



TUGAS AKHIR - SF141501

**PEMODELAN SUMBER TEKANAN GUNUNGAPI
UNTUK ESTIMASI KEDALAMAN DAN PERUBAHAN
VOLUME BERDASARKAN DATA TILTMETER
MENGUNAKAN PENDEKATAN MOGI (STUDI KASUS:
GUNUNG MERAPI)**

OKINAWA RIKENATA AIDA ISLAMIAH
NRP 0111144000085

DOSEN PEMBIMBING
Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si
Dr. Agus Budi Santoso, S.Si, M.Sc

DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS ILMU ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULIH NOPEMBER
SURABAYA 2018



TUGAS AKHIR - SF141501

**PEMODELAN SUMBER TEKANAN GUNUNGAPI
UNTUK ESTIMASI KEDALAMAN DAN PERUBAHAN
VOLUME BERDASARKAN DATA TILTMETER
MENGUNAKAN PENDEKATAN MOGI (STUDI KASUS:
GUNUNG MERAPI)**

OKINAWA RIKENATA AIDA ISLAMIAH
NRP 0111144000085

DOSEN PEMBIMBING
Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si
Dr. Agus Budi Santoso, S.Si, M.Sc

DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS ILMU ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”



FINAL PROJECT - SF141501

***MODELLING OF VOLCANO PRESSURE SOURCE FOR
ESTIMATING DEPTH AND VOLUME CHANGES BASED
ON TILTMETER DATA USING MOGI APPROACH
(CASE STUDY: MOUNTAIN MERAPI)***

OKINAWA RIKENATA AIDA ISLAMİYAH
NRP 0111144000085

ADVISORS

Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si
Dr. Agus Budi Santoso, S.Si, M.Sc

***DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF NATURAL SCIENCES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018***

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

**PEMODELAN SUMBER TEKANAN GUNUNGAPI
UNTUK ESTIMASI KEDALAMAN DAN PERUBAHAN
VOLUME BERDASARKAN DATA TILTMETER
MENGUNAKAN PENDEKATAN MOGI (STUDI KASUS:
GUNUNG MERAPI)**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana
pada
Bidang Studi Geofisika
Program Studi S-1 Departemen Fisika
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

OKINAWA RIKENATA AIDA ISLAMIYAH

Nrp. 01111440000085

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si(Pembimbing I)
(NIP. 197505205 199903.1.004)
2. Dr. Agus Budi Santoso, S.Si, M.Sc(Pembimbing II)
(NIP. 19800827 200502 1 001)



“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

**Pemodelan Sumber Tekanan Gunungapi Untuk
Estimasi Kedalaman Dan Perubahan Volume
Berdasarkan Data Tiltmeter Menggunakan Pendekatan
Mogi (Studi Kasus: Gunung Merapi)**

Nama Mahasiswa : Okinawa Rikenata Aida Islamiyah
NRP : 01111440000085
**Departemen : Fisika, Fakultas Ilmu Alam, Institut
Teknologi Sepuluh Nopember**
Dosen Pembimbing : Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si
: Dr. Agus Budi Santoso, S.Si, M.Sc

Abstrak

Gunung Merapi merupakan salah satu gunungapi yang memiliki aktivitas vulkanisme tinggi. Apabila terjadi erupsi Gunung Merapi, bahaya yang sangat mengancam keselamatan warga sekitar. Untuk meminimalisir dampak erupsi Gunung Merapi diperlukan suatu kegiatan berupa monitoring aktivitas Gunung Merapi.

Dalam penelitian ini dilakukan monitoring aktivitas Gunung Merapi menggunakan tiltmeter selama kurun periode 1 September – 30 Desember 2017. Data bacaan tiltmeter kemudian diimpor ke perangkat lunak Matlab 2017a. Data bacaan tiltmeter dikonversi ke satuan radian dan dilakukan resampling menjadi data harian. Kemudian dilakukan pemberian filter untuk menghilangkan noise pada data. Selanjutnya diberikan regresi linear pada data bacaan tiltmeter hingga didapatkan plot vektor tiltmeter dan pemodelan Mogi.

Dari hasil penelitian ini didapatkan estimasi kedalaman dan perubahan volume dari sumber tekanan pada masing-masing

periode pengamatan. Pada periode pengamatan 1 – 16 September 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 2579,282 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 60913,918 m³ dengan error sebesar 16,63%. Pada periode pengamatan 16 September – 1 Oktober 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 2042,450 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 39403,980 m³ dengan error sebesar 35,61%. Pada periode pengamatan 16 – 31 Oktober 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 3434,049 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 50691,096 m³ dengan error sebesar 26,89%. Pada periode pengamatan 15 – 30 Nopember 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 2456,148 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 23075,386 m³ dengan error sebesar 37,36%. Pada periode pengamatan 30 Nopember – 15 Desember 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 4533,337 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 385147,190 m³ dengan error 6,56%. Pada periode pengamatan 15 – 30 Desember 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 3583,457 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 118784,829 m³ dengan error sebesar 21,27%. Dari hasil pemodelan tersebut diketahui bahwa Gunung Merapi tidak menunjukkan aktivitas vulkanis yang signifikan.

Kata kunci: Gunung Merapi, Mogi, monitoring, perubahan volume, sumber tekanan

MODELLING OF VOLCANO PRESSURE SOURCE FOR ESTIMATING DEPTH AND VOLUME CHANGES BASED

ON TILTMETER DATA USING MOGI APPROACH (CASE STUDY: MOUNTAIN MERAPI)

Name of Student : Okinawa Rikenata Aida Islamiyah
NRP : 01111440000085
Department : *Physics, Faculty of Natural Sciences,
Sepuluh Nopember Institute of
Technology*
Advisors : ***Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si***
: ***Dr. Agus Budi Santoso, S.Si, M.Sc***

Abstract

Mount Merapi is one of volcano which has high volcanism activity. In the event of eruption of Mount Merapi, a danger that greatly threatens the safety of local people. To minimize the impact of Mount Merapi eruption required an activity in the form of monitoring the activity of Mount Merapi.

In this research, monitoring activity of Mount Merapi using tiltmeter during the period of 1 September to 30 December 2017. Tiltmeter reading data then imported to Matlab 2017a software. The tiltmeter reading data is converted to radians and resampling into daily data. Then do the giving of filter to eliminate noise in data. Furthermore, given a linear regression on the data tiltmeter readings to obtain plot vector tiltmeter and Mogi modeling.

From the results of this study obtained estimation of depth and volume changes from pressure sources in each observation period. In observation period 1 - 16 September 2017, the depth of source of Mount Merapi pressure is 2579,282 m and its volume change is equal to 60913,918 m³ with error equal to 16,63%. In

the observation period of 16 September to 1 October 2017, the depth of the source of Mount Merapi's pressure is 2042,450 m and the volume change is 39403,980 m³ with error of 35.61%. In the observation period from 16 to 31 October 2017, the depth of the source of pressure of Mount Merapi is 3434,049 m and the volume change is 50691,096 m³ with error of 26,89%. In the observation period 15 - 30 November 2017, the depth of the source of pressure of Mount Merapi is 2456,148 m and the volume change is 23075,386 m³ with error equal to 37,36%. In the observation period 30 November - 15 December 2017, the depth of the source of Mount Merapi's pressure is 4533.337 m and the volume change is 385147,190 m³ with error of 6,56%. In the observation period 15 - 30 December 2017, the depth of the source of pressure of Mount Merapi is 3583.457 m and the volume change is 118784,829 m³ with error of 21.27%. From the results of modeling it is known that Merapi volcano does not show significant volcanic activity.

Keywords: Mount Merapi, Mogi, monitoring, volume change, pressure source

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Dengan memanjatkan puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayahNya, akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

“PEMODELAN SUMBER TEKANAN GUNUNGAPI UNTUK ESTIMASI KEDALAMAN DAN PERUBAHAN VOLUME BERDASARKAN DATA TILTMETER MENGUNAKAN PENDEKATAN MOGI (STUDI KASUS: GUNUNG MERAPI)”

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis sepenuhnya menyadari bahwa tulisan ini tidak akan selesai tanpa pihak-pihak yang telah ikhlas membantu baik secara langsung maupun tidak langsung serta memberikan dukungan yang tiada henti-hentinya kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat pada waktu yang ditentukan. Ucapan terima kasih sebesar-besarnya penulis ungkapkan kepada:

1. Allah Subhanahu' Wa Taala', segala puji bagi-Nya, Dzat yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya, serta Rasulullah Muhammad SAW yang telah membawa perubahan menjadi umat yang lebih baik.
2. Bapak Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan dan bimbingan mengenai penulisan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Agus Budi Santoso, S.Si, M.Sc selaku pembimbing di instansi tempat penelitian Tugas Akhir penulis yang telah sabar membimbing dan memberikan ilmunya selama penelitian hingga menyelesaikan Tugas Akhir.

4. Bapak Prof. Dr. Ing. François Beauducel yang telah bersedia membimbing dan membagikan ilmunya kepada penulis selama penelitian hingga penyelesaian Tugas Akhir.
5. Kedua orang tua penulis, adik, dan saudara tercinta yang telah memberikan banyak doa dan dorongan dalam penyelesaian Tugas Akhir maupun selama proses perkuliahan.
6. Tim konsultan Addinal Fikriyah dan Alfu Alfin Nadhifatul Ummah yang selalu hadir dan memberikan dukungan dan semangat kepada penulis mulai dari mencari tempat penelitian Tugas Akhir hingga Tugas Akhir ini selesai dibuat.
7. Indra Rudianto, S.Si yang dengan penuh kesabaran membantu, menjawab berbagai pertanyaan, dan memberikan semangat dan dukungannya kepada penulis mulai dari pengolahan data hingga penyelesaian Tugas Akhir.
8. Tim *Multichat* senang Cindy August, Enrico C., M. Rolli, Faska Muhammad, Elga Firnanda, Grevinda Kristanti, dan Aryo Wiratama P. yang telah memberikan semangat dan menemani penulis selama berada di Yogyakarta hingga penyelesaian Tugas Akhir.
9. Priskila Helen C.A. yang telah menjadi penyemangat penulis selama berada di kantor BPPTKG Yogyakarta untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
10. Segenap karyawan kantor BPPTKG Yogyakarta yang telah mengizinkan penulis melakukan penelitian Tugas Akhir.
11. ANTARES yang telah memberikan dorongan dan semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Semua pihak yang membantu terselesaikannya penulisan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu, semoga Allah memberikan rahmat dan hidayahNya pada kalian semua.
Semoga segala bimbingan, bantuan, dan dukungan dari semua pihak diberikan balasan oleh Allah SWT dan semoga Tugas Akhir

ini dapat bermanfaat sebagai referensi untuk mahasiswa-mahasiswa yang berminat mengambil Tugas Akhir khususnya dalam pengamatan deformasi gunungapi. Aamiin.

Surabaya, Juli 2018

Okinawa Rikenata A.I.
Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TITLE PAGE	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II	5
DASAR TEORI.....	5
2.1 Vulkanologi.....	5
2.2 Gununggapi.....	5

2.3 Deformasi.....	6
2.4 Tilt.....	7
2.5 Model Ruang Magma.....	7
2.6 Model Mogi.....	8
2.7 Kemiringan Tanah Radial	14
2.8 Tiltmeter.....	15
2.9 <i>Non-Linear Least Square</i>	16
BAB III.....	19
METODOLOGI	19
3.1 Lokasi Penelitian.....	19
3.2 Geologi Regional Gunung Merapi	19
3.3 Data dan Peralatan	21
3.3.1 Data	21
3.3.2 Peralatan	21
3.4 Pengolahan Data	21
3.4.1 Persiapan Data.....	22
3.4.2 Pengolahan menggunakan <i>Matlab 2017a</i>	22
3.4 Diagram Alir Penelitian	23
BAB IV	27
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Jaringan Tiltmeter	27
4.2 Hasil Pengolahan Data Tiltmeter	27
4.3 Acuan Estimasi Kedalaman Sumber Tekanan	29

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gunungapi.....	5
Gambar 2.2	Model Elemen <i>Inflating</i> dan <i>Deflating</i> Gunungapi..	7
Gambar 2.3	Geometri Sumber Tekanan pada <i>Half-space</i> Infinit	8
Gambar 2.4	Geometri Sumber Tekanan dengan Syarat Batas.....	8
Gambar 3.1	Peta Stasiun Tiltmeter Gunung Merapi.....	19
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 4.1	Plot Vektor Tiltmeter	28
Gambar 4.2	Plot Pemodelan Mogi.....	28
Gambar 4.3	Plot Vektor Tiltmeter 1-16 September 2017	31
Gambar 4.4	Plot Vektor Tiltmeter 16 September–1 Oktober 2017	33
Gambar 4.5	Plot Vektor Tiltmeter 1-16 Oktober 2017.....	34
Gambar 4.6	Plot Vektor Tiltmeter 16-31 Oktober 2017.....	35
Gambar 4.7	Plot Vektor Tiltmeter 31 Oktober–15 Nopember 2017.....	36
Gambar 4.8	Plot Vektor Tiltmeter 15–30 Nopember 2017	38
Gambar 4.9	Plot Vektor Tiltmeter 30 Nopember–15 Desember 2017.....	39
Gambar 4.10	Plot Vektor Tiltmeter 15-30 Desember 2017.....	40
Gambar 4.11	Pemodelan Sumber Tekanan Periode 1-16 September 2017.....	42
Gambar 4.12	Pemodelan Sumber Tekanan Periode 16 September – 1 Oktober 2017.....	43
Gambar 4.13	Pemodelan Sumber Tekanan Periode 16 – 31 Oktober 2017.....	43
Gambar 4.14	Pemodelan Sumber Tekanan Periode 15 – 30 Nopember 2017.....	44
Gambar 4.15	Pemodelan Sumber Tekanan Periode 30 Nopember – 15 Desember 2017.....	44

Gambar 4.16 Pemodelan Sumber Tekanan Periode 15 – 30
Desember 2017.....45

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 1-16 September 2017.....	31
Tabel 4.2 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 16 September – 1 Oktober 2017	32
Tabel 4.3 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 1-16 Oktober 2017	34
Tabel 4.4 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 16-31 Oktober 2017	35
Tabel 4.5 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 31 Oktober – 15 Nopember 2017.....	36
Tabel 4.6 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 15 - 30 Nopember 2017.....	37
Tabel 4.7 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 30 Nopember – 15 Desember 2017.....	38
Tabel 4.8 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 15 – 30 Desember 2017	40
Tabel 4.9 Hasil Pemodelan Sumber Tekanan.....	45

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara geografis, Indonesia terletak pada 6° LU- 11° LS dan 95° BT- 141° BT. Indonesia dikenal sebagai wilayah yang mempunyai tatanan geologi yang unik. Hal ini dikarenakan, Indonesia merupakan jalur pertemuan tiga lempeng besar yaitu lempeng Indo Australia yang relatif bergerak ke utara, lempeng Eurasia yang relatif bergerak ke selatan, dan lempeng Pasifik yang relatif bergerak ke barat. Pertemuan lempeng ini mengakibatkan Indonesia dilalui oleh jalur pegunungan berapi yang membentang dari Sumatera hingga kawasan Sulawesi Utara.

Menurut Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, terdapat 129 gunungapi aktif di Indonesia. Adanya gunungapi di Indonesia tentu menimbulkan dampak baik dan dampak negatif. Salah satu dampak negatif dari gunungapi ini adalah bahaya dari letusan gunungapi yang mengandung material magma yang membahayakan bagi masyarakat di sekitar gunung. Salah satu gunungapi di Indonesia yang masih aktif hingga sekarang adalah Gunung Merapi yang terletak di Yogyakarta.

Gunung Merapi merupakan salah satu gunungapi yang memiliki aktivitas vulkanisme tinggi. Hal ini dapat diketahui dari periode letusannya yang tergolong cepat yaitu sekitar 2-7 tahun. Aktivitas vulkanisme gunung berkaitan dengan dapur magma. Aktivitas pada dapur magma menyebabkan adanya perubahan bentuk badan gunung berupa pengembangan (*inflation*) atau pengempisan (*deflation*). Perubahan permukaan gunung dijadikan sebagai indikator dalam memperkirakan terjadinya erupsi.

Apabila terjadi erupsi Gunung Merapi, bahaya yang sangat mengancam keselamatan warga sekitar adalah adanya aliran awan panas yang bergerak dengan kecepatan tinggi. Awan panas ini merupakan guguran kubah Merapi. Sedangkan bahaya sekunder adalah banjir lahar dingin yang dapat terjadi ketika musim hujan. Untuk meminimalisir dampak erupsi Gunung Merapi berupa adanya korban jiwa dan kerugian materiil yang besar diperlukan suatu kegiatan berupa *monitoring* aktivitas Gunung Merapi.

Monitoring gunungapi dengan menggunakan tiltmeter digunakan untuk mengukur perubahan kemiringan pada struktur permukaan Gunung Merapi. Tiltmeter dipasang pada beberapa lokasi di sekitar kawah gunung. Tiltmeter dihubungkan dengan *digitizer* untuk konversi ke data digital. Kemudian data yang telah dikonversi dikirimkan ke komputer server yang terhubung dengan pos *monitoring* gunungapi terdekat. Dilakukan pengolahan data secara kontinyu dari 1 September – 30 Desember 2017 menggunakan perangkat lunak *Matlab 2017a* untuk mengetahui kedalaman, dan perubahan volume sumber tekanan dari waktu ke waktu beserta *error* dari pemodelan yang dilakukan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai kedalaman sumber tekanan beserta perubahan volumenya tiap periode pengamatan?
2. Berapa nilai *error* dari hasil pemodelan?

1.3 Batasan Masalah

Agar lebih terfokus pada tujuan dan menghindari adanya penyimpangan dari pokok masalah dalam penelitian ini, maka penulis memberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Gunung yang digunakan sebagai objek *monitoring* adalah Gunung Merapi, Yogyakarta.
2. Dalam *monitoring* deformasi ini menggunakan metode tiltmeter.
3. *Monitoring* dilakukan dalam kurun waktu 4 bulan, terhitung sejak 1 September 2017 hingga 30 Desember 2017.
4. Data *monitoring* diperoleh dari 4 stasiun, yaitu Labuhan, Babadan, Selokopo, dan Jurang Grawah.
5. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan model Mogi.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini ialah sebagai berikut:

1. Mendapatkan nilai kedalaman sumber tekanan beserta volumenya setiap periode pengamatan.
2. Memperoleh nilai *error* dari hasil pemodelan.

1.5 Manfaat

Dengan dilakukannya penelitian Tugas Akhir ini diharapkan dapat bermanfaat untuk:

1. Menambah ilmu terkait dengan *monitoring* aktivitas Gunung Merapi.
2. Memberikan informasi mengenai aktivitas Gunung Merapi.
3. Dapat menjadi acuan untuk penelitian sejenis.
4. Menjadi masukan untuk BPPTKG Yogyakarta mengenai aktivitas dan deformasi Gunung Merapi.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara garis besar, sistematika penulisan proposal tugas akhir ini meliputi:

- Bab I Pendahuluan, menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, manfaat, dan sistematika penulisan laporan tugas akhir.
- Bab II Tinjauan Pustaka, meliputi teori sebagai landasan penyusunan tugas akhir.
- Bab III Metodologi, merupakan penjabaran mengenai prosedur kerja yang digunakan dalam tugas akhir.
- Bab IV Hasil dan Pembahasan, menjelaskan tentang analisa data hasil penelitian beserta pembahasannya.
- Bab V Kesimpulan dan Saran, memuat tentang inti dari pembahasan yang menjawab permasalahan serta berisi masukan untuk mengembangkan hasil penelitian lebih lanjut.

BAB II

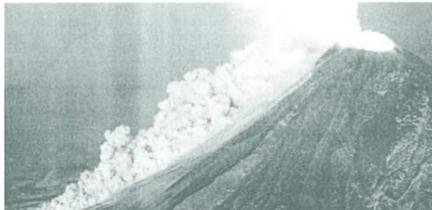
DASAR TEORI

2.1 Vulkanologi

Vulkanologi merupakan sebuah studi mengenai kenaikan magma (batuan meleleh) menuju mantel dan kerak Bumi dan erupsinya pada permukaan Bumi. Vulkanologi menguraikan tentang evolusi dari magma dan pergerakannya serta erupsinya. Aktivitas vulkanik memiliki keuntungan dan kerugian pada kehidupan makhluk hidup di sekitarnya. Monitoring dan prediksi mengenai erupsi vulkanik dilakukan dengan pengukuran geofisika (Sigurdsson, 2009).

2.2 Gunungapi

Gunungapi merupakan sebuah rekahan dalam kerak bumi yang menjadi tempat keluarnya magma, gas, atau cairan lainnya ke permukaan bumi. Gunungapi biasanya berbentuk kerucut. Bahan utama pembentuk gunungapi adalah magma, yaitu suatu fluida kompleks yang terdiri dari batuan cair dengan suhu yang sangat tinggi yang berasal dari dalam perut bumi. Kemudian magma yang muncul ke permukaan bumi ini disebut sebagai lava (Scarth, 1994).



Gambar 2.1 Gunungapi (Zobin, 2003)

Proses terbentuknya gunungapi umumnya terjadi pada daerah yang berada pada zona subduksi. Pada zona ini akan terbentuk retakan yang akan menjadi jalan keluar magma ke permukaan bumi. Magma yang muncul ke permukaan bumi akan mengalami

diferensiasi akibat adanya perbedaan tekanan saat naik menuju puncak gunung. Perbedaan tekanan ini menyebabkan sifat fisik magma akan berubah sehingga berpengaruh tipe struktur gunungapi dan jenis letusannya (Nandaka dkk,2009).

2.3 Deformasi

Lahan primer gunungapi terbentuk dari adanya peningkatan dan erupsi magma. Magma yang mengalami peningkatan berinteraksi dengan batuan dan fluida di sekitarnya. Interaksi ini menimbulkan adanya rekahan batuan sehingga menjadi jalur baru bagi magma untuk mengalir dan terkumpul pada suatu reservoir bawah tanah. Pembentukan jalur baru dan perubahan tekanan di dalam reservoir menimbulkan adanya tekanan sehingga merusak batuan di sekitarnya. Pola dan laju deformasi permukaan di sekitar gunungapi menunjukkan proses tektonik dan vulkanik yang dirambatkan melalui sifat mekanik dari kerak bumi (Dzurisin, 2007).

Sumber deformasi vulkanik disebut juga sebagai sumber volumetrik yang terdiri atas pengembangan (*inflating*), pengempisan (*deflating*), serta penumbuhan bentuk dan ukuran. Sumber volumetrik mengembang dan menyusut melalui pergerakan fluida. Deformasi tergantung pada bentuk dan ukuran dari sumber, kenaikan tekanan, dan juga sifat elastik dari medium. Untuk setiap kedalaman dan geometri sumber tertentu, deformasi permukaan berskala dengan rasio perubahan tekanan pada rongga terhadap modulus elastis setengah ruang. Modulus elastis dapat bervariasi dengan beberapa orde magnitudo, menghasilkan ketidakpastian yang sama dalam perubahan tekanan yang diperkirakan dari kecocokan model terhadap deformasi permukaan (Dzurisin, 2007).

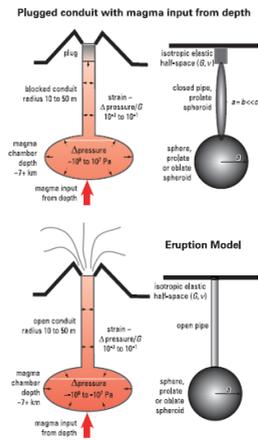
2.4 Tilt

Tilt didefinisikan sebagai inklinasi terhadap arah vertikal atau horizontal, atau dapat dianggap sebagai vektor 2 dimensi yang dituliskan dalam komponen (ω_x, ω_y) . Komponen tilt dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial y}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial w}{\partial x} \\ -\frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan ω_x bernilai positif ketika perpindahan vertikal w menurun pada arah sumbu x positif, dan ω_y bernilai positif ketika w menurun pada sumbu y positif. Tilt tidak berdimensi dan memiliki satuan μ radian. Tanda dari komponen *slope* sebanding dengan negatif dari komponen tilt (Dzurisin, 2007).

2.5 Model Ruang Magma

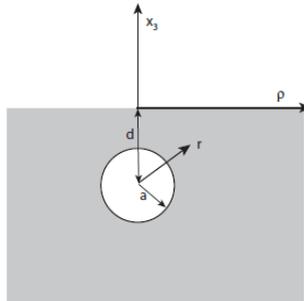


Gambar 2.2 Model Elemen *Inflating* dan *Deflating* Gunungapi (Dzurisin, 2007)

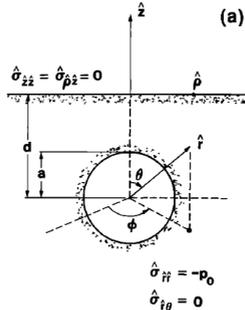
Terdapat dua elemen prinsip dalam model sederhana dari suatu siklus erupsi gunungapi, yaitu ruang magma yang terus

menerus terisi dari perut bumi, dan saluran yang digunakan sebagai jalur magma untuk keluar ke permukaan. Ruang magma yang terus menerus terisi menimbulkan adanya peningkatan tekanan. Apabila tekanan telah cukup untuk mendorong sumbat pada kubah, maka akan terjadi erupsi hingga tekanan menurun dan sumbat kembali menutup kubah. Sumbat terbentuk dari lava kental yang mengandung asam yang keluar saat terjadi erupsi. Lava mengisi lubang kawah di bagian puncak gunung, kemudian mengeras dan menutup lubang pada dinding gunungapi (Dzurisin, 2007).

2.6 Model Mogi



Gambar 2.3 Geometri Sumber Tekanan pada *Half-space* Infinit (Segall, 2010)



Gambar 2. 4 Geometri Sumber Tekanan dengan Syarat Batas (McTigue, 1987)

Solusi klasik untuk deformasi permukaan Bumi yang disebabkan oleh adanya aktivitas perubahan tekanan pada sumber magma pertama kali digagas oleh Anderson (1936) dan Mogi (1958) dalam bentuk geometri titik sumber pada *half-space* infinit seperti pada gambar 2.3 dan 2.4. Model Mogi adalah model yang paling banyak digunakan karena merupakan model yang sederhana. Model Mogi mengasumsikan material elastis dengan permukaan bebas dan tidak ada tarikan pada permukaan. Pada model Mogi, diasumsikan bahwa lapisan bawah permukaan adalah linear, elastis, isotropis, dan homogen (Segall, 2010).

Terdapat persamaan ekuilibrium yang menunjukkan divergensi tegangan.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = 0 \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana suku pertama merupakan divergensi tegangan dan suku kedua adalah *body force* dengan ρ adalah densitas dan f_i adalah gaya gravitasi. Tidak ada suku awal dikarenakan diasumsikan *quasistatic* dimana perpindahan dan deformasi terjadi dengan sangat pelan sehingga kita dapat mengabaikan suku awal pada persamaan gerakan. Dalam keadaan ini kita juga mengabaikan *body force* karena kita mengasumsikan bahwa kondisi tegangan awal menyetimbangkan seluruh *body force* pada sistem sehingga

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots(2.3)$$

Dari gambar diatas, asumsikan terdapat bola dengan radius a , dengan pusat berada pada kedalaman d di dalam *half-space* uniform yang disisipkan pada tekanan internal uniform p . Dibutuhkan dua sistem koordinat, yaitu sistem koordinat bola yang berasal pada pusat bola dengan jarak radial r dari pusat, dan sistem koordinat silinder yang terpusat diatas bola, dengan ρ mengukur

jarak radial dari pusat simetri pada permukaan Bumi. Terdapat syarat batas sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sigma_{i3} &= 0 \text{ pada } x_3 = 0, i = 1, 2, 3, \\ \sigma_{rr} &= -p \text{ pada } r = a, \\ \sigma_{r\theta} = \sigma_{r\phi} &= 0 \text{ pada } r = a \dots\dots\dots(2.4) \end{aligned}$$

Syarat batas yang pertama menjelaskan bahwa pada bidang $x_3 = 0$ bebas daya tarik, dan untuk kedua syarat batas lainnya menjelaskan bahwa tegangan radial sebanding dengan tekanan uniform p pada dinding bola dimana daya tarik geser hilang (Segall, 2010).

McTigue (1987) melanjutkan penyelesaian persamaan di atas dengan menghilangkan daya tarik terinduksi pada $r = a$ sehingga memenuhi syarat batas pada dinding bola. Hal ini melanggar batas permukaan bebas, namun dapat dikoreksi kembali dengan menerapkan daya tarik sebanding dan berlawanan pada $x_3 = 0$. Kita membutuhkan persamaan yang menghubungkan antara tegangan dan regangan.

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_j + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \dots\dots\dots(2.5)$$

Yang biasa kita sebut sebagai Hukum Hooke dengan μ dan λ adalah konstanta Lamé. Karena simetri maka hanya terdapat satu persamaan ekuilibrium sebagai berikut.

$$\frac{\partial\sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(2\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\phi\phi}) = 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan simetri $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\phi\phi}$. Regangan radial adalah $\varepsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r$ dan dengan simetri radial, regangan lingkaran diberikan oleh $\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_{\phi\phi} = u_r / r$ (Segall, 2010).

Dalam tiga dimensi, hukum Hooke dapat diturunkan dan didapatkan persamaan untuk material isotropis sebagai berikut.

$$\sigma_{rr} = (2\mu + \lambda)\varepsilon_{rr} + \lambda\varepsilon_{\theta\theta} + \lambda\varepsilon_{\phi\phi} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \lambda\varepsilon_{rr} + (2\mu + \lambda)\varepsilon_{\theta\theta} + \lambda\varepsilon_{\phi\phi} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\sigma_{\phi\phi} = \lambda\varepsilon_{rr} + \lambda\varepsilon_{\theta\theta} + (2\mu + \lambda)\varepsilon_{\phi\phi} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan menggabungkan ketiga persamaan di atas dengan hukum Hooke maka didapatkan persamaan ekuilibrium dalam hal perpindahan sebagai berikut:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{du_r}{dr} + 2 \frac{u_r}{r} \right) = 0 \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan di atas dan mengalikan setiap suku dengan $e^{\Phi(r)}$ didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$e^{\Phi(r)} \frac{du_r}{dr} + \frac{2u_r}{r} e^{\Phi(r)} = Ae^{\Phi(r)}.$$

Anggap $y = u_r e^{\Phi(r)}$, maka persamaan di atas dapat dituliskan menjadi

$$\frac{dy}{dr} + \left(\frac{2}{r} - \frac{d\Phi}{dr} \right) u_r e^{\Phi(r)} = Ae^{\Phi(r)} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan menghilangkan suku yang bertanda kurung dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\left(\frac{2}{r} - \frac{d\Phi}{dr} \right) = 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

sehingga $\Phi = \log r^2$. Kita susun ulang persamaan menjadi

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dr} &= Ae^{\Phi(r)} \\ y &= \int Ae^{\Phi(r)} dr \dots\dots\dots(2.7) \end{aligned}$$

Dimisalkan $k = \log r^2$, $dk = \frac{2}{r} dr$, $r = e^{k/2}$, dan $dr = \frac{e^{k/2}}{2} dk$ maka persamaan 2.7 menjadi

$$y = \frac{A}{3} e^{3 \log r^2 / 2} + B \dots\dots\dots(2.8)$$

Sebelumnya kita memiliki $y = u_r e^{\Phi(r)}$, dengan substitusi nilai y ke persamaan 2.8 maka diperoleh

$$u_r e^{\Phi(r)} = \frac{A}{3} e^{3 \log r^2 / 2} + B \dots\dots\dots(2.9)$$

dan persamaan menjadi

$$u_r = A \frac{r}{3} + \frac{B}{r^2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Agar perpindahan hilang dari ruang magma, maka $A=0$. Kondisi ini menyebabkan persamaan 2.10 berubah menjadi

$$u_r = \frac{B}{r^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

Konstanta B ditentukan oleh kondisi batas pada dinding ruang magma. Regangan radial adalah $\epsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r$ sedangkan regangan lingkaran diberikan oleh $\epsilon_{\theta\theta} = \epsilon_{\phi\phi} = u_r / r$. Dengan substitusi u_r ke dalam ungkapan regangan radial, regangan volumetrik ϵ_{kk} menghilang dan tegangan radial menjadi

$$\sigma_{rr} = 2\mu\epsilon_{rr} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\sigma_{rr} = 2\mu \partial u_r / \partial r = \frac{-4\mu B}{r^3} \dots\dots\dots(2.13)$$

Mengingat kembali kondisi batas dimana $\sigma_{rr}(r = a) = -p$ dan diperoleh nilai konstanta $B = pa^3/4\mu$. Sehingga diperoleh perpindahan dan tegangan

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{pa^3}{4\mu r^2}, \\ \sigma_{rr} &= \frac{-pa^3}{r^3}, \\ \sigma_{\phi\phi} = \sigma_{\theta\theta} &= 2\mu \frac{u_r}{r} = \frac{pa^3}{2r^3} \dots\dots\dots(2.14) \end{aligned}$$

Tegangan radial dan tegangan melingkar saling berlawanan karena tegangan radial bersifat menekan, sedangkan tegangan lingkaran bersifat menarik (Segall, 2010).

Tegangan semakin berkurang terhadap jarak sebagai $(a/r)^3$ sehingga pada bidang $x_3 = 0$ kondisi permukaan bebas tidak dipenuhi pada orde $(a/d)^3$. Dengan melakukan transformasi perpindahan dan tegangan ke dalam sistem koordinat polar silinder, dimana ρ adalah koordinat radial di sepanjang permukaan bebas, maka diperoleh perpindahan radial pada komponen vertikal dan horizontal sebagai berikut:

$$u_z(\rho, x_3 = 0) = \frac{pa^3}{4\mu} \frac{d}{(\rho^2 + d^2)^{3/2}},$$

$$u_\rho(\rho, x_3 = 0) = \frac{pa^3}{4\mu} \frac{\rho}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.15)$$

Untuk transformasi tegangan ke koordinat polar silinder, digunakan hukum transformasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\sigma_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} &= 0 \\ \frac{1}{r^2} + \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\sigma_{zr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0 \dots\dots\dots(2.16) \end{aligned}$$

Kita mempunyai

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho z} &= (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) \sin \theta \cos \theta, \\ \sigma_{zz} &= \sigma_{rr} \cos^2 \theta + \sigma_{\theta\theta} \sin^2 \theta \dots\dots\dots(2.17) \end{aligned}$$

dengan $\sin \theta = \rho/r$, $\cos \theta = d/r$. Sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(\rho, x_3 = 0) &= -\frac{pa^3}{2} \left[\frac{3d^2}{(\rho^2+d^2)^{5/2}} - \frac{1}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \right] \\ \sigma_{zz}(\rho, x_3 = 0) &= -\frac{3pa^3}{2} \frac{3d^2}{(\rho^2+d^2)^{5/2}} \dots\dots\dots(2.18) \end{aligned}$$

Perpindahan yang dihasilkan oleh adanya daya tarik adalah

$$\begin{aligned} u_z(\rho, x_3 = 0) &= \frac{(3-4\mu)pa^3}{4\mu} \frac{d}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \\ u_\rho(\rho, x_3 = 0) &= \frac{(3-4\mu)pa^3}{4\mu} \frac{\rho}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.19) \end{aligned}$$

Apabila dijumlahkan, maka total perpindahan adalah

$$u_z = \frac{(1-\nu)pa^3}{\mu} \frac{d}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$u_\rho = \frac{(1-\nu)pa^3}{\mu} \frac{\rho}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.21)$$

Pada *half-space*, perpindahan tidak radial kecuali pada area dekat dinding ruang untuk a/d kecil dan pada permukaan bebas (Segall, 2010).

Perubahan volume dinotasikan dengan ΔV , dihasilkan dari integral perpindahan radial pada permukaan ruang magma. Apabila radius ruang magma jauh lebih kecil dibandingkan kedalaman ruang magma dari permukaan, kita bisa memperkirakan

perpindahan pada perbatasan ruang magma dengan menggunakan solusi *full-space*.

$$\Delta V = 4\pi a^2 u_r (r = a)$$

Dari persamaan sebelumnya kita mempunyai

$$u_r = \frac{pa^3}{4\mu r^2}$$

$$u_r (r = a) = pa/4\mu$$

Sehingga perubahan volume adalah

$$\Delta V = \pi pa^3 / \mu$$

Dengan nilai perubahan volume diatas, maka perpindahan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u_z = \frac{(1-\nu)\Delta V}{\pi} \frac{d}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$u_\rho = \frac{(1-\nu)\Delta V}{\pi} \frac{\rho}{(\rho^2+d^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.23)$$

Kedua persamaan diatas dikenal sebagai model Mogi, yaitu suatu pendekatan dalam permasalahan bola bertekanan pada *half-space* (Segall, 2010).

2.7 Kemiringan Tanah Radial

Kita menggunakan data tilt untuk mengestimasi lokasi dan perubahan volume dari sumber deformasi. Model sumber simetris radial sesuai dengan simetri umum dari pola deformasi yang terekam dalam data tilt. Diasumsikan deformasi permukaan terukur dihasilkan dari perubahan tekanan di dalam ruang magma pada permukaan elastis homogen. Perilaku sumber tekanan dapat dihitung menggunakan kemiringan tanah radial atau *radial ground tilt*, θ_r , yang didapatkan dari turunan perpindahan,

$$\theta_r = \frac{3(1-\nu)\Delta V}{\pi} \frac{\rho d}{(\rho^2+d^2)^{5/2}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana:

ν = Rasio Poisson ($\nu = 0.25$)

- ΔV = Perubahan volume pada ruang magma
 ρ = Jarak antara sumber dengan stasiun pengamatan
 d = Kedalaman Sumber

Positif menunjukkan adanya kenaikan tekanan sumber magma atau volume (Carey dkk, 2015).

2.8 Tiltmeter

Mobil Volcano-Monitoring System (MVMS) terdiri dari instrumen yang digunakan untuk mengukur deformasi secara horizontal, vertikal, dan kemiringan. EDM (*Electronic Distance Meters*) dan GPS (*Global Positioning System*) secara prinsip digunakan untuk mengukur deformasi horizontal. Sedangkan perpaduan EDM digunakan untuk mengukur deformasi vertikal dan *tilt*. Tiltmeter digunakan untuk pengukuran *tilt* secara *real time* (Scarpa & Tilling, 1996).

Tiltmeter adalah pengamat deformasi yang menyediakan data dalam resolusi mikroradian secara mendekati real-time, dapat beroperasi pada segala macam kondisi, dan dapat diletakkan pada daerah yang sulit dijangkau atau terlalu berbahaya untuk dilakukan penelitian secara berkala. Data deformasi telemeter menyediakan rekaman yang hampir kontinyu untuk mendeteksi adanya perubahan pada gunungapi yang mungkin dapat terjadi dalam kerangka waktu yang singkat dibandingkan dengan pengamatan geodetik standar seperti EDM atau pengukuran *Leveling*. Tiltmeter sangat sensitif terhadap perubahan temperatur sehingga perlu ditanam dalam kedalaman 1-2 meter dengan tujuan agar instrumen terisolasi dari perubahan temperatur yang signifikan. Tiltmeter terdiri dari tiga komponen utama yaitu pelat tiltmeter, *portable* tiltmeter, dan *readout* unit (Scarpa & Tilling, 1996).

2.9 Non-Linear Least Square

Non-linear least squares adalah suatu bentuk analisis yang digunakan untuk pencocokan data observasi m dengan model yang tidak linear pada parameter n yang tidak diketahui. Misal terdapat suatu fungsi $f(x)$ dari variabel x tersusun pada nilai y_1 sebanyak m .

$$y_1 = f(x_1), \dots, y_m = f(x_m)$$

Diasumsikan fungsi adalah bentuk analitik yang bergantung pada parameter n $f(x; \lambda_1, \dots, \lambda_n)$ dan mempertimbangkan set *overdetermined* dari persamaan m :

$$y_1 = f(x_1; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \dots \dots \dots (2.25)$$

$$y_m = f(x_m; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \dots \dots \dots (2.26)$$

Kita ingin menyelesaikan persamaan diatas untuk mendapatkan nilai $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Dengan mengambil nilai tebakan awal λ_1 dan mendefinisikan

$$d\beta_i = y_i - f(x_i; \lambda_1, \dots, \lambda_n) \dots \dots \dots (2.27)$$

Untuk mendapatkan estimasi linear untuk perubahan $d\lambda_i$ dibutuhkan reduksi dari $d\beta_i$ ke 0

$$d\beta_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial \lambda_j} d\lambda_j \Big|_{x_i \lambda} \dots \dots \dots (2.28)$$

untuk $i = 1, \dots, m$, dengan $\lambda \equiv (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$. Dapat dituliskan menjadi lebih sederhana menjadi

$$d\beta_i = A_{i j} d\lambda_j \dots \dots \dots (2.29)$$

dimana **A** adalah matriks $m \times n$

$$A_{i j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \lambda_1} \Big|_{x_1 \lambda} & \dots & \frac{\partial f}{\partial \lambda_n} \Big|_{x_1 \lambda} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial \lambda_1} \Big|_{x_m \lambda} & \dots & \frac{\partial f}{\partial \lambda_n} \Big|_{x_m \lambda} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.30)$$

Atau dituliskan dalam bentuk yang lebih sederhana menjadi

$$d\beta = A d\lambda \dots \dots \dots (2.31)$$

dengan $d\boldsymbol{\beta}$ adalah vektor m dan $d\boldsymbol{\lambda}$ adalah vektor n . Dengan memberikan matriks transpose \mathbf{A} pada kedua sisi pada persamaan (2.24) kemudian didapatkan

$$\mathbf{A}^T d\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) d\boldsymbol{\lambda}$$

Kita misalkan $\mathbf{a} \equiv \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ dan $\mathbf{b} \equiv \mathbf{A}^T d\boldsymbol{\beta}$ sehingga diperoleh persamaan matriks sebagai berikut:

$$\mathbf{a} d\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{b} \dots \dots \dots (2.32)$$

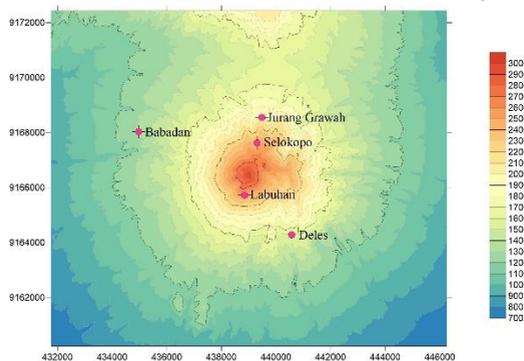
$d\boldsymbol{\lambda}$ dapat diselesaikan menggunakan teknik matriks standar seperti eliminasi Gauss (Weisstein, 2018).

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB III METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak pada kawasan Gunung Merapi dengan lokasi secara geografis terletak pada koordinat $07^{\circ}32'30''$ - $07^{\circ}52'30''$ LS dan $110^{\circ}15'00''$ - $110^{\circ}37'30''$ BT. Ditinjau secara administratif, Gunung Merapi terletak pada perbatasan empat kabupaten, yaitu Kabupaten Sleman yang terletak di Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Kabupaten Magelang, Boyolali, dan Klaten yang terletak di Propinsi Jawa Tengah. Gunung Merapi memiliki ketinggian 2978 m dpl dengan diameter sebesar 28 km, luas sebesar 300-400 km² serta volume ± 150 km³ (BPPTKG).



Gambar 3.1 Peta Stasiun Tiltmeter Gunung Merapi

3.2 Geologi Regional Gunung Merapi

Gunung Merapi tumbuh di atas titik potong antara kelurusan vulkanik Ungaran-Telomoyo-Merbabu-Merapi dan kelurusan vulkanik Lawu-Merapi-Sumbing-Sindoro-Slamet. Kelurusan vulkanik Ungaran-Merapi tersebut merupakan sesar mendatar yang berbentuk konkaf hingga sampai ke barat, dan berangsur-angsur berkembang kegiatan vulkanisnya sepanjang sesar

mendatar dari arah utara ke selatan. Dapat diurut dari utara yaitu Ungaran Tua berumur Pleistosen dan berakhir di selatan yaitu di Gunung Merapi yang sangat aktif hingga saat ini. Kadang disebutkan bahwa Gunung Merapi terletak pada perpotongan dua sesar kwarter yaitu Sesar Semarang yang berorientasi utara-selatan dan Sesar Solo yang berorientasi barat-timur (Ratdomopurbo dkk, 2000).

Secara morfologi tubuh gunung Merapi dapat dibagi menjadi empat bagian yaitu Kerucut Puncak, Lereng Tengah, dan Lereng Kaki dan Dataran Kaki. Kerucut puncak dibangun oleh endapan paling muda berupa lava dan piroklastik. Satuan lereng tengah dibangun oleh endapan lava, piroklastik, dan lahar. Lereng Kaki dan Dataran Kaki tersusun dari endapan piroklastik, lahar, dan aluvial. Dari bentuknya, dibandingkan dengan gunungapi disebelahnya yaitu Gunung Merbabu, Gunung Merapi nampak jauh lebih runcing. Hal ini menunjukkan bahwa pertumbuhan bagian puncaknya relatif lebih cepat. Hal ini didukung pula oleh kenyataan bahwa pada saat ini produk aktivitas Merapi hanya tersebar pada jarak yang dekat dari puncak Merapi (Ratdomopurbo dkk, 2000).

Kerucut puncak Merapi yang sering disebut sebagai Gunung Anyar merupakan bagian Merapi yang paling muda. Semua aktivitas Merapi terpusat pada puncak kerucut ini. Kawah utama Merapi saat ini berupa bukaan berbentuk tapal kuda yang mengarah ke barat-baratdaya. Morfologi kawah ini terbentuk sesudah letusan tahun 1961. Secara umum, dataran puncak Merapi tersusun dari kubah-kubah lava yang tidak terlongsorkan. Beberapa area di dataran puncak Merapi di luar kawah utama mengeluarkan banyak uap vulkanik yaitu di area Gendol dan Woro, bagian tenggara dataran puncak (Ratdomopurbo dkk, 2000).

Bagian lereng barat Merapi merupakan daerah aliran guguran dan piroklastik. Daerah ini merupakan daerah terbuka karena sering terlanda awan panas. Daerah lereng timur sebagai bagian dari struktur Merapi Tua jarang terkena dampak aktivitas Merapi. Lereng ini lebih banyak tertutup dengan vegetasi. Morfologinya nampak dipisahkan dari kerucut Merapi dengan sesar yang berbentuk tapal kuda yang melalui bawah Gunung Ijo, lereng timur Merapi (Ratdomopurbo dkk, 2000).

3.3 Data dan Peralatan

3.3.1 Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data tilt hasil pemantauan *online* pada kantor BPPTKG. Stasiun pengamatan yang digunakan adalah sebanyak 4 stasiun yaitu Labuhan, Jurang Grawah, Selokopo, dan Babadan yang terletak di sekitar Gunung Merapi. Didapatkan data tilt dalam format .CSV dari masing-masing stasiun pengamatan. Rentang waktu dari data yang digunakan dalam penelitian yaitu dalam kurun waktu 4 bulan yaitu 1 September 2017 hingga 30 Desember 2017.

3.3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi 2 jenis, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Adapun perangkat keras berupa tiltmeter yang digunakan pada stasiun pengamatan deformasi Gunung Merapi, dan laptop sebagai pengolah data. Sedangkan perangkat lunak yang digunakan yaitu *Matlab 2017a* untuk pengolahan data tiltmeter hingga pemodelan sumber tekanan, dan *Microsoft Word* untuk penulisan laporan.

3.4 Pengolahan Data

Proses pengolahan data dilakukan untuk mengetahui estimasi kedalaman dan volume dari sumber tekanan. Pengolahan data dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Persiapan Data

Pengumpulan data adalah tahap awal dalam mempersiapkan data yang akan diolah. Dalam hal ini data tilt didapatkan dari stasiun pengamatan tiltmeter milik kantor BPPTKG. Data tilt dalam format .CSV diimpor ke perangkat lunak *Matlab 2017a* serta diberikan *median filter* yang bertujuan untuk menghilangkan *spike* pada data pembacaan tiltmeter. Data tilt yang diperoleh berupa pengamatan tiap menit sehingga dilakukan *resampling* data menjadi 1 hari.

3.4.2 Pengolahan menggunakan *Matlab 2017a*

Data tilt yang telah *di-resampling* kemudian dicari regresi liniernya. Tujuan pemberian regresi linier ini adalah untuk mengetahui hubungan secara linier antara periode pengamatan dengan bacaan tiltmeter. Hubungan ini adalah berupa kenaikan atau penurunan pada bacaan tiltmeter. Dari regresi linier yang didapatkan perlu dilakukan pencarian ketidakpastian dari regresi linier tersebut.

Langkah selanjutnya adalah menghitung jarak masing-masing stasiun pengamatan dari puncak Gunung Merapi. Perhitungan besarnya jarak menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Jarak = \sqrt{(E_{stasiun} - E_{puncak})^2 + (N_{stasiun} - N_{puncak})^2} \dots\dots\dots(3.1)$$

Dengan:

E = Koordinat *easting* (UTM)

N = Koordinat *northing* (UTM)

Setelah mendapatkan nilai jarak, dilakukan perhitungan nilai amplitudo dengan rumus sebagai berikut:

$$Amplitude = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \dots\dots\dots(3.2)$$

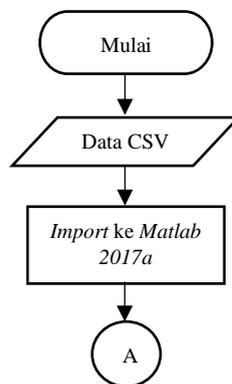
Perhitungan nilai amplitudo bertujuan untuk mengetahui nilai resultan dari bacaan tiltmeter komponen B-T dan U-S yang diketahui dari regresi linier.

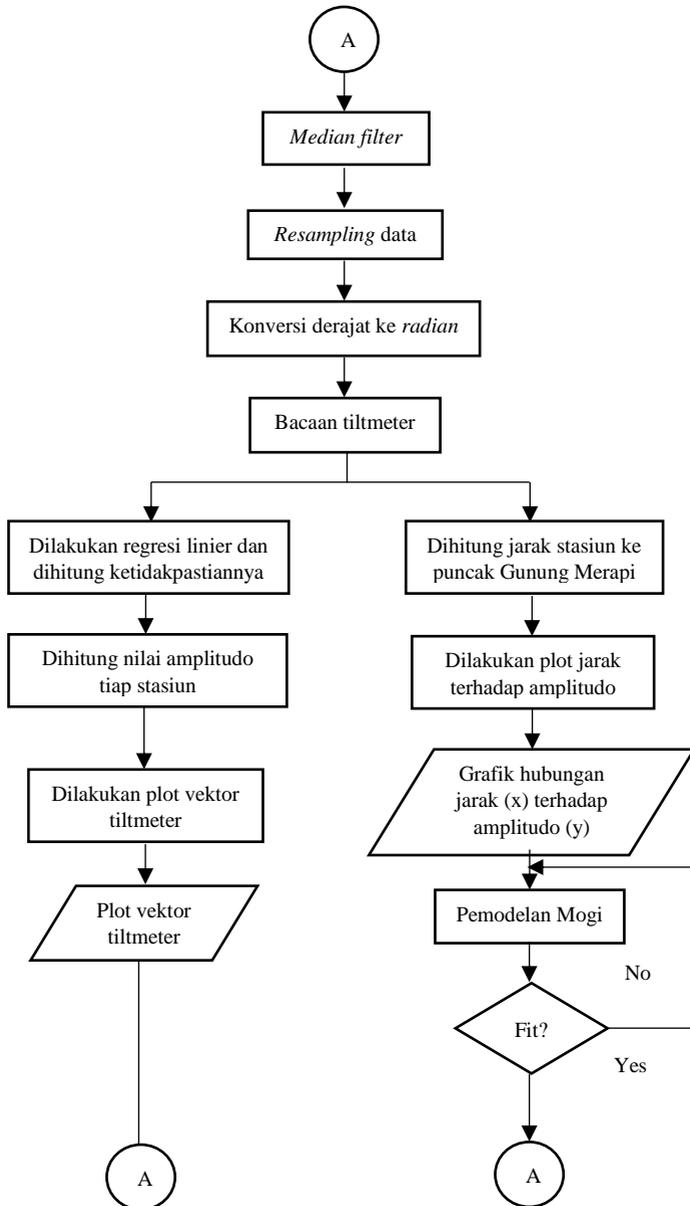
Langkah selanjutnya adalah pembuatan plot arah vektor tiltmeter tiap stasiun serta plot jarak terhadap amplitudo tiap stasiun. Plot arah vektor tiltmeter ini bertujuan untuk mengetahui arah radial tiltmeter pada kurun periode tertentu. Dan plot jarak terhadap amplitudo digunakan untuk melakukan estimasi kedalaman dan volume sumber tekanan Gunung Merapi.

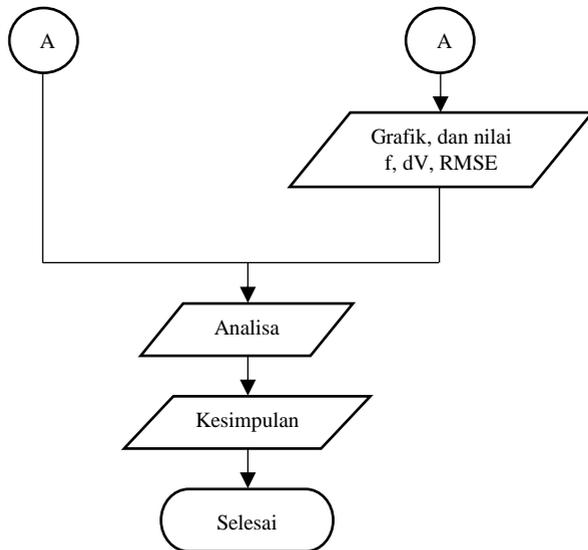
Pada tahap estimasi kedalaman dan volume sumber tekanan Gunung Merapi, dilakukan dengan cara pemodelan menggunakan metode inversi *non linear least-square*. Adapun persamaan yang digunakan adalah persamaan (2.17). Hasil pemodelan ini adalah nilai kedalaman dan volume beserta *error*-nya dari model yang paling cocok dengan data *observed*.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah diagram alir penelitian berdasarkan proses pengolahan data sebagaimana telah diuraikan pada subbab sebelumnya.







Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB IV

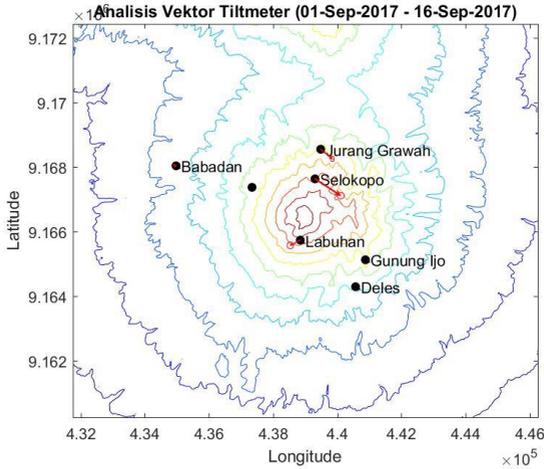
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Jaringan Tiltmeter

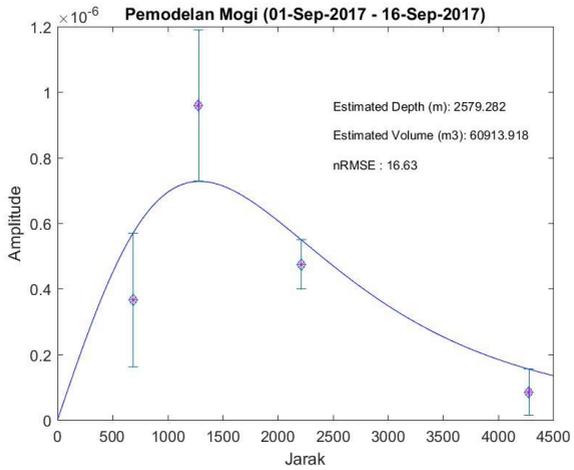
Tiltmeter digunakan sebagai instrumen pengukur perubahan permukaan. Tiltmeter memiliki dua sensor level yang digunakan untuk merekam inklinasi dari *base plate* serta mengukur perubahan temperatur eksternal. Nilai keluaran dari tiltmeter ini digunakan dalam penentuan besarnya deformasi beserta orientasi arahnya. Tiltmeter memiliki tiga komponen, yaitu komponen radial (sumbu Y), komponen tangensial (sumbu X), serta komponen bacaan temperatur. Data dari tiltmeter dikonversi ke bentuk digital oleh *digitizer* dan ditransmisikan hingga dapat diakses pada ruang monitoring kantor BPPTKG.

4.2 Hasil Pengolahan Data Tiltmeter

Pengolahan data tiltmeter dilakukan menggunakan perangkat lunak *Matlab 2017a*. Pengolahan data dilakukan untuk mendapatkan arah dan besar vektor tiltmeter dari masing-masing stasiun tiltmeter serta estimasi kedalaman dan volume sumber tekanan Gunung Merapi pada kurun waktu 1 September hingga 30 Desember 2017. Pengolahan data tiltmeter ini menghasilkan plot vektor tiltmeter beserta *error* ellipsnya serta plot jarak terhadap amplitudo tiap stasiun. Plot jarak terhadap amplitudo kemudian digunakan dalam estimasi kedalaman dan volume sumber tekanan menggunakan model Mogi. Berikut ini adalah contoh tampilan plot vektor tiltmeter dan plot jarak terhadap amplitudo beserta pemodelan Mogi.



Gambar 4.1 Plot Vektor Tiltmeter



Gambar 4.2 Plot Pemodelan Mogi

4.3 Acuan Estimasi Kedalaman Sumber Tekanan

Berdasarkan Mogi, 1958 kawah merupakan suatu celah terbuka yang di bawahnya terdapat sumber tekanan yang memiliki akses terhadap sumber magma. Dari pernyataan ini maka kawah Gunung Merapi dapat digunakan sebagai acuan dalam estimasi kedalaman sumber tekanan yang didapatkan dari hasil pemodelan Mogi. Gunung Merapi memiliki morfologi tubuh yang dibagi menjadi 4 bagian, yaitu Kerucut Puncak, Lereng Tengah, Lereng Kaki, serta Dataran Kaki. Dari morfologi tubuh ini diketahui bahwa Gunung Merapi hanya memiliki satu puncak sehingga memudahkan dalam pengambilan acuan untuk estimasi kedalaman sumber tekanan.

4.4 Analisis Vektor Tiltmeter

Deformasi didefinisikan sebagai perubahan bentuk pada permukaan tubuh gunungapi. Perubahan ini dapat berupa inflasi (pengembangan) ataupun deflasi (pengempisan). Deformasi terjadi pada batuan yang bertujuan untuk mengimbangi desakan magma. Pemantauan deformasi gunungapi dilakukan dengan menggunakan tiltmeter yang diletakkan di stasiun Labuhan, Jurang Grawah, Selokopo, dan Babadan. Data pembacaan tiltmeter dikirimkan ke ruang monitoring kantor BPPTKG berupa data bacaan tiltmeter tiap menit.

Data bacaan tiltmeter terdiri dari tiga komponen, yaitu bacaan tiltmeter Barat-Timur, Utara-Selatan, serta temperatur. Tiap komponen menunjukkan pengukuran yang independen. Satuan bacaan tiltmeter komponen Barat-Timur dan Utara-Selatan adalah derajat dan untuk komponen temperatur adalah celcius. Dalam proses pengolahan data bacaan tiltmeter, perlu dilakukan konversi satuan dari derajat ke *radian*.

Dari pengolahan data tiltmeter menggunakan perangkat lunak *Matlab 2017a*, didapatkan regresi linier dari bacaan tiltmeter serta ketidakpastian dari regresi linier. Regresi linier serta ketidakpastiannya dilakukan pada bacaan tiltmeter komponen N dan E. Regresi linier merepresentasikan kecenderungan *trend* bacaan tiltmeter selama periode tertentu. Apabila garis linier turun maka bernilai negatif, dan bernilai positif apabila garis linier naik.

Dari regresi linier didapatkan nilai gradien dari komponen N dan E serta ketidakpastiannya. Nilai gradien digunakan untuk estimasi besarnya nilai amplitudo vektor tiltmeter yang dihitung menggunakan rumus (3.2) serta kecenderungan arah kemiringan tiltmeter. Ketidakpastian regresi digunakan sebagai *error* dalam arah vektor tiltmeter yang direpresentasikan dalam bentuk elipsoid.

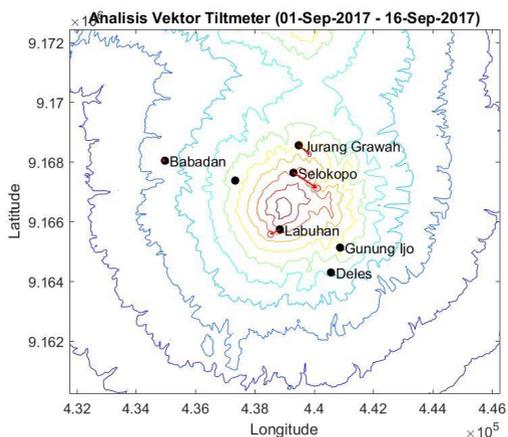
Vektor tiltmeter memberikan kita gambaran mengenai deformasi gunungapi beserta orientasi arahnya seperti yang akan ditunjukkan pada gambar 4.3 hingga 4.10. Vektor tiltmeter ini diasumsikan sebagai resultan dari kedua vektor yaitu *trend* dari bacaan tiltmeter B-T yang direpresentasikan pada sumbu-x, serta *trend* dari bacaan tiltmeter U-S yang direpresentasikan pada sumbu-y. Dengan mengasumsikan arah utara adalah sumbu y+, arah timur adalah sumbu x+, arah selatan adalah sumbu y-, serta arah barat adalah sumbu x-, maka dari data nilai gradien pada tabel 4.1 hingga 4.8 serta plot vektor tiltmeter, kita dapat mengetahui bahwa apabila apabila pada komponen B-T atau *easting* bernilai positif dan U-S atau *northing* bernilai negatif, maka deformasi gunungapi cenderung ke arah tenggara. Apabila komponen *easting* bernilai negatif dan *northing* bernilai positif maka deformasi gunungapi cenderung ke arah barat laut. Apabila bagian *easting* dan *northing* sama sama bernilai negatif, maka deformasi gunungapi cenderung ke arah barat daya serta apabila kedua komponen bernilai positif maka deformasi cenderung ke arah timur laut.

Berikut ini adalah hasil pengolahan data bacaan tiltmeter yang dibagi menjadi beberapa periode pengamatan.

4.4.1 Periode Pengamatan 1-16 September 2017

Tabel 4. 1 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 1-16 September 2017

1 September – 16 September 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpasian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	-3,1097e-07	-1,6258e-07	1,0346e-07	1,0625e-07	3,5090e-07
2.	Jurang Grawah	3,6543e-07	-3,020e-07	5,5419e-08	8,7911e-08	4,7407e-07
3.	Selokopo	8,0162e-07	-5,2199e-07	1,1297e-07	9,7978e-08	9,5659e-07
4.	Babadan	-4,4696e-08	7,2612e-09	3,8942e-08	3,6458e-08	4,5282e-08



Gambar 4.3 Plot Vektor Tiltmeter 1-16 September 2017

Berdasarkan plot vektor tiltmeter diatas, yang memberikan informasi deformasi paling dominan adalah stasiun Selokopo, Jurang Grawah, dan Labuhan. Deformasi paling dominan ditunjukkan pada stasiun Selokopo disusul dengan Jurang Grawah dan orientasi arah tenggara. Stasiun Labuhan menunjukkan deformasi dengan orientasi arah barat daya. Dan stasiun Babadan menunjukkan deformasi yang paling kecil dengan orientasi arah

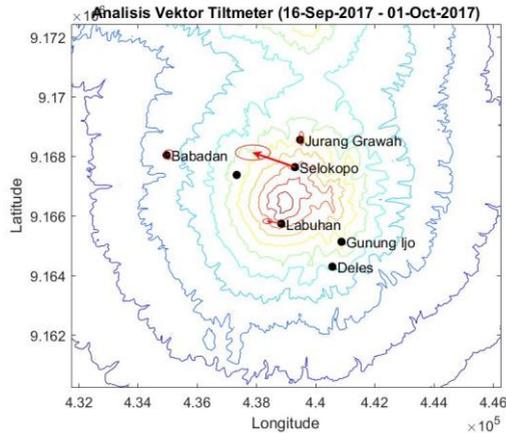
barat laut. Dari *error* yang direpresentasikan dalam bentuk elipsoid, diketahui bahwa apabila nilai ketidakpastian pada komponen E lebih besar daripada nilai ketidakpastian pada komponen N, maka bentuk elips akan cenderung horizontal. Sedangkan apabila nilai ketidakpastian pada komponen N lebih besar daripada nilai ketidakpastian pada komponen E, maka bentuk elips akan cenderung tegak. Penentuan besar kecilnya *error* adalah dengan membandingkan nilai ketidakpastian dengan nilai regresi pada masing-masing komponen bacaan tiltmeter. Dari nilai ketidakpastian yang disediakan dalam tabel diatas, dapat diketahui bahwa pada stasiun Babadan, nilai *error* terbesar adalah pada bacaan tiltmeter komponen *northing*. Stasiun Jurang Grawah, Selokopo, dan Labuhan memiliki nilai *error* yang kecil baik pada komponen *easting* dan komponen *northing*.

Arah radial dari vektor tiltmeter disebabkan oleh intrusi magma. Apabila pola radial menunjuk ke arah tertentu, maka dapat diindikasikan adanya aktivitas magma yang signifikan. Dari plot diatas, pola radial membentuk arah yang acak atau tidak mengarah pada arah tertentu.

4.4.2 Periode Pengamatan 16 September – 1 Oktober 2017

Tabel 4.2 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 16 September – 1 Oktober 2017

16 September – 1 Oktober 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpasian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	-4,6782e-07	8,4748e-08	1,5777e-07	8,4548e-08	4,7543e-07
2.	Jurang Grawah	4,2170e-08	4,9920e-08	7,4011e-08	2,3264e-07	6,5348e-08
3.	Selokopo	-1,4207e-06	4,8713e-07	5,9120e-07	2,5480e-07	1,5019e-06
4.	Babadan	6,9617e-08	1,7290e-08	1,6686e-07	1,6073e-07	7,1732e-08



Gambar 4.4 Plot Vektor Tiltmeter 16 September–1 Oktober 2017

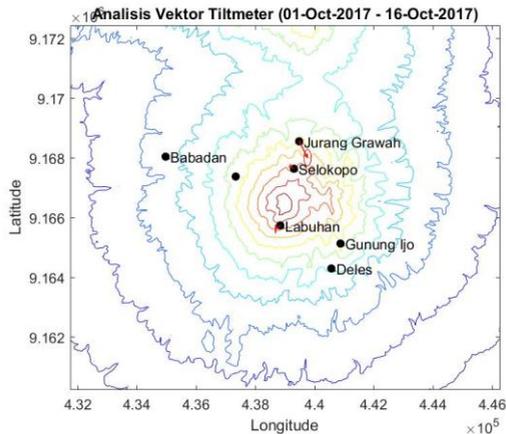
Pada periode pengamatan 16 September hingga 1 Oktober 2017 deformasi paling dominan ditunjukkan pada stasiun Selokopo dengan orientasi arah barat laut disusul oleh Labuhan dengan orientasi arah yang sama. Stasiun Babadan dan Jurang Grawah menunjukkan deformasi yang kecil dengan orientasi arah yang sama yaitu timur laut. Ditinjau dari nilai ketidakpastian dari masing-masing komponen tiap stasiun, diketahui bahwa nilai *error* cukup besar pada stasiun Babadan pada kedua komponen. Kemudian untuk stasiun Labuhan memiliki nilai ketidakpastian pada komponen *northing* yang hampir sama dengan nilai regresi. Stasiun Jurang Grawah dan Selokopo memiliki nilai *error* yang cukup besar pada komponen *northing*. Nilai *error* yang besar dapat disebabkan oleh adanya gangguan pada saat pembacaan data. Sensor tiltmeter memiliki kepekaan yang sangat tinggi. Hal ini menyebabkan adanya perubahan sekecil apapun seperti adanya langkah kaki di sekitar stasiun akan terekam oleh tiltmeter. Selain itu dapat disebabkan oleh adanya perubahan suhu lingkungan

sekitar. Serta dari arah radial vektor tiltmeter tidak menunjuk ke arah tertentu.

4.4.3 Periode Pengamatan 1 – 16 Oktober 2017

Tabel 4.3 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 1-16 Oktober 2017

1 Oktober – 16 Oktober 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpasian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	-1,6018e-07	-1,2215e-07	1,4433e-08	1,4126e-07	2,0144e-07
2.	Jurang Grawah	2,8478e-07	-5,5086e-07	1,2236e-07	2,7432e-07	6,2012e-07
3.	Selokopo	-1,2092e-07	7,4993e-08	3,1383e-08	6,3383e-08	1,4229e-07
4.	Babadan	0	0	0	0	0



Gambar 4.5 Plot Vektor Tiltmeter 1-16 Oktober 2017

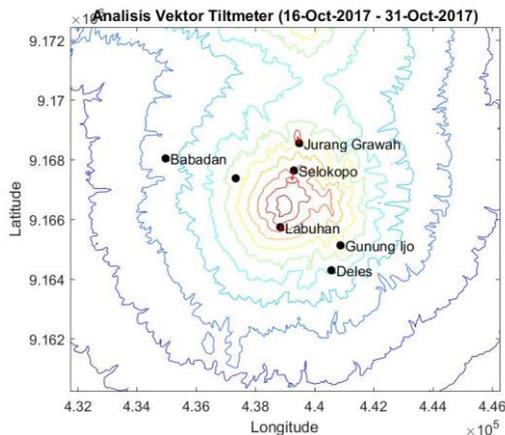
Selanjutnya pada periode pengamatan 1-16 Oktober 2017 vektor tiltmeter hanya terdapat pada 3 stasiun, yaitu Selokopo, Jurang Grawah, serta Labuhan. Hal ini disebabkan karena data raw tilt pada stasiun Babadan hanya melakukan pembacaan hingga bulan September saja. Deformasi paling dominan ditunjukkan pada stasiun Jurang Grawah dengan orientasi arah tenggara, disusul dengan deformasi stasiun Labuhan dengan orientasi arah ke barat

daya dan Selokopo ke arah barat laut. Dari nilai ketidakpastian pada tabel, diketahui bahwa pada tiap stasiun tidak terdapat nilai *error* yang besar. Hanya nilai ketidakpastian yang hampir menyamai nilai regresi yaitu pada stasiun Selokopo dan Labuhan pada komponen *northing*. Dan dari arah radial vektor tiltmeter juga tidak merujuk ke pola tertentu.

4.4.4 Periode Pengamatan 16 – 31 Oktober 2017

Tabel 4.4 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 16-31 Oktober 2017

16 Oktober – 31 Oktober 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpasian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	6,0588e-08	-3,9444e-08	5,7117e-08	9,9504e-08	7,2296e-08
2.	Jurang Grawah	-6,1311e-08	2,1333e-07	9,9576e-08	2,2296e-07	2,2196e-07
3.	Selokopo	-6,9504e-08	-3,2466e-07	1,9396e-07	1,0212e-07	3,3202e-07
4.	Babadan	0	0	0	0	0



Gambar 4.6 Plot Vektor Tiltmeter 16-31 Oktober 2017

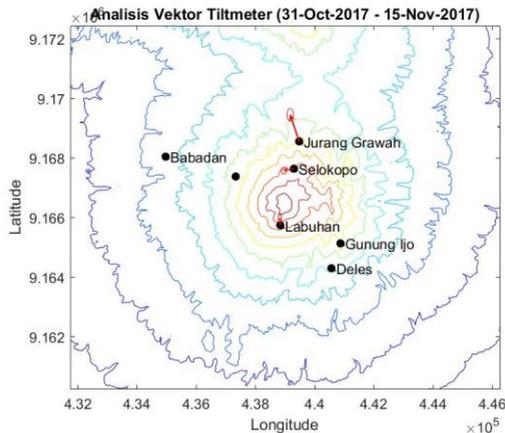
Pengamatan periode 16 hingga 31 Oktober 2017 menunjukkan deformasi yang kecil pada ketiga stasiun pengamatan yaitu Jurang Grawah, Selokopo, dan Labuhan.

Masing-masing stasiun memberikan orientasi arah deformasi yang berbeda. Jurang Grawah berorientasi ke arah barat laut, Selokopo ke arah barat daya, dan Labuhan ke arah tenggara. Ditinjau dari nilai ketidakpastian, pada stasiun Labuhan *error* cenderung lebih besar pada komponen *northing*. Sedangkan pada stasiun Jurang Grawah *error* cenderung lebih besar pada komponen *easting*. Dan pada stasiun Selokopo nilai *error* tidak terlalu besar pada kedua komponennya. Arah radial vektor tiltmeter juga tidak menunjukkan adanya pola ke arah tertentu.

4.4.5 Periode Pengamatan 31 Oktober – 15 Nopember 2017

Tabel 4.5 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 31 Oktober – 15 Nopember 2017

31 Oktober – 15 Nopember 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpasian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	-1,3783e-08	2,4198e-07	5,9162e-08	1,4873e-07	2,4238e-07
2.	Jurang Grawah	-3,0410e-07	8,9159e-07	1,0593e-07	2,1001e-07	9,4202e-07
3.	Selokopo	-3,3785e-07	-6,5053e-08	9,7306e-08	1,1021e-07	3,4405e-07
4.	Babadan	0	0	0	0	0



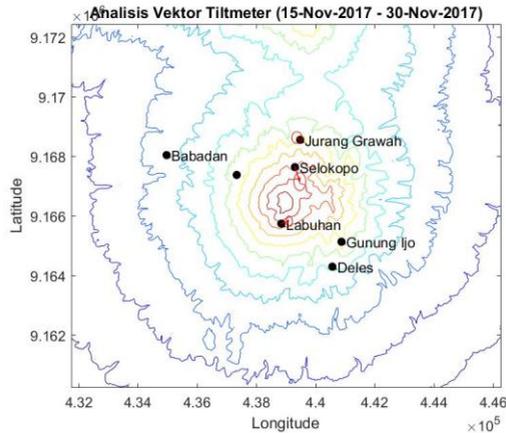
Gambar 4.7 Plot Vektor Tiltmeter 31 Oktober–15 Nopember 2017

Kemudian pada pengamatan periode 31 Oktober hingga 15 Nopember 2017, deformasi secara dominan ditunjukkan pada stasiun Jurang Grawah dengan orientasi arah barat laut kemudian stasiun Selokopo dengan orientasi arah barat daya disusul dengan stasiun Labuhan ke arah barat laut. Ditinjau dari nilai ketidakpastian seperti yang tertera pada tabel, *error* pada stasiun Labuhan cenderung lebih besar pada komponen *easting*. Sedangkan pada stasiun Jurang Grawah nilai ketidakpastian cenderung lebih kecil dibandingkan nilai regresi pada kedua komponen. Dan pada stasiun Selokopo memiliki nilai ketidakpastian yang besar pada komponen *northing*. Ditinjau dari arah vektor tiltmeter, tidak terdapat pola yang menuju ke arah tertentu.

4.4.6 Periode Pengamatan 15 – 30 Nopember 2017

Tabel 4.6 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 15 - 30 Nopember 2017

15 Nopember – 30 Nopember 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpasian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	2,6137e-07	8,5437e-08	1,0944e-07	1,6856e-07	2,7498e-07
2.	Jurang Grawah	-1,1178e-07	7,2221e-08	1,7517e-07	1,9711e-07	1,3308e-07
3.	Selokopo	1,6773e-07	-4,8754e-07	2,0199e-07	3,0229e-07	5,1558e-07
4.	Babadan	0	0	0	0	0



Gambar 4.8 Plot Vektor Tiltmeter 15–30 Nopember 2017

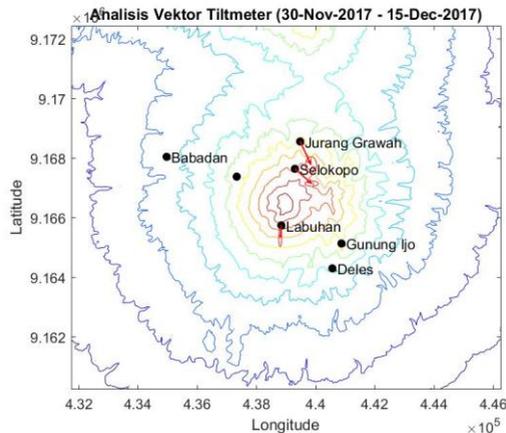
Selanjutnya yaitu pengamatan periode 15 hingga 30 Nopember 2017. Panah vektor tiltmeter menunjukkan panjang paling dominan pada stasiun Selokopo kemudian disusul stasiun Labuhan dan Jurang Grawah. Deformasi pada stasiun Selokopo berorientasi ke arah tenggara, Jurang Grawah berorientasi arah barat laut dan Labuhan ke arah timur laut. Ditinjau dari nilai ketidakpastian, *error* vektor tiltmeter paling besar ditunjukkan pada stasiun Jurang Grawah yang memiliki nilai ketidakpastian yang besar dibandingkan nilai gradien pada komponen *northing*. Kemudian stasiun Labuhan memiliki *error* yang kecil pada kedua komponen dan stasiun Selokopo memiliki *error* yang cenderung lebih besar pada komponen *easting*. Pada pengamatan periode ini, arah vektor tiltmeter tidak menunjukkan ke satu arah yang spesifik.

4.4.7 Periode Pengamatan 30 Nopember – 15 Desember 2017

Tabel 4.7 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 30 Nopember – 15 Desember 2017

30 Nopember – 15 Desember 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpastian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	-3,5574e-08	-4,1087e-07	5,4101e-08	3,0267e-07	4,1241e-07

2.	Jurang Grawah	3,6784e-07	-7,8315e-07	1,8556e-07	2,6875e-07	8,6524e-07
3.	Selokopo	5,6776e-07	-4,9957e-07	2,2519e-07	8,8411e-08	7,5626e-07
4.	Babadan	0	0	0	0	0



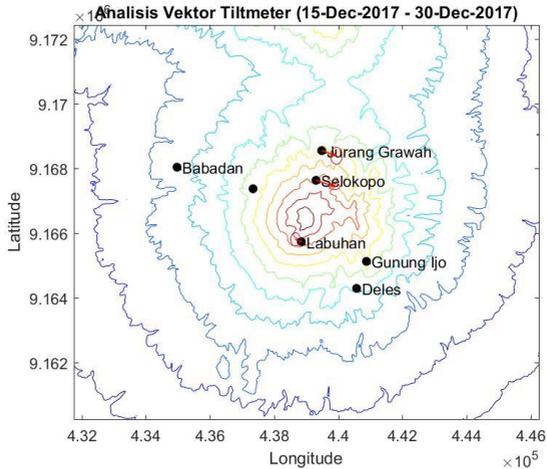
Gambar 4.9 Plot Vektor Tiltmeter 30 Nopember–15 Desember 2017

Pada periode pengamatan 30 Nopember hingga 15 Desember 2017, panah vektor tiltmeter pada ketiga stasiun menunjukkan panjang yang tidak terlalu berbeda secara signifikan. Hal ini menunjukkan deformasi yang hampir sama. Deformasi paling besar ditunjukkan pada stasiun Jurang Grawah disusul stasiun Selokopo. Deformasi terkecil terdapat pada stasiun Labuhan. Stasiun Labuhan memiliki deformasi yang berorientasi ke arah barat daya sedangkan kedua stasiun lainnya yaitu Jurang Grawah dan Selokopo menunjukkan arah deformasi yang sama yaitu ke arah barat laut. Ditinjau dari nilai ketidakpastian, pada stasiun Labuhan *error* paling besar pada komponen *easting*. Sedangkan pada stasiun Selokopo dan Jurang Grawah memiliki *error* yang cenderung kecil pada kedua komponen. Dan arah dari vektor tiltmeter juga tidak menunjukkan kecenderungan ke satu arah tertentu.

4.4.8 Periode Pengamatan 15 – 30 Desember 2017

Tabel 4.8 Hasil Olah Bacaan Tiltmeter Periode Pengamatan 15 – 30 Desember 2017

15 Desember – 30 Desember 2017						
No.	Stasiun	Gradien (rad/hari)		Ketidakpasian		Amplitudo (rad/hari)
		E	N	E	N	
1.	Labuhan	-1,8226e-07	6,7503e-08	1,4959e-07	2,0721e-07	1,9436e-07
2.	Jurang Grawah	4,5852e-07	-1,6069e-07	1,8305e-07	2,6029e-07	4,8586e-07
3.	Selokopo	5,7955e-07	-1,9328e-07	1,6707e-07	9,3071e-08	6,1093e-07
4.	Babadan	0	0	0	0	0



Gambar 4.10 Plot Vektor Tiltmeter 15-30 Desember 2017

Dan pada periode pengamatan 15 hingga 30 Desember 2017, besar deformasi antara stasiun Selokopo dan Jurang Grawah tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Sedangkan pada stasiun Labuhan, besar nilai deformasi sangat kecil dibandingkan dengan nilai deformasi pada stasiun Selokopo dan Jurang Grawah. Orientasi arah deformasi pada stasiun Jurang Grawah dan Selokopo adalah arah tenggara dan stasiun Labuhan ke arah barat

laut. Ditinjau dari nilai ketidakpastian, *error* vektor tiltmeter pada stasiun Jurang Grawah cenderung lebih besar pada komponen *northing*. Hal ini dapat dilihat dari nilai ketidakpastian pada komponen *northing* yang lebih besar dibandingkan dengan nilai gradiennya. Dan pada stasiun Labuhan memiliki nilai ketidakpastian yang hampir sama dengan nilai regresi pada komponen *easting*. Stasiun Selokopo menunjukkan nilai *error* yang kecil pada kedua komponen. Arah dari vektor tiltmeter juga tidak menunjukkan adanya kecenderungan ke satu arah.

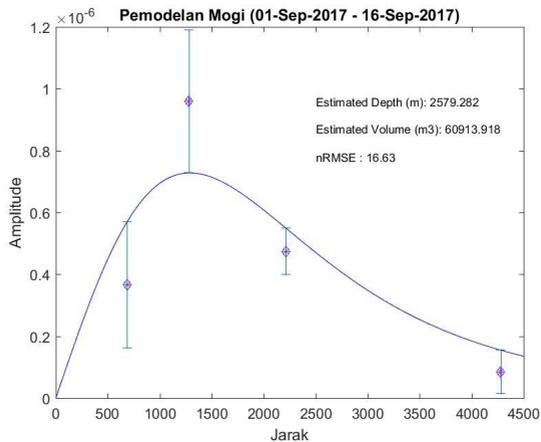
Ditinjau dari plot arah vektor tiltmeter diatas, diketahui bahwa pada masing-masing stasiun cenderung memberikan arah radial yang acak. Kantung magma diasumsikan berbentuk menyerupai bola. Pada dasarnya kantung magma ini berisi batuan meleleh yang berada pada tekanan yang sangat tinggi. Tekanan pada kantung magma akan menyebar ke segala arah hingga menyebabkan batuan di sekitarnya mengalami retak atau pecah. Retak atau pecahnya batuan ini menyebabkan adanya jalur bagi magma untuk bergerak ke atas. Keretakan batuan ini juga menyebabkan adanya perubahan bentuk gunungapi atau yang disebut sebagai deformasi. Sehingga dari plot yang telah didapatkan, diketahui bahwa selama dalam periode pengamatan terjadi deformasi pada Gunung Merapi dengan arah dan besar yang bervariasi. Dengan arah vektor tiltmeter yang acak ini mengindikasikan bahwa tidak adanya aktivitas magma yang signifikan pada gunungapi.

4.5 Analisa Sumber Tekanan

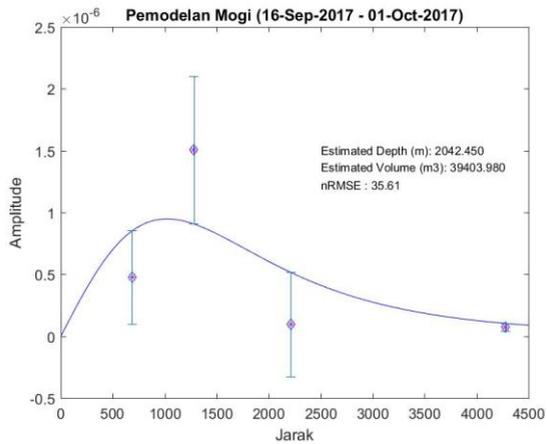
Sumber tekanan Gunung Merapi diperoleh dengan menggunakan model Mogi berdasarkan persamaan (2.17). Pemodelan dilakukan pada grafik jarak-amplitudo. Grafik jarak-amplitudo ini adalah grafik yang dibentuk dari plot jarak tiap stasiun terhadap puncak kawah Gunung Merapi dan juga nilai

amplitudonya. Setiap titik mewakili stasiun tiltmeter. Hasil model adalah berupa plot yang *best fit* dengan pola titik-titik pada grafik.

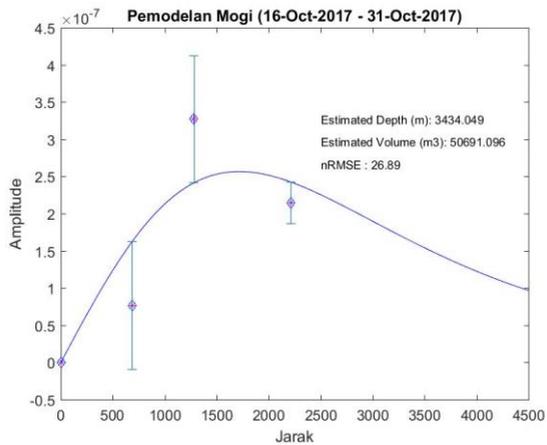
Dari 8 periode pengamatan, terdapat 6 plot hasil pemodelan Mogi. Untuk 2 plot lainnya tidak ditampilkan karena tidak sesuai dengan model Mogi yaitu hanya berupa garis linear. Hal ini dapat disebabkan oleh data bacaan tiltmeter yang kurang baik akibat berbagai faktor eksternal sehingga diperoleh perhitungan data yang kurang valid. Berikut ini adalah hasil pemodelan sumber tekanan menggunakan model Mogi.



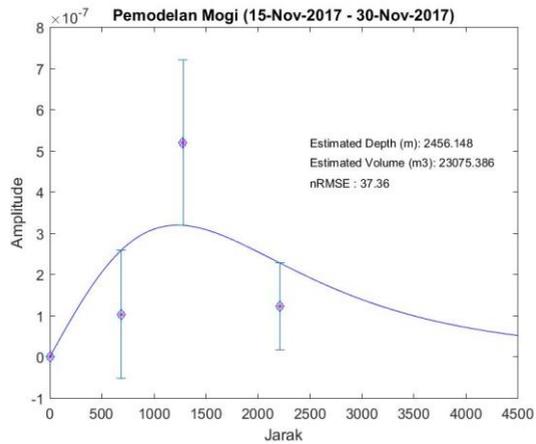
Gambar 4.11 Pemodelan Sumber Tekanan Periode 1-16 September 2017



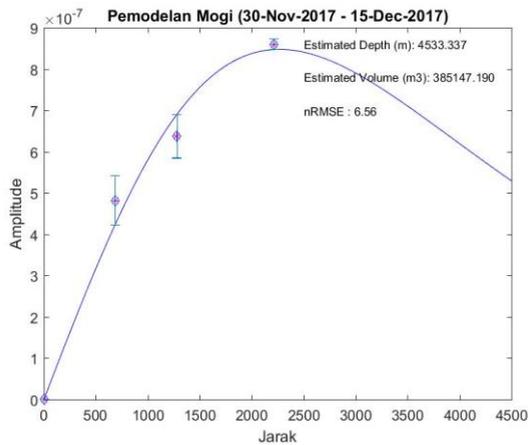
Gambar 4.12 Pemodelan Sumber Tekanan Periode 16 September – 1 Oktober 2017



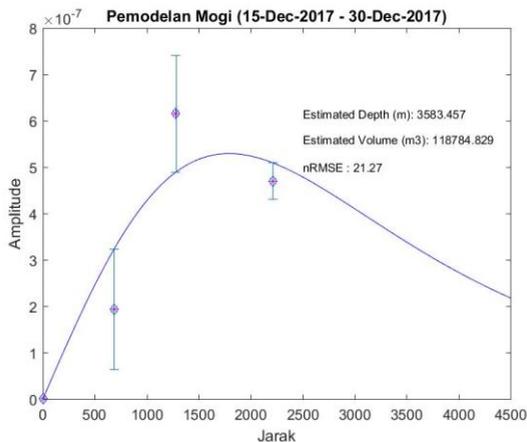
Gambar 4.13 Pemodelan Sumber Tekanan Periode 16 – 31 Oktober 2017



Gambar 4.14 Pemodelan Sumber Tekanan Periode 15 – 30 Nopember 2017



Gambar 4.15 Pemodelan Sumber Tekanan Periode 30 Nopember – 15 Desember 2017



Gambar 4.16 Pemodelan Sumber Tekanan Periode 15 – 30 Desember 2017

Dari hasil plot diatas, nilai kedalaman, volume, beserta RMSE yang telah dinormalisasi disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4.9 Hasil Pemodelan Sumber Tekanan

No.	Periode Pengamatan	Kedalaman (m)	Perubahan Volume (m^3)	nRMSE (%)
1.	1-16 September 2017	2579,282	60913.918	16,63
2.	16 September – 1 Oktober 2017	2042,450	39403,980	35,61
3.	16-31 Oktober 2017	3434,049	50691,096	26,89
4.	15-30 Nopember 2017	2456,148	23075,386	37,36
5.	30 Nopember – 15 Desember 2017	4533,337	385147,190	6,56
6.	15-30 Desember 2017	3583,457	118784,829	21,27

Pada tabel 4.9, nilai *error* disajikan dalam bentuk RMSE yang dinormalisasi. Penggunaan RMSE masih memberikan angka yang cukup susah dalam penggambaran *error* pemodelan sehingga normalisasi pada nilai RMSE bertujuan untuk mendapatkan angka dengan ukuran yang lebih kecil agar mempermudah dalam mengetahui seberapa besar *error* dalam pemodelan. Berdasarkan

hasil yang diperoleh pada tabel diatas, nilai kedalaman dan perubahan volume dari sumber tekanan Gunung Merapi bervariasi tiap periode pengamatan. Perubahan volume yang dimaksud adalah suplai magma yang berasal dari dapur magma. Dari hasil secara keseluruhan, sumber tekanan Gunung Merapi atau kantung magma berada pada kedalaman paling dangkal 2,042 km dan kedalaman paling besar adalah 4,533 km di bawah puncak kawah gunung. Sedangkan suplai magma sendiri cenderung variatif. Suplai magma terbesar adalah pada periode pengamatan 30 Nopember – 15 Desember 2017 dan perubahan volume terkecil adalah pada periode pengamatan 15-30 Nopember 2017. Ditinjau dari nilai *error* yang dihasilkan, *error* terbesar dihasilkan pada periode pengamatan 15-30 Nopember 2017. Estimasi *error* diperoleh dari nilai residual pada masing-masing stasiun terhadap model yang direpresentasikan dengan *errorbar*. Semakin besar nilai residual maka semakin besar pula *error* yang didapatkan.

Adapun nilai *error* yang tertera pada tabel 4.9 di atas adalah nilai *error* pada proses *fitting* antara data *observed* dengan model. Nilai *error* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor lain. Diantaranya adalah banyaknya data bacaan tiltmeter. Dalam *monitoring* ini data yang diperoleh tidak cukup banyak. Hal ini dapat diketahui dari adanya stasiun yang hanya memberikan data bacaan tiltmeter pada beberapa periode pertama dalam *monitoring* serta dari 7 stasiun pengamatan, hanya 4 stasiun saja yang digunakan. Kemudian pemberian filter pada data bacaan tiltmeter. Pemberian filter yang belum tepat memungkinkan data yang diolah masih terdapat *noise*. Selanjutnya adalah panjang vektor tiltmeter antar stasiun yang berbeda cukup besar. Hal ini menyebabkan terdapat data yang resisten terhadap *outlier* pada saat dilakukan proses pemodelan. Selain itu juga dapat disebabkan oleh pola radial yang terbentuk dari vektor tiltmeter. Dari data yang diperoleh dari

hasil pengolahan, pola radial cenderung ke arah yang acak atau tidak mengarah ke satu arah tertentu. Hal ini mengindikasikan tidak adanya pola dari deformasi serta tidak adanya perubahan aktivitas magma secara signifikan yang menunjukkan gejala gunungapi hendak erupsi.

Aktivitas vulkanik gunungapi dipengaruhi oleh suplai pada kantong magma. Pada dasarnya magma terbentuk dari batuan yang meleleh akibat tekanan dan temperatur tinggi di dalam perut Bumi. Suplai magma berkaitan dengan sistem tektonik berupa subduksi yang disebabkan oleh tumbukan antara lempeng Indo-Australia dengan lempeng benua Asia. Tekanan dan temperatur yang tinggi dapat menyebabkan magma yang terbentuk dapat naik hingga terkumpul pada suatu reservoir yang disebut kantong magma. Naiknya magma disebabkan oleh batuan di sekitarnya yang sudah tidak mampu menahan tekanan akibat magma yang terus menerus terbentuk. Jumlah magma yang naik ke reservoir menyebabkan terjadinya perubahan volume pada reservoir atau kantong magma tersebut. Batuan yang merekah akibat tidak mampu menahan tekanan ini kemudian menyebabkan deformasi pada tubuh gunungapi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Setelah dilakukan pemodelan tiap periode pengamatan, diperoleh hasil estimasi kedalaman sumber tekanan beserta perubahan volumenya berikut ini.
 - Pada periode pengamatan 1 – 16 September 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 2579,282 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 60913,918 m³.
 - Pada periode pengamatan 16 September – 1 Oktober 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 2042,450 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 39403,980 m³.
 - Pada periode pengamatan 16 – 31 Oktober 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 3434,049 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 50691,096 m³.
 - Pada periode pengamatan 15 – 30 Nopember 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 2456,148 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 23075,386 m³.
 - Pada periode pengamatan 30 Nopember – 15 Desember 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah 4533,337 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 385147,190 m³.
 - Pada periode pengamatan 15 – 30 Desember 2017, kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah

3583,457 m dan perubahan volumenya adalah sebesar 118784,829 m³.

Dari pemodelan yang telah dilakukan, Gunungapi Merapi tidak menunjukkan aktivitas yang signifikan.

2. Dari hasil tiap pemodelan, diperoleh nilai *error* tiap periode pengamatan sebagai berikut:

- Pada periode pengamatan 1 – 16 September 2017 diperoleh *error* sebesar 16,63%.
- Pada periode pengamatan 16 September – 1 Oktober 2017 diperoleh *error* sebesar 35,61%.
- Pada periode pengamatan 16 – 31 Oktober 2017 diperoleh *error* sebesar 26,89%.
- Pada periode pengamatan 15 – 30 Nopember 2017 diperoleh *error* sebesar 37,36%.
- Pada periode pengamatan 30 Nopember – 15 Desember 2017 diperoleh *error* sebesar 6,56%.
- Pada periode pengamatan 15 – 30 Desember 2017 diperoleh *error* sebesar 21,27%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diusulkan dalam kaitan penelitian lebih lanjut mengenai analisis kedalaman dan perubahan volume sumber tekanan Gunung Merapi adalah diperlukan periode *monitoring* yang lebih panjang dengan Tiltmeter sehingga diperoleh data yang lebih banyak. Data-data tambahan dapat ditambahkan untuk memperkaya analisis seperti data aktivitas kegempaan, GPS, *Thermal Cam*, maupun data lain yang dapat menunjang analisis. Serta perlu dilakukan pengujian antara deformasi hasil model dan hasil pengukuran dengan metode lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, E. M. 1936. *The Dynamics of The Formation of Cone-sheets, Ring-dykes, and Caldron Subsidence*. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh 56, 128–157.
- BPPTKG. ----. **Pemantauan**.
 <URL:<http://merapi.bgl.esdm.go.id/pub/page.php?idf=11>>.
- Carey, Rebecca et al. 2015. *Hawaiian Volcanoes From Source to Surface*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Dzurisin, Daniel. 2007. *Volcano Deformation Geodetic Monitoring Techniques*. Germany: Springer.
- McTigue, D. F. 1987. *Elastic Stress and Deformation Near A Finite Spherical Magma Body: Resolution of The Point Source Paradox*. Journal of Geophysical Research 92, 12,931–12,940.
- Mogi, K. 1958. *Relations Between The Eruptions of Various Volcanoes and The Deformations of The Ground Surfaces Around Them*. Bulletin of the Earthquake Research Institute of the University of Tokyo 36, 99–134.
- Nandaka, Agung IDM dkk. 2009. **Pemantauan Gunungapi di Indonesia**. Yogyakarta: Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi.
- Parfitt, Elizabeth A., and Wilson, Lionel. 2008. *Fundamentals of Physical Volcanology*. Australia: Blackwell.
- Ratdomopurbo A., Andreastuti, Supriyati D. 2000. **Karakteristik Gunung Merapi**. Yogyakarta: Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi.
- Scarpa, R. & Tilling, R.I. 1996. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Germany: Springer.
- Scarth, Alwyn. 1994. *Volcanoes An Introduction*. London: UCL Press.
- Segall, Paul. 2010. *Earthquake and Volcano Deformation*. United States: Princeton University Press.
- Sirgurdsson, Haraldur. 2009. *Volcanology*. University of Rhode Island.

- Weisstein, Eric W. 2018. *Nonlinear Least Squares Fitting*,
<URL:<http://mathworld.wolfram.com/NonlinearLeastSquaresFitting.html>>
- Zobin, V.M. 2003. *Introduction To Volcanic Seismology*.
Netherlands: Elsevier.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kediri, 15 Nopember 1996, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Avia Dharma Gedangan, SDN Percobaan Surabaya, SMPN 12 Surabaya, dan SMAN 15 Surabaya. Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Fisika FIA-ITS pada tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP 01111440000085.

Di Departemen Fisika ini penulis mengambil Bidang Studi Geofisika. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan kampus seperti Gerigi ITS, ITS Expo, Unit Kegiatan Mahasiswa Sinematografi (CLICK), Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMASIKA), Seksi Mahasiswa – Ikatan Ahli Geologi Indonesia (SM-IAGI), dan Karang Taruna. Penulis juga mengikuti beberapa kontes foto *online* internasional dan memperoleh penghargaan *Staff Winter Selection* pada kontes foto *Inspiring Shots* pada tahun 2016 dan *People Choice* pada kontes foto *Visual Poetry* pada tahun 2017.