ti_{obs} = Waktu tempuh gelombang seismik pada stasiun ke- i dari hiposenter gempa.

Ti_{cal} = Waktu tempuh yang dihitung berdasarkan model kecepatan bawah permukaan.

Dengan ri adalah nilai residual. Apabila suatu gempa terjadi pada posisi (x_o, y_o, z_o) pada waktu t_o di stasiun dengan posisi x_i, y_i, z_i akan tercatat waktu tiba gelombang gempa tersebut pada waktu t_i , maka waktu tempuh gelombang seismik dapat diketahui (x_o, y_o, z_o, t_o). Dari persamaan 2.3 diketahui apabila waktu tiba gelombang pada stasiun pengamat sama dengan jumlah dari waktu tempuh dan waktu asal, maka akan menghasilkan residual/error yang bernilai nol, dapat diperkirakan bahwa posisi dan waktu asal gempa tersebut benar.

Pada umumnya turunan parsial harus dihitung dengan metode numerik berdasarkan interpolasi tabel waktu tempuh (*travel time*). Kasus yang paling sederhana penerapan metode iteratif adalah untuk model bumi homogen dengan kecepatan gelombang = v (Stein dan Wysession, 2003. *Travel time* dari perkiraan awal hiposenter (x_o, y_o, z_o) ke stasiun $-i$ (x_i, y_i) adalah:

$$t_i^{tra} = \frac{\sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2 + z_o^2}}{v} \quad (2)$$

Jika perkiraan awal *origin time* adalah t_o , maka waktu residual di stasiun ke- i adalah:

$$r_i = \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x_0} \Delta x + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y_0} \Delta y + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z_0} \Delta z + \Delta t \quad (3)$$

$$r = G \cdot x \quad (4)$$

Keterangan:

r : vektor residual

G : matriks turunan parsial

x : vektor koreksi untuk hiposenter dan *origin time*

Maka, secara lengkap bentuk persamaan solusi matriks yaitu matriks r:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1^{tra}}{\partial x_0} & \frac{\partial t_1^{tra}}{\partial y_0} & \frac{\partial t_1^{tra}}{\partial z_0} \\ \frac{\partial t_2^{tra}}{\partial x_0} & \frac{\partial t_2^{tra}}{\partial y_0} & \frac{\partial t_2^{tra}}{\partial z_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial x_0} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial y_0} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial z_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (5)$$

Nilai $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$ merupakan nilai residual informasi sumber gempa yaitu nilai longitude, latitude, kedalaman (km) dan *origin time* dari persamaan matriks. Kemudian dapat dilakukan perbaikan lokasi hiposenter terus-menerus hingga mendapatkan residual waktu tempuh observasi dan kalkulasi (pada persamaan 1) mendekati nol. Karakteristik dari metode Geiger itu sendiri yaitu dapat diaplikasikan pada waktu tiba gelombang primer dan gelombang sekunder untuk mendapatkan fokal elemennya. Penggunaan metode Geiger sangat sederhana, dapat digunakan maksimal enam media lapisan horizontal, serta jumlah data yang digunakan minimal dari 3 stasiun (Nishi, 2005).

3.5. Teori Elastisitas

Teori elastisitas di atas menghubungkan antara gaya yang dikenakan pada permukaan luar medium yang menghasilkan perubahan bentuk. Hubungan yang paling tepat untuk menggambarkan interaksi antara gaya yang dikenakan, dengan deformasi (pada gunungapi ataupun peristiwa yang lainnya) diperlihatkan dalam konsep stress (tegangan/ tegasan/ tekanan) dan

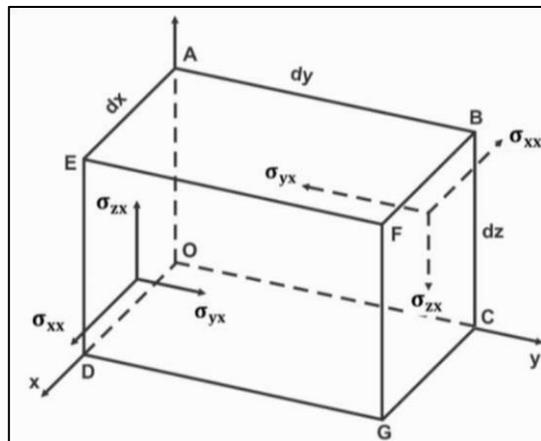
strain (regangan). Hubungan antara strain dan stress diungkap dalam hukum Hooke, untuk lebih memperdalam mengenai stress, strain, hukum Hooke.

3.5.1. Tegangan (*Stress*)

Tegangan atau *stress* adalah suatu tensor yang mendeskripsikan suatu gaya yang bekerja pada sebuah medium kontinu yang dapat terdemormasi. Tegangan dinyatakan sebagai besarnya gaya persatuan luas (Stein dan Wysession, 2008). Tegangan normal atau bisa disebut dengan *normal stress* merupakan komponen tensor yang diakibatkan oleh gaya yang tegak lurus dengan permukaan, sedangkan gaya yang sejajar dengan permukaan menghasilkan tegangan geser atau *shear stress*. Persamaan tegangan pada suatu benda dapat dituliskan seperti berikut.

$$\sigma = \frac{dF}{dA} \quad (6)$$

dengan dF merupakan gaya yang bekerja pada suatu benda dalam Newton (N), dA merupakan luas benda dalam satuan meter persegi (m^2), dan σ merupakan tegangan yang dialami benda dan memiliki satuan N/m^2 .

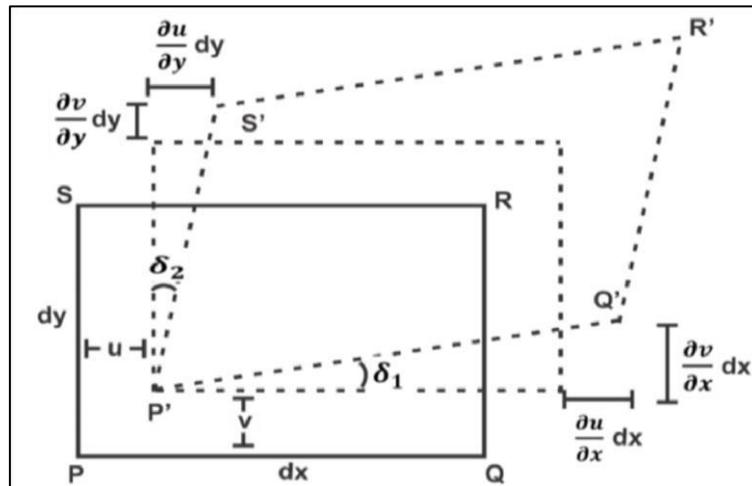


Gambar 10. Komponen–komponen tegangan (*stress*) (Telford,1990).

3.5.2. Regangan (*Strain*)

Regangan (*strain*) merupakan hasil deformasi dari gerakan bagian-bagian di dalam benda. *Strain* berhubungan dengan perpindahan atau pergeseran titik-titik di dalam suatu materi yang mengalami deformasi. Perubahan koordinat

benda terjadi diakibatkan oleh adanya *stress*, dan dapat diilustrasikan pada **Gambar 11**.



Gambar 11. Analisis regangan (*strain*) dua dimensi (Telford, 1990).

Ketika gaya dikenakan, misal P bergerak menjadi P', maka PP' memiliki komponen u dan v . Dalam hal ini, jika titik Q, R, dan S memiliki perpindahan sama seperti P, maka tidak akan terjadi perubahan bentuk dan ukuran. Meskipun demikian, jika nilai u dan v berbeda pada setiap titik maka persegi mengalami perubahan ukuran dan bentuk serta akan dihasilkan regangan.

Perubahan dimensi diberikan oleh *strain* normal yang menghasilkan perubahan volume. Perubahan volume per satuan volume disebut dilatasi dan dinotasikan dengan Δ . Jika sebuah benda dengan sisi mula-mula dx , dy , dz setelah mengalami strain maka komponennya berubah menjadi $dx (1 + \epsilon_{xx})$; $dy (1 + \epsilon_{yy})$; $dz (1 + \epsilon_{zz})$. Dengan demikian, pertambahan volumenya dapat dituliskan oleh persamaan 2 berikut.

$$\begin{aligned}\Delta &= \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\end{aligned}\quad (7)$$

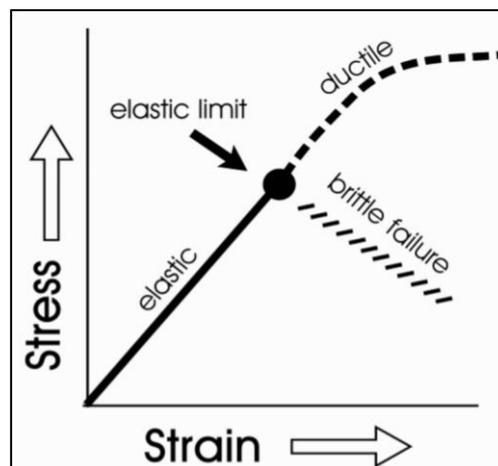
3.5.3. Hukum Hooke

Sifat batas elastis pada material bumi dapat dideskripsikan dengan hukum Hooke yang menyatakan bahwa besarnya *strain* berbanding lurus terhadap besarnya *stress* (**Gambar 12.**). Suatu medium elastis yang bersifat homogen isotrop didefinisikan sebagai medium yang tidak memiliki variasi densitas sehingga gelombang menjalar dengan kecepatan yang sama di dalam medium tersebut. Hooke mendeskripsikan kedua komponen tersebut tanpa memperhitungkan arah sehingga dapat dituliskan seperti persamaan 3 seperti berikut.

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{ii} \quad (i = x, y, z)$$

$$\sigma_{ij} = \mu \varepsilon_{ij} \quad (i, j = x, y, z; i \neq j) \quad (8)$$

dengan λ dan μ merupakan tetapan *Lame*. Besaran μ merupakan hambatan pada regangan geser yang sering disebut sebagai atau modulus geser.



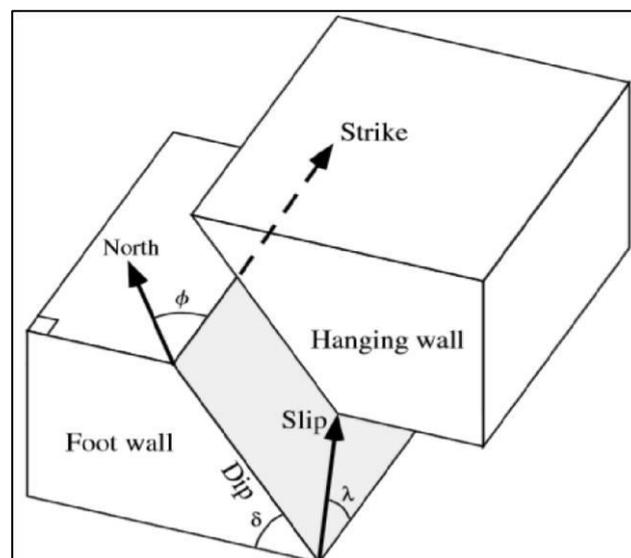
Gambar 12. Grafik hubungan *stress* dan *strain* (Bormann, 2002).

3.6. Sesar Bumi (*Earth Fault*)

Sesar adalah celah pada kerak bumi yang berada pada perbatasan antara dua Lempeng tektonik. Gempa bumi sangat dipengaruhi oleh pergerakan batuan dan lempeng pada sesar ini. Terdapat tiga jenis sesar yang menyebabkan adanya gempa bumi, yaitu sesar naik, sesar turun, dan sesar turun. Selain tiga

jenis sesar tersebut, dikenal pula jenis sesar *oblique fault* dimana sesar tersebut merupakan kombinasi dari sesar mendatar dan sesar naik atau turun (Reid, 1982).

Bila batuan yang menumpu merosot ke bawah akibat batuan penumpu dikedua sisinya bergerak saling menjauh, sesarnya dinamakan sesar normal (*normal fault*). Bila batuan yang menumpu terangkat ke atas akibat batuan penumpu dikedua sisinya bergerak saling mendorong, maka sesar tersebut dinamakan sesar terbalik (*reverse fault*). Bila kedua batuan pada sesar bergerak saling bergeser horizontal, sesarnya dinamakan sesar geseran-jurus (*strike-slip fault*).



Gambar 13. Geometri suatu patahan sebagai sumber gempa bumi (Shearer, 2009).

Orientasi bidang patahan ditentukan oleh parameter bidang patahan yang terdiri dari *strike*, *dip*, dan *rake*.

1. *Strike* (Φ) adalah sudut yang dibentuk oleh jurus sesar dengan arah utara. *Strike* diukur dari arah utara ke arah timur searah dengan jarum jam hingga jurus patahan ($0^\circ \leq \Phi \leq 360^\circ$).
2. *Dip* (δ) adalah sudut yang dibentuk oleh bidang sesar dengan bidang horizontal dan diukur pada bidang vertikal dengan arahnya tegak lurus

jurus patahan ($0^\circ \leq \delta \leq 360^\circ$).

3. *Rake* (λ) adalah sudut yang dibentuk arah slip dan jurus patahan. *Rake* berharga positif pada batuan naik (*thrust fault*) dan negatif pada patahan turun (*Normal Fault*) ($-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$).

Arah pergerakan sesar secara umum dapat dibedakan menjadi 3 jenis yaitu:

1. *Dip slip movement* yaitu pergerakan sesar terjadi dalam arah sejajar dengan sudut kemiringan sesar. Pergerakan yang dominan adalah arah vertikal.
2. *Strike slip movement* yaitu pergerakan dasar terjadi dalam arah sejajar dengan sudut *strike* sesar. Pergerakan yang dominan adalah arah horizontal.
3. Kombinasi antara *dip slip movement* dengan *strike slip movement*.

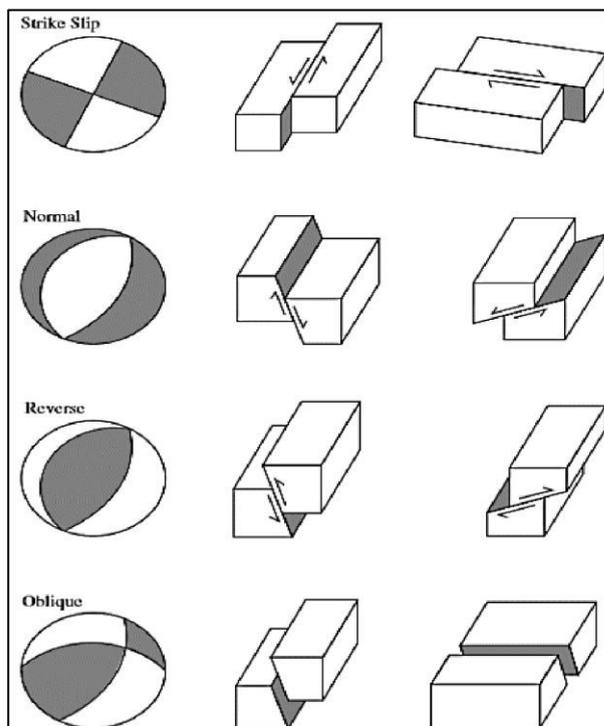
Jika parameter-parameter *strike*, *slip*, dan *rake* diketahui maka dapat ditentukan jenis sesarnya. Shearer (2009) membagi sesar berdasarkan genetis atau gaya yang bekerja padanya, diantaranya sebagai berikut:

1. Sesar naik (*reverse fault* atau *thrust fault*) yaitu bila *hanging wall* pada sesar tersebut relatif naik terhadap *foot wall*. Parameter jenis ini akan memenuhi nilai $\delta \neq 0$ atau $\delta \neq \pi/2$, serta nilai λ terletak pada rentang $(\pi, 0)$.
2. Sesar turun (*normal fault*) yaitu sesar dimana *hanging wall* pada sesar tersebut relatif turun terhadap *foot wall*. Parameter jenis ini akan memenuhi nilai $\delta \neq 0$ atau $\delta \neq \pi/2$, serta nilai λ terletak pada rentang $(-\pi, 0)$.
3. Sesar mendatar (*strike slip fault*) yaitu sesar dengan arah gerakan bergerak mendatar relatif satu sama lain. Parameter jenis ini akan memenuhi nilai $\delta = \pi/2$, serta nilai $\lambda = 0$ atau $\lambda = \pi/2$, sesar dibagi atas:

- *Strike slip left lateral fault (sinistral strike slip fault)*, bila *hanging wall* bergerak kekiri dan nilai $\lambda = 0$.
- *Rught lateral strike slip fault (dextral strike slip fault)*, bila bergerak ke kanan dan nilai $\lambda = \pi = 180^\circ$.

4. Gerakan kombinasi antara sesar naik atau turun disebut *oblique fault*.

Dari diagram bola vokal dengan menggunakan proyeksi luasan sama (*equal area projection*), dapat dibaca orientasi bidang nodal yaitu *strike*, *dip* dan *rake/slip*. Hal penting untuk menentukan orientasi diagram tersebut adalah salah satu dari bidang nodal harus menjadi arah sesar gempa.



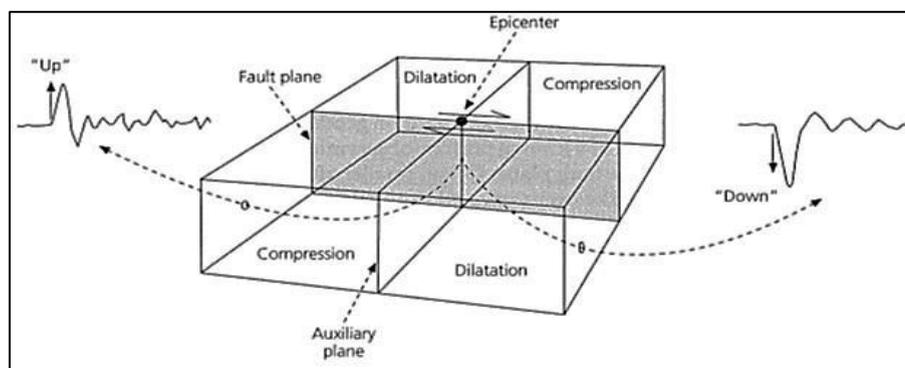
Gambar 14. Jenis-jenis patahan berdasarkan arah pergerakan relatif *hanging wall* terhadap *footwall* (Shearer, 2009).

3.7. Polaritas Gelombang Seismik

Dalam seismologi, polaritas diartikan sebagai arah gerakan pertama gelombang seismik yang terekam pada seismogram. Jika arah gerakan pertama naik (*up*) berarti terjadi kompresi sedangkan jika gerakan pertama

turun (*down*) berarti dilatasi atau relaksasi (Bormann, 2002). Polaritas gelombang seismik yang sering digunakan dalam analisis gerakan pertama adalah polaritas gelombang P. Kedatangan gelombang P pada setiap stasiun pengamatan berbeda-beda tergantung pada lokasi stasiun terhadap sumber gempa bumi. **Gambar 15.** menunjukkan konsep polaritas gelombang P pada gempa bumi yang disebabkan patahan *strike-slip*. Gerakan awal gelombang P naik (kompresi) pada stasiun yang lokasinya cenderung di depan atau didekati arah gerak patahan dan akan turun (dilatasi) pada stasiun yang lokasinya cenderung dijauhi atau di belakang oleh gerakan patahan (Stein dan Wysession, 2003).

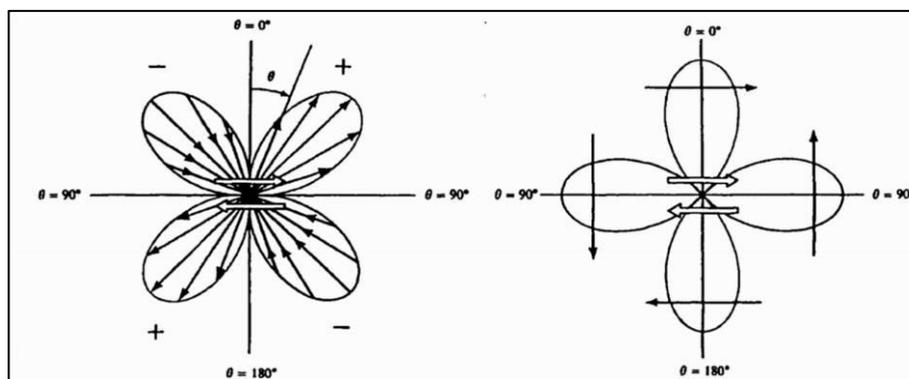
Gerakan awal gelombang P membagi daerah patahan menjadi 4 kuadran sepanjang bidang patahan dan bidang yang tegak lurus dengan bidang patahan yang disebut sebagai *auxiliary plane*. Pada stasiun pengamatan yang terletak di daerah yang berdekatan dengan bidang patahan atau *auxiliary plane* gerakan awal gelombang akan cenderung datar dan bernilai mendekati nol. Hal ini disebabkan daerah tersebut merupakan daerah batas perubahan dari dilatasi ke kompresi atau sebaliknya.



Gambar 15. Polarisasi gelombang P pada gempa bumi yang disebabkan pergerakan patahan geser. Daerah kompresi menghasilkan polarisasi naik sedangkan daerah dilatasi menghasilkan polarisasi turun (Stein dan Wysession, 2003).

Analisis yang lebih dalam mengenai karakteristik gelombang seismik dapat dilakukan melalui pola radiasi yang dihasilkan dari gelombang seismik

tersebut. Pola radiasi gelombang seismik tergantung pada geometri patahan. Radiasi pada gerakan bidang patahan akan membentuk pasangan kopel gaya. Teori kopel ganda (**Gambar 16.**) menyatakan bahwa pada suatu sumber gempa bumi, bekerja 4 gaya sama besar dan berlawanan arah. Keempat gaya ini berlaku sebagai sepasang momen gaya yang saling tegak lurus. Sistem ini dapat menjelaskan posisi gaya yang bekerja pada akhir proses patahan serta dapat menerangkan distribusi polaritas gelombang P dari sumber gempa bumi.



Gambar 16. Pola radiasi gelombang P (kiri) dan gelombang S (kanan) pada teori kopel ganda (Aki dan Richard, 2002).

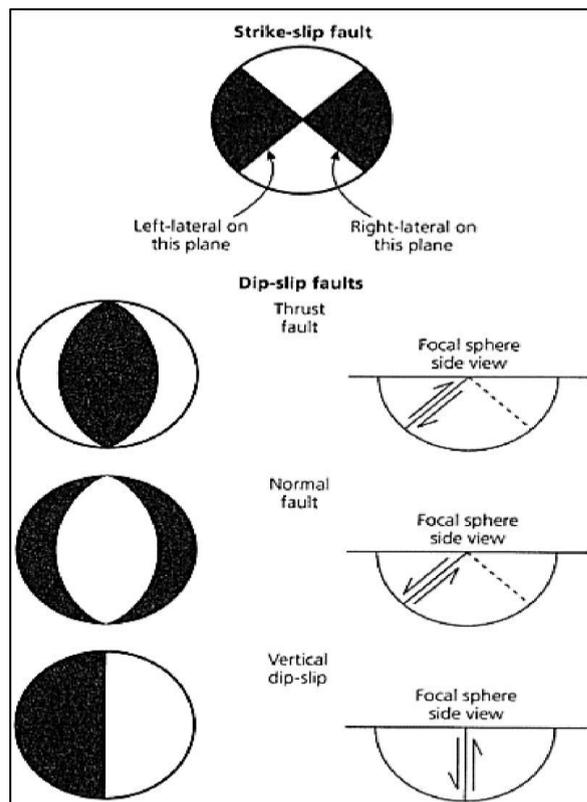
3.8. Mekanisme Sumber Gempabumi

Mekanisme sumber gempa atau *focal mechanism* adalah istilah yang digunakan untuk menerangkan sifat penjalaran energi gempa bumi yang berpusat pada hiposenter atau fokus gempa bumi. Sesar sering dianggap sebagai mekanisme sebuah penjalaran energi gelombang elastis pada fokus tersebut, sehingga dengan memperoleh arah gerakan sesar dan arah bidang sesar untuk suatu gempa bumi diperoleh solusi mekanisme sumber gempa bumi (Sari, 2018).

Bola fokus suatu sumber gempa bumi pada dasarnya berupa bola tiga dimensi yang berpusat di hiposenter gempa bumi. Bola fokus tiga dimensi yang merupakan hasil analisis polaritas gelombang P tersebut agak sulit untuk

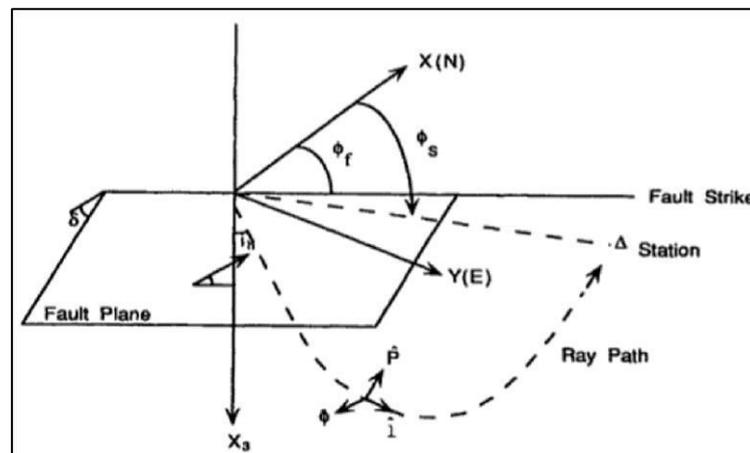
diinterpretasikan secara visual. Perlu dilakukan proyeksi ke dalam bentuk dua dimensi (bidang *equatorial*) agar lebih mudah dibaca dan dipahami. Proyeksi dilakukan dengan cara membagi bola fokus tersebut menjadi 2 bagian simetris yang memotong hiposenter gempa bumi (**Gambar 17.**).

Satu peristiwa gempa bumi memberikan berbagai informasi yang dapat dianalisis untuk mengetahui bagaimana mekanisme yang terjadi pada sumber gempa tersebut. Melalui karakteristik radiasi gelombang P serta kecepatan rambat gelombang P pada medium kita dapat menentukan waktu tiba gelombang serta waktu kejadian gempa bumi. Informasi ini dapat diolah untuk mendapatkan lokasi episenter dan hiposenter gempa bumi. Analisis lebih lanjut dapat dilakukan untuk mendapatkan bola fokus sumber gempa bumi.



Gambar 17. Mekanisme fokus gempa bumi pada beberapa sistem patahan dilihat dari *lower-half hemisphere* (Stein dan Wyssession, 2003).

Data berupa lokasi stasiun dan episenter gempa bumi digunakan untuk menghitung *azimuth* (ϕ) serta sudut datang (*take-off angle*) gelombang seismik (i_h) (**Gambar 18.**). Kemudian *azimuth* dan sudut datang pada setiap stasiun diproyeksikan kedalam proyeksi stereografis *lower-hemisphere* dengan menggunakan stereonet. Untuk menunjukkan polaritas gelombang P pada setiap stasiun digunakan symbol yang berbeda berupa tanda (+) untuk kompresi atau polaritas naik dan tanda (-) untuk dilatasi atau polaritas turun. Selanjutnya plot data diputar untuk membuat dua garis nodal berupa *fault plane* dan *auxiliary plane*. Setelah itu didapatkan bola fokus sumber gempa bumi dua dimensi hasil proyeksi bola mekanisme sumber yang berbentuk tiga dimensi



Gambar 18. Proyeksi azimuth dan *take-off angle* pada suatu sumber gempa bumi (Lay dan Wallace, 1995).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat dan waktu penelitian ini adalah:

Tanggal : 1 Oktober 2021 s.d. 31 April 2022

Tempat : Laboratorium Teknik Geofisika Universitas Lampung,
Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro No.1 Gedong Meneng, Rajabasa,
Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung,
Lampung 35142.

4.3. Perangkat lunak

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Laptop

Laptop digunakan untuk seluruh kegiatan penelitian tugas akhir dari pengolahan data maupun penulisan laporan.

2. *Software Dimas 2008*

Software Dimas 2008 digunakan dalam melakukan proses *picking event* gempa bumi dan penentuan nilai polaritas gerakan awal gelombang P pada *event* yang dilakukan *picking*.

3. *Software Python*

Software Python digunakan dalam proses pengolahan data hasil *picking* guna mendapatkan waktu *origin time*, longitude dan latitude, kedalaman hiposenter gempa bumi, serta nilai RMS.

4. *Software DOSBox 0.74*

Software DOSBox 0.74 digunakan untuk menjalankan program AZMTAK dan *pinV*.

5. Program AZMTAK

Program AZMTAK digunakan untuk menghitung nilai *azimuth* dan *take off angle* dari sumber gempa terhadap sensor yang digunakan untuk kemudian digunakan sebagai parameter dalam melakukan plotting pada stereonet.

6. Program *pinV*

Program *pinV* untuk melakukan plotting data *azimuth* dan *take off angle* yang didapatkan dari AZMTAK kedalam sebuah stereonet.

7. *Software ArcGIS 10.8*

Software ArcGIS 10.8 digunakan untuk pembuatan peta sebaran pos pengamatan gunung api dan juga peta geologi.

8. *Software Microsoft Word dan Excel v.2013*

Microsoft Word untuk melakukan penyusunan laporan tugas akhir dan *Microsoft Excel* digunakan dalam pembuatan grafik sebaran hiposenter

9. *Software Surfer v.16.*

Software Surfer v.16. dilakukan pada prose pembuatan *plotting* sebaran episenter dan melakukan *slicing* data untuk mendapatkan informasi penampang untuk pembuatan grafik sebaran hiposenter.

4.4. Data penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil pemantauan aktivitas seismik gunungapi Agung yang dilakukan pada Pos Pengamatan Gunungapi PVMBG. Data tersebut berupa data seismogram dari rekaman seismometer yang dalam bentuk sekunder dan sudah berupa data digital yang sudah dilakukan konversi data. Data *monitoring* seismik yang digunakan dalam pengolahan data ini hanya data rekaman pada gempa bumi VT. Jumlah tanggal yang digunakan pada penelitian ini yaitu berjumlah 61 tanggal sejak tanggal 1 November hingga 31 Desember 2017 atau pada periode erupsi kedua tahun 2017, dengan total *event* gempa yaitu 799 *event*.

Data tambahan lain dalam menunjang pengolahan data seismik berupa data letak stasiun. Data stasiun pengamatan Gunungapi Agung ditunjukkan pada **Tabel 3.** di bawah ini.

Tabel 3. Data koordinat pos pengamatan seismik Gunungapi Agung

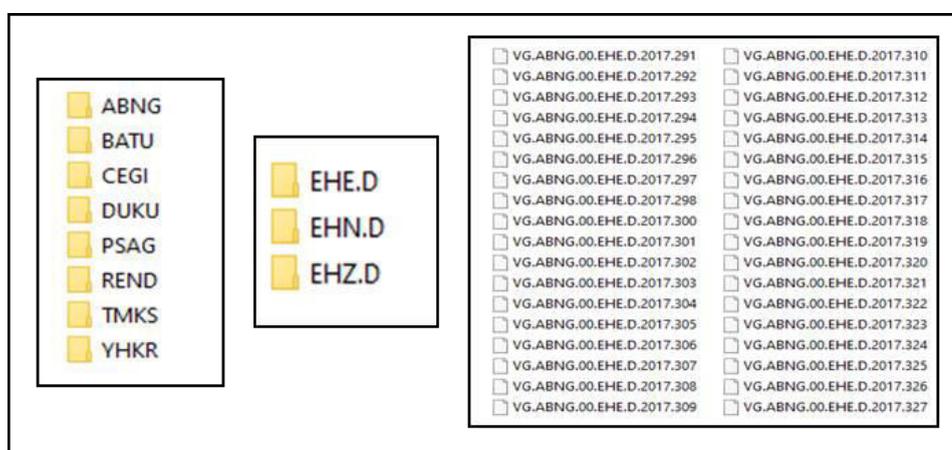
No.	Nama Pos	Longitude	Latitude	Elevasi (mdpl)
1	ABANG	115.4347	-8.29436	1.427 m
2	PSAG	115.4987	-8.37769	1.292 m
3	TMKS	115.4667	-8.36383	1.234 m
4	YHKR	115.5083	-8.38157	1.212 m
5	CEGI	115.4716	-8.30241	955 m
6	DUKU	115.5343	-8.2960	635 m
7	REND	115.4316	-8.42471	525 m
8	BATU	115.49954	-8.20885	28 m

4.5. Prosedur penelitian

Adapun alur yang digunakan penulis dalam kerja praktik ini yaitu sebagai berikut:

4.5.1. Sortir data dan *register event*

Data yang digunakan dalam pengolahan yaitu berformat *miniseed* (.msd), dengan jumlah 3 komponen pada setiap stasiunnya, hanya pada PGA YHKR dan TMKS yang hanya memiliki satu komponen saja yaitu komponen vertikal.



Gambar 19. Tampilan data rekaman seismik gunungapi Agung pada 8 pos pengamatan dan terdapat pada 3 komponen alat rekaman data seismik (EHE, EHN, dan EHZ).

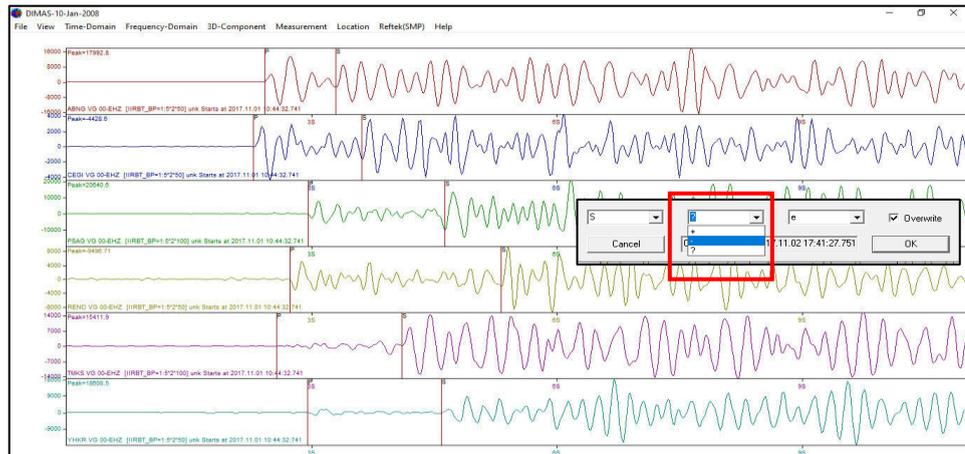
Pembacaan data seismik dilakukan dengan menggunakan *software Dimas 2008*. Pada pembacaan data terlebih dilakukan *filtering* dengan jenis *bandpass filter* menggunakan rentang 1-5 Hz. Kemudian dilakukan sortir data merupakan tahap awal dari pengolahan data dari data rekaman seismogram yang bertujuan untuk menyeleksi data dari data digital rekaman sinyal seismik sehingga dapat diperoleh rekaman seismik per-*event* gempanya. Tahap *register event* dilakukan dengan tujuan menganalisa setiap *event* seismik yang terekam untuk menentukan apakah sebuah *event* merupakan rekaman gempa atau bukan, menentukan jenis *event* yang terjadi. Proses ini akan menghasilkan data *event* yang telah memuat informasi waktu dan jenis gempanya.



Gambar 20. Data ditampilkan pada *software Dimas 2008*, dilakukan *filtering* dengan rentang 1-5 Hz, kemudian data akan mudah untuk dilakukan *picking* gelombang P dan S.

4.5.2. *Picking* waktu tiba gelombang P dan S

Pada tahap sebelumnya sudah mendapatkan *event* gempa bumi yang diindikasikan sebagai *event* gempa vulkanik ataupun gempa vulkanik dangkal yang memiliki beberapa informasi. Dari *event* tersebut dilakukan *picking* waktu tiba gelombang P dan S dari *event* yang ditampilkan. Saat melakukan *picking* gelombang, dilakukan juga proses penentuan nilai polaritas dari gelombang P, nilai polaritas ditandai dengan simbol (+) untuk gelombang datang P yang arah awal gerak gelombangnya bergerak ke atas dan disebut dengan kompresi, sedangkan simbol (-) untuk gelombang datang P yang arah awal gerak gelombang bergerak ke bawah dan disebut dengan dilatasi. *Picking* arah gerakan awal gelombang P dilakukan dengan menggunakan minimal 4 rekaman stasiun, agar lebih akurat, kemudian dilakukan pada komponen vertikal saja, karena tidak semua stasiun merekam lengkap dengan 3 komponen. Kemudian setelah melakukan *picking*, data *event* tersebut disimpan dengan format .pks.



Gambar 21. Picking gelombang P dan S, serta memilih nilai polaritas gelombang P apakah bersifat kompresi (+) atau dilatasi (-).

4.5.3. Input parameter

Proses *input* parameter pada *flow* kiri yaitu dilakukan pada *software Python*, dengan memasukan file data *picking event* yang berformat *.pks* yaitu data picking gelombang P dan S. selanjutnya dilakukan running program dan mendapatkan nilai nilai *Origin Time*, nilai hiposenter dengan satuan km, nilai RMS, ERH, ERZ. Hasil tersebut akan tersimpan dengan format file *.dat* dan di pindahkan pada *Microsoft Excel* untuk memudahkan pembacaan infromasinya dan untuk melakukan pengolahan ke tahap selanjutnya menggunakan *software* lainnya.

Proses plot pada peta sebaran hiposenter dilakukan menggunakan *software Surfer v.16*. dengan memasukan data longitude, latitude, dan kedalaman hiposenter pada peta geologi gunungapi Agung. Kemudian dilakukan analisis peta sebaran hiposenter pada peta geologi.

```

Microsoft Windows [Version 10.0.19043.1348]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

D:\KULIAH\SKRIPSI\DATA\programyadea_v1.0\programyadea>python programyadea.py
D:/KULIAH/SKRIPSI/DATA/HASIL PICKING/NOVEMBER/1.11.17 (085)/E.S.00-01.07.pks
HYPOLVERSE 2000 STARTING
COMMAND? COMMAND? COMMAND? COMMAND? COMMAND? COMMAND? 6 STATIONS READ IN.
COMMAND? COMMAND? COMMAND? FIELD INPUT PHASE FILE TYPE & SET PHO(COP) & ARC(CAR) FORMATS
INPUT IS A TRADITIONAL HYPO71-HYPOLVERSE PHASE FILE
SETTING FORMATS COP 1, CAR 1
COMMAND? COMMAND?
-LAT- --LON- DEPTH RMS PMAG MUM ERH ERZ ID
1 2017-11-1 0:01 0 22 115 27 13.44 0.08 0.0 11 0.5 0.5 0
COMMAND? FORTRAN STOP
OT: 2017-11-01 00:01:13.08 UTC
Lat: -0.3623
Lon: 115.4876
Depth: 13.44 KM
RMS: 0.08 s
ERH / ERZ: 0.54 / 0.53

D:\KULIAH\SKRIPSI\DATA\programyadea_v1.0\programyadea>python programyadea.py
D:/KULIAH/SKRIPSI/DATA/HASIL PICKING/NOVEMBER/1.11.17 (085)/E.S.00-12.25.pks
HYPOLVERSE 2000 STARTING
COMMAND? COMMAND? COMMAND? COMMAND? COMMAND? COMMAND? 6 STATIONS READ IN.
COMMAND? COMMAND? COMMAND? FIELD INPUT PHASE FILE TYPE & SET PHO(COP) & ARC(CAR) FORMATS
INPUT IS A TRADITIONAL HYPO71-HYPOLVERSE PHASE FILE
SETTING FORMATS COP 1, CAR 1
COMMAND? COMMAND?
-LAT- --LON- DEPTH RMS PMAG MUM ERH ERZ ID
1 2017-11-1 0:12 0 21 115 27 8.85 0.24 0.0 10 1.1 1.4 0
COMMAND? FORTRAN STOP
OT: 2017-11-01 00:12:22.57 UTC
Lat: -0.3577
Lon: 115.4876
Depth: 8.85 KM
RMS: 0.24 s
ERH / ERZ: 1.11 / 1.41
D:\KULIAH\SKRIPSI\DATA\programyadea_v1.0\programyadea>

```

Gambar 22 . Output yang dihasilkan dari running software Python adalah nilai Longitude, Latitude, Origin Time, Depth, RMS, ERH, dan ERZ.

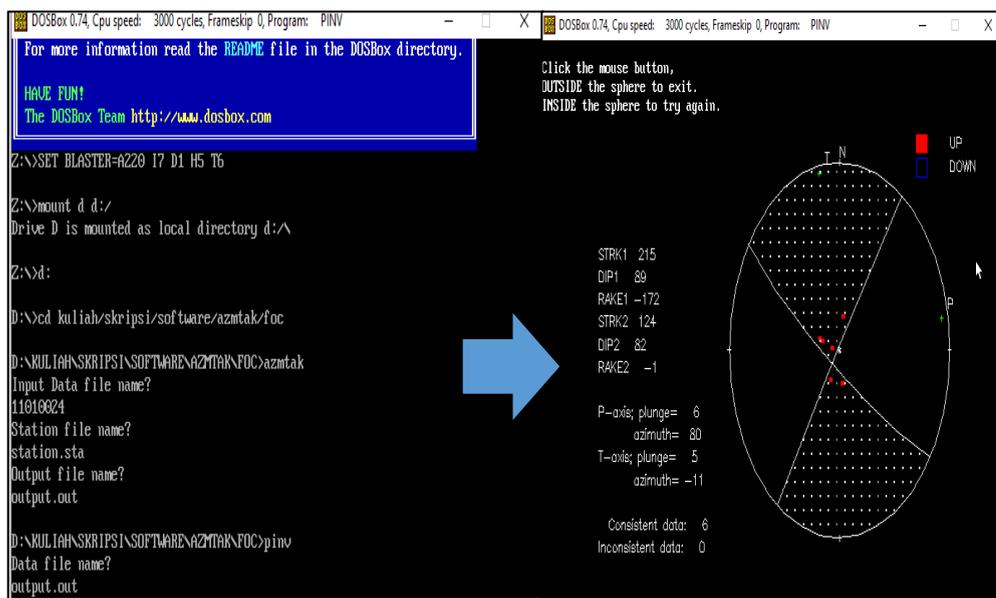
4.5.4. Slicing peta episenter

Proses untuk mendapatkan grafik sebaran hiposenter dengan melakukan *slicing* menggunakan software *Surfer v.16*. pada peta episenter dengan memperhatikan area yang didominasi sebaran hiposenter serta melakukan *slicing* pada sebaran episenter pada area sesar lokal, dimana terdapat informasi adanya sesar lokal Abang-culik. *Slicing* dilakukan sebanyak 3 sayatan, diantaranya sayatan AB dengan arah baratdaya diantara G. Agung dan kaldera Batur dengan dasar sayatan pada sayatan tersebut sebaran episenter sangat mendominasi dari berbagai kedalaman pada area sayatan tersebut, kemudian sayatan CD dengan arah Barat-Timur memotong tubuh G. Agung untuk mendapatkan sebaran hiposenter yang lebih didominasi pada bagian barat G. Agung, dan sayatan terakhir yaitu sayatan EF dengan memotong bagian sebaran episenter yang sangat tinggi serta mengenai sesar bagian baratdaya G. Agung. Kemudian dilakukan analisis antara sebaran hiposenter dan sebaran episenter dengan memperhatikan adanya informasi sesar.

4.5.5. Input parameter

Pada proses *input* parameter dilakukan di software *DosBOX* dan menginput data *picking* gelombang P dan S yang berformat .pks yang merupakan hasil dari proses *picking* gelombang P dan S, dilakukan dengan menjalankan program AZMTAK untuk mendapatkan nilai dari parameter sesar yaitu strike,

dip dan rake, kemudian pada program PINV untuk memproyeksikan nilai parameter tersebut ke dalam bentuk bola fokus sesar (*beachball*).



Gambar 23. Hasil dari *running* berupa bola fokus memiliki nilai parameter sesar yaitu *srike*, *dip*, dan *rake*.

4.5.6. Plot *stereonet* pada peta gunungapi Agung

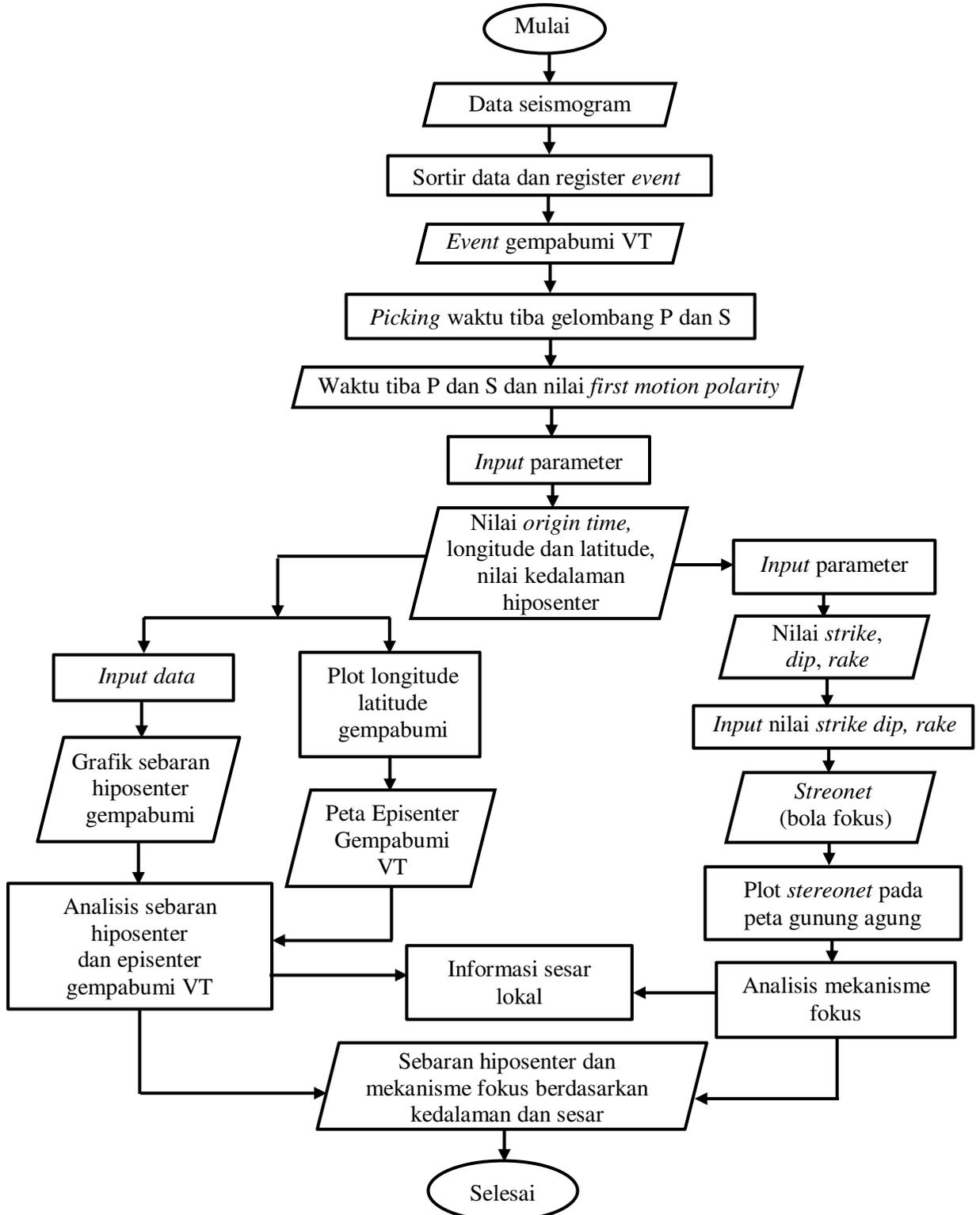
Data yang di plot pada peta gunungapi Agung adalah proyeksi dari bola fokus gempa bumi vulkanik gunungapi Agung dan kemudian dilakukan analisis berdasarkan kedalaman hiposenter dan jenis sesar aktif yang berada di area gunungapi Agung. Hasil akhir dari pengolahan yaitu adanya sebaran bola fokus berdasarkan kedalaman dari bola fokus yang mendeskripsikan gempa vulkanik itu sendiri.

4.5.7. Sebaran mekanisme fokus berdasarkan kedalaman dan sesar

Pada hasil dari penelitian ini yaitu mendapatkan jenis-jenis sesar yang mengiringi aktivitas intrusi magma periode erupsi G. Agung November-Desember 2017 dengan proses analisis berdasarkan kedalaman hiposenter dan sesar aktif yang berada di antara G. Agung dan kaldera Batur. Kemudian nantinya dapat mengetahui kondisi di bawah gunung.

4.6. Diagram Alir

Adapun diagram alir dalam penelitian ini adalah seperti pada **Gambar 24.** berikut.



Gambar 24. Diagram alir

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Selama periode erupsi November-Desember 2017 terjadi 799 event gempa bumi VT dengan zona hiposenter seismisitas tinggi berada pada kedalaman 5-8 km dan 9-12 km mdpl, sehingga gempa bumi *vulcanotectonic* (VT) tipe A gempa bumi vulkano-tekonik dalam lebih mendominasi dibandingkan dengan gempa bumi VT tipe B.
2. Hasil penentuan mekanisme fokus yang didasarkan pada penentuan nilai polaritas gerak awal gelombang P serta *event* memiliki nilai RMS 1,74. Hasil penentuan mekanisme fokus mendapatkan 75 sesar, yang terdiri dari: sesar geser (*strike slip fault*) 55 sesar, sesar naik (*reverse fault*) 16 sesar, sesar normal (*normal fault*) berjumlah 3 sesar dan sesar kombinasi naik (*oblique reverse*) berjumlah 1 sesar. Semua jenis sesar didominasi dengan memiliki arah *strike* relatif tenggara-barat laut dan barat laut-tenggara, dengan titik nodal *T-axis* relatif pada tenggara, dan *P-axis* relatif pada barat, dan berasosiasi terhadap kegiatan magmatisme di bawah permukaan.
3. Berdasarkan data sebaran kedalaman hiposenter gempa bumi di bawah gunungapi Agung diindikasikan adanya kantong magma pada rentang kedalaman 5-8 km mdpl dan 9-12 km mdpl yang dibuktikan adanya zona seismisitas sangat tinggi dan tersebar luas, serta jenis mekanisme fokus didominasi pada sesar geser dan berada di rentang kedalaman tersebut menandakan adanya area atau wadah sebagai tempat terakumulasi fluida.

6.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini adalah:

1. Proses *picking* data sebaiknya dilakukan dengan lebih teliti agar mendapat *output* yang baik dengan nilai RMS yang sangat minim.
2. Dalam penentuan hiposenter dan mekanisme fokus lebih baik menggunakan data dari 3 komponen stasiun agar lebih akurat.
3. Penggunaan model kecepatan lebih baik menggunakan model kecepatan lokal yang disesuaikan dengan kondisi lapisan batuan lokasi penelitian dan penentuan parameter gempabumi lainnya seperti nilai-b untuk mengetahui medan stress pada wilayah penelitian.
4. Penggunaan metode geofisika lain seperti metode geomagnetik atau metode gravity sebagai data korelasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K., dan Richards, P. G. 2002. *Quantitative Seismology*. Edisi kedua. *University Science Books*. California.
- Arimuko, A., Wibawa, A. S. W., dan Firmansyah, A. 2019. Analisis Perbandingan Penentuan Hiposentrum Menggunakan Metode Grid Search , Geiger , dan Random Search : Studi Kasus pada Letusan Gunung Sinabung 2017. *Journal for Physics Education and Applied Physics*. Vol.1, No. 2. Hal: 22–28.
- Bormann, P. 2002. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). Volume 1 dan 2. *GeoForschungsZentrum Potsdam*. Jerman.
- Bulo, D., Djayus, Supriyanto, dan Hendrawanto, B. 2020. Penentuan Titik *Epicenter* Dan *Hypocenter* Serta Parameter *Magnitude* Gempabumi Berdasarkan Data Seismogram. *Jurnal Geosains Kutai Basin*. Vol. 3, No. 1. E-ISSN 2615-5176. Februari 2020. Balikpapan.
- Clewell, D. H., dan Simon, R. F. 1950. Seismic wave propagation. *Geological Survey Bulletin 976-B*. Vol. 15(1), Page: 50–60. Washington.
- Daisuke, S. 1997. Source Mechanism Practice. IISE. Japan.
- Diaz, N., Suarbawa, KN., dan Mursitantyo, A. 2018. Relokasi Gempabumi di Pulau Bali Bagian Utara Tahun 20152017 dengan menggunakan Metode Double Difference (DD). *Buletin Fisika*. Vol. 19 No. 2 Agustus 2018: Hal. 64 – 72.
- Gutenberg, B., dan C. F. Richter. 1956. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am*.
- Herwanda, M. 2016. Analisis Spektral Dan Parameter Sumber Gempa Vulkanik Di Gunungapi Sinabung Sumatera Utara. Skripsi. Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik. Universitas Lampung. Lampung.

- Hidayati, S., Ishihara, K., Iguchi, M., dan Ratdomopurbo, A., 2008. Focal Mechanism of Volcanotectonic Earthquakes at Merapi Volcano, Indonesia. *Indonesian Journal of Physics*. Vol. 9 No. 3: Hlm. 75 – 82.
- Hidayati, S. 2010. *Pengenalan Seismologi Gunungapi. Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunungapi Baru*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.
- Hidayati, S., Suparman, Y., dan Loeqman, A.. 2011. Mekanisme Fokus dan Parameter Sumber Gempa Vulkano-Tektonik di Gunung Guntur, Jawa Barat. *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 6 No. 1:1-11.
- Iguchi, M., Suantika, G., Sulaeman, C., Wildan, A., Sutawidjaja, I. S., Kriswati, E., Kristianto, Solihin, A., Surono, dan Triastuty, H., 2015. *Source Mechanisms 66 of Volcanic Earthquakes at Some Volcanoes in Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Bandung.
- Katili, J.A. 1975. Volcanism and Plate Tectonics in the Indonesia Island Arcs. *Journal Tectonophysics*. Vol. 26, Page: 165-188.
- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R. dan Buland R. 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophys. J. Int.* (1995) Vol. 122, Page: 108-124.
- KESDM. 2014. *Data Dasar Gunungapi Indonesia, Gunung Agung*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Badan Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.
- Kriswati, E., Pamitro, Y. E., dan Basuki, A. 2010. Mekanisme Gempa Vulkanik Gunung Talang Pasca Gempa Tektonik Mentawai Tahun 2007-2009, Sumatra Barat. *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 5 No. 209-218.
- Kurniawan, S. E., & Saputri, F. 2019. Relokasi Hiposenter Gempabumi Donggala Tahun 2018 Menggunakan Metode *Hyporelocate*. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*. Vol. 6 No.1, Hal: 13–22.
<https://doi.org/10.36754/jmkg.v6i1.110>.

- Kusumadinata, K. 1964. The Eruption of Agung Volcano in Bali, in 1963. *Bull. Geol Surv. Indonesia*. Vol 1, No. 1, Hal. 12-15.
- Lay, T., dan T.C. Wallace. 1995. *Modern Global Seismology*. Academic Press, San Diego, 521pp.
- Madrinovella, I., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., & Triastuty, H. 2012. Studi Penentuan dan relokasi Hiposenter Serta Mekanisme Fokus Gempa Mikrodi Sekitar Cekungan Bandung. *Jurnal Geofisika*. Vol. 13, No. 2, Hal: 80–88.
- Minakami, T. 1974. *Seismology of Volcanoes in Japan*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. New York.
- Nishi, K., 2005, Hypocenter Calculation Software GAD (Geiger's method with Adaptive Damping), Version 1. *Silver Expert JICA Indonesia*. Jakarta.
- Ramdhan, M., Priyobudi, Kristyawan, S., dan Sembiring, A. S. 2020. Seismisitas di Wilayah Jawa Tengah dan Sekitarnya Berdasarkan Hasil Relokasi Hiposenter dari Empat Jaringan Seismik Menggunakan Model Kecepatan 3-D. *Buletin Eksplorium*. Vol 41, No.1, Hal: 61–72. Jakarta.
<https://doi.org/10.17146/eksplorium.2020.41.1.5828>
- Reid, H.F. 1982. Elastic Rebound Theory of Earthquake. *BSSA*. Vol 11 Pages: 98-100.
- Saputri, D., dan Pujiastuti, D. 2020. Analisis Kecocokan Nilai Percepatan Tanah Pulau Lombok Berdasarkan Perhitungan Empiris dengan Data Percepatan Tanah dari Akselerograf di Stasiun Mataram. *Jurnal Fisika Unand*. Vol.9, No. 1, Hal: 79-84. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.1.79-84.2020>.
- Sari, A.W.A. 2018. Penentuan Mekanisme Fokus Gempa Bumi Volcanotectonic (Vt) Gunung Api Merapi Menggunakan Polaritas Gelombang P Pada September 2017-Mei 2018. Skripsi. Program Studi Geofisika. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Shearer, P.M.. 2009. *Introduction to Seismology Edisi kedua*. Cambridge University Press. New York
- Shohaya, J.N., Madlazim, Rahmawati, E..2014. Model Kecepatan 1-D Gelombang P dan Relokasi Hiposenter Gempa Bumi di Bengkulu Menggunakan Metode

Coupled Velocity Hipocenter. Jurnal Fisika. Vol 3. No 02.2014, Hal: 69-73. Surabaya.

Siswowodjoyo, S.S. 1981. *Metoda Pengamatan, Analisis Gempa dan Hubungannya dengan Tingkat Kegiatan Gunungapi.* Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.

Stein, S., dan Wysession, M., 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure.* Blackwell Publishing Company. United Kingdom.

Sutawidjaja, I.S. 2006. A guide to the geological phenomena of Batur Caldera, Bali-Indonesia. *I.A.V.C.E.I General Assembly 2000.*

Syahbana, D. K., Kasbani, K., Suantika G., Prambada, O., Andreas, A. S., Saing, U. B., Kunrat, S. L., Andreastuti, S., Martanto, M., Kriswati, E., Suparman, Y. , Humaida H., Ogburn, S., Kelly, P. J., Wellik, J., Wright, H. M. N., Pesicek, J. D., Wessels, R., Kern, C., Lisowski M., Diefenbach, A., Poland, M., Beauducel, F., Pallister, J., Vaughan, R.G. dan Lowenstern, J. B.. 2019. The 2017–19 Activity at Mount Agung in Bali (Indonesia): Intense unrest, monitoring, crisis response, evacuation, and eruption. *Scientific Reports.* (2019). Vol. 9. Page: 8848. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45295-9>. Bandung.

Telford, W.M., Geldart, L.P., dan Sheriff. R.E., 1990. *Applied Geophysics, Second Edition.* Cambridge University Press. New York.

Witton., dan Pattick, E. 2003. *Volcano Seismology in Indonesia.* Lonely Planet Publications, Ltd.

Zobin, V.M.. 2003. *Introduction to Volcanic Seismology.* Elsevier Science B.V. Amsterdam.

Daftar Pustaka Dari Situs Internet :

Data Peta Rupa Bumi Indonesia dari Badan Informasi Geospasial (BIG), data diperoleh melalui situs internet : <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web>.

(Diakses pada 28 oktober 2021)

