



TESIS - RG142556

**TOMOGRAFI SEISMIK 3D PADA SISTEM
HIDROTERMAL KAWASAN GUNUNG PAPANDAYAN
MENGUNAKAN *LOCAL EARTHQUAKE
TOMOGRAPHY* UNTUK ANALISIS STRUKTUR
BAWAH PERMUKAAN**

**SAYYIDATUL KHOIRIDAH
NRP 3514202007**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. A. Syaeful Bahri, S.Si., MT**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN GEOTHERMAL
JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



TESIS - RG142556

**3D SEISMIC TOMOGRAPHY OF HYDROTHERMAL
SYSTEM IN PAPANDAYAN VOLCANO AREA USING
LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY FOR
SUBSTRUCTURE ANALYSIS**

**SAYYIDATUL KHOIRIDAH
NRP 3514202007**

ADVISOR

Dr. A. Syaeful Bahri, S.Si., MT

**MAGISTER PROGRAM
GEOTHERMAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**

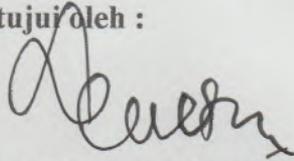
LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :
Sayyidatul Khoiridah
NRP. 3514202007

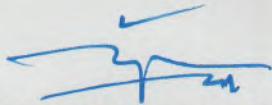
Tanggal Ujian : 19 Juli 2016
Periode Wisuda : 114

Disetujui oleh :



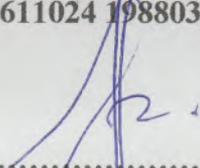
.....
1. Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si., MT
NIP. 19690906 199702 1 001

(Pembimbing)



.....
2. Dr. Widya Utama, DEA
NIP. 19611024 198803 1 001

(Penguji)

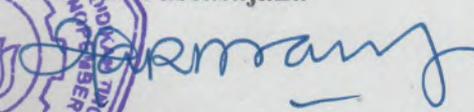


.....
3. Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si., M.Si
NIP. 19760123 200003 1 001

(Penguji)



Mengetahui,
Direktur Pascasajana


Prof. W. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

(halaman ini sengaja dikosongkan)

TOMOGRAFI SEISMIK 3D PADA SISTEM HIDROTERMAL KAWASAN GUNUNG PAPANDAYAN MENGGUNAKAN *LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY* UNTUK ANALISIS STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN

Nama Mahasiswa : Sayyidatul Khoiridah

NRP : 3514202007

Dosen Pembimbing : Dr. A. Syaeful Bahri, S.Si, MT

ABSTRAK

Di kawasan Gunung Papandayang terdapat manifestasi panasbumi dan sebelum dilakukan pengembangan potensi panas bumi, maka perlu dilakukan penelitian tomografi seismik dapat digunakan sebagai referensi pengambilan keputusan mitigasi bencana gunungapi baik dalam hal pemantauan (*monitoring*) maupun peringatan dini (*early warning*) tingkat kegiatan gunungapi. Tujuan dari dilakukan penelitian ini adalah untuk memperoleh model gambaran struktur internal 3D dan nilai distribusi anomali kecepatan bawah permukaan Gunung Papandayan. Data yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari 17 gempa VA dan 36 gempa TL dengan magnitudo gempa $M_w < 1,5$ yang tercatat sejak 1 September sampai 19 Oktober 2015. Tahapan-tahapan dari penelitian ini yaitu *picking* waktu kedatangan gelombang P (t_p) dan S (t_s) dengan menggunakan *software* SWARM. Hasil *picking* gelombang digunakan untuk memperoleh hiposenter awal dari masing-masing gempa dengan menggunakan *software* GAD. Kemudian dicari model kecepatan bumi yang baru menggunakan *software* VELEST dan dilakukan relokasi hiposenter dengan *software* HypoDD. Selanjutnya dilakukan inversi tomografi 3D menggunakan *software* *Local Earthquake Tomography* (LOTOS). Hasil inversi tomografi seismik menunjukkan adanya anomali kecepatan negatif untuk kecepatan gelombang P dan S pada sistem hidrotermal yang ada di kawasan Gunung Papandayan hingga kedalaman 20 km terhadap MSL. Data Poisson's rasio V_p/V_s memberikan nilai yang relatif rendah di Barat dari puncak Gunung Papandayan sampai di kawasan Wayang Windu hingga kedalaman 18 km terhadap MSL dengan nilai rasio 1,6 – 1,726 yang diindikasikan sebagai *gas-saturated rock*.

Kata kunci: Hiposenter, *Local Earthquake Tomography*, Gunung Papandayan, dan tomografi seismik.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

3D SEISMIC TOMOGRAPHY OF HYDROTHERMAL SYSTEM IN PAPANDAYAN VOLCANO AREA USING LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY FOR SUBSTRUCTURE ANALYSIS

By : Sayyidatul Khoiridah
Student Identity Number : 1113201029
Supervisor : Dr. A. Syaeful Bahri, S.Si, MT

ABSTRACT

In the Papandayan volcano area has manifestations of geothermal and before to development of geothermal energy, so necessary to research about seismic tomography that is can be used as reference for volcanic disaster mitigation decision making both in terms of monitoring as well as early warning the level of volcanic activity. Purpose of this research to get 3D subsurface model and subsurface velocity anomaly distribution value of Papandayan volcano. The data use in this study consists of 17 VA earthquakes and 36 TL earthquake with magnitude M_w 1,5 that recorded from September 1, 2015 until October 19, 2015. The stages of this research are picking arrival time of P (t_p) and S (t_s) waves by using SWARM software. Results of picking seismic waves used to obtain the initial hypocenter of each earthquake by using GAD software. Then the new's earth velocity models determined using software VELEST and to get hypocenter relocation using HypoDD software. Furthermore, 3D tomography inversion is performed by using Local Earthquake Tomography (LOTOS) software. Seismic tomographic inversion results indicate a negative velocity anomaly for P and S wave velocity in hydrothermal systems that exist in the area of the volcano to a depth of 20 km to the MSL. Data Poisson's ratio V_p/V_s give relative low value in west from the top of Papandayan volcano to the Wayang Windu area to depth of 18 km of the MSL with ratio value of 1.6 to 1.726 indicated as gas -saturated rock.

Key Words: Hipocenter, Local Earthquake Tomography, Papandayan volcano, and seismic tomography.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT Tuhan semesta alam yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “*Tomografi Seismik 3D Pada Sistem Hidrotermal Kawasan Gunung Papandayan Menggunakan Local Earthquake Tomography Untuk Analisis struktur Bawah Permukaan*”, sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan program strata dua (S2) Jurusan Teknik Geomatika bidang keahlian geothermal, FTSP, ITS Surabaya.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Ayahanda H. Khozim dan Ibunda tersayang Yasrifah yang telah memberikan banyak do’a, dukungan, dan semangat yang tiada henti selama menempuh kuliah hingga penyelesaian tesis.
2. Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, MT selaku Dosen Pembimbing tesis yang telah meluangkan waktu, pikiran, bimbingan dalam penulisan tesis ini
3. Dr. Hetty Triastuty, S.Si, M.Sc selaku pembimbing tesis dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana (PVMBG) Bandung yang telah bersedia meluangkan waktu, pikiran, dan bimbingan dalam penulisan tesis ini.
4. Ira Mutiara Anjasmara, ST, M.Phil, Ph. D selaku Kaprodi Pascasarjana Geomatika dan penguji proposal tesis yang telah banyak memberikan masukan dan saran dalam penyelesaian tesis.
5. Prof. Dr. Ir. Bangun Muljo Sukojo, DEA, DESS selaku penguji proposal tesis yang telah banyak memberikan masukan dan saran dalam menyelesaikan tesis.
6. Dr. Widya Utama, DEA selaku penguji tesis yang telah banyak memberikan masukan dan saran dalam menyelesaikan tesis.
7. Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si., M.Si selaku penguji tesis yang telah banyak memberikan masukan dan saran dalam menyelesaikan tesis.
8. Dr. Ir. Amien Widodo, M. Si selaku dosen wali yang telah memberikan arahan dalam pengambilan matakuliah dan tesis.

9. Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa yang turut serta menyumbangkan ilmunya dalam menyelesaikan tesis.
10. Seluruh staf pengajar Jurusan Geomatika, FTSP, ITS yang telah memberikan dukungan dan saran dalam mengerjakan tesis.
11. Moh. Ikhya'ul Ibad yang telah memberikan do'a, motivasi, dan telah meluangkan waktunya dalam membantu menyelesaikan tesis.
12. Teman-teman fisika Mbak Indrawati yang telah bersedia untuk berbagi ilmu dan mengajari mengoperasikan VELEST dan LOTOS. Mas Miftah yang telah mengajari mengoperasikan SWARM dan GAD, Jordan yang telah mengajari mengoperasikan hypoDD, dan Mas Arya yang telah mengajari GMT.
13. Teman-teman pascasarjana Geothermal dan Geofisika Mas Rekswanda, Mas Bakri, Mas Agung, Pak Ghomgom, Mas Abri, Mas Fitrah, dan Andy serta teman-teman pascasarjana geomatika yang telah yang telah banyak memberikan motivasi dalam terselesaikan tesis.
14. Teman-teman kos tercinta Umai, Percil Zamrid, Kakak Nungki, Kakak Resti, Mbak Wida, Wenda, dan Ratih serta Ibu kos dan Bapak kos yang telah memberikan motivasi hingga tesis ini terselesaikan.
15. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan tesis ini. Akhirnya penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sitematika Penulisan	4
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Profil Gunung Papandayan	5
2.2 Gelombang Seismik	7
2.3 Pembaruan Model Kecepatan 1D	9
2.4 Penentuan Hiposenter	10
2.4.1 Penentuan Hiposenter Menggunakan Metode Geiger ...	10
2.4.2 Relokasi Hiposenter Menggunakan <i>Double Difference</i> ...	12
2.5 Tomografi Seismik.....	15
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Data dan Stasiun Penelitian	21
3.2 Diagram Alir Penelitian	22
3.2.1 Pemilihan Data Gempa	22
3.2.1.1 <i>Picking</i> Gelombang P (t_p) dan S (t_s)	24
3.2.1.2 Koreksi $t_p - t_s$	25
3.2.1.3 Analisis Spektra Gelombang P dan S	26
3.2.2 Penentuan Hiposenter Awal dengan Menggunakan GAD.....	27
3.2.3 Pembaruan Model Kecepatan 1D Menggunakan VELEST	28
3.2.4 Relokasi Hiposenter dengan <i>hypoDD</i>	29
3.2.5 Inversi Tomografi Seismik 3D	30
3.2.6 Analisis dan Interpretasi Data	33
3.2.7 Model Pencitraan Tomografi Seismik 3D dan Nilai Distribusi Anomali V_p , V_s , dan Poisson's Rasio V_p/V_s	32
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Hiposenter Gempa dari GAD	33

4.2	Pembaruan Model Kecepatan Bumi dengan VELEST.....	34
4.3	Hasil Relokasi Hiposenter dengan hypoDD.....	37
4.4	Hasil Inversi Tomografi.....	40
	4.4.1 Model Kecepatan Bumi 1D.....	40
	4.4.2 Analisis Tomogram Kecepatan Gelombang P (V_p) dan S (V_s)	41
	4.4.3 Analisis Tomogram Poisson's Rasio V_p/V_s	58
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		53
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN.....		57

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1 Model struktur kecepatan bumi Gunung Papandayan (Kristianto, 2005)	9
Tabel 4.1 Model kecepatan hasil dari VELEST.....	35
Tabel 4.2 Koreksi stasiun penelitian dari VELEST.....	36

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1	(i) Peta geologi gunung Papandayan (ii) Lintasan A – B dan C – D pada peta geologi gunung Papandayan terhadap kedalaman (iii) keterangan peta (Asmoro dkk, 1989).....	6
Gambar 2.2	Perbedaan pemodelan ke depan (<i>forward modelling</i>) dan pemodelan inversi (<i>inverse modelling</i>) (Menke, 1984).....	11
Gambar 2.3	Ilustrasi algoritma relokasi <i>hypo double-difference</i> (Waldhauser & Ellsworth, 2000).....	13
Gambar 3.1	Lokasi dan stasiun penelitian.....	21
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 3.3	Diagram alir manajemen data.....	23
Gambar 3.4	<i>Picking waveform</i> 3 komponen gempa vulkanik-dalam pada tanggal 9 September 2015 pada jam 10:46:08.180 UTC yang terekam di stasiun KTS.....	24
Gambar 3.5	<i>Picking waveform</i> 3 komponen gempa tektonik lokal pada tanggal 5 September 2015 pada jam 09:11:41.863 UTC yang terekam di stasiun SED.....	24
Gambar 3.6	FFT <i>waveform</i> 3 komponen gempa vulkanik-dalam pada tanggal 9 September 2015 pada jam 10:46:08.180 UTC yang terekam di stasiun KTS.....	25
Gambar 3.7	FFT <i>waveform</i> 3 komponen gempa tektonik lokal pada tanggal 5 September 2015 pada jam 09:11:41.863 UTC yang terekam di stasiun SED.....	25
Gambar 3.8	Spektra <i>waveform</i> 3 komponen gempa vulkanik-dalam pada tanggal 9 September 2015 pada jam 10:46:08.180 UTC yang terekam di stasiun KTS.....	26
Gambar 3.9	Spektra <i>waveform</i> 3 komponen gempa tektonik lokal pada tanggal 5 September 2015 pada jam 09:11:41.863 UTC yang terekam di stasiun SED.....	26
Gambar 3.10	Diagram alir penentuan hiposenter dengan metode GAD.....	27
Gambar 3.11	Diagram alir pembaruan model kecepatan bumi 1D.....	28
Gambar 3.12	Diagram alir algoritma <i>hypoDD</i>	29
Gambar 3.13	Prinsip kerja LOTOS (dimodifikasi dari Koulakov, 2009).....	30
Gambar 4.1	Distribusi episenter gempa Gunung Papandayan sebelum relokasi. Lingkaran biru menunjukkan distribusi gempa dari metode GAD dan segitiga merah merupakan stasiun seismik perekam gempa. Gempa lebih terkonsentrasi di sebelah Barat stasiun MIS dan SKL. Sedangkan gempa yang lainnya menyebar dari Barat sampai menuju puncak Kawah Gunung Papandayan.....	34
Gambar 4.2	Model kecepatan 1D hasil VELEST terhadap fungsi kedalaman. Garis biru merupakan model kecepatan gelombang S (Vs) dan garis merah adalah model kecepatan	

	gelombang P (V_p)	35
Gambar 4.3	Peta episenter gempa sebelum dan sesudah relokasi yang <i>dioverlay</i> dengan peta geologi kawasan rawan bencana gempabumi Jawa bagian Barat. Gempa sebelum direlokasi mayoritas berada di sesar-sesar yang ada di sekitar kawasan Gunung Papandayan. Gempa setelah direlokasi lebih terfokus di desa Santosa.....	37
Gambar 4.4	Lokasi usaha Wayang Windu. Desa Santosa ditunjukkan oleh arah panah (Dinas Pertambangan dan Energi Provinsi Jawa Barat, 2006)	38
Gambar 4.5	Hiposenter gempa penampang Utara-Selatan. Gempa sebelum relokasi mayoritas berada di kedalaman antara 0 km sampai 12 km terhadap MSL. Sedangkan gempa setelah relokasi <i>tercluster</i> di kedalaman antara 1,259 km sampai 9,605 km terhadap MSL dan gempa semakin kedaman mengarah ke Utara dari Gunung Papandayan (MSL = 0 km terhadap titik referensi 2665 m)	39
Gambar 4.6	Hiposenter gempa penampang Barat-Timur. Gempa sebelum relokasi mayoritas berada di kedalaman antara 0 km sampai 12 km terhadap MSL. Sedangkan gempa setelah relokasi <i>tercluster</i> di kedalaman antara 1,259 km sampai 9,605 km terhadap MSL dan gempa semakin kedaman mengarah ke Barat dari Gunung Papandayan (MSL = 0 km terhadap titik referensi 2665 m)	40
Gambar 4.7	Model kecepatan bumi 1D. Garis berwarna abu-abu merupakan model kecepatan awal dari VELEST yang digunakan sebagai informasi awal dan garis berwarna merah merupakan model 1D optimum sebagai hasil dari pengolahan dengan menggunakan LOTOS.....	41
Gambar 4.8	Distribusi anomali V_p pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 1 km (b) 3 km (c) 5 km (d) 7 km (e) 9 km (f) 11 km (g) 13 km dan (h) 15 km.....	43
Gambar 4.9	Distribusi anomali V_s pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 1 km (b) 3 km (c) 5 km (d) 7 km (e) 9 km (f) 11 km (g) 13 km dan (h) 15 km.....	44
Gambar 4.10	Garis <i>cross section</i> untuk menampilkan kedalaman distribusi anomali V_p , V_s , dan Poisson's ratio V_p/V_s . <i>Cross section</i> 1-A sampai 1-B berada pada koordinat $107,500^\circ$ BT dan $7,190^\circ$ LS sampai $107,860^\circ$ BT dan $7,370^\circ$ LS, <i>Cross section</i> 2-A sampai 2-B berada pada koordinat $107,742^\circ$ BT dan $7,107^\circ$ LS sampai $107,420^\circ$ BT dan $7,452^\circ$ LS, dan <i>cross section</i> 3-A sampai 3-B berada pada koordinat $107,885^\circ$ BT dan $7,167^\circ$ LS sampai $107,490^\circ$ BT dan $7,288^\circ$ LS.....	45
Gambar 4.11	Struktur kedalaman anomali V_p pada irisan vertikal dari hasil <i>cross section</i> 1A – 1B, 2A – 2B, dan 3A – 3B. Anomali negatif berwarna merah dan anomali positif	

	berwarna biru.....	46
Gambar 4.12	Struktur kedalaman anomali Vs pada irisan vertikal dari hasil <i>cross section</i> 1A – 1B, 2A – 2B, dan 3A – 3B. Anomali negatif berwarna merah dan anomali positif berwarna biru.....	47
Gambar 4.13	Distribusi anomali Poisson's rasio Vp/Vs pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 1 km (b) 3 km (c) 5 km (d) 7 km (e) 9 km (f) 11 km (g) 13 km dan (h) 15 km.....	49
Gambar 4.14	Struktur kedalaman anomali Poisson's rasio Vp/Vs pada irisan vertikal dari hasil <i>cross section</i> 1A – 1B, 2A – 2B, dan 3A – 3B.....	50

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SINGKATAN

FFT	= <i>Fast Fourier Transform</i>
GAD	= <i>Geiger's method with Adaptive Damping</i>
GF	= <i>Goal Function</i>
<i>HypoDD</i>	= <i>Hypo Double-Difference</i>
JHD	= <i>Joint Hypocenter Determination</i>
LOTOS	= <i>Local Tomography Software</i>
LSQR	= <i>Least Square Linier</i>
MSL	= <i>Mean Sea Level (MSL =0 km)</i>
PVMBG	= <i>Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi</i>
RMS	= <i>Root Mean Square</i>
SWARM	= <i>Seismic Wave Analysis and Real-time Monitor</i>
TL	= <i>Tektonik Lokal</i>
UTC	= <i>Universal Time Coordinated</i>
VA	= <i>Vulkanik Dalam / gempa tipe-A</i>

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lampiran 1	Data Stasiun Seismik Perekam Gempa Vulkanik Gunung Papandayan	55
Lampiran 2	Data <i>Travel Times</i> dan Frekuensi Gempa Vulkanik Gunung Papandayan	56
Lampiran 3	Data Gempa Vulkanik Gunung Papandayan Dari GAD.....	64
Lampiran 4	Data Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Papandayan Setelah Relokasi dengan hypoDD.....	66

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tomografi seismik merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mencitrakan model anomali 3-D bawah permukaan bumi berdasarkan waktu tiba gelombang seismik (Iyer & Hirahara, 1993). Pada penelitian ini metode tomografi seismik diterapkan di daerah gunung Papandayan yang berada pada koordinat $107^{\circ} 44'' 00'$ BT dan $7^{\circ} 19'' 00'$ LS dengan ketinggian 2.665 mdpl dan terletak ± 20 km sebelah selatan Garut atau ± 70 km sebelah tenggara Bandung. Gunung Papandayan termasuk gunungapi aktif strato tipe A yang pernah meletus setelah tahun 1600. Erupsi yang pernah terjadi di gunung Papandayan tercatat sejak tahun 1772. Pada gunung Papandayan terdapat empat kawah besar yaitu Kawah Tegal Bugbrung, Kawah Tegal Alun-Alun, Kawah Parugpug, dan Kawah Mas. Dalam kompleks Kawah Mas terdapat kawah-kawah lainnya seperti Kawah Nangklak dan Kawah Baru.

Gunung Papandayan selain dijadikan sebagai tempat wisata gunungapi (vulkanowisata) juga memiliki manifestasi panas bumi yang dapat dijadikan sebagai energi alternatif pengganti listrik. Hal tersebut didukung oleh kondisi geologinya, di mana terdapat aktivitas tektonik berupa sesar yang ditemukan di sekitar Gunung Nangklak, Kawah Tegal Alun-alun, Kawah Mas, dan Gunung Walirang. Potensi yang ada di kawasan gunung Papandayan perlu diimbangi oleh kegiatan monitoring aktivitas kegempaan yang dilakukan secara kontinu oleh PVMBG. Oleh karena itu, dilakukan penelitian inversi tomografi seismik 3D bawah permukaan dengan menggunakan *Local Earth Tomography* yang dapat digunakan sebagai referensi untuk pengambilan keputusan mitigasi bencana gunungapi baik dalam hal pemantauan (*monitoring*) maupun peringatan dini (*early warning*) tingkat kegiatan gunungapi.

Tomografi seismik 3D bawah permukaan gunung Papandayan pada penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan pada tahun 2005 oleh Kristianto dengan menggunakan data gempa vulkanik-dalam dan vulkanik-dangkal yang terekam pada bulan Juni – Juli 1998 di tujuh stasiun. Sedangkan pada penelitian ini digunakan data gempa vulkanik-

dalam dan tektonik lokal dari bulan September – Oktober 2015 yang terekam di empat belas stasiun. Hasil penelitian ini diperoleh informasi zona lemah bawah permukaan pada sistem hidrotermal kawasan gunung Papandayan yang dapat digunakan sebagai pengembangan dari penelitian sebelumnya serta dapat digunakan untuk mengetahui hubungan struktur geologi antara sistem hidrotermal yang ada di kawasan gunung Papandayan terhadap panas bumi yang ada di area Darajat dan Wayang Windu.

Tomografi seismik pertama kali dipublikasikan oleh Aki dan Lee (1976) untuk mendelineasi model anomali 3D bawah permukaan bumi. Dalam perkembangannya, tomografi seismik telah banyak digunakan untuk interpretasi di bidang tektonik global (Kennett *et al.*, 1998), regional (Widiantoro dan Van der Hilst, 1997) maupun lokal (Thurber, 1983) dengan baik. Keberhasilan metode ini kemudian dikembangkan pada daerah yang lebih sempit seperti daerah gunungapi sebagaimana yang sudah diterapkan pada tahun 2005 di gunungapi Guntur dengan menggunakan waktu tunda P (Suantika, 2002) dan pada tahun 2005 dilakukan studi lanjut dengan menggunakan waktu tunda gelombang P dan S (Nugraha, 2005). Pada penelitian ini, metode tomografi digunakan untuk studi kasus gunung Papandayan dengan menggunakan waktu tunda gelombang P dan S dan untuk memudahkan peneliti dalam mendapatkan pencitraan yang baik dari kondisi bawah permukaan, maka digunakan alat bantu berupa *software* LOTOS.

Kecepatan seismik adalah salah satu parameter fisis yang sangat baik untuk menggambarkan karakteristik medium bawah permukaan. Pemodelan tomografi seismik, dapat digunakan untuk membuat penampang distribusi kecepatan yang menjadi panduan untuk korelasi stratigrafi dan gambaran penyebaran litologi. Oleh karena itu, analisa kecepatan yang akurat sangat dibutuhkan untuk mendapatkan korelasi stratigrafi dan gambaran penyebaran litologi (Monalia, 2011).

Pada penelitian ini sebelum dilakukan inversi tomografi seismik, maka dilakukan relokasi hiposenter terlebih dahulu karena ketepatan dalam penentuan relokasi hiposenter gempa mikro sangat diperlukan untuk menunjang interpretasi struktur bawah permukaan hasil inversi tomografi. Pada penelitian ini penentuan hiposenter gempabumi sebelum dilakukan relokasi digunakan metode *Geiger*

Adaptive Dumping (GAD), dimana hiposenter gempa bumi yang diperoleh dengan metode tersebut masih mengandung kesalahan akibat dari struktur kecepatan yang tidak termodelkan. Oleh karena itu, perlu dilakukan relokasi hiposenter dengan menggunakan metode hypoDD sehingga efek terkait struktur kecepatan yang tidak termodelkan dapat dihilangkan sehingga dapat meningkatkan akurasi posisi hiposenter. Algoritma DD telah diuji oleh Waldhauser dan Ellsworth (2000) menggunakan data gempa di bagian utara *Hayward fault* California yang hasilnya menunjukkan adanya perubahan dari distribusi hiposenter gempa yang acak menjadi sebaran yang fokus dan mengungkap lineasi distribusi hiposenter secara horizontal, mengarah pada suatu area sempit pada *fault* yang merupakan zona lemah dimana akumulasi *stress* biasanya dilepaskan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana nilai distribusi anomali kecepatan gelombang P (V_p), gelombang S (V_s), dan rasio V_p/V_s ?
2. Bagaimana pencitraan tomografi bawah permukaan kawasan gunung Papandayan dengan menggunakan *Local Earthquake Tomography*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan data nilai distribusi anomali kecepatan gelombang P (V_p), gelombang S (V_s), dan rasio V_p/V_s
2. Memperoleh pencitraan tomografi bawah permukaan kawasan gunung Papandayan dengan menggunakan *Local Earthquake Tomography*

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gempa vulkanik dalam dan tektonik lokal gunung Papandayan yang diperoleh dari PVMBG dan terekam sejak 1 September 2015 sampai 19 Oktober 2015 dengan M_w 1,5.

2. Pengolahan data awal untuk mendapatkan waktu tiba dari gelombang P (t_p) dan gelombang S (t_s) digunakan *software* SWARM
3. Pembaruan model kecepatan bumi dengan menggunakan *software* VELEST 3.1
4. Penentuan koordinat hiposenter dilakukan dengan *software* GAD
5. Relokasi hiposenter menggunakan metode *double difference* yang dibantu oleh *software* HypoDD
6. Proses inversi tomografi dilakukan oleh *software* LOTOS 12

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil tomografi seismik 3D dapat digunakan untuk pengembangan potensi panas bumi di daerah Garut, Jawa Barat. Selain itu, dapat digunakan sebagai referensi untuk pengambilan keputusan mitigasi bencana gunungapi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan proposal tesis ini terdiri dari:

BAB 1 PENDAHULUAN. Pada bab ini dipaparkan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

BAB II DASAR TEORI. Berisi tentang teori-teori yang mendukung penelitian antara lain profil gunung Papandayan, gelombang seismik, pembaruan model kecepatan 1D, penentuan hiposenter, relokasi hiposenter, dan tomografi seismik.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN. Bab ini menjelaskan tentang prosedur kerja yang dilakukan selama menyelesaikan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN. Bab ini berisi tentang hasil dan analisis data yang diperoleh selama penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN. Bab ini menyimpulkan hasil-hasil dari penelitian yang sudah dilakukan dan membahas saran-saran dalam penggunaan hasil penelitian dan langkah-langkah yang diperlukan untuk menyempurnakan hasil penelitian lebih lanjut.

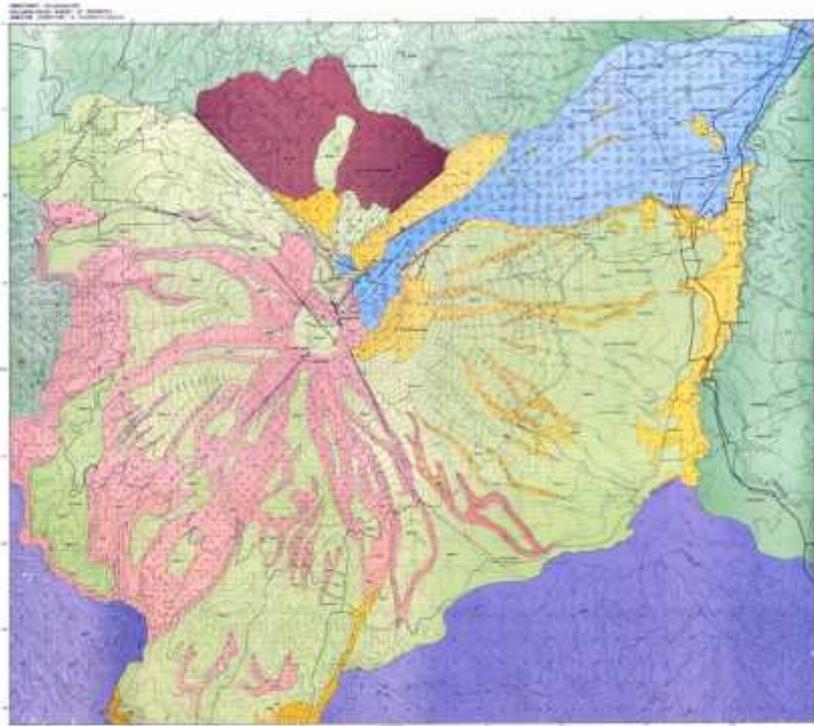
BAB 2

DASAR TEORI

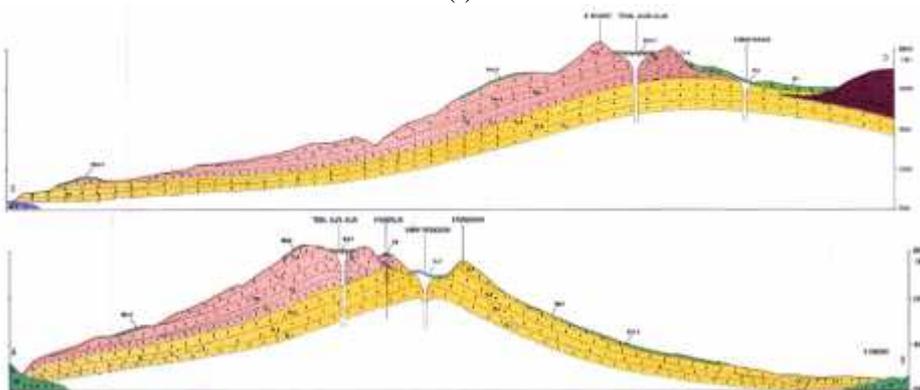
2.1 Profil Gunung Papandayan

Gunung Papandayan terletak ± 20 km sebelah selatan Garut atau ± 70 km sebelah tenggara Bandung, dengan ketinggian puncak 2.665 m dpl. Posisi geografisnya terletak pada $7^{\circ} 42'$ LS dan $107^{\circ} 44'$ BT. Di gunung Papandayan memiliki empat kawah besar yaitu kawah Tegal Bungbrung, Kawah Tegal Alun-Alun, Kawah Parugpug, dan Kawah Mas. Dari empat kawah tersebut Kawah Mas merupakan kawah paling aktif dan menghasilkan banyak endapan belerang. Dalam kompleks Kawah Mas terdapat kawah-kawah lainnya seperti Kawah Nangklak dan Kawah Baru. Pada beberapa kawah utama masih tampak adanya aktivitas berupa hembusan gas solfatara/fumarola yang cukup besar, juga banyak ditemukan pemunculan mata air panas sebagai akibat dari manifestasi aktivitas gunungapi Papandayan.

Stratigrafi gunung Papandayan dipisahkan menjadi produk primer dan sekunder. Produk primer terdiri dari batuan tersier berupa andesit yang ditemukan di sebelah selatan Gunung Papandayan; produk Gunungapi di sekitar Gunung Papandayan terdiri dari endapan jatuhan piroklastik Gunung Geulis, intrusi Gunung Kembar, endapan jatuhan piroklastik dan aliran lava Gunung Cikuray, endapan jatuhan piroklastik Gunung Jaya, dan aliran piroklastik G.Puntang; produk Gunung Papandayan terdiri dari aliran lava, endapan jatuhan, dan aliran piroklastik; produk Kawah Tegal Alun-alun terdiri dari aliran lava dan endapan aliran piroklastik; produk Gunung Nangklak terdiri dari endapan jatuhan piroklastik; produk Kawah Manuk terdiri dari endapan jatuhan piroklastik; dan produk Kawah Mas terdiri dari endapan jatuhan piroklastik. Sedangkan produk sekunder terdiri dari endapan guguran puing Kawah Manuk, endapan guguran puing Kawah Mas, dan lahar. Adapun gambar peta geologi gunung Papandayan ditunjukkan pada gambar 2.1.



(i)



(ii)



(iii)

Gambar 2.1 (i) Peta geologi gunung Papandayan (ii) Lintasan A – B dan C – D pada peta geologi gunung Papandayan terhadap kedalaman (iii) keterangan peta (Asmoro dkk, 1989)

Struktur geologi gunung Papandayan dipisahkan menjadi struktur sesar dan struktur kawah. Struktur sesar umumnya berjenis sesar normal, ditemukan di sekitar gunung Nangklak, Kawah Tegal Alun-alun, Kawah Mas, dan gunung Walirang, serta di lereng Baratlaut dan Tenggara gunung Papandayan, berarah umum NE-SW, NW-SE, dan NNW-SSE dengan indikasi berupa breksiasi, kelurusan topografi, zona hancuran struktur kawah, terdapat di Kawah Mas, Kawah Manuk, Kawah Brungbrung, Kawah Tegal Alun-alun, Kawah Nangklak, dan Kawah Baru.

2.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah bentuk gelombang elastis yang menjalar dengan bumi sebagai mediumnya. Gelombang ini merambat sebagai reaksi dari adanya gangguan di dalam kerak bumi, misalnya adanya patahan. Getaran gelombang seismik yang relatif kecil dapat direkam dengan alat seismograf di suatu tempat di permukaan bumi yang dipasang dalam jaringan gempa mikro yang telah ditentukan. Gelombang seismik digolongkan menjadi dua jenis yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Namun, pada gempa mikro yang digunakan hanya gelombang *body* saja. Gelombang *body* ada dua jenis yaitu gelombang primer (*P-wave*) dan gelombang sekunder (*S-wave*) (Gylfy & Bjornsson, 1991).

Gelombang P atau gelombang longitudinal atau gelombang kompresi merupakan gelombang seismik yang memiliki kecepatan paling tinggi (6-7 km/detik) dibandingkan gelombang-gelombang seismik lainnya dan pertama kali tiba pada setiap stasiun pengukuran seismik (Kayal, 2002). Gelombang ini terjadi karena adanya tekanan. Kecepatan gelombang P (V_p) 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. Kecepatan gelombang P yaitu:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

Dengan V_p adalah kecepatan gelombang P, λ adalah konstanta Lamé, μ adalah modulus rigiditas, dan ρ adalah densitas.

Gelombang S adalah gelombang sekunder atau gelombang transversal yaitu gelombang yang menjalar lebih lambat dari pada gelombang P sehingga akan terekam di seismograf setelah gelombang P dan hanya dapat merambat pada batuan padat sehingga pada inti bumi bagian luar tidak dapat terdeteksi. Sedangkan pada inti bumi bagian dalam mampu melewati. Kecepatan gelombang 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 (Gubbins, 1990). Kecepatan gelombang S yaitu:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Perbandingan antara cepat rambat gelombang P dan kecepatan gelombang S menghasilkan suatu konstanta yang disebut *Poisson ratio*. Konstanta ini merupakan sebuah besaran tak berdimensi yang menyatakan karakteristik dari suatu daerah (batuan) tersebut. Hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\dagger)}{1-2\dagger}} \quad (2.3)$$

Sehingga

$$\dagger = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \right] \quad (2.4)$$

Dimana \dagger adalah *Poisson ratio*. Faktor-faktor kandungan air, retakan, porositas, temperatur, metamorfosa, tekanan, dan tipe batuan dapat mempengaruhi cepat rambat gelombang. Saturasi air dapat memberikan efek yang lebih besar terhadap gelombang P daripada gelombang S. Cepat rambat gelombang P akan bertambah sebesar 20% apabila suatu batuan kering tersaturasi oleh air, sedangkan gelombang S tidak mengalami perubahan kecepatan. Hal tersebut dikarenakan gelombang S tidak dapat menjalar pada materi yang berfasa cair (Rosid, 1988).

Pada zona saturasi uap diharapkan gelombang P lebih lambat daripada daerah sekelilingnya. Hal ini berarti berkurangnya harga *Poisson ratio*. Faktor porositas dan kandungan retakan pun memberikan efek yang sama terhadap gelombang P. Kedua faktor ini dapat mengurangi cepat rambat gelombang P dan

sedikit pengaruhnya terhadap gelombang S. Ternyata cepat rambat gelombang *body* dapat memonitor zona lemah (zona anomali kecepatan rendah) dalam suatu daerah dengan melihat harga *Poisson ratio*-nya (Rosid, 1988).

2.3 Pembaharuan Model Kecepatan 1D

Model kecepatan 1D sangat diperlukan untuk kalkulasi waktu tempuh pada proses relokasi hiposenter. Model kecepatan 1D tersebut kemudian akan diperbarui dengan tujuan untuk meminimalisasi kesalahan kalkulasi waktu tempuh dalam penentuan hiposenter. Pada penelitian ini digunakan model kecepatan referensi dari Kristianto (2005) untuk menentukan hiposenter awal gempa dengan menggunakan GAD dan untuk melakukan pembaruan model kecepatan bumi dengan menggunakan VELEST. Model kecepatan Kristianto (2005) menganggap medium homogen setengah ruang (*homogeneous half space*) dengan menggunakan model lima lapisan kecepatan sebagaimana ditunjukkan pada tabel 1.1.

Tabel 1.1 Model struktur kecepatan bumi Gunung Papandayan (Kristianto, 2005)

Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0,5	2,50	1,42
0,7	2,75	1,571
3	3,00	1,714
6	4,50	2,571
100	8,00	4,571

Proses pembaharuan model kecepatan 1D dengan menggunakan *software* VELEST telah diperkenalkan oleh Kissling (1995). Kelebihan dari VELEST yaitu dapat memperbarui model kecepatan bumi dan adanya koreksi stasiun sehingga dapat diperoleh hasil yang lebih optimal. Selain itu, pada kasus model kecepatan dan koreksi stasiun yang tetap, VELEST dapat digunakan untuk metoda relokasi gempa JHD (Rachman & Nugraha, 2012). Prinsip dari *software* ini yaitu dengan menggunakan metode *couple-velocity hypocenter* yang merupakan metode

relokasi gempa, penentuan model kecepatan bawah permukaan 1-D, dan koreksi stasiun secara simultan menggunakan algoritma pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan linier.

Pengamatan waktu tiba gelombang t_{obs} dinyatakan dalam persamaan $t_{obs} = f(s, h, m)$, di mana s , h , dan m adalah koordinat stasiun, parameter hiposenter termasuk *origine time*, dan model kecepatan. Dengan menerapkan teori penjalaran gelombang dengan model kecepatan awal, maka dapat dihitung waktu kedatangan teoritis t_{cal} untuk setiap pasangan stasiun. Selanjutnya waktu kedatangan residual t_{res} dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

Di mana t_{res} adalah residual waktu tempuh observasi dan waktu tempuh kalkulasi, t_{obs} adalah waktu tempuh observasi, t_{cal} adalah waktu tempuh kalkulasi, f adalah fungsi terhadap (s, h, m) , k adalah jumlah hiposenter, i adalah jumlah stasiun, n merupakan jumlah parameter model kecepatan dan e adalah *error* keseluruhan (*error* waktu kedatangan observasi, perhitungan, dan model kecepatan).

2.4 Penentuan Hiposenter

2.4.1 Penentuan Hiposenter Menggunakan Metode Geiger

Penentuan lokasi sumber gempa (hiposenter) merupakan tahap awal dalam melakukan analisa kegempaan. Salah satu cara untuk menentukan posisi hiposenter sebelum dilakukan relokasi adalah dengan menggunakan metode penentuan hiposenter. Pada penelitian ini untuk menentukan hiposenter digunakan *software* GAD yang menggunakan prinsip metode Geiger yaitu menghitung selisih antara waktu pengamatan dan waktu perhitungan sebagaimana dinyatakan pada persamaan di bawah ini:

$$r_i = t_{obs}^i - t_{cal}^i \quad (2.6)$$

Di mana r_i adalah selisih antara hasil pengamatan dan hasil perhitungan pada stasiun ke- i , t_{obs}^i adalah waktu tempuh gelombang seismik pada stasiun ke- i (x_i , y_i , z_i) dari pusat gempa (hiposenter), dan t_{cal}^i adalah waktu tempuh gelombang

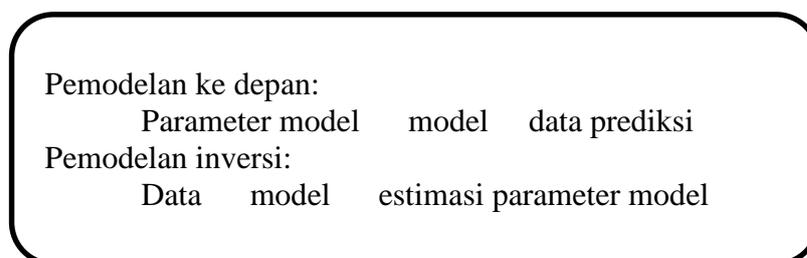
seismik pada stasiun ke- i (x_i, y_i, z_i) yang dihitung berdasarkan model kecepatan bawah permukaan.

Metode GAD hanya valid untuk diterapkan pada maksimal 6 lapisan (Suantika dkk, 2008). Persamaan yang digunakan dalam metode Geiger adalah sebagai berikut:

$$r_i = \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial x_i} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial y_i} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial z_i} \right) \Delta z + \Delta t_0 \quad (2.7)$$

Dimana $\left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial x_i} \right), \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial y_i} \right), \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial z_i} \right) =$ turunan parsial dari waktu tempuh perhitungan terhadap lokasi hiposenter awal, $\Delta x, \Delta y, \Delta z,$ dan $\Delta t_0 =$ perubahan lokasi hiposenter dan waktu tiba, dan $r_i =$ selisih antara hasil pengamatan dan hasil perhitungan pada stasiun ke- i .

Metode GAD bekerja dengan *forward modelling* dan inversi sehingga didapatkan nilai dengan *error* terkecil. *Forward modelling* didefinisikan sebagai proses untuk memprediksi hasil pengukuran (memprediksi data) menggunakan persamaan matematis yang diturunkan dari beberapa konsep umum atau model yang relevan terhadap fenomena yang ditinjau (Menke, 1984). Sedangkan pemodelan inversi dapat dikatakan sebagai kebalikan dari pemodelan ke depan. Menke (1984, hal. 2) menjelaskan pemodelan inversi merupakan teknik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai suatu fenomena fisika berdasarkan pengamatan. Pemodelan inversi dimulai dengan data dan sebuah prinsip umum atau model, kemudian dua hal tersebut digunakan untuk memperkirakan parameter model. Secara sederhana, kedua pemodelan di atas dapat digambarkan dengan skema berikut ini:



Gambar 2.2 Perbedaan pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan inversi (*inverse modelling*) (Menke, 1984)

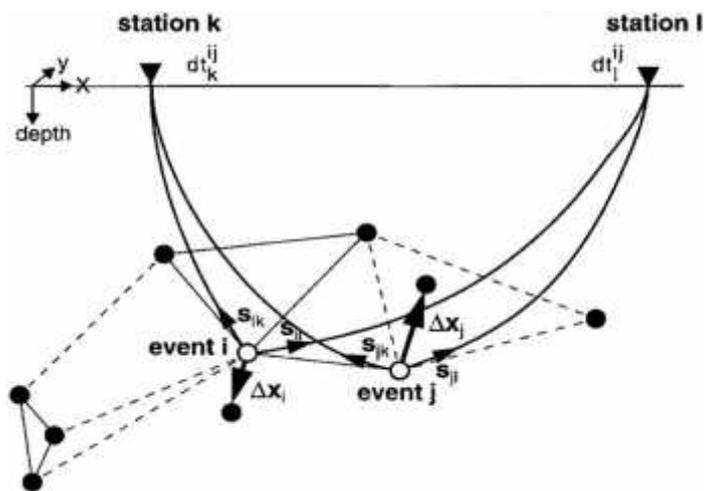
Software GAD yang diperoleh dari PVMBG umumnya digunakan untuk penentuan posisi hiposenter terutama untuk gempa-gempa vulkanik atau gempa dengan jarak yang relatif dekat antara sumber gempa dan penerima (*receiver*) sehingga memiliki kesesuaian dengan penelitian kali ini yang dilakukan di kawasan gunung Papandayan. Data *input* yang digunakan pada *software* GAD yaitu berupa data waktu tiba gelombang P dan gelombang S dan polaritasnya, model kecepatan, dan koordinat stasiun. Beberapa model sintetis dikembangkan untuk verifikasi program GAD, sehingga dapat diketahui pengaruh *input* data, terutama data waktu tiba terhadap *output* yang berupa posisi sumber gempa. Permasalahan dalam penentuan waktu tiba pada model terletak dalam penentuan waktu tempuh gelombang. Penentuan waktu tempuh gelombang ditentukan dari lintasan perambatan gelombang (*raypath*) dari sumber ke penerima. Lintasan perambatan gelombang di GAD pada dasarnya menggunakan metode *shooting*. Pada metode *shooting* permasalahan dirumuskan dengan mencari sudut atau arah tembak yang tepat, sehingga lintasan gelombang berujung tepat pada koordinat stasiun penerima (Nishi, 2001).

2.4.2 Relokasi Hiposenter Menggunakan *Double Difference*

Hiposenter adalah lokasi dari sumber gempa. Lokasi tersebut pada umumnya dituliskan dengan *longitude* (X_0), *latitude* (Y_0), kedalaman (Z_0), dan waktu asal (t_0). Pada penelitian ini untuk mendapatkan hasil hiposenter yang akurat, maka dilakukan relokasi dengan menggunakan metode *double-difference*. Metode hypoDD pertama kali dikemukakan oleh Waldhauser dan Ellsworth (2000), di mana metode ini menggunakan data katalog gempa dan *waveform cross-correlation*. Prinsip dari metode *Double Difference* yaitu menggunakan data waktu tempuh antara dua gempa bumi yang letak hiposenternya berdekatan. Jika jarak antara dua hiposenter gempa bumi sangat kecil dibandingkan dengan jarak hiposenter terhadap stasiun, maka dapat dianggap bahwa *raypath* kedua gempa bumi tersebut mendekati sama. Dengan demikian, maka dapat diasumsikan bahwa selisih waktu tempuh antara dua gempa bumi yang terekam terhadap stasiun yang sama merupakan fungsi jarak antara kedua hiposenter, sehingga kesalahan model kecepatan dapat diminimalisasi meskipun tanpa menggunakan koreksi stasiun.

(Waldhauser & Ellsworth, 2000). Koreksi stasiun merupakan koreksi waktu yang dibutuhkan gelombang seismik untuk sampai pada stasiun perekam. Selain itu, koreksi stasiun juga dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui struktur geologi yang ada di bawah permukaan stasiun pencatat gempa bumi. Koreksi stasiun negatif diberikan ketika kecepatan gelombang yang dilalui semakin cepat akibat yang dilalui semakin padat. Namun koreksi stasiun positif diberikan ketika kecepatan gelombang yang dilalui semakin lambat akibat medium yang dilalui semakin renggang biasanya berupa sedimen atau pasir (Imposal et al., 2009).

Gambar 2.3 merupakan ilustrasi dari algoritma relokasi hiposenter menggunakan *Double Difference*. Lingkaran hitam dan putih menunjukkan hiposenter uji yang dihubungkan dengan gempa-gempa yang ada di sekitarnya dengan menggunakan data katalog (garis putus-putus) dan juga *waveform cross-correlation* (garis utuh). Gempa yang berdekatan, gempa *i* dan *j* ditunjukkan dengan lingkaran putih. Kedua gempa tersebut terekam oleh stasiun *k* dan *l* dengan selisih waktu dt_k^{ij} dan dt_l^{ij} (Waldhauser & Ellsworth, 2000).



Gambar 2.3 Ilustrasi algoritma relokasi *hypo double-difference* (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

Residual antara waktu tempuh observasi dan kalkulasi dari dua gempa yang berdekatan dapat dinyatakan dengan persamaan:

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

dengan dr_k^{ij} adalah waktu tempuh residual antara pasangan gempa i dan j pada stasiun k , $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$ adalah waktu tempuh gelombang berdasarkan observasi antara gempa i dan gempa j terhadap stasiun k , dan $(t_k^i - t_k^j)^{cal}$ adalah waktu tempuh gelombang berdasarkan kalkulasi antara gempa i dan gempa j terhadap stasiun k .

Untuk mempermudah penyelesaian maka diasumsikan bahwa model kecepatan telah mewakili keadaan sebenarnya, dan pembacaan waktu tiba telah tepat. Linearisasi dari permasalahan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

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

Δm adalah perubahan model hiposenter yang terdiri dari empat parameter hiposenter (x, y, z, t).

Jika persamaan (2.7) disusun untuk semua *event* dalam satu *cluster* dan dinyatakan dalam bentuk matriks, maka akan menjadi sebagai berikut:

$$WG\Delta m = W\Delta d \quad (2.10)$$

Matriks G adalah matriks Jacobian, yang berisi turunan parsial dari waktu tempuh dari seluruh pasangan gempa terhadap parameter hiposenter. Ukuran dari matriks Jacobian ini yaitu $M \times 4N$, dengan M adalah jumlah dari observasi *double difference* dan N adalah banyaknya gempa yang terekam, sedangkan 4 merupakan banyaknya parameter hiposenter (x_0, y_0, z_0, t_0). Matriks Δd berisi nilai residual waktu tempuh seluruh pasangan gempa, dan ukurannya yaitu $M \times 1$. Δm adalah matriks yang berisi vektor perubahan posisi relatif pasangan hiposenter terhadap posisi hiposenter awal pada satu *cluster*, berukuran $4N \times 1$. Setiap persamaan akan diberi pembobotan W . W merupakan matriks diagonal yang berperan sebagai pembobotan apriori berdasarkan kualitas dari *picking* tiap *event*. Kualitas *picking* dilihat berdasarkan jelas atau tidaknya identifikasi waktu tiba gelombang P maupun S.

Uraian di atas merupakan langkah-langkah dalam penentuan hiposenter menggunakan metode *Double Difference* dalam satu iterasi. Namun, jika penentuan hiposenter yang telah dilakukan menghasilkan nilai residual yang masih bernilai besar maka perlu dilakukan iterasi kembali, sehingga akan

diperoleh nilai residual minimum yang lebih kecil dan mendekati nol yang mengindikasikan bahwa perbaikan posisi hiposenter telah tercapai.

2.5 Tomografi Seismik

Menurut Iyer dan Hirahara (1993, hal. 2) dalam bukunya “*Seismic Tomography: Theory and Practice*”, sebagian besar gambar dari tomografi seismik didasarkan pada distribusi kecepatan gelombang gempa yang ditentukan dengan data waktu tiba gelombang gempa. Definisi tomografi seismik tersebut dilengkapi oleh Tien-when dan Philip (1994, hal. 1) sebagai teknik pencitraan yang menghasilkan gambar dari suatu objek dengan memanfaatkan respon objek terhadap energi eksternal yang bersifat non-destruktif. Energi eksternal yang dimaksud bisa berupa energi buatan ataupun energi alami berupa gempa bumi. Jadi, tomografi seismik dapat didefinisikan sebagai salah satu metode geofisika dalam teknik pencitraan yang menghasilkan gambar dari suatu objek (dalam hal ini yaitu bumi) berdasarkan waktu tiba gelombang seismik yang terjadi di seluruh dunia.

Prinsip dasar tomografi seismik yaitu mencitrakan bawah permukaan daerah penelitian dalam domain kecepatan. Untuk memudahkan kalkulasi, kecepatan gelombang lokal diganti dengan kelambanan lokal pada tahap inversi. Hal ini dikarenakan ketika berada domain kelambanan (*slowness*) persamaan inversi menjadi linear. Proses inversi tomografi pada penelitian ini dibantu oleh *software* LOTOS versi 12. LOTOS 12 adalah sebuah *software* yang dapat digunakan untuk mencitrakan tomografi suatu wilayah berdasarkan gelombang-gelombang seismik yang terdapat di wilayah tersebut. LOTOS didesain untuk menginversi struktur kecepatan gelombang P dan S yang simultan serta koordinat sumber gempa untuk mendapatkan pencitraan dari kondisi bawah permukaan daerah gempa. Algoritma LOTOS juga dapat dengan mudah diaplikasikan untuk berbagai set data tanpa pemrosesan parameter yang rumit (Koulakov, 2009).

Perbedaan utama dari LOTOS 12 jika dibandingkan dengan versi sebelumnya, LOTOS 07 dan LOTOS 09 yaitu (Koulakov, 2009):

1. Selain inversi untuk V_p dan V_s , LOTOS 12 juga memiliki kemampuan untuk menginversi V_p - V_p/V_s .

2. Hasil dalam bidang horisontal dapat disajikan dalam tipe PNG *bitmap* tanpa menggunakan *software* grafis apapun.
3. Struktur *file* dan program menjadi lebih sederhana dan sesuai.
4. Disediakan beberapa contoh berbeda yang dapat digunakan untuk merekonstruksi model baru.
5. Disediakan beberapa panduan yang sangat membantu dalam penggunaan *software* ini.
6. Disediakan *tool* untuk simulasi data buatan yang dapat digunakan untuk merencanakan *network deploying* (penyebaran jaringan).
7. Sudah mencakup topografi pula, sumber dapat terletak di atas permukaan laut.
8. Disediakan lokasi sumber awal berdasarkan *straight line approximation* (perkiraan garis lurus), misalnya untuk kasus lokal.

Algoritma LOTOS terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut:

1. Algoritma Optimisasi Kecepatan 1D dan Lokasi Awal Sumber

Langkah-langkah utama untuk mendapatkan kecepatan 1D adalah (Koulakov, 2009):

Langkah 1. Pemilihan data untuk optimisasi. Data yang terpilih adalah data yang terdistribusi secara merata pada kedalaman yang sama. Agar hal tersebut tercapai, maka dipilih data dengan jumlah stasiun pencatat terbanyak untuk tiap interval kedalaman.

Langkah 2. Kalkulasi waktu tiba gelombang dalam model 1D. Pada iterasi pertama, model ditetapkan secara manual dengan menggunakan informasi awal.

Langkah 3. Lokasi sumber dalam model 1D. Waktu tiba gelombang akan dihitung berdasarkan data yang telah didapat dari Langkah 1. Kalkulasi lokasi sumber ini juga didasarkan pada kalkulasi *goal function* (GF) yang menunjukkan probabilitas suatu titik sebagai lokasi sumber (Koulakov & Sobolev, 2006). GF pada *software* LOTOS 12 ini adalah:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N A(\Delta t_1) B(\Delta d_1) C}{\sum_{i=1}^N B(\Delta d_1) C} \quad (2.11)$$

Dalam hal ini, N adalah jumlah total *event* yang terekam, sedangkan A adalah nilai residual.

$$A(t_i) = \begin{cases} 1, & \text{jika } t_i / C_{PS} < 1 \\ (t_i - 2) / (1 - 2), & \text{jika } 1 < t_i / C_{PS} < 2 \\ 0, & \text{jika } t_i / C_{PS} > 2 \end{cases} \quad (2.12)$$

1 dan 2 adalah limit untuk nilai residual. Jika nilai residual tersebut kurang dari 1 GF menjadi 1, namun jika kurang dari 1 GF menjadi 0. Nilai 1 dan 2 ditentukan dari nilai prediksi dari anomali kecepatan. B adalah jarak kebergantungan seperti yang dituliskan pada Pers. (2.11).

$$B = \begin{cases} 1, & \text{jika } d_i < d_{min} \\ (d_{min}/d_i)^m, & \text{jika } d_i > d_{min} \end{cases} \quad (2.13)$$

dan C merupakan fase pembobotan. Bobot untuk fase gelombang P yaitu 1, untuk gelombang S lebih kecil dari P ($W_s=1/P$). Sedangkan untuk gelombang dengan fase P dan S pada satu stasiun digunakan persamaan residual sebagai berikut:

$$\Delta t_i = (t_{obs}^s - t_{ref}^s) - (t_{obs}^p - t_{ref}^p) \quad (2.14)$$

Bobot untuk residual tersebut akan bertambah jika model kecepatan P dan S mempunyai korelasi yang lebih baik.

Langkah 4. Kalkulasi derivatif pertama dari matriks sepanjang *rays computed* dalam iterasi sebelumnya. Bentuk notasi matriksnya sebagaimana pada persamaan 2.15.

$$[A].[x]=[b] \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dx} & \frac{dT_2}{dy} & \frac{dT_3}{dz} & \frac{dT_4}{dt} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dT_M}{dx} & \frac{dT_M}{dy} & \frac{dT_M}{dz} & \frac{dT_M}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_r \\ r_4 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Matriks [A] dikenal sebagai matriks kernel yang berisi derivatif pertama dari residual waktu tempuh setiap stasiun terhadap parameter hiposenter. Matriks ini berukuran $n \times 4$ dimana n adalah jumlah stasiun pengamatan dan 4 adalah jumlah parameter hiposenter (x_0, y_0, z_0, t_0). Matriks [b] adalah matriks yang berisi data

pengamatan yang diperoleh dari residual waktu tiba gelombang gempa di stasiun pengamat gempa (t_{obs}) dengan ukuran $n \times 1$. Sedangkan matriks $[x]$ yang ingin diketahui berisi data posisi hiposenter (x, y, z) dan data waktu terjadi gempa (t_0) yang berukuran 4×1 .

Langkah 5. Inversi matriks yang simultan untuk data P dan S menggunakan matriks pada Langkah 4. Matriks $[A]$ pada Pers. (2.13) bukanlah matriks bujursangkar, sedangkan proses inversi tomografi hanya bisa dilakukan pada matriks yang bujursangkar. Oleh karena itu Matriks $[A]$ dikalikan dengan transposnya.

$$[A^T A].[x] = [A^T b] \quad (2.17)$$

Selanjutnya dilakukan minimisasi norm sebagai berikut:

$$[x] = [(A^T A)^{-1}(A^T b)] \quad (2.18)$$

Matriks $[A^T A]$ mendekati singular sehingga digunakan *gradient damping* dalam perkiraan solusi *Least Square Linier* (LSQR). *Gradient damping* tersebut membiaskan solusi hasil inversi ke dalam suatu model yang *smooth*. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan tomografi yang relatif *smooth* sehingga memudahkan interpretasi. Selanjutnya dilakukan pengulangan Langkah 1 sampai dengan Langkah 5 hingga diperoleh nilai RMS terkecil.

2. *Bending Algorithm* untuk *Ray Tracing* dalam Model Kecepatan 3D

Algoritma untuk *ray tracing* dalam LOTOS menggunakan prinsip Fermat. Algoritma ini disebut sebagai *bending tracing* (Um & Thurber, 1987). Hal yang penting dalam algoritma ini yaitu dapat digunakannya parameterisasi apapun dari distribusi kecepatan. Namun, yang diperlukan hanyalah mendefinisikan nilai kecepatan yang unik dan positif pada titik manapun dari daerah penelitian. LOTOS versi terbaru yaitu LOTOS 12 telah mencakup banyak variasi pilihan dari definisi kecepatan.

3. Iterasi Inversi Tomografi

a. Lokasi sumber dalam model kecepatan 3

Setelah model kecepatan 1D dan lokasi awal sumber diketahui dengan optimisasi model 1D, kemudian dilakukan relokasi sumber dengan

ray tracing 3D (bending), maka langkah selanjutnya yaitu menggunakan metode gradien untuk mendapatkan lokasi sumber dalam model 3D (Koulakov, 2009).

b. Parameterisasi titik gempa

Metode parameterisasi menggunakan *nodes* dan algoritma telah dilakukan oleh Koulakov (2009). *Nodes* berada dalam tiap garis vertikal. *Nodes* dipasang sesuai dengan distribusi sinar. Jika tidak ada sinar maka tidak ada *nodes*. Jarak antara *nodes* diusahakan sekecil mungkin di dalam area dengan densitas sinar yang tinggi.

c. Kalkulasi matriks dan inversi V_p - V_s

Derivatif pertama dari matriks dihitung menggunakan *ray paths computed* setelah lokasi sumber telah dalam model 3D. Tiap elemen matriks, $A_{ij} = \partial t_i / \partial v_j$, sebanding dengan deviasi waktu sepanjang sinar ke-*i* dalam *node* ke-*j*. Inversi untuk matriks secara keseluruhan akan didapatkan dengan menggunakan iterasi LSQR (Paige & Saunders, 1983).

d. Siklus iterasi

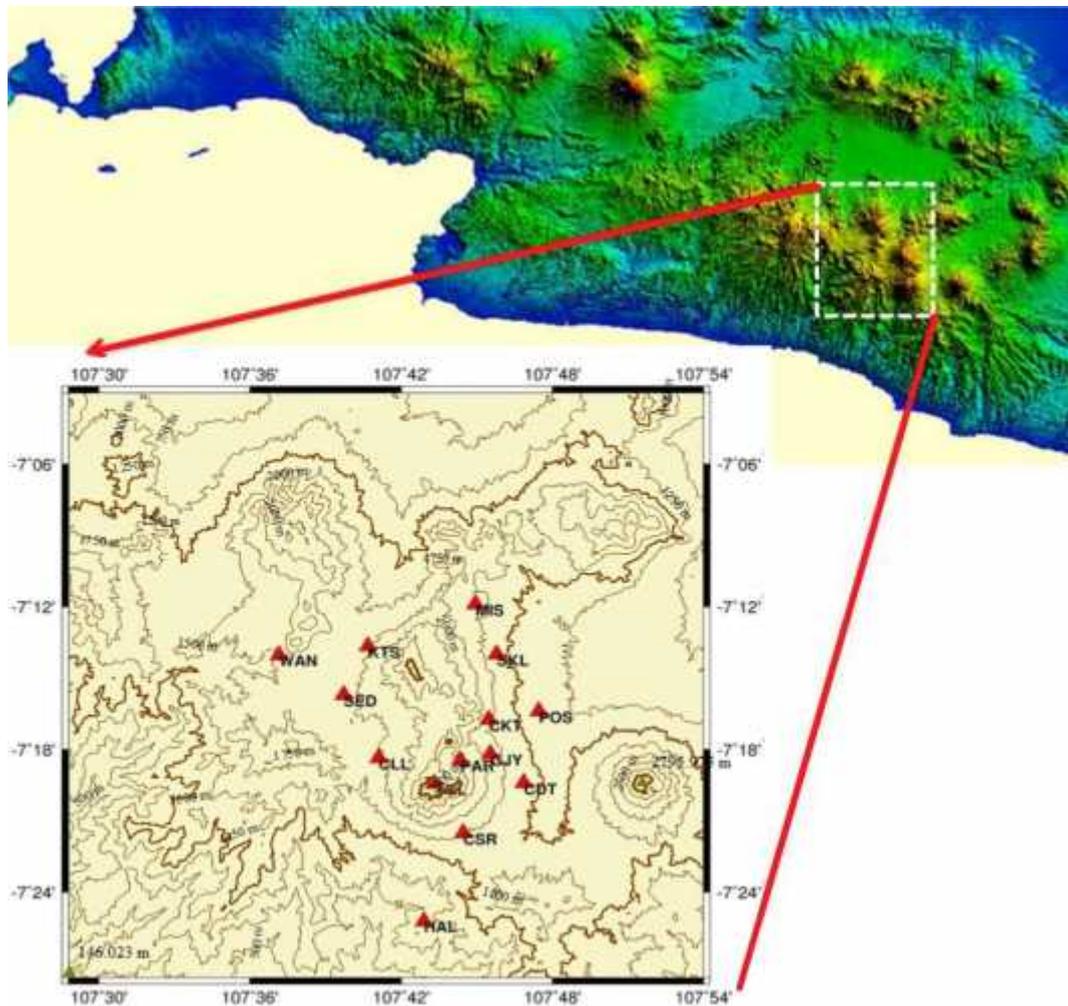
Siklus iterasi dimulai dari langkah menentukan lokasi sumber, kalkulasi matriks, dan inversi. Iterasi dapat dilakukan berulang agar mendapatkan hasil yang terbaik.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Data dan Stasiun Penelitian

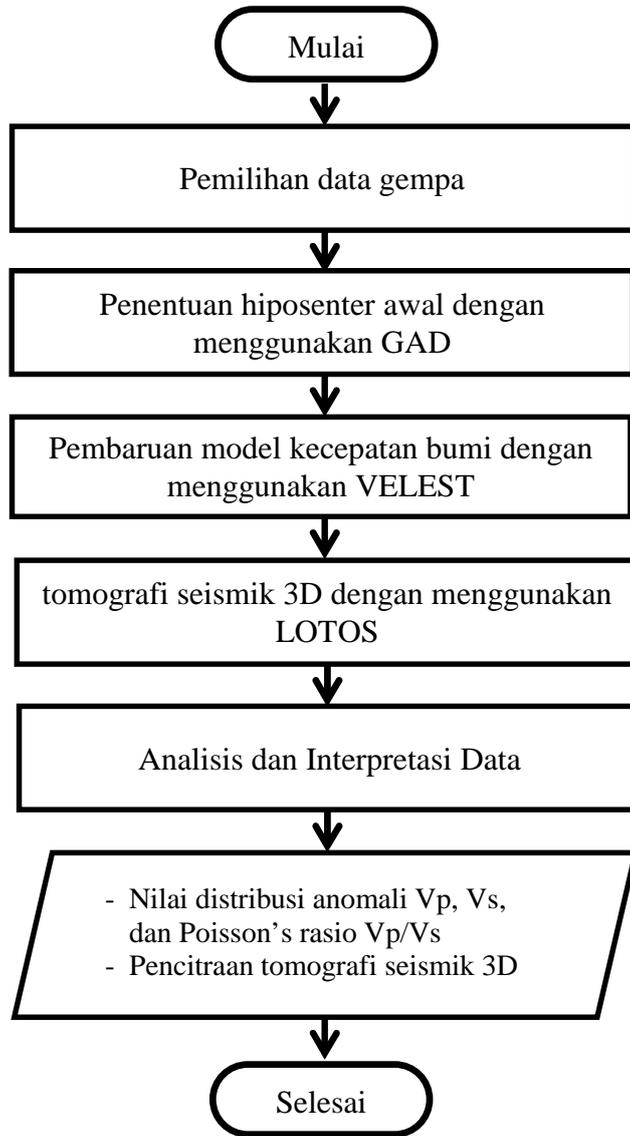
Penelitian ini menggunakan data gempa vulkanik dalam dan tektonik lokal gunung Papandayan yang terekam sejak 1 September – 19 Oktober 2015 dengan M_w 1,5 dan luas area penelitian yaitu $46,62 \times 45,51$ km. Besarnya luas area didasarkan pada lokasi stasiun penerima gempa dan estimasi sebaran gempa. Data direkam dengan menggunakan seismometer tipe Guralph CMG-40T oleh PVMBG di 14 stasiun sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 3.1.



Gambar 3.1 Lokasi dan stasiun penelitian

3.2 Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian tomografi seismik 3D pada sistem hidrotermal kawasan Gunung Papandayan terdiri dari beberapa tahapan sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.2.

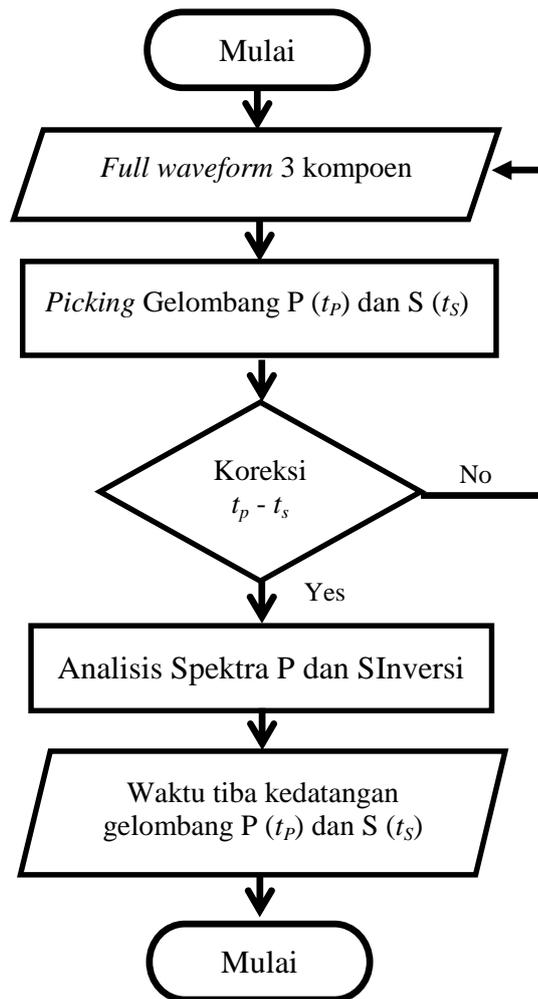


Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

Adapun penjelasan dari diagram alir penelitian adalah sebagai berikut:

3.2.1 Pemilihan Data Gempa

Ada beberapa tahapan yang dilakukan dalam manajemen data antara lain *picking* waktu tiba gelombang P (t_p) dan S (t_s), koreksi $t_p - t_s$, dan analisis spektra gelombang P dan S sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.3.



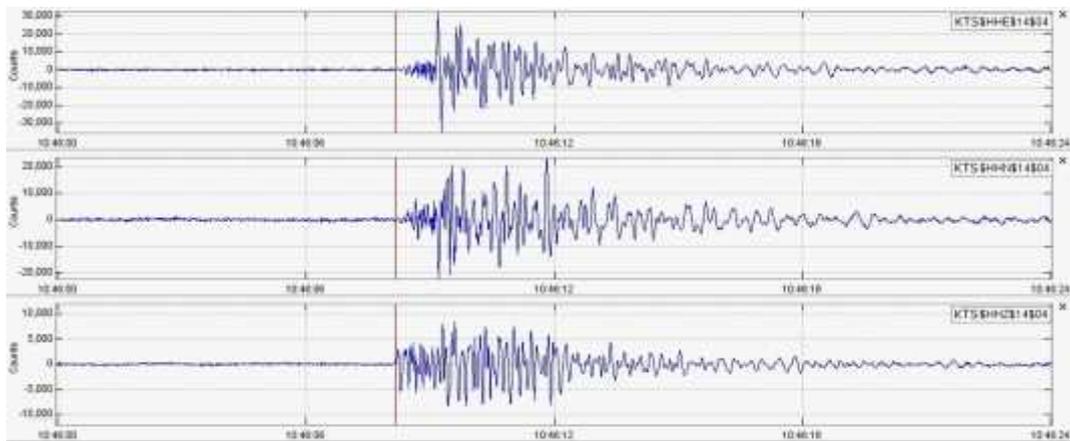
Gambar 3.3 Diagram alir manajemen data

Manajemen data dilakukan untuk membedakan antara gempa vulkanik-dalam, vulkanik-dangkal, tektonik lokal, tektonik jauh, maupun gempa tremor berdasarkan nilai frekuensi, selisih waktu tiba gelombang P dan S ($t_p - t_s$), dan bentuk sifat fisis gelombang. Penelitian ini menggunakan data gempa vulkanik-dalam dan tektonik-lokal. Pemilihan data gempa vulkanik-dalam dilakukan dengan melihat ciri-cirinya yaitu mempunyai selisih waktu tiba gelombang P dan S ($t_p - t_s$) sampai 5 detik, berdasarkan analisis spektral frekuensi dominan berada dalam rentang 4 – 7 Hz dengan kedalaman sumbernya antara 1 -20 km di bawah puncak (kawah) gunungapi (Minakami, 1949, dalam Siswoidjoyo, 1989). Sedangkan gempa tektonik lokal mempunyai waktu tiba 15 detik dengan frekuensi kejadian tinggi (Iskandar, 2013), dan kedalaman sumber gempunya

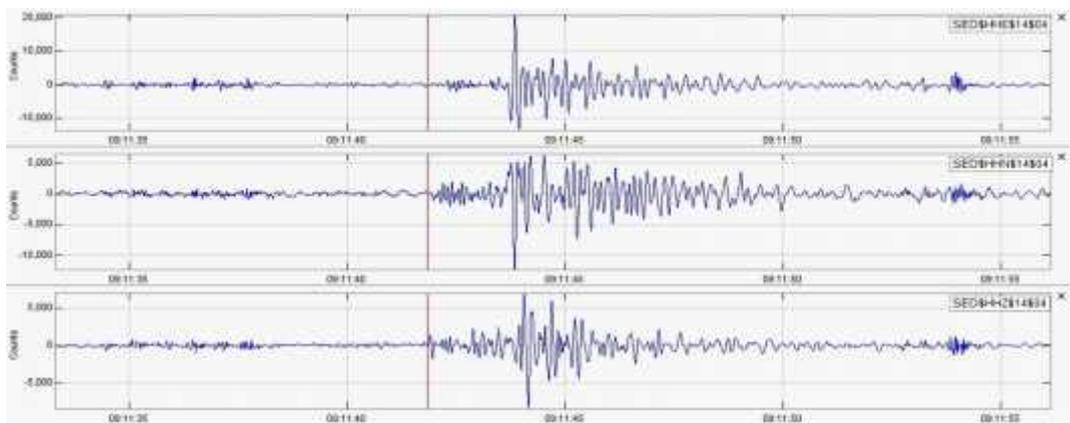
kurang dari 100 km, termasuk yang ada di sekitar gunungapi (Kristianto dkk, 2008).

3.2.1.1 Picking Gelombang P (t_p) dan S (t_s)

Picking waktu tiba gelombang P (t_p) dan S (t_s) dilakukan secara manual dengan menggunakan bantuan *software* SWARM. Untuk *picking* gelombang P digunakan komponen vertikal (BHZ). Sedangkan untuk *picking* gelombang S digunakan komponen horizontal *easting* (BHE) dan *northing* (BHE). Bentuk fisis dari gempa vulkanik-dalam dan tektonik-lokal dapat dilihat pada gambar 3.4 dan 3.5.



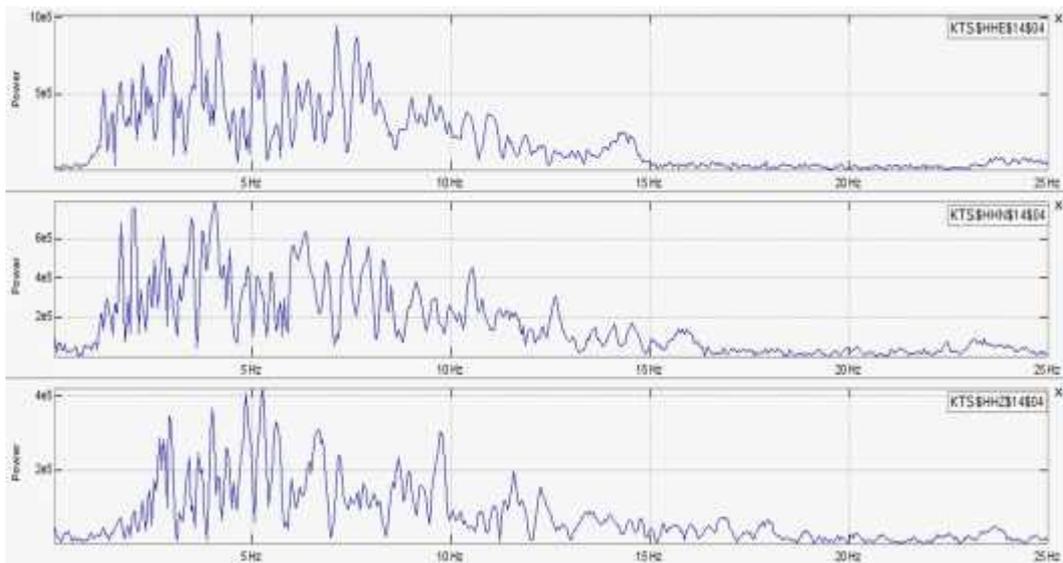
Gambar 3.4 *Picking waveform* 3 komponen gempa vulkanik-dalam pada tanggal 9 September 2015 pada jam 10:46:08.180 UTC yang terekam di stasiun KTS



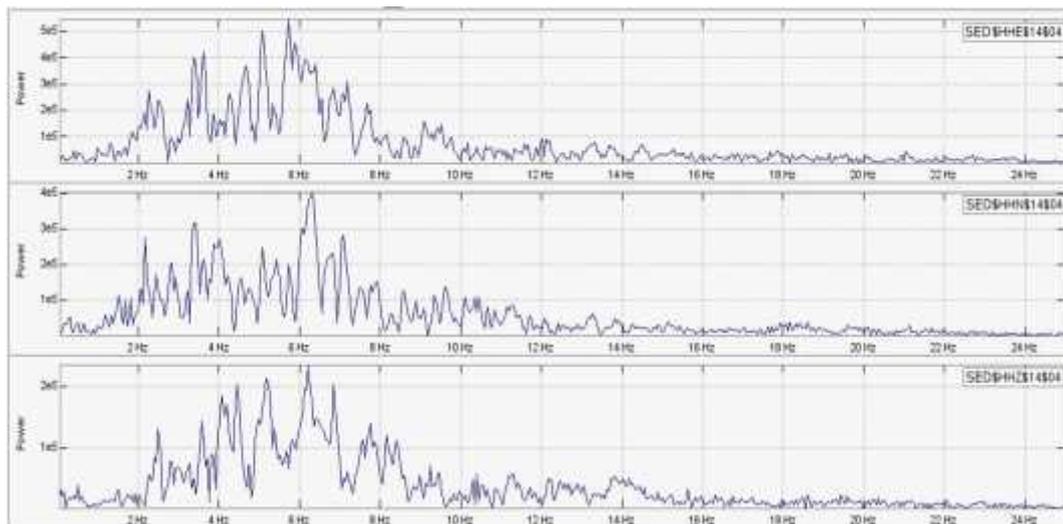
Gambar 3.5 *Picking waveform* 3 komponen gempa tektonik lokal pada tanggal 5 September 2015 pada jam 09:11:41.863 UTC yang terekam di stasiun SED

3.2.1.2 Koreksi $t_P - t_S$

Koreksi $t_P - t_S$ dilakukan dengan menggunakan FFT yaitu dengan mengubah *waveform* domain waktu menjadi domain frekuensi sehingga dapat diketahui nilai frekuensi maksimum dari gelombang yang digunakan. Gambar 3.6 dan gambar 3.7 adalah contoh dari FFT dari gempa vulkanik-dalam dan tektonik lokal yang terjadi di sistem hidrotermal Kawasan Gunung Papandayan.



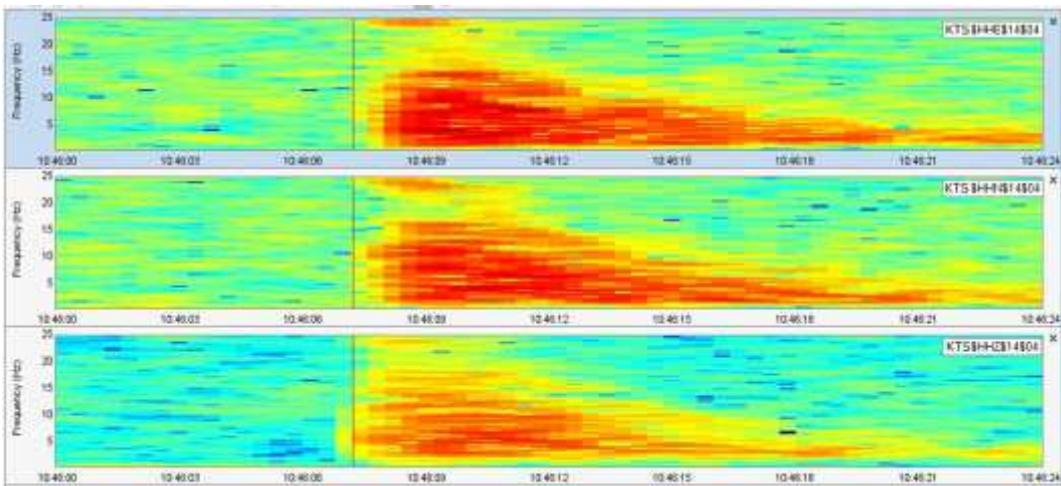
Gambar 3.6 FFT *waveform* 3 komponen gempa vulkanik-dalam pada tanggal 9 September 2015 pada jam 10:46:08.180 UTC yang terekam di stasiun KTS



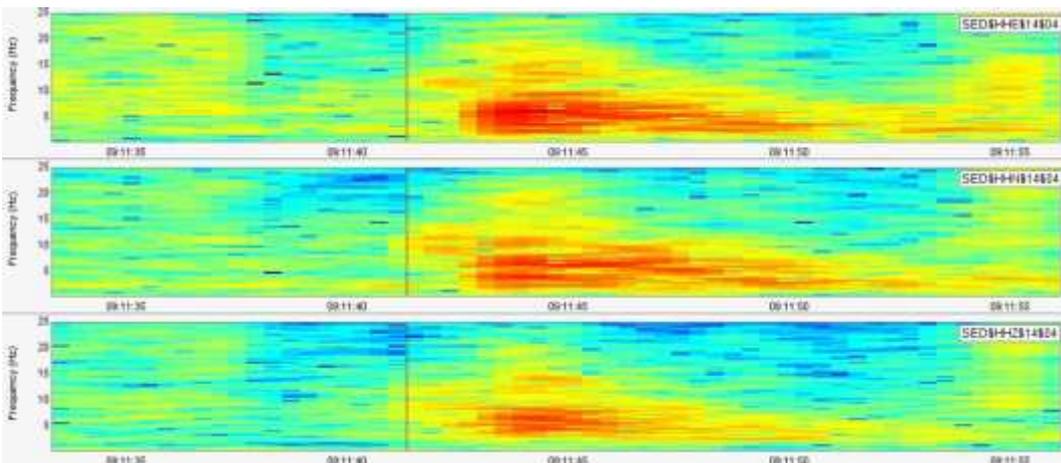
Gambar 3.7 FFT *waveform* 3 komponen gempa tektonik lokal pada tanggal 5 September 2015 pada jam 09:11:41.863 UTC yang terekam di stasiun SED

3.2.1.3 Analisis Spektra Gelombang P dan S

Setelah dilakukan koreksi $t_P - t_S$ langkah selanjutnya yaitu melakukan analisis spektra gelombang P dan S sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 3.8 untuk gempa vulkanik-dalam Gunung Papandayan dan gambar 3.9 untuk gempa tektonik lokal Gunung Papandayan. Analisis spektra dilakukan untuk mempermudah menentukan waktu tiba gelombang P dan S dan memperkirakan kenaikan mula-mula frekuensi yangmana dalam hal ini ditunjukkan oleh perubahan warna dari biru ke merah.



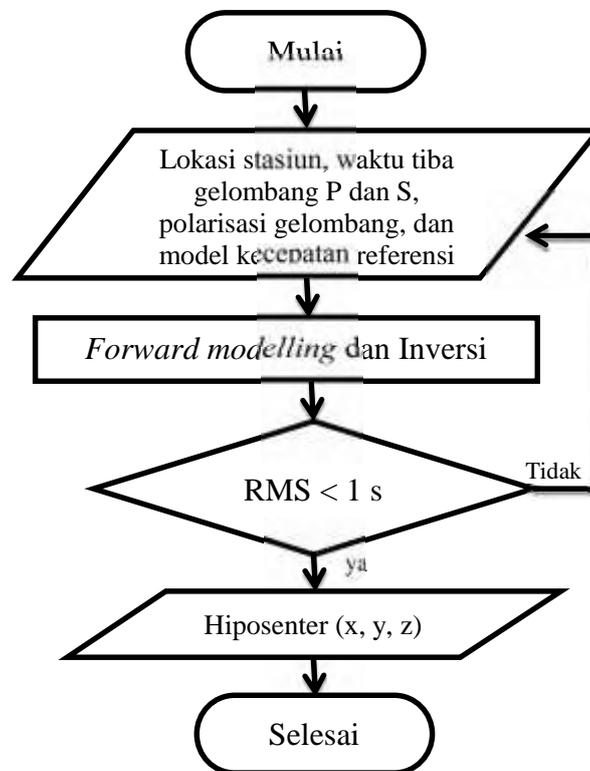
Gambar 3.8 Spektra *waveform* 3 komponen gempa vulkanik-dalam pada tanggal 9 September 2015 pada jam 10:46:08.180 UTC yang terekam di stasiun KTS



Gambar 3.9 Spektra *waveform* 3 komponen gempa tektonik lokal pada tanggal 5 September 2015 pada jam 09:11:41.863 UTC yang terekam di stasiun SED

3.2.2 Penentuan Hiposenter Awal dengan Menggunakan GAD

Di bawah ini adalah diagram alir penentuan hiposenter gempa dengan metode GAD:

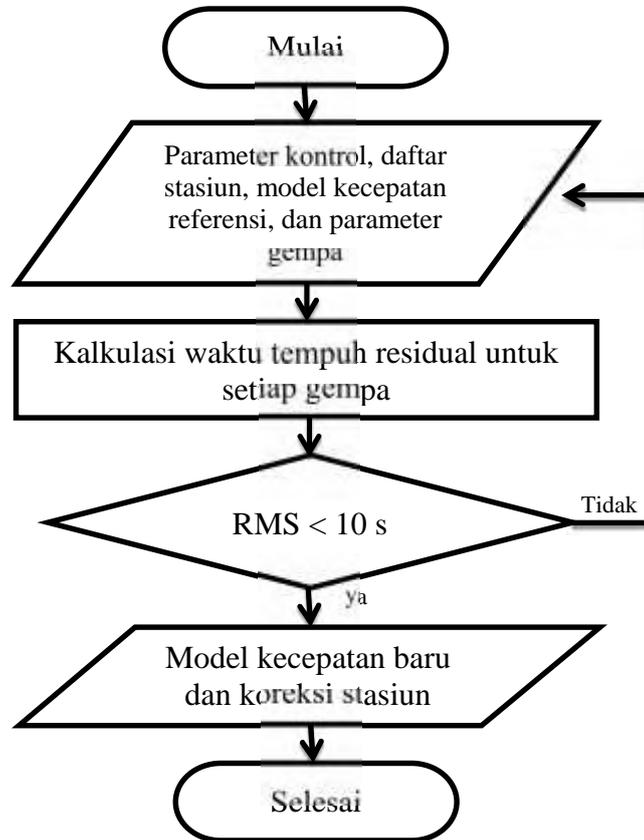


Gambar 3.10 Diagram alir penentuan hiposenter dengan metode GAD

Tahap pertama yang dilakukan dalam penentuan hiposenter dengan menggunakan GAD yaitu menyiapkan *file input* yang terdiri dari *stasiun.dat* berisi lokasi stasiun penelitian dalam koordinat XYZ, *arrival.dat* yang berisi waktu tiba gelombang P dan S serta polarisasi gelombang, dan *velocity.dat* yang berisi model kecepatan bumi dari hasil penelitian Kristianto (2005). Setelah itu *software* GAD melakukan *forward modelling* dan inversi dengan menghitung selisih antara waktu pengamatan dan waktu perhitungan seperti pada persamaan 2.6 sehingga akan didapatkan nilai keluaran dari perhitungan berupa x , y , z , dan T yang berada di dalam *file result.dat*. Faktor yang mempengaruhi tingkat kesalahan (RMS) dalam menentukan hiposenter dengan menggunakan GAD adalah ketepatan *picking* gelombang P dan S. Oleh karena itu, pada penelitian ini nilai RMS dibatasi < 1 s supaya diperoleh hasil yang lebih akurat dan apabila nilai $RMS > 1$ s, maka akan dilakukan iterasi.

3.2.3 Pembaruan Model Kecepatan 1D Menggunakan VELEST

Berikut adalah diagram alir pembaruan model kecepatan bumi 1 D dengan menggunakan VELEST 3.1.

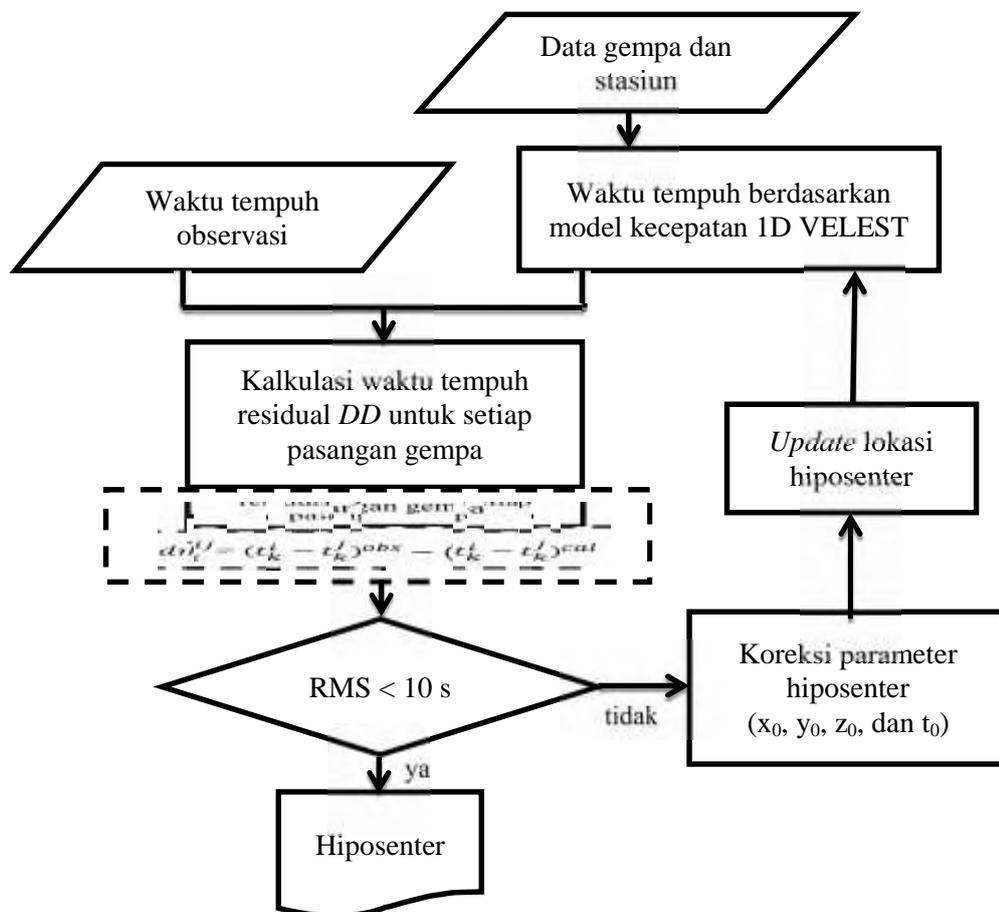


Gambar 3.11 Diagram alir pembaruan model kecepatan bumi 1D

Pembaruan model kecepatan bumi 1D dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* VELEST 3.1. Berdasarkan gambar Tahap pertama yang dilakukan adalah mempersiapkan 4 *file input* yaitu *.*cmn* yang berisi parameter kontrol, *.*sta* yang berisi informasi stasiun-stasiun perekam gempa, *.*mod* yang berisi model kecepatan awal dari hasil penelitian Kristianto (2005), dan *.*cnv* yang berisi parameter gempa (waktu tiba gelombang P dan S, koordinat hiposenter, kedalaman, dan magnitude). Tahap selanjutnya yaitu melakukan kalkulasi waktu tempuh residual pada masing-masing gempa dengan menggunakan persamaan 2.5. Setelah mendapatkan nilai residual, selanjutnya dilakukan *forward modelling* pada nilai tersebut untuk mendapatkan nilai t_{cal} baru. Kemudian nilai t_{cal} baru tersebut dibandingkan misfitnya dengan t_{cal} yang

sebelumnya telah didapat. Jika dalam satu iterasi tersebut masih didapatkan nilai RMS yang besar, maka perlu dilakukan iterasi kembali sehingga akan diperoleh nilai RMS yang lebih kecil dan mendekati nol. Pada penelitian ini nilai RMS dibatasi < 10 s supaya diperoleh hasil yang lebih akurat. Hasil *output* VELEST yaitu selain didapatkan pembaruan model kecepatan juga diperoleh koreksi stasiun.

3.2.4 Relokasi Hiposenter dengan *hypoDD*



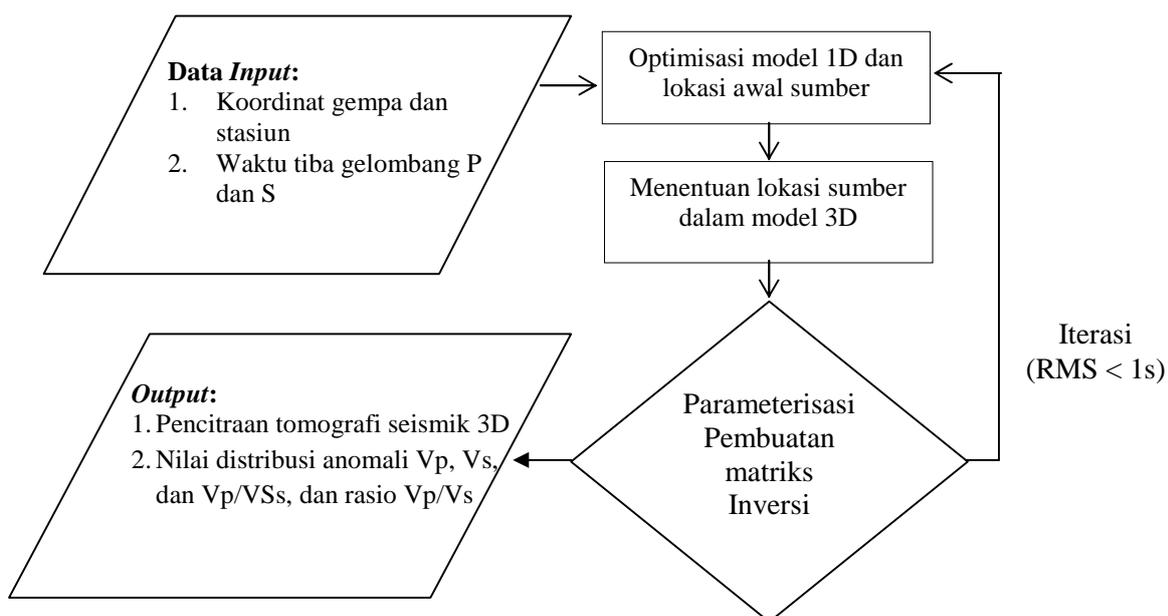
Gambar 3.12 Diagram alir algoritma *hypoDD*

Untuk memperoleh lokasi hiposenter yang akurat, maka dilakukan relokasi hiposenter dengan menggunakan *software* HypoDD. Adapun diagram alir algoritma relokasi hiposenter dengan menggunakan *hypoDD* dapat dilihat pada gambar 3.12. Langkah pertama yang dilakukan yaitu menyiapkan dua *file input* yaitu *phase.dat* dan *sta.dat*. *File phase.dat* merupakan *input file* yang berisi data

gempa berupa *origine time, latitude, longitude, depth*, dan magnitude. Sedangkan stat.dat berisi informasi mengenai stasiun perekam gempa meliputi nama stasiun dan koordinat stasiun. Selanjutnya dilakukan perhitungan waktu tempuh residual relatif antara hiposenter gempa yang saling berdekatan dalam satu *cluster* dengan menggunakan persamaan 2.8. Dalam perhitungan relokasi hiposenter pada studi ini, seluruh gempa dianggap berada pada satu *cluster*. *Ray tracing* untuk perhitungan waktu tempuh *hypoDD* menggunakan prinsip *pseudo-bending*, di mana setiap *raypath* dugaan selalu mencapai stasiun, walaupun belum tentu sesuai dengan Hukum Snellius) (Madrinovella, Widiyantoro, & Meilano, 2011). *Output* yang diperoleh yaitu hiposenter akhir yang sudah direlokasi yang terdapat pada *file hypoDD.reloc*. Pada penelitian ini supaya diperoleh nilai yang akurat, maka dilakukan iterasi sehingga diperoleh $RMS < 10$ s. Apabila nilai $RMS > 10$ s, maka dilakukan koreksi terhadap parameter gempa kemudian diulangi kembali tahapan-tahapan dalam melakukan relokasi hiposenter.

3.2.5 Inversi Tomografi Seismik 3D

Proses inversi tomografi pada penelitian ini dibantu dengan menggunakan *software* LOTOS 12. Secara umum, diagram alir algoritma LOTOS ditunjukkan pada gambar 3.13.



ambar 3.13 Prinsip kerja LOTOS (dimodifikasi dari Koulakov, 2009)

Secara rinci, prinsip kerja LOTOS diuraikan sebagai berikut:

1. Persiapan File Data Input

Pada tahapan ini, disiapkan *file* data yang nantinya akan dijadikan *input* pada *software* LOTOS 12. Pada *software* LOTOS 12 terdapat *file inidata* yang di dalamnya berisi identitas *file rays* dan *stat_ft*. Pada *file rays* berisi hiposenter *event* beserta waktu tempuh dari setiap stasiun. Sedangkan pada *file stat_ft* berisi identitas stasiun berupa *latitude*, *longitude*, dan kedalamannya.

2. Optimasi Model 1D dan Lokasi Awal Sumber

Beberapa langkah untuk mendapatkan model 1D optimum antara lain pemilihan data untuk optimasi. Pada penelitian ini data yang digunakan untuk inversi tomografi adalah data gempa VA dan TL yang sudah direlokasi dengan menggunakan *hypoDD* dan dipilih dengan jumlah stasiun pencatat terbanyak untuk tiap interval kedalaman. Kemudian mengkalkulasi waktu tiba gelombang dengan menetapkan model kecepatan 1D yang didapat sebelumnya dengan menggunakan *software* VELEST sebagai informasi awal.

3. Lokasi Sumber dalam Model 3D

Tahap selanjutnya yaitu menentukan lokasi dalam model 3D dengan menggunakan algoritma *ray tracing* berdasarkan prinsip Fermat atau yang disebut sebagai *bending tracing* (Um & Thurber, 1987) dengan minimalisasi waktu tempuh gelombang yang diperoleh.

4. Parameterisasi Pembuatan Matriks Inversi

Metode parameterisasi menggunakan *nodes* dan algoritma telah dilakukan oleh Koulakov (2009). Jarak antara *nodes* diusahakan sekecil mungkin di dalam area dengan densitas sinar yang tinggi. Selanjutnya dilakukan inversi untuk matriks secara keseluruhan akan didapatkan dengan menggunakan iterasi LSQR (Paige & Saunders, 1983). Pada penelitian ini dilakukan iterasi hingga mendapatkan $RMS < 1$ s.

5. Output Tomografi Seismik

Hasil yang diperoleh dari inversi tomografi seismik adalah model pencitraan tomografi seismik 3D dan nilai distribusi anomali V_p , V_s , dan Poisson's rasio V_p/V_s .

3.2.6 Analisis dan Interpretasi Data

Pada tahap ini dilakukan analisis dan interpretasi data hasil pengolahan data dengan menggunakan *software* GAD, VELEST, hypoDD, dan LOTOS. Kemudian hasil tomografi seismik dibandingkan dengan data geologi kawasan Gunung Papandayan dan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Kristianto (2005) untuk mendapatkan kesesuaian data dari hasil penelitian.

3.2.7 Model Pencitraan tomografi Seismik 3D dan Nilai Distribusi Anomali V_p , V_s , dan Poisson's Rasio V_p/V_s

Output dari penelitian ini adalah model pencitraan tomografi seismik 3D dan nilai distribusi anomali V_p , V_s , dan Poisson's rasio V_p/V_s pada sistem hidrotermal yang ada di kawasan Gunung Papandayan.

BAB 4

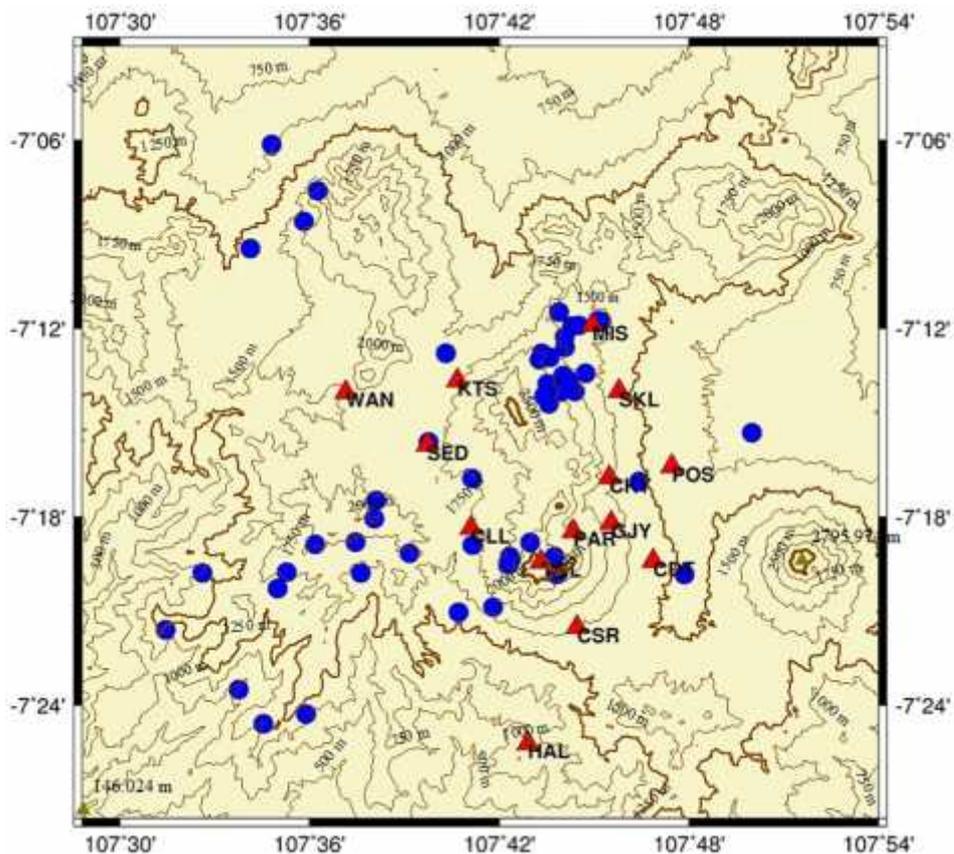
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hiposenter Gempa dari GAD

Pada penelitian ini, data gempa mikro yang digunakan terdiri dari gempa VA sebanyak 17 *event* dan gempa TL sebanyak 36 *event*. Pemilihan gempa VA dan TL dilakukan supaya dalam analisis tomografi dapat mencakup sistem hidrotermal dan bisa mengetahui apakah terdapat hubungan struktur geologi antara Gunung Papandayang terhadap kawah Darajat maupun kawah Wayang Windu yang merupakan area prospek geothermal.

Berdasarkan hasil *picking* gelombang P dan S diketahui bahwa selisih waktu tiba gelombang P dan S untuk gempa VA berkisar antara 0,2 – 3,5 detik dengan rentang frekuensi antara 4 – 7 Hz. Sedangkan selisih waktu tiba gelombang P dan S untuk gempa TL berada pada rentang 0,5 – 10,5 detik dengan frekuensi antara 5 – 16 Hz. Adanya perbedaan selisih waktu tiba gelombang P dan S antara gempa VA dan TL dikarenakan oleh perbedaan jarak antara lokasi *centroid* gempa terhadap stasiun. Sedangkan perbedaan frekuensi disebabkan karena adanya perbedaan energi yang dihasilkan oleh masing-masing gempa. Nilai selisih gelombang P dan S kemudian digunakan untuk menentukan distribusi hiposenter dengan menggunakan *software* GAD. Dari penelitian ini didapatkan data hiposenter dengan kualitas baik yang memiliki $RMS < 1$ s (lampiran 2).

Distribusi penampang episenter gempa VA dan TL (Gambar 4.1) menunjukkan bahwa gempa lebih terkonsentrasi di Barat Daya stasiun MIS yang berada di sekitar panas bumi Darajat dan di Barat stasiun SKL yang terletak di Sukalaksana. Sedangkan gempa-gempa yang lain menyebar dari arah Barat sampai ke Timur menuju Kawah Gunung Papandayan. Selain itu juga terdapat empat gempa yang *tercluster* di sebelah Barat Gunung Malabar yang berada di utara stasiun WAN.



Gambar 4.1 Distribusi episenter gempa Gunung Papandayan sebelum relokasi. Lingkaran biru menunjukkan distribusi gempa dari metode GAD dan segitiga merah merupakan stasiun seismik perekam gempa. Gempa lebih terkonsentrasi di sebelah Barat stasiun MIS dan SKL. Sedangkan gempa yang lainnya menyebar dari Barat sampai menuju puncak Kawah Gunung Papandayan.

4.2 Pembaruan Model Kecepatan Bumi dengan VELEST

Hasil hiposenter yang diperoleh dengan menggunakan metode GAD kemudian digunakan untuk untuk mendapatkan model kecepatan bumi 1D yang baru untuk mengatasi ketidak-cocokan model kecepatan dari hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Kristianto (2005) sehingga diperoleh model kecepatan yang lebih optimal terlebih penelitian yang di lakukan oleh Kristianto (2005) hanya berada di sekitar kawah Papandayan dengan menggunakan gempa vulkanik-dalam dan vulkanik dangkal. Sedangkan pada penelitian ini mencakup area yang lebih luas.

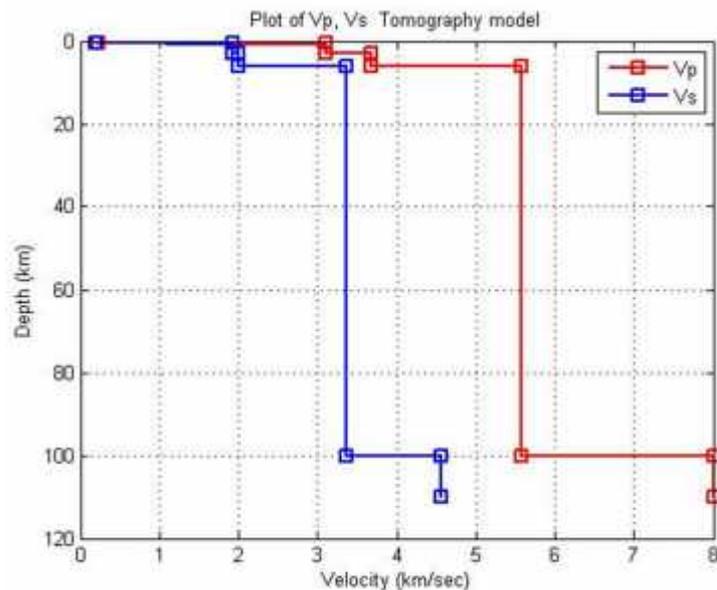
Pada penelitian ini untuk menghasilkan model kecepatan baru dilakukan proses inversi simultan sampai 12 iterasi sehingga didapatkan data hiposenter

dengan kualitas baik ($RMS < 10$ s). Namun, pada penelitian ini data hiposenter dari hasil VELEST tidak digunakan sebagai data *input* untuk inversi tomografi seismik karena untuk inversi tomografi seismik digunakan hiposenter dari hasil relokasi hypoDD. Hal ini dikarenakan hasil gempa setelah direlokasi dengan hypoDD lebih *tercluster* dengan baik. Adapun Model kecepatan dari VELEST ditunjukkan pada tabel 4.1 dan gambar 4.2.

Dari hasil model kecepatan VELEST dapat diketahui adanya perbedaan dengan model kecepatan Kristianto (2005) pada lapisan atas dari kedalaman 0, 5 – 6 km. Sedangkan pada lapisan paling bawah dengan kedalaman 100 km memiliki nilai yang sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan di kedalaman 100 km melewati medium dengan kandungan material yang sama.

Tabel 4.1 Model kecepatan hasil dari VELEST

Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0,5	0.23	0.20
0,7	3.11	1.92
3	3.67	2.00
6	5.57	3.36
100	8.00	4.57



Gambar 4.2 Model kecepatan 1D hasil VELEST terhadap fungsi kedalaman. Garis biru merupakan model kecepatan gelombang S (V_s) dan garis merah adalah model kecepatan gelombang P (V_p)

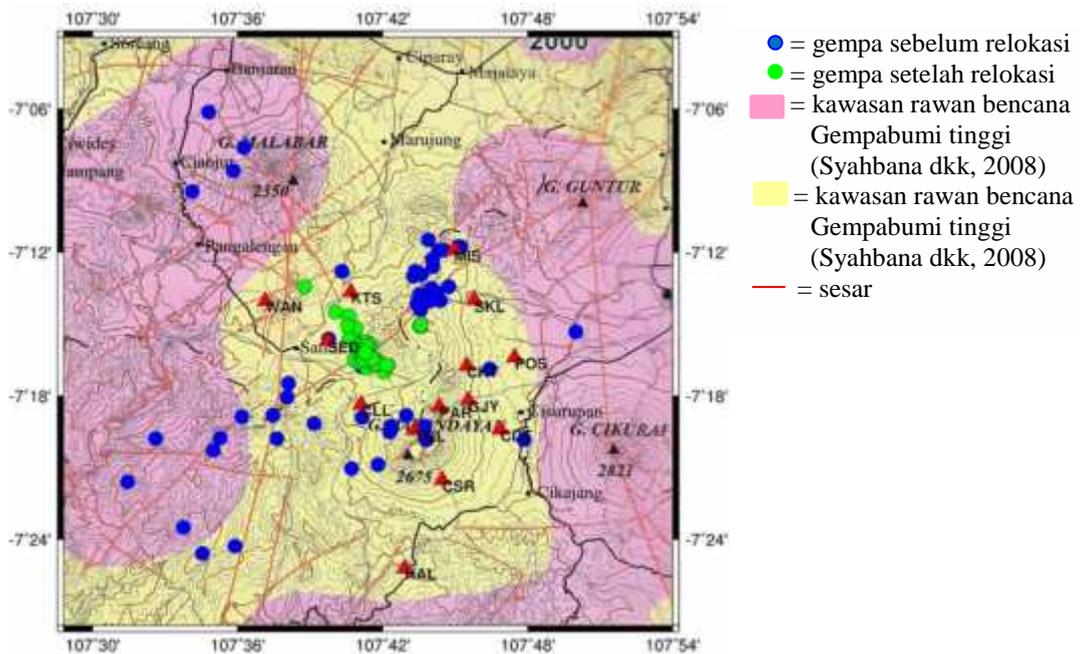
Kelebihan dari metode VELEST yaitu adanya koreksi pada masing-masing stasiun seismik yang merekam gempa di kawasan Gunung Papandayan. Pada penelitian ini, stasiun TGL dipilih sebagai stasiun referensi karena letaknya berada di kawah Tegal Alun yang merupakan salah satu dari kawah besar yang dimiliki oleh Gunung Papandayan. Koreksi stasiun relatif terhadap stasiun referensi (TGL) yang *disetting* koreksi stasiunnya bernilai 0,00 detik. Artinya, kecepatan rata-rata dari gelombang P dan S pada tersebut bernilai sama di stasiun referensi ini. Sedangkan kecepatan tersebut harus dikoreksi untuk 13 stasiun yang lain. Hasil koreksi stasiun penelitian dapat dilihat pada tabel 4.2. Dari hasil koreksi stasiun diketahui bahwa stasiun SKL dan HAL memiliki nilai koreksi negatif yang menginterpretasi bahwa medium yang ada di sekitar kedua stasiun tersebut bersifat lebih kompak dan biasanya berupa batuan padat. Sedangkan 12 stasiun seismik yang lain bernilai positif yang menunjukkan bahwa kecepatan gelombang P yang terekam di stasiun-stasiun tersebut nilainya lebih rendah dibandingkan kecepatan rata-rata. Kondisi tersebut dapat diinterpretasikan bahwa medium di sekitar 12 stasiun tersebut bersifat tidak kompak dan biasanya berupa batuan sedimen atau pasir.

Tabel 4.2 Koreksi stasiun penelitian dari VELEST

Stasiun	Koreksi stasiun
PAR	0,06
CKT	0,03
CSR	0,07
SED	0,02
MIS	0,06
CLL	0,04
KTS	0,11
WAN	0,03
SKL	-0,03
CDT	0,14
POS	0,01
GJY	0,07
HAL	-0,18
TGL	0,00

4.3 Hasil Relokasi Hiposenter dengan hypoDD

Proses yang dilakukan setelah didapatkan hiposenter awal dan model kecepatan baru yaitu relokasi hiposenter. Perbandingan hasil distribusi gempa sebelum dan sesudah relokasi dapat dilihat pada gambar 4.3.

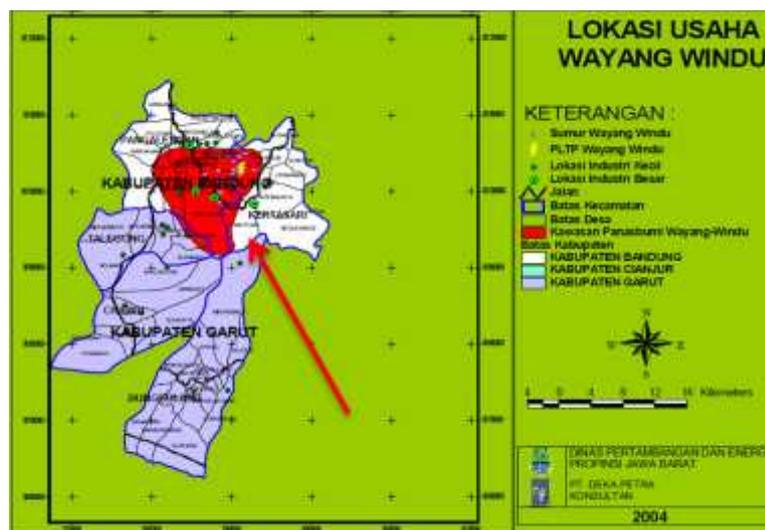


Gambar 4.3 Peta episenter gempa sebelum dan sesudah relokasi yang *doverlay* dengan peta geologi kawasan rawan bencana gempabumi Jawa bagian Barat. Gempa sebelum direlokasi mayoritas berada di sesar-sesar yang ada di sekitar kawasan Gunung Papandayan. Gempa setelah direlokasi lebih terfokus di desa Santosa.

Pada penelitian ini penentuan hiposenter gempabumi sebelum dilakukan relokasi digunakan metode *Geiger Adaptive Dumping* (GAD), dimana hiposenter gempabumi yang diperoleh dengan metode tersebut masih mengandung kesalahan akibat dari struktur kecepatan yang tidak termodelkan. Oleh karena itu, perlu dilakukan relokasi hiposenter dengan menggunakan metode hypoDD sehingga efek terkait struktur kecepatan yang tidak termodelkan dapat dihilangkan sehingga dapat meningkatkan akurasi posisi hiposenter. Selain itu, nilai error yang diperoleh dari relokasi hypoDD pada penelitian ini juga relatif kecil yaitu 9,6 % dengan nilai RMS < 10 s (lampiran 4).

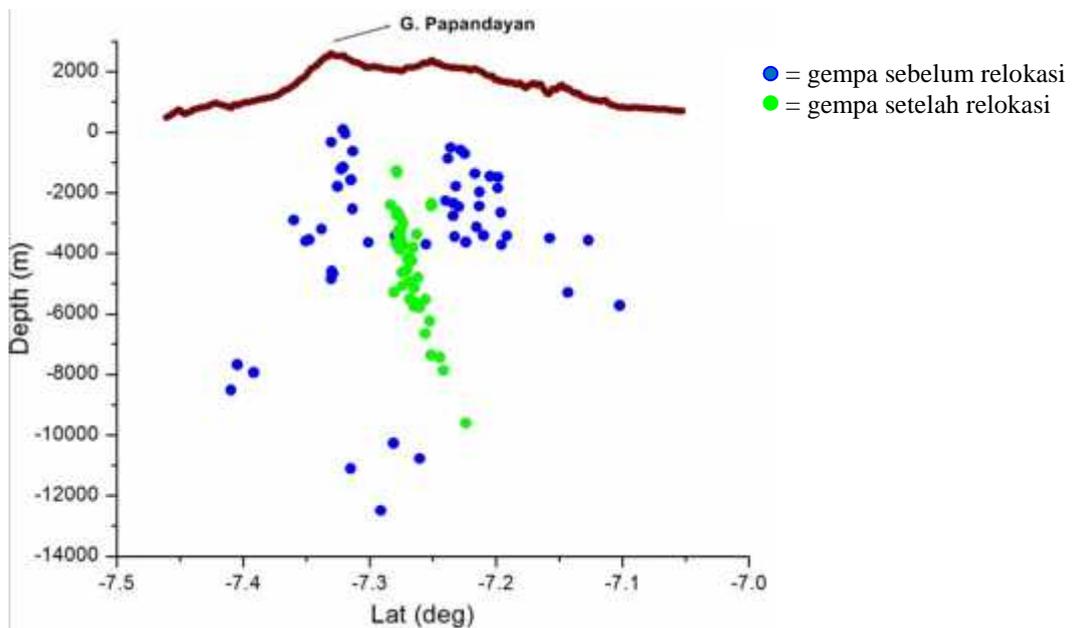
Dari gambar 4.3 menunjukkan adanya perubahan dari distribusi hiposenter gempa yang acak (gempa sebelum relokasi) menjadi sebaran yang fokus (gempa

sesudah relokasi). Gempa sebelum relokasi (lingkaran warna biru) sebagian ada yang lebih terkonsentrasi di sekitar sesar yang berada di Utara hingga Barat Daya dari stasiun MIS dan sesar yang memanjang dari Gunung Guntur hingga ke arah Barat Daya desa Santosa terlebih di Barat Gunung Papandayan terdapat pertemuan dua sesar yaitu sesar yang memanjang dari utara hingga selatan Gunung Malabar dan sesar yang mengarah ke Gunung Guntur. Selain itu gempa juga membentuk *horizontal crack* mulai dari Barat hingga pusat kawah Papandayan dan juga ada empat gempa yang berada di sekitar Gunung Malabar. Hal tersebut menunjukkan bahwa sesar-sesar yang berada pada sistem hidrotermal kawasan Gunung Papandayan mempunyai tingkat aktifitas kegempaan yang tinggi. Sehingga perlu sekali dilakukan monitoring tingkat kegempaan gunung api. Sedangkan dari hasil relokasi dengan menggunakan hypoDD ditunjukkan oleh lingkaran warna hijau yang memperlihatkan bahwa gempa tercluster di desa Santosa yang terletak di Kecamatan Kertasari Kabupaten Bandung. Hal ini mengindikasikan bahwa di desa Santosa terdapat patahan tempat migrasi fluida panas bumi bawah permukaan. Hal tersebut juga didukung oleh data dari Dinas Pertambangan dan Energi Provinsi Jawa Barat (2006) bahwa desa Santosa merupakan kawasan panas bumi dengan kondisi jalan yang masih sangat buruk serta masih memiliki keterkaitan dengan pengembangan usaha lokal kawasan Wayang Windu (Gambar 4.4).

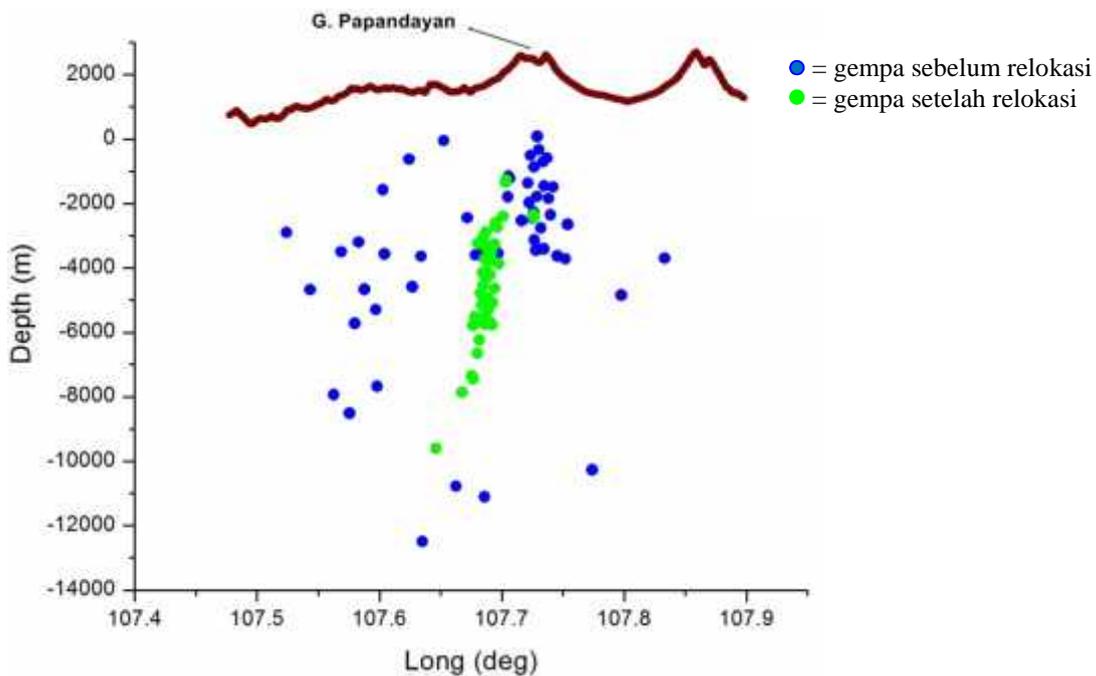


Gambar 4.4 Lokasi usaha Wayang Windu. Desa Santosa ditunjukkan oleh arah panah (Dinas Pertambangan dan Energi Provinsi Jawa Barat, 2006)

Distribusi penampang Utara-Selatan dan Barat-Timur dari hiposenter gempa sebelum dan sesudah relokasi (gambar 4.5 dan 4.6) menunjukkan bahwa setelah dilakukan relokasi gempa lebih terakumulasi dan jarak antar hiposenter saling berdekatan satu sama lain. Setelah direlokasi dengan menggunakan *software* hypoDD gempa lebih dominan berada pada kedalaman antara 3,859 km sampai 12,205 km terhadap puncak Gunung Papandayan dan semakin dalam gempa lebih mengarah ke Barat mendekati stasiun WAN yang terletak di Wanasuka dan pada gambar 4.4 Wanasuka termasuk kawasan panasbumi Wayang Windu (berada di dalam warna merah). Sedangkan gempa sebelum direlokasi lebih menyebar dan mayoritas berada pada kedalaman 2,6 km sampai 14,6 km terhadap puncak Gunung Papandayan. Hasil dari relokasi hiposenter dengan menggunakan *hypoDD* kemudian digunakan dalam inversi tomografi seismik 3D untuk mengidentifikasi zona *saturated fluid*.



Gambar 4.5 Hiposenter gempa penampang Utara-Selatan. Gempa sebelum relokasi mayoritas berada di kedalaman antara 0 km sampai 12 km terhadap MSL. Sedangkan gempa setelah relokasi tercluster di kedalaman antara 1,259 km sampai 9,605 km terhadap MSL dan gempa semakin kedaman mengarah ke Utara dari Gunung Papandayan (MSL = 0 km terhadap titik referensi 2665 m)

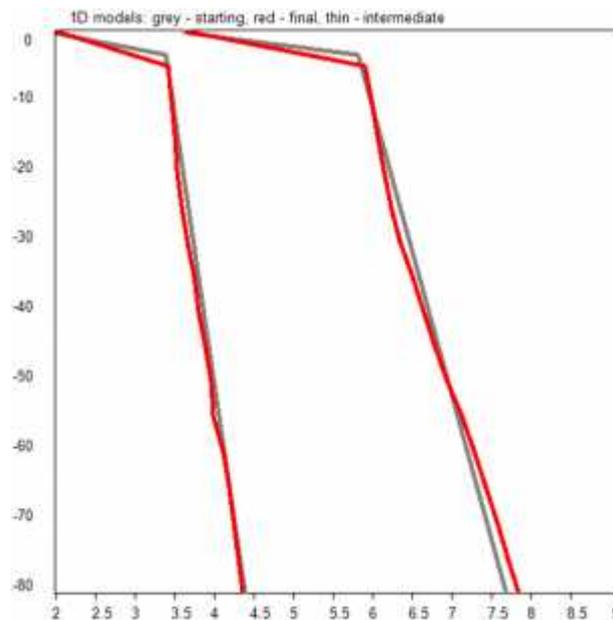


Gambar 4.6 Hiposenter gempa penampang Barat-Timur. Gempa sebelum relokasi mayoritas berada di kedalaman antara 0 km sampai 12 km terhadap MSL. Sedangkan gempa setelah relokasi tercluster di kedalaman antara 1,259 km sampai 9,605 km terhadap MSL dan gempa semakin kedaman mengarah ke Barat dari Gunung Papandayan (MSL = 0 km terhadap titik referensi 2665 m)

4.4 Hasil Inversi Tomografi

4.4.1 Model Kecepatan Bumi 1D

Pada penelitian ini, untuk mendapatkan hasil tomografi seismik dilakukan iterasi sebanyak 3 kali sehingga diperoleh RMS yaitu 0,1507981 s untuk gelombang P dan 0,2063601 s untuk gelombang S. *Event* yang berhasil diolah dengan menggunakan *software* LOTOS ada 53 *event* yang terdiri dari 381 gelombang P dan 381 gelombang S. Model 1D optimum sebagai hasil dari pengolahan dengan menggunakan *software* LOTOS 12 ditunjukkan pada gambar 4.7. Garis warna abu-abu merupakan hasil model kecepatan awal dari VELEST yang digunakan sebagai informasi awal. Sedangkan garis warna merah merupakan model 1D optimum dari hasil pengolahan dengan menggunakan *software* LOTOS 12.



Gambar 4.7 Model kecepatan bumi 1D. Garis berwarna abu-abu merupakan model kecepatan awal dari VELEST yang digunakan sebagai informasi awal dan garis berwarna merah merupakan model 1D optimum sebagai hasil dari pengolahan dengan menggunakan LOTOS.

4.4.2 Analisis Tomogram Kecepatan Gelombang P (V_p) dan S (V_s)

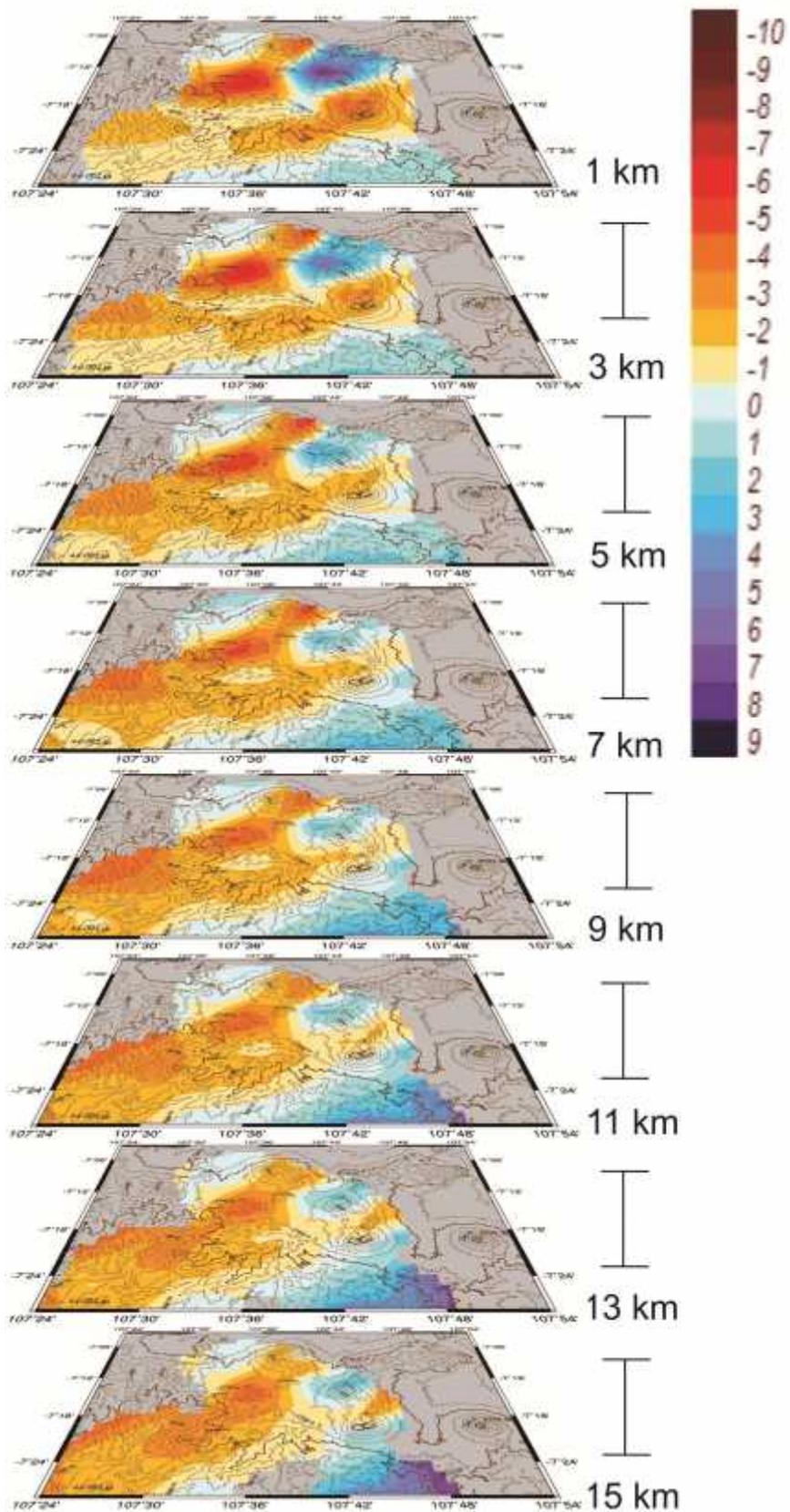
Keberadaan zona dengan temperatur tinggi pada lapisan bawah permukaan memberikan pengaruh yang bervariasi pada nilai V_p dan V_s . Pada keadaan *gas-saturated rock* baik V_p maupun V_s cenderung menurun dengan dengan penurunan nilai V_p yang cenderung lebih signifikan dibanding dengan nilai V_s sehingga rasio V_p/V_s cenderung kecil. Pada keadaan *water-saturated rock* nilai V_p dan V_s akan cenderung menurun pula. Namun pada kondisi ini, penurunan nilai V_p cenderung lebih kecil dibandingkan pada *gas-saturated rock* sehingga nilai rasio V_p/V_s cenderung tinggi. Sementara itu, pada batuan yang berasosiasi dengan *partial melting*, baik nilai V_p dan V_s akan cenderung menurun namun dengan penurunan V_s yang jauh lebih signifikan. Pada kasus ini, nilai rasio V_p/V_s cenderung akan lebih tinggi (Wang dkk, 1990).

Model pencitraan tomografi seismik dengan menggunakan LOTOS ditampilkan dalam distribusi anomali deviasi kecepatan gelombang P (V_p) dan S (V_s) dengan satuan km/s. Setelah didapatkan struktur kecepatan hasil inversi untuk gelombang P dan S, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai Poisson's rasio

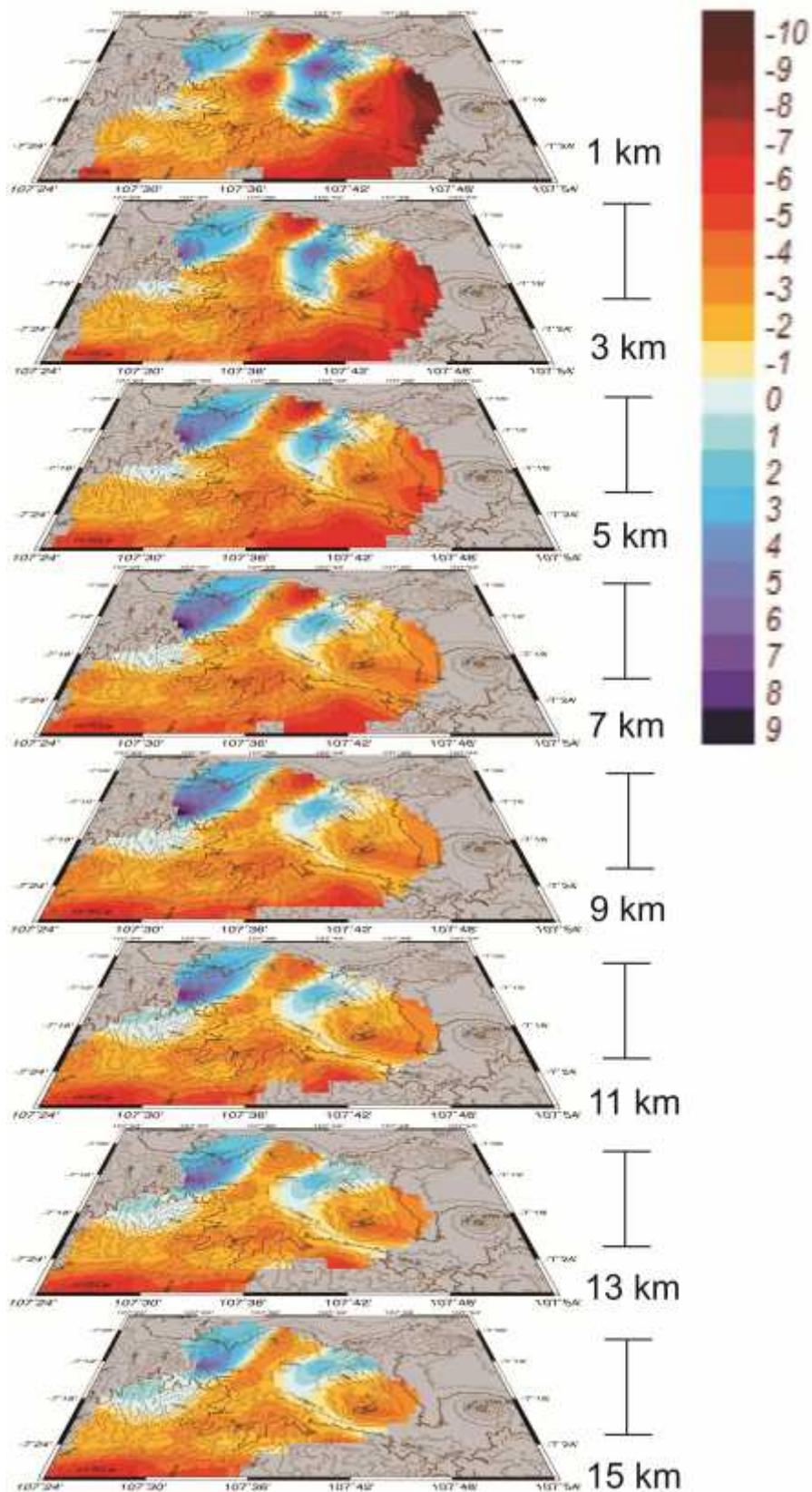
Vp/Vs yang dapat digunakan untuk interpretasi zona *saturated fluid* yang ada pada sistem hidrotermal kawasan Gunung Papandayan. Harga anomali deviasi terhadap distribusi Vp dan Vs pada penelitian ini berkisar antara -10 sampai +10. Pada bidang horizontal ditampilkan irisan pada kedalaman 1 km, 3 km, 5 km, 7 km, 9 km, 11 km, 13 km, dan 15 km terhadap MSL (MSL berada pada 0 km) sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.8 dan 4.9. Warna merah tua dengan nilai -10 mewakili anomali negatif maksimum dan warna biru tua dengan nilai +9 mewakili anomali positif maksimum. Anomali kecepatan negatif yang dimaksud di sini adalah adanya kecepatan gelombang P yang sangat rendah dan diperkirakan berasosiasi dengan keberadaan alterasi hidrotermal.

Gambar penampang horizontal dari distribusi anomali gelombang P (Gambar 4.8) menunjukkan bahwa anomali negatif dengan nilai -2 km/s sampai -6 km/s lebih dominan berada di daerah Wayang Windu. Di kawasan Gunung Papandayan anomali kecepatan negatif berkisar antara -2 km/s sampai -3 km/s. Sedangkan kecepatan anomali positif dengan nilai +1 km/s sampai +9 km/s mayoritas berada di daerah Kertasari.

Pada gambar penampang horizontal daerah distribusi anomali gelombang S (Gambar 4.9) menunjukkan bahwa anomali kecepatan negatif dengan nilai antara -1 km/s sampai -7 km/s lebih menyebar dari Gunung Malabar hingga selatan Kawasan Wayang Windu kemudian menghubungkan ke arah Barat menuju daerah sekitar Gunung Papandayan. Hal tersebut sesuai dengan geologi daerah penelitian di mana daerah yang dilalui oleh anomali kecepatan negatif merupakan daerah-daerah yang dilalui oleh patahan-patahan yang diindikasikan dapat membantu jalur migrasi fluida hidrotermal bawah permukaan. Sedangkan kecepatan anomali positif berada di daerah Kertasari sampai Barat Gunung Papandayan dengan nilai anomali antara +1 km/s sampai +8 km/s. Dari gambar 4.8 dan 4.9 dapat diketahui bahwa terdapat hubungan antara struktur geologi Gunung Papandayan terhadap kawah Wayang Windu yang merupakan area prospek geothermal. Hal tersebut juga didukung dengan hasil struktur kedalaman distribusi anomali Vp dan Vs (Gambar 4.11 dan 4.12).

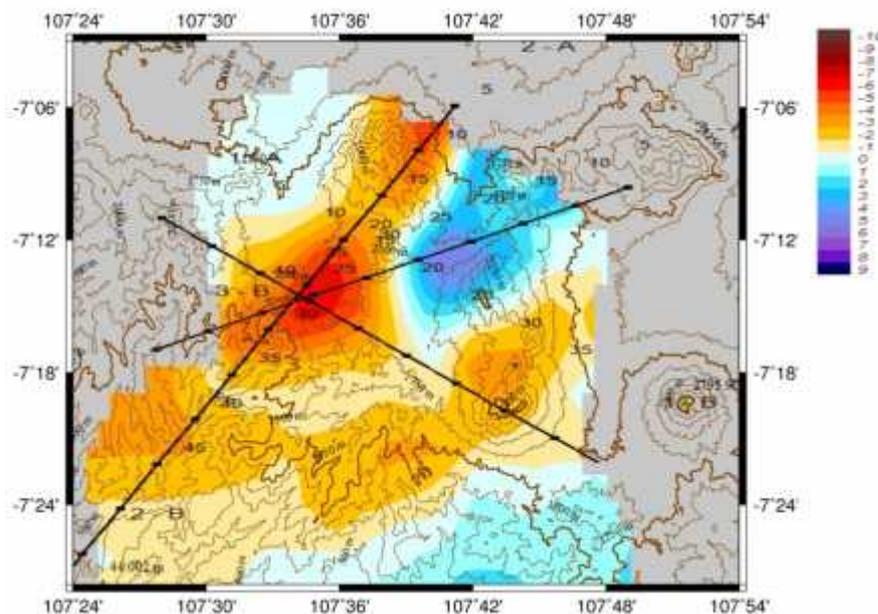


Gambar 4.8 Distribusi anomali V_p terhadap kedalaman 1 km, 3 km, 5 km, 7 km, 9 km, 11 km, 13 km, dan 15 km terhadap MSL

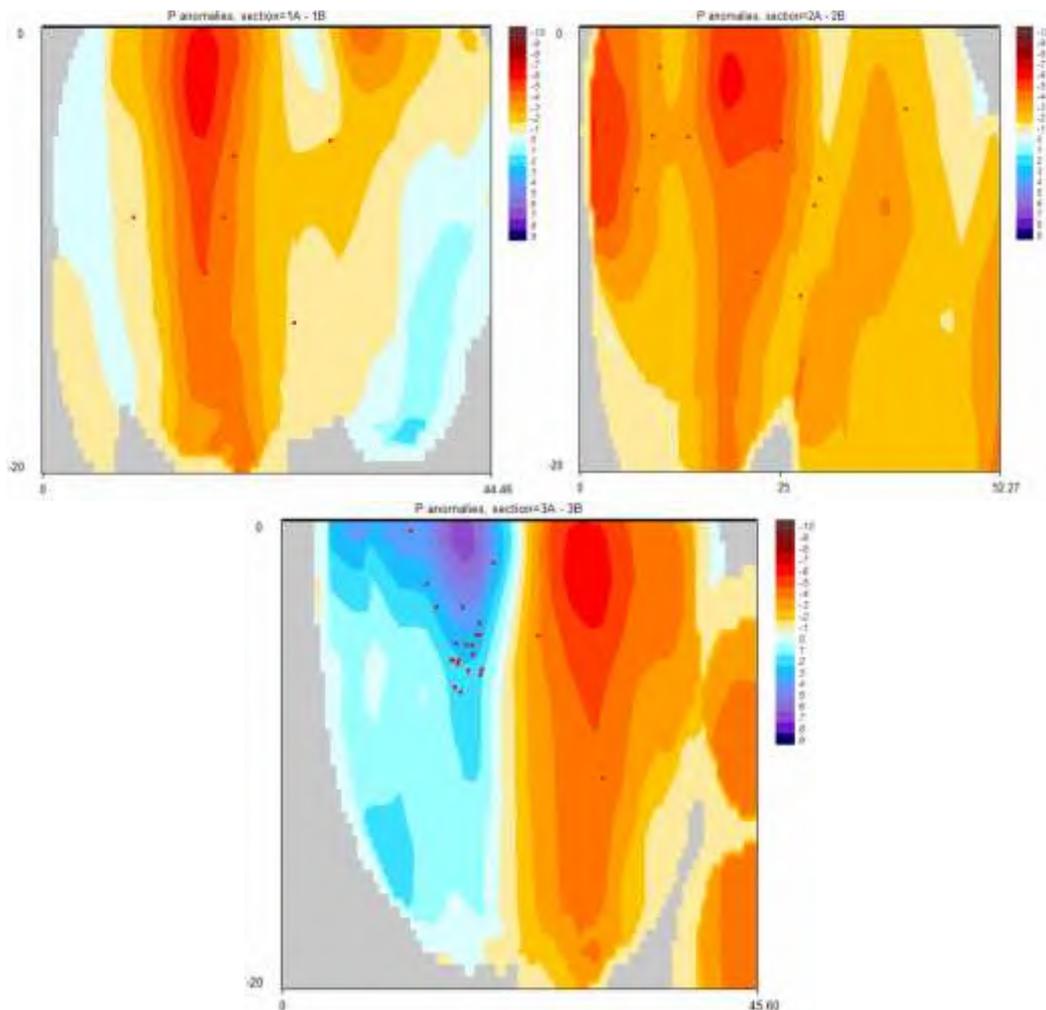


Gambar 4.9 Distribusi anomali V_p terhadap kedalaman 1 km, 3 km, 5 km, 7 km, 9 km, 11 km, 13 km, dan 15 km terhadap MSL

Gambar 4.10 merupakan garis *cross section* yang digunakan untuk mengetahui struktur kedalaman distribusi Vp, Vs, dan Poisson's ratio Vp/Vs. Ada 3 garis *cross section* yang dipilih yaitu irisan pertama terletak pada koordinat 107,500° BT dan 7,190° LS sampai 107,860° BT dan 7,370° LS, irisan kedua terletak pada koordinat antara 107,742° BT dan 7,107° LS sampai 107,420° BT dan 7,452° LS, dan irisan yang ketiga berada pada koordinat antara 107,885° BT dan 7,167° LS sampai 107,490° BT dan 7,288° LS. Garis *cross section* yang pertama menghubungkan antara daerah anomali negatif yang berada di kawasan Wayang Windu (1-A) sampai daerah anomali negatif puncak Gunung Papandayang (1-B). Garis *cross section* yang kedua dipilih karena pada sepanjang garis dari 2-A sampai 2-B terlihat adanya anomali negatif Vp dan Vs. Sedangkan garis *cross section* ketiga dipilih dari daerah anomali positif yang terletak di Kertasari (3-A) sampai daerah anomali negatif yang ada kawah Wayang Windu (3-B). Hasil distribusi kedalaman anomali Vp dan Vs ditunjukkan pada gambar 4.11 dan 4.12.



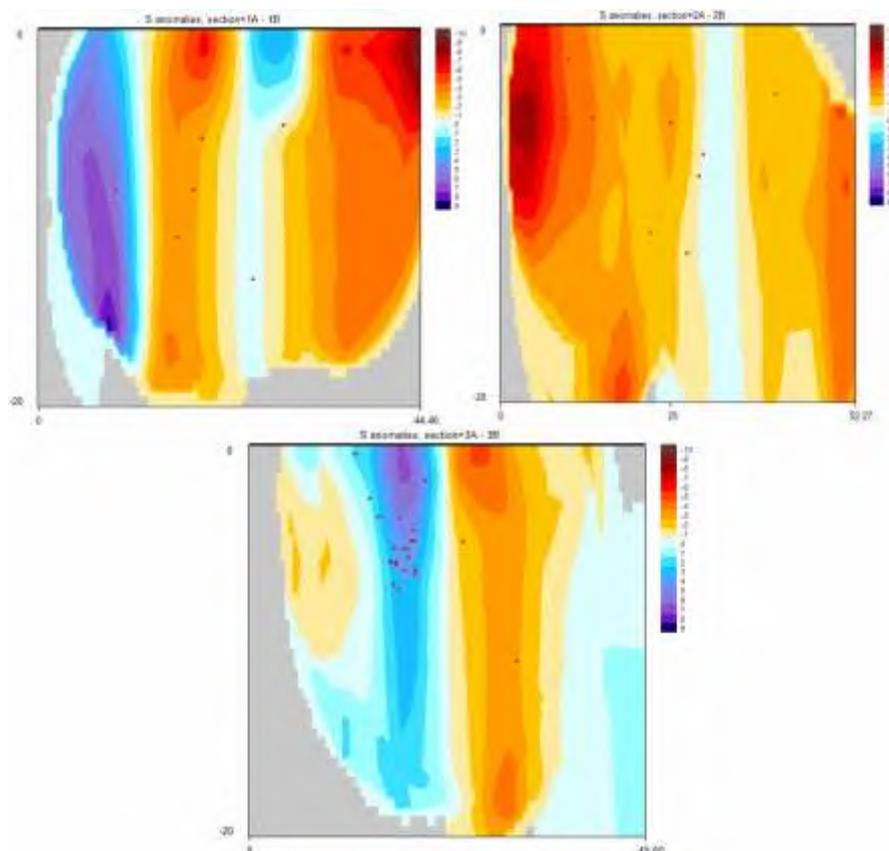
Gambar 4.10 Garis *cross section* untuk menampilkan kedalaman distribusi anomali Vp, Vs, dan Poisson's ratio Vp/Vs. *Cross section* 1-A sampai 1-B berada pada koordinat 107,500° BT dan 7,190° LS sampai 107,860° BT dan 7,370° LS, *Cross section* 2-A sampai 2-B berada pada koordinat 107,742° BT dan 7,107° LS sampai 107,420° BT dan 7,452° LS, dan *cross section* 3-A sampai 3-B berada pada koordinat 107,885° BT dan 7,167° LS sampai 107,490° BT dan 7,288° LS



Gambar 4.11 Struktur kedalaman anomali Vp dari hasil *cross section* 1A – 1B, 2A – 2B, dan 3A – 3B. Anomali negatif berwarna merah dan anomali positif berwarna biru.

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa anomali negatif gelombang P dari hasil *cross section* 1A – 1B berada di sekitar permukaan kawasan Wayang Windu hingga kedalaman 20 km dan pada kedalaman antara 5 km sampai 9 km terlihat adanya hubungan anomali kecepatan negatif menerobos sampai kedalaman 2,6 km di bawah puncak Gunung Papandayan. *Cross section* 2A – 2B memotong wilayah Wayang Windu mulai dari Timur Laut hingga Barat Daya sejauh 52,27 km dan merupakan daerah anomali negatif yang mengindikasikan adanya patahan-patahan sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal bawah permukaan dengan temperatur yang lebih tinggi dari daerah sekitarnya. Sedangkan *cross section* 3A-3B terlihat bahwa gempa vulkanik dari penelitian ini mayoritas berada di Kecamatan Kertasari yang memiliki nilai anomali positif sampai kedalaman

sekitar 17 km terhadap MSL. Berdasarkan hasil pencitraan terlihat bahwa nilai anomali negatif maksimum sebesar -5 km/s sampai -6 km/s terdapat di kawasan Wayang Windu pada kedalaman 2,6 km sampai 10,6 km terhadap puncak gunung Papandayan. Sedangkan nilai anomali positif maksimum sebesar +9 km/s sampai +3 km/s terdapat di Kertasari sampai kedalaman 10 km terhadap MSL. Hal tersebut berkaitan dengan hiposenter gempa yang mayoritas berada hingga kedalaman 9,605 km terhadap MSL dan pada penelitian ini hiposenter gempa mayoritas berada di daerah dengan anomali positif.



Gambar 4.12 Struktur kedalaman anomali Vs dari hasil *cross section* 1A – 1B, 2A – 2B, dan 3A – 3B. Anomali negatif berwarna merah dan anomali positif berwarna biru.

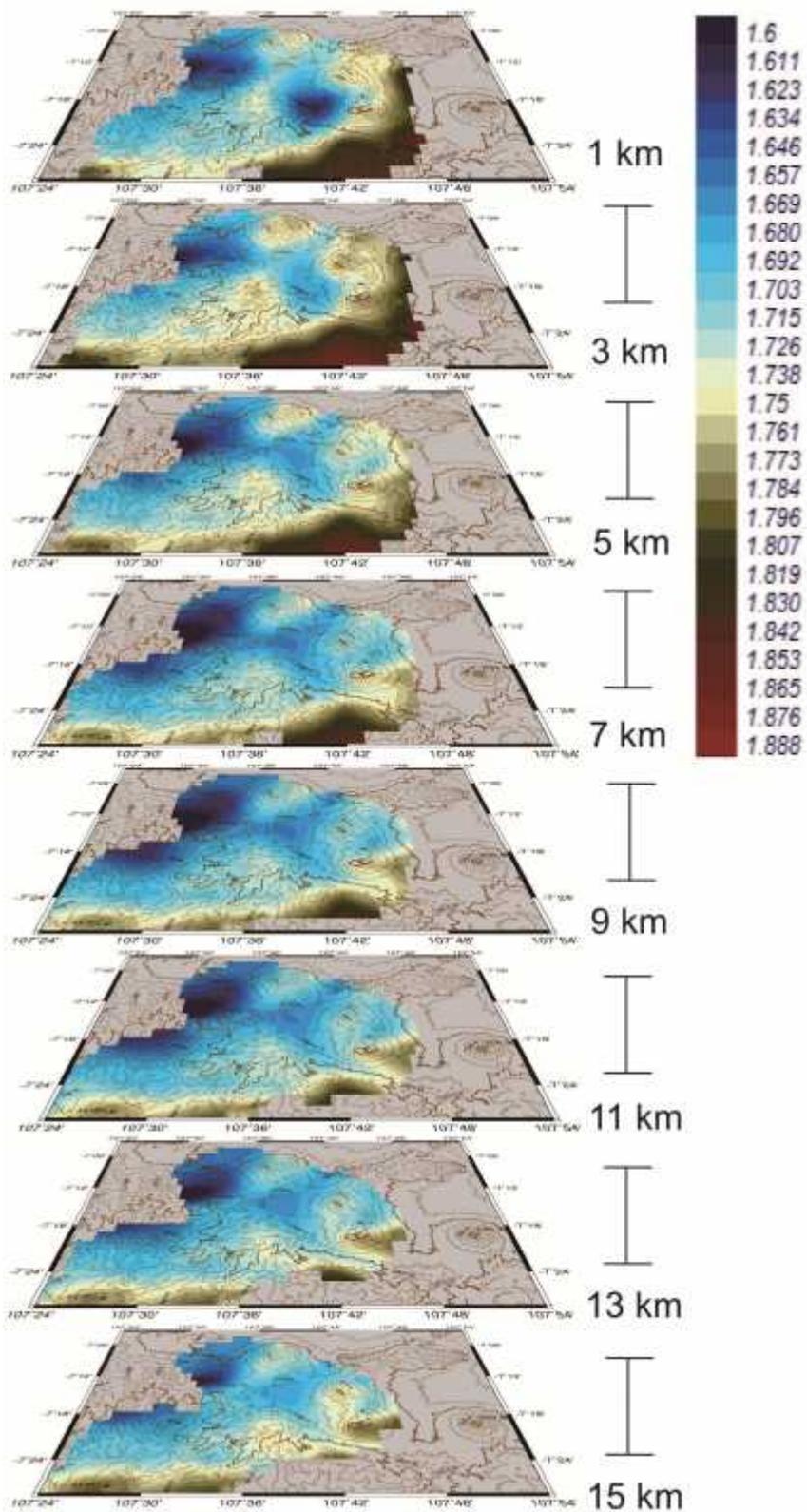
Gambar 4.12 menunjukkan distribusi kedalaman anomali Vs, di mana dari hasil *cross section* 1A -1B dapat terlihat bahwa anomali negatif berada pada permukaan Wayang Windu sampai kedalaman 20 km dan di sekitar kawah Gunung Papandayan mulai dari kedalaman 2,6 km sampai 20,6 km terhadap puncak Gunung Papandayan. Sedangkan nilai anomali positif berada di Barat

Gunung Papandayan atau selatan Kertasari dengan kedalaman hingga 18 km terhadap MSL. Hasil *cross section* 2A - 2B menunjukkan bahwa nilai anomali negatif yaitu -9 km/s sampai -6 km berada di sekitar kawah Gunung Malabar sampai kedalaman 10 km terhadap MSL dan nilai anomali negatif yang lain berada menyebar dari Kawasan Wayang Windu sampai ke arah Selatan kemudian menghubungkan ke arah Barat menuju daerah sekitar Gunung Papandayan dengan kedalaman sampai 20 km terhadap MSL. Sedangkan *cross section* 3A – 3B menunjukkan bahwa daerah Kertasari memiliki nilai positif sampai di kedalaman 18 km terhadap MSL dan di sebelah Timur Kertasari tepatnya di daerah Pangalengan terdapat anomali negatif sampai di kedalaman 20 km terhadap MSL.

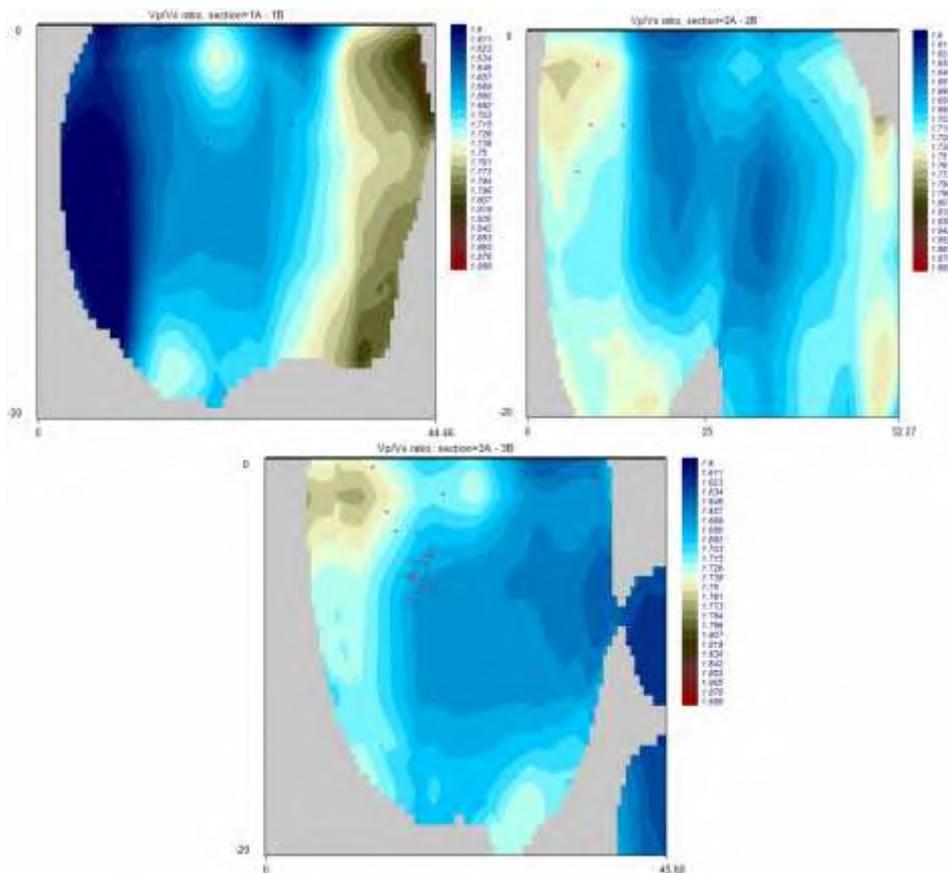
Pada penelitian ini dilakukan penjejakan sinar gelombang seismik dengan metode *pseudo bending* berdasarkan prinsip Fermat, di mana hiposenter dan stasiun penerimanya telah diketahui. Berdasarkan prinsip Fermat, sinar gelombang akan cenderung mendekati medium yang mempunyai anomali kecepatan lebih tinggi daripada kecepatan medium di sekelilingnya. Sedangkan pada medium yang memiliki anomali kecepatan negatif, sinar gelombang akan cenderung menjauhi area tersebut (Suantika dkk, 2008). Hasil tomografi seismik gelombang P (V_p) dan S (V_s) pada penelitian ini telah sesuai dengan prinsip Fermat, dimana hiposenter gempa mayoritas berada di daerah anomali positif. Hal tersebut berkaitan dengan cakupan sinar seismik dari spektrum gempa yang berada di kedalaman antara 3,859 km sampai 12,205 km terhadap puncak Gunung Papandayan.

4.4.3 Analisis Tomogram Poisson's Rasio V_p/V_s

Gambar 4.13 merupakan Poisson's rasio V_p/V_s sebagai hasil inversi pada irisan horizontal. Warna merah tua dengan nilai 1,888 mewakili rasio V_p/V_s maksimum dan warna biru tua dengan nilai 1,6 mewakili rasio V_p/V_s minimum. Rasio V_p/V_s yang tinggi menunjukkan adanya retakan yang berisi fluida dan tingkat saturasi air yang tinggi pula (Moos and Zoback, 1983). Sedangkan rasio V_p/V_s yang rendah menunjukkan adanya batuan kering yang terisi oleh gas. Batuan yang banyak mengandung fluida akan menyebabkan perubahan porositas yang dapat menimbulkan keretakan dan memicu terjadinya gempa.



Gambar 4.13 Distribusi anomali Poisson's ratio V_p/V_s terhadap kedalaman 1 km, 3 km, 5 km, 7 km, 9 km, 11 km, 13 km, dan 15 km terhadap MSL



Gambar 4.14 Struktur kedalaman anomali Poisson's ratio V_p/V_s dari hasil *cross section* 1A – 1B, 2A – 2B, dan 3A – 3B.

Berdasarkan gambar pencitraan tomografi rasio V_p/V_s (Gambar 4.13 dan 4.14) menunjukkan bahwa rasio V_p/V_s rendah berada di Barat dari puncak Gunung Papandayan sampai ke sekitar kawasan Wayang Windu dengan nilai rasio V_p/V_s antara 1,6 sampai 1,726 yang berada pada kedalaman sampai 18 km terhadap MSL. Hal itu dapat diinterpretasikan bahwa pada kedalaman tersebut terdapat lapisan anomali kecepatan rendah yang berasosiasi dengan *gas-saturated rock*. Sedangkan adanya anomali tinggi yang menyertainya diidentifikasi sebagai adanya retakan yang berisi fluida dengan tingkat saturasi air yang tinggi (*water-saturated rock*). Daerah anomali tinggi dengan nilai rasio V_p/V_s sebesar 1,75 sampai 1,761 berada di sepanjang permukaan wilayah Kertasari sampai kedalaman 4 km terhadap MSL dan dari kedalaman 4 km sampai 12 km di bawah permukaan Kertasari terdapat anomali rasio V_p/V_s yang rendah yaitu antara 1,703 sampai 1,726 yang diinterpretasi sebagai *gas-saturated rock* yang berasosiasi dengan anomali rasio V_p/V_s rendah yang ada di sekitar Gunung Malabar hingga

kawasan Gunung Wayang Windu sampai ke Barat Gunung Papandayan. Di mana batuan penyusun di sekitar Gunung Malabar bervariasi dari basal sampai andesit basal. Sedangkan di bagian bawah dan di daerah yang berdekatan dengan Gunung Wayang Windu terdapat batuan piroklastika yang sebagian telah mengalami ubahan hidrotermal. Diperkirakan batuan piroklastika tersebut terbentuk semenjak pembentukan Kaldera Pangalengan dan bersumber dari beberapa gunung api yang lebih muda, termasuk Gunung Papandayan.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN 1
DATA STASIUN SEISMIK PEREKAM GEMPA VULKANIK GUNUNG
PAPANDAYAN

Nama Stasiun	Channel	Koordinat Stasiun (°)		Altitude (m)
		Longitude	Latitude	
Cidatar	CDT	107,7818 E	07,3236 S	1362
Cikati	CKT	107,7585 E	07,2792 S	1572
Cileuleuy	CLL	107,6849 E	07,3059 S	1730
Cisaruni	CSR	107,7408 E	07,3587 S	1470
Drajat (Psr Kiamis)	MIS	107,7499 E	07,1983 S	1705
Gunung Jaya	GJY	107,7594 E	07,3032 S	1606
Halimun	HAL	107,7146 E	07,4204 S	924
Kertasari	KTS	107,6781 E	07,2276 S	1781
Parkir	PAR	107,7387 E	07,3078 S	1938
Post	POS	107,7915 E	07,2733 S	1144
Sedep	SED	107,6619 E	07,2617 S	1670
Sukalaksana	SKL	107,7629 E	07,2333 S	1345
Tegal Alun	TGL	107,7224 E	07,3239 S	2524
Wanasuka	WAN	107,6195 E	07,2339 S	1556

LAMPIRAN 2
DATA TRAVEL TIME DAN FREKUENSI GEMPA VULKANIK
GUNUNG PAPANDAYAN

No,	Origin Time (UTC)	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)	Tp – Ts (s)	Frekuensi maksimum (Hz)	Jenis Gempa
1	2015/09/01_20:29	PAR	59,433	60,550	1.117	11,805	TL
		CLL	60,656	61,948	1.292	11,370	
		CSR	60,201	61,485	1.284	11,843	
		TGL	58,836	63,153	1.940	11,780	
2	2015/09/02_16:42	PAR	22,546	23,484	0.938	15,670	TL
		TGL	22,439	23,455	1.016	14,007	
		SED	23,206	25,022	1.816	6,315	
		CSR	22,646	23,774	1.128	12,524	
		CLL	22,386	23,497	1.111	5,710	
		GJY	23,248	23,980	0.732	14,659	
		CKT	23,768	24,528	0.760	8,076	
3	2015/09/03_20:41	SKL	30,020	32,685	2.665	10,021	TL
		MIS	29,672	32,033	2.361	11,295	
		SED	29,381	31,745	2.364	9,018	
		WAN	28,688	30,404	1.716	6,917	
		KTS	28,953	31,372	2.419	6,697	
		CKT	30,509	33,275	2.766	9,315	
		CLL	30,353	32,574	2.221	6,156	
		PAR	30,650	34,297	3.647	12,326	
		GJY	30,801	33,783	2.982	8,949	
		POS	30,872	34,322	3.450	9,390	
		CSR	31,630	34,739	3.109	7,050	
4	2015/09/03_20:51	SKL	32,130	34,685	2.555	6,044	TL
		PAR	32,747	36,089	3.342	13,367	
		CKT	32,616	35,700	3.084	9,129	
		MIS	31,721	34,261	2.540	8,052	
		SED	31,467	33,992	2.525	6,193	
		WAN	30,949	32,651	1.702	6,825	
		CLL	32,500	35,580	3.080	6,305	
		TGL	33,102	36,344	3.242	8,126	
		KTS	31,005	33,512	2.507	7,160	
5	2015/09/05_09:11	SKL	42,616	44,287	1.671	5,747	TL
		MIS	42,706	45,273	2.567	5,524	
		SED	41,863	43,700	1.837	6,267	
		WAN	42,592	44,557	1.965	7,234	
		CLL	41,036	42,157	1.121	5,709	
		CSR	41,328	42,788	1.460	12,524	
		TGL	41,117	42,130	1.013	9,687	
		HAL	41,135	42,119	0.984	12,339	
6	2015/09/05_20:26	PAR	28,573	29,708	1.135	6,119	VA
		TGL	28,695	29,922	1.227	6,087	
		CSR	29,480	30,564	1.084	6,571	
		CKT	29,606	30,892	1.286	5,188	
7	2015/09/07_16:47	SKL	37,116	47,476	10.360	9,210	TL
		POS	36,681	47,118	10.437	7,554	

		KTS	36,721	46,893	10.172	5,840	
		CKT	36,717	46,692	9.975	6,063	
		PAR	35,842	45,312	9.470	7,425	
		SED	36,137	45,914	9.777	6,037	
		WAN	36,039	46,196	10.157	6,692	
		CDT	36,552	46,075	9.523	5,497	
		CLL	35,632	44,626	8.994	5,806	
		GJY	36,218	45,793	9.575	6,500	
		TGL	35,735	45,195	9.460	6,692	
8	2015/09/07_17:15	HAL	27,016	30,428	3.412	11,665	TL
		SED	26,905	30,115	3.210	7,057	
		CDT	28,438	32,772	4.334	9,205	
		CLL	27,227	30,054	2.827	6,131	
		TGL	27,499	30,873	3.374	8,135	
		CSR	27,607	31,331	3.724	10,753	
		CKT	28,248	32,353	4.105	6,076	
		SKL	27,862	32,574	4.712	9,236	
9	2015/09/08_11:56	PAR	41,981	43,028	1.047	12,472	TL
		CLL	41,810	43,097	1.287	6,592	
		TGL	41,874	42,991	1.117	9,474	
		CSR	42,137	42,960	0.823	7,707	
		CKT	42,580	44,201	1.621	7,668	
		SED	42,643	44,472	1.829	6,861	
		KTS	43,176	45,365	2.189	6,285	
10	2015/09/08_12:36	PAR	53,346	55,382	2.036	4,210	VA
		CKT	52,931	54,258	1.327	4,325	
		MIS	52,478	53,557	1.079	4,517	
		KTS	52,860	53,991	1.131	6,400	
		CLL	52,668	54,553	1.885	4,325	
11	2015/09/08_14:58	SKL	51,272	52,277	1.005	6,633	TL
		MIS	51,484	52,688	1.204	7,596	
		KTS	51,823	53,250	1.427	6,864	
		SED	52,336	54,195	1.859	7,750	
		TGL	52,822	54,620	1.798	7,365	
		GJY	52,357	53,168	0.811	6,320	
		PAR	52,367	54,046	1.679	9,038	
12	2015/09/12_22:03	PAR	44,986	46,879	1.893	8,635	TL
		CKT	44,551	46,533	1.982	8,943	
		POS	44,727	46,422	1.695	7,018	
		KTS	44,283	45,996	1.713	6,364	
		SED	45,326	47,033	1.707	5,632	
		CSR	45,990	48,794	2.804	7,326	
13	2015/09/13_13:31	SKL	25,080	27,831	2.751	6,210	TL
		HAL	27,157	31,516	4.359	5,170	
		CKT	25,577	28,300	2.723	6,287	
		MIS	24,665	27,901	3.236	7,557	
		SED	24,455	27,805	3.350	6,171	
		WAN	23,76	25,495	1.735	6,633	
		CDT	26,511	30,959	4.448	6,595	
		CLL	25,37	28,448	3.078	5,517	
		TGL	25,967	29,262	3.295	6,710	
		CSR	26,477	29,87	3.393	6,518	
		KTS	24,108	26,496	2.388	6,013	
14	2015/09/14_13:01	PAR	6,336	11,492	5.156	13,526	TL

		SED	6,003	11,382	5.379	6,672	
		CSR	6,042	11,036	4.994	11,600	
		TGL	6,272	11,323	5.051	7,018	
		MIS	7,848	14,102	6.254	8,635	
15	2015/09/15_17:49	SKL	37,131	38,12	0.989	6,515	VA
		PAR	38,015	39,793	1.778	4,478	
		CKT	37,589	39,187	1.598	5,555	
		MIS	37,367	38,556	1.189	4,517	
		KTS	37,422	38,717	1.295	6,938	
		SED	38,059	40,1	2.041	5,132	
		CLL	38,277	40,119	1.842	5,478	
		TGL	38,409	40,455	2.046	6,900	
		CSR	39,097	41,431	2.334	6,016	
16	2015/09/15_21:02	CLL	43,411	46,194	2.783	5,613	TL
		SKL	43,149	45,691	2.542	5,863	
		SED	42,367	44,716	2.349	6,710	
		PAR	43,744	46,819	3.075	13,834	
		POS	43,977	47,887	3.910	8,481	
		CKT	43,62	46,566	2.946	7,249	
		TGL	44,01	47,185	3.175	7,480	
		CSR	44,625	48,651	4.026	7,249	
		KTS	41,996	43,96	1.964	6,017	
		WAN	41,67	43,02	1.350	9,868	
17	2015/09/16_06:33	PAR	41,495	43,514	2.019	13,625	TL
		TGL	41,462	43,419	1.957	11,281	
		CKT	42,006	44,319	2.313	12,395	
		CSR	41,864	44,115	2.251	11,434	
		WAN	41,213	42,151	0.938	12,126	
18	2015/09/18_09:30	SKL	59,858	61,078	1.220	5,851	TL
		CKT	60,449	62,196	1.747	5,768	
		MIS	59,682	60,799	1.117	7,631	
		CLL	61,038	63,12	2.082	6,200	
		TGL	61,092	63,321	2.229	5,387	
		WAN	61,303	62,965	1.662	6,819	
19	2015/09/19/13:31	SKL	11,671	16,183	4.512	10,726	TL
		PAR	10,982	15,643	4.661	13,820	
		CKT	11,532	16,099	4.567	11,615	
		SED	10,057	14,295	3.015	6,200	
		WAN	9,654	13,442	4.238	6,702	
		CLL	10,087	14,361	3.788	6,200	
		TGL	10,835	15,504	4.274	6,973	
		CSR	11,034	15,914	4.669	11,847	
		KTS	10,656	15,224	4.88	6,354	
20	2015/09/20_01:53	SKL	14,34	15,497	1.157	6,082	TL
		MIS	14,213	15,312	1.099	7,356	
		SED	15,101	16,622	1.521	8,321	
		CKT	15,352	16,688	1.336	7,433	
		PAR	15,519	16,625	1.106	11,950	
21	2015/09/21_15:26	SKL	10,844	11,982	1.138	8,012	TL
		PAR	11,818	13,563	1.745	12,723	
		CKT	11,474	12,756	1.282	6,028	
		MIS	11,118	12,123	1.005	7,876	
		SED	12,100	13,232	1.132	8,987	
		WAN	12,635	14,346	1.711	9,789	

		CLL	12,708	15,126	2.418	10,562	
		TGL	12,361	14,185	1.824	11,952	
		POS	12,014	13,832	1.818	10,209	
		CSR	12,979	14,706	1.727	9,809	
		KTS	11,327	12,746	1.419	9,876	
22	2015/09/20_19:02	SKL	41,851	42,366	0.515	11,987	TL
		PAR	42,902	44,964	2.062	10,978	
		CKT	42,607	44,354	1.747	11,212	
		MIS	41,475	42,541	1.066	13,562	
		SED	42,574	43,763	1.189	14,672	
		WAN	43,305	45,264	1.959	12,009	
		CDT	43,586	45,442	1.856	10,567	
		CLL	43,195	45,305	2.110	9,879	
		TGL	43,293	45,348	2.055	10,172	
		POS	42,915	44,58	1.665	11,267	
		CSR	43,901	46,652	2.751	9,009	
		KTS	41,896	43,325	1.429	11,202	
23	2015/09/28_01:50	SKL	4,843	6,228	1.385	9,897	TL
		MIS	4,332	5,098	0.766	8,765	
		CKT	5,789	7,498	1.709	8,702	
		WAN	6,656	8,828	2.172	7,998	
		PAR	6,259	8,158	1.899	8,809	
		KTS	6,154	6,958	0.804	8,001	
24	2015/09/28_01:47	SKL	43,292	44,717	1.425	9,909	TL
		MIS	42,764	43,574	0.810	10,002	
		CKT	43,810	45,287	1.477	11,202	
		PAR	45,117	46,883	1.703	9,502	
		KTS	44,688	46,589	1.766	9,127	
25	2015/09/28_15:12	SKL	17,401	17,828	0.427	10,901	TL
		PAR	18,452	20,121	1.669	9,890	
		CKT	18,011	19,39	1.379	8,798	
		MIS	17,594	18,597	1.003	8,972	
		SED	18,695	20,192	1.497	7,098	
		WAN	19,392	21,005	1.613	8,990	
		CDT	18,944	20,762	1.818	9,002	
		CLL	19,048	20,793	1.745	7,998	
		POS	18,151	19,154	1.003	8,771	
		TGL	18,804	20,304	1.500	9,008	
		CSR	19,488	20,878	1.390	9,121	
		KTS	18,242	19,923	1.681	8,023	
26	2015/09/29_10:46	PAR	10,017	12,18	2.163	6,198	VA
		MIS	9,491	11,127	1.636	5,124	
		SED	8,828	10,182	1.354	4,067	
		WAN	8,911	10,224	1.313	5,786	
		KTS	8,180	9,156	0.976	4,523	
		TGL	10,367	13,003	2.636	5,786	
27	2015/09/30_16:37	CKT	35,244	45,449	9.552	10,234	TL
		MIS	36,197	47,068	10.221	9,897	
		SED	34,641	44,509	10.205	10,245	
		WAN	34,553	44,367	10.871	9,897	
		CLL	34,408	43,957	9.868	8,799	
		TGL	34,486	44,175	9.814	8,998	
		POS	35,619	46,127	9.791	7,156	
		CSR	34,676	43,790	9.549	9,867	

28	2015/10/01_20:03	KTS	35,259	45,567	9.689	10,121	VA
		PAR	48,457	50,425	1.968	6,789	
		SED	48,351	50,382	2.031	5,098	
		WAN	48,805	51,306	2.501	4,567	
		CLL	47,717	49,412	1.695	5,786	
29	2015/10/02_08:15	TGL	48,286	50,251	1.965	4,897	TL
		SKL	43,162	49,461	6.299	9,897	
		CDT	42,484	48,732	6.248	9780	
		CKT	42,656	48,703	6.047	8,987	
		POS	43,184	49,361	6.177	7,764	
		MIS	43,375	49,928	6.553	9,864	
		PAR	41,956	47,665	5.709	8,458	
		SED	41,713	47,216	5.503	10,002	
		WAN	41,670	46,505	4.835	7,690	
		CLL	41,358	46,656	5.298	8,758	
		TGL	41,864	47,312	5.448	9,706	
		CSR	41,510	47,084	5.574	10,765	
30	2015/10/02_14:17	HAL	40,559	45,389	4.83	9,220	TL
		PAR	14,034	19,479	5.445	7,867	
		CKT	14,683	20,631	5.948	6,578	
		MIS	15,461	21,897	6.436	9,870	
		SED	13,539	18,903	5.364	6,780	
		WAN	13,465	18,551	5.086	6,700	
		CLL	13,371	18,402	5.031	8,909	
		TGL	13,938	19,276	5.338	9,721	
31	2015/10/04_01:33	KTS	14,141	19,988	5.847	8,290	TL
		PAR	27,166	29,391	2.225	11,980	
		CKT	26,873	28,187	1.314	9,809	
		MIS	25,856	26,994	1.138	8,978	
		SED	27,338	28,646	1.308	10,987	
		WAN	27,349	28,705	1.356	11,789	
		CDT	27,992	30,157	2.165	6,789	
		CLL	27,365	29,577	2.212	7,875	
		TGL	27,513	29,792	2.279	6,789	
		POS	27,188	29,344	2.156	9,980	
32	2015/10/04_13:20	KTS	26,077	27,482	1.405	10,985	TL
		PAR	15,521	17,145	1.624	9,267	
		CKT	15,176	16,559	1.383	8,798	
		KTS	15,133	16,543	1.410	8,765	
33	2015/10/04_13:42	MIS	15,010	16,146	1.136	8,209	TL
		PAR	45,043	46,757	1.714	9,309	
		CKT	44,764	45,924	1.160	8,093	
		MIS	44,612	45,696	1.084	11,987	
		SED	45,134	46,700	1.566	10,678	
		WAN	45,670	47,790	2.12	13,983	
		CDT	45,715	47,714	1.999	8,970	
		CLL	45,320	47,086	1.766	7,983	
		TGL	45,363	47,125	1.762	9,092	
		POS	45,018	46,753	1.735	8,102	
		CSR	46,014	48,203	2.189	7,120	
		KTS	44,734	45,993	1.259	7,157	
34	2015/10/04_18:09	PAR	12,877	14,858	1.981	5,981	VA
		CKT	12,358	14,231	1.873	4,902	
		MIS	11,278	12,449	1.171	6,200	

		SED	12,641	14,110	1.469	4,789	
		WAN	12,812	14,074	1.262	5,234	
		CLL	12,928	15,029	2.101	6,290	
35	2015/10/07_06:05	PAR	15,003	16,730	1.727	9,089	TL
		CKT	14,581	16,022	1.441	8,027	
		MIS	14,274	15,360	1.086	8,290	
		CLL	15,448	17,260	1.812	9,120	
		TGL	15,487	17,401	1.914	10,293	
		CSR	16,132	18,147	2.015	7,803	
36	2015/10/08_19:06	PAR	32,816	34,560	1.744	4,728	VA
		CKT	32,358	33,874	1.516	5,820	
		MIS	31,815	32,838	1.023	4,890	
		SED	32,978	34,805	1.827	6,798	
		CLL	33,821	35,367	1.546	5,890	
		CSR	33,970	36,365	2.395	6,093	
		KTS	32,436	33,785	1.349	6,022	
37	2015/10/09_05:20	PAR	58,953	61,030	2.077	8,392	TL
		CKT	58,568	60,026	1.458	9,872	
		MIS	58,090	59,298	1.208	8,932	
		SED	59,028	60,558	1.530	8,456	
		WAN	59,571	61,540	1.969	9,087	
		CLL	59,222	60,235	1.013	8,290	
		TGL	59,358	61,536	2.178	7,830	
		POS	59,044	60,953	1.909	10,234	
		KTS	58,298	59,745	1.447	11,378	
38	2015/10/10_04:55	PAR	43,604	45,937	2.333	10,299	TL
		HAL	43,726	46,290	2.564	9,892	
		CKT	44,148	46,996	2.848	8,345	
		MIS	44,581	47,599	3.018	9,110	
		SED	42,851	44,878	2.027	7,899	
		WAN	42,912	44,381	1.469	8,125	
		CDT	44,458	47,571	3.113	9,189	
		CLL	42,815	45,004	2.189	10,111	
		TGL	43,543	45,889	2.346	7,890	
		POS	44,661	47,910	3.249	8,289	
		CSR	43,824	46,227	2.403	10,926	
		KTS	43,487	45,909	2.422	7,345	
39	2015/10/10_12:15	PAR	38,483	40,827	2.344	4,987	VA
		CKT	39,045	41,889	2.844	4,293	
		MIS	39,465	42,506	3.041	5,672	
		SED	37,727	39,751	2.024	6,890	
		WAN	37,834	39,325	1.491	6,235	
		CLL	37,697	40,141	2.444	5,309	
		TGL	38,418	40,729	2.311	4,190	
		CSR	38,713	41,104	2.391	5,134	
		KTS	38,366	40,827	2.461	6,987	
40	2015/10/10_12:15	PAR	52,471	54,760	2.289	4,190	VA
		CKT	52,969	55,850	2.881	5,780	
		MIS	53,469	56,545	3.076	6,234	
		SED	51,680	53,697	2.017	4,081	
		WAN	53,143	53,934	0.791	5,680	
		TGL	52,374	54,690	2.316	6,900	
		CSR	52,671	55,034	2.363	5,983	
		KTS	53,089	54,742	1.653	4,908	

41	2015/10/10_17:32	PAR	59,799	62,139	2.340	6,908	VA
		HAL	59,908	62,457	2.549	5,088	
		MIS	59,061	61,088	2.027	6,983	
		SED	60,044	62,321	2.277	5,097	
		CDT	59,001	60,274	1.273	4,678	
		CLL	59,68	62,422	2.742	6,899	
42	2015/10/10_18:49	PAR	54,638	55,299	0.661	9,890	TL
		CKT	54,815	56,275	1.460	7,880	
		MIS	55,944	58,376	2.432	6,890	
		SED	54,953	56,775	1.822	7,342	
		WAN	55,781	57,978	2.197	6,890	
		CDT	55,008	56,832	1.824	5,123	
		CLL	54,094	55,259	1.165	4,789	
		TGL	54,210	55,267	1.057	9,798	
		POS	55,420	57,694	2.274	5,253	
		CSR	54,423	55,202	0.779	7,900	
43	2015/10/10_20:20	PAR	30,593	32,652	2.059	8,092	TL
		CKT	30,134	32,651	2.517	8,790	
		MIS	28,682	29,411	0.729	10,765	
		SED	30,828	32,545	1.717	7,880	
		WAN	31,057	33,227	2.170	8,980	
		CDT	31,093	33,869	2.776	10,237	
		TGL	30,973	33,303	2.330	9,820	
		POS	30,306	32,573	2.267	8,907	
		CSR	31,556	33,165	1.609	9,087	
44	2015/10/10_20:57	SED	58,481	60,517	2.036	4,567	VA
		CLL	58,442	60,616	2.174	6,002	
		WAN	58,478	60,502	2.024	5,890	
		KTS	59,180	61,487	2.307	5,798	
45	2015/10/11_14:26	PAR	41,425	45,003	3.578	8,907	TL
		CLL	41,517	46,702	5.148	5,980	
		TGL	40,318	45,213	4.895	7,092	
		CSR	40,528	45,918	5.390	8,091	
46	2015/10/11_23:24	PAR	7,616	9,785	2.169	4,082	VA
		SED	6,235	8,457	2.222	5,093	
		WAN	7,204	8,793	1.589	6,098	
		TGL	7,583	9,584	2.001	4,550	
		CSR	8,009	10,214	2.205	5,990	
47	2015/10/12_13:20	PAR	60,354	62,576	2.222	4,011	VA
		CKT	59,692	61,519	1.827	3,012	
		KTS	59,440	61,122	1.682	4,120	
		MIS	58,093	58,868	0.775	3,420	
48	2015/10/15_01:15	SED	31,282	33,287	2.005	4,567	VA
		CLL	31,250	33,416	2.166	6,778	
		TGL	31,973	34,307	2.334	5,667	
		PAR	32,017	34,375	2.358	4,345	
		WAN	31,514	32,805	1.291	6,578	
49	2015/10/15_17:09	PAR	60,444	62,505	2.061	8,978	TL
		CKT	60,074	61,855	1.781	8,922	
		MIS	58,574	59,414	0.840	7,869	
		SED	60,336	62,326	1.990	6,234	
		WAN	60,873	63,228	2.355	5,672	
		CDT	61,074	63,383	2.309	4,789	

		CLL	60,744	63,026	2.282	7,890	
		TGL	60,839	63,092	2.253	5,902	
		CSR	61,457	64,236	2.779	10,200	
		KTS	59,642	61,251	1.609	7,899	
50	2015/10/16_12:45	CKT	22,578	25,218	0.580	4,901	VA
		KTS	23,346	24,521	1.175	6,789	
		CSR	22,086	24,672	2.586	4,203	
		SED	21,000	22,924	1.924	6,902	
51	2015/10/16_17:11	PAR	12,543	13,397	0.854	5,792	VA
		CLL	13,145	14,575	1.430	5,892	
		CSR	12,573	13,369	0.796	4,092	
		TGL	12,419	13,235	0.816	5,092	
52	2015/10/17_14:38	PAR	43,441	44,656	1.215	7,820	TL
		CKT	44,046	46,745	2.699	8,460	
		WAN	42,871	44,229	1.358	7,902	
		CLL	42,530	43,959	1.429	9,108	
		TGL	43,358	45,532	2.174	7,298	
		KTS	43,406	44,788	1.382	8,178	
53	2015/10/18_12:03	PAR	14,352	17,574	3.222	4,157	VA
		CKT	13,708	16,487	2.779	8,900	
		TGL	14,698	18,185	3.487	7,823	
		KTS	15,815	17,643	1,828	7,901	

LAMPIRAN 3

DATA GEMPA VULKANIK GUNUNG PAPANDAYAN DARI GAD

No,	Origine Time (UTC)	Lat (°)	Long (°)	Depth (km)*	Error hiposenter di GAD (%)				Mw (SR)
					x	y	z	Time	
1	2015/09/01_20:29	107,7290541	-7,32117	0,820	0,129	0,129	0,129	0,094	0,944
2	2015/09/02_16:42	107,7062973	-7,32245	1,210	0,014	0,014	0,014	0,013	0,187
3	2015/09/03_20:41	107,5969640	-7,14326	5,287	0,454	0,455	0,408	0,081	0,120
4	2015/09/03_20:51	107,6043243	-7,12706	3,564	0,041	0,041	0,041	0,024	0,120
5	2015/09/05_09:11	107,6966306	-7,34792	3,550	0,401	0,363	0,644	0,167	0,922
6	2015/09/05_20:26	107,7162793	-7,31366	2,530	0,023	0,023	0,023	0,022	0,245
7	2015/09/07_16:47	107,6785495	-7,35068	3,725	0,793	0,456	0,500	0,184	1,120
8	2015/09/07_17:15	107,5240090	-7,35995	2,953	0,225	0,220	0,256	0,135	0,342
9	2015/09/08_11:56	107,7055225	-7,32118	1,157	0,049	0,051	0,055	0,034	0,245
10	2015/09/08_12:36	107,7235315	-7,23603	0,502	0,054	0,054	0,056	0,046	-0,056
11	2015/09/08_14:58	107,7319910	-7,23406	2,756	0,024	0,024	0,024	0,021	0,643
12	2015/09/12_22:03	107,7337117	-7,22501	0,706	0,195	0,394	0,402	0,129	0,684
13	2015/09/13_13:31	107,5799099	-7,10240	5,720	0,026	0,026	0,026	0,026	1,120
14	2015/09/14_13:01	107,5980721	-7,40481	7,682	0,454	0,833	0,321	0,165	0,245
15	2015/09/15_17:49	107,7263514	-7,23819	0,863	0,077	0,083	0,212	0,036	0,120
16	2015/09/15_21:02	107,5686847	-7,15758	3,499	0,109	0,109	0,108	0,057	0,643
17	2015/09/16_06:33	107,6340811	-7,30112	3,640	0,047	0,048	0,049	0,04	0,421
18	2015/09/18_09:30	107,7346036	-7,21014	3,406	0,017	0,016	0,017	0,015	0,819
19	2015/09/19/13:31	107,5433604	-7,32976	4,677	0,836	0,455	0,327	0,111	0,342
20	2015/09/20_01:53	107,7267297	-7,21549	3,132	0,021	0,021	0,021	0,020	0,684
21	2015/09/20_15:26	107,7287658	-7,23179	1,781	0,128	0,153	0,462	0,061	0,546
22	2015/09/20_19:02	107,7212342	-7,21667	1,363	0,019	0,019	0,019	0,017	0,819
23	2015/09/28_01:50	107,7519910	-7,19587	3,718	0,023	0,023	0,023	0,022	0,421
24	2015/09/28_01:47	107,7538288	-7,19639	2,647	0,021	0,021	0,021	0,021	0,421
25	2015/09/28_15:12	107,7397568	-7,23352	2,351	0,084	0,082	0,099	0,038	0,643
26	2015/09/29_10:46	107,6717928	-7,21335	2,436	0,047	0,053	0,059	0,021	0,342
27	2015/09/30_16:37	107,6857207	-7,27979	3,426	0,793	0,846	0,536	0,244	0,597
28	2015/10/01_20:03	107,6858288	-7,31513	11,103	0,026	0,026	0,026	0,025	0,041
29	2015/10/02_08:15	107,5756036	-7,40985	8,519	0,920	0,864	0,302	0,154	0,722
30	2015/10/02_14:17	107,5626126	-7,39186	7,941	0,773	0,131	0,415	0,155	0,041
31	2015/10/04_01:33	107,7223423	-7,21322	1,976	0,153	0,234	0,278	0,063	1,134
32	2015/10/04_13:20	107,7278378	-7,23290	3,449	0,039	0,036	0,055	0,020	0,245
33	2015/10/04_13:42	107,7260631	-7,24012	2,258	0,098	0,116	0,184	0,035	1,187
34	2015/10/04_18:09	107,7313964	-7,19140	3,416	0,011	0,011	0,011	0,011	0,245
35	2015/10/07_06:05	107,7454775	-7,22394	3,630	0,038	0,035	0,038	0,031	1,090
36	2015/10/08_19:06	107,7369640	-7,22809	0,583	0,117	0,105	0,192	0,05	-0,056
37	2015/10/09_05:20	107,7254054	-7,22949	2,460	0,039	0,039	0,040	0,029	0,722
38	2015/10/10_04:55	107,6027840	-7,31473	1,569	0,327	0,295	0,397	0,132	1,120
39	2015/10/10_12:15	107,5877748	-7,32938	4,665	0,124	0,114	0,147	0,073	0,245
40	2015/10/10_12:15	107,6526667	-7,31944	0,044	0,721	0,672	0,823	0,203	0,120
41	2015/10/10_17:32	107,8332252	-7,25553	3,695	0,022	0,022	0,022	0,021	0,120
42	2015/10/10_18:49	107,7048559	-7,32538	1,788	0,072	0,091	0,111	0,035	0,722
43	2015/10/10_20:20	107,7383333	-7,19878	1,843	0,049	0,050	0,050	0,036	0,421
44	2015/10/10_20:57	107,5831712	-7,33819	3,196	0,203	0,149	0,070	0,078	0,245
45	2015/10/11_14:26	107,7976577	-7,33055	4,841	0,120	0,121	0,210	0,119	0,643

46	2015/10/11_23:24	107,6627568	-7,26049	10,780	0,035	0,035	0,035	0,035	0,245
47	2015/10/12_13:20	107,7418739	-7,19849	1,487	0,030	0,048	0,059	0,017	-0,056
48	2015/10/15_01:15	107,6351351	-7,29131	12,491	0,112	0,108	0,142	0,062	0,245
49	2015/10/15_17:09	107,7345495	-7,20464	1,456	0,073	0,080	0,083	0,037	1,041
50	2015/10/16_12:45	107,6269009	-7,32993	4,581	0,766	0,928	0,252	0,046	-0,056
51	2015/10/16_17:11	107,7303243	-7,33058	0,324	0,059	0,055	0,033	0,009	0,120
52	2015/10/17_14:38	107,6242432	-7,31339	0,625	0,086	0,089	0,093	0,064	0,120
53	2015/10/18_12:03	107,7738468	-7,28122	10,271	0,028	0,028	0,028	0,028	0,245

*) Kedalaman terhadap MSL

LAMPIRAN 4
DATA HIPOSENTER GEMPA VULKANIK GUNUNG PAPANDAYAN
SETELAH RELOKASI DENGAN HYPODD

No,	Origine Time (UTC)	Lat (°)	Long (°)	Depth (km)*	Mw (SR)	RMS (s)
1	2015/09/01_20:29	107,726335	-7,251513	2,434	0,944	3,389
2	2015/09/02_16:42	107,696175	-7,278702	2,739	0,187	4,327
3	2015/09/03_20:41	107,685482	-7,273714	3,018	0,120	4,575
4	2015/09/03_20:51	107,694027	-7,277464	3,255	0,120	4,510
5	2015/09/05_09:11	107,685978	-7,273225	3,721	0,922	2,290
6	2015/09/05_20:26	107,687972	-7,270119	4,149	0,245	0,200
7	2015/09/07_16:47	107,691138	-7,279360	3,675	1,120	7,668
8	2015/09/07_17:15	107,682479	-7,261824	4,796	0,342	7,170
9	2015/09/08_11:56	107,683805	-7,264725	5,145	0,245	2,510
10	2015/09/08_12:36	107,703271	-7,278640	1,277	-0,056	1,330
11	2015/09/08_14:58	107,703328	-7,278621	1,268	0,643	1,546
12	2015/09/12_22:03	107,680094	-7,256215	6,645	0,684	1,566
13	2015/09/13_13:31	107,691536	-7,275389	3,488	1,120	6,471
14	2015/09/14_13:01	107,701025	-7,283578	2,404	0,245	2,708
15	2015/09/15_17:49	107,680257	-7,275214	3,239	0,120	5,153
16	2015/09/15_21:02	107,678003	-7,256030	5,519	0,643	2,755
17	2015/09/16_06:33	107,687109	-7,269021	4,312	0,421	0,400
18	2015/09/18_09:30	107,726034	-7,250988	2,391	0,819	5,813
19	2015/09/19/13:31	107,688989	-7,277504	3,339	0,342	2,952
20	2015/09/20_01:53	107,676522	-7,244321	7,439	0,684	3,140
21	2015/09/20_15:26	107,689372	-7,262649	5,640	0,546	3,030
22	2015/09/20_19:02	107,681551	-7,252618	6,240	0,819	2,497
23	2015/09/28_01:50	107,688957	-7,265853	3,809	0,421	0,400
24	2015/09/28_01:47	107,686890	-7,264777	5,745	0,421	5,745
25	2015/09/28_15:12	107,684790	-7,276905	3,224	0,643	3,224
26	2015/09/29_10:46	107,689136	-7,280727	5,278	0,342	5,278
27	2015/09/30_16:37	107,687622	-7,263000	3,371	0,597	3,371
28	2015/10/01_20:03	107,646143	-7,224054	9,605	0,041	9,605
29	2015/10/02_08:15	107,684839	-7,270426	4,548	0,722	4,548
30	2015/10/02_14:17	107,689209	-7,276152	3,640	0,041	3,640
31	2015/10/04_01:33	107,694775	-7,278567	2,605	1,134	2,605
32	2015/10/04_13:20	107,683740	-7,265219	5,702	0,245	5,702
33	2015/10/04_13:42	107,675716	-7,251298	7,360	1,187	7,360
34	2015/10/04_18:09	107,692383	-7,264489	5,765	0,245	5,765
35	2015/10/07_06:05	107,667570	-7,241742	7,871	1,090	7,871
36	2015/10/08_19:06	107,685807	-7,268198	5,499	-0,056	5,499
37	2015/10/09_05:20	107,726009	-7,251115	2,347	0,722	1,237
38	2015/10/10_04:55	107,676758	-7,260541	5,775	1,120	5,775
39	2015/10/10_12:15	107,690674	-7,267022	4,206	0,245	4,206
40	2015/10/10_12:15	107,703328	-7,278847	1,259	0,120	1,505
41	2015/10/10_17:32	107,726066	-7,251259	2,394	0,120	1,371
42	2015/10/10_18:49	107,703027	-7,278526	1,340	0,722	1,602
43	2015/10/10_20:20	107,688729	-7,266407	4,245	0,421	4,619
44	2015/10/10_20:57	107,725618	-7,251534	2,397	0,245	1,527
45	2015/10/11_14:26	107,697550	-7,276388	3,865	0,643	2,716
46	2015/10/11_23:24	107,686938	-7,274813	2,887	0,245	1,411

47	2015/10/12_13:20	107,726001	-7,250970	2,407	-0,056	0,858
48	2015/10/15_01:15	107,694051	-7,274721	4,632	0,245	4,331
49	2015/10/15_17:09	107,726115	-7,250891	2,388	1,041	1,411
50	2015/10/16_12:45	107,695231	-7,277414	2,694	-0,056	3,335
51	2015/10/16_17:11	107,688859	-7,268614	4,930	0,120	1,704
52	2015/10/17_14:38	107,684277	-7,268627	4,141	0,120	1,315
53	2015/10/18_12:03	107,692643	-7,274220	5,075	0,245	2,728

*) Kedalaman terhadap MSL

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dibahas pada bab sebelumnya, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Anomali kecepatan negatif dari gelombang P (V_p) mayoritas berada di sekitar permukaan kawah Wayang Windu hingga kedalaman 20 km terhadap MSL dengan nilai -2 km/s sampai -6 km/s dan pada kedalaman antara 5 km sampai 9 km terlihat adanya hubungan anomali kecepatan negatif menerobos sampai kedalaman 2,6 km di bawah puncak Gunung Papandayan. Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara struktur geologi bawah permukaan antara kawasan Wayang Windu terhadap Gunung Papandayan. Sedangkan anomali kecepatan positif dari gelombang P (V_p) berada di sepanjang permukaan Kertasari sampai kedalaman 17 km terhadap MSL dengan nilai +1 km/s sampai +9 km/s.
2. Nilai anomali kecepatan negatif dari gelombang S (V_s) yang berkisar antara -1 km/s sampai -7 km/s lebih menyebar dari Gunung Malabar hingga selatan Kawasan Wayang Windu dengan kedalaman sampai 20 km terhadap MSL yang kemudian menghubungkan ke arah Barat menuju daerah sekitar Gunung Papandayan dengan kedalaman distribusi anomali negatif berkisar antara 2,6 km sampai 20,6 km terhadap puncak Gunung Papandayan. Hal tersebut diindikasikan bahwa di daerah dengan anomali kecepatan negatif terdapat patahan-patahan sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal bawah permukaan dengan temperatur yang lebih tinggi dari daerah sekitarnya. Sedangkan kecepatan anomali positif berada di daerah Kertasari sampai Barat Gunung Papandayan dengan nilai anomali antara +1 km/s sampai +8 km/s dengan kedalaman hingga 18 km terhadap MSL.
3. Rasio V_p/V_s rendah berada di Barat dari puncak Gunung Papandayan sampai ke sekitar kawasan Wayang Windu dengan nilai rasio V_p/V_s antara 1,6 sampai 1,726 yang berada pada kedalaman sampai 18 km terhadap MSL. Hal

itu menunjukkan bahwa pada kedalaman tersebut terdapat lapisan anomali kecepatan rendah yang berasosiasi dengan *gas-saturated rock*. Sedangkan daerah anomali tinggi dengan nilai rasio V_p/V_s sebesar 1,75 sampai 1,761 berada di sepanjang permukaan Kertasari sampai kedalaman 4 km terhadap MSL yang diindikasikan sebagai *water-saturated rock* dan dari kedalaman 4 km sampai 12 km di bawah permukaan Kertasari terdapat anomali rasio V_p/V_s yang rendah yaitu antara 1,703 sampai 1,726 yang diinterpretasi sebagai *gas-saturated rock* yang berasosiasi dengan anomali rasio V_p/V_s rendah yang ada di sekitar Gunung Malabar hingga kawasan Gunung Wayang Windu sampai ke Barat Gunung Papandayan. Di mana batuan penyusun di sekitar Gunung Malabar bervariasi dari basal sampai andesit basal. Sedangkan di bagian bawah dan di daerah yang berdekatan dengan Gunung Wayang Windu terdapat batuan piroklastika yang sebagian telah mengalami ubahan hidrotermal. Batuan piroklastika tersebut diperkirakan terbentuk semenjak pembentukan Kaldera Pangalengan dan bersumber dari beberapa gunung api yang umurnya lebih muda, termasuk Gunung Papandayan.

5.2 Saran

Beberapa saran yang terkait dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu penambahan rentang waktu pengumpulan data gempa vulkanik di kawasan Gunung Papandaya untuk memperoleh jumlah gempa vulkanik yang lebih banyak, karena semakin banyak jumlah gempa yang digunakan untuk inversi tomografi seismik 3D, maka dapat diperoleh hasil pencitraan yang lebih baik.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang *centroid momen tensor* (CMT) yang dapat digunakan untuk identifikasi bidang sesar yang ada di daerah penelitian terlebih daerah penelitian merupakan kawasan gunungapi dengan sistem patahan yang kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K., & Lee, W.H.K. (1976). Determination Of Three-Dimensional Velocity Anomalies Under a Seismic Array Using First P Arrival Time from Local Earthquake. *Journal of Geophysical Research*, No. 23, Vol. 81, 4381-4399.
- Asmoro, P., D. Wachyudin, dan E. Mulyadi. (1989). *Peta Geologi Papandayan, Garut, Jawa Barat*. Direktorat Vulkanologi, Bandung.
- Dinas Pertambangan dan Energi Provinsi Jawa Barat. 2006. Pengembangan Panas Bumi Di Jawa Barat: Kontribusi dan Harapan Daerah. *Seminar Nasional Panas Bumi: "Panas Bumi sebagai Energi Andalan Masa Kini dan Mendatang"*. Bali, 3 April 2006.
- Gomberg, J., & Shedlock, K. (1990). The Effect of S-Wave Arrival Times on The Accuracy of Hypocenter Estimation. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 80, No. 6, pp. 1605 - 1628.
- Gubbins, D. (1990). *Seismology and Plate Tectonics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gylfy, P., & Bjornsson, A. (1991). *Geophysical Exploration for Geothermal Resources Principles and Application*. Iceland: UNU Geothermal Training Programme Reykjavik.
- Imposal, S., Fournon, P. M., Raffaele, R., Scaltrito. A., and Scarfi, L., (2009). Accurate hypocenter locations in the Middle-Durance Fault Zone, South-Eastern France, *Cent. Eur. J. Geosci.* 4: 416-423, DOI: 10.2478/v10085-009-0030-7.
- Iyer, H., & Hirahara, K. (1993). *Seismic Tomography: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kayal, J. (2002). *Seismic Waves and Earthquake Location*. Geological Survei of India.
- Kennett, B.L.N., Widiyantoro, S., & Van der Hilst, R.D. (1998). Joint Seismic Tomography for Bulk Sound and Shear Wave Speed in the Earth's Mantle. *Journal of Geophysics Research*, B6, Vol. 103, p.12.469-12.493.
- Kissling. (1995). *Program VELEST USER's GUIDE-Short Introduction*. Institute of Geophysics, ETH Zurich, Switzerland, 26.
- Koulakov, I. (2009). LOTOS code for Local Earthquake Tomographic Inversion. *J. Geophys.Res.*, Vol.99 (B10), hal. 19.635-19.646.
- Koulakov, I. dan S.V. Sobolev. (2006). A Tomographic Image of Indian Lithosphere Break-off beneath the Pamir-Hidukush Region. *Geophy. Journ. Int.*, 00. 425-440.
- Kristianto. (2005). *Studi Seismik Tomografi Pada Kasus Gunungapi Papandayan*. Tesis, Institut Teknologi Bandung.
- Kristianto dan Agus B. (2008). Evaluasi Seismik dan Visual Kegiatan Vulkanik G. Egon, 2005. *Bulletin Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi*, Vol. 3 No. 2, Agustus 2008: 9-17.
- Madrinovella, I., Widiyantoro, S., & Meilano, I. (2011). Relokasi Hipocenter Gempa Padang 30 September 2009 Menggunakan Metode Double Difference. *JTM*, Vol. XVIII No. 1.
- Menke, W. (1984). *Geophysical Data Analysis: Discrete Inversi Theory*. Orlando: Academic Press Inc.

- Monalia, P. (2011). *Analisis Model Kecepatan Berdasarkan Tomografi Refleksi Waktu Tempuh (Travel-Time Tomography Reflection)*. Tesis, Universitas Indonesia, FMIPA, Jakarta.
- Moos, D., dan Zoback. M. 1983. In Situ Studies of Velocity in Fractured Crystalline Rock. *Journal of Geophysical Research*. No. 88.
- Nishi, K. (2001). A three-dimensional robust seismic ray tracer for volcanic regions. *Earth Planets Space*, 53, 101-109.
- Nugraha, A. D. (2005). *Studi Tomografi 3-D Non Linier Untuk Gunung Guntur Menggunakan Waktu Tiba Gelombang P dan S*. Tesis Magister, Program Studi Pascasarjana Sains Kebumihan, FIKTM, Bandung.
- Paige, C., & Saunders, M. (1983). 1983. *LQSR: An Algorithm For Sparse Linear Equations and Sparse Least Square*, No. 88.
- PVMBG. (2015). *Laporan Bulanan Gunungapi Papandayan*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- Rachman, T., & Nugraha, A. D. (2012). Penentuan Model 1-D Kecepatan Gelombang P dan Relokasi Hiposenter Secara Simultan Untuk Data Gempabumi yang Berasosiasi dengan Sesar Sumatra Di Wilayah Aceh dan Sekitarnya. *JTM*, Vol. XIX No. 1.
- Rosid, S. (1988). *Penentuan Episenter dan Parameter Gempa mikro dalam Kaitannya dengan Daerah Prospek Geothermal Banten, Jawa Barat*. Skripsi. Universitas Indonesia.
- Suantika, G. (2002). *Pencitraan Tomografi Seismik 3-D Gunung Guntur*. Tesis Magister, Program Studi Pascasarjana Sains Kebumihan FIKTM, ITB, Bandung.
- Suantika, G., Trevi J. P., dan Sri W. (2008). Pencitraan Tomografi Atenuasi Seismik Tiga-Dimensi Gunung Guntur Menggunakan Metode Rasio Spektra. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol. 9 No. 2 November 2008: 81-100.
- Syahbana, D. K., Suantika, G., dan Solikhin, A. (2008). *Peta Kawasan Rawan Bencana Gempabumi Jawa Bagian Barat*. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Badan Geologi, Bandung, Jawab Barat.
- Thurber, C. (1983). Earthquake Location and Three-Dimensional Crustal Structure in the Coyote Lake Area, Central California. *Journal Geophys, Res.*, 88, B10, 8226-8236.
- Um, J., & Thurber, C. H. (1987). A Fast Algorithm For Two-Point Seismic Ray Tracing. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77; 972-986.
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull. Seism. soc. Am.*, Vol. 90, pp. 1353-1368.
- Wang, Z., M. L. Batse, A. M. Nur. (1990). Effect of Different Pore Fluids on Seismic Velocities in Rock. *Can. J. Explor. Geophys.*, Vol. 26 No. 1 & 2, P 104-112.
- Widiyantoro, S., & Van der Hilst, R.D. (1997). Mantle Structure Beneath Indonesia Inferred from High-Resolution Tomographic Imaging. *Journal Gephys International*, 130. 167-182.

BIODATA PENULIS



Sayyidatul Khoiridah, lahir di Gresik Jawa Timur pada tanggal 27 Desember 1991 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal yang pernah dilalui dimulai dari TK Muslimat NU 12 Mamba'ul Ulum Bedanten Bungah Gresik (1996-1998), MI Ma'arif Mamba'ul Ulum Bedanten Bungah Gresik (1998-2004), MTs Ma'arif Mamba'ul Ulum Bedanten Bungah Gresik (2004-2007), dan MA Ma'arif Mamba'ul Ulum Bedanten Bungah Gresik (2007-2010). Kemudian menempuh pendidikan S1 di Fisika FMIPA ITS Surabaya dengan mengambil bidang fisika bumi (2010-2014). Setelah lulus S1 dan mendapat gelar sarjana penulis melanjutkan pendidikan Magister pada tahun 2014 dengan bidang keahlian geothermal di Teknik Geomatika ITS Surabaya dengan bantuan dana dari beasiswa *Fresh Graduate*. Akhir kata, jika pembaca menemukan hal-hal yang ingin didiskusikan berhubungan dengan isi tesis, maka dapat menghubungi melalui email ke sayyidatulkhoiridah@gmail.com.