

**MONITORING AKTIVITAS DEFORMASI GUNUNG MERAPI  
BERDASARKAN ANALISIS DATA GPS (*Global Positioning System*)  
PRA DAN PASCA ERUPSI 2010 MENGGUNAKAN PEMODELAN  
MOGI DAN YOKOYAMA**

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**A. ATHIYAH ANSHARIYAH**

**NIM. 14640024**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2018**

**MONITORING AKTIVITAS DEFORMASI GUNUNG MERAPI  
BERDASARKAN ANALISIS DATA GPS (*Global Positioning System*)  
PRA DAN PASCA ERUPSI 2010 MENGGUNAKAN PEMODELAN  
MOGI DAN YOKOYAMA**

SKRIPSI

**Diajukan Kepada:**

**Jurusan Fisika  
Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang  
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**A. ATHIYAH ANSHARIYAH  
NIM.14640024**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2018**

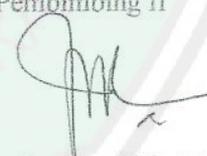
HALAMAN PERSETUJUAN

MONITORING AKTIVITAS DEFORMASI GUNUNG MERAPI  
BERDASARKAN ANALISIS DATA GPS (*Global Positioning System*) PRA  
DAN PASCA ERUPSI 2010 MENGGUNAKAN PEMODELAN MOGI DAN  
YOKOYAMA

SKRIPSI

Oleh:  
A. Athiyah Anshariyah  
NIM.14640024

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji  
Pada Tanggal 25 September 2018

<p>Pembimbing I</p>  <p><u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP.19650504 199003 1 003</p>	<p>Pembimbing II</p>  <p><u>Umaivaitus Syarifah, M.A</u> NIP.19820925 200901 2 005</p>
--	---



Menyetujui,  
Ketua Jurusan

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

HALAMAN PENGESAHAN

MONITORING AKTIVITAS DEFORMASI GUNUNG MERAPI  
BERDASARKAN ANALISIS DATA GPS (*Global Positioning System*)  
PRA DAN PASCA ERUPSI 2010 MENGGUNAKAN PEMODELAN  
MOGI DAN YOKOYAMA

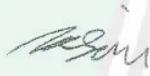
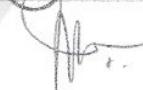
SKRIPSI

Oleh:

A. Athiyah Anshariyah

NIM.14640024

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan  
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)  
Pada Tanggal 24 Oktober 2018

Penguji Utama	<u>Irjan, M.Si.</u> NIP.19691231 200604 1 003	
Ketua Penguji	<u>Farid Samsu Hananto, M.T.</u> NIP.19740513 200312 1 001	
Sekretaris Penguji	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si.</u> NIP.19650504 199003 1 003	
Anggota Penguji	<u>Umayyatus Syarifah, M.A.</u> NIP.19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,  
Ketua Jurusan Fisika



  
Abdul Basid, M.Si  
19650504 199003 1 003

## HALAMAN PERNYATAAN

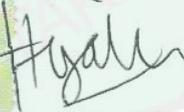
Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : A. Athiyah Anshariyah  
NIM : 14640022  
Jurusan : Fisika  
Fakultas : Sains dan Teknologi  
Judul Penelitian : Monitoring aktivitas deformasi Gunung Merapi berdasarkan analisis data GPS (*Global Positioning System*) pra dan pasca erupsi 2010 menggunakan pemodelan mogi dan yokoyama

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis merupakan hasil karya saya sendiri, bukan tulisan atau pikiran dan pengambil alihan data orang lain. Skripsi ini benar-benar hasil tulisan dan pikiran saya sendiri, kecuali dalam pengambilan sumber cuplikan dan mencantumkan pada daftar pustaka. apabila dikemudian hari terbukti skripsi ini hasil jiplakan, maka saaya bersedia menerima sanksi atas perbuatan saya tersebut.

Malang, 13 September 2018  
Yang Membuat Pernyataan



  
A. Athiyah Anshariyah  
NIM.14640024

## MOTTO

IT ALWAYS SEEMS IMPOSSIBLE UNTIL ITS DONE.  
SO WHY AREN'T WE KEEP WORKING HARD?



## HALAMAN PERSEMBAHAN

I dedicate this thesis to my very first love, my very first teacher in every aspects of life, the strongest supporters of mine since my first breath I took in this world, yet my everything:

**H. Muhammad Idrus, S.S., M.Pd.**

**Hj. Nurhaedah, S.Pd., M.Si.**

Ayah dan Ibu, without your support, I wouldn't be the person I am. You have been my main supporter throughout my career, and I owe everything to you both. There is no word beyond thank you for your endless love for me.



## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak akan tersusun dengan baik tanpa adanya bantuan dari pihak-pihak yang terkait. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan penulisan skripsi ini. Selanjutnya kami ucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Abdul Haris, M.Ag., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Ibu Dr. Sri Harini, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Bapak Drs. Abdul Basid, M.Si., selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang sekaligus sebagai Dosen Pembimbing I Skripsi.
4. Ibu Umaiatus Syarifah, M.A. selaku pembimbing II skripsi.
5. Bapak Irjan, M.Si dan Bapak Farid Samsu Hananto, M.T. selaku penguji I dan penguji II skripsi.
6. Ibu Sulistiyani selaku pembimbing di lapangan (BPPTKG Yogyakarta) yang telah banyak membantu dalam proses pembelajaran dan penyelesaian skripsi ini.
7. Orangtua serta keluarga yang selalu mendukung dan memberikan do'a serta semangat agar penulis senantiasa diberikan kemudahan dalam melaksanakan segala hal.
8. Sigma Nur Rismawati dan Indana Zulfa, sahabat yang telah membuat Kota Malang terasa menjadi rumah kedua setelah Kota Makassar, menjadi teman pertama di sini, serta terima kasih karena tidak pernah lelah menjadi teman cerita dan teman berjuang bersama dari semester pertama.
9. Sahabat, abang, ayah, dan motivator pribadi dalam satu sosok Nuralfin Anripa. Terima kasih banyak karena telah tanpa henti menasehati dan menyemangati saya juga dari semester pertama.
10. Andin Nur Fitrianti, Kiki Arista, Muhimmatul Azizah, dan Ismatul Fuada yang selalu menjadi tim hura-hura dalam keseharian saya. Terima kasih

karena sudah selalu ada mendampingi dan membantu dalam pengerjaan skripsi ini.

11. Teman-teman seperjuangan Geofisika 2014 dan juga Fisika 2014 yang selalu saling memberikan dukungan dan semangat. Terima kasih karena tidak pernah menyerah sebelum berhasil.
12. Adik tingkat Geofisika 2015, Ira Jam'iyatul Qalbiyah dan Karisma Dwi Wardani. Terima kasih karena selalu dan tidak pernah bosan mendengarkan keluh kesahku dalam pengerjaan skripsi ini.
13. Serta semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun secara tidak langsung demi kesuksesan dalam menyelesaikan skripsi ini.

Malang, 13 September 2018

Penulis



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah serta bimbingan-Nya kepada kami, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan nikmatnya berupa kesehatan, kesempatan, kekuatan, keinginan, serta kesabaran, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Proposal skripsi yang telah penulis susun ini berjudul “Monitoring Aktivitas Deformasi Gunung Merapi Berdasarkan Analisis Data GPS (*Global Positioning System*) Pra dan Pasca Erupsi 2010 Menggunakan Pemodelan Mogi Dan Yokoyama”. Sholawat serta salam penulis panjatkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, yang telah menuntun manusia dari zaman jahiliyah menuju zaman yang terang benderang, yang penuh dengan ilmu pengetahuan luar biasa saat ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak akan tersusun dengan baik tanpa adanya bantuan dari pihak-pihak yang terkait. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan penulisan skripsi ini.

Semoga amal baik mereka diterima sebagai suatu amal kebaikan untuk keridhoan-Nya semata-mata. Penulis juga mohon maaf apabila dalam penyusunan skripsi ini ada beberapa kekurangan dan kesalahan.

Malang, 13 September 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PENGAJUAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>MOTTO</b> .....	vi
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	vii
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	viii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	x
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>ABSTRAK</b> .....	xvi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	7
1.3 Tujuan Penelitian .....	8
1.4 Manfaat Penelitian .....	8
1.5 Batasan Masalah .....	8
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Tinjauan Umum Gunung Merapi .....	10
2.2 Geologi Regional Gunung Merapi .....	12
2.3 Sistem Vulkanis Gunung Merapi .....	16
2.4 Deformasi Gunung Api .....	19
2.5 Teori Elastisitas .....	24
2.6 Metode Deformasi .....	26
2.7 Metode GPS ( <i>Global Positioning System</i> ) .....	27
2.8 Sistem Telemetry .....	31
2.9 Kajian Lokasi Sumber Tekanan Magma (Model Mogi) .....	33
2.10 Penentuan Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma .....	37
2.11 Model Yokoyama .....	37
2.12 Hiposenter dan Episenter .....	38
2.13 Gelombang Seismik .....	39
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Waktu dan Tempat .....	42
3.2 Alat dan Bahan .....	43
3.3 Jenis Data .....	44
3.4 Metodologi Penelitian .....	45
3.4.1 Diagram Tahapan Penelitian .....	45
3.4.2 Diagram Alir Penelitian .....	47
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Analisis Deformasi Menggunakan Data GPS .....	49
4.1.1 Analisis Deformasi Stasiun GRWH .....	51
4.1.2 Analisis Deformasi Stasiun KLAT .....	53

4.1.3 Analisis Deformasi Stasiun DELS .....	55
4.2 Analisis Data Seismisitas Tahun 2010 .....	59
4.3 Analisis Vektor Pergeseran Menggunakan Model Yokoyama .....	64
4.4 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Model Mogi.....	66
4.4.1 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Stasiun GRWH.....	67
4.4.2 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Stasiun KLAT .....	71
4.4.3 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Stasiun DELS.....	75
4.5 Estimasi Volume Suplai Magma.....	79
4.6 Erupsi Gunung Merapi Tahun 2010.....	80
4.7 Gunung api dalam Perspektif Al-Qur'an .....	82
<b>BAB V PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan .....	88
5.2 Saran.....	88
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Peta Sebaran Gunung Api di Indonesia.....	2
Gambar 2.1	Peta Fisiografi Daerah Jawa Tengah dan Jawa Timur .....	13
Gambar 2.2	Model Sederhana Bawah Permukaan Gunung Merapi .....	19
Gambar 2.3	Gejala Deformasi pada Gunung Api Aktif.....	24
Gambar 2.4	Skema model Mogi dan perubahan kemiringan yang terekam .....	36
Gambar 3.1	Lokasi Pos Pengamatan Terhadap Puncak Gunung Merapi .....	42
Gambar 3.2	Diagram Tahapan Penelitian .....	45
Gambar 3.3	Diagram Alir Penelitian .....	47
Gambar 4.1	Lokasi Stasiun Pengamatan Lapangan di Gunung Merapi .....	50
Gambar 4.2	Perubahan Panjang <i>Baseline</i> Stasiun GRWH Periode 2009-2011 .....	52
Gambar 4.3	Perubahan Panjang <i>Baseline</i> Stasiun KLAT Periode 2009-2011 .....	54
Gambar 4.4	Perubahan Panjang <i>Baseline</i> Stasiun DELS Periode 2009-2011 .....	56
Gambar 4.5	Perbandingan Panjang <i>Baseline</i> antara Stasiun DELS, KLAT, dan GRWH .....	57
Gambar 4.6	Gelombang Seismik Saat Terjadi Gempa .....	60
Gambar 4.7	Gelombang Seismik Saat Tidak Terjadi Gempa.....	61
Gambar 4.8	<i>Output</i> Hypoellips Berupa Garis Lintang Dan Garis Bujur .....	62
Gambar 4.9	<i>Output</i> Aplikasi Hypoellips Berupa Kedalaman Hiposenter .....	62
Gambar 4.10	Letak Hiposenter Berdasarkan <i>latitude</i> (Garis Lintang) .....	63
Gambar 4.11	Letak Hiposenter Berdasarkan <i>longitude</i> (Garis Bujur).....	63
Gambar 4.12	Hasil 3 Dimensi Letak Hiposenter Gempa.....	64
Gambar 4.13	Vektor Pergeseran Arah Deformasi Gunung Merapi.....	66
Gambar 4.14	<i>Cross Section</i> Barat-Timur Gunung Merapi .....	70
Gambar 4.15	<i>Cross Section</i> Selatan-Utara Gunung Merapi .....	70
Gambar 4.16	Model 3 Dimensi Gunung Merapi dan lokasi sumber tekanan magma berdasarkan data stasiun GRWH .....	71
Gambar 4.17	<i>Cross Section</i> Barat-Timur Gunung Merapi .....	74
Gambar 4.18	<i>Cross Section</i> Selatan-Utara Gunung Merapi .....	74
Gambar 4.19	Model 3 Dimensi Gunung Merapi dan lokasi sumber tekanan magma berdasarkan data stasiun KLAT .....	75
Gambar 4.20	<i>Cross Section</i> Barat-Timur Gunung Merapi .....	78
Gambar 4.21	<i>Cross Section</i> Selatan-Utara Gunung Merapi .....	78
Gambar 4.22	Model 3 Dimensi Gunung Merapi dan lokasi sumber tekanan magma berdasarkan data stasiun DELS.....	79
Gambar 4.23	Sebaran Panas Saat Terjadi Erupsi di Gunung Merapi .....	82

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Lokasi Data Pengamatan GPS .....	43
Tabel 4.1 Perubahan Panjang <i>Baseline</i> .....	58
Tabel 4.2 Parameter Model Mogi Stasiun GRWH .....	68
Tabel 4.3 Parameter Model Mogi Stasiun KLAT .....	72
Tabel 4.4 Parameter Model Mogi Stasiun DELS.....	76



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Perubahan Panjang *Baseline* Tiap Stasiun  
Lampiran 2 Data Kedalam Hiposenter Gempa



## ABSTRAK

Anshariyah, A. Athiyah. 2018. **Monitoring Aktivitas Deformasi Gunung Merapi Berdasarkan Analisis Data GPS (*Global Positioning System*) Pra dan Pasca Erupsi 2010 Menggunakan Pemodelan Mogi Dan Yokoyama**. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (1) Drs. Abdul Basid, M.Si. (II) Umaiatus Syarifah, M.A.

---

---

**Kata Kunci:** Gunung Merapi, Survei GPS, Pemodelan Gunung api.

Gunung Merapi adalah salah satu gunung api aktif bertipe strato-volcano yang terletak di antara Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). VEI (*Volcano Explosivity Index*) menunjukkan bahwa erupsi Gunung Merapi dimulai pada tanggal 26 Oktober 2010. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan lokasi dari sumber tekanan magma dan untuk menentukan jumlah volume suplai magma yang ada di dalam tubuh gunung periode 2009 hingga 2011. Terdapat delapan stasiun pengamatan GPS (*Global Positioning System*) yang terpasang di sekitar Gunung Merapi. Menjelang terjadinya erupsi, data GPS menunjukkan pemanjangan *baseline* (jarak antara puncak dengan stasiun pemantauan). Hal tersebut menunjukkan bahwa Gunung Merapi telah mengalami fase inflasi yang kemudian akan mengalami fase deflasi beberapa bulan setelah erupsi terjadi. Estimasi lokasi sumber tekanan magma dan jumlah volume suplai magma dihitung menggunakan model Mogi dan Yokoyama. Hasil menunjukkan bahwa lokasi sumber tekanan magma berada pada kedalaman 1.229 km di bawah permukaan laut untuk stasiun KLAT, 1.252 km di bawah permukaan laut untuk stasiun GRWH, dan 1.188 km di bawah permukaan laut untuk stasiun DELS. Sedangkan jumlah volume suplai magma sebelum terjadinya erupsi sebesar 15 juta m<sup>3</sup>. Setelah erupsi terjadi, volume suplai magma berkurang menjadi 11.3 juta m<sup>3</sup>. Berdasarkan penelitian ini, dapat diketahui bahwa erupsi pada Gunung Merapi dikontrol oleh tekanan sumber yang berasal dari aktivitas internal Gunung Merapi.

## ABSTRACT

Anshariyah, A. Athiyah. 2018. **Monitoring of Merapi Volcano Deformations Based on GPS (Global Positioning System) Data Before and After Eruption By Using Mogi and Yokoyama Modelling**. Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University of Malang. Supervisors: (1) Drs. Abdul Basid, M.Si. (II) Umaiatus Syarifah, M.A.

---

**Keywords:** Merapi Volcano, GPS Survey, Volcano Modelling.

Merapi Volcano is an active strato-volcano located on the border between Central Java and Yogyakarta Province, Indonesia. A VEI (Volcano Explosivity Index) eruption of Merapi began on 26th October 2010. This research aims to determine the location of the source of pressure and magma supply volume at merapi volcano in period 2009 to 2011. There are eight GPS (Global Positioning System) stations installed around merapi volcano. Near the eruption, GPS shown a lengthening of the baselines between the summit and the monitoring stations, it means that merapi has already entered into inflation process and begin to deflate a month after the eruption occur. Estimation of the location of magma pressure source and magma supply volume have been done using Mogi and Yokoyama modelling. The result shown the depth of pressure source before eruption is around 1.229 km above the sea surface for KLAT station, 1.252 km above the sea surface for GRWH station, and 1.118 km above the sea surface for DELS station. Magma supply volume before eruption is approximately 15 million m<sup>3</sup>. After the eruption, magma supply volume is decreasing approximately 11.3 million m<sup>3</sup>. Based on this research, it is known that erupton is controlled by the pressure source from internal activities of merapi volcano.

## ملخص البحث

أنصارية. 2018. عطية أ ,مراقبة النشاط التثوه لجبل ميرابي القائم على تحليل البيانات باستخدام 2010 ثورة وبعد قبل) العالمي المواقع تحديد نظام (GPS البحث. ويوكوياما موجي النمذجة الجامعي الفيزياء قسم ، العلوم كلية والتكنولوجيا، مالانج الحكومية لإسلامية إبراهيم مالك مولانا جامعة الباسط عبد (1): المشرف، الماجستير، (2) وأمىة الشريفة، الماجستير

الكلمات المفتاحية:ميرابي جبل ، GPS المسح ، النمذجة البركان

جبل ميرابي هو واحد من البراكين النشطة التي لها نوع ستراتو الذي فولكانو- يدل (VEI (Volcano Explosivity Index). ويوجياكرتا الوسطى جاوة بين يوقع أكتوبر 26 من بدأ ميرابي جبل بركان ثوران أن إلى، لان البحث هذا يهدف 2010 في يوجد الذي الصهارة المعروض حجم ويحديد الصهارة ضغط مصدر موقع يحدد الجسم الجبل بين عامي 2011 . و 2009 وهناك ثماني محطات المراقبة GPS ( ثورة عند ميرابي جبل محيط في توجد التي) العالمي المواقع دتحدد نظام، ظهرت GPS بيانات إطالة خط الأساس أن على دل). المراقبة ومحطة الذروة بين المسافة) م إلى ستواجه التي تضخم مرحلة شهد قد ميرابي جبل رحلة انكماشية بعد عدة أشهر من اندلاع الثوران المعروض حجم وإجمالي رةالصها ضغط مصدر موقع تقدير . عن الموقع أن النتائج وأظهرت. ويوكوياما موجي نموذج باستخدام احتسب الصهارة المعروض وحجم السطح تحت كيلومتر 1.229 عمق في هو الصهارة ضغط مصدر مليون 15 هو الصهارة<sup>3</sup>بعد وقوع الثوران، حول الموقع عن مصدر ضغط الصهارة إلى 11.3 إلى الصهارة المعروض حجم وبلغ السطح تحت كيلومتر 1.188 مليون م.<sup>3</sup>بناء على هذا البحث، حكم ثوران جبل ميرابي بضغط المصدر الذي يستند من الأنشطة الداخلية لجبل ميرابي.

# **BAB I PENDAHULUAN**

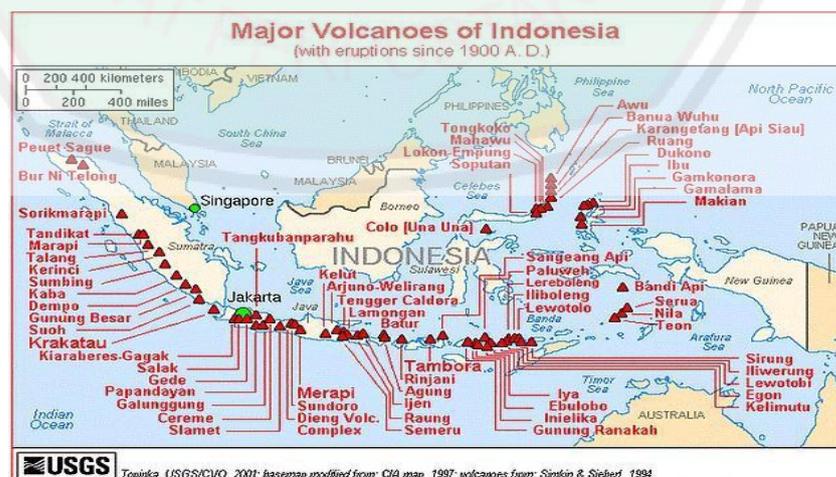
## **1.1 Latar Belakang**

Vulkanologi merupakan ilmu yang sangat penting untuk dipelajari dan diterapkan dalam lingkungan manusia. Ilmu ini sangatlah kompleks karena perkembangannya sangat berkaitan dengan kemajuan ilmu pengetahuan yang lainnya, seperti petrologi, petrokimia, geologi, geofisika, termodinamika, geokimia, seismologi, dan ilmu pengetahuan lainnya. Salah satu bidang dari kegiatan vulkanologi adalah pemantauan terhadap gunung api. Pemantauan atau *monitoring* gunung api dapat diartikan sebagai usaha pengawasan terhadap manifestasi gunung api dengan menggunakan indera manusia dan instrumen seperti menggunakan peralatan geofisika.

Kepulauan Indonesia merupakan hasil pertemuan dari lempeng-lempeng litosfera yang disebut dengan lempeng tektonik. Lempeng tektonik yang bersifat samudra, yaitu Lempeng Tektonik Hindia-Australia yang bergerak dari Selatan ke Utara dan dari Barat Daya ke Timur Laut, Lempeng Pasifik yang bergerak dari arah Barat, dan lempeng yang bersifat benua yaitu Lempeng Eurasia yang relatif bergerak dari Utara ke Selatan. Pada bentuk pertemuan antara dua lempeng tektonik yang bersifat samudra dengan benua, maka yang mempunyai sifat fisik yang lebih berat akan berada di bawah yang ringan. Apabila lempeng tektonik tersebut sudah mencapai zona kerak bumi kedalaman kurang lebih 120 km dari permukaan bumi, maka akan lebur menjadi magma (sebagai proses anektesi magma) dengan temperatur 4000°C. Magma tersebut akan bergerak ke permukaan

melalui rekahan-rekahan yang terbentuk akibat benturan pertemuan dan muncul ke permukaan gunung api yang aktif, sebagaimana beberapa gunung api di Pulau Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, dan Kepulauan Maluku.

Indonesia memiliki jumlah gunung api paling banyak di dunia. Di Indonesia tercatat memiliki 130 gunung api yang merupakan 10% dari jumlah keseluruhan dunia. Dari 130 gunung api tersebut, 17 di antaranya masih aktif. Cincin Api Pasifik atau Lingkaran Api Pasifik merupakan daerah yang sering mengalami gempa bumi dan letusan gunung api yang mengelilingi cekungan Samudra Pasifik. Dengan cakupan wilayah sepanjang 40.000 km daerah ini berbentuk tapal kuda. Lingkaran Api ini terdiri atas 452 gunung api dimana sekitar 75% menjadi rumah bagi gunung api dan tidak aktif. Sekitar 90% dari gempa bumi yang terjadi dan 81% dari gempa bumi terbesar terjadi di sepanjang Cincin Api ini. Daerah gempa berikutnya (5%–6% dari seluruh gempa dan 17% dari gempa terbesar) adalah sabuk *Alpide* yang membentang dari Jawa ke Sumatera, Himalaya, Mediterania hingga ke Atlantika.



Gambar 1.1 Peta Sebaran Gunung api di Indonesia  
(<https://dreamindonesia.me/tag/peta-sebaran-gunung-berapi-di-indonesia/>)

Gunung Merapi merupakan salah satu gunung paling aktif yang ada di Indonesia. Gunung api ini terletak di perbatasan Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan letak geografi  $7^{\circ} 32.5'$  LS dan  $110^{\circ} 26.5'$  BT dengan ketinggian 2911 meter di atas permukaan air laut dan tinggi di atas dataran Yogyakarta 2800 meter (Atlas Top, 1938:21). Terletak di titik silang dua buah sesar yang penting dilihat dari sudut regional, yakni sebuah sesar transversal yang memisahkan Jawa Timur dan Jawa Tengah dan sebuah sesar longitudinal yang melewati Pulau Jawa (Neumann Van Padang, 1951). Gunung Merapi merupakan bagian dari deretan gunung api yang menurut perkembangannya dimulai dari Utara ke Selatan yaitu Gunung Ungaran, Gunung Suropati, Gunung Telomoyo, Gunung Merbabu, dan terakhir Gunung Merapi di ujung selatan.

Letusan dari gunung api merupakan suatu fenomena alam yang tidak dapat dikendalikan oleh manusia. Gunung api yang meletus dapat menimbulkan kerusakan, baik secara materil maupun jiwa manusia yang tinggal di daerah sekitar gunung api. Usaha yang dilakukan dalam penanggulangan bencana letusan gunung api adalah dengan memantau aktivitas gunung api tersebut secara terus-menerus, sehingga apabila gunung api mengalami peningkatan aktivitas magma, maka pihak yang berwenang akan mengeluarkan peringatan berupa waspada atau bahkan awas.

Letusan-letusan kecil terjadi tiap 2-3 tahun, dan yang lebih besar sekitar 10-15 tahun sekali. Letusan-letusan Merapi yang dampaknya besar antara lain di tahun 1006, 1786, 1822, 1872, dan 1930. Letusan besar pada tahun 1006 membuat seluruh bagian tengah Pulau Jawa diselubungi abu. Letusan tersebut diduga

menyebabkan Kerajaan Mataram Kuno harus berpindah ke Provinsi Jawa Timur. Letusan di tahun 1930 menghancurkan 3 desa, sedangkan letusan yang terjadi pada tahun 2001-2003 berupa aktivitas tinggi yang berlangsung terus-menerus. Sebagaimana Allah SWT berfirman dalam surah an-Naml (27) ayat 88:

وَتَرَى الْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً ۖ وَهِيَ ثَمْرٌ مِّمَّ السَّحَابِ صُنْعَ اللَّهِ الَّذِي أَتَقَنَ كُلَّ شَيْءٍ إِنَّهُ خَبِيرٌ  
بِمَا تَفْعَلُونَ (٨٨)

“Dan kamu lihat gunung-gunung itu, kamu sangka Dia tetap di tempatnya, padahal ia berjalan sebagai jalannya awan....” (Q.S. an-Naml [27]: 88).

Allah SWT menyampaikan firmanNya sebagai petunjuk atau tanda-tanda dengan kata kiasan yang memiliki makna luas. Menurut tafsir Al Maraghi kata (تمر) digunakan dalam arti guncangan dan bergetar, sedang ia (langit) tetap pada tempatnya. (المر) pada asalnya berarti bolak-balik, pulang pergi dan kadang diartikan berjalan (Mushthafa, 1989).

Berdasarkan tafsir tersebut, ayat di atas bermakna bahwa gunung itu tidak diam di tempatnya, tetapi bergerak secara terus-menerus. Menurut para pakar Geologi, menyatakan bahwa gerakan gunung-gunung ini disebabkan pergerakan lempeng tektonik yang berada di bawahnya. Lempengan tersebut bergerak di atas lapisan magma yang lebih rapat, sehingga sering terjadi tabrakan yang membentuk beberapa lipatan antar lempeng yang menyebabkan terjadinya gempa bumi. Selanjutnya kejadian tersebut bisa mempengaruhi pola struktur yang berkembang di daerah tersebut.

Deformasi dapat memberikan informasi mengenai perubahan bentuk permukaan tubuh gunung api terkait dengan kegiatan vulkanik utamanya disebabkan oleh perubahan tekanan yang terjadi dalam kantong magma dan

migrasi magma. Pemantauan deformasi salah satunya dilakukan menggunakan tiltmeter. Tiltmeter merupakan alat pengukur deformasi gunung api berupa kemiringan sudut tubuh gunung api dengan satuan radian dan berupa pengembangan (inflasi) atau pengempisan (deflasi) tubuh gunung. Data tilt merupakan salah satu informasi untuk memahami mekanisme fisis di dalam tubuh Merapi seperti pasokan (*magma supply*) volume magma dan kedalaman sumber tekanan. Kajian mengenai sumber tekanan dan suplai magma dapat membantu dalam memahami karakteristik mekanisme internal yang diharapkan mampu membantu dalam prediksi terjadinya erupsi dan mitigasi bencana gunung api (Kusumastuti, 2014).

Penelitian mengenai volume suplai magma dan perkiraan lokasi sumber tekanan melalui metode deformasi di Gunung Merapi pernah dilakukan oleh Beauducel dan Cornet tahun 1999 menggunakan alat GPS dan tiltmeter. *Displacement* rata-rata yang terukur oleh GPS pada enam titik pengamatan adalah 6,5 cm. Perubahan sudut kelerengan yang terukur oleh tiltmeter komponen tangensial adalah  $11,1 \pm 0,7 \mu\text{rad}$  dan  $0,9 \pm 0,4 \mu\text{rad}$  untuk komponen radial. Penentuan sumber tekanan dan volume suplai magma menggunakan model Mogi dan *horizontal ellips*. Sumber tekanan diperkirakan sekitar  $8,5 \pm 0,4$  km di bawah puncak Gunung Merapi dan berjarak  $2 \pm 0,4$  km ke timur dari Merapi dengan volume sebesar  $11 \pm 2$  juta.m<sup>3</sup>. Penentuan parameter sumber mengacu pada penelitian Beauducel (1998), bahwa untuk estimasi radius kantong magma adalah 850 m, radius dapur magma 1200 m, serta (Modulus Young) sekitar 30 GPa,

sedangkan untuk parameter mengacu pada erupsi 2010 dengan skala VEI 4 dimana mengeluarkan material erupsi sebesar  $\pm 100$  juta  $m^3$ .

Penelitian mengenai estimasi sumber tekanan dan volume suplai magma Gunung Merapi berdasarkan data tiltmeter periode 2010-2012 telah dilakukan oleh Kusumastusi (2014). Pada penelitian tersebut berdasarkan model Mogi diperoleh lokasi sumber tekanan penyebab deformasi berada pada kedalaman 2155 meter di bawah puncak Merapi berjarak 120 meter ke timur dari puncak Merapi. Hasil deformasi tiltmeter periode 2011-2012 di Gunung Merapi menunjukkan adanya proses inflasi dengan volume suplai magma sebesar 16 juta  $m^3$ .

Aktivitas Gunung Merapi dapat membawa dampak positif dan negatif bila ditinjau secara ekonomi. Dampak positif Gunung Merapi yaitu dapat memberikan potensi sumber daya alam yang dapat dikelola dengan baik, seperti material pasir, dan batu. Sedangkan dampak negatif dari aktivitas Merapi saat meningkat dapat menjadi sumber bencana yang merugikan.

Untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh Gunung Merapi maka diperlukan pemantauan kegiatan gunung api sebagai langkah awal dalam mitigasi bencana alam. Metode yang dapat digunakan dalam memantau aktivitas gunung api adalah dengan menggunakan tiltmeter, EDM (*Electronics Distance Measurements*), GPS (*Global Positioning System*), dan seismik. Metode deformasi merupakan metode geofisika yang mengukur perubahan bentuk fisik suatu medium yang diakibatkan oleh gaya-gaya yang mengenainya. Salah satu metode pemantauan deformasi adalah dengan pengukuran menggunakan tiltmeter,

yaitu dengan mengetahui perubahan sudut permukaan tanah gunung apabila terjadi peningkatan atau penurunan aktivitas.

Pengamatan deformasi menggunakan GPS merupakan salah satu metode yang sangat efektif karena dapat mengamati perubahan bentuk permukaan gunung secara kontinyu, GPS juga tidak memerlukan keterlihatan antar titik pengamatan sehingga posisi titik GPS dapat tersebar dan menggambarkan bentuk gunung api secara keseluruhan, dan yang terakhir GPS dapat menghasilkan data dengan ketelitian hingga orde mm (millimeter) dengan menggunakan metode *Differential Possiting*.

Pada penelitian kali ini metode yang digunakan untuk mengamati besarnya deformasi dari Gunung Merapi adalah metode GPS. Didapatkan data GPS dan dilakukan pengolahan data menggunakan *software* GAMIT/GLOBK untuk mengetahui posisi, arah, dan besar pergeseran suatu titik pengamatan secara kontinyu. Dari nilai pergeseran yang sudah didapatkan kemudian dapat digunakan untuk mencari titik pusat tekanan magma dan besarnya volume suplai magma yaitu dengan menggunakan pemodelan Mogi dan Yokoyama. Hasil yang diperoleh tersebut dapat digunakan untuk mengetahui aktivitas dan letak kantong magma Gunung Merapi.

## **1.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana deformasi permukaan Gunung Merapi sebelum dan sesudah terjadinya erupsi tahun 2010?
2. Dimana posisi sumber tekanan magma Gunung Merapi sebelum dan sesudah terjadinya erupsi tahun 2010?

3. Berapa besar volume kantung Magma Gunung Merapi sebelum dan sesudah erupsi tahun 2010?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Untuk mengetahui deformasi yang terjadi di permukaan Gunung Merapi sebelum dan sesudah terjadinya erupsi tahun 2010.
2. Untuk mengetahui posisi sumber tekanan Gunung Merapi sebelum dan sesudah terjadinya erupsi tahun 2010.
3. Untuk mengetahui besarnya volume kantung Magma Gunung Merapi sebelum dan sesudah erupsi tahun 2010.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

1. Memberikan informasi indikator aktivitas signifikan Gunung Merapi dalam upaya mitigasi bencana.
2. Sebagai sumber informasi selanjutnya untuk penelitian gunung api, bencana, dan lain sebagainya.

### **1.5 Batasan Masalah**

1. Data yang digunakan adalah data GPS (*Global Positioning System*) tahun 2009-2011.
2. Data yang digunakan merupakan data GPS dari Stasiun BPPTKG, DELS, GRWH, dan KLAT.
3. Penentuan lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi menggunakan pemodelan Yokoyama.

4. Penentuan besarnya volume suplai magma Gunung Merapi menggunakan pemodelan Mogi.



## **BAB II** **TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Tinjauan Umum Gunung Merapi**

Gunung Merapi merupakan salah satu gunung api yang paling aktif di Indonesia atau dapat dikatakan tidak pernah tidur atau beristirahat. Dalam aktivitasnya, gunung merapi sering berpotensi membahayakan lingkungan sekitar termasuk makhluk hidup di sekitar Gunung Merapi (Bemmelen, 1949).

Dalam sejarahnya, Gunung Merapi dapat dibagi menjadi empat tahap pembentukan (Berthommier, 1990):

1. Tahap Pra Merapi (lebih dari 400.000 tahun yang lalu)
2. Tahap Merapi Tua (60.000-8000 tahun yang lalu)
3. Tahap Merapi Pertengahan (8000-2000 tahun yang lalu)
4. Tahap Merapi Baru (2000 sampai sekarang)

Gunung Merapi di Jawa Tengah merupakan gunung api paling aktif di Indonesia. Letak geografisnya  $7^{\circ} 32.5'$  LS,  $110^{\circ} 26.5'$  BT dengan ketinggian 2953,244 m dan merupakan gunung andesitik berbentuk kerucut dengan kubah lava dan solfatara. Aktivitas yang telah berlangsung selama 50.000 tahun ini mengeluarkan produk material dengan rata-rata  $1.000.000 \text{ m}^3/\text{tahun}$  (Berthommier, 1990). Gunung Merapi merupakan bagian dari deretan gunung api yang menurut perkembangannya dimulai dari utara ke selatan yaitu Gunung Ungaran, Gunung Suropati, Gunung Telomoyo, Gunung Merbabu dan terakhir Gunung Merapi di ujung selatan.

Letusannya dicirikan oleh pertumbuhan kubah lava yang disusul oleh letusan paroximal yang disertai aliran piroklastik berupa lelehan, lava dan awan

panas. Awan panas tipe Merapi ada 2 yaitu, awan panas guguran dan awan panas letusan. Awan panas guguran ini terjadi akibat dari guguran lava pijar yang longsor karena pengaruh gaya berat dan kemiringan, sedangkan awan panas letusan berasal dari debris yang meletus vertikal. Suhu dari awan panas berkisar antara 4000°C–6000°C dan kecepatannya mencapai 60-70 Km/jam. Aktivitas Gunung Merapi dicirikan oleh range frekuensi letusan dengan durasi waktu 1-5 tahun (Berthommier, 1990). Allah SWT berfirman:

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً ۖ فَأَخْرَجْنَا بِهِ ثَمَرَاتٍ بِحَثٍّ مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهَا وَمِنَ الْجِبَالِ جُدَدٌ  
بَيضٌ وَحُمْرٌ مُخْتَلِفٌ أَلْوَانُهَا وَغَرَابِيبُ سُودٍ (٢٧)

*“Tidakkah kamu melihat bahwasanya Allah menurunkan hujan dan langit lalu kami hasilkan dengan hujan itu buah-buahan yang beraneka macam jenis. Dan di antara gunung-gunung itu ada jalur-jalur putih dan merah yang beraneka macam warnanya dan ada (pula) yang hitam pekat.” (Q.S. Fathir: 27)*

Gunung adalah kumpulan massa sangat besar yang terdiri dari bebatuan yang ada di atas sepetak besar tanah dan terdiri atas materi yang sama pula. Atau dengan kata lain, gunung adalah sekumpulan besar batu yang menimpa sekumpulan batu lainnya di permukaan bumi. Inilah pengertian gunung yang selama ini diketahui oleh manusia (Ahmad, 2011).

Dari ayat di atas, dapat kita ketahui secara ilmiah bahwa perbedaan warna pada gunung disebabkan oleh perbedaan materi yang dikandung oleh batuan gunung tersebut. Jika materinya besi, maka warna dominannya adalah merah. Jika materi batuanya adalah batu bara, maka warna dominannya adalah hitam. Jika materi batuanya perunggu, maka gunung tersebut berwarna kehijauan, dan seterusnya. Materi-materi ini oleh para ahli geologi dinamakan dengan magma. Karena kemunculan magma itu berasal dari kedalaman yang berbeda, maka

kandungannya akan berbeda pula. Magma yang berproses dari kedalaman yang berbeda pada akhirnya akan mengkristal dan membentuk gundukan-gundukan atau gunung-gunung yang beraneka ragam warna dan materinya. Demikianlah sebenarnya kesatuan hukum Allah SWT. Meskipun bentuknya beraneka ragam, tetapi berasal dari satu hal yang sama.

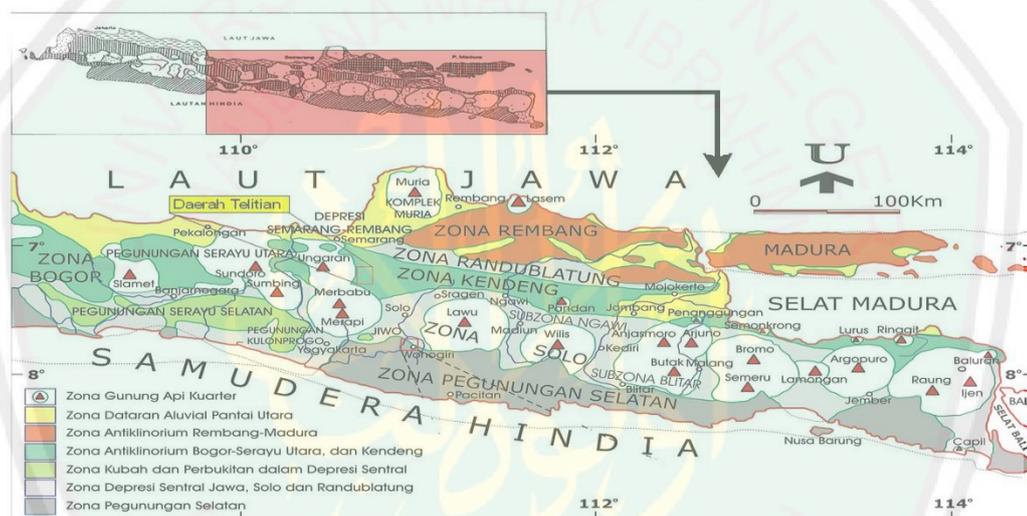
## 2.2 Geologi Regional Gunung Merapi

Gunung Merapi mempunyai ketinggian 2.930 mdpl pada tahun 2010, merupakan gunung teraktif di Indonesia. Pada sisi selatan berada di daerah Kabupaten Sleman, Yogyakarta, di sisi barat berada di daerah Kabupaten Magelang, di sisi timur berada di Kabupaten Boyolali, dan di sisi tenggara berada di Kabupaten Klaten.

Gunung Merapi dibagi menjadi dua, yaitu Merapi Tua dan Merapi Muda. Kedua gunung merapi tersebut dapat dibedakan morfologi dan litologinya, karena masa pembentukannya berbeda. Gunung Merapi Tua telah aktif sejak akhir dari Pleistosen akhir, sedangkan Merapi Muda aktif sejak tahun 1006. Untuk litologi Merapi Muda cenderung bersifat intermediet, sedangkan litologi Merapi Tua lebih cenderung bersifat basa. Untuk morfologinya, Merapi Muda yang terletak di sebelah barat, memiliki pola kontur radial yang menunjukkan gunung api stadium muda, belum menunjukkan erosi lanjut, sedangkan untuk Merapi Tua tampak memiliki pola kontur yang menunjukkan stadium dewasa, terlihat dari banyaknya proses erosi yang terjadi dan terpotong oleh sesar. Sehingga Van Bemmelen (1949) dapat menyimpulkan bahwa tubuh Merapi Tua terpotong-potong oleh sesar-sesar turun yang mengarah ke barat, yang kemudian tertutup oleh Merapi

Muda pada *hanging wall*-nya. Hal ini terkait dengan pembentukan Perbukitan Gendol. Karena puncak Gunung Merapi pada bagian utara dan timur dikelilingi oleh formasi Merapi Tua maka mulut kubah terbuka ke arah barat daya, hal ini menyebabkan kegiatan erupsi Gunung Merapi menuju ke arah barat daya.

Van Bammelen (1949) dalam bukunya "*The Geology of Indonesia*" fisiografi Jawa menjadi 7 zona. Seperti pada gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1 Peta Fisiografi Daerah Jawa Tengah dan Jawa Timur  
(<http://hmgj.or.id/geologi-regional-zona-kendeng/geologi/>)

Daerah Istimewa Yogyakarta terletak pada 250 km dari pertemuan lempeng di selatan Jawa yang mengalami efek adanya gempa yang diakibatkan dari pergeseran lempeng-lempeng Eurasia dan India-Australia. Pergeseran kedua lempeng tersebut berpengaruh pada daerah Jawa bagian selatan termasuk adanya fenomena timbulnya Gunung Merapi.

Gunung Merapi secara tektonik merupakan bagian dari sistem subduksi Sumatera, Jawa, Bali, dan Lombok (Hamilton, 1979). Sistem subduksi tersebut merupakan batas aktif lempeng yang menghasilkan magma basalt andesit dan

gempa yang relatif intensif. Magma andesit yang didapatkan akan menghasilkan gas yang besar, sehingga letusan eksplosif dapat terjadi.

Gunung Merapi termasuk dalam gunung api tipe strato yang mempunyai kekentalan magma yang tinggi (Reksowirogo, 1979). Kekentalan magma yang tinggi ini berpengaruh terhadap bentukan suatu gunung api. Bentuk Gunung Merapi dapat dibedakan menjadi 2 bagian, yaitu bagian Gunung Merapi yang lebih tua dan kerucut Gunung Merapi aktif (Bammelan, 1949).

Secara fisiografi Gunung Merapi berada di zona tengah (Van Bammelan, 1949). Menurut para ahli gunung ini muncul pada titik pertemuan antara dua deret gunung api yaitu Ungaran-Telemoyo-Merbabu-Merapi dan Lawu-Merapi-Sumbing-Sundoro-Slamet. Merapi juga terletak pada pertemuan antara Sesar Semarang (membujur utara-selatan) dan Sesar Solo (membujur Barat-Timur) (Laporan Tahunan P3G 1980/1981, dikutip dari Kusumayudha, 1988).

Secara tektonik Merapi terbentuk karena leburnya sebagian kerak Samudera Hindia akibat terjadinya tumbukan antara lempeng Eurasia-Asia dan lempeng Hindia-Australia di selatan Pulau Jawa. Kerak Hindia-Australia yang lebur itu selanjutnya terdorong ke atas dan dirupsikan antara lain melalui gunung ini (Hamilton, 1979). Magma yang memasok kegiatan Merapi merupakan hasil proses peleburan yang berlangsung sejak Plio-Pleistosen sekitar dua juta tahun yang lalu.

Sudah sering dijabarkan, bahwa Gunung Merapi mempunyai dapur magma yang sangat dangkal, magmanya sangat kental, dan tekanan gasnya sangat lemah. Hal ini menyebabkan kegiatannya hanya menghasilkan letusan-letusan kecil dan

timbunan lava membentuk kubah pada lubang kepundannya (Kusumadinata, 1979).

Gunung Merapi mengalami evolusi vulkanik yang semula magma Merapi bersifat encer (basa) dengan tipe erupsi efusif. Kemudian sifat magma berkembang menjadi lebih kental (asam) dengan tipe erupsi campuran efusif dan eksplosif. Pada perkembangan terakhir Gunung Merapi menghasilkan magma yang sangat kental sehingga fase efusif kegiatan gunung ini hanya menghasilkan kubah dan sumbat lava (Kusumayudha, 1988).

Secara morfologi tubuh Gunung Merapi dapat dibagi menjadi empat bagian yaitu Kerucut Puncak, Lereng Tengah, Lereng Kaki, dan Dataran Kaki. Kerucut Puncak dibangun oleh endapan yang lebih muda berupa lava dan piroklastik. Satuan lereng tengah dibangun oleh endapan lava piroklastik dan lahar. Lereng Kaki dan Dataran Kaki tersusun oleh endapan piroklastik, lahar, dan aluvial (Sari, 2007).

Bagian lereng barat Merapi merupakan daerah aliran guguran dan piroklastik. Daerah ini merupakan daerah terbuka karena sering tertanda awan panas. Lereng Kaki Merapi tersusun dari pegunungan-pegunungan radial yang diselingi dengan hulu-hulu sungai. Beberapa sungai penting yang ada di lereng barat dari selatan ke utara yaitu Kali Krasak, Brebeg, Kali Putih, Kali Lamat, dan Kali Senowo. Alur-alur pada sungai tersebut yang sering mendapat tambahan material produk letusan.

### 2.3 Sistem Vulkanis Gunung Merapi

Perilaku dan karakteristik Gunung Merapi ditentukan oleh tiga faktor utama, yaitu sifat magma, struktur internal di dalam gunung api, dan besar suplai magma dari kedalaman (Nandaka, 2006). Sifat magma yang mempengaruhi sistem vulkanis Gunung Merapi meliputi komposisi, tingkat kekentalan, kandungan air dan kandungan gas. Sedangkan struktur internal di dalam gunung api sangat berperan dalam menentukan bagaimana gunung api tersebut bertingkah laku termasuk di dalamnya menyangkut bagaimana pipa magma dan posisi dapur magma (Nandaka, 2006).

Van Bemmelen (1949) membuat model bawah permukaan pertama dari Gunung Merapi berupa tumbukan subduksi antara lempeng Samudra Indo-Australia yang menyusup di bawah lempeng Eurasia mencapai kedalaman 60–150 km dan meleleh akibat pengaruh temperatur dan tekanan, proses ini akan menghasilkan magma asal (magma primitif). Magma yang keluar akan menjadi aliran lava dan menempati posisi transisi antara lava cair dan sumbat lava yang bergantung pada tempat keluar lava. Lava yang keluar dengan posisi miring akan menjadi lidah lava, sedangkan yang keluar di tempat datar akan menjadi kubah lava (*lava dome*).

Berdasarkan data kegempaan Merapi, terlihat bahwa gempa vulkanik hanya terjadi tidak jauh dari puncak ke bawah secara vertikal dan tidak tersebar luas. Dari data BPPTKG, pada kedalaman 1,5-2 km di bawah puncak tidak dijumpai adanya hiposenter gempa begitu pula pada kedalaman >5 km. Gempa vulkanik tektonik memerlukan medium yang solid. Zona-zona yang tidak terdapat

hiposenter diperkirakan merupakan zona lunak (*ductile*) karena adanya kehadiran magma. Zona lembek pada kedalaman 1,5-2,5 km diinterpretasikan sebagai kantong magma (Ratdomopurbo dan Poupinet, 1995). Luehr dkk. (2013) membuktikan dengan melakukan seismik topografi dan didapatkan anomali kecepatan rendah pada kedalaman 5 km. Model sederhana bawah permukaan Gunung Merapi ditunjukkan pada gambar 2.2.

Di antara dua zona gempa VTA (vulkanik tektonik tipe A) dan VTB (vulkanik tektonik tipe B) diperkirakan sebagai zona aseismik. Tidak terdapatnya gempa di lokasi ini mengarahkan kepada dugaan keberadaan material yang lebih lunak di antara zona material yang keras. Untuk material yang serupa sifat yang lebih lunak ini berimplikasi suhu yang lebih tinggi. Zona aseismik ini kemudian diinterpretasikan sebagai sebuah kantong magma (Ratdomopurbo, 1995). Hipotesa ini didukung dengan fakta bahwa temperatur di sekitar puncak yakni di plataran Woro dan Gendol bisa mencapai 830 °C yang berarti terdapat sumber panas yang cukup dangkal. Secara geologi Van Bemmelen menunjukkan adanya sesar tektonik di bawah gunung Merapi yaitu sesar Kukusan. Diperkirakan kantong magma ini muncul akibat adanya sesar dasar ini dimana magma dapat terkumpul di atasnya. Diperkirakan kantong magma ini berperan sebagai sebuah katup yang memperlambat migrasi magma ke atas dari dapur magma, karenanya kekuatan letusan erupsinya menjadi berkurang. Penghitungan hiposenter dilakukan pada gempa VTA dan VTB dengan pembacaan waktu tiba gelombang P dan S pada seismogram digital. Gempa-gempa yang muncul pada kedalaman 0-1,5 km dinamakan gempa vulkanik dangkal (VTB), sedangkan gempa-gempa

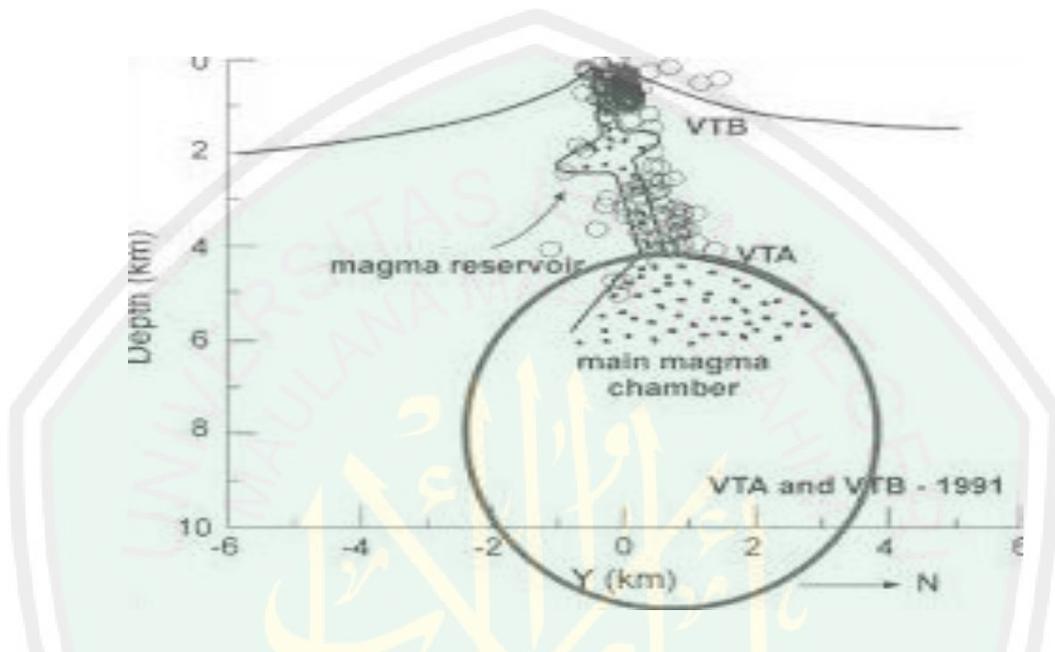
yang muncul pada kedalaman 2,5-5 km merupakan gempa vulkanik dalam (VTA) (Ratdomopurbo, 2000).

Gempa adalah getaran atau vibrasi permukaan bumi. Permukaan berarti hanya kerak bumi, suatu patahan dimana satu bongkah batu telah bergesekan dengan batu lain dengan kekuatan yang sangat besar. Energi dalam gesekan ini diubah menjadi getaran di dalam batu-batuan dan getaran ini dapat terasa sampai ribuan mil. Getaran-getaran gempa bumi ini adalah sejenis gerakan gelombang yang bergerak pada kecepatan yang berbeda-beda melalui kerak bumi yang berbatu-batu. Getaran-getaran ini dapat diketahui dengan alat yaitu seismograf (Siswowidjoyo, 1981).

Gempa *multiphase* (MP) yaitu gempa yang terjadi selama pertumbuhan kubah lava dengan penggambaran sinyal seismik yang terjadi selama proses pembentukan. Gempa ini terjadi di puncak kubah lava yaitu pada saat kubah lava tumbuh cepat jumlah gempa dapat mencapai 700 gempa per hari. Frekuensi gempa dominan yang tercatat pada seismogram kertas berkisar antara 3-4 Hz (Siswowidjoyo, 1981).

Gempa guguran adalah gempa yang diakibatkan oleh adanya guguran material-material dari puncak Merapi yang longsor ke lereng. Peristiwa ini menimbulkan adanya material dari puncak yang turun ke bawah yang dapat menyebabkan timbulnya getaran pada pembacaan seismograf ini. Panjang atau lamanya sinyal guguran sesuai dengan lamanya proses longoran dari material lava tersebut. Gempa guguran apabila dilihat dari bentuknya memiliki bentuk

yang khas dari pada gempa lain yang ada di Merapi, yaitu memiliki bentuk ellips yang kecil di sisi-sisinya dan besar ditengahnya (Siswowidjoyo, 1981).



Gambar 2.2 Model Sederhana Bawah Permukaan Gunung Merapi (Ratdomopurbo dan Poupinet, 1995)

#### 2.4 Deformasi Gunung Api

Deformasi dalam mekanika kontinu adalah transformasi sebuah benda dari kondisi semula ke kondisi terkini. Makna dari "kondisi" dapat diartikan sebagai serangkaian posisi dari semua partikel yang ada di dalam benda tersebut. Sebuah deformasi dapat disebabkan oleh gaya eksternal, gaya internal (seperti gravitasi atau gaya elektromagnetik) atau perubahan temperatur di dalam benda (pemuaiian). Dalam benda kontinu, bidang yang terdeformasi dihasilkan dari tegangan yang diaplikasikan akibat adanya gaya atau pemuaiian di dalam benda. Benda yang terdeformasi dapat kembali ke kondisi semula setelah gaya yang diaplikasikan dilepas, dan itu disebut sebagai deformasi elastis. Namun ada juga

deformasi tidak dapat dikembalikan meski gaya telah dilepas, yang disebut dengan deformasi plastis, yang terjadi ketika benda telah melewati batas elastis atau *yield* dan merupakan hasil dari slip atau mekanisme dislokasi pada tingkat atom. Tipe lainnya dari deformasi yang tidak dapat kembali yaitu deformasi *viscous* atau deformasi viskoelastisitas. Dalam kasus deformasi elastis, fungsi respon yang terkait dengan regangan terhadap tegangan dijelaskan dalam ekspresi tensor hukum Hooke.

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda. Deformasi gunung api adalah perubahan bentuk gunung api biasanya dalam dimensi mikron sampai dengan meter. Deformasi gunung api terjadi karena aktivitas vulkanik berupa pergerakan magma di bawah permukaan yang berpengaruh pada perubahan tekanan pada kantong magma. Akibatnya volume permukaan juga berubah sehingga menyebabkan tubuh gunung api berubah. Pada prinsipnya deformasi dari tubuh gunung api dapat berupa kenaikan permukaan tanah (inflasi) ataupun penurunan permukaan tanah (deflasi) (Sari, 2007).

Deformasi yang berupa inflasi umumnya terjadi karena proses gerakan magma ke permukaan yang menekan permukaan tanah di atasnya. Dalam hal ini deformasi yang maksimal biasanya teramati tidak lama sebelum letusan gunung api berlangsung. Sedangkan deformasi deflasi umumnya terjadi selama atau setelah masa letusan. Pada saat setelah letusan tekanan magma di dalam gunung api telah melemah. Pada saat setelah masa letusan permukaan tanah cenderung kembali ke posisi semula (Sari, 2007).

Tekanan magma ke atas menimbulkan deformasi di tubuh gunung yang menyebabkan permukaan naik, permukaan turun, kemiringan, atau pembentukan cembungan/tonjolan. Pada metode pemantauan aktivitas gunung api umumnya menggunakan bantuan peralatan. Peralatan tersebut selain menekan juga akan menunjukkan gejala gangguan kesetimbangan. Salah satu metode yang dipakai dalam pemantauan aktivitas gunung api adalah metode deformasi. Merupakan metode yang dipakai untuk memantau perubahan bentuk, posisi, dan dimensi tubuh gunung api akibat aktivitas vulkanik.

Berdasarkan sifat hubungan antara *stress* dan *strain* diatas maka deformasi dibedakan menjadi 3 macam (Sari, 2007):

1. Deformasi Elastis. Ini terjadi jika *strain* (regangan) yang dihasilkan berbanding lurus dengan *stress* yang bekerja. Apabila *stress* dihilangkan maka benda dapat kembali ke bentuk semula *origin shape*.
2. Deformasi *Viscous*. Merupakan *strain* yang bertambah kontinu terhadap *stress* yang bekerja pada suatu laju perbandingan, dan terbalik terhadap viskositasnya. Material *liquid* tidak mempunyai kekuatan dasar untuk menimbulkan *strain* ini.
3. Deformasi Plastis. Deformasi ini hampir sama dengan deformasi *viscous*, hanya saja deformasi plastis ini mempunyai kekuatan dasar sebelum deformasi *viscous* dimulai. Jadi saat *strain* sama dengan nol, besarnya *stress* tergantung dengan mediumnya.

Deformasi permukaan tanah terjadi karena adanya perubahan tekanan magma atau instruksi magma. Biasanya deformasi dinyatakan dalam pergeseran

(*displacement*) arah horizontal dan vertikal serta ungkitan (*tilting*). Perubahan yang dipantau secara teliti dapat memberikan informasi penting tentang struktur dan mekanisme gunung api aktif.

Tekanan magma ke atas menimbulkan deformasi di tubuh gunung yang menyebabkan permukaan naik, permukaan turun, kemiringan, atau pembentukan cembungan/tonjolan.

Pemantauan deformasi gunung api berdasarkan metode implikasinya dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe, yaitu metode episodik dan metode kontinyu. Pada metode episodik, pemantauan dilakukan secara episodik dalam selang waktu tertentu. Metode deformasi episodik ini umumnya menggunakan data pengamatan terestris, seperti jarak (EDM), arah (dari *theodolite*), beda tinggi (dari sifat datar), perubahan gaya berat (dari pengukuran *microgravity*), dan GPS (*Global Positioning Sistem*). Sedangkan metode deformasi kontinyu umumnya memerlukan sistem pengiriman data melalui transmisi gelombang elektromagnetik. Deformasi kontinyu menggunakan sensor tiltmeter, ekstensiometer, dan dilatometer yang hanya karakterisasi deformasi yang sifatnya sangat lokal. Ada beberapa kemungkinan penyebab deformasi gunung api antara lain:

1. Aktivitas Vulkanik

Magma mempunyai tekanan tinggi sehingga cenderung untuk keluar ke permukaan. Tekanan yang besar menyebabkan deformasi di permukaan. Teknik deformasi diterapkan untuk mengetahui besarnya peregangan yang terjadi. Ketika magma bergerak ke permukaan ada beberapa perubahan yang

dapat diukur seperti peningkatan seismik, deformasi *sub surface* serta beberapa tanda geofisika dan geokimia lainnya.

## 2. Pergeseran Sesar

Di bumi dapat dipastikan terdapat banyak zona sesar, karena hal ini adalah suatu gejala pelenturan kerak bumi yang akan menyebabkan adanya pergeseran lempeng atau benua. Apabila rekahan pada batuan mengalami pergeseran, sehingga terjadi perpindahan antara bagian-bagian yang saling berhadapan dengan arah sejajar dengan bidang patahan, maka gejala ini disebut sesar. Pergerakan sesar ini dapat menyebabkan terjadinya pergeseran di permukaan tanah (Asikin, 1979).

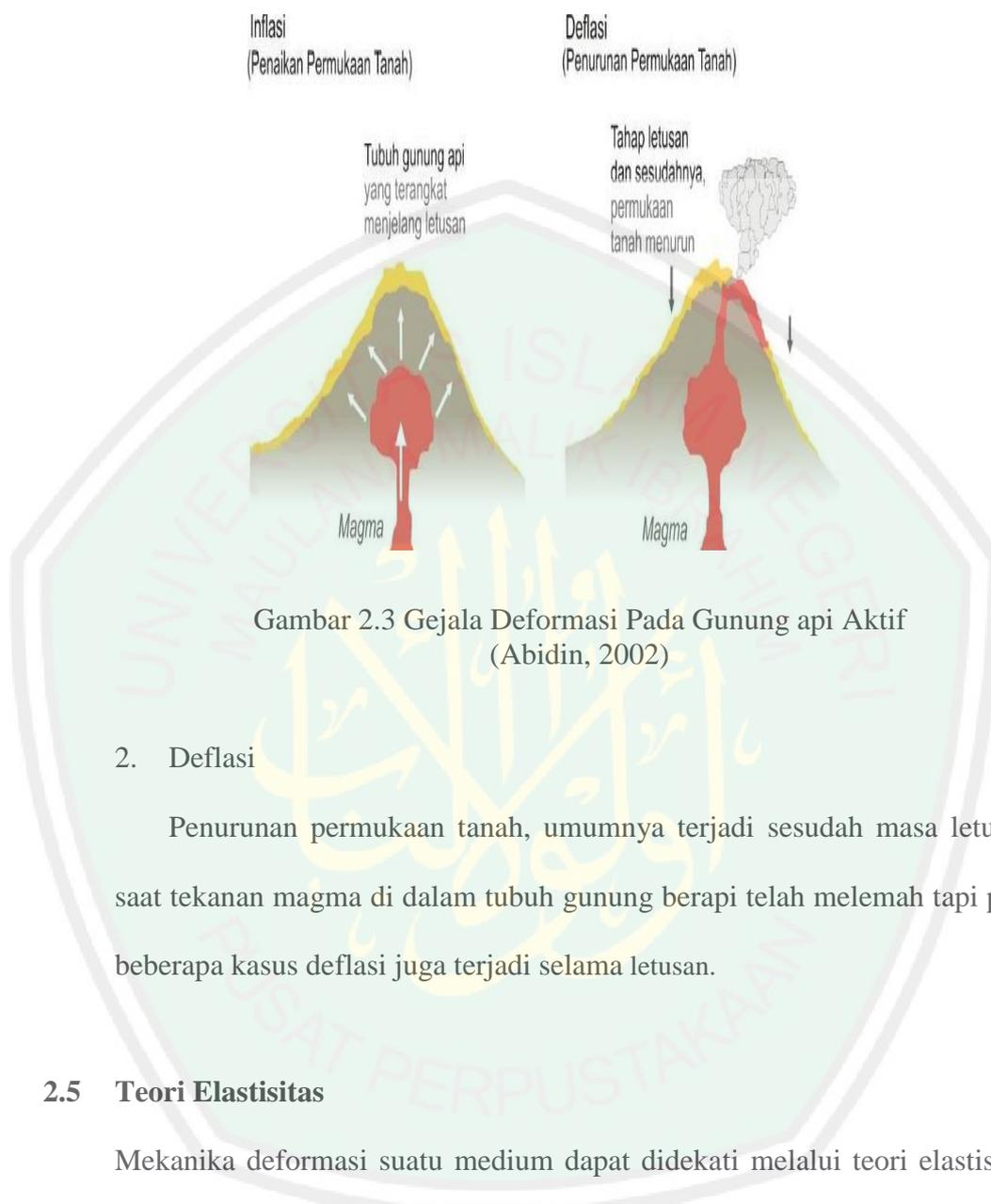
## 3. Kestabilan Lereng

Kemiringan lereng menyebabkan ketidakstabilan pada permukaan tanah, sehingga menyebabkan terjadinya pergeseran tanah.

Secara garis besar gejala deformasi dapat berupa inflasi dan deflasi, yaitu:

### 1. Inflasi

Pengangkatan permukaan tanah, umumnya terjadi karena proses pergerakan magma ke permukaan yang menekan permukaan tanah di atasnya. Inflasi disebabkan oleh adanya magma yang bergerak naik ke permukaan gunung berapi. Inflasi sering dijadikan sebagai tanda-tanda akan terjadinya erupsi pada gunung berapi.



Gambar 2.3 Gejala Deformasi Pada Gunung api Aktif (Abidin, 2002)

## 2. Deflasi

Penurunan permukaan tanah, umumnya terjadi sesudah masa letusan, saat tekanan magma di dalam tubuh gunung berapi telah melemah tapi pada beberapa kasus deflasi juga terjadi selama letusan.

## 2.5 Teori Elastisitas

Mekanika deformasi suatu medium dapat didekati melalui teori elastisitas. Medium terdiri atas partikel-partikel dengan distribusi partikelnya menerus atau kontinyu sehingga pergeserannya dapat dilacak sebagai fungsi koordinat. Elemen medium tersebut mengalami tegangan dan regangan akibat bekerjanya suatu gaya. Tegangan atau *stress* didefinisikan sebagai gaya persatuan luas. Tegangan ini timbul akibat adanya gangguan mekanis atau terganggunya sistem keseimbangan

gaya pada suatu batuan. Tegangan merupakan perbandingan gaya terhadap luasan, yang dinotasikan sebagai (Aisyah, 2013):

$$\sigma = \frac{dF}{dA} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana  $dF$  : Elemen gaya yang bekerja pada benda dalam Newton (N)  
 $dA$  : Elemen luas benda (m<sup>2</sup>)  
 $\sigma$  : Tegangan yang dialami benda (N/m<sup>2</sup>)

Tegangan secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua, yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal yang bekerja dengan arah dan gaya tegak lurus bidang dinotasikan  $\sigma_{ij}$  dengan  $i=j$ , sebaliknya tegangan geser adalah tegangan yang bekerja dengan arah gaya sejajar bidang dengan indeks  $i \neq j$ .

Dalam teori elastisitas saat *strees* ( $\sigma$ ) bekerja pada sebuah benda elastik, maka benda tersebut akan mengalami perubahan bentuk dan ukuran yang dikenal dengan istilah *strain* atau regangan. Regangan adalah perbandingan antara perubahan bentuk dan ukuran (jarak, panjang, atau volume) terhadap bentuk dan ukuran semula.

Hukum Hooke menyatakan bahwa terdapat hubungan linier antara *strees* dan *strain* pada batuan (antara gaya yang diterapkan dan besarnya deformasi). Hukum Hooke memiliki hubungan yang rumit, tetapi ketika medium bersifat isotropis maka hukum Hooke dapat dinyatakan pada persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu \epsilon_{ii} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan  $\sigma_{ii}$ : *normal strees*  
 $\sigma_{ij}$ : *shear strees*  
 $\Delta$ : dilatasi ( $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z$ ), merupakan total normal *strain*  
 $\epsilon_{ii}$ : *normal strain*  
 $\epsilon_{ij}$ : *shear strain*

$\lambda \mu$  : konstanta *Lame*

Konstanta-konstanta elastisitas menyatakan kualitas medium saat dikenai suatu *strees*. Pada persamaan (2.2) dan (2.3) terdapat konstanta elastisitas yaitu konstanta  $\lambda$  dan  $\mu$ . Ditinjau dari persamaan (2.3) ketika  $\epsilon_{ij}$  maka  $\mu$  menjadi besar, dengan  $\mu$  adalah suatu ukuran tingkat kesulitan suatu benda untuk mengalami perubahan bentuk (pergeseran) ketika *shear strees* bekerja pada benda tersebut. Apabila nilai *strees* melebihi batas elastisitas, maka hukum Hooke tidak berlaku dan *strain* meningkat pesat. *Strain* ini tidak menghilang ketika *strees* dihilangkan (Telford dkk., 1990). Kesebandingan antara *normal strees* dan *normal strain* dinyatakan oleh Modulus Young ( $E$ ), secara matematis dirumuskan:

$$\sigma_{xx} = E \epsilon_{xx} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan  $\sigma_{xx}$  : *Strees* searah sumbu x pada bidang yang tegak lurus sumbu x  
 $E$  : Modulus Young  
 $\epsilon_{xx}$  : *Strain* searah sumbu x pada bidang yang tegak lurus sumbu x

Perbandingan antara *shear strees* dan *shear strain* yang menimbulkan pergeseran pada salah satu bidang, tetapi tidak menimbulkan perubahan volume disebut sebagai Modulus Geser atau Rigiditas, secara matematis dirumuskan:

$$G = \frac{\sigma_{yx}}{\epsilon_{yx}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan  $G$  : Rigiditas,  
 $\sigma_{yx}$  : *Strees* searah sumbu x pada bidang yang tegak lurus sumbu x  
 $\epsilon_{yx}$  : *Strain* searah sumbu y pada bidang yang tegak lurus sumbu x

## 2.6 Metode Deformasi

Letusan gunung api umumnya selalu diikuti dengan gejala peruntuhan karena berkurangnya isi dari gunung api setelah magma ditumpahkan. Tiltmeter

merupakan suatu alat yang dapat mengukur kemiringan lereng (*slope*) hingga ketelitian  $10^{-5}$  derajat. Setelah terjadi letusan kemiringan lereng negatif sedangkan sebelum letusan adalah positif. Sekarang geodimeter telah banyak digunakan dan dengan menggunakan sinar laser maka pengukuran perubahan kemiringan lereng dapat lebih teliti lagi. Selain Tiltmeter terdapat juga alat yang berfungsi pada pengamatan deformasi yaitu EDM (*Electronic Distance Measurement*) yang berfungsi untuk mengetahui perkembangan jarak dari puncak gunung api ke pos pengamatan. Perubahan jarak ini dapat mengidentifikasi perkembangan aktivitas gunung api. Ada juga GPS sebagai alat pemantau yang berfungsi mengetahui koordinat dan elevasi dari suatu gunung api (Sari, 2007).

## 2.7 Metode GPS (Global Positioning System)

Pada prinsipnya deformasi dari tubuh gunung api dapat berupa kenaikan permukaan tanah (inflasi) ataupun penurunan permukaan tanah (deflasi). Deformasi yang berupa inflasi umumnya terjadi karena proses gerakan magma ke permukaan yang menekan permukaan tanah di atasnya. Dalam hal ini deformasi yang maksimal biasanya teramati tidak lama sebelum letusan gunung api berlansung. Sedangkan deformasi berupa deflasi umumnya terjadi selama atau sesudah masa letusan. Pada saat itu tekanan magma di dalam tubuh gunung api telah melemah. Pada saat itu permukaan tanah cenderung kembali ke posisinya semula. Gejala deformasi gunung api akan menyebabkan pergeseran posisi suatu titik di tubuh gunung api. Pergeseran posisi tersebut dapat terjadi baik dalam arah horizontal maupun vertikal.

Pengukuran GPS dilakukan dengan menggunakan satelit. Satelit GPS secara kontinyu mengirimkan sinyal-sinyal gelombang pada 2 frekuensi L-band yang dinamakan L1 dan L2. Sinyal L1 berfrekuensi 1575.42 MHz dan sinyal L2 berfrekuensi 1227.60 MHz. Sinyal L1 membawa 2 buah kode biner yang dinamakan kode-P (P-code, *Precise atau Private code*) dan kode-C/A (C/A code, *Clear Acces atau Coarse Acquisition*), sedangkan sinyal L2 hanya membawa kode-C/A. Dengan mengamati sinyal-sinyal dari satelit dengan GPS penerima (Receiver) dalam jumlah dan waktu yang cukup, seseorang kemudian dapat memprosesnya untuk mendapatkan informasi posisi, kecepatan ataupun waktu secara cepat dan teliti. Pada dasarnya pemantauan deformasi dengan GPS adalah selisih posisi/koordinat (L,B,H/X,Y,Z) dari suatu titik pantau/*bench mark* pada pengukuran periode satu dengan pengukuran periode berikutnya. Pemantauan deformasi dengan GPS dapat di bagi dua yaitu pemantauan secara kontinyu dan pemantauan secara episodik. Prinsip pemantauan deformasi secara kontinyu yaitu pemantauan terhadap perubahan koordinat beberapa titik yang mewakili sebuah gunung api dari waktu ke waktu. Metode ini menggunakan beberapa alat penerima sinyal (*reciever*) GPS yang ditempatkan pada beberapa titik pantau pada punggung dan puncak gunung api, serta pada suatu pusat pemantau (stasiun referensi) yang merupakan pusat pemroses data. Pusat pemantau adalah suatu lokasi yang telah diketahui koordinatnya, dan sebaiknya ditempatkan di kota yang terdekat dengan gunung api yang bersangkutan (misalkan di pos pengamatan gunung api). Koordinat titik-titik pantau tersebut kemudian ditentukan secara teliti dengan GPS, relatif terhadap pusat pemantau, dengan menggunakan metode

penentuan posisi diferensial secara *real time*. Untuk itu data pengamatan GPS dari titik-titik pantau harus dikirimkan secara *real time* ke pusat pemantau untuk diproses bersama-sama dengan data pengamatan GPS dari pusat pemantau. Pengiriman data ini dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan satelit komunikasi ataupun telemetri dengan gelombang radio.

Pusat pemantau adalah suatu lokasi yang telah diketahui koordinatnya dan sebaiknya ditempatkan di kota yang terdekat dengan gunung api yang bersangkutan (misalkan di pos pengamatan gunung api). Koordinat titik-titik pantau tersebut kemudian ditentukan secara teliti dengan GPS, relatif terhadap pusat pemantau, dengan menggunakan metode penentuan posisi diferensial secara *real time*. Untuk itu data pengamatan GPS dari titik-titik pantau harus dikirimkan secara *real time* ke pusat pemantau untuk diproses bersama-sama dengan data pengamatan GPS dari pusat pemantau. Pengiriman data ini dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan satelit komunikasi ataupun telemetri dengan gelombang radio.

Dalam proses pemantauan aktivitas (geometrik) gunung api dengan GPS, sebagai contoh kalau jarak antara dua titik pantau yang diletakkan sebelah menyebelah sisi gunung api secara sistematis semakin memanjang dari waktu ke waktu, atau beda tinggi antara titik-titik pantau dengan pusat pemantau makin membesar secara kontinyu, maka kita harus waspada bahwa mungkin gunung yang bersangkutan akan meletus. Perlu ditekankan di sini bahwa untuk mendapatkan suatu kesimpulan yang lebih komprehensif tentang aktivitas gunung api tersebut, informasi geometrik yang diberikan oleh GPS sebaiknya

diintegrasikan dengan informasi-informasi vulkanologis. Pemantauan secara episodik yaitu pemantauan GPS terhadap titik-titik pantau secara berkala, yang membedakannya dengan pemantauan secara kontinyu adalah disini pemantauan dilakukan pada periode tertentu dengan metode pengukuran secara statik.

GPS adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang berbasiskan pada pengamatan satelit-satelit *Global Positioning System* (Abidin, 2002). Prinsip pemantauan *ground deformation* pada tubuh gunung api dengan survei GPS yaitu dengan cara menempatkan beberapa titik di beberapa lokasi yang dipilih, ditentukan koordinatnya secara teliti dengan menggunakan metode survei GPS. Dengan mempelajari pola dan kecepatan perubahan koordinat dari titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, maka karakteristik *ground deformation* pada tubuh gunung api akan dapat dihitung dan dipelajari lebih lanjut.

Pemantauan *ground deformation* gunung api dengan menggunakan GPS pada prinsipnya dapat dilakukan secara episodik atau kontinyu. Dalam pengamatan secara episodik, koordinat dari beberapa titik GPS yang dipasang pada gunung api ditentukan secara teliti menggunakan metode survey GPS. Koordinat titik-titik ini ditentukan dalam selang periode tertentu secara berkala dalam selang waktu tertentu dan dengan menganalisis perbedaan koordinat yang dihasilkan untuk setiap periode, maka karakteristik deformasi dari gunung api dapat ditentukan dan dianalisis.

Pemantauan deformasi secara kontinyu secara prinsip sama dengan pemantauan deformasi secara episodik, yang membedakannya hanya aspek

operasional dari pemantauan. Dalam pemantauan deformasi secara kontinyu koordinat dari titik-titik GPS pada gunung api ditentukan secara *real time* dan terus menerus dengan sistem yang disusun secara otomatis. Agar metode ini dapat dilakukan maka diperlukan komunikasi data antara titik-titik GPS pada gunung api dan stasiun pengamat.

## 2.8 Sistem Telemetry

Telemetry adalah sebuah teknologi pengukuran dilakukan dari jarak jauh dan melaporkan informasi kepada perancang atau operator sistem. Kata telemetry berasal dari Bahasa Yunani yaitu *tele* artinya jarak jauh sedangkan *metron* artinya pengukuran. Secara istilah telemetry diartikan sebagai suatu bidang keteknikan yang memanfaatkan instrumen untuk mengukur panas, radiasi, kecepatan atau properti lainnya dan mengirimkan data hasil pengukuran ke penerima yang letaknya jauh secara fisik berada diluar dari jangkauan pengamat atau user.

Telemetry dalam keadaan bergerak berpengaruh pada saat pengukuran, pengukuran tersebut untuk mendapatkan nilai percepatan pada suatu benda bergerak. Telemetry bergerak sangat rentan terhadap *noise*. *Noise* yang sering terjadi adalah *noise* dari getaran, suhu, tekanan atmosfer, dan benda yang menjadi penghalang.

Bergeraknya suatu benda dapat terjadi pada beberapa kondisi. Pergerakan benda dapat diasumsikan pada sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Masing-masing sumbu mempunyai definisi,  $x$  adalah longitudinal axis,  $y$  adalah *lateral axis*, dan  $z$  adalah *vertical axis*. Dalam hal ini, arah percepatan benda adalah pada sumbu  $x$ , jika

membelok maka bergerak pada sumbu y, dan jika mengalami naik atau penurunan akan bergerak pada sumbu z.

Telemetri adalah suatu teknik pengukuran atau pengamatan terhadap objek dan jarak yang sangat jauh. *Signal* informasi ditransformasikan ke bentuk lain yang dapat dituangkan ke media transmisi, yang selanjutnya hasil transformasi tersebut diubah kembali dalam bentuk *signal* asli. Sistem telemetri menurut media transmisinya dibagi menjadi:

1. Sistem telemetri menggunakan kabel. Pengiriman informasi ini disampaikan ke penerima melalui suatu kabel atau kawat penghantar dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Bagian penerima membutuhkan *transduser* lain untuk mengubah *signal* elektronis kembali ke bentuk asalnya. Pada bagian ini harus ada alat penguat *signal* berupa *amplifier* untuk menguatkan *signal* elektronis sampai batas tertentu.
2. Sistem telemetri melalui gelombang radio. Terdiri dari satu unit instrumen pengirim (*transmitter*) yang ditempatkan di lapangan untuk pengirim *signal*. *Signal* dikirim dengan kecepatan cahaya, sedangkan bagian penerima menentukan *receiver*.
3. Sistem telemetri hujan. Sistem telemetri curah hujan ini pada dasarnya adalah uji coba peralatan baru yang dilakukan oleh regu instrumentasi PGM dalam meneliti curah hujan yang terjadi di puncak Merapi. Sistem ini mulai dibuat dan dipasang di puncak (lava 57) mulai bulan Juli 1996.

Prinsip kerja sistem telemetri curah hujan yaitu berupa sensor akan menangkap curah hujan, kemudian setelah melewati batas kalibrasi sensitivitas sensor, maka secara mekanik dan magnetik *relay* sensor akan terhubung sesaat kemudian lepas lagi, bersamaan dengan dibuangnya air melalui lubang yang berada di bagian bawah sensor. *Relay* yang ada pada sensor curah hujan akan mendeteksi terus-menerus keadaan *relay* (tersambung atau terputus). Sistem elektronik akan mengirim curah hujan ke unit pertama.

## 2.9 Kajian Lokasi Sumber Tekanan Magma (Model Mogi)

Menurut Aisyah (2013), deformasi yang terukur di permukaan yang disebabkan oleh aktivitas internal gunung berapi dapat memberikan informasi mengenai lokasi kantong maupun dapur magma. Pada sebagian besar gunung api yang ada di dunia, data-data deformasi memberikan nilai yang penting dalam meninjau aspek-aspek umum guna kepentingan prediksi letusan yang akan terjadi selanjutnya. Seorang ilmuwan Jepang bernama Kiyoo Mogi, melalui publikasinya di tahun 1958 menandai dimulainya era modern pada studi deformasi gunung berapi. Lewat model yang dikembangkannya (*Mogi's model*), deformasi yang diamati dapat terjadi di permukaan merupakan hasil dari adanya peningkatan tekanan (*pressure*) dari sebuah sumber kecil, bola (*spherical*) di dalam ruangan elastik tak berhingga yang membentuk setengah ruang (*half space*). Model yang dikembangkan ini juga mensimulasikan efek dari peningkatan tekanan magma di dalam dapur magma yang terpendam jauh di dalam sebelum terjadi letusan.

Pengembangan model Mogi sejauh ini telah mempertimbangkan pengaruh dari topografi dalam tiga dimensi dan pengaruh bentuk dapur magma yang

*nonspherical* dan *non axisymmetrical*. Volume inflasi maupun amblesan yang terukur di suatu permukaan sangat terkait dengan suplai atau berkurangnya volume magma dalam suatu kantong atau dapur magma. Dalam perkembangannya, beberapa penelitian memodifikasi geometri sumber tekanan seperti geometri bola, *ellipse* dalam sistem yang tertutup maupun terbuka (Dzurisin, 2007).

Pusat tekanan atau pusat sumber dilatasi sering disebut Model Mogi setelah Kiyoo Mogi (Mogi, 1958) menyimpulkan bahwa pengukuran secara geodetik mengenai perubahan elevasi dan pergeseran horizontal berhubungan dengan letusan di Jepang dan Hawaii dihasilkan dari peningkatan dan penurunan aktivitas dapur magma di dalam gunung api. Metode ini masih menjadi metode yang paling banyak digunakan untuk memodelkan deformasi permukaan dari berkurang atau bertambahnya aktivitas dapur magma.

Model Mogi digunakan untuk menganalisis dan mengestimasi kedalaman pusat tekanan dimulai dengan memperhitungkan efek dari tekanan secara hidrostatik di dalam tubuh gunung api. Dalam melakukan estimasi kedalaman pusat tekanan diperlukan data dari deformasi horizontal, deformasi vertikal, dan jarak horizontal. Estimasi kedalaman pusat tekanan tersebut kemudian dapat digunakan untuk mengestimasi volume magma yang terdapat pada dapur magma suatu gunung api. Persamaan yang digunakan untuk menghitung deformasi horizontal, deformasi vertikal, dan jarak horizontal menggunakan persamaan yang digunakan oleh Kiyoo Mogi (Mogi, 1958).

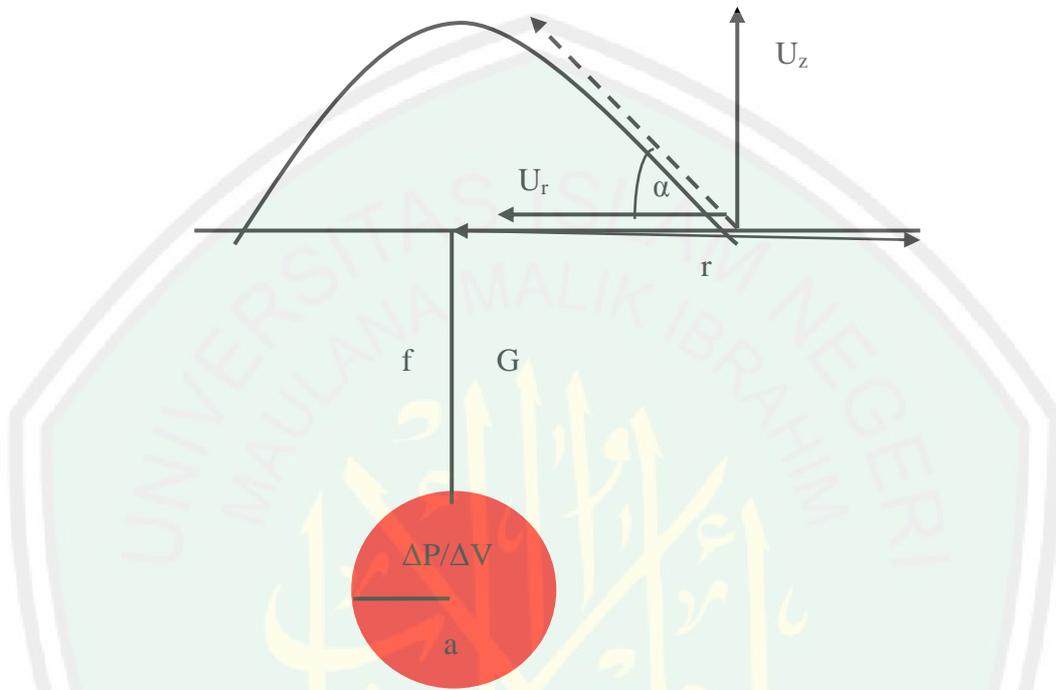
Deformasi pada suatu permukaan dapat teramati melalui perubahan posisi akibat perubahan tekanan hidrostatik ( $\Delta P$ ) pada suatu sumber tekanan. Pendekatan mengenai karakteristik sumber tekanan dapat dilakukan dengan penyederhanaan geometri sumber tekanan. Mogi (1958) mengemukakan suatu model untuk menjelaskan deformasi akibat perubahan tekanan hidrostatik ( $\Delta P$ ) pada suatu sumber tekanan. Geometri sumber tekanan dianggap berbentuk bola (*spheris*) berjari-jari  $a$ , dimana  $a \ll f$ , dengan  $f$  adalah kedalaman sumber tekanan. Sumber tekanan diasumsikan berada dalam medium homogen dan elastik dengan diasumsikan berada dalam medium homogen dan elastik dengan parameter elastisitas  $G$  (*rigiditas*). Lokasi sumber tekanan pada kedalaman  $f$  vertikal di bawah titik  $A$  yang diasumsikan sebagai kawah aktif. Perubahan tekanan hidrostatik ( $\Delta P$ ) yang menyebabkan deformasi terekam sebagai perubahan sudut ungkitan yang dipasang pada jarak  $r$  terhadap titik  $A$  dalam komponen radial ( $U_r$ ) dan vertikal ( $U_z$ ). Skema model Mogi dan perubahan koordinat yang terekam pada sensor GPS dapat ditinjau pada gambar 2.4.  $U_r$  adalah vektor pergeseran arah radial dan  $U_z$  adalah vektor pergeseran arah vertikal yang menurut (Kusumastuti, 2014) harga  $U_r$  dan  $U_z$  adalah:

$$U_r = \frac{(1-\nu)\alpha^3 \Delta P}{G} \left[ \frac{r}{(f^2+r^2)^{3/2}} \right] \dots\dots\dots(2.6)$$

$$U_z = \frac{(1-\nu)\alpha^3 \Delta P}{G} \left[ \frac{f}{(f^2+r^2)^{3/2}} \right] \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana  $U_r$  : Perubahan Horizontal (*Horizontal Displacement*)  
 $U_z$  : Perubahan Vertikal (*Vertical Displacement*)  
 $\Delta P$  : Tekanan hidrostatik  
 $G$  : Rigiditas medium  
 $\alpha$  : Jari-jari bola pusat tekanan  
 $f$  : Kedalaman sumber tekanan

$r$  : Jarak antara stasiun pemantauan terhadap *crater*  
 $\nu$  : Rasio poisson



Gambar 2.4 Skema model Mogi dan perubahan kemiringan yang terekam. (Dzurisin, 2007)

Perubahan volume gunung api yang terjadi akibat deformasi  $\Delta V$  dapat diperkirakan dari nilai parameter  $k$ , berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\Delta V = 2\delta k \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\Delta V_{Injection} = 4\delta \frac{(f^2+r^2)^{5/2}a}{9fr} \dots\dots\dots(2.9)$$

- Dengan
- $\Delta V$  : Perubahan volume ( $m^3$ )
  - $k$  : Nilai intensitas ( $m^3$ )
  - $\Delta V_{inj}$  : Anomali pasokan volume magma ( $m^3$ )
  - $\delta$  : Perubahan data tilt rata-rata

## 2.10 Penentuan Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma

Estimasi lokasi sumber tekanan dan volume suplai dari beberapa konsep model menghasilkan nilai yang hampir sama, walaupun model geometri sumber tekanan berbeda (Aisyah, 2013). Estimasi dengan menggunakan model invers dibutuhkan sampai memperoleh pendekatan terbaik, yaitu melalui linierisasi fungsi non linier. Metode *Grid Search* digunakan untuk penentuan lokasi sumber tekanan, yaitu ditentukan saat diperoleh nilai residual terkecil antara pergeseran horizontal observasi dalam teoritis atau model.

Menurut (Mogi, 1958) model Mogi mengasumsikan beberapa hal, yaitu:

1. Kerak bumi merupakan medium setengah elastis.
2. Sumber tekanan yang menyebabkan deformasi berupa bola yang terletak pada media tertentu.
3. Nilai kedalaman harus jauh lebih besar dari nilai jari-jari bola.

Jika jarak radial dinyatakan sebagai berikut:

$$r = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana  $X_1$ ,  $Y_1$  merupakan koordinat titik pantau dan  $X_0$ ,  $Y_0$  merupakan koordinat titik sumber tekanan.

## 2.11 Model Yokoyama

Yokoyama mengasumsikan sumber tekanan berbentuk *sphere* dengan perluasan searah (*unidirectional*) (Yokoyama, 1971). Efek dari perluasan searah tersebut adalah dengan tekanan yang lebih kecil model yokoyama menghasilkan pergeseran yang sama besarnya apabila dibandingkan dengan model deformasi

gunung lainnya. Berikut ini merupakan rumus untuk mencari pergeseran baik dari arah horizontal maupun vertikal menggunakan model Yokoyama:

$$U_r = -\frac{a^2 p}{18i} \left[ \frac{6FR}{(F^2+R^2)^{3/2}} - \frac{3\{F-(F^2+R^2)^{1/2}\}}{R(F^2+R^2)^{1/2}} \right] - \frac{a^4 p}{126i} \left[ \frac{19FR}{(F^2+R^2)^{3/2}} - \frac{2R}{F(F^2+R^2)^{3/2}} + \frac{2}{F^2} \frac{F-(F^2+R^2)^{1/2}}{R(F^2+R^2)^{1/2}} \right] \dots\dots\dots(2.11)$$

$$U_z = -\frac{a^4 p}{6i} \left[ \frac{3}{(F^2+R^2)^{1/2}} - \frac{2F^2}{(F^2+R^2)^{3/2}} \right] - \frac{a^4 p}{6i} \left[ \frac{2}{7F^2} \frac{1}{(F^2+R^2)^{1/2}} + \frac{2}{7} \frac{1}{(F^2+R^2)^{3/2}} - \frac{5}{21} \frac{2F^2-R^2}{(F^2+R^2)^{5/2}} \right] \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

- Ur : Perubahan horisontal
- Uz : Perubahan vertikal
- A : Jari-jari sumber tekanan
- R : Jarak stasiun pengamat dengan crater
- F : Kedalaman sumber tekanan
- μ : Rigiditas medium
- P : Tekanan hidrostatik

## 2.12 Hiposenter dan Episenter

Titik dalam perut bumi yang merupakan sumber gempa dinamakan hiposenter atau fokus. Proyeksi tegak lurus hiposenter ke permukaan bumi ini dinamakan episenter. Gelombang gempa merambat dari hiposenter ke patahan sesar *fault rupture*. Bila kedalaman fokus dari permukaan adalah 0-70 km, maka terjadilah gempa dangkal (*shallow earthquake*). Sedangkan bila kedalamannya antara 70-700 km, maka akan terjadi gempa dalam (*deep earthquake*) (Hartuti, 2009).

Hiposenter adalah tempat terjadinya perubahan lapisan batuan atau dislokasi di dalam Bumi sehingga menimbulkan gempa bumi. Apabila hiposenter terletak

di dasar laut maka getaran gempa bumi yang terjadi dapat menimbulkan gelombang air pasang yang sangat besar dengan ketinggian mencapai puluhan meter atau biasa disebut *tsunami*. Episenter adalah tempat di permukaan Bumi yang letaknya paling dekat dengan hiposenter. Letak episenter tegak lurus terhadap hiposenter, dan daerah di sekitar episenter adalah wilayah yang paling besar merasakan getaran gempabumi (Mulyo, 2004).

Lokasi gempa didefinisikan dengan hiposenter gempa ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) dan waktu asal  $t_0$ . Hiposenter adalah lokasi fisik dari sumber gempa, biasanya diberikan dalam longitude ( $x_0$ ), latitude ( $y_0$ ), dan kedalaman di bawah permukaan ( $z_0$ ) km, saat hiposenter dan waktu asal ditentukan oleh waktu kedatangan fase seismik dimuali oleh gempa pertama, lokasi akan dihitung sesuai dengan titik dimana gempa dimulai. Hal tersebut dilakukan secara iterasi hingga diperoleh model hiposenter yang menghasilkan nilai residual di setiap stasiun mencapai nilai minimum yang ditentukan (Sahara, 2009).

### 2.13 Gelombang Seismik

Gerakan batuan yang tiba-tiba di sepanjang celah pada sesar bumi dapat menimbulkan getaran (*vibration*) yang mentransmisikan energi dalam bentuk gelombang (*wave*). Gelombang yang merambat di sela-sela bebatuan di bawah permukaan bumi disebut dengan gelombang badan (*body waves*). Sedangkan gelombang yang merambat dari episenter ke sepanjang permukaan bumi disebut dengan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang seismik dibagi menjadi dua, yaitu (Hartuti, 2009):

## 1. Gelombang Badan (Body Wave)

Ada dua macam gelombang badan, yaitu gelombang primer atau gelombang *P* (*primary wave*) dan gelombang sekunder atau gelombang *S* (*secondary wave*). Gelombang *P* atau gelombang mampatan (*compression wave*) adalah gelombang longitudinal yang arah gerakannya sejajar dengan arah perambatan gelombang. Gelombang ini merupakan gelombang seismik tercepat yang merambat di sela-sela bebatuan, yaitu dengan kecepatan 6-7 km/detik. Gelombang *S* atau gelombang rincih (*shear wave*) adalah gelombang transversal yang arah gerakannya tegak lurus dengan arah perambatan gelombang. Gelombang seismik ini merambat di sela-sela bebatuan dengan kecepatan 3,5 km/detik.

Baik gelombang *P* maupun gelombang *S* dapat membantu ahli seismologi untuk mencari letak hiposenter dan episenter suatu gempa. Saat kedua gelombang ini berjalan di dalam dan permukaan bumi, keduanya mengalami pemantulan (*reflection*) dan pembiasan (*refraction*). Hal ini sama persis seperti sebuah cahaya yang seolah membelok saat menembus kaca bening. Para ahli seismologi memeriksa pembelokan ini untuk menentukan sumber dari suatu gempa.

## 2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Ada dua macam gelombang permukaan, yaitu gelombang Rayleigh dan gelombang *Love*. Gelombang Rayleigh menimbulkan efek gerakan tanah yang sirkular. Hal ini akan mengakibatkan tanah bergerak naik turun

seperti ombak di laut. Sedangkan gelombang *Love* dapat menimbulkan efek gerakan tanah yang horizontal dan tidak menghasilkan perpindahan vertikal.

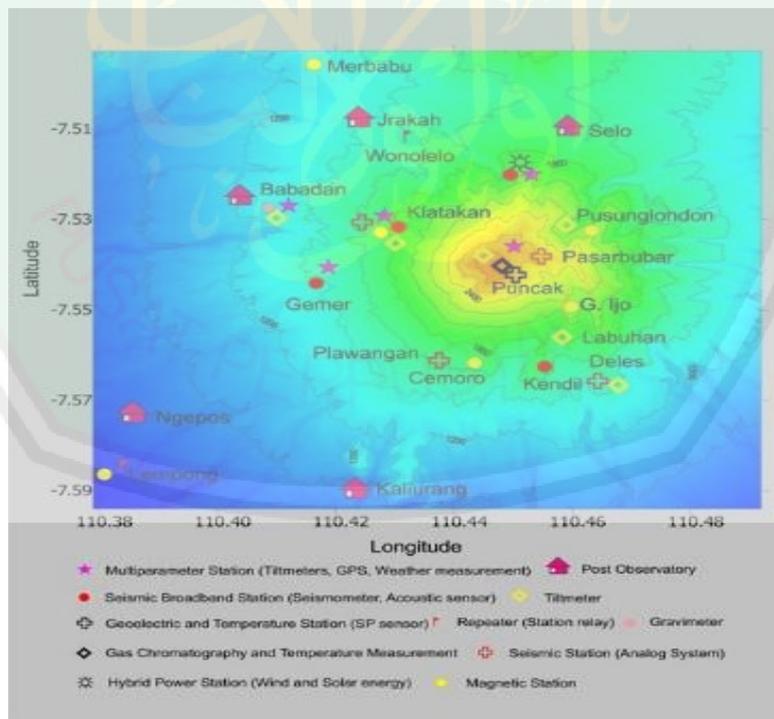


## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini akan dilakukan di kantor PVMBG – BPPTKG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi – Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi, Jalan Cendana No. 15 Yogyakarta, selama satu bulan yaitu tanggal 05 April 2018 sampai 6 Mei 2018.

Gunung Merapi berada pada koordinat  $7^{\circ}32,5'$  LS dan  $-110^{\circ}26,5'$  BT yang secara lokasi berada pada Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah.



Gambar 3.1 Lokasi pos pengamatan terhadap puncak Gunung Merapi

Digunakan 4 titik stasiun GPS untuk memantau deformasi Gunung

Merapi, yaitu:

Tabel 3.1 Lokasi Data Pengamatan GPS (BPPTKG, 2016)

No	Stasiun	Lokasi
1	BPTK	BPPTKG, Yogyakarta
2	DELS	Deles, Klaten
3	GRWH	Grawah, Boyolali
4	KLAT	Klatakan, Magelang

### 3.2 Alat dan Bahan

#### 1. Perangkat keras (*Hardware*)

- a. Laptop digunakan untuk proses pengolahan data, pemodelan hasil, dan pembuatan laporan.
- b. Alat GPS (*Global Positioning System*)

#### 2. Perangkat Lunak (*Software*)

- a. Sistem Operasi Linux atau Windows 8.
- b. *Software* TEQC (*Translation, Editing and Quality Check*) untuk penggabungan data rinex dalam format satu jam menjadi satu hari.
- c. *Software* Gamit/GLOBK merupakan perangkat lunak untuk mengolah data secara *post-processing*.
- d. MATLAB R2010a dan Python digunakan untuk membuat program pencarian sumber tekanan magma menggunakan model Yokoyama dan Mogi.
- e. Microsoft Office digunakan untuk pembuatan laporan.

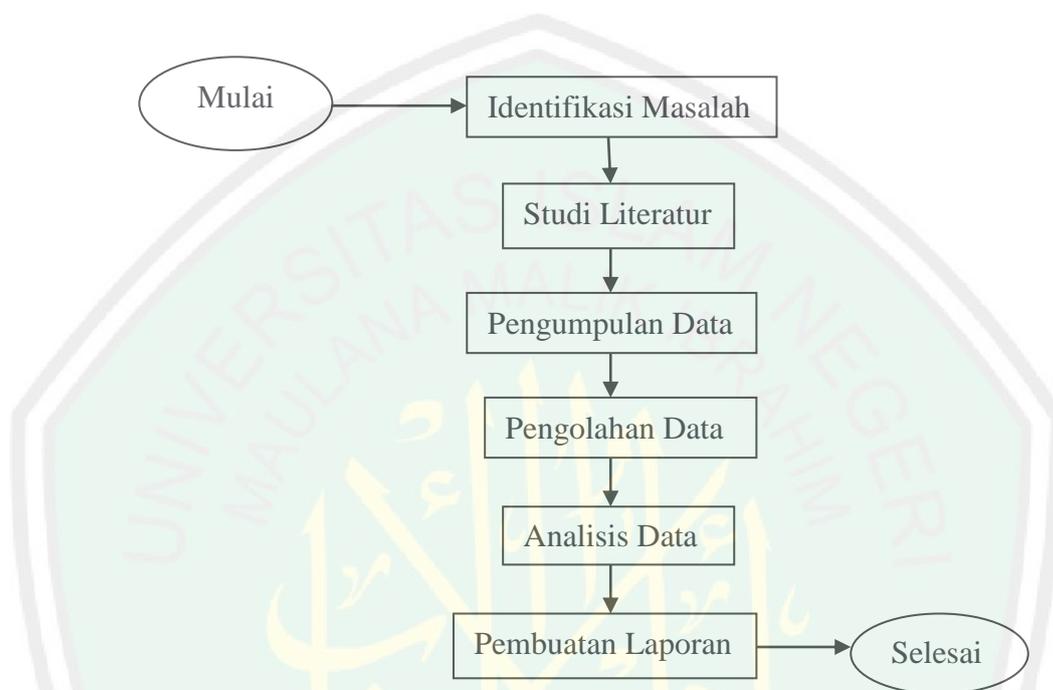
- f. Microsoft Excel digunakan untuk *filtering* data
- g. *Software* Surfer 12 untuk pemetaan lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi.
- h. *Software* Seisgram2K dan Hypoellips untuk mengolah data kegempaan

### 3.3 Jenis Data

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data sekunder dari hasil rekaman alat GPS dari 4 titik pengamatan, dimana satu titik sebagai titik ikat yaitu stasiun GPS BPTK yang berada di kantor BPPTKG dan tiga lainnya sebagai titik pengamatan yang berada di sekitar Gunung Merapi. Didapatkan data GPS dalam format rinex sebanyak 24 data dalam waktu satu hari, dikarenakan stasiun GPS melakukan akuisisi data setiap jam dengan sampling pengukuran tiap satu detik. Rentang waktu dari data yang digunakan dalam penelitian yaitu dari tahun 2009 sampai tahun 2011.

### 3.4 Metodologi Penelitian

#### 3.4.1 Diagram Tahapan Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Tahapan Penelitian

#### 1. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini yaitu bagaimana menganalisis perubahan deformasi dan kecepatan pergeseran untuk mendapatkan lokasi sumber tekanan magma.

#### 2. Studi Literatur

Mencari referensi-referensi terkait dengan masalah yang diangkat dalam penelitian. Studi literatur yang dilakukan meliputi:

- a. Pengkajian tentang *software* pengolahan dari metode GPS untuk mendapatkan nilai deformasi Gunung Merapi.

- b. Studi literatur mengenai analisis deformasi dan kecepatan pergeseran titik-titik GPS.
- c. Studi literatur tentang penentuan lokasi sumber tekanan magma dan besarnya volume suplai magma menggunakan pemodelan Yokoyama dan Mogi.

### 3. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang diperlukan dalam penelitian. Data yang dibutuhkan adalah data pengamatan dari stasiun GPS Gunung Merapi dalam kurun waktu 3 tahun. Data tersebut didapatkan dari Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG).

### 4. Pengolahan Data

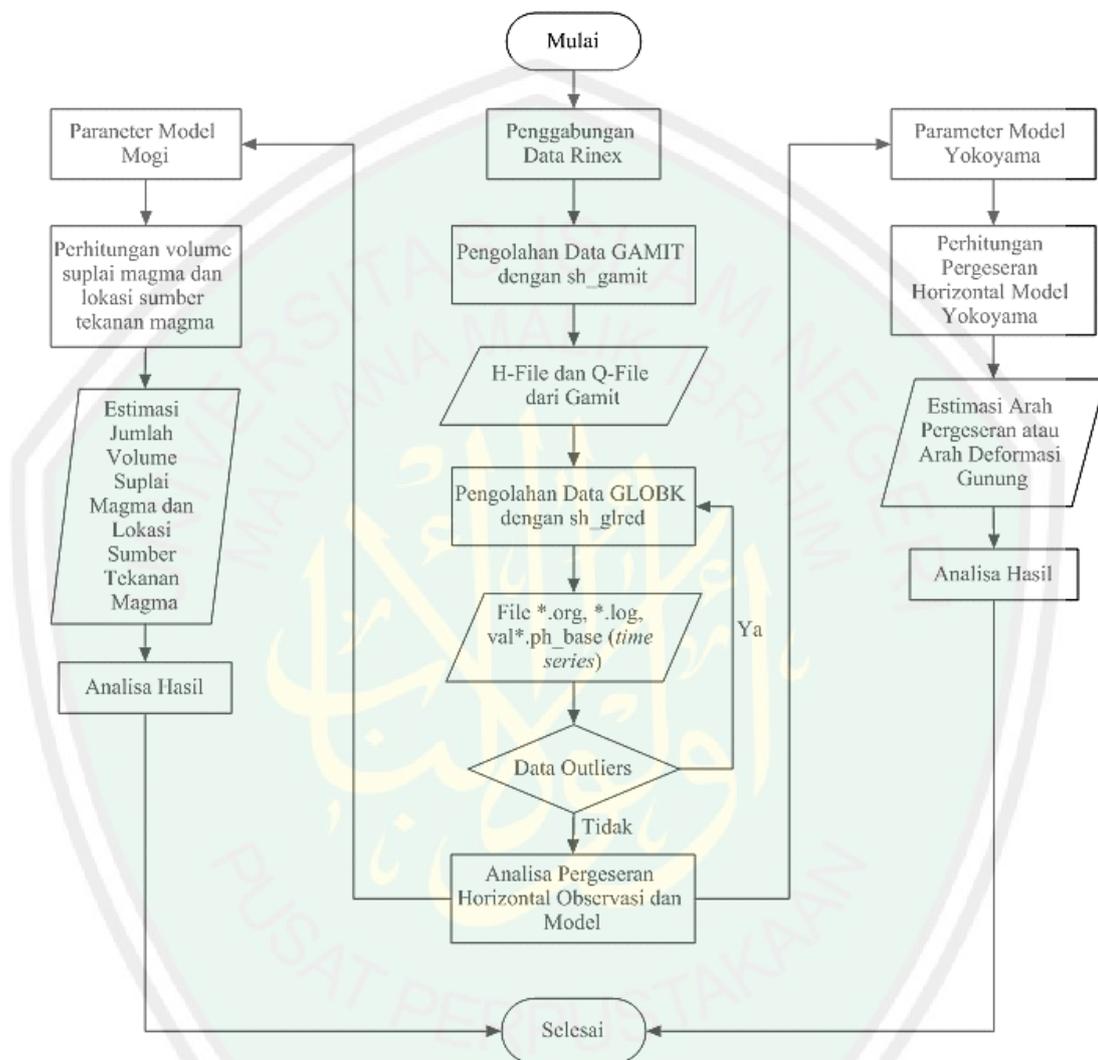
Pada tahap ini dilakukan pengolahan data-data yang diperoleh untuk selanjutnya dilakukan analisis. Tahap pengolahan data lebih lanjut dijelaskan pada Gambar 3.3.

### 5. Analisis Data

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisis besar deformasi yang terjadi pada permukaan Gunung Merapi pada kurun waktu 3 tahun, yang dilanjutkan dengan proses pencarian sumber tekanan menggunakan Model Yokoyama dan Mogi melalui hasil pergeseran tersebut.

### 6. Pembuatan Laporan

### 3.4.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

Pertama, dilakukan proses pengumpulan data baik primer maupun sekunder, dimana tahap ini digunakan untuk mempersiapkan data yang akan diolah. Data RINEX GPS yang diperoleh berupa data pengamatan setiap jam, untuk

mendapatkan data RINEX dalam satu hari maka dilakukan penggabungan dengan *software* TEQC.

Kedua, melakukan pengolahan menggunakan *software* GAMIT & GLOBK. Langkah awalnya adalah melakukan pembuatan direktori kerja untuk menyimpan data RINEX GPS serta *file control*. Kemudian lakukan *editing* dari *file control*. Setelah tahapan *editing* selesai, lakukan proses pengolahan data dengan GAMIT secara *automatic batch processing* yaitu dengan melakukan perintah “*sh\_gamit -s yyyy ddd1 ddd2 -expt [expt]*”. Hasil keluaran dari pengolahan GAMIT adalah *h-files*. Berikutnya adalah menjalankan proses pengolahan dari *software* GLOBK untuk menghasilkan pergeseran secara *time series* dan koordinat estimasi. Sebelum menuju ke dalam GLOBK lakukan konversi *h-file* hasil dari GAMIT menjadi *file biner*. Setelah melakukan konversi lakukan perintah “*sh\_glred -s YYYY1 DDD1 YYYY2 DDD2 -expt [expt] -opt H G E*”.

Ketiga, dari hasil pengolahan *software* GAMIT/GLOBK, dilakukan uji *t-student* untuk menguji nilai pergeseran hasil dari *software* GAMIT/GLOBK secara kualitatif.

Keempat, dilakukan prediksi sumber tekanan menggunakan Model Yokoyama. Prediksi dilakukan dengan membandingkan nilai pergeseran horizontal observasi dengan nilai pergeseran model. Prediksi dilakukan dengan pembuatan program menggunakan Origin Pro.

## **BAB IV**

### **ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

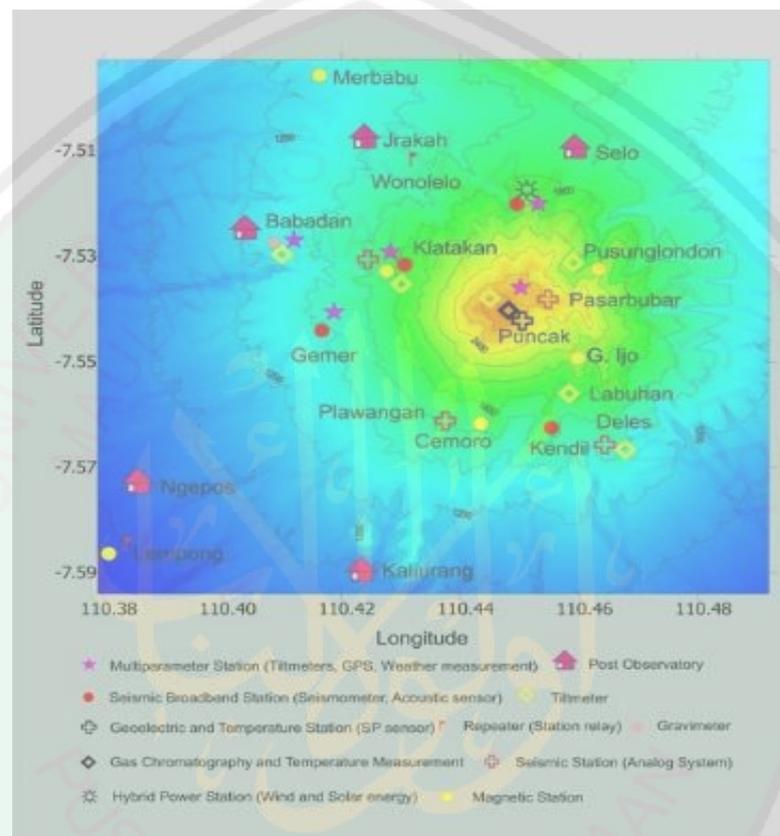
#### **4.1 Analisis Deformasi Menggunakan Data GPS**

Hasil pengolahan data yang didapatkan akan dianalisis pada bab ini dengan analisis secara kualitatif dan kuantitatif. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model sumber tekanan penyebab terjadinya deformasi di permukaan berdasarkan data perubahan titik-titik koordinat yang terdapat pada tubuh gunung api. Analisis kualitatif dilakukan dengan melihat perubahan deformasi yang terjadi berdasarkan pola perubahan data koordinat (derajat) antara kawah Gunung Merapi dengan titik pos pantauannya. Sedangkan analisis kuantitatif dilakukan dengan melihat hasil perhitungan model Mogi dan model Yokoyama berdasarkan parameter yang ada pada referensi yang digunakan sehingga cocok dengan hasil observasi.

Pengolahan data GPS dilakukan menggunakan *software* GAMIT/GLOBK, pengolahan dilakukan untuk mendapatkan koordinat estimasi beserta besar vektor pergeseran dari stasiun GPS Gunung Merapi yang terjadi pada pra dan pasca erupsi 2010 (2009-2011). Pengolahan tahap pertama dilakukan menggunakan *software* GAMIT, kemudian didapatkan solusi berupa h-file sebanyak DOY yang diteliti. Setelah didapatkan solusi dari proses pengolahan GAMIT, tahapan pengolahan dilanjutkan menggunakan *software* GLOBK. Dalam pengolahan GLOBK didapatkan koordinat geosentrik ataupun toposentrik yang selanjutnya akan diamati pergerakan posisinya secara *time series* sehingga dapat diketahui besar pergeseran titik GPS. Sehingga deformasi pada Gunung Merapi dapat diketahui dari besarnya pergeseran atau perubahan koordinat antara kawah

Gunung Merapi dengan pos pantau Gunung Merapi. Pada penelitian kali ini, ada tiga stasiun pos pantau yang diteliti, yaitu pos GRWH, DELS, dan KLAT.

Bertikut adalah penyebaran pos pantau yang ada di Sekitar Gunung Merapi:



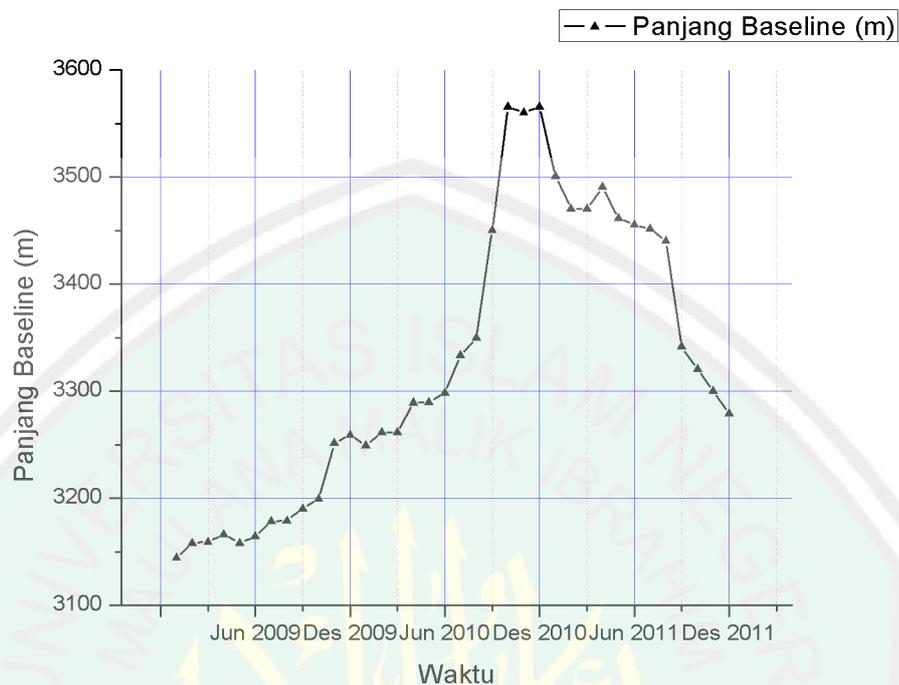
Gambar 4.1 Lokasi Stasiun Pengamatan Lapangan di Gunung Merapi

Pemantauan aktivitas gunung api melalui metode deformasi dapat diketahui melalui proses monitoring inflasi dan deflasi akibat perubahan tekanan dari dalam tubuh gunung api. Proses perubahan badan gunung api tersebut dapat terekam melalui perubahan jarak antar titik pengamat dengan titik ikat (*baseline*). Selain perubahan panjang *baseline*, aktivitas deformasi juga dapat ditunjukkan dengan perubahan tinggi setiap stasiun. Apabila perubahan condong ke arah positif maka

dapat dikatakan gunung tersebut mengalami inflasi, sedangkan apabila condong ke arah negatif maka gunung tersebut mengalami deflasi.

#### 4.1.1 Analisis Deformasi Stasiun GRWH

Dari data koordinat yang diperoleh sepanjang pengamatan, perubahan yang sangat signifikan terjadi ketika terjadi letusan pada akhir tahun 2010. Perubahan vertikal secara positif dan sangat signifikan terjadi pada seluruh titik pantau pada saat terjadi letusan, yaitu pada titik GRWH, KLAT, dan DELS yang berlokasi di sekitar kawah. Kemudian kembali ke posisi semula (berubah negatif) secara bertahap pada tahun 2011. Secara horizontal juga deformasi terjadi secara mencolok terutama pada *baseline* yang berhubungan dengan titik GRWH, KLAT, ataupun DELS. Setelah dilakukan beberapa tahap filter dan pengolahan data GPS, didapatkanlah data berupa perubahan panjang *baseline* yang terjadi pada stasiun GRWH selama periode 2009 hingga 2011 yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.2 Perubahan Panjang *Baseline* Stasiun GRWH Periode 2009-2011

Dari data yang dilampirkan pada tabel 4.1 dan gambar 4.2, dapat kita ketahui bahwa untuk periode 2009-2010, terjadi pemanjangan *baseline* di stasiun GRWH yang ditunjukkan dengan bertambah panjangnya *baseline* antara kawah Gunung Merapi dengan titik pantau pos GRWH sekitar +2 hingga +300 meter. Hal ini menunjukkan bahwa sekitar periode tersebut, aktivitas vulkanik Gunung Merapi meningkat yang akhirnya berujung erupsi besar-besaran pada Bulan Oktober 2010. Setelah terjadinya erupsi (sekitar tahun 2011), aktivitas vulkanik Gunung Merapi akhirnya mereda dan mengalami deflasi, ditunjukkan dengan adanya pemendekan *baseline* antara kawah Gunung Merapi dengan titik pantau stasiun GRWH sekitar -3 hingga -100 meter.

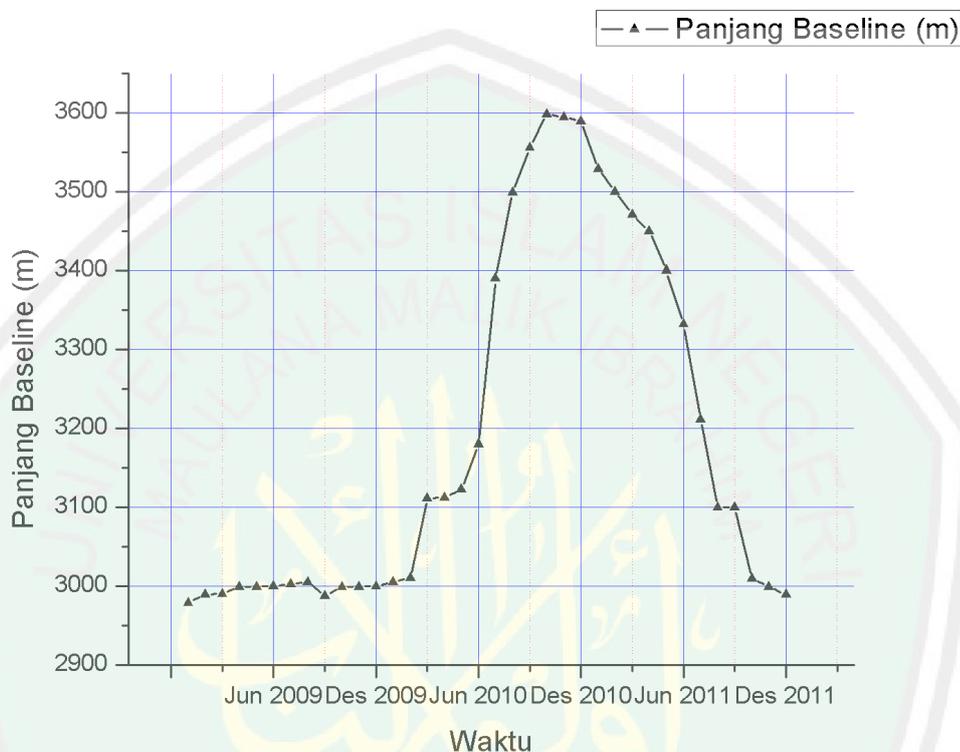
Deformasi sangat erat kaitannya dengan keadaan magma yang terkandung pada sebuah gunung api. Deformasi pada permukaan gunung api salah satunya

disebabkan oleh perubahan aktivitas magma di dalam tubuh gunung api. Apabila magma bergerak dari bawah ke atas permukaan (inflasi), maka permukaan tubuh gunung api akan mengalami pengembangan karena mendapatkan tekanan dari bawah permukaan. Pengembangan tubuh gunung api ini menyebabkan perubahan panjang *baseline* atau perubahan jarak antara kawah gunung dengan salah satu pos pantau gunung api. Sedangkan saat magma bergerak dari atas menuju ke bawah kantung magma (deflasi), maka permukaan tubuh gunung api akan mengalami pengempisan karena mendapatkan tekanan dari arah atas gunung api. Hal ini juga akan menyebabkan terjadinya perubahan panjang *baseline*. Pada kasus ini, di Stasiun GRWH saat menjelang terjadinya erupsi 2010, Gunung Merapi mengalami pengembangan tubuh gunung (inflasi) karena magma bergerak dari bawah ke atas permukaan tubuh gunung api yang akhirnya magma dikeluarkan bersamaan dengan letusan Gunung Merapi pada tahun 2010. Setelah letusan, aktivitas vulkanik magma kembali menurun (deflasi) yang ditandai dengan semakin pendeknya *baseline* atau semakin pendeknya jarak antara kawah Gunung Merapi dengan stasiun pantau GRWH.

#### **4.1.2 Analisis Deformasi Stasiun KLAT**

Stasiun KLAT (Klatakan) berada di sisi barat-laut dari puncak Gunung Merapi. Sama halnya dengan stasiun GRWH dan DELS, stasiun ini juga merupakan pos pantau untuk data GPS dengan menggunakan alat dan sensor yang sama. Setelah dilakukan beberapa tahap filter dan pengolahan data GPS, didapatkanlah data berupa perubahan panjang *baseline* yang terjadi pada stasiun

KLAT selama periode 2009 hingga 2011 yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.3 Perubahan Panjang *Baseline* Stasiun KLAT Periode 2009-2011

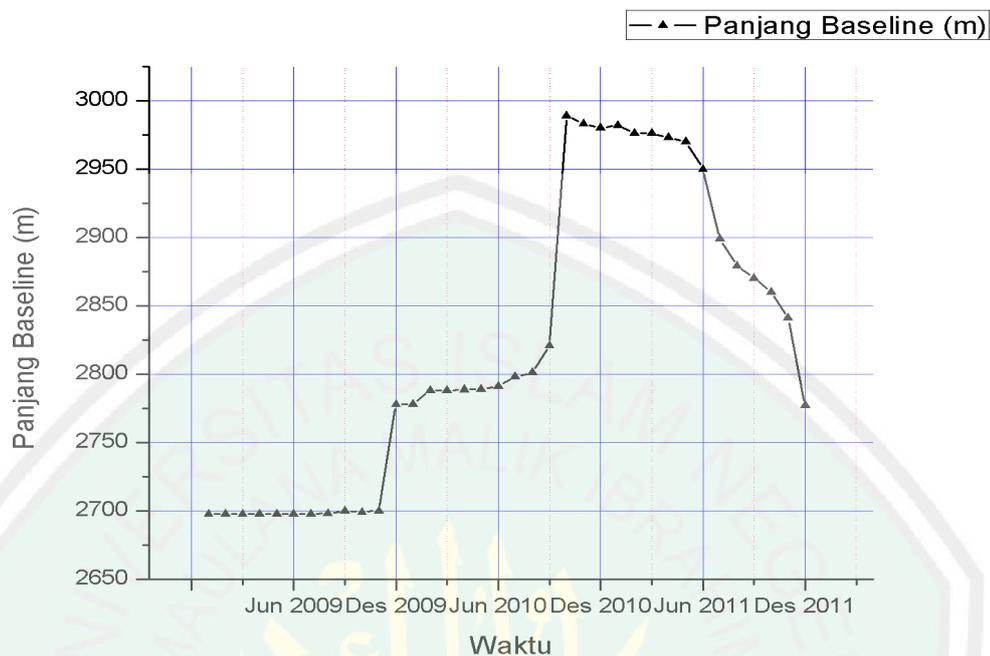
Dari data yang dilampirkan pada tabel 4.1 dan gambar 4.3, dapat kita ketahui bahwa untuk periode 2009-2010, terjadi pemanjangan *baseline* di stasiun GRWH yang ditunjukkan dengan bertambah panjangnya *baseline* antara kawah Gunung Merapi dengan titik pantau pos KLAT sekitar +1 hingga +319 meter. Hal ini menunjukkan bahwa sekitar periode tersebut, aktivitas vulkanik Gunung Merapi meningkat yang akhirnya berujung erupsi besar-besaran pada Bulan Oktober 2010. Setelah terjadinya erupsi, aktivitas vulkanik Gunung Merapi akhirnya mereda dan mengalami deflasi, ditunjukkan dengan adanya pemendekan

*baseline* antara kawah Gunung Merapi dengan titik pantau stasiun GRWH sekitar -1 hingga -121 meter.

Deformasi pada permukaan gunung api salah satunya disebabkan oleh perubahan aktivitas magma di dalam tubuh gunung api. Apabila magma bergerak dari bawah ke atas permukaan (inflasi), maka permukaan tubuh gunung api akan mengalami pengembangan karena mendapatkan tekanan dari bawah permukaan. Pengembangan tubuh gunung api ini menyebabkan perubahan panjang *baseline* atau perubahan jarak antara kawah gunung dengan salah satu pos pantau gunung api. Sedangkan saat magma bergerak dari atas menuju ke bawah kantung magma (deflasi), maka permukaan tubuh gunung api akan mengalami pengempisan karena mendapatkan tekanan dari arah atas gunung api. Hal ini juga akan menyebabkan terjadinya perubahan panjang *baseline*. Sama halnya yang terjadi di stasiun GRWH, di Stasiun KLAT saat menjelang terjadinya erupsi 2010, Gunung Merapi juga mengalami pengembangan tubuh gunung (inflasi) karena magma bergerak dari bawah ke atas permukaan tubuh gunung api yang akhirnya magma dikeluarkan bersamaan dengan letusan Gunung Merapi pada tahun 2010. Setelah letusan, aktivitas vulkanik magma kembali menurun (deflasi) yang ditandai dengan semakin pendeknya *baseline* atau semakin pendeknya jarak antara kawah Gunung Merapi dengan stasiun pantau KLAT.

#### **4.1.3 Analisis Deformasi Stasiun DELS**

Berikut adalah perubahan panjang *baseline* antara kawah Gunung Merapi dengan pos pantau stasiun DELS periode 2009 hingga periode 2011:

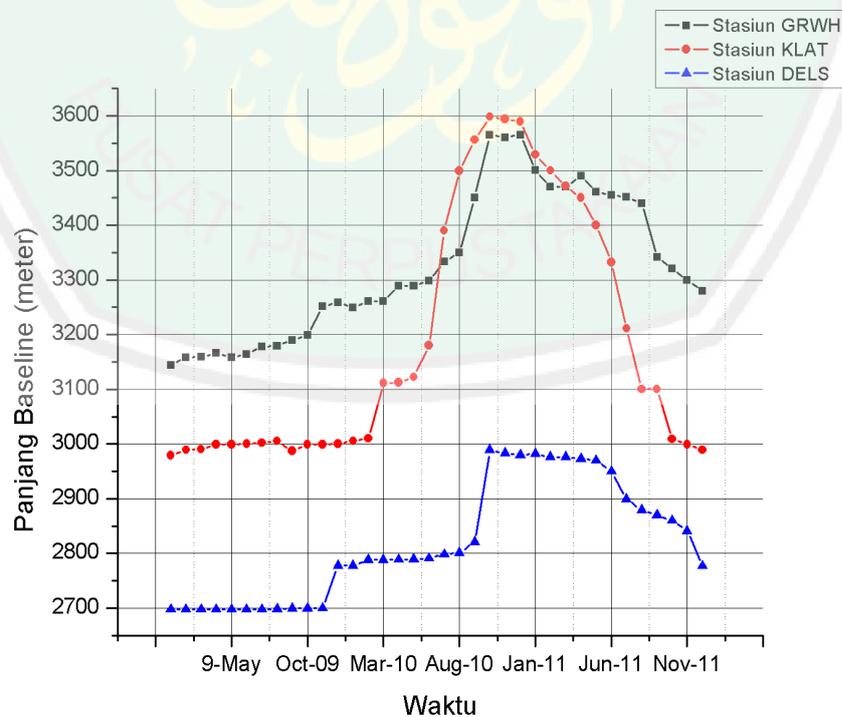


Gambar 4.4 Perubahan Panjang *Baseline* Stasiun DELS Periode 2009-2011

Sama halnya dengan stasiun pantau yang lainnya, dari gambar 4.4 dan tabel 4.1 dapat diketahui bahwa untuk periode 2009-2010 stasiun ini mengalami pemanjangan *baseline* terhadap kawah Gunung Merapi, yaitu sekitar +0.1 hingga +182 meter. Setelah terjadinya erupsi pada Bulan Oktober 2010, terjadi pemendekan *baseline* antara stasiun DELS dengan kawah Gunung Merapi, yaitu sekitar -2 hingga -100 meter. Berikut ini adalah data perubahan panjang *baseline* stasiun pos pantau dengan kawah Gunung Merapi:

Deformasi pada permukaan gunung api salah satunya disebabkan oleh perubahan aktivitas magma di dalam tubuh gunung api. Apabila magma bergerak dari bawah ke atas permukaan (inflasi), maka permukaan tubuh gunung api akan mengalami pengembangan karena mendapatkan tekanan dari bawah permukaan. Pengembangan tubuh gunung api ini menyebabkan perubahan panjang *baseline*

atau perubahan jarak antara kawah gunung dengan salah satu pos pantau gunung api. Sedangkan saat magma bergerak dari atas menuju ke bawah kantung magma (deflasi), maka permukaan tubuh gunung api akan mengalami pengempisan karena mendapatkan tekanan dari arah atas gunung api. Hal ini juga akan menyebabkan terjadinya perubahan panjang *baseline*. Pada kasus ini, di Stasiun DELS saat menjelang terjadinya erupsi 2010, Gunung Merapi mengalami pengembangan tubuh gunung (inflasi) karena magma bergerak dari bawah ke atas permukaan tubuh gunung api yang akhirnya magma dikeluarkan bersamaan dengan letusan Gunung Merapi pada tahun 2010. Setelah letusan, aktivitas vulkanik magma kembali menurun (deflasi) yang ditandai dengan semakin pendeknya *baseline* atau semakin pendeknya jarak antara kawah Gunung Merapi dengan stasiun pantau DELS.



Gambar 4.5 Perbandingan Panjang *Baselines* antara Stasiun DELS, KLAT, dan GRW

Tabel 4.1 Perubahan Panjang *Baseline*

<b>Waktu</b>	<b>Panjang <i>Baseline</i> Stasiun GRWH (meter)</b>	<b>Panjang <i>Baseline</i> Stasiun KLAT (meter)</b>	<b>Panjang <i>Baseline</i> Stasiun DELS (meter)</b>
2009-Jan	3144.2472	2979.4797	2697.892
2009-Feb	3158.2473	2989.4797	2697.9
2009-Mar	3159.2489	2990.4799	2697.82121
2009-Apr	3166.2461	2999.4798	2697.82124
2009-May	3158.2488	2999.4802	2697.82222
2009-Jun	3164.2472	3000.4804	2697.92314
2009-Jul	3178.2472	3002.4798	2697.92344
2009-Aug	3179.2572	3005.479	2698.2354
2009-Sep	3190.2592	2987.4803	2699.92355
2009-Oct	3199.2472	2999.4805	2699.2356
2009-Nov	3251.2542	2999.4809	2700.2359
2009-Dec	3259.2549	3000.4807	2778.2361
2010-Jan	3249.3472	3005.481	2778.2366
2010-Feb	3261.3482	3010.481	2788.2378
2010-Mar	3261.3482	3111.4811	2788.2379
2010-Apr	3289.3572	3112.4813	2788.9399
2010-May	3289.5472	3122.4813	2789.2433
2010-Jun	3298.5472	3180.4821	2791.2456
2010-Jul	3333.5551	3390.4822	2798.2489
2010-Aug	3349.5562	3499.4823	2801.249
2010-Sep	3450.5583	3556.4823	2821.2498
2010-Oct	3565.6012	3598.4824	2989.258
2010-Nov	3560.6111	3594.4825	2983.2598
2010-Dec	3565.6321	3589.4825	2980.254
2011-Jan	3500.6432	3529.4801	2982.2532
2011-Feb	3470.5432	3500.4811	2976.2531
2011-Mar	3470.5342	3471.4812	2976.2444

2011-Apr	3490.4567	3450.48	2973.2432
2011-May	3461.4444	3400.48	2970.2431
2011-Jun	3455.4321	3332.4799	2950.2423
2011-Jul	3451.4232	3211.4796	2899.2444
2011-Aug	3440.4232	3100.4795	2879.2344
2011-Sep	3341.4111	3100.4799	2870.2211
2011-Oct	3320.4012	3009.4797	2860.2214
2011-Nov	3300.3232	2999.4795	2841.2344
2011-Dec	3279.3222	2989.4795	2777.2345

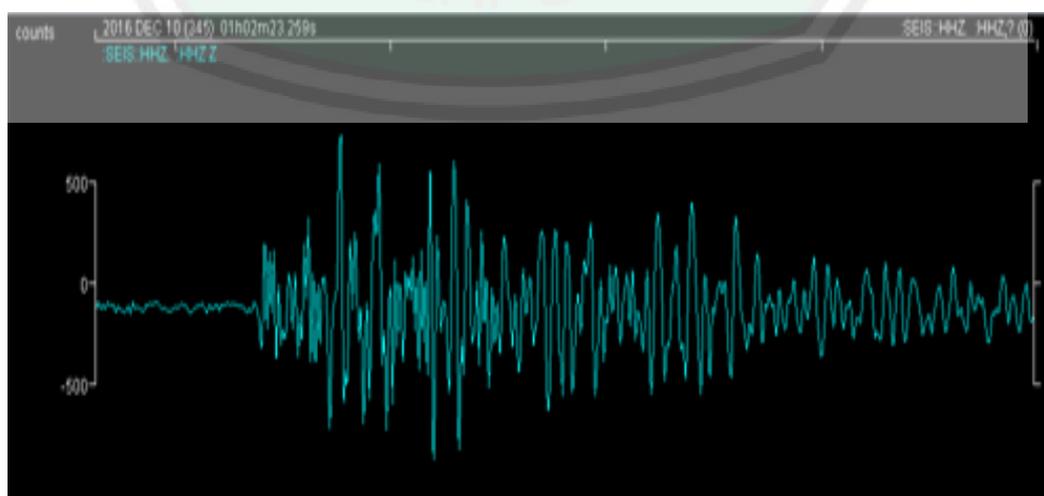
#### 4.2 Analisis Data Seismisitas Gunung Merapi Periode 2009-2011

Dalam penelitian ini digunakan beberapa data pendukung, salah satunya adalah data seismisitas Gunung Merapi. Data seismisitas menjadi indikator untuk melihat peningkatan aktivitas vulkanik menjelang terjadinya suatu letusan. Seismisitas Merapi periode 2009-2011 ditandai adanya beberapa gempa VTA dan gempa VTB yang terjadi. Sedangkan munculnya gempa guguran periode tersebut berperan penting dalam penentuan status dari gunung tersebut. Gempa VTA yang terekam berhubungan dengan migrasi magma ke atas dari dapur magma menuju ke kantong magma, sedangkan peningkatan tekanan di kantong magma dapat memicu munculnya gempa VTB sehingga gempa VTA dan VTB dapat terjadi relatif dalam waktu yang sama.

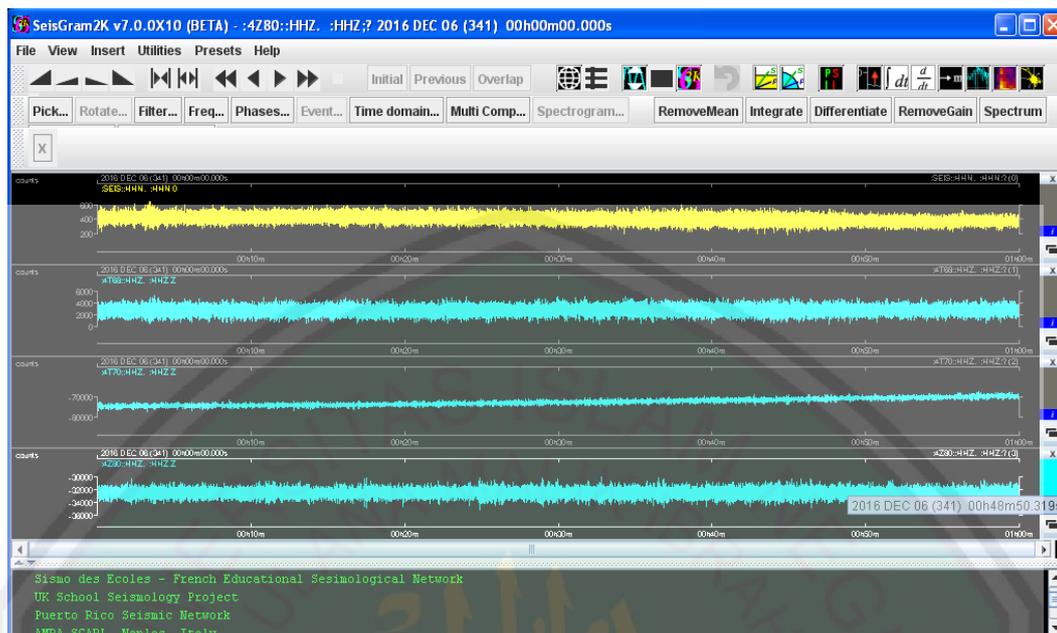
Pada saat terjadi erupsi, terjadi banyak gempa di antaranya gempa vulkanik dan gempa guguran. Sebagai contoh, saat menjelang terjadinya erupsi Gunung Merapi pada Bulan Oktober 2010, terjadi gempa vulkanik sebanyak 4 kali yang diikuti oleh gempa guguran sebanyak 16 kali. Hal ini menunjukkan adanya

pergerakan magma dari kedalaman yang mencapai permukaan. Desakan magma di bawah permukaan mengakibatkan terjadinya gempa MP maupun guguran. Gempa guguran biasanya diasosiasikan dengan adanya pergerakan magma menuju permukaan bumi. Adanya tekanan besar dari dalam menyebabkan adanya runtuh batuan karena pengaruh gravitasi dan menyebabkan guguran.

Data gempa vulkanik dapat digunakan untuk mengetahui hiposenter atau titik dalam perut bumi yang merupakan sumber gempa. Gempa yang muncul pada kedalaman 0-1,5 km dinamakan dengan gempa vulkanik dangkal (VTB) sedangkan gempa yang muncul pada kedalaman 2,5-5 km dinamakan sebagai gempa dalam (VTA) (Ratdomopurbo dan Poupinet, 1995). Pengolahan data dimulai dengan *picking* gelombang seismik menggunakan *software* Seisgram2K dan *Hypoellips* untuk mendapatkan lokasi titik pusat gempa yang terjadi atau hiposenter. Berdasarkan pengolahan data kegempaan didapatkan titik hiposenter yang berada di sekitar kedalaman 2.3 km atau 2300 m dari puncak Merapi. Gambar 4.5 berikut merupakan salah satu hasil *picking* gelombang seismik gempa yang terjadi.



Gambar 4.6 Gelombang seismik saat terjadi gempa



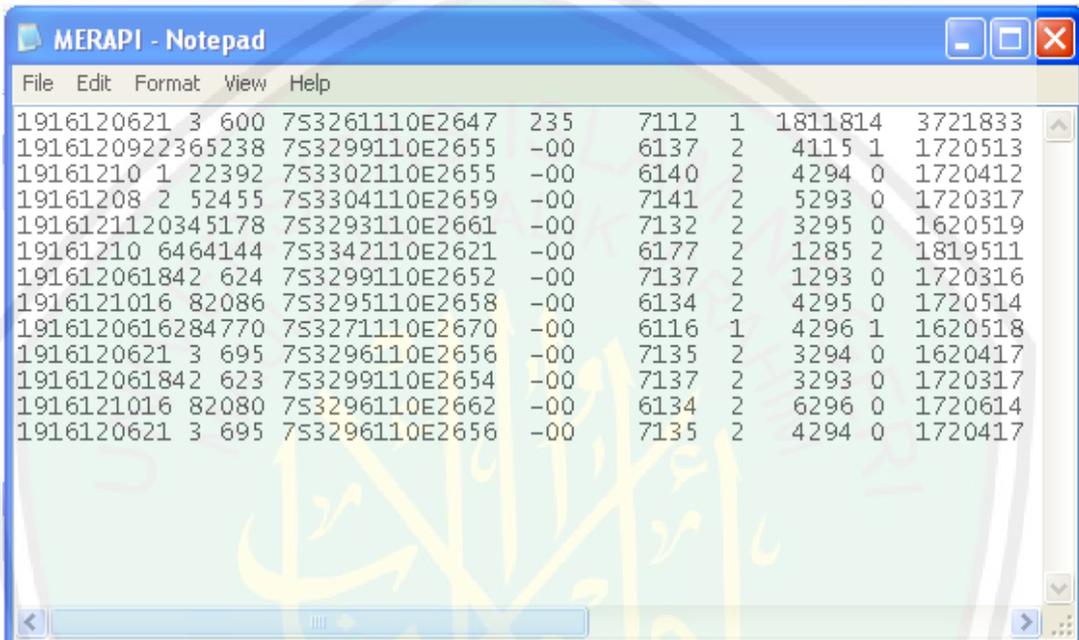
Gambar 4.7 Gelombang seismik saat tidak terjadi gempa

Data berupa gelombang seismik gempa seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 tidak bisa mengidentifikasi apakah gempa tersebut gempa vulkanik dalam (VTA) atau gempa vulkanik dangkal (VTB). Jenis gempa dapat diketahui setelah melakukan pengolahan data menggunakan aplikasi hypoellips. Data yang diolah pada sub pembahasan ini adalah data kegempaan pada tanggal 26 Oktober 2010, hari di mana terjadinya erupsi besar Gunung Merapi.

Setelah data kegempaan atau seismisitas di-*picking* menggunakan aplikasi Seisgram2K, data kegempaan kemudian dimasukkan dan diolah menggunakan aplikasi Hypoellips agar didapatkan data berupa garis lintang (*latitude*), garis bujur (*longitude*), dan kedalaman hiposenter itu sendiri.

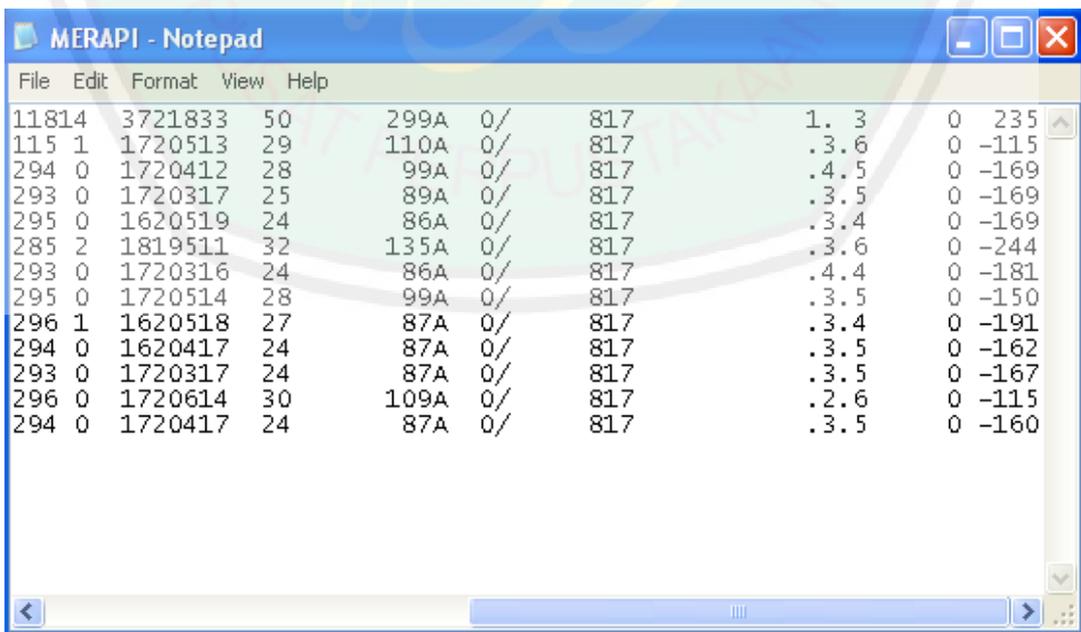
Data gempa yang diperoleh dari stasiun pengamatan masih dengan waktu GMT 00. Gunung Merapi merupakan gunung yang berada pada zona waktu GMT

+7. Oleh karena itu jam datangnya gempa (*arrival time*) harus ditambah dengan 7 jam terlebih dahulu agar sesuai dengan zona waktu Indonesia. Berikut ini merupakan *output* dari aplikasi Hypoellips:



1916120621	3	600	7S3261110E2647	235	7112	1	1811814	3721833
1916120922365238			7S3299110E2655	-00	6137	2	4115	1 1720513
19161210	1	22392	7S3302110E2655	-00	6140	2	4294	0 1720412
19161208	2	52455	7S3304110E2659	-00	7141	2	5293	0 1720317
1916121120345178			7S3293110E2661	-00	7132	2	3295	0 1620519
19161210	6464144		7S3342110E2621	-00	6177	2	1285	2 1819511
191612061842	624		7S3299110E2652	-00	7137	2	1293	0 1720316
1916121016	82086		7S3295110E2658	-00	6134	2	4295	0 1720514
1916120616284770			7S3271110E2670	-00	6116	1	4296	1 1620518
1916120621	3	695	7S3296110E2656	-00	7135	2	3294	0 1620417
191612061842	623		7S3299110E2654	-00	7137	2	3293	0 1720317
1916121016	82080		7S3296110E2662	-00	6134	2	6296	0 1720614
1916120621	3	695	7S3296110E2656	-00	7135	2	4294	0 1720417

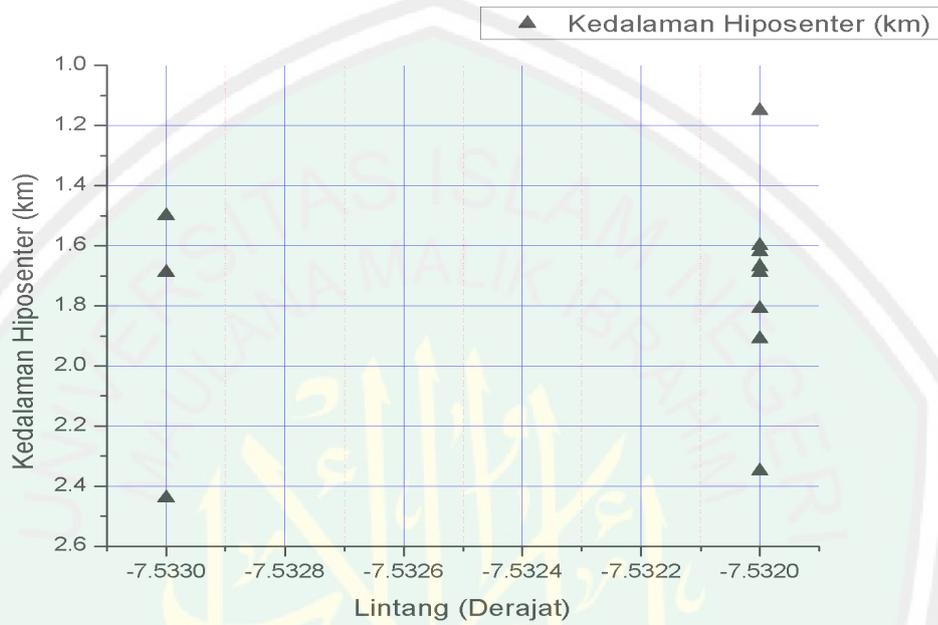
Gambar 4.8 *Output* aplikasi Hypoellips berupa garis lintang dan garis bujur



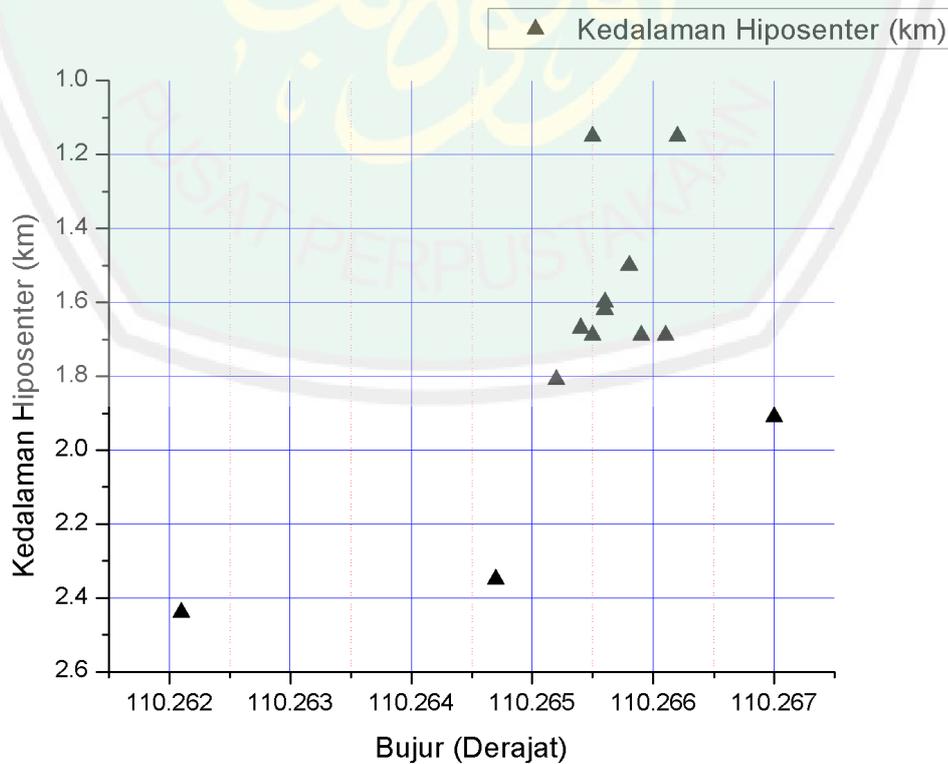
11814	3721833	50	299A	0/	817	1. 3	0	235
115	1	1720513	29	110A	0/	817	.3.6	0 -115
294	0	1720412	28	99A	0/	817	.4.5	0 -169
293	0	1720317	25	89A	0/	817	.3.5	0 -169
295	0	1620519	24	86A	0/	817	.3.4	0 -169
285	2	1819511	32	135A	0/	817	.3.6	0 -244
293	0	1720316	24	86A	0/	817	.4.4	0 -181
295	0	1720514	28	99A	0/	817	.3.5	0 -150
296	1	1620518	27	87A	0/	817	.3.4	0 -191
294	0	1620417	24	87A	0/	817	.3.5	0 -162
293	0	1720317	24	87A	0/	817	.3.5	0 -167
296	0	1720614	30	109A	0/	817	.2.6	0 -115
294	0	1720417	24	87A	0/	817	.3.5	0 -160

Gambar 4.9 *Output* aplikasi Hypoellips berupa kedalaman hiposenter

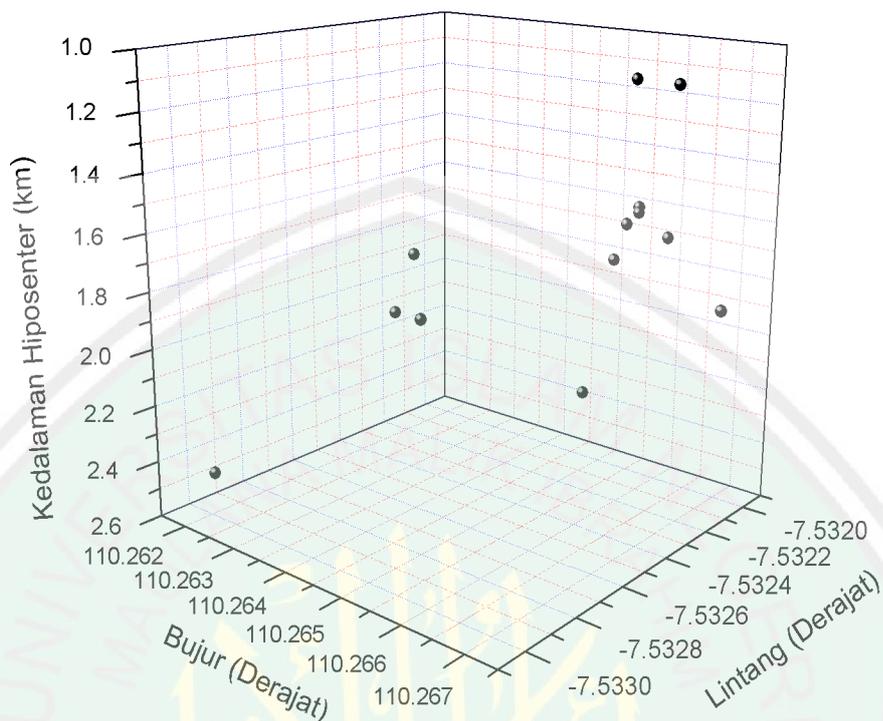
Hasil pengolahan data seismisitas dalam mendapatkan kedalaman pusat gempa (hiposenter) ditunjukkan seperti gambar 4.10, 4.11 dan 4.12 berikut ini:



Gambar 4.10 Letak hiposenter berdasarkan garis lintang (*latitude*)



Gambar 4.11 Letak hiposenter berdasarkan garis bujur (*longitude*)



Gambar 4.12 Hasil 3 dimensi letak hiposenter gempa

Dari gambar 4.10, 4.11, dan 4.12 di atas, dapat kita ketahui bahwa kedalaman pusat gempa (hiposenter) yang terjadi pada hari di mana terjadinya erupsi besar Gunung Merapi (26 Oktober 2010) berada pada kedalaman sekitar 1100 meter hingga 2500 meter di bawah permukaan.

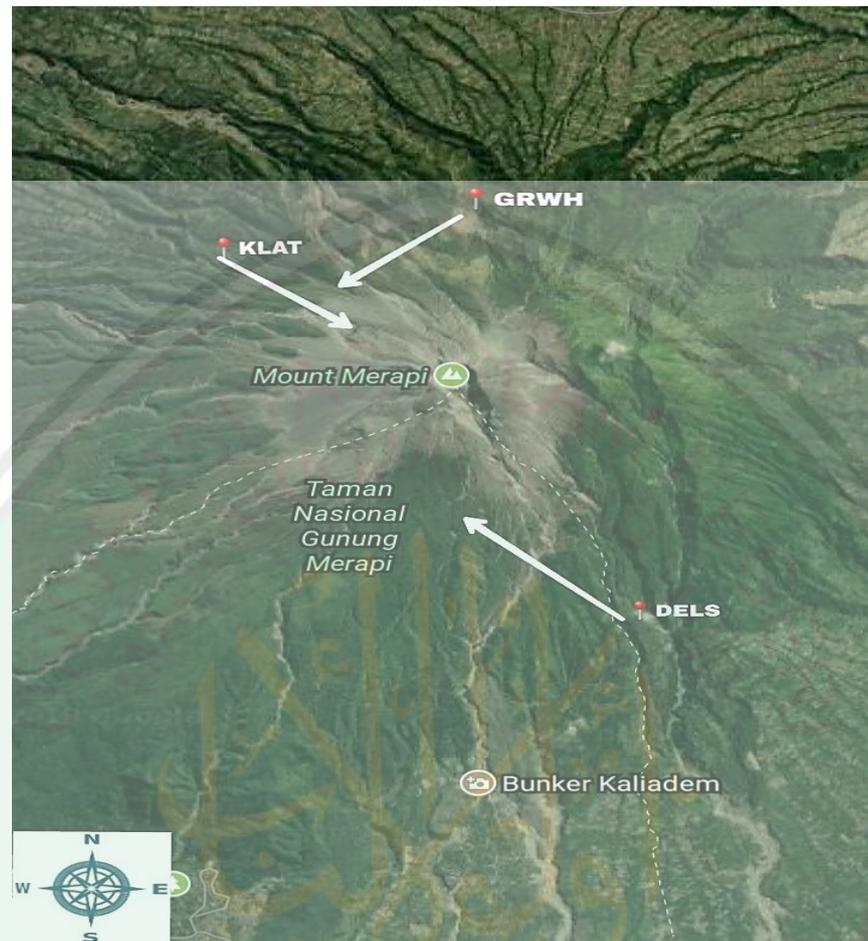
#### 4.3 Analisis Vektor Pergeseran Menggunakan Model Yokoyama

Salah satu cara mengetahui pola deformasi yang terjadi pada badan gunung api adalah dengan mempelajari pola vektor pergeseran masing-masing koordinat pengamatan GPS.

Yokoyama mengasumsikan sumber tekanan berbentuk *sphere* dengan perluasan searah (*unidirectional*) (Yokoyama, 1971). Efek dari perluasan searah tersebut adalah dengan tekanan yang lebih kecil model yokoyama menghasilkan

pergeseran yang sama besarnya apabila dibandingkan dengan model deformasi gunung lainnya.

Proses pemodelan aktivitas deformasi Gunung Merapi menunjukkan lokasi dari sumber tekanan terdapat di sebelah Barat Laut dari puncak Gunung Merapi pada kedalaman 2100 meter relatif terhadap puncak. Pada penelitian lain ditinjau dari segi sumber tekanan menggunakan pemodelan Anomali Bouguer terlihat bahwa pada kedalaman 2500 meter tampak adanya distribusi densitas rendah di daerah Gunung Merapi, densitas rendah ini diasumsikan berbentuk ellips yang ditafsirkan sebagai kantong magma (Sarkowi, 2010). Sedangkan terdapat publikasi lain yang juga menyatakan letak kantong magma dari Gunung Merapi berkisar pada kedalaman 2000 meter hingga 2500 meter (Bahlefi, 2013). Dari kedua pernyataan di atas maka prediksi kedalaman dari Model Yokoyama dapat dikatakan mendekati atau masih dalam kisaran nilai yang sama dengan nilai kedalaman sebesar 2100 meter. Aktivitas yang terjadi pada sumber tekanan dangkal memberikan interaksi yang terekam pada permukaan Gunung Merapi, hal tersebut dapat terlihat dari arah pergerakan vektor pada Gambar 4.12:



Gambar 4.13 Vektor pergeseran arah deformasi Gunung Merapi

#### 4.4 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Model Mogi

Aktivitas magmatik pada sumber tekanan reservoir magma merupakan penyebab adanya deformasi pada gunung api. Deformasi pada gunung api berupa inflasi dan deflasi dapat terlihat dari pola vektor pergeseran. Berdasarkan vektor pergeseran tersebut dapat ditentukan keberadaan sumber magma, bentuk, dan lokasi sumber magma tersebut. Salah satu cara untuk menentukan sumber tekanan tersebut adalah dengan menggunakan model Mogi. Metode penentuan sumber tekanan ini ditemukan oleh Kiyoo Mogi pada tahun 1958. Model Mogi merupakan solusi statis untuk menentukan medan pergeseran pada sumber

tekanan *spherical* yang berada di dalam perut gunung yang merupakan bagian kerak bumi yang diasumsikan elastik. Model intrusi magma ini secara luas digunakan untuk memprediksi pengamatan deformasi dari gunung api. Model Mogi mensimulasikan sumber tekanan yang berupa bola/bulatan kecil yang terpancang sebuah ruang dalam gunung api yang homogen, isotropis (sifat mekanik seragam pada setiap arah) dan mempunyai faktor rasio.

Berdasarkan analisis kualitatif, setiap grafik GPS stasiun GRWH, KLAT, dan DELS menunjukkan deformasi yang terjadi secara signifikan dengan besar anomali data GPS periode 2009-2011 sebesar -1 hingga +319 meter. Besar anomali ini juga dapat digunakan untuk perhitungan lokasi sumber tekanan magma dan volume suplai magma yang ada di bawah permukaan Merapi. Dengan adanya asumsi bahwa sumber tekanan yang ada di bawah permukaan penyebab terjadinya perubahan tubuh gunung api baik pengembangan maupun pengempisan, sehingga dilakukan perhitungan berdasarkan teori model Mogi untuk mengetahui besar tekanan yang berada di kedalaman tertentu sebagai penyebab deformasi permukaan.

#### 4.4.1 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Stasiun GRWH

Besarnya anomali data GPS di Stasiun GRWH dianggap sebagai besarnya pergeseran horizontal hasil pengukuran ( $\Delta U_r$  observasi). Pergeseran horizontal observasi digunakan sebagai nilai patokan hasil pengukuran dalam mencari parameter model lokasi sumber tekanan yang cocok antara keduanya dengan proses iterasi (pengulangan pengolahan data). Perhitungan ini dilakukan untuk

mengetahui kedalaman atau lokasi sumber tekanan magma gunung merapi saat terjadinya erupsi.

Perhitungan model menggunakan persamaan (2.6) yang ada di bab kedua. Input yang digunakan adalah jarak radial antara puncak dengan stasiun pantau Gunung Merapi (konstan), kedalaman sumber, poisson's ratio, rigiditas, jari-jari sumber tekanan dan perubahan tekanan. Sedangkan yang dicari adalah lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi. Pembuatan model Mogi juga digunakan untuk mengetahui apakah deformasi periode tersebut terpengaruhi oleh sumber magma dangkal (kantong magma) atau sumber magma yang dalam (dapur magma).

Tabel 4.2 Parameter Model Mogi Stasiun GRWH

Anomali Data (meter)	Jari-Jari Bola Pusat Tekanan (meter)	Perubahan Tekanan (Pa)	Rigiditas Medium (Pa)	Kedalaman Sumber Tekanan Magma (meter)
0.000001	550	$10^5$	$2 \times 10^{10}$	1252.59

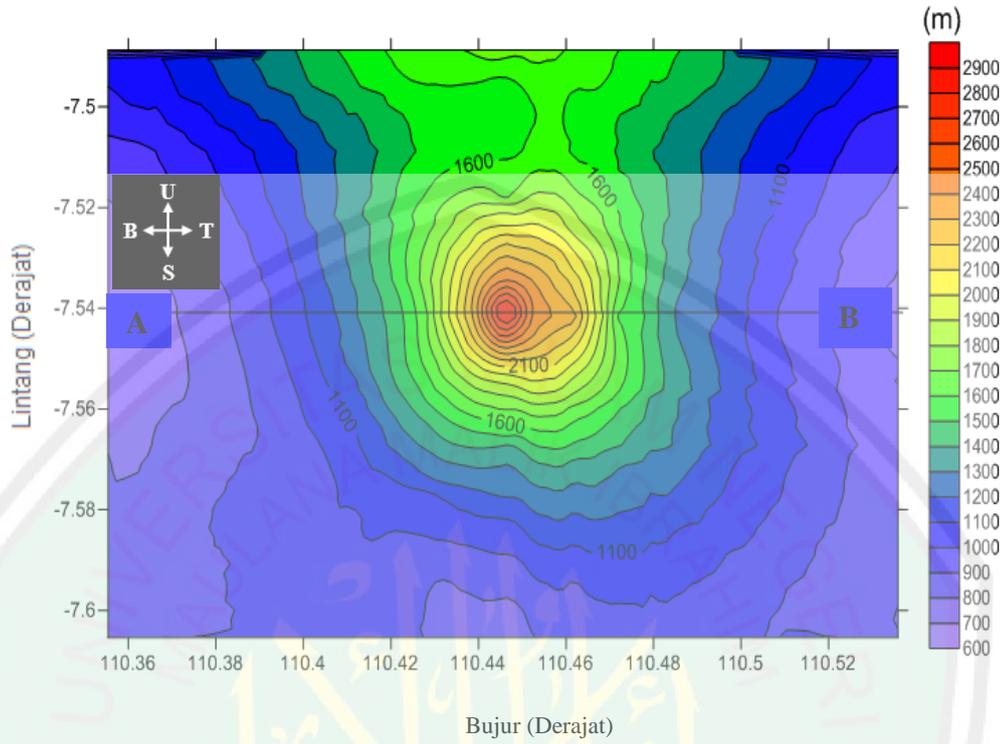
Nilai perubahan tekanan yang digunakan pada model Mogi ini sebesar 0,1 MPa yang umum digunakan untuk kawasan gunung api (Bonnacorrso dkk., 1996). *Shear Modulus* yang digunakan dalam perhitungan model Mogi ini sebesar 20 GPa yang umum digunakan untuk batuan kerak bumi (Dzurisin, 2007).

Hasil yang diperoleh dari perhitungan model Mogi diperoleh lokasi sumber tekanan magma penyebab deformasi yang berada di kedalaman 1252.59 meter dengan besar perubahan tekanan penyebab deformasi sebesar 0,1 MPa dan jari-

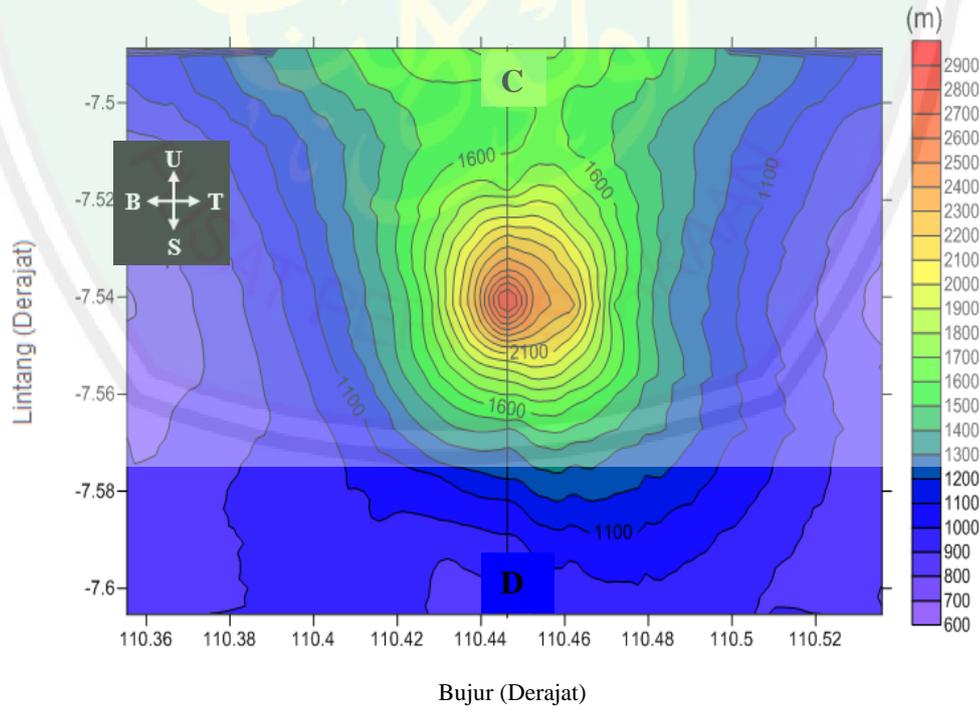
jari bola pusat tekanan sebesar 550 m. Selain itu, berdasarkan analisis seismisitas Gunung Merapi setelah dihitung didapatkan titik pusat hiposenter berada pada kedalaman sekitar 1100 meter hingga 2500 meter di bawah permukaan. Nilai hiposenter tersebut dijadikan validasi terhadap hasil perhitungan model berdasarkan data GPS yang terukur pada periode tersebut, dan keduanya memiliki nilai yang cukup sama dan bisa dinyatakan bahwa perhitungan parameter sudah mewakili keadaan yang sebenarnya.

Kedalaman sumber magma yang telah dihitung menggunakan model Mogi dapat dimodelkan baik 2D maupun 3D menggunakan aplikasi Surfer 12 dan Origin Pro 8. Berdasarkan peta topografi wilayah Gunung Merapi dapat diolah sehingga pola permukaan gunung dapat diketahui dengan melakukan *cross section* pada arah A-B (barat-timur) dan C-D (utara-selatan). Adanya *cross section* ini bertujuan untuk memudahkan dalam pemodelan ataupun dalam analisis hasil sumber magma yang ada di bawah permukaan Merapi.

Hasil *cross section* A-B pada peta topografi daerah sekitar Gunung Merapi yang ditunjukkan pada gambar 4.14. Sedangkan hasil *cross section* C-D pada peta topografi daerah sekitar Gunung Merapi yang ditunjukkan pada gambar 4.15. Berdasarkan hasil pengolahan peta, garis yang ada merupakan batas dari kontur warna, sedangkan warna mempresentasikan perbedaan ketinggian dari yang terendah hingga tertinggi.

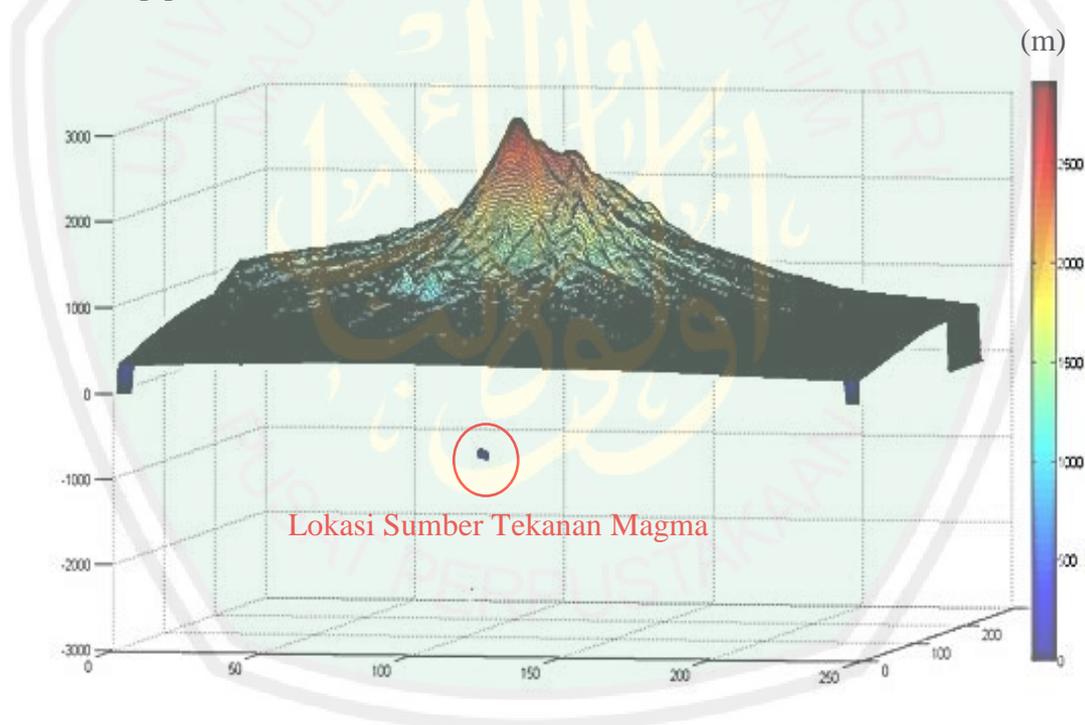


Gambar 4.14 Cross section barat-timur Gunung Merapi



Gambar 4.15 Cross Section utara-selatan Gunung Merapi

Berdasarkan penelitian ini, posisi dari tekanan magma masih berada pada kisaran kantong magma, walaupun telah terjadi beberapa aktivitas gempa vulkanik pada kedalaman dangkal. Selain itu, inflasi pada tubuh Gunung Merapi mengindikasikan bahwa telah terjadi aktivitas dari sumber magma yang menekan tubuh Gunung Merapi. Dari Gambar 4.16 di bawah tampak sebuah titik di bawah permukaan model Gunung Merapi. Titik tersebut merupakan posisi sumber tekanan magma, dimana posisi kedalamannya adalah 1252.59 meter relatif terhadap permukaan laut.



Gambar 4.16 Model 3 Dimensi Gunung Merapi dan Lokasi Sumber Tekanan Magma Berdasarkan Data Stasiun GRWH

#### 4.4.2 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Stasiun KLAT

Besarnya anomali data GPS di Stasiun KLAT dianggap sebagai besarnya pergeseran horizontal hasil pengukuran ( $\Delta U_r$  observasi). Pergeseran horizontal observasi digunakan sebagai nilai patokan hasil pengukuran dalam mencari

parameter model lokasi sumber tekanan yang cocok antara keduanya dengan proses iterasi (pengulangan pengolahan data). Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui kedalaman atau lokasi sumber tekanan magma gunung merapi saat terjadinya erupsi.

Perhitungan model menggunakan persamaan (2.6) yang ada di bab kedua. Input yang digunakan adalah jarak radial antara puncak dengan stasiun pantau Gunung Merapi (konstan), kedalaman sumber, *poisson's ratio*, rigiditas, jari-jari sumber tekanan dan perubahan tekanan. Sedangkan yang dicari adalah lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi. Pembuatan model Mogi juga digunakan untuk mengetahui apakah deformasi periode tersebut terpengaruhi oleh sumber magma dangkal (kantong magma) atau sumber magma yang dalam (dapur magma).

Tabel 4.3 Parameter Model Mogi Stasiun KLAT

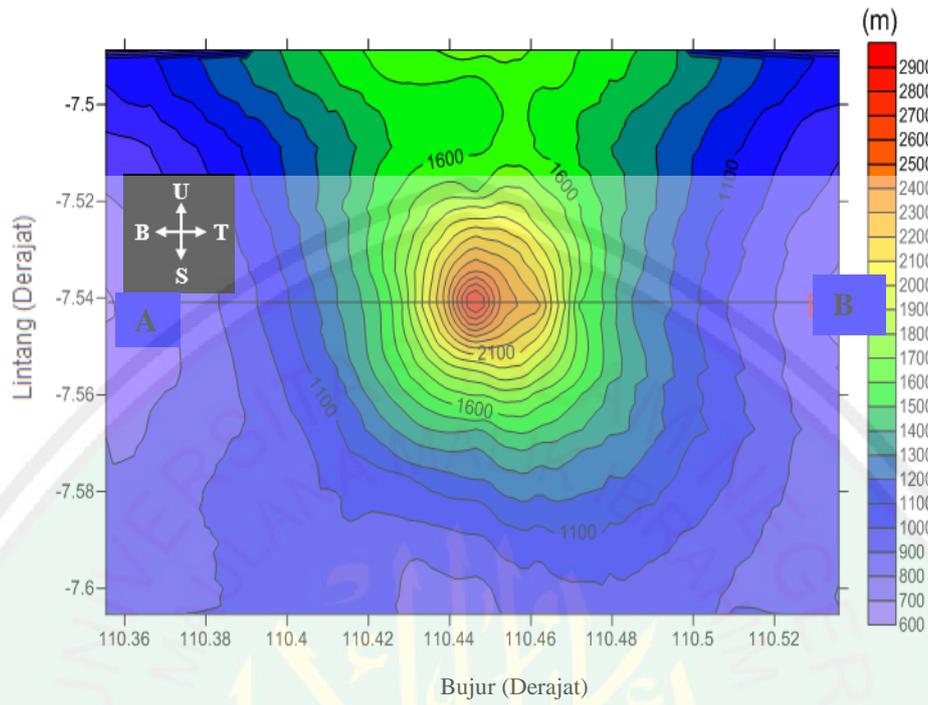
Anomali Data (meter)	Jari-Jari Bola Pusat Tekanan (meter)	Perubahan Tekanan (Pa)	Rigiditas Medium (Pa)	Kedalaman Sumber Tekanan Magma (meter)
0.000001	550	$10^5$	$2 \times 10^{10}$	1229.63

Nilai perubahan tekanan yang digunakan pada model Mogi ini sebesar 0,1 MPa yang umum digunakan untuk kawasan gunung api (Bonnacorrso dkk., 1996). *Shear Modulus* yang digunakan dalam perhitungan model Mogi ini sebesar 20 GPa yang umum digunakan untuk batuan kerak bumi (Dzurisin, 2007).

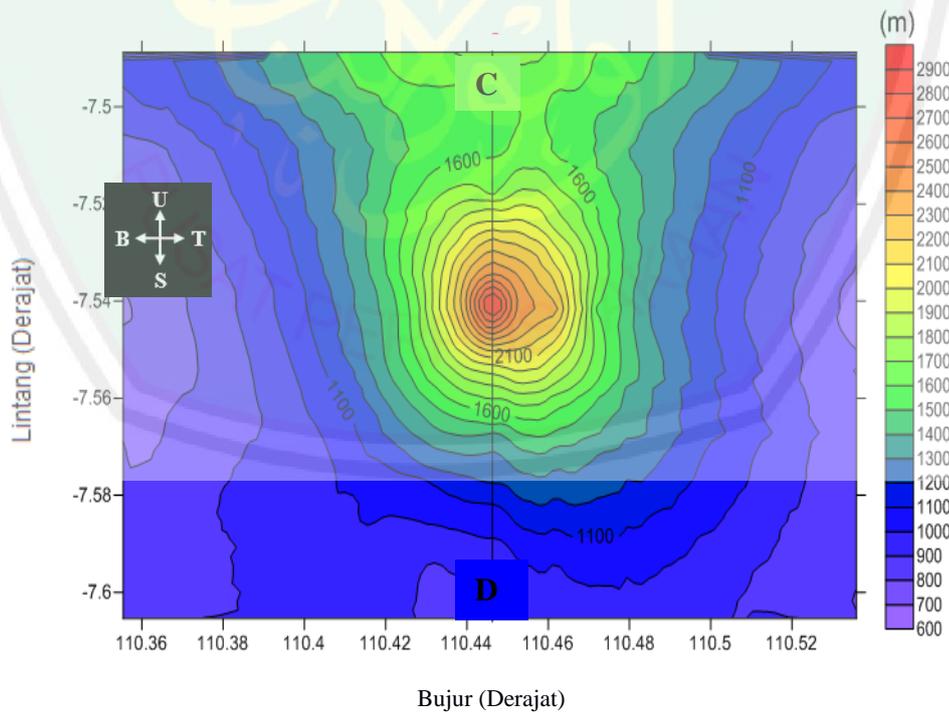
Hasil yang diperoleh dari perhitungan model Mogi diperoleh lokasi sumber tekanan magma penyebab deformasi yang berada di kedalaman 1229.63 meter dengan besar perubahan tekanan penyebab deformasi sebesar 0,1 MPa dan jari-jari bola pusat tekanan sebesar 550 m. Selain itu, berdasarkan analisis seismisitas Gunung Merapi setelah dihitung didapatkan titik pusat hiposenter berada pada kedalaman sekitar 1100 meter hingga 2500 meter di bawah permukaan. Nilai hiposenter tersebut dijadikan validasi terhadap hasil perhitungan model berdasarkan data GPS yang terukur pada periode tersebut, dan keduanya memiliki nilai yang cukup sama dan bisa dinyatakan bahwa perhitungan parameter sudah mewakili keadaan yang sebenarnya.

Kedalaman sumber magma yang telah dihitung menggunakan model Mogi dapat dimodelkan baik 2D maupun 3D menggunakan aplikasi Surfer 12 dan Origin Pro 8. Berdasarkan peta topografi wilayah Gunung Merapi dapat diolah sehingga pola permukaan gunung dapat diketahui dengan melakukan *cross section* pada arah A-B (barat-timur) dan C-D (utara-selatan). Adanya *cross section* ini bertujuan untuk memudahkan dalam pemodelan ataupun dalam analisis hasil sumber magma yang ada di bawah permukaan Merapi.

Hasil *cross section* A-B pada peta topografi daerah sekitar Gunung Merapi yang ditunjukkan pada gambar 4.17. Sedangkan hasil *cross section* C-D pada peta topografi daerah sekitar Gunung Merapi yang ditunjukkan pada gambar 4.18. Berdasarkan hasil pengolahan peta, garis yang ada merupakan batas dari kontur warna, sedangkan warna mempresentasikan perbedaan ketinggian dari yang terendah hingga tertinggi.

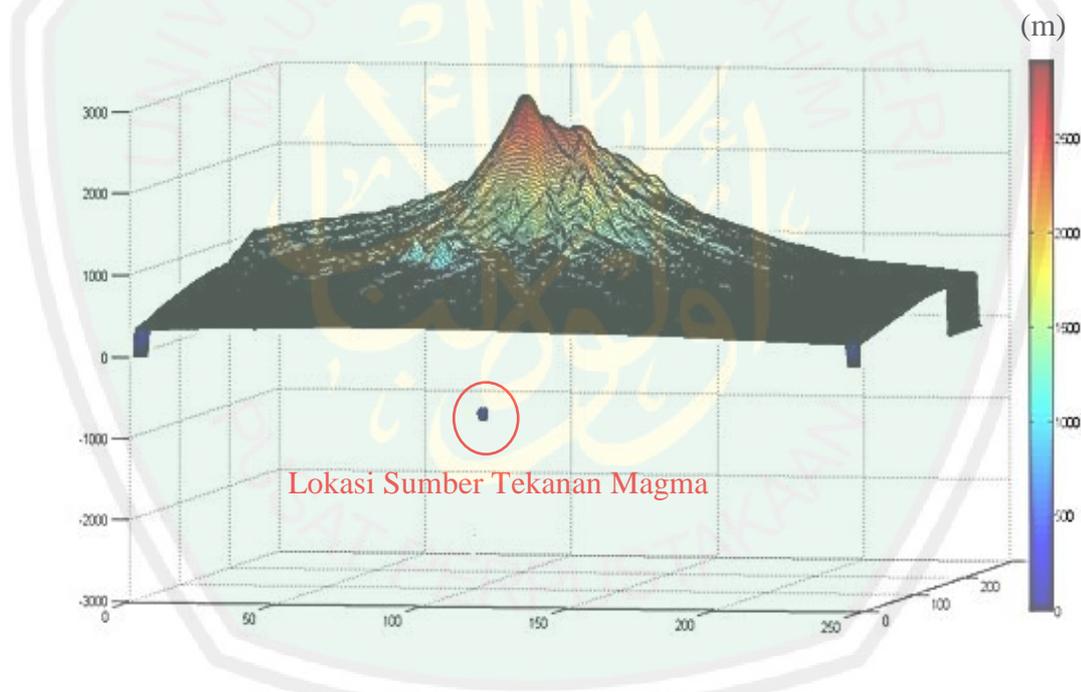


Gambar 4.17 Cross section barat-timur Gunung Merapi



Gambar 4.18 Cross Section utara-selatan Gunung Merapi

Berdasarkan penelitian ini, posisi dari tekanan magma masih berada pada kisaran kantong magma, walaupun telah terjadi beberapa aktivitas gempa vulkanik pada kedalaman dangkal. Selain itu, inflasi pada tubuh Gunung Merapi mengindikasikan bahwa telah terjadi aktivitas dari sumber magma yang menekan tubuh Gunung Merapi. Dari Gambar 4.19 di bawah tampak sebuah titik di bawah permukaan model Gunung Merapi. Titik tersebut merupakan posisi sumber tekanan magma, dimana posisi kedalamannya adalah 1229.63 meter relatif terhadap permukaan laut.



Gambar 4.19 Model 3 Dimensi Gunung Merapi dan Lokasi Sumber Tekanan Magma Berdasarkan Data Stasiun KLAT

#### 4.4.3 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Stasiun DELS

Besarnya anomali data GPS di Stasiun DELS dianggap sebagai besarnya pergeseran horizontal hasil pengukuran ( $\Delta U_r$  observasi). Pergeseran horizontal observasi digunakan sebagai nilai patokan hasil pengukuran dalam mencari

parameter model lokasi sumber tekanan yang cocok antara keduanya dengan proses iterasi (pengulangan pengolahan data). Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui kedalaman atau lokasi sumber tekanan magma gunung merapi saat terjadinya erupsi.

Perhitungan model menggunakan persamaan (2.6) yang ada di bab kedua. Input yang digunakan adalah jarak radial antara puncak dengan stasiun pantau Gunung Merapi (konstan), kedalaman sumber, poisson's ratio, rigiditas, jari-jari sumber tekanan dan perubahan tekanan. Sedangkan yang dicari adalah lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi. Pembuatan model Mogi juga digunakan untuk mengetahui apakah deformasi periode tersebut terpengaruhi oleh sumber magma dangkal (kantong magma) atau sumber magma yang dalam (dapur magma).

Tabel 4.3 Parameter Model Mogi Stasiun KLAT

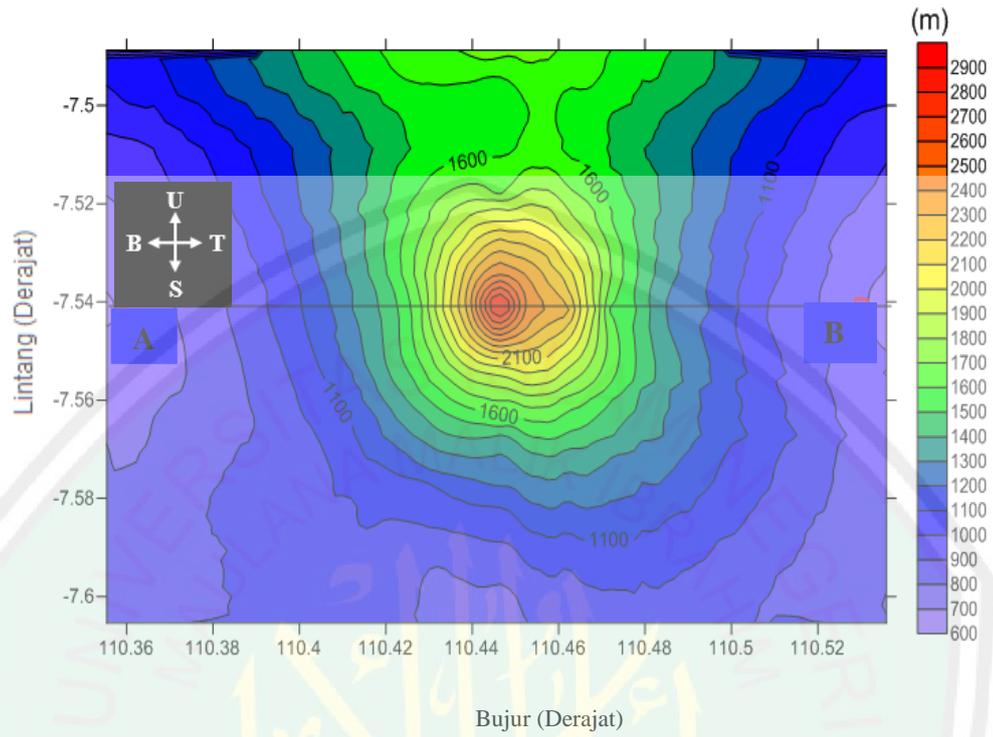
<b>Anomali Data (meter)</b>	<b>Jari-Jari Bola Pusat Tekanan (meter)</b>	<b>Perubahan Tekanan (Pa)</b>	<b>Rigiditas Medium (Pa)</b>	<b>Kedalaman Sumber Tekanan Magma (meter)</b>
0.000001	550	$10^5$	$2 \times 10^{10}$	1188.38

Hasil yang diperoleh dari perhitungan model Mogi diperoleh lokasi sumber tekanan magma penyebab deformasi yang berada di kedalaman 1188.38 meter dengan besar perubahan tekanan penyebab deformasi sebesar 0,1 MPa dan jari-jari bola pusat tekanan sebesar 550 m. Selain itu, berdasarkan analisis seismisitas Gunung Merapi setelah dihitung didapatkan titik pusat hiposenter berada pada kedalaman sekitar 1100 meter hingga 2500 meter di bawah permukaan. Nilai

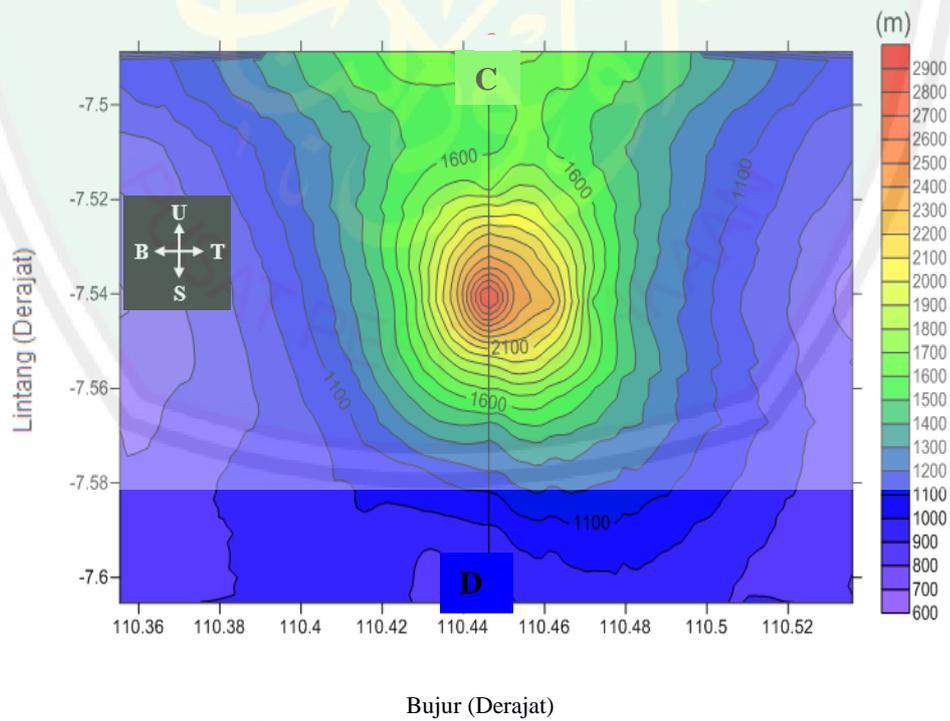
hiposenter tersebut dijadikan validasi terhadap hasil perhitungan model berdasarkan data GPS yang terukur pada periode tersebut, dan keduanya memiliki nilai yang cukup sama dan bisa dinyatakan bahwa perhitungan parameter sudah mewakili keadaan yang sebenarnya.

Kedalaman sumber magma yang telah dihitung menggunakan model Mogi dapat dimodelkan baik 2D maupun 3D menggunakan aplikasi Surfer 12 dan Origin Pro 8. Berdasarkan peta topografi wilayah Gunung Merapi dapat diolah sehingga pola permukaan gunung dapat diketahui dengan melakukan *cross section* pada arah A-B (barat-timur) dan C-D (utara-selatan). Adanya *cross section* ini bertujuan untuk memudahkan dalam pemodelan ataupun dalam analisis hasil sumber magma yang ada di bawah permukaan Merapi.

Hasil *cross section* A-B pada peta topografi daerah sekitar Gunung Merapi yang ditunjukkan pada gambar 4.20. Sedangkan hasil *cross section* C-D pada peta topografi daerah sekitar Gunung Merapi yang ditunjukkan pada gambar 4.21. Berdasarkan hasil pengolahan peta, garis yang ada merupakan batas dari kontur warna, sedangkan warna mempresentasikan perbedaan ketinggian dari yang terendah hingga tertinggi.

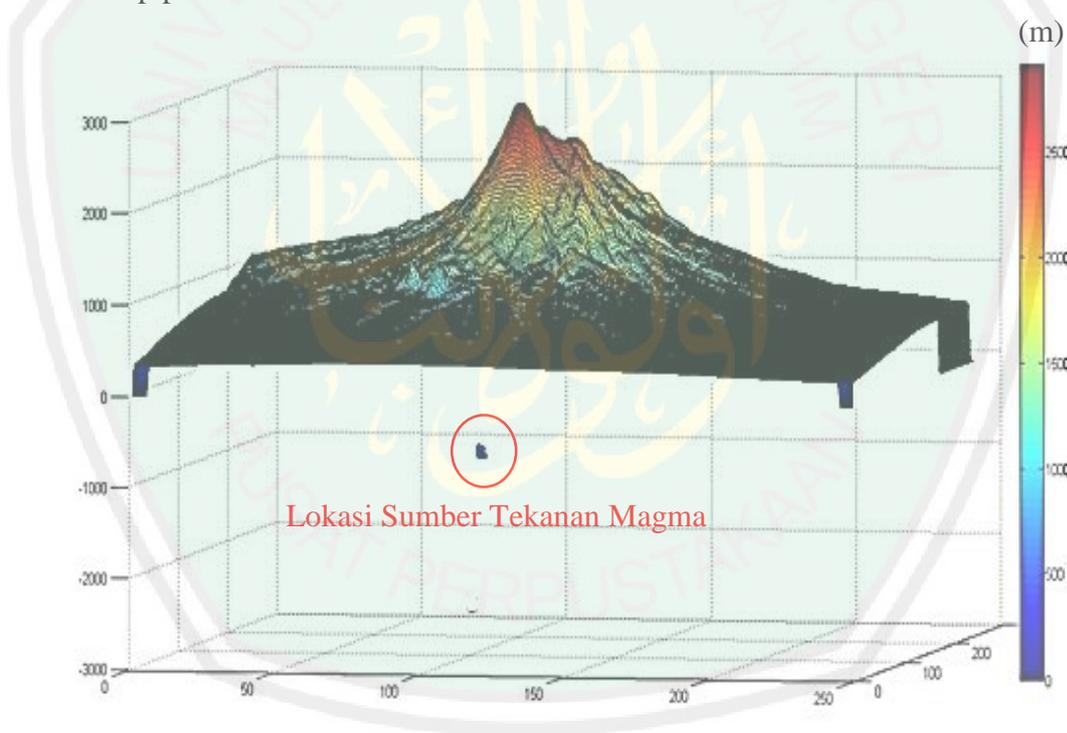


Gambar 4.20 Cross section barat-timur Gunung Merapi



Gambar 4.21 Cross Secuon utara-selatan Gunung Merapi

Berdasarkan penelitian ini, posisi dari tekanan magma masih berada pada kisaran kantong magma, walaupun telah terjadi beberapa aktivitas gempa vulkanik pada kedalaman dangkal. Selain itu, inflasi pada tubuh Gunung Merapi mengindikasikan bahwa telah terjadi aktivitas dari sumber magma yang menekan tubuh Gunung Merapi. Dari Gambar 4.22 di bawah tampak sebuah titik di bawah permukaan model Gunung Merapi. Titik tersebut merupakan posisi sumber tekanan magma, dimana posisi kedalamannya adalah 1188.38 meter relatif terhadap permukaan laut.



Gambar 4.22 Model 3 Dimensi Gunung Merapi dan Lokasi Sumber Tekanan Magma Berdasarkan Data Stasiun KLAT

#### 4.5 Estimasi Volume Suplai Magma

Perubahan volume suplai magma dianggap berhubungan dengan perubahan tekanan hidrostatik pada suatu sumber tekanan. Berat jenis magma berbeda

dengan medium di sekitarnya, sehingga magma cenderung naik ke permukaan. Perubahan volume suplai magma yang berhubungan dengan perubahan tekanan hidrostatik dapat mengakibatkan deformasi yang terukur di permukaan. Oleh karena itu, melalui model Mogi dapat dilakukan perhitungan volume suplai magma. Perhitungan suplai volume magma menggunakan persamaan di bawah ini:

$$\Delta V = 4\delta \frac{(f^2+r^2)^{5/2}a}{9fr} \quad (4.1)$$

Berdasarkan pengolahan data GPS, hasil pada Stasiun DELS dan KLAT tidak begitu menunjukkan deformasi yang terjadi pada periode 2009-2011. Sehingga perhitungan volume suplai magma pada periode tersebut dihitung berdasarkan hasil olahan model pada Stasiun GRWH. Berdasarkan persamaan di atas melalui perhitungan model Mogi menggunakan Ms. Excel diperoleh nilai volume suplai magma untuk periode menjelang terjadinya erupsi adalah sebesar 15 juta m<sup>3</sup> dan untuk periode setelah erupsi adalah sebesar 11.3 juta m<sup>3</sup>.

#### 4.6 Erupsi Gunung Merapi Tahun 2010

Gunung Merapi berbentuk sebuah kerucut gunung api dengan komposisi magma basaltik andesit dengan kandungan silika (SiO<sub>2</sub>) berkisar antara 52 - 56%. Morfologi bagian puncaknya dicirikan oleh kawah yang berbentuk tapal kuda, dimana di tengahnya tumbuh kubah lava.

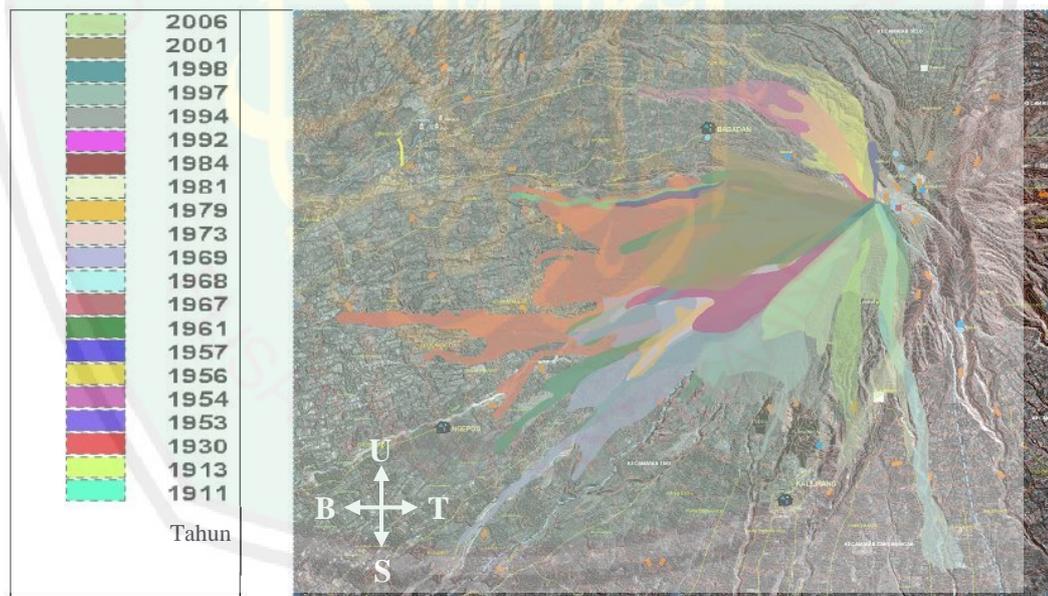
Letusan Gunung Merapi dicirikan oleh keluarnya magma ke permukaan membentuk kubah lava di tengah kawah aktif di sekitar puncak. Munculnya lava

baru biasanya disertai dengan pengrusakan lava lama yang menutup aliran sehingga terjadi guguran lava. Lava baru yang mencapai permukaan membentuk kubah yang bisa tumbuh membesar. Pertumbuhan kubah lava sebanding dengan laju aliran magma yang bervariasi hingga mencapai ratusan ribu meter kubik per hari. Kubah lava yang tumbuh di kawah dan membesar menyebabkan ketidakstabilan. Kubah lava yang tidak stabil posisinya dan didorong oleh tekanan gas dari dalam menyebabkan sebagian longsor sehingga terjadi awan panas. Awan panas akan mengalir secara gravitasional menyusur lembah sungai dengan kecepatan 60-100 km/jam dan akan berhenti ketika energi gerakannya habis. Inilah awan panas yang disebut Tipe Merapi yang menjadi ancaman bahaya yang utama.

Pada 25 Oktober 2010 status Merapi ditetapkan 'Awat' (Level IV), dengan kondisi akan segera meletus, ataupun keadaan kritis yang dapat menimbulkan bencana setiap saat. Aktivitas yang teramati secara visual yaitu, tanpa kubah lava, tanpa api diam, dan tanpa lava pijar guguran-guguran besar. Sedangkan seismisitasnya meningkat menjadi 588 kejadian/hari Gempa Fase Banyak, 80 kejadian/hari Gempa Vulkanik, 194 kejadian/hari Gempa Guguran, dengan laju deformasi 42 cm/hari. Radius aman ditetapkan di luar 10 km dari puncak Merapi.

Pada 26 Oktober 2010 pukul 17:02 WIB terjadi letusan pertama. Letusan bersifat eksplosif disertai dengan awanpanas dan dentuman. Hal ini berbeda dengan kejadian sebelumnya, yaitu letusan bersifat efusif dengan pembentukan kubah lava dan awanpanas guguran. Letusan yang terjadi pada 29 - 30 Oktober lebih bersifat eksplosif. Pada 3 November 2010 terjadi rentetan awan panas yang di mulai pada pukul 11:11 WIB.

13 November 2010, intensitas erupsi mulai menurun dan radius aman juga diubah yaitu Sleman 20 km, Magelang 15 km, Boyolali 10 km, Klaten 10 km. Pada 19 November intensitas erupsi kembali menunjukkan penurunan. Radius aman juga dirubah, yaitu Sleman sebelah barat K. Boyong 10 km, Sleman sebelah Timur K. Boyong 15 km, Magelang 10 km, Boyolali 5 km, dan Klaten 10 km. Korban jiwa akibat erupsi G. Merapi 2010 sebanyak 347 orang. Korban terbanyak berada di Kabupaten Sleman yaitu 246 jiwa. Menyusul Kabupaten Magelang 52 jiwa, Klaten 29 jiwa, dan Boyolali 10 jiwa. Sedangkan pengungsi mencapai 410.388 orang.



Gambar 4.23 Sebaran panas saat terjadinya erupsi di Gunung Merapi

#### 4.7 Gunung api Dalam Perspektif al-Quran

Al-Quran atau Quran (bahasa Arab: القرآن al-Quran) ialah kitab suci bagi umat Islam. Menurut ajaran Islam, al-Quran ialah wahyu yang Allah SWT turunkan kepada Nabi Muhammad SAW melalui perantaraan malaikat Jibril yang

sampai ke zaman sekarang secara mutawahir. Al-Quran menuntun manusia agar senantiasa membaca dan memahami kandungannya agar dapat mengantar dan memberikan petunjuk kepada manusia mengenai bencana yang ada di bumi seperti halnya bencana yang diakibatkan oleh gunung api.

Gunung api adalah rekahan dalam kerak bumi tempat keluarnya cairan magma atau gas atau cairan lainnya ke permukaan bumi. Material yang dierupsikan ke permukaan bumi umumnya membentuk kerucut. Gunung ternyata menembus lapisan pertama bumi yang ketebalannya mencapai 50 km dan semuanya terdiri atas batu yang dinamakan dengan litosfer (kulit bumi). Gunung menembus lapisan pertama bumi ini hingga mencapai akarnya di lapisan kedua bumi yang bergerak aktif di bawahnya (Alzwar dkk, 1988).

Mengingat lapisan kedua bumi yang selalu aktif bergerak, maka Allah SWT pun kemudian mengukuhkan dan menguatkan bumi dengan menanamkan gunung-gunung di atas lapisan yang bergerak tersebut. Sama sebagaimana pasak tenda yang ditancapkan di atas tanah tempat tenda didirikan (Ahmad, 2011). Hal ini sudah ditulis di dalam Al-Qur'an sejak 14 abad silam. Allah SWT berfirman:

وَالْجِبَالَ أَوْتَادًا ۗ

“Dan gunung-gunung sebagai pasak.” (Q.S an-Naba (78):7)

Di ayat lainnya Allah SWT berfirman:

خَلَقَ السَّمَوَاتِ بِغَيْرِ عَمَدٍ ۖ تَرَوْنَهَا وَآلْفَىٰ ۚ فِي الْأَرْضِ رَوْسِيٰ أَنْ تَمِيدَ بِكُمْ ۖ وَبَثَّ فِيهَا مِنْ كُلِّ دَابَّةٍ ۖ وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً ۖ فَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ زَوْجٍ ۖ كَرِيمٍ ۙ ۱۰

“Dia menciptakan langit tanpa tiang yang kamu melihatnya dan Dia meletakkan gunung-gunung (di permukaan) bumi supaya bumi itu tidak menggoyangkan kamu; dan memperkembang biakkan padanya segala macam jenis binatang. Dan Kami turunkan air hujan dari langit, lalu Kami tumbuhkan padanya segala macam tumbuh-tumbuhan yang baik.” (Q.S Luqman (31): 10).

Dalam konteks al-Quran dan hadits, kata *الأرض* yang artinya bumi menunjukkan tiga arti yang disesuaikan dengan pemahaman konteksnya. Kata *الأرض* (bumi) terkadang menunjukkan planet bumi secara keseluruhan, namun terkadang juga hanya menunjukkan daratan tempat di mana manusia tinggal. Dan terkadang lagi, artinya menunjukkan tanah yang menutupi bebatuan pada daratan.

Pasak adalah seperti paku tetapi terbuat dari kayu (KBBI, 2016). Pasak umumnya ditancapkan dalam-dalam ke tanah. Maksud ayat tersebut bahwa gunung dijadikan Allah SWT sebagai pasak, berarti ada bagian gunung yang berfungsi sebagai pasak yang menancap dalam-dalam ke dalam tanah.

Menurut ilmu Geologi bahwa ternyata gunung memiliki akar (*mountain root*) seperti jangkar yang menusuk masuk ke dalam bumi. Akar gunung ini (*mountain root*) memiliki fungsi untuk memberikan stabilitas dan keseimbangan kepada bumi ketika terjadi guncangan akibat pergerakan lempengan tektonik, sehingga bumi tidak sedemikian mudah untuk porak-poranda. Tugas utama gunung adalah sebagai pasak agar bumi tidak berguncang akibat tekanan gas-gas yang terbentuk di dalamnya semakin bertambah (Mulyaningsih, 2006).

Kata “pasak” dalam al-Quran sebenarnya memiliki dua bagian, yakni menurut bentuknya dan fungsinya. Jika menurut bentuk, sebuah pasak lebih banyak bagiannya berada dalam tanah daripada bagian di luar tanah. Jika menurut fungsi, sebuah pasak berfungsi membuat agar barang yang ditancapi tidak bergerak-gerak; tidak bergoyang-goyang atau tetap pada tempatnya semula (Bakry, 2001).

Demikian pula menurut ilmu geologi modern. Ternyata bagian sebuah gunung yang terlihat di luar hanya sebagian kecil saja yakni  $1/3$ , sedangkan bagian yang tertanam di dalam bumi mencapai  $2/3$  bagian. Jadi sesungguhnya semua gunung yang kita lihat di dunia ini masih sangat kecil jika dibandingkan dengan bagian gunung yang tertanam di dalam bumi (Mulyaningsih, 2006).

Setiap gunung memiliki akar tunjang yang masuk ke dalam kulit bumi, maka sesungguhnya akar tunjang gunung yang terpendam di dalam lapisan bumi telah menahan lapisan benua atau kulit bumi dari berbagai gerakan atau guncangan dahsyat yang akan terjadi karena pengaruh tekanan dari dalam (endogen) atau tekanan dari luar (eksogen).

Para ilmuwan sepakat bahwa gunung tidak diam seperti yang kita anggap, melainkan bergerak. Profesor Emeritus Frank Press dari Washington DC, Amerika Serikat (AS), salah seorang ahli Geologi yang mengkaji tentang gunung sebagai sebagai pasak bumi. Menurut Prof Press, sebenarnya, kerak bumi mengapung di atas cairan. Lapisan terluar bumi membentang 5 km dari permukaan. Kedalaman lapisan gunung menghujam sejauh yang 50 km. Dengan demikian, pegunungan adalah semacam pasak yang didorong ke dalam bumi (Alzwar dkk, 1988).

Dengan kata lain, gunung-gunung menggenggam lempengan-lempengan kerak bumi dengan memanjang ke atas dan ke bawah. Sehingga dengan adanya gunung api dapat menolong makhluk hidup yang ada di bumi dari guncangan lempeng yang ada di bawah permukaan (Ahmad, 2011).

Sebagaimana Allah SWT berfirman dalam surah an-Naml (27) ayat 88:

وَتَرَى الْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً وَهِيَ تَمُرُّ مَرَّ السَّحَابِ صُتِعَ اللَّهُ الَّذِي أَنْقَنَ كُلَّ شَيْءٍ عِائَةً خَيْرٌ  
بِمَا تَفْعَلُونَ ۝ ۸۸

“Dan kamu lihat gunung-gunung itu, kamu sangka Dia tetap di tempatnya, padahal ia berjalan sebagai jalannya awan....” (Q.S. an-Naml [27]: 88).

Allah SWT menyampaikan firmanNya sebagai petunjuk atau tanda-tanda dengan kata kiasan yang memiliki makna luas. Menurut tafsir Al Maraghi kata (تمر) digunakan dalam arti guncangan dan bergetar, sedang ia (langit) tetap pada tempatnya. (المر) pada asalnya berarti bolak-balik, pulang pergi dan kadang diartikan berjalan (Mushthafa, 1989).

Berdasarkan tafsir tersebut, ayat di atas bermakna bahwa gunung itu tidak diam di tempatnya, tetapi bergerak secara terus-menerus. Menurut para pakar Geologi, menyatakan bahwa gerakan gunung-gunung ini disebabkan pergerakan lempeng tektonik yang berada di bawahnya. Lempengan tersebut bergerak di atas lapisan magma yang lebih rapat, sehingga sering terjadi tabrakan yang membentuk beberapa lipatan antar lempeng yang menyebabkan terjadinya gempa bumi. Selanjutnya kejadian tersebut bisa mempengaruhi pola struktur yang berkembang di daerah tersebut.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Gunung api khususnya Gunung Merapi ini selalu aktif bergerak dan berubah posisi atau dalam ilmu geofisika disebut dengan deformasi gunung api. Perubahan posisi dan bentuk gunung dapat diketahui dengan menggunakan metode GPS (*Global Positioning System*). Metode ini memberikan perubahan koordinat atau perubahan panjang jarak kawah Gunung Merapi dengan salah satu stasiun pantau gunung api. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa menjelang terjadinya erupsi, terjadi pemanjangan jarak

antara kawah gunung dengan stasiun pantau sekitar +0.1 hingga +319 meter, sedangkan beberapa bulan setelah terjadinya erupsi, jarak antara kawah gunung dengan stasiun pantau kembali memendek sekitar -1 hingga -121 meter.



## **BAB V PENUTUP**

### **5.1 Kesimpulan**

1. Menjelang terjadinya erupsi Gunung Merapi tahun 2010, terjadi pemanjangan *baseline* (inflasi) antara kawah gunung dengan beberapa stasiun pos pantau pengamatan Gunung Merapi. Pemanjangan *baselinenya* sebesar +0.1 meter hingga +319 meter. Kemudian setelah terjadi erupsi, sekitar awal tahun 2011 hingga akhir tahun 2011, terjadi pemendekan *baseline* (deflasi) sebesar -1 hingga -121 meter.
2. Lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi berada di kedalaman 1252.59 meter untuk stasiun GRWH, 1229.63 meter untuk stasiun KLAT, dan 1188.38 meter untuk stasiun DELS.
3. Volume suplai magma yang terkandung di dalam kantung magma Gunung Merapi menjelang terjadinya erupsi adalah sebesar 15 juta m<sup>3</sup> dan setelah terjadinya erupsi menurun menjadi 11.3 juta m<sup>3</sup>.

### **5.2 Saran**

Untuk penelitian selanjutnya, penelitian menggunakan metode GPS ada baiknya ditunjang menggunakan metode penentuan deformasi gunung api lainnya, seperti metode tiltmeter, EDM, seismik, dan lain sebagainya agar hasil deformasi yang diperoleh bisa lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Yusuf Al-Hajj. 2011. *Sains Moden Menurut Perspektif Al-Quran dan As-Sunnah*. Johor Bahru: Perniagaan Jahabersa.
- Al-Quran dan Terjemahannya*. 2001. Departemen Agama RI Jakarta: Bumi Restu.
- Alzwar, A. dkk. 1988. *Pengantar Dasar Ilmu Gunung api*. Bandung: NOVA.
- Abidin, H.Z. 2000. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Abidin, H.Z. 2002. *Survei dengan GPS. Cetakan Kedua*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Aisyah, Nurnaning. 2013. *Analisa Deformasi dari Data Tilt dan Estimasi Perubahan Volume Magma Merapi Tahun 2006 dengan Model Mogi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Al-Qur'an dan Terjemahannya. 2008. Departemen Agama RI. Bandung: Diponegoro.
- Asikin, S. 1979. *Geologi Struktur Tektonik Indonesia*. Bandung: Jurusan Teknik Geologi Institut Teknologi Bandung.
- Atlas, Top. 1938. *Handbook of Volcanoes*. USA: Wiley Press.
- Bakry, H. Oemar. 2001. *Tafsir Rahmat*.
- Bahlevi, Andika Rizal. 2013. *Analisis Deformasi Gunung Merapi Tahun 2012 dari Data Pengamatan GPS*. Jurusan Teknik Geodesi Universitas Diponegoro.
- Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG). 2016. *Sejarah Merapi*. [www.merapi.bgl.esdm.go.id/informasi](http://www.merapi.bgl.esdm.go.id/informasi). Diakses pada tanggal 01 Februari 2018 pada pukul 20:12 WIB.
- Beauducel, F. 1998. *Structures et Comportement Mecanique Duvolcan Merapi (Java): Une Approche Methodologique du Champ de Deformations*. Institute de Physique du Globe de Paris Departement de Sismologie U.M.R.C.N.R.S (Docteur These).7580.
- Beauducel, F. and Cornet, F.1999. *Collection and Three-Dimensional Modeling of GPS and Tilt Data at Merapi Volcano-Java*. *Journal of Geophysical research*, Vol.104, No. B1, P.725-736.

Bemmelen, V.R.W. 1949. *The Geology of Indonesia, vol I-A, Gov. Printed Offices*  
The Hague Martinus Nijhof, h.732.

Berthommier, P.C. 1990. *Etude Volkanologique du Merapi, Tephrostratigraphie  
et Chronologie Product Eruptifs*. These University Blaise Pascal.  
Clermont Ferrad II, U.F.R de Recherche Scientifique et Technique.

Bonnaccorso, A., dkk. 1996. Fast Deformation Processes and Eruptive Activity at  
Mount Etna (Italy). *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. Vol.  
101 B8, hal 17467-17480.

Dzurisin, D. 2007. *Volcano Deformation, Geodetic Monitoring Techniques*,  
Checister: Springer.

Hamilton, W. 1979. *Tectonics of the Indonesian region*. United States Geological  
Survey Professional Paper, p. 1078.

Hartuti, Evi Rine. 2009. *Buku Pintar Gempa*. Yogyakarta: DIVA Press.

<https://dreamindonesia.me/tag/peta-sebaran-gunung-berapi-di-indonesia/>. Diakses  
pada tanggal 26 Januari 2018.

<https://hmgi.or.id/Geologi-Regional-Zona-Kendeng/Geologi>. Diakses pada  
tanggal 26 Januari 2018.

KBBI, 2016. *Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI)*. [Online]  
<http://kbbi.web.id/pusat>.

Kusumadinata, K. 1979. *Data dasar Gunungapi Indonesia*. Direktorat  
Vulkanologi Bandung.

Kusumastuti, D. R. 2014. *Estimasi Kedalaman Sumber Tekanan dan Volume  
Suplai Magma Gunung Merapi Berdasarkan Data Tiltmeter*. Skripsi.  
Yogyakarta: Jurusan Fisika FMIPA Universitas Gajah Mada.

Kusumayudha, 1988. *Laporan Tahunan P3G 1980/1981*. Indonesia.

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

Mogi, K. 1958. *Relation Between The eruption of Various Vulcanoos and The  
Deformations of the Ground Surface Around Them*, Bulletin of Earth  
Quake Research Institute Vol 36, 99-134.

Mulyaningsih, Sri. 2006. *Vulkanologi*. Yogyakarta: Ombak.

- Mulyo, Agung. 2004. *Pengantar Ilmu Kebumihan (Pengetahuan Geologi untuk Pemula)*. Bandung: Pustaka Setia.
- Musthafa, Ahmad Al-Maraghi. 1989. *Tafsir Al-Maraghiy*. Semarang: Tohapatra.
- Nandaka, A. 2006. *Pemantauan Deformasi Gunung Merapi 2005-2006 dengan EDM*. Yogyakarta: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi-BPPTK.
- Padang, Neumann Van. 1951. *Catalogue of The Active Volcanoes of The World Including Solfatara Fields*. No. 1 V.1. Indonesia.
- Ratdomopurbo dan Andreastuti, 2000. *Karakteristik Gunung Merapi*. Yogyakarta: Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi-BPPTKG.
- Ratdomopurbo, A. dan Poupinet, G. 1995. *An Overview of The Seismicity of Merapi Volcano (Java, Indonesia), 1983-1994*, J. Volcano. Geotherm. Res. 100 (1-4), 193-214.
- Reksowigoro, L.D. 1979. Semeru, in Kusumadinata, K., ed., *Data Dasar Gunung api Indonesia: Vulcanological Survey of Indonesia*. Bandung: Direktorat Vulkanologi.
- Sahara, D. 2009. "Relokasi Hiposenter Menggunakan SED, JHD, dan DD". *Skripsi*. Jurusan Teknik Geofisika, FITM-ITB.
- Sari, S. 2007. *Sistem Pemantauan Gunung api dan Bencana Geologi: Analisis Deformasi Gunung Kelud Berdasarkan Data Tilt Tahun 2006 sampai Februari 2007 Sebagai Studi Kasus*. Purwokerto: Universitas Jendral Soedirman.
- Sarkowi, M. 2010. Identifikasi Struktur Daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Ilmiah*, Saintek MIPA.
- Siswamidjajo, Suparto. 1981. *Seismologi Gunung Api*. Bandung: PVMBG.
- Telford, W. Geldart, L. and Sheriff, R. 1990. *Applied Geophysics Edisi ke dua*. New York: Cambridge University Press.
- Yokoyama, I., 1971. A Model for the Crustal Deformation around Volcanoes. *Journal of Physics of The Earth*, Vol. 19 (No.3).



**KEMENTERIAN AGAMA RI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN)  
MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**Jl. Gajayana No. 50 Dinoyo Malang (0341) 551345 Fax. (0341) 572533**

**BUKTI KONSULTASI SKRIPSI**

**Nama** : A. Athiyah Anshariyah  
**NIM** : 14640024  
**Fakultas/ Jurusan** : Sains dan Teknologi/ Fisika  
**Judul Skripsi** : Monitoring Aktivitas Deformasi Gunung Merapi Berdasarkan Analisis Data Gps (Global Positioning System) Pra Dan Pasca Erupsi 2010 Menggunakan Pemodelan Mogi Dan Yokoyama  
**Pembimbing I** : Drs. Abdul Basid, M.Si.  
**Pembimbing II** : Umayyatus Syarifah, M.A.

No	Tanggal	HAL	Tanda Tangan
1	20 Januari 2018	Konsultasi Bab I, II, dan III	
2	25 Februari 2018	Konsultasi Bab I, II, III dan ACC	
3	13 Juli 2018	Konsultasi Kajian Agama Bab I dan II	
4	31 Juli 2018	Konsultasi Data Hasil Bab IV	
5	03 Agustus 2018	Konsultasi Bab IV	
6	21 September 2018	Konsultasi Kajian Agama Bab I, II, & IV	
7	24 September 2018	Konsultasi Bab V	
8	27 September 2018	Konsultasi Semua Bab, Abstrak dan ACC	
9	28 September 2018	Konsultasi Kajian Agama dan ACC	

Malang, 28 September 2018  
Mengetahui,  
Ketua Jurusan Fisika,

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



# LAMPIRAN

## LAMPIRAN I

### Data Perubahan Panjang *Baseline* Tiap Stasiun

<b>Waktu</b>	<b>Panjang <i>Baseline</i> Stasiun GRWH (meter)</b>	<b>Panjang <i>Baseline</i> Stasiun KLAT (meter)</b>	<b>Panjang <i>Baseline</i> Stasiun DELS (meter)</b>
2009-Jan	3144.2472	2979.4797	2697.892
2009-Feb	3158.2473	2989.4797	2697.9
2009-Mar	3159.2489	2990.4799	2697.82121
2009-Apr	3166.2461	2999.4798	2697.82124
2009-May	3158.2488	2999.4802	2697.82222
2009-Jun	3164.2472	3000.4804	2697.92314
2009-Jul	3178.2472	3002.4798	2697.92344
2009-Aug	3179.2572	3005.479	2698.2354
2009-Sep	3190.2592	2987.4803	2699.92355
2009-Oct	3199.2472	2999.4805	2699.2356
2009-Nov	3251.2542	2999.4809	2700.2359
2009-Dec	3259.2549	3000.4807	2778.2361
2010-Jan	3249.3472	3005.481	2778.2366
2010-Feb	3261.3482	3010.481	2788.2378
2010-Mar	3261.3482	3111.4811	2788.2379
2010-Apr	3289.3572	3112.4813	2788.9399
2010-May	3289.5472	3122.4813	2789.2433
2010-Jun	3298.5472	3180.4821	2791.2456
2010-Jul	3333.5551	3390.4822	2798.2489
2010-Aug	3349.5562	3499.4823	2801.249
2010-Sep	3450.5583	3556.4823	2821.2498
2010-Oct	3565.6012	3598.4824	2989.258
2010-Nov	3560.6111	3594.4825	2983.2598
2010-Dec	3565.6321	3589.4825	2980.254
2011-Jan	3500.6432	3529.4801	2982.2532
2011-Feb	3470.5432	3500.4811	2976.2531

2011-Mar	3470.5342	3471.4812	2976.2444
2011-Apr	3490.4567	3450.48	2973.2432
2011-May	3461.4444	3400.48	2970.2431
2011-Jun	3455.4321	3332.4799	2950.2423
2011-Jul	3451.4232	3211.4796	2899.2444
2011-Aug	3440.4232	3100.4795	2879.2344
2011-Sep	3341.4111	3100.4799	2870.2211
2011-Oct	3320.4012	3009.4797	2860.2214
2011-Nov	3300.3232	2999.4795	2841.2344
2011-Dec	3279.3222	2989.4795	2777.2345



## LAMPIRAN II

### Data Kedalaman Hiposenter Gempa

<b>Garis Bujur</b>	<b>Garis Lintang</b>	<b>Kedalaman Hiposenter (km)</b>
110.2647	7.532	2.35
110.2655	7.532	1.15
110.2655	7.533	1.69
110.2659	7.533	1.69
110.2661	7.532	1.69
110.2621	7.533	2.44
110.2652	7.532	1.81
110.2658	7.533	1.5
110.267	7.532	1.91
110.2656	7.532	1.62
110.2654	7.532	1.67
110.2662	7.532	1.15
110.2656	7.532	1.6