ESTIMASI LOKASI SUMBER TEKANAN DAN VOLUME SUPLAI MAGMA GUNUNG MERAPI BERDASARKAN DATA TILTMETER MENGGUNAKAN MODEL MOGI

SKRIPSI

Oleh:
ALFITA SYIFAUL QOLBI
NIM. 17640022

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2021

ESTIMASI LOKASI SUMBER TEKANAN DAN VOLUME SUPLAI MAGMA GUNUNG MERAPI BERDASARKAN DATA TILTMETER MENGGUNAKAN MODEL MOGI

SKRIPSI

Diajukan kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Maulana Malik Ibrahim Malang
untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)

Oleh:
ALFITA SYIFAUL QOLBI
NIM. 17640022

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2021

HALAMAN PERSETUJUAN

ESTIMASI LOKASI SUMBER TEKANAN DAN VOLUME SUPLAI MAGMA GUNUNG MERAPI BERDASARKAN DATA TILTMETER MENGGUNAKAN MODEL MOGI

SKRIPSI

Oleh:
Alfita Syifaul Qolbi
NIM. 17640022

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada Tanggal, 24 November 2021

Pembimbing I	Pembimbing II
Drs. Abdul Basid, M.Si.	Dr. Erna Hastuti, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003	NIP. 19811119 200801 2 009

Menyetujui,
Ketua Jurusan Fisika

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

HALAMAN PENGESAHAN

ESTIMASI LOKASI SUMBER TEKANAN DAN VOLUME SUPLAI MAGMA GUNUNG MERAPI BERDASARKAN DATA TILTMETER MENGGUNAKAN MODEL MOGI

SKRIPSI

Oleh:
Alfita Syifaul Qolbi
NIM. 17640022

Telah Diperiksa di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima sebagai Salah Satu Persyaratan
untuk Memperoleh Gelar Sarjana (S.Si)
Tanggal: 22 Desember 2021

Ketua	:	Irjan, M.Si NIP. 19691231 200604 1 003	
Anggota I	:	Ahmad Luthfin, S.Si., M.Si NIP. 19860504 201903 1 009	
Anggota II	:	Drs. Abdul Basid, M.Si NIP. 19650504 199003 1 003	
Anggota III	:	Dr. Erna Hastuti, M.Si NIP. 19811119 200801 2 009	

Mengesahkan,
Ketua Jurusan Fisika

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

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama	: Alfita Syifaul Qolbi
NIM	: 17640022
Jurusan	: Fisika
Fakultas	: Sains dan Teknologi
Judul Skripsi	: Estimasi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Gunung Merapi Berdasarkan Data Tiltmeter Menggunakan Model Mogi

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan data, tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 17 Desember 2021
Yang membuat pernyataan,

Alfita Syifaul Qolbi
NIM. 17640022

MOTTO

Nothing happens without the permission of Allah,
strengthen prayer and keep the spirit.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT
Sholawat serta salam tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW

Skripsi ini saya persembahkan kepada:
Kedua orang tua dan keluarga besar saya yang selalu mendoakan, menyemangati dan memberikan segalanya untuk saya.

Dosen-dosen pembimbing dan penguji yang selalu memberikan bimbingan dan arahan untuk penyelesaian skripsi ini.

Teman-teman Geofisika dan Fisika'17 yang saling menguatkan, menyemangati, dan membantu satu sama lain sehingga saya bisa sampai tahap ini.

Partner saya, Deshinta Endah Fridayanti yang sejak pengajuan judul bahkan sejak awal kuliah susah senang bersama, sering membantu, saling kerja sama.

Teman-teman JDFI Da'watul Mukhlashin yang dengan sholawat dan candanya bisa jadi penghibur diri saya ketika lelah dan jenuh saat proses pengerjaan skripsi.

Dan terutama untuk diri saya sendiri yang selalu yakin, semangat dan mampu bertahan meskipun banyak cobaan dan rintangan.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah yang telah menciptakan alam semesta dalam suatu keteraturan hingga dari lisan terucap sejuta rasa syukur kehadirat Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga kami diberikan kesempatan dan kesehatan, dapat mengerjakan skripsi yang berjudul **Estimasi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Gunung Merapi Berdasarkan Data Tiltmeter Menggunakan Model Mogi** dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurah kepada baginda Nabi Muhammad SAW, yang diutus ke permukaan bumi ini untuk menyempurnakan akhlaq manusia, menuntun umat dari zaman jahiliyah menuju zaman yang penuh cahaya, yaitu al-Dinnul Islam. Penulis menyelesaikan skripsi yang berjudul **Estimasi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Gunung Merapi Berdasarkan Data Tiltmeter Menggunakan Model Mogi**sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Strata 1 Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.Dengan selesainya penulisan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Prof Dr. H. M. Zainuddin, M.A selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr.Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Imam Tazi, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Dosen Pembimbing yang selalu memberikan bimbingan, pengarahan, saran dan motivasi dalam penulisan skripsi.
5. Dr. Erna Hastuti, M.Si selaku Dosen Pembimbing Agama, yang bersedia meluangkan waktu memberikan bimbingan dan pengarahan bidang integrasi sains dan Al-Quran.
6. Segenap dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika Universitas Islam NegeriMaulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan pengarahan dan ilmu pengetahuan.

7. Dr. Dra. Hanik Humaida, M.Sc selaku Kepala BPPTKG yang telahmembantu dalam proses perizinan penelitian pada skripsi ini.
8. Nurnaning Aisyah, S.Si, P.hD. selaku pembimbing lapangan yang telah banyak membantu dalam proses pembelajaran dan penyelesaian skripsi ini.
9. Abah, mama, adik serta keluarga di rumah yangmendukung penuh serta tak pernah henti memberikan doademi kesuksesan penulis dalam segala hal, baik moral maupun materilnya.
10. Teman–teman Fisika angkatan 2017 yang senantiasa memberi semangat dan dukungan kepada penulis.
11. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dalam penulisanskripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini,penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dan kekeliruan. Untuk itu penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Demikian yang dapat penulis sampaikan, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi orang lain.

Malang, 26 November2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ii
HALAMAN PERSETUJUAN iii
HALAMAN PENGESAHAN iv
HALAMAN PERNYATAAN v
MOTTO vi
HALAMAN PERSEMBAHAN vii
KATA PENGANTAR viii
DAFTAR ISI x
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR TABEL xiii
DAFTAR LAMPIRAN xiv
ABSTRAK xv
ABSTRACT xvi
الملخص xvii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 8
1.3 Tujuan Penelitian 8
1.4 Batasan Masalah 9
1.5 Manfaat Penelitian 9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 10
2.1 Tinjauan Umum Gunung Merapi 10
2.2 Geologi Gunung Merapi 11
2.3 Sejarah Letusan Gunung Merapi 14
2.4 Sistem Pemantauan Gunung Merapi 17
2.5 Deformasi Gunungapi 18
2.6 Metode Pemantauan Gunungapi 22
2.7 Tiltmeter 23
2.8 Monitoring Deformasi dengan Tiltmeter 24
2.9 Sistem Telemetri 26
2.10 Kawah Gunungapi Sebagai Acuan Penentuan Pusat Tekanan 27
2.11 Kajian Penentuan Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma (Model Mogi) 27
2.12 Metode *Grid Search* 30
BAB III METODE PENELITIAN 32
3.1 Waktu dan Tempat 32
3.2 Jenis Data 33
3.3 Peralatan 34
3.4 Pengolahan Data 34
3.5 Analisis Data 35
3.6 Diagram Alir 36
BAB IV PEMBAHASAN 37
4.1 Analisis Deformasi Menggunakan Data Tilt 37
4.1.1 Data Seismisitas dan EDM sebagai Acuan Pembagian Periode 39
4.1.2 Analisis Deformasi Stasiun Grawah 41
4.1.3 Analisis Deformasi Stasiun Selokopo 43

4.1.4 Analisis Deformasi Stasiun Labuhan..... 44
4.1.5 Pembacaan Grafik Tiltmeter..... 45
4.2 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Model Mogi. 46
4.3 Estimasi Volume Suplai Magma..... 49
4.3 Gunungapi dalam Perspektif al-Quran dan Hadits..... 52
BAB V PENUTUP..... 58
5.1 Kesimpulan 58
5.2 Saran..... 58
DAFTAR PUSTAKA..... 59
LAMPIRAN..... 63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Lokasi Gunung Merapi 11
Gambar 2.2 Grafik Statistik Letusan Gunung Merapi Sejak Abad 18-20 16
Gambar 2.3 Gejala Deformasi pada Gunung Berapi Aktif 22
Gambar 2.4 Monitoring Gunungapi dengan Tiltmeter 24
Gambar 2.5 Urutan Inflasi ke Deflasi Berkaitan dengan Dinamika Magma dan Monitoring Tiltmeter dan GPS 26
Gambar 2.6 Model Mogi untuk Penentuan Sumber Tekanan Magma 28
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian 32
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian 36
Gambar 4.1 Arah Ungkitan dalam Kuadran 38
Gambar 4.2 Data Deformasi Menggunakan EDM 39
Gambar 4.3 Data Seismisitas Gunung Merapi 40
Gambar 4.4 Perubahan Ungkitan Komponen X (tangensial) dan Y (radial) Tahun 2020 pada Stasiun Grawah 41
Gambar 4.5 Perubahan Ungkitan Komponen X (tangensial) dan Y (radial) Tahun 2020 pada Stasiun Selokopo 43
Gambar 4.6 Perubahan Ungkitan Komponen X (tangensial) dan Y (radial) Tahun 2020 pada Stasiun Labuhan 44
Gambar 4.7 Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 1D 48
Gambar 4.8 Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 2D (a) Penampang Barat-Timur (b) Penampang Utara-Selatan 49

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Lokasi Stasiun Tiltmeter	33
Tabel 4.1	Perubahan Nilai Ungkitan Tiap Stasiun.....	45
Tabel 4.2	Parameter Metode *Grid Search* Model Mogi	46
Tabel 4.3	Hasil Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma	47
Tabel 4.4	Estimasi Volume Suplai Magma.....	50

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Penurunan Rumus Model Mogi..... 63
Lampiran 2 Script Matlab Model Mogi 64
Lampiran 3 Bukti Konsultasi Skripsi..... 67

ABSTRAK

Qolbi, Alfita Syifaul. 2021. **Estimasi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Gunung Merapi Berdasarkan Data Tiltmeter Menggunakan Model Mogi**. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang. Pembimbing: (I) Dr. Abdul Basid, M.Si. (II) Nurnaning Aisyah, S.Si, P.hD. (III) Erna Hastuti, M.Si.

Kata Kunci: Deformasi, Tiltmeter, Gunung Merapi, Sumber Tekanan, Volume, Mogi

Gunung Merapi merupakan salah satu gunungapi yang memiliki aktivitas vulkanisme tinggi. Untuk meminimalisir dampak erupsi Gunung Merapi diperlukan suatu kegiatan berupa monitoring aktivitas Gunung Merapi. Penelitian tentang estimasi lokasi sumber tekanan magma dan volume suplai magma Gunung Merapi periode 2020 ini dihitung berdasarkan analisis perubahan data tiltmeter dengan pendekatan kuantitatif model Mogi. Asumsi berdasarkan model yang digunakan adalah variasi data tilt yang terekam diakibatkan oleh perubahan tekanan hidrostatik di pusat sumber yang berbentuk *sperical* (bola) dalam medium homogen yang memiliki jari-jari, rigiditas dan *poisson ratio*. Data tilt diperoleh secara kontinu dari tiltmeter yang terpasang di stasiun Grawah, Selokopo, dan Labuhan. Deformasi paling besar terjadi di Stasiun Selokopo yaitu sebesar 20,5 μrad pada komponen X dan 40 μrad pada komponen Y. Stasiun Grawah yaitu 10 μrad pada komponen X dan 40 μrad pada komponen Y. Sedangkan deformasi paling kecil terjadi di Stasiun Labuhan yaitu sebesar -121 μrad pada komponen X dan -95 μrad pada komponen Y. Data bacaan tiltmeter atau data observasi yang berupa grafik diolah menggunakan excel dengan memasukkan parameter model Mogi. Kemudian dilakukan metode *grid search* untuk menentukan interval setiap model parameter. Apabila model respon (teoritikal) sesuai dengan data observasi, maka parameter model tersebut menunjukkan nilai parameter yang dicari. Hasil pemodelan menunjukkan lokasi sumber tekanan berada pada kedalaman 1600 - 2500 meter dari puncak dengan volume Suplai magma 8.743.136 Juta m^3.

ABSTRACT

Qolbi, Alfita Syifaul. 2021. **Estimation of the Location of the Pressure Source and the Volume of Mount Merapi's Magma Supply Based on Tiltmeter Data Using the Mogi Model.** Thesis. Physics Department. Faculty of Science and Technology. State Islamic University (UIN) of Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisor: (I) Dr. Abdul Basid, M.Si. (II) Nurnaning Aisyah, S.Si, P.hD. (III) Erna Hastuti, M.Si.

Keywords: Deformation, Tiltmeter, Mount Merapi, Pressure Source, Volume, Mogi

Mount Merapi is one of the volcanoes that has high volcanism activity. To minimize the impact of the eruption of Mount Merapi, an activity is needed in the form of monitoring the activity of Mount Merapi. This research on the estimation of the location of magma pressure sources and the volume of magma supply of Mount Merapi for the 2020 period is calculated based on the analysis of changes in tiltmeter data with a quantitative approach to the Mogi model. The assumption based on the model used is that the variation of recorded tilt data is caused by changes in hydrostatic pressure at the center of the source in the form of a spherical (spherical) in a homogeneous medium that has radius, rigidity and poisson ratio. Tilt data is obtained continuously from tiltmeters installed at Grawah, Selokopo, and Labuhan stations. The largest deformation occurred at Selokopo Station, which was 20.5 rad on component X and 40 rad on component Y. Grawah Station was 10 rad on component X and 40 rad on component Y. While the smallest deformation occurred at Labuhan Station, which was -121 rad on component X and -95 rad on component Y.Tiltmeter reading data or observation data in the form of graphs is processed using excel by entering Mogi model parameters. Then the grid search method is used to determine the interval for each model parameter. If the response model (theoretical) is in accordance with the observation data, then the model parameters indicate the value of the parameter being sought. The modeling results show the location of the pressure source is at a depth of 1600 - 2500 meters from the peak with a magma supply volume of 8,743,136 million m^3.

مستخلص البحث

ألفيتا شفاء القلبي. 2021. تقدير موقع المصدر الضغط وحجم إمداد الصهارة بجبل ميرابي بناءً على بيانات مقياس الميل باستخدام نموذج موجي. البحث الجامعي. قسم علم الفيزياء كلية العلوم والتكنولوجيا جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. لمشرف الأول: عبد البسيط الماجستير، المشريفة الثانية: نورأنينج عائشة، المشريفة الثالثة: إيرنا هاستوتي، الماجستير.

الكلمات المفتاحية: التشوية، مقياس الميل، جبل ميرابي، مصدر الضغط، الحجم، موجي.

جبل ميرابي هو أحد البراكين ذات النشاط البركاني العالي.لتقليل تأثير ثوران جبل ميرابي، هناك حاجة إلى نشاط في شكل مراقبة نشاط جبل ميرابي.تم حساب هذا البحث حول تقدير موقع مصادر ضغط الصهارة وحجم إمداد الصهارة لجبل ميرابي للفترة 2020 بناءً على تحليل التغييرات في بيانات مقياس الميل مع نهج كمي لنموذج موجي. الافتراض المستند إلى النموذج المستخدم هو أن تباين بيانات الإمالة المسجلة ناتج عن التغيرات في الضغط الهيدروستاتيكي في مركز المصدر في شكل كروي (كروي) في وسط متجانس له نصف قطر وصلابة ونسبة بواسون.يتم الحصول على بيانات الإمالة بشكل مستمر من أجهزة قياس الإمالة المثبتة في محطات جراواة وسلوكوبو ولابوهان. حدث أكبر تشوه في محطة سلوكوبو التي كانت 20.5أورادعلى المكونX و 40أورادعلى المكونY. كانت محطة جراواة 10 أورادعلى المكونXو 40 أوراد على المكونY.بينما حدث أصغر تشوه في محة لابوهان والتي كانت (-121) أورادعلى المكونXو(-90)أورادعلى المكونY.تتم معالجة بيانات قراءة مقياس الميل أو بيانات المراقبة في شكل رسوم بيانية باستخدام ايكسيل عن طريق إدخال معلمات نموذج موجي. ثم يتم استخدام طريقة البحث الشبكي لتحديد الفاصل الزمني لكل معلمة نموذج. إذا كان نموذج الاستجابة (النظري) متوافقًا مع بيانات المراقبة، فإن معلمات النموذج تشير إلى قيمة المعلمة التي يتم البحث عنها. تظهر نتائج النمذجة موقع مصدر الضغط على عمق 1600-2500 متر من الذروة مع حجم إمداد الصهارة 8743136 مليون متر مكعب.

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara geografis, Indonesia merupakan negara yang terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik. Indonesia juga termasuk wilayah yang dilalui jalur *ring of fire* (cincin api dunia). *Ring of Fire* merupakan daerah berbentuk seperti tapal kuda yang mengelilingi Samudera Pasifik dengan panjang 40.000 km. Sekitar 90% gempa bumi terjadi di daerah ini dan 81% gempa bumi terbesar terjadi di sepanjang Cincin Api tersebut sehingga sering terjadi gempa bumi dan letusan gunung berapi. Indonesia memiliki banyak gunungapi yang tersebar dari Pulau Sumatera hingga Papua. Gunungapi tersebut terbentuk akibat adanya zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia (Sambodo, 2012).

Pulau Jawa memiliki beberapa Gunungapi yang masih aktif, salah satunya adalah Gunung Merapi yang terletak di perbatasan empat kabupaten, yaitu Kabupaten Sleman (Provinsi DI Yogyakarta), Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali dan Kabupaten Klaten (Provinsi Jawa Tengah). Posisi geografisnya terletak pada 7°32'30"-7°52'30" LS dan 110°15'00"-110°37'30"BT dan memiliki ketinggian 2900 m di atas permukaan laut. Berdasarkan tatanan tektoniknya, Gunung Merapi terletak pada zona subduksi, dimana lempeng Indo-Australia menunjam di bawah lempeng Eurasia yang mengontrol vulkanisme di Sumatra, Jawa, Bali dan Nusa Tenggara. Gunung Merapi muncul di bagian Selatan dari jajaran gunungapi di Jawa Tengah mulai dari utara ke selatan yaitu Gunung Ungaran, Gunung Telomoyo, Gunung Merbabu dan Gunung Merapi dengan arah N165°E. Kelurusan ini merupakan sebuah patahan yang berhubungan dengan

retakan akibat tektonik yang mendahului vulkanisme di Jawa Tengah. Aktivitas vulkanisme ini bergeser dari arah utara ke selatan, sehingga Gunung Merapi merupakan gunungapi yang paling muda (Kiswiranti & Kirbani, 2013).

Letusan gunungapi merupakan suatu fenomena alam yang tak bisa dikendalikan oleh manusia. Gunungapi yang meletus menimbulkan kerusakan, baik secara materil maupun jiwa manusia yang tinggal di daerah sekitar gunungapi. Usaha yang dilakukan dalam penanggulangan bencana letusan gunungapi adalah dengan memantau aktivitas gunungapi secara terus menerus, sehingga jika gunungapi mengalami peningkatan aktivitas magma, maka pihak yang berwenang akan mengeluarkan peringatan atau bahkan waspada.Letusan-letusan Merapi yang dampaknya besar salah satunya pada tahun 1006 yang membuat seluruh bagian tengah Pulau Jawa diselubungi abu. Letusan tersebut diduga mengakibatkan Kerajaan Mataran Kuno harus berpindah ke Provinsi Jawa Timur.

Sains menunjukkan bahwa 80 persen bumi adalah air dan magma yang panas. Lapisan padat atau lapisan teratas bumi bagaikan lempengan tipis yang terapung diatas lapisan magma. Sehingga, lempeng ini akan selalu bergerak dan mengalami berbagai tekanan.Allah SWT berfirman dalam surah an-Naml (27) ayat 88:

وَتَرَى ٱلْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً وَهِيَ تَمُرُّ مَرَّ ٱلسَّحَابِ صُنْعَ ٱللَّهِ ٱلَّذِيٓ أَتْقَنَ كُلَّ شَيْءٍ إِنَّهُ خَبِيرٌ بِمَا تَفْعَلُونَ﴿٨٨﴾

"*Dan kamu lihat gunung-gunung itu, kamu sangka dia tetap ditempatnya, padahal ia berjalan sebagai jalannya awan.(Begitulah) perbuatan Allah yang membuat dengan kokoh tiap-tiap sesuatu; Sesungguhnya Allah Maha Mengetahui apa yang kamu kerjakan*" (An-Naml [27]: 88).

Menurut tafsir Ibnu Katsir, Firman Allah Ta'ala (وَتَرَى ٱلْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً وَهِيَ تَمُرُّ مَرَّ ٱلسَّحَابِ) "*Dan kamu lihat gunung-gunung itu, kamu sangka dia tetap*

ditempatnya, padahal ia berjalan sebagai jalannya awan." yaitu engkau lihat dia seakan-akan tetap tidak bergerak seperti apa adanya, padahal dia berjalan seperti gerakan awan, yaitu bergerak dari tempat-tempatnya. (صُنْعَ ٱللَّهِ ٱلَّذِيٓ أَتْقَنَ كُلَّ شَيْءٍ) "*(Begitulah) perbuatan Allah yang membuatdengan kokoh tiap-tiap sesuatu,*" yaitu Dia melakukan itu dengan ketetapan-Nya yang besar dan meletakkan hikmah-hikmah di dalamnya. (Abdullah, 2007).

Allah SWT menyampaikan firman-Nya sebagai petunjuk dengan kata kiasan yang memiliki makna luas. Menurut tafsir al-Maraghy kata (تمر) digunakan dalam artian goncangan dan bergetar, sedang langit tetap pada tempatnya. (المر) pada asalnya berarti bolak-balik, pulang pergi dan kadang diartikan berjalan. Dalam tafsir al-Maraghy dijelaskan bahwa Kamu lihat gunung-gunung seakan-akan ia tetap kokoh pada keadannya, padahal ia lepas dari tempatnya dan berjalan-jalan seperti awan (Mushthafa, 1989).

Berdasarkan tafsir, ayat di atas menjelaskan bahwa gunung-gunung memang tidak diam di tempat, tetapi berjalan seperti awan. Karena kita bersama-sama dengan gunung-gunung berada di atas lempeng bumi dan adanya pengaruh gaya gravitasi menyebabkan kita sulit merasakan dan menggerakkannya. Awan tidak bergerak sendiri, namun digerakkan oleh angin. Seperti halnya lempeng samudera dan benua yang bergerak karena adanya aliran konveksi magma di bawah lapisan litosfer bumi.

Saat ini Gunung Merapi terbilang masih sangat berbahaya karena Gunung Merapi sering mengalami erupsi baik itu letusan kecil maupun letusan besar. Bahkan menurut Laporan Kebencanaan Geologi Kementerian ESDMpada tahun 2020Gunung Merapi mengalami erupsi sebanyak 6 kali.Letusan pertama terjadi

pada tanggal 13 Februari 2020 pukul 05:43:00 WIB. Asap kawah berwarna putih dengan intensitas tipis hingga tebal dengan ketinggian sekitar 100-400 m dari puncak. Suhu udara mencapai 15-32°C.Melalui rekaman seismograf tercatat1 kali gempa letusan/ erupsi dan 17 kali gempa guguran. Abu vulkanik teramati sekitar 2000 m di atas puncak.

Letusan kedua terjadi pada tanggal 3 Maret 2020 pukul 17:27:00 WIB. Teramati asap kawah utama berwarna putih dengan intensitas tebal tinggi sekitar 25 m dari puncak.Suhu udara sekitar 15-29.1°C. Kelembaban 22-88%. Tekanan udara 627.5-709.6 mmHg.Melalui rekaman seismograf tercatat1 kali gempa letusan dan 16 kali gempa guguran.

Letusan ketiga terjadi pada tanggal 28 Maret 2020pukul 05:21:00 WIB dengan tinggi kolom abu 2000 m dari puncak dan pukul 19:25:00 WIB dengan tinggi kolom abu 3000 m dari puncak. Pada tanggal 29 Maret 2020 pukul 00:15:00 WIB juga terjadi letusan dengan tinggi kolom abu 1500 m dari puncak condong ke arah barat. Teramati asap kawah utama berwarna putih dengan intensitas tebal tinggi sekitar 200-400 m dari puncak. Melalui rekaman seismograf pada tanggal 28 Maret 2020 tercatat 3 kali gempa letusan dan 6 kali gempa guguran dan pada tanggal 29 Maret 2020 tercatat 1 kali gempa letusan dan 1 kali gempa guguran.

Letusan keempat terjadi pada tanggal 2 April 2020 pukul 15:10:00 WIB. Teramati asap kawah utama berwarna putih dengan intensitas tipis hingga tebal tinggi sekitar 50-600 m dari puncak. Melalui rekaman seismograf tercatat 1 kali gempa letusan dan 7 kali gempa guguran. Abu vulkanik teramati dengan ketinggian sekitar 3000 m di atas puncak.

Letusan kelima terjadi pada tanggal 10 April 2020 pada pukul 09:10:00 WIB. Teramati asap kawah utama berwarna putih dengan intensitas tipis tinggi sekitar 10 m dari puncak. Tercatat di seismogram terjadi 1 kali gempa letusan dengan amplitude 75 mm durasi 103 detik, teramati tinggi kolom 3000 m dari puncak,arah angin barat laut.

Letusan terakhir terjadi pada tanggal 21 Juni 2020 dengan tinggi kolom erupsi 3000 m di atas puncak.Teramati asap kawah utama berwarna putih dengan intensitas sedang hingga tebal tinggi sekitar 50-6000 m dari puncak. Pada pukul 09:13:00 WIB terjadi erupsi dengan kolom abu setinggi ± 6000 m di atas puncak. Kolom abu teramati berwarna kelabu dengan intensitas tebal ke arah barat. Erupsi ini terekam di seismograf dengan amplitudo maksimum 75 mm dan durasi 328 detik.Pukul 09:27:00 WIB terjadi erupsi susulan, tetapi visual letusan tidak teramati.Melalui rekaman seismograf tercatat 2 kali gempa letusan/erupsi dan 1 kali gempa guguran.

Sejak tanggal 5 November 2020 pukul 12:00:00 WIB status Gunung Merapi masuk pada tingkat aktivitas Level III (Siaga) sejak. Gunungapi Merapi mengalami erupsi tidak menerus. Asap kawah berwarna putih, intensitas tebal, tinggi 50 m di atas puncak. Suhu udara sekitar 14-30,2°C. Suara guguran terdengar dari Babadan pkl.5.30 WIB. Melalui rekaman seismograf pada 5 November 2020 tercatat55 kali gempa Guguran.

Upaya mitigasi bencana perlu dilakukan dalam rangka mengurangi bahaya ataupun kerugian yang disebabkan oleh letusan Gunung Merapi. Upaya tersebut dapat dilakukan dengan adanya pemantauan secara kontinu terhadap aktivitas Gunung Merapi baik secara visual, geokimia, seismik, deformasi atau yang

lainnya. Pemantauan deformasi dan seismisitas merupakan metode yang telah diaplikasikan hampir di semua gunungapi di Indonesia karena fenomena letusan gunungapi yang sulit dideteksi secara alami tanpa adanya pemantauan atau indikasi ilmiah. Fenomena letusan gunungapi memiliki sebuah gejala yang biasa disebut dengan deformasi. Deformasi merupakan suatu fenomena dimana objek-objek alamiah maupun buatan manusia mengalami perubahan bentuk dari kondisi awalnya, biasanya terjadi perubahan posisi yang dapat berupa kenaikan permukaan tanah/inflasi ataupun penurunan permukaan tanah/deflasi (Abidin, 2007).

Deformasi dapat memberikan informasi terkait perubahan bentuk permukaan tubuh gunungapi terkait dengan kegiatan vulkanik terutama disebabkan oleh perubahan tekanan yang terjadi dalam kantong magma dan migrasi magma. Pemantauan deformasi salah satunya dilakukan dengan menggunakan tiltmeter. Tiltmeter adalah alat ukur deformasi gunungapi berupa kemiringan sudut tubuh gunungapi dengan satuan radian dan berupa pengembungan (inflasi) atau pengempisan (deflasi) tubuh gunung. Data tilt merupakan salah satu informasi untuk mengetahui mekanisme fisis di dalam tubuh Merapi seperti pasokan (*magma supply*) volume magma dan kedalaman sumber tekanan. Kajian mengenai sumber tekanan dan volume suplai magma dapat membantu memahami karakteristik mekanisme internal yang diharapkan dapat membantu dalam prediksi terjadinya erupsi dan mitigasi bencana gunungapi (Kusumastuti, 2014).

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan model Mogi (1958) merupakan salah satu model yang dapat digunakan untuk penentuan lokasi pusat

tekanan dan perubahan volume dengan mengasumsikan sumber tekanan sebagai bola. Berdasarkan hasil analisis deformasi yang diolah dapat dijadikan sebagai salah satu parameter dalam penentuan lokasi pusat tekanan dan volume suplai magma Gunung Merapi dan mengasumsikan kawah aktif sebagai lokasi pusat tekanan secara grafis. Pada prinsipnya model Mogi akan menghasilkan data model deformasi permukaan dari input data deformasi hasil ukuran, jarak titik pantau dengan lokasi pusat tekanan (kawah), kedalaman dan perubahan volume pusat tekanan.

Penelitian terkait volume suplai magma dan perkiraan lokasi sumber tekanan melalui metode deformasi di Gunung Merapi pernah dilakukan oleh Beauducel dan Cornet dengan menggunakan alat GPS dan tiltmeter. Diplacement rata-rata yang diukur oleh GPS pada enam titik pengamatan adalah 6,5 cm. Perubahan sudut kemiringan yang terukur oleh tiltmeter komponen tangensial adalah 11,1±0,7 μrad dan 0,9±0,4 μrad untuk komponen radial. Penentuan sumber tekanan dan volume suplai magma dilakukan dengan menggunakan model Mogi dan *horizontal ellips*. Sumber tekanan diperkirakan sekitar 8,5±0,4 km di bawah puncak Gunung Merapi dan sekitar 2±0,4 km ke timur dari Merapi dengan volume sebesar 11±2 juta m^3. Kemudian penelitian serupa juga dilakukan oleh Aisyah et al. (2018) dengan menggunakan data EDM periode 2006 dan 2010.

Aktivitas Gunung Merapi membawa dampak positif dan dampak negatif. Untuk mengurangi dampak negatif yang diakibatkan oleh Gunung Merapi, diperlukan pemantauan aktivitas gunungapi sebagai langkah awal dalam mitigasi bencana alam.Pemantauan deformasi untuk gunungapi penting dilakukan agar dapat mengetahui karakteristik mechanism internalsuatugunungapi.Perubahan

permukaan gunung dijadikan sebagai indikator dalam memperkirakan terjadinya erupsi. Pemantauantersebutdiharapkan dapat membantu dalam penyusunan langkah mitigasi bencana gunungapi sebagai upaya untuk meminimalisir korban jiwa maupun kerugian material.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka perumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana deformasi aktivitas vulkanik Gunung Merapi berdasarkan data Tiltmeter tahun 2020?
2. Dimana lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi berdasarkan Model Mogi?
3. Berapa volume suplai magma Gunung Merapi sebelum dan sesudah erupsi tahun 2020?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui deformasi aktivitas vulkanik Gunung Merapi berdasarkan data Tiltmeter tahun 2020.
2. Untuk mengetahui lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi berdasarkan Model Mogi.
3. Untuk mengetahui volume suplai magma Gunung Merapisebelum dan sesudah erupsi pada tahun 2020.

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka penelitian ini memiliki batasan masalah, diantaranya:

1. Data yang digunakan tahun 2020 dari Stasiun Grawah pada koordinat -7,5216 LS dan 110,4515 BT dengan ketinggian 2045 mdpl,Stasiun Selokopo pada koordinat -7,5299 LS dan 110,4499 BT dengan ketinggian 2363 mdpl dan Stasiun Labuhan pada koordinat -7,557 LS dan 110,445 BT dengan ketinggian 1730 mdpl.
2. Perhitungan lokasi sumber tekanandan volume suplai magma menggunakanModel Mogi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Bagi masyarakat, penelitian ini berguna untuk informasi mengenai aktivitas vulkanik yang terjadi di Gunung Merapi dalam upaya mitigasi bencana.
2. Bagi mahasiswa, penelitian ini dapat digunakan sebagai sumber informasi yang dapat digunakan sebagai referensi penelitian selanjutnya mengenai lokasi sumber tekanan dan volume suplai magma berdasarkan data Tiltmeter pada GunungMerapi.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum Gunung Merapi

Gunung Merapi merupakan gunung termuda dalam rangkaian gunung berapi yang mengarah ke selatan dari Gunung Ungaran. Gunung Merapi terbentuk karena aktivitas di zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke bawah Lempeng Eurasia menyebabkan munculnya aktivitas vulkanik di sepanjang bagian tengah Pulau Jawa. Saat ini puncaknya tidak ditumbuhi vegetasi karena aktivitas vulkanik yang tinggi. Puncak ini tumbuh di sisi barat daya puncak Gunung Batulawang yang lebih tua (Purnomo, 2014).

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

1. Tahap Pra Merapi (lebih dari 400.000 tahun yang lalu).

   Disebut sebagai Gunung Bibi dengan magma andesit-basaltik berumur ±700.000 tahun terletak di lereng timur Merapi termasuk Kabupaten Boyolali.

2. Tahap Merapi Tua (60.000-8000 tahun yang lalu).

   Pada masa ini mulai lahir sebagai Gunung Merapi yang merupakan fase awal dari pembentukannya dengan kerucut belum sempurna.

3. Tahap Merapi Pertengahan (8000-2000 tahun yang lalu).

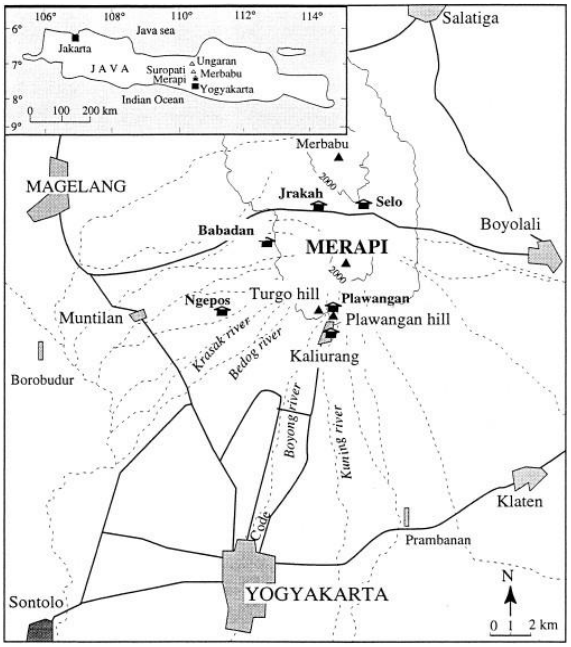
   Terjadi beberapa lelehan lava andesitik yang menyusun Bukit Batulawang dan Gajahmungkur, yang saat ini nampak di lereng utara Merapi.

4. Tahap Merapi Baru (2000 tahun yang lalu sampai sekarang).

   Pada kawah Pasarbubar terbentuk kerucut puncak Merapi yang saat ini disebut sebagai Gunung Anyar dan menjadi pusat aktivitas Merapi.

2.2 Geologi Gunung Merapi

Gunung Merapi termasuk salah satu gunungapi aktif di Indonesia. Gunung Merapi memiliki tinggi 2978 m, diameter 28 km, luas 615,44 km^2 dan volume 612,57 km^2. Secara geografis, Gunung Merapi berada pada koordinat 07° 32'30"-07°52'30" LS dan 110°15'00"- 110°37'30" BT. Secara administratif, Gunung Merapi berbatasan dengan empat kabupaten, yaitu Kabupaten Sleman yang berada di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali, dan Kabupaten Klaten yang berada di Provinsi Jawa Tengah. Aktivitas Gunung Merapi diperkirakan telah berlangsung sejak 50.000 tahun yang lalu dengan kecepatan rata-rata material yang dikeluarkan dari dalam bumi sebesar 1.000.000 m^3/tahun (Berthomier, 1990).



Gambar 2.1 Peta Lokasi Gunung Merapi

Secara tektonik, Gunung Merapi adalah bagian dari sistem subduksi Sumatera, Jawa, Bali, dan Lombok. Sistem subduksi tersebut merupakan batas aktif lempeng yang menghasilkan magma basalt andesit dan gempa yang relatif

intensif. Magma andesit akan menghasilkan gas yang besar sehingga letusan eksplosif dapat terjadi. Gunung Merapi termasuk dalam gunungapi tipe strato yang mempunyai kekentalan magma tinggi yang berpengaruh terhadap bentukan suatu gunungapi. Gunung Merapi terbentuk disebabkan karena leburnya sebagian kerak samudra Hindia akibat terjadinya tumbukan antara lempeng Eurasia-Asia dan lempeng Hindia Australia di selatan pulau Jawa. Kerak Hindia Australia yang lebur itu kemudian terdorong ke atas dan dierupsikan melalui gunung ini. Magma yang memasok kegiatan Gunung Merapi adalah akibat dari proses peleburan yang berlangsung sejak periode Plio-plestosen sekitar dua juta tahun yang lalu (Hamilton, 1979).

Gunung berapi adalah salah satu objek yang diciptakan melalui proses pergeseran lempeng bumi dengan fungsi yang sangat vital dalam menjaga kesetimbangan alam, bukan entitas objek yang berdiri sendiri. Sebagaimana Allah SWT berfirman dalam surat an-Nahl ayat 16:

وَأَلْقَىٰ فِى ٱلْأَرْضِ رَوَٰسِىَ أَن تَمِيدَ بِكُمْ وَأَنْهَٰرًا وَسُبُلًا لَّعَلَّكُمْ تَهْتَدُونَ ﴿١٥﴾

"Dan Dia mencampakkan gunung-gunung di bumi supaya bumi itu tidak goncang bersama kamu, (dan Dia menciptakan) sungai-sungai dan jalan-jalan agar kamu mendapat petunjuk,"(Q.S.an-Nahl 16:15)

Menurut tafsir al-Mishbah, kata (ألقى) *alqa/mencampakkan di bumi* yakni melempar ke arahnya, memberi kesan bahwa kehadiran gunung, sungai, dan jalan-jalan, terjadi sesudah penciptaan bumi, dan karena itu ayat ini tidak menggunakan kata *menciptakan gunung-gunung*. Boleh jadi pencampakan yang dimaksud adalah terjadinya benturan yang besar, atau gempa yang dahsyat, yang mengakibatkan lahirnya gunung-gunung dan sungai-sungai. Kata (رواسى) *rawasi* terambil dari kata (الرسو) *ar-rasw* atau *ar-rusuwwu* yakni kemantapan pada suatu tempat. Dari sini gunung-gunung, karena ia kekar, ditunjuk dengan kata *rawasi*

(Shihab, 2002). Kemudian menurut Ibnu Katsir, Allah Ta'ala menyebutkan bumi dan apa yang ada di dalamnya berupa gunung-gunung yang tinggi dan kokoh agar bumi tenang dan tidak goncang dengan apa yang ada di atasnya berupa binatang-binatang. Karena kalau bumi goncang, binatang-binatang itu tidak nyaman hidupnya (Abdullah, 2007)

Nash al-Qur'an pada surat an-Nahl di atas sangat bersesuaian dengan fakta ilmiah yang dikaji oleh pakar-pakar vulkanologi. Bumi bukanlah materi padatan solid yang bersifat statis seperti sebongkah batu yang melayang di luar angkasa. Namun bumi terdiri dari banyak lapisan astenosfer dari inti bumi hingga kerak bumi. Kerak bumi sendiri terdiri dari lempeng-lempeng benua dan lempeng-lempeng samudra yang saling bertindihan dan terus bergerak secara dinamis.

Pertemuan antar lempeng inilah yang akhirnya membentuk deretan gunung berapi. Gunung berapi sendiri berfungsi sebagai penjaga stabilitas energi panas bumi yang ditimbulkan oleh gesekan antar lempeng. Panas bumi ini disalurkan secara periodik melalui rongga-rongga aliran magma yang bermuara di kawah. Jika tidak ada lubang saluran ini, maka panas bumi tersebut bisa meletup sewaktu-waktu dan menimbulkan kerusakan yang lebih hebat dari erupsi gunung berapi. Dalam bahasa al-Qur'an, Allah menggunakan kalimat (أَن تَمِيدَ بِكُمْ) "*agar bumi itu tidak goncang bersama kamu*" yang menunjukkan bahwa ada potensi béncana yang lebih besar seandainya tidak diciptakan gunung yang berfungsi sebagai penjaga stabilitasnya.

Secara fisiografis, Gunung Merapi berada di zona Depresi Tengah (Bammelen,1949). Menurut para ahli, gunung ini muncul pada titik pertemuan antara dua deretan gunungapi yaitu Ungaran-Telemoyo-Merbabu-Merapi dan

Lawu-Merapi-Sumbing-Sundoro-Slamet. Merapi juga terletak pada pertemuan antara sesar Semarang (membujur utara-selatan) dan sekitar Solo (membujur barat-timur) (Kusumayudha, 1988).

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

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

2.3 Sejarah Letusan Gunung Merapi

Secara tertulis, sejarah letusan Gunung Merapi mulai tercatat sejak awal masa Kolonial Belanda sekitar abad ke-17. Letusan sebelumnya tidak tercatat dengan jelas. Sedangkan letusan-letusan besar yang terjadi saat masa sebelum periode Merapi Baru hanya didasarkan pada penentuan waktu relatif. Secara umum, sejarah letusan Gunung Merapi dirangkum sebagai berikut (ESDM, 2014):

1. Periode 3000-250 Tahun yang Lalu

Pada periode 3000-250 tahun yang lalu, tercatat kurang lebih 33 kali letusan, dengan 7 diantaranya adalah letusan besar. Data tersebut menunjukkan bahwa letusan besar terjadi sekali dalam 150-500 tahun (Andreastuti et al., 2000).

2. Periode Merapi Baru

Pada periode Merapi Baru, telah terjadi beberapa kali letusan besar yaitu pada abad ke-19 (tahun 1768, 1822, 1849, 1872) dan abad ke-20 yaitu 1930-1931. Erupsi pada abad ke-19 jauh lebih besar dari letusan abad ke-20, dengan awan panas mencapai 20 km dari puncak. Kemungkinan letusan besar terjadi satu kali dalam 100 tahun (Newhall et al., 2000).

3. Pada Abad ke-20

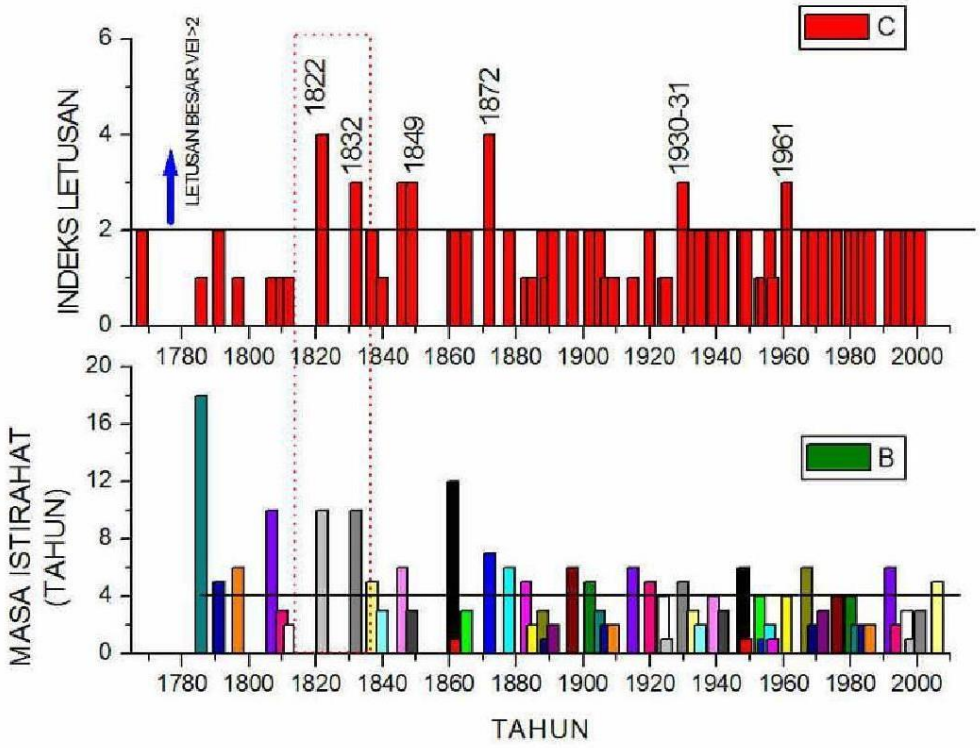
Aktivitas Merapi pada abad ke-20 terjadi minimal 28 kali letusan dan letusan paling besar terjadi pada tahun 1931. Sudah 3/4 abad tidak terjadi letusan besar.

4. Erupsi Tahun 2006

Erupsi tahun 2006, mengakibatkan perubahan arah letusan dari Barat Daya ke Tenggara dengan membentuk bukaan kawah yang mengarah ke Kali Gendol.

5. Erupsi Tahun 2010

Erupsi tahun 2010, sehari sebelum terjadinya letusan pada tanggal 26 Oktober 2010 tingkat seismisitas Gunung Merapi meningkat dengan 588 gempa *multiphase,* 80 gempa vulkanik, 194 gempa guguran dengan laju deformasi 42 cm perhari. Pada tanggal 26 Oktober 2010 terjadi letusan pertama yang bersifat eksplosif disertai dengan awan panas dan dentuman menghasilkan material hasil letusan 150 m^3.



Gambar 2.2 Grafik Statistik Letusan Gunung Merapi Sejak Abad 18-20 (ESDM, 2014)

Berdasarkan data yang tercatat sejak tahun 1600-an, Gunung Merapi meletus lebih dari 80 kali atau rata-rata meletus satu kali dalam 4 tahun. Kisaran masa istirahatnya antara 1-18 tahun. Artinya, masa istirahat terpanjang yang tercatat ialah 18 tahun. Secara umum, letusan Merapi pada abad ke-18 dan abad ke-19 masa istirahatnya relatif lebih panjang, sedangkan indeks letusannya lebih besar. Akan tetapi tidak bisa dikatakan bahwa masa istirahat yang panjang menentukan letusan yang akan datang menjadi relatif besar. Hal tersebut karena berdasarkan faktabeberapa letusan besar, masa istirahatnya pendek. Namun sebaliknya, pada saat mengalami istirahat panjang, letusan berikutnya ternyata kecil. Tidak menutup kemungkinan juga bahwa periode panjang letusan pada abad ke-18 dan abad ke-19 disebabkan banyak letusan kecil yang tidak tercatat dengan

baik, karena memang kondisi saat itu. Jadi, besar kecilnya letusan lebih tergantung pada sifat kimia dan sifat fisika magma. Deskripsi singkat letusan Gunung Merapi disajikan pada Gambar 2.2 di bawah ini. Gambar di bawah ini menunjukkan grafik letusan Gunung Merapi sejak abad ke-18. Pada abad ke-18 dan ke-19, letusan Gunung Merapi umumnya relatif besar dibandingkan letusan pada abad ke-20, sedangkan masa istirahatnya lebih panjang (ESDM, 2014).

2.4 Sistem Pemantauan Gunung Merapi

Gunung Merapi dan gunungapi lainnya pada umumnya akan memberikan tanda sebelum meletus. Tanda-tanda tersebut dipantau pada lokasi stasiun yang tersebar di berbagai lokasi di sekitar gunungapi tersebut. Beberapa cara Pemantauan di Gunung Merapi yaitu sebagai berikut (BPPTKG, 2016):

1. Pemantauan Visual

   Pemantauan visual yaitu dengan melihat langsung beberapa tanda-tanda yang terjadi di sekitar gunungapi. Tanda-tanda yang terjadi antara lain perubahan morfologi kubah lava, perubahan warna asap, suara seperti guruh atau guntur. Peralatan yang digunakan untuk pemantauan visual yaitu kamera CCTV yang selama 24 jam. Pengamatan visual paling penting yaitu perubahan morfologi kubah lava. Pengamatan tersebut penting karena akan memberikan informasi arah longsoran kubah lava dan besar volume yang akan diluncurkan ke bawah.

2. Pemantauan Deformasi dengan EDM

   Mengembang atau mengempisnya tubuh gunung dapat diamati dengan menggunakan *Electronic Distance Measurement* (EDM). Deformasi akan mengubah jarak antara reflektor dan alat yang didirikan secara tetap pada suatu

pos pantau. Secara umum cara kerja EDM yaitu suatu gelombang elektronik yang telah diketahui frekuensinya dipancarkan ke pemantul atau reflektor, dan dipantulkan kembali ke pemancar.

3. Deformasi dengan Tiltmeter

Salah satu cara untuk mengetahui perubahan deformasi adalah dengan menggunakan tiltmeter. Tiltmeter digunakan untuk memantau perubahan kemiringan dari sebuah tubuh gunungapi. Pada Gunung Merapi, tiltmeter diukur secara terus menerus dari puncak dengan radio telemetri.

4. Pemantauan dengan GPS

Global Positioning System (GPS) merupakan sistem navigasi berbasiskan satelit yang saling berhubungan yang berda di orbitnya. Pada Gunung Merapi, pengamatan dilakukan sejak tahun 1993 atas kerjasama Indonesia - Prancis dilakukan survey GPS di lereng dan puncak Merapi secara regular setiap tahun.

5. Pemantauan Kimia Gas

Gunungapi yang memiliki kantong magma dangkal seperti Merapi akan mengeluarkan gas vulkanik melalui rekahan-rekahan di permukaannya. Sulfur Dioksida (SO_2) merupakan salah satu komposisi gas utama gunungapi yang mempunai suhu solfatara tinggi. Pemantauan kimia gas dilakukan secara terus menerus dari jarak yang aman dan diukur dengan *Correlation Spectrophotometer* (COSPEC) untuk mendeteksi intersitas ultraviolet yang berkorelasi dengan kandungan gas SO_2 di dalam asap solfatara. Kenaikan konsentrasi SO_2 dapat berarti adanya kenaikan magma yang melepas gas tersebut atau semakin terbukanya lubang kepundan.

6. Pemantauan Seismik

Aktivitas gempa bumi di bawah gunungapi selalu meningkat sebelum terjadinya erupsi karena magma dan gas gunungapi yang mendorong ke permukaan melalui rekahan dan lorong-lorong. Saat magma dan gas vulkanik berpindah, menyebabkan retakan hingga pecahnya batuan. Retakan ataupun pecahnya batuan ini merupakan sumber getaran. Ketika batu pecah pada frekuensi tinggi, gempa bumi akan timbul. Aktivitas seismik tersebut dapat dipantau dengan menggunakan seismometer, alat yang dapat mendeteksi gerakan tanah yang disebabkan oleh beberapa fenomena, termasuk angin, *volcanic explotion*, longsoran, lahar, dan gempa bumi.

2.5 Deformasi Gunungapi

Deformasi adalah perubahan bentuk, perubahan posisi, dan perubahan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Deformasi merupakan perubahan kedudukan, pergerakan secara absolut atau relatif dari posisi suatu materi atau perubahan kedudukan yang berada dalam dimensi linier. Perubahan yang terjadi umumnya disebabkan oleh gaya berat atau beban yang terjadi pada objek tersebut. Sumber beban atau gaya yang bekerja ini bisa berasal dari luar maupun dari dalam objek. Pergerakan atau perubahan posisi yang terjadi dapat ditinjau dari dua sisi, yaitu absolut (ditinjau dari titik pada objek itu sendiri) dan relatif (ditinjau dari titik lain).

Deformasi gunungapi merupakan perubahan bentuk gunungapi yang biasa dinyatakan dalam dimensi mikron sampai dengan meter. Deformasi gunungapi terjadi karena aktivitas vulkanik berupa pergerakan magma di bawah permukaan yang mempengaruhi perubahan tekanan pada kantong magma. Akibatnya, volume

permukaannya berubah sehingga menyebabkan tubuh gunungapi juga berubah. Deformasi dari tubuh gunungapi dapat berupa kenaikan permukaan tanah (inflasi) atau penurunan permukaan tanah (deflasi) (Sari, 2007).

Gejala deformasi gunungapi menyebabkan pergeseran posisi suatu titik tubuh gunungapi. Pergeseran posisi tersebut terjadi baik dari arah horisontal maupun arah vertikal. Menurut Van der Laat, R. (1997)dalam Sari (2007), nilai pergeseran ini bisa mencapai puluhan meter pada gunungapi silisik yang membentuk kubah lava. Beberapa kemungkinan yang menyebabkan deformasi gunungapi antara lain:

1. Aktivitas Vulkanik

   Magma memiliki tekanan yang tinggi sehingga cenderung keluar ke permukaan. Tekanan yang besar menyebabkan adanya deformasi di permukaan. Deformasi diterapkan untuk melihat 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

   Dapat dipastikan ada banyak zona sesar di bumi, karena hal ini adalah suatu

   gejala pelenturan kerak bumi yang akan menyebabkan pergeseran benua atau lempeng. Jika rekahan pada batuan mengalami pergeseran, maka terjadi transisi antara bagian-bagian yang saling berhubungan dengan arah sejajar dengan bidang patahan, dan gejala ini disebut sesar. Pergerakan sesar tersebut dapat menyebabkan terjadinya pergeseran di permukaan tanah (Asikin, 1979).

3. Kestabilan Lereng

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

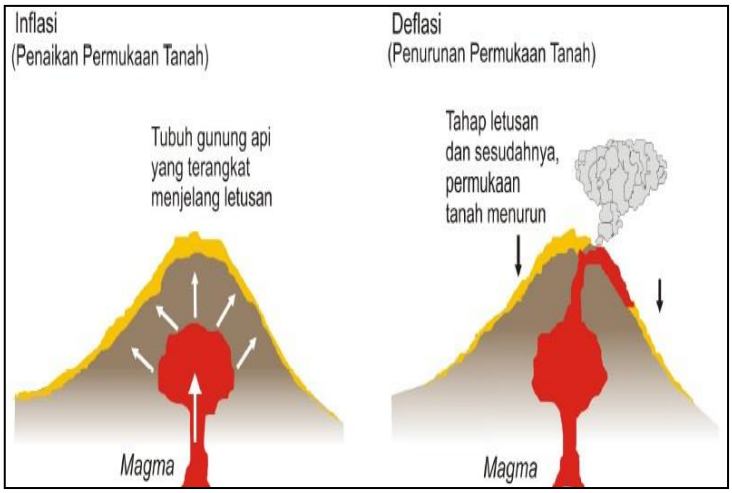
Deformasi permukaan tanahterjadi karena adanya perubahan tekanan magma atau intrusi magma. Umumnya, deformasi dinyatakan dengan pergeseran *(displacement)* arah horizontal, arah vertikal, danungkitan(*tilting*). Di daerah gunungapi sering terjadi perubahan topografi karena adanya aliran lava atau erupsi. Beda halnya dengan aktivitas magma di dalam kantong magma yang tidak menghasilkan tambahan material di permukaan, perubahan ini dapat berupa tambahan material. Akibat dari aktivitas magma ini adalah deformasi. Pada prinsipnya, deformasi dari tubuh gunungapi berupa inflasi dan deflasi (Jamel, 2012):

1. Inflasi

Merupakan pengangkatan permukaan tanah yang umumnya terjadi karena proses pergerakan magma ke permukaan yang menekan permukaan tanah di atasnya. Inflasi disebabkan oleh magma yang bergerak naik ke permukaan gunung berapi. Inflasi sering dijadikan tandaakan terjadinya erupsi pada gunung berapi.

2. Deflasi

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



Gambar 2.3 Gejala Deformasi pada Gunung Berapi Aktif
(Abidin, 2002)

2.6 Metode Pemantauan Deformasi

Metode pemantauan deformasi diaplikasikan dengan berbagai macam sistem dan sensor. Metode pemantauan deformasi umumnya menggunakan data terestris (Bahlefi, 2013). Metode pemantauan deformasi ini pada dasarnya akan mendapatkan pola dan kecepatan dari gerakan tubuh gunungapi, baik dalam arah horizontal maupun vertikal. Menurut (McGuire, 1995) dalam Bahlevi (2013), data dan informasi deformasi permukaan tersebut dapat digunakan untuk mengungkapkan beberapa hal tentang karakteristik dari aktivitas magmatik gunungapi yang bersangkutan, seperti perubahan dari fluks magma (untuk kantong magma yang bersifat tetap), lokasi, bentuk, dan perkembangan kantong magma baru yang terbentuk karena proses intrusi.

Berdasarkan metode implikasinya, pemantauan deformasi gunungapi dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu (Abidin, 2007):

1. Metode Episodik

   Pada metode ini, pemantauan dilakukan secara episodik dalam selang waktu

tertentu. Pemantauan deformasi episodik 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*).

2. Metode Kontinu

Umumnya, pemantauan deformasi secara kontinu memerlukan sistem pengiriman datamelalui transmisi gelombang elektromagnetik. Defomasi kontinudapat menggunakan sensor tiltmeter, ekstensiometer, dan dilatometer yang karakterısasi deformasinya bersifat sangat lokal.

2.7 Tiltmeter

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

Kemiringan didefinisikan sebagai kemiringan ke arah vertikal atau horizontal, dan dapat didefinisikan sebagai vektor 2-D yang diselesaikan menjadi komponen (ω_x, ω_y). Kemiringan komponen diberikan oleh (Lisowski, M., 2007):

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

Dengan:

ω_x : Nilai ungkitan *(tilt)* komponen horizontal (rad)

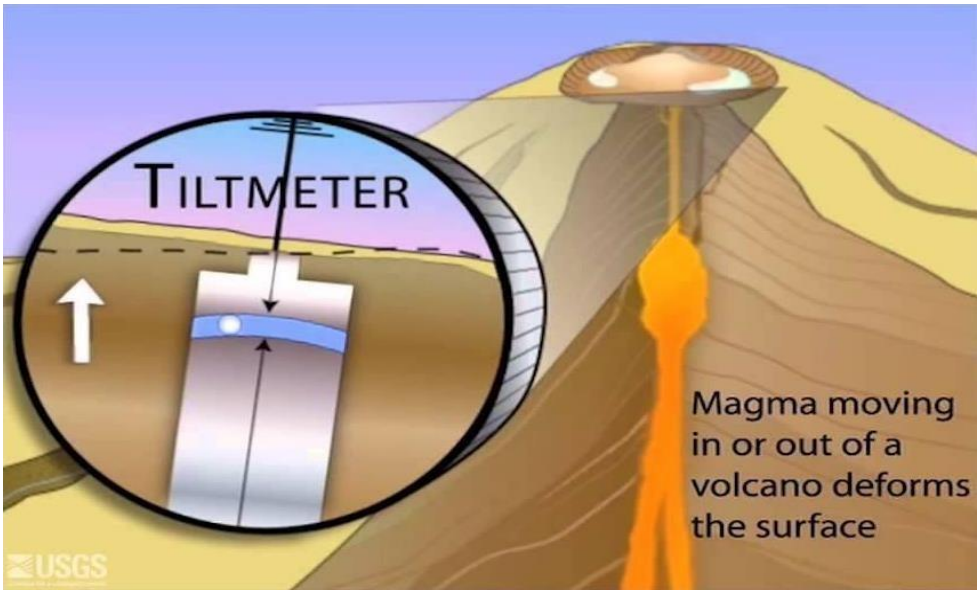
ω_y : Nilai ungkitan *(tilt)* komponen vertikal (rad)

$(\partial w/\partial x)$: Fungsi koordinat vertikal

$(\partial w/\partial y)$: Fungsi koordinat horizontal

2.8 Monitoring Deformasi dengan Tiltmeter

Tiltmeter ialah alat pengukur deformasi gunung yang berfungsi untuk mendeteksi pengembungan atau pengempisan tubuh gunung. Tiltmeter juga digunakan untuk mengukur kemiringan pada suatu struktur yang ada di permukaan. Alat ini dapat dipakai untuk memonitoring pergerakan magma pada gunungapi yang dapat mengakibatkan deformasi di permukaan akibat desakan magma seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.4 (Hartanto, 2017).



Gambar 2.4 Monitoring Gunungapi dengan Tiltmeter (USGS, 2013)

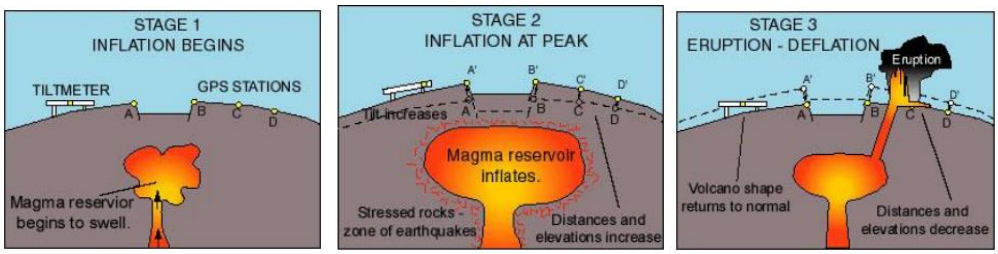
Secara maksimal, alat ini digunakan 1 pasang yang terletak saling berseberangan pada kawah. Hal ini membuat perbedaan posisi antar tilmeter dapat dihitung dengan akurat. Pengiriman data yang dilakukan oleh tiltmeter yaitu dengan menggunakan radio pancar yang terhubung dengan pos pengamatan gunungapi terdekat. Sehingga data tiltmeter dapat dimonitor secara berkala pada pos pengamatan gunungapi yang ada (Hartanto, 2017).

Struktur yang perlu dilakukan untuk pengukuran dengan metode tiltmeter adalah struktur yang secara visual yang telah menunjukkan adanya perubahan posisi secara horizontal atau vertikal agar dapat diketahui intensitas gerakannya. Seperti kasus pada sebuah gunung berapi, para ilmuwan biasanyaakan memasang tiltmeter di banyak titik, mulai dari kaki gunung hingga daratan-daratan tertinggi yang diperkirakan sebagai jalur aliran lava (Hartanto, 2017).

Permukaan gunungapiakan berubah bentuk atau terjadi deformasi sebagai respons terhadap naiknya magma di bawah permukaan menuju ke puncak. Perubahan bentuk permukaan biasanya berupa kenaikan, penurunan, kemiringan lereng atau pengembangan dan pengempisan seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Tiltmeter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur perubahan sudut lokasi dimana alat itu diletakkan. Perubahan sudut terjadi bila tekanan magma mendorong tubuh gunung dan karena sifat elastisitas batuan akan mengembang atau mengempis bila tekanan berkurang. Jadi tiltmeter dapat digunakan sebagai acuan apabila ada perubahan aktivitas magma yang ditandai dengan adanya perubahan sudut yang menyebabkan deformasi (Hartanto, 2017).

Pada monitoring gunungapi, sensor tiltmeter dipasang di puncak gunungapi dan data dikirim secara telemetri online menggunakan gelombang radio ke

kantorpusat (BPPTKG). Data lapangan dikonversi ke dalam satuan sudut (radian) dan digambarkan secara otomatis dalam grafik. Tiltmeter sangat peka terhadap pengaruh lokal kondisi puncak yang penuh dengan asap solfatara, perubahan suhu siang dan malam yang sering menyebabkan gangguan transmisi (Hartanto, 2017).



Gambar 2.5 Urutan Inflasi ke Deflasi Berkaitan dengan Dinamika Magma dan Monitoring Tiltmeter dan GPS (Hartanto, 2017)

2.9 Sistem Telemetri

Telemetri merupakan suatu teknik pengukuran dan pengamatan terhadap objek dan jarak yang sangat jauh. Signal informasi ditransformasikan ke bentuk lain yang dituangkan ke media transmisi. Hasil transformasi tersebut diubah kembali kedalam bentuk signal aslinya. Menurut media transmisinya, system telemetri dibagi menjadi:

1. Sistem Telemetri Menggunakan Kabel

   Pengiriman informasi disampaikan kepada penerima melalui suatu kabel atau kawat penghantar dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Bagian penerima membutuhkan *transdusser* lain untuk mengubah signal elektronis kembali ke bentuk asal mulanya. Pada bagian ini harus ada alat penguat signal yang berupa *amplifier* untuk menguatkan signal elektronis sampai batas tertentu.

2. Sistem Telemetri Gelombang Radio

   Pengiriman informasi disampaikan dari suatu unit instrument pengirim

(*transmitter*) yang ditempatkan dilapangan untuk pengirim signal. Signal dikirim dengan kecepatan cahaya, sedangkan penerima menentukan *receiver*.

2.10 Kawah Gunungapi Sebagai Acuan Penentuan Pusat Tekanan

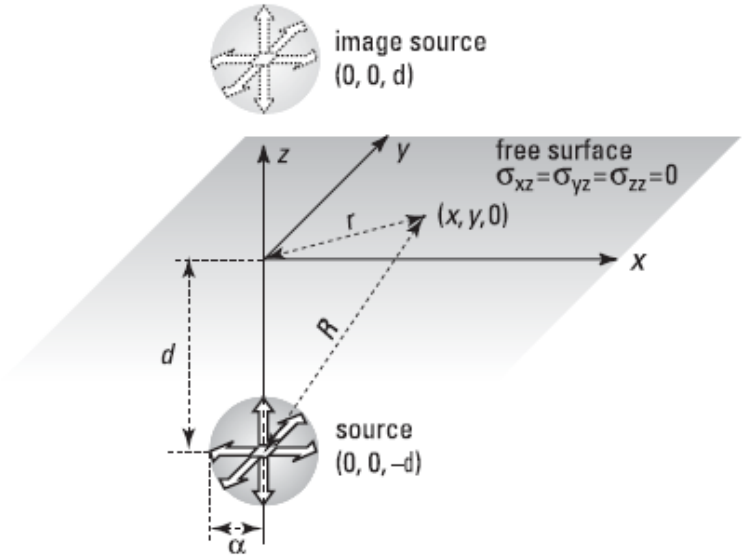
Kawah merupakan salah satu bagian yang terdapat pada suatu gunungapi yang berupa suatu curam. Umumnya berbentuk lingkaran yang dibentuk oleh letusan atau runtuhan yang terjadi pada suatu gunungapi. Kawah terletak pada puncak suatu gunungapi dan pada suatu gunungapi tidak menutup kemungkinan terdapat beberapa kawah.

Menurut (Dzurisin, 2007) model sederhana dari siklus letusan dari suatu gunungapi mencakup dua elemen utama yaitu dapur magma yang memberikan tekanan dari bawah dan kawah yang memberikan kesempatan untuk magma keluar ke permukaan. (Mogi, 1958) mengasumsikan bahwa pusat tekanan berada di bawah kawah yang merupakan suatu celah terbuka dan memiliki akses terhadap sumber magma.

2.11 Kajian Penentuan Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma (Model Mogi)

Pada sebagian besar gunungapi yang ada di dunia, data-data deformasi memberikan nilai yang penting dalam aspek-aspek umum untuk menentukan prediksi letusan yang akan terjadi selanjutnya. Seorang ilmuwan Jepang bernama Kiyoo Mogi, yang melalui publikasinya pada tahun 1958 menandai awalera modern pada studi deformasi gunung berapi. Lewat model yang dikembangkannya *(Mogi's model)*, deformasi yang diamati dapat terjadi di permukaan merupakan hasil dan adanya peningkatan tekanan *(pressure)* dari

sebuah sumber kecil, *spherical* (bola) di dalam ruangan elastik tak berhingga yang berbentuk setengah ruang *(half space)* seperti ilustrasi pada Gambar 2.6 di bawah.



Gambar 2.6Model Mogi untuk Penentuan Sumber Tekanan Magma
(Lisowski, 2007 dalam Dzurisin, 2007)

Volume inflasi maupun deflasi yang terukur di suatu permukaan sangat berkaitan dengan suplai atau berkurangnya volume magma dalam suatu kantong atau dapur magma. Menurut perkembangannya, beberapa peneliti memodifikasi geometri sumber tekanan seperti geometri bola, *ellipse* dalam sistem yang tertutup maupun terbuka (Lisowski, 2007 dalam Dzurisin, 2007).

Deformasi yang terjadi pada suatu permukaan dapat diamati melalui perubahan posisi akibat perubahan tekanan hidrostatik (ΔP) pada suatu sumber tekanan. Pendekatan terkait karakteristik sumber tekanan dapat dilakukan dengan menyederhanakan geometri sumber tekanan. Mogi (1958) mengemukakan suatu model untuk menjelaskan deformasi akibat penubahan tekanan hidrostatik (ΔP) pada suatu sumber tekanan. Geometri sumber tekanan dianggap berbentuk bola *(spher)* dengan jari-jari α, dimana $\alpha << d$, dan d adalah kedalaman sumber tekanan.

Sumber tekanan diasumsikan berada dalam medium homogen dan elastis dengan parameter elastisitas *G* (rigiditas). Perubalan tekanan hidrostatik (Δ*P*) yang menyebabkan deformasi terekam sebagai perubahan sudut ungkitan yang dipasang pada jarak *r* terhadap titik pengamatan dalam komponen radial *(ω_x)* dan tangensial*(ω_y)*, dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{pmatrix}\omega_x\\ \omega_y\end{pmatrix}_{z=0} = \begin{pmatrix}-\frac{\partial w}{\partial x}\\ -\frac{\partial w}{\partial y}\end{pmatrix} \tag{2.2}$$

$$w = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G}\left(\frac{d}{R^3}\right) \tag{2.3}$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2} \tag{2.4}$$

$$y = y_s - y_c \tag{2.5}$$

$$x = x_s - x_c \tag{2.6}$$

$$\begin{pmatrix}\omega_x\\ \omega_y\end{pmatrix} = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G}\begin{pmatrix}\frac{-3dx}{R^5}\\ \frac{-3dy}{R^5}\end{pmatrix} \tag{2.7}$$

Dengan:

ω_x	:	Nilai ungkitan *(tilt)* komponen horizontal (rad)
ω_y	:	Nilai ungkitan *(tilt)* komponen vertikal (rad)
α	:	Jari-jari pusat tekanan (m)
ΔP	:	Perubahan tekanan di kantung magma (Pa)
v	:	*Poisson's ratio*
G	:	Rigiditas medium (Pa)
x_s,y_s	:	Posisi bujur dan lintang stasiun pengamatan (m)
x_c,y_c	:	Posisi bujur dan lintang sumber tekanan (m)
d	:	Kedalaman sumber tekanan (m)
dx,dy	:	Jarak horizontal dan vertikal posisi stasiun (m)

R : Jarak antara stasiun pengamatan dengan pusat sumber tekanan(m)

Tilt tidak berdimensi dan biasanya diberikan dalam satuan μradian (ppm). Volume suplai magma (ΔV_{magma}) gunungapi yang terjadi akibat deformasi dapat diperkirakan berdasarkan persamaan berikut ini (Lisowski, 2007 dalam Dzurisin, 2007:

$$\Delta V_{cavity} = \frac{\Delta P}{G}\pi\alpha^3 \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta V_{cavity}}{\Delta V_{magma}} = \frac{2(1-v)}{\left\{1+\frac{4\mu}{3k^*}\right\}} \quad (2.9)$$

$$\Delta V_{magma} = \frac{\Delta V_{cavity}}{2(1-v)}\left\{1+\frac{4\mu}{3k^*}\right\} \quad (2.10)$$

Dengan:

ΔV_{cavity} : Perubahan volume saluran (m^3)

ΔV_{magma} : Volume suplai magma (m^3)

v : *Poisson's ratio*

G : Rigiditas medium (Pa)

k^* : Modulus bulk magma di reservoir (Pa)

μ : Modulus geser batuan induk (Pa)

ΔP : Perubahan tekanan di kantung magma (Pa)

α : Jari-jari pusat tekanan (m)

2.12 Metode *Grid Search*

Salah satu cara untuk memperoleh solusi inversi non-linier menggunakan pendekatan global adalah dengan mengembangkan harga fungsi objektif untuk setiap model pada ruang modelsecara sistematik *(systematic search)*. Pada metode

ini, terlebih dahulu ruang model didefinisikan dengan menentukan interval atau batas minimum dan maksimum harga setiap parameter model yang mungkin. Kemudian dilakukan diskretisasi pada interval tersebut sehingga diperoleh *grid* yang meliputi semua ruang model yang telah didefinisikan, Pada metode pencarian, setiap *grid* merepresentasikan satu sampel model yang harus dihitung responsnya untuk memperoleh harga fungsi objektif yang berasosiasi dengan model tersebut. Oleh karena itu, teknik pencarian sistematik seperti ini sering juga disebut dengan teknik *grid search.*Informasi mengenai harga fungsi objektif untuk semua *grid* pada ruang model dapat digunakan untuk menentukan solusi, yaitu model dengan harga fungsi obyektif minimum (Grandis, 2009).

Metode *Grid Search* adalah salah satu metode yang digunakan dalam melakukan prediksi sumber tekanan magma.Nilai kuadrat selisih pergeseran teoritis dan observasi dinotasikan dengan R_{min}^2,yang dalam persamaan 2.7dilakukan dengan memberikan variasi nilai radius sumber tekanan *(α),* perubahan tekanan *(ΔP)* dan lokasi sumber *(x_c. y_c, d)* sampai nilai $R_{min}total$ terkecil (Wismaya et al, 2016):

$$R_{min}Sta_{1,\dots,n}=\sqrt{(w_{xobs}Sta_{1,\dots,n}-w_{yobs}Sta_{1,\dots,n})^2+(w_{xteo}Sta_{1,\dots,n}-(w_{yteo}Sta_{1,\dots,n})^2} \quad (2.11)$$

$$R_{min}total = \sqrt{(Rmin^2Sta_1)+(Rmin^2Sta_{\dots})+(Rmin^2Sta_3)} \quad (2.12)$$

Dengan:

$R_{min}Sta_{1,\dots,n}$: Residual minimum antara pergeseran horizontal observasi dan teoritikal pada masing-masing stasiun (μrad)

$w_{x\,obs}$, $w_{y\,obs}$: Data ungkitan observasi pada komponen x,y (μrad)

$w_{x\,teo}$, $w_{y\,teo}$: Data ungkitan teoritikal pada komponen x,y (μrad)

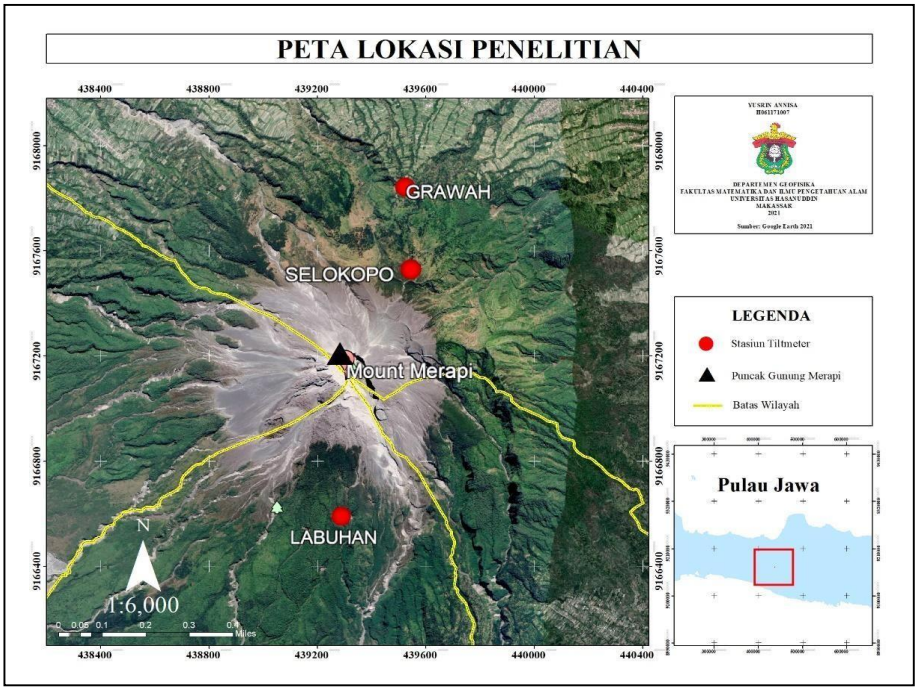
$R_{min}total$: Residual minimum dari seluruh stasiun (μrad)

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di kantor BPPTKG (Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi), yang letaknya di Jl. Cendana No.15, Semaki, Kecamatan Umbulharjo, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta mulai bulan April 2021 sampai Juni 2021.

Gunung Merapi adalah lokasi yang akan diteliti, yang mana secara geografis terletak pada koordinat 7°32'28,11" LS dan 110°26'46,04" BT. Secara administratif, Gunung Merapi terletak pada perbatasan empat kabupaten yaitu Kabupaten Sleman (Provinsi DI Yogyakarta), Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali dan Kabupaten Klaten (Provinsi Jawa Tengah) dengan ketinggian 2900 m dari permukaan laut.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

Pemantauan deformasi Gunung Merapi menggunakan 3 titik stasiun tiltmeter dengan rincian pada Tabel 3.1 dibawah ini:

Tabel 3.1 Lokasi Stasiun Tiltmeter (BPPTKG, 2016)

Nama Stasiun	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Lokasi
Grawah	110,4515	-7,5216	2045	Boyolali, Jawa Tengah
Selokopo	110,4499	-7,5299	2363	Boyolali, Jawa Tengah
Labuhan	110,445	-7,557	1730	Sleman, DIY

3.2 Jenis Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah data sekunder hasil rekaman tiltmeter Gunung Merapi tahun 2020 yang terekam dengan hasil rekaman berupa *tilt* radial, *tilt* tangensial, dan suhu yang sudah terkonversi dalam satuan mikroradian dan (℃). Posisi geografis alat tiltmeter di Stasiun Grawah yaitu pada koordinat -7,5216 LS dan 110,4515 BT dengan ketinggian 2045 mdpl,Stasiun Selokopo pada koordinat -7,5299 LS dan 110,4499 BT dengan ketinggian 2363 mdpl dan Stasiun Labuhan pada koordinat -7,557 LS dan 110,445 BT dengan ketinggian 1730 mdpl. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif, dimana data-data yang ada diolah dan kemudian dijelaskan sesuai dengan literatur yang ada.

3.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Laptop
2. Data deformasi menggunakan Tiltmeter tahun 2020.
3. *Software*Ms-Word dan Ms-Excel
4. *Matlab R2014a*
5. *Google Earth Pro*
6. *Software* Origin Pro 9

3.4 Pengolahan Data

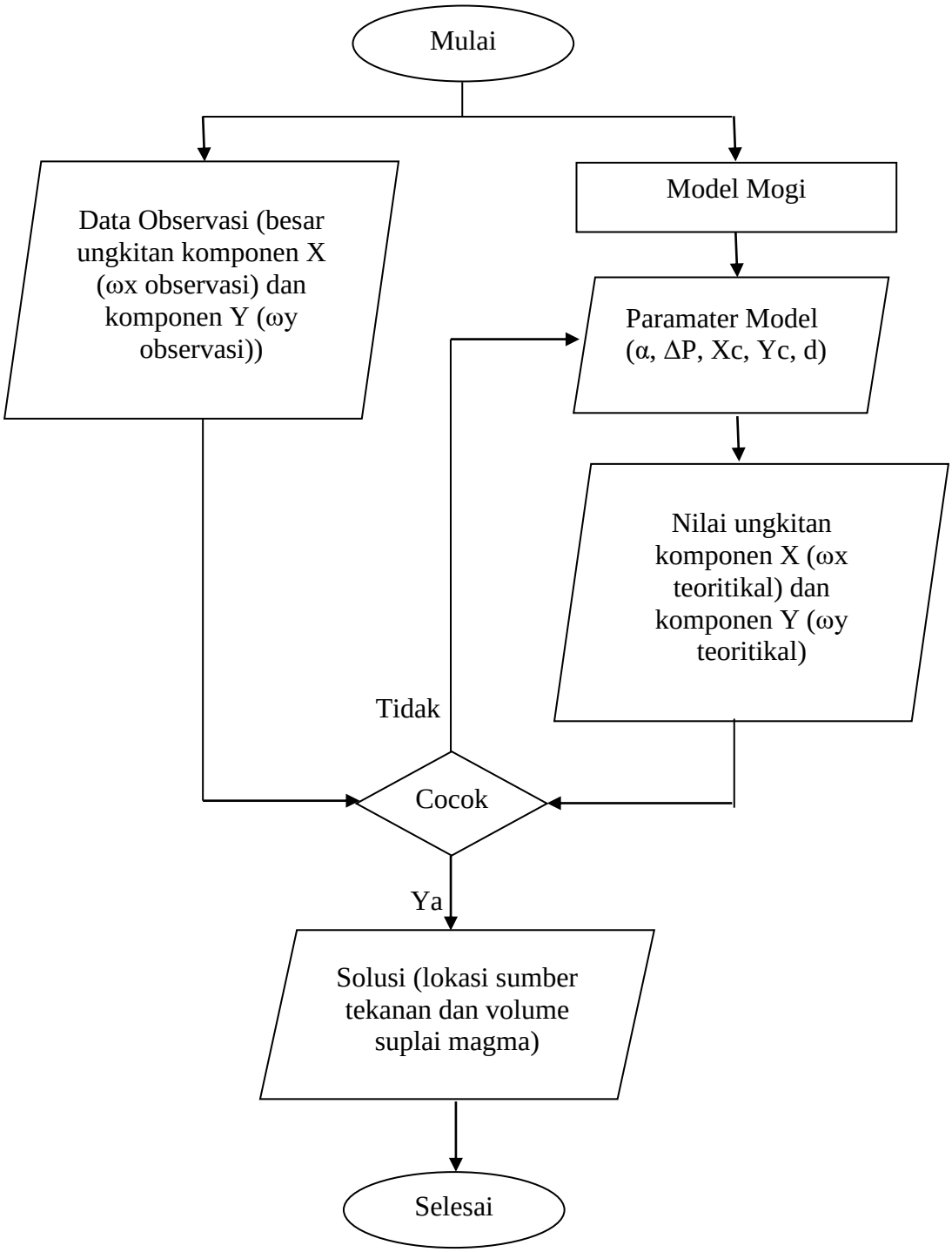
Data tiltmeter yang diperoleh dari BPPTKG digunakan untuk mengetahui besar deformasi setiap periode dari setiap pengamatan. Kemudian dilakukan perhitungan prediksi lokasi sumber tekanan dan volume suplai magma secara teoritis menggunakan Model Mogi (Persamaan 2.7). Pada tahap ini akan diberikan nilai untuk setiap model parameter *(a, ΔP, Xc, Yc, d).* Metode *grid search* (Persamaan 2.12) digunakan untuk menentukan interval (batas minimum dan maksimum) setiap model parameter. Kemudian membandingkan data observasi dengan data teoritikal berdasarkan masukan parameter model hingga keduanya cocok. Apabila model respon (teoritikal) sesuai dengan pengamatan dapat mengetahui bahwa parameter model tersebut menunjukkan nilai parameter yang dicari. Jika data dari model tidak sesuai maka pemodelan harus diulang dengan mengganti model parameter nilai/*range* hingga didapat kecocokan antara model respons (teoritikal) dan pengamatan. Setelah diperoleh nilai tiap parameter model, selanjutnya dapat diestimasikan lokasi sumber tekanan dan volume suplai magma (Persamaan 2.10) tiap periode pengamatan.

3.5 Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Analisa kualitatif dilakukan dengan melihat pola perubahan data *tilt* (mikroradian) terhadap suhu disekitar Gunung Merapi sebagai hasil observasi dan juga untuk mengetahui karakteristik data tilt yang dihasilkan dengan trend grafik.

Sedangkan analisa kuantitatif diperoleh berdasarkan hasil perhitungan dengan model Mogi dan Ms. Excel berdasarkan referensi. Hasil perhitungan berupa nilai pergeseran dari model Mogi dibandingkan dengan hasil pergeseran dari pengukuran tiltmeter. Apabila nilai hasil observasi dengan nilai hasil model sama atau mendekati maka dapat diasumsikan bahwa parameter model menunjukkan nilai yang dicari. Namun, jika respon model tidak menunjukkan kecocokan dengan hasil observasi maka harus dilakukan pengulangan pengolahan data dengan mengganti parameter model sehingga menghasilkan kecocokan pada kedua nilai.

3.6 Diagram Alir



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV
PEMBAHASAN

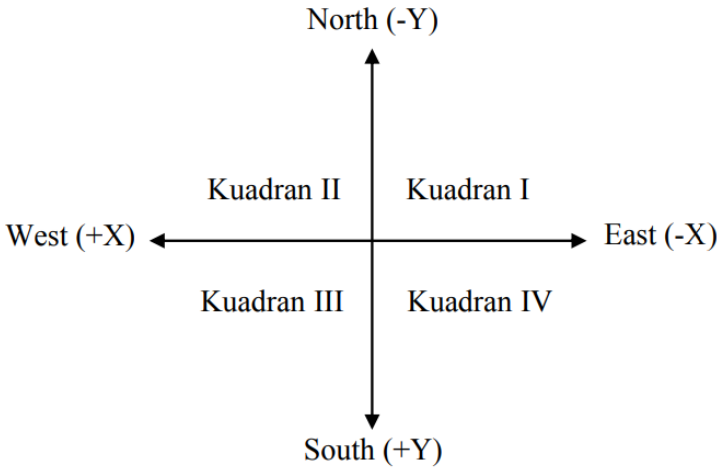
Hasil pengolahan data yang didapatkan akan dianalisis dengan analisa kualitatif dan kuantitatif. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model sumber tekanan yang menyebabkan terjadinya deformasi di permukaan berdasarkan data kemiringan dari alat tiltmeter. Analisa kualitatif dilakukan dengan melihat perubahan deformasi yang terjadi berdasarkan pola perubahan data *tilt* (mikroradian) terhadap suhu di sekitar Gunung Merapi sebagai hasil observasi dan juga untuk mengetahui karakteristik grafik yang dihasilkan oleh data tersebut. Sedangkan analisa kuantitatif dilakukan dengan melihat hasil perhitungan model Mogi berdasarkan parameter-parameter yang digunakan sehingga cocok dengan hasil observasi.

4.1 Analisis Deformasi Menggunakan Data Tilt

Pemantauan aktivitas gunungapi melalui metode deformasi dapat diketahui melalui proses pemantauan inflasi dan deflasi akibat perubahan tekanan dari dalam tubuh gunungapi. Proses perubahan tubuh gunungapi tersebut dapat direkam melalui perubahan nilai ungkitan pada tiltmeter.Data *tilt* radial dan tangensial merupakan hasil pengukuran sensor karena adanya perubahan bentuk atau posisi tubuh gunungapi kearah puncak atau sebaliknya. Arah sumbu y ditandai dengan radial sedangkan arah sumbu x ditandai dengan tangensial. Perubahan arah sumbu y (+) menandakan adanya pergerakan tubuh gunung ke arah puncak, sedangkan pada sumbu x menandakan pergerakan tubuh gunung ke arah tegak lurus terhadap radial yaitu bergerak ke samping. Data yang terukur dengan tanda (-) menandakan adanya pergerakan sensor tiltmeter ke arah yang

berlawanan atau menjauhi puncak yang bergantung pada perubahan tekanan magma di dalam tubuh gunungapi. Kenaikan atau penurunan tubuh gunung dapat dilihat berdasarkan pola grafik yang dihasilkan.

Instalasi stasiun tiltmeter telah diatur sedemikian rupa sehingga komponen Barat-Timur dan Utara-Selatan menyesuaikan arah mata angin. Nilai positif (+) atau negatif (-) suatu ungkitan mempengaruhi pergeseran arah, arah tersebut dapat ditentukan melalui pembagian kuadran seperti yang ada pada Gambar 4.1. Sedangkan untuk stasiun Selokopo berbeda dari dua stasiun lainnya, hal ini disebabkan karena pemasangan posisi komponen x dan y terbalik, sehingga untuk arah Utara (y) dan Timur (x) masing-masing adalah ungkitan bernilai posistif (+).



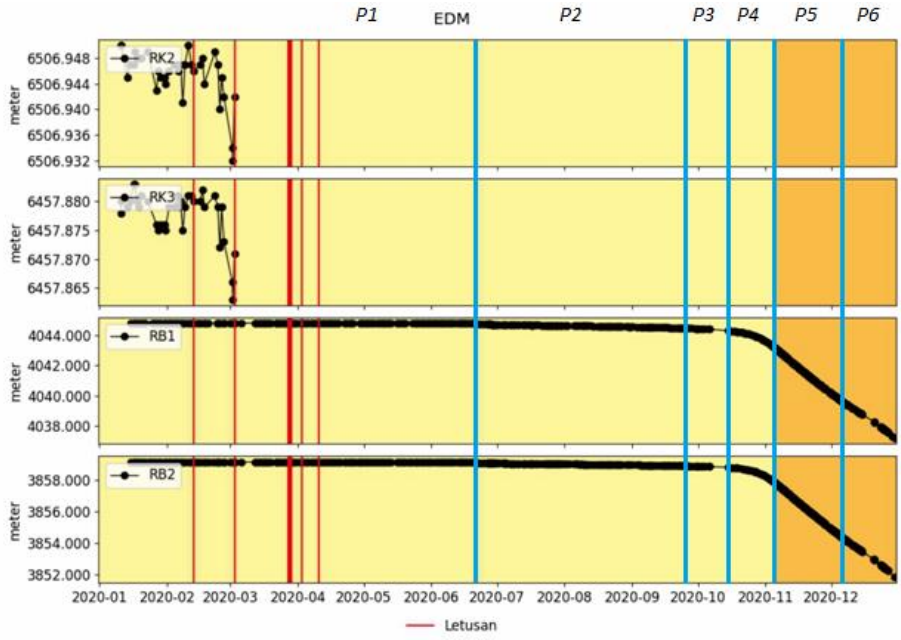
Gambar 4.1 Arah Ungkitan dalam Kuadran

Apabila pada Stasiun Grawah komponen X dan Y terlihat pola grafik dengan tren positif maka terdapat sumber tekanan dari arah Barat Daya stasiun, yaitu di puncak Gunung Merapi. Begitu pula analisis grafik pada data tilt Stasiun Selokopo. Di sisi lain, pada periode yang sama terbaca pada Stasiun Labuhan pola tren negatif komponen X dan Y, analisis tersebut memperkuat dugaan bahwa sumber tekanan berasal dari Gunung Merapi. Analisis grafik ini penting untuk

mengetahui anomali yang terekam oleh stasiun tilt merupakan deformasi gunungapi atau deformasi semu yang berasal dari pengaruh atmosferik. Hal ini dapat terjadi karena sifat sensor tiltmeter yang sensitif dengan perubahan-perubahan lingkungan.

4.1.1 Data Seismisitas dan EDM sebagai Acuan Pembagian Periode

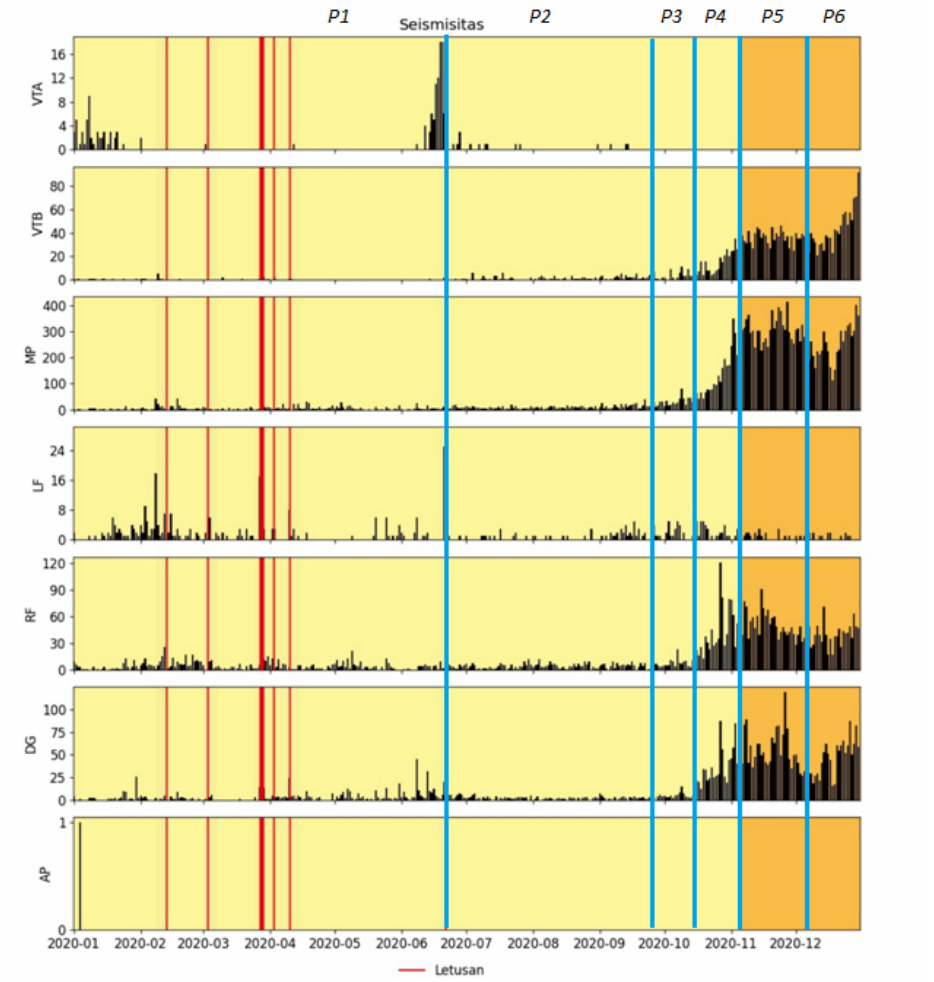
Pada penelitian ini digunakan beberapa data pendukung yaitu data seismisitas Gunung Merapi dan data EDM. Data-data pendukung ini digunakan untuk membagi periode menjadi 6 periode dalam kurun waktu 1 tahun sesuai dengan aktivitas Gunung Merapi. Data seismisitas menjadi indikator untuk melihat besar peningkatan aktivitas vulkanik menjelang terjadinya suatu letusan dan data EDM merupakan data deformasi.



Gambar 4.2 Data Deformasi Menggunakan EDM

Berdasarkan Gambar 4.2, pembagian periode didasarkan pada data deformasi menggunakan EDM. Yang dilihat pada gambar tersebutadalah grafik RB1 (Reflektor Babadan 1) dan RB2 (Reflektor Babadan 2). Pada periode

pertama belum ada penurunan jarak tunjam. Kemudian pada periode kedua hingga terakhir terus mengalami penurunan jarak tunjam.

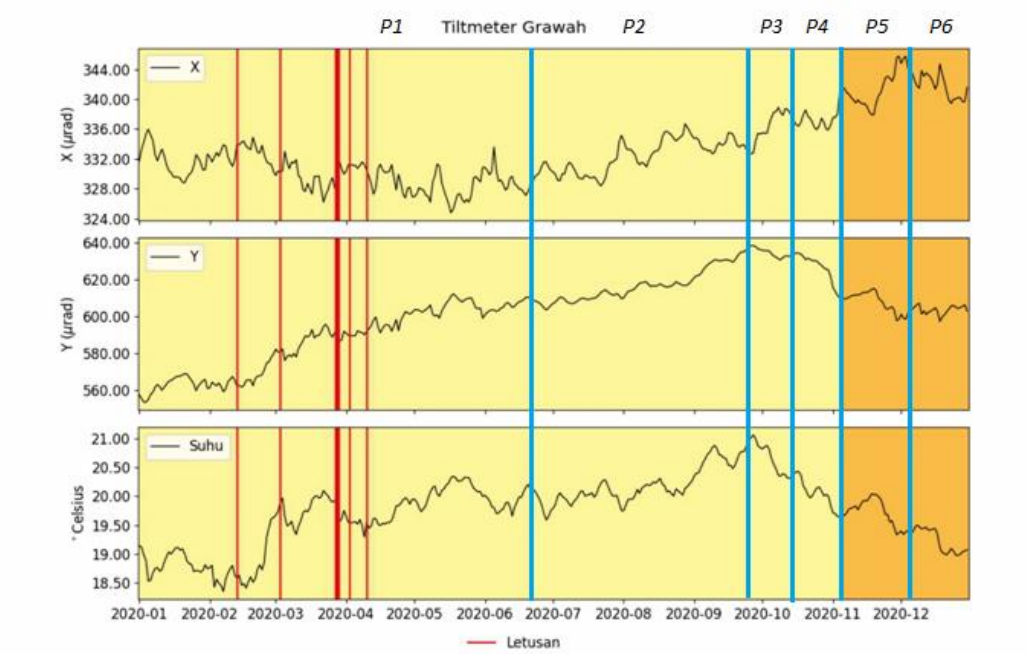


Gambar 4.3 Data Seismisitas Gunung Merapi

Berdasarkan Gambar 4.3, pembagian periode hanya didasarkan pada VTA (gempa dalam) dan VTB (gempa dangkal). Pada akhir periode pertama, terdapat gempa dalam sangat besar tepatnya pada saat erupsi keenam tahun 2020 sehingga erupsi tersebut dapat menjadi acuan berakhirnya periode pertama. Kemudian pada periode kedua, tidak terjadi gempa VTA maupun VTB. Memasuki periode ketiga, mulai ada gempa dangkal dan pada perode keempat terus mengalami kenaikan grafik VTB sampai pada periode terakhir. Sehingga dari kedua data diatas, dapat diketahui pembagian periode pertama mulai awal

tahun 2020 hingga tanggal 21 Juni tepatnya saat terjadi erupsi. Dilanjutkan periode kedua hingga akhir bulan September, periode ketiga hingga pertengahan bulan Oktober dan periode keempat hingga tanggal 5 November. Tepat tanggal 5 November status Gunung Merapi menjadi siaga sehingga masuk pada periode kelima dan keenam.

4.1.2 Analisis Deformasi Stasiun Grawah



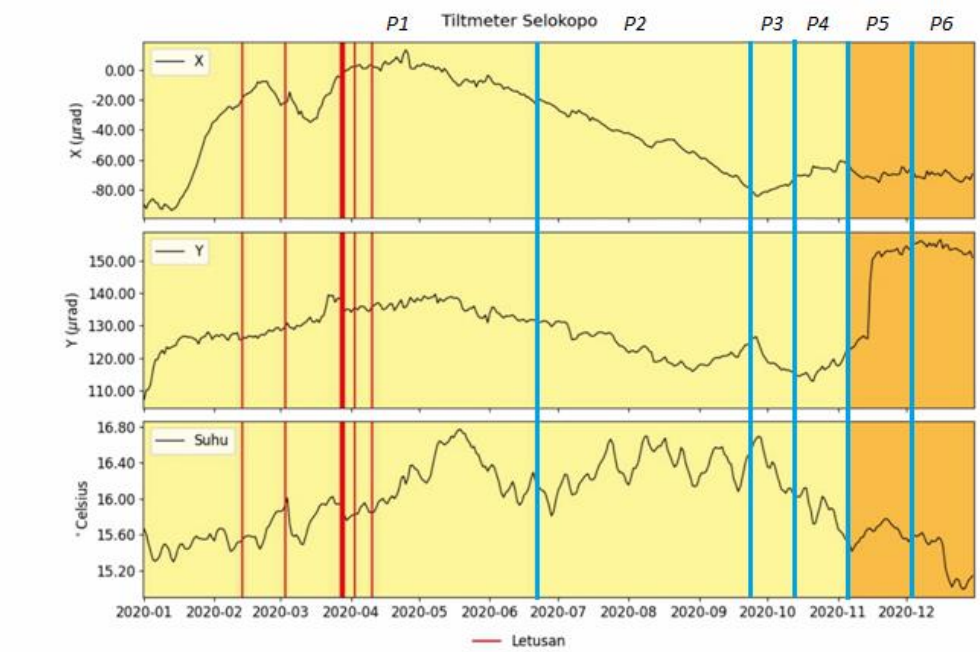
Gambar 4.4 Perubahan Ungkitan Komponen X (tangensial) dan Y (radial) Tahun 2020 pada Stasiun Grawah

Kenaikan dan penurunan data *tilt* radial dan tangensial menggambarkan adanya perubahan tekanan magma di bawah tubuh gunungapi yang terukur oleh sensor dari tiltmeter. Sedangkan pada sensor suhu tiltmeter menggambarkan keadaan suhu alat yang perubahannya dapat dipengaruhi oleh lingkungan tubuh gunungapi baik dari dalam (magma) maupun dari luar tubuh gunungapi (udara bebas). Kestabilan suhu dan data yang didapatkan dapat diketahui dengan caramelihat data yang terukur di malam hari, karena data yang terukur di malam

hari dianggap lebih bagus dan tidak begitu terpengaruh oleh lingkungan seperti efek matahari, udara sekitar dan lainnya.

Terjadinya inflasi dan deflasi dilihat pada komponen Y. Apabila komponen Y mengalami peningkatan maka menandakan terjadinya inflasi begitupula sebaliknya. Komponen Y dijadikan acuan karena menandakan perubahan tubuh gunung ke arah puncak atau tidak. Sedangkan komponen X menandakan perubahan tubuh gunung ke arah samping. Data observasi pada Stasiun Grawah yang diperoleh dari pengamatan yang ditunjukkan pada Gambar 4.4,dapat dilihat bahwa pada periode 1 perubahan nilai ungkitan yang terjadi pada komponen X menunjukkan penurunan dan pada komponen Ymenunjukkan peningkatan sehingga arah ungkitan mengarahkeTenggara atau ke Selatan terhadap lokasi Stasiun Grawah dan terjadi inflasi. Pada periode 2 sama-sama terjadi peningkatan ungkitan komponen X dan komponen Y, hal ini menyebabkan ungkitan berarah ke Barat Daya atau ke Selatan terhadap Stasiun Grawah sehingga terjadi inflasi. Pada periode 3, ungkitan komponen X menunjukkan kenaikan sedangkan komponen Y mengalami penurunan yang menyebabkan arah ungkitan ke Barat Laut terhadap Stasiun Grawah sehingga terjadi deflasi. Pada periode 4 dan 5, ungkitan komponen X tetap menunjukkan kenaikan dan komponen Y tetap mengalami penurunan, sehingga arah ungkitannya sama dengan periode 3 yaitu ke Barat Laut terhadap Stasiun Grawah dan terjadi deflasi. Periode 6 terjadi perubahan ungkitan komponen X dan komponen Y mengalami penurunansehingga ungkitannya berarah ke Timur Laut terhadap Stasiun Grawah dan terjadi deflasi.

4.1.3 Analisis Deformasi Stasiun Selokopo

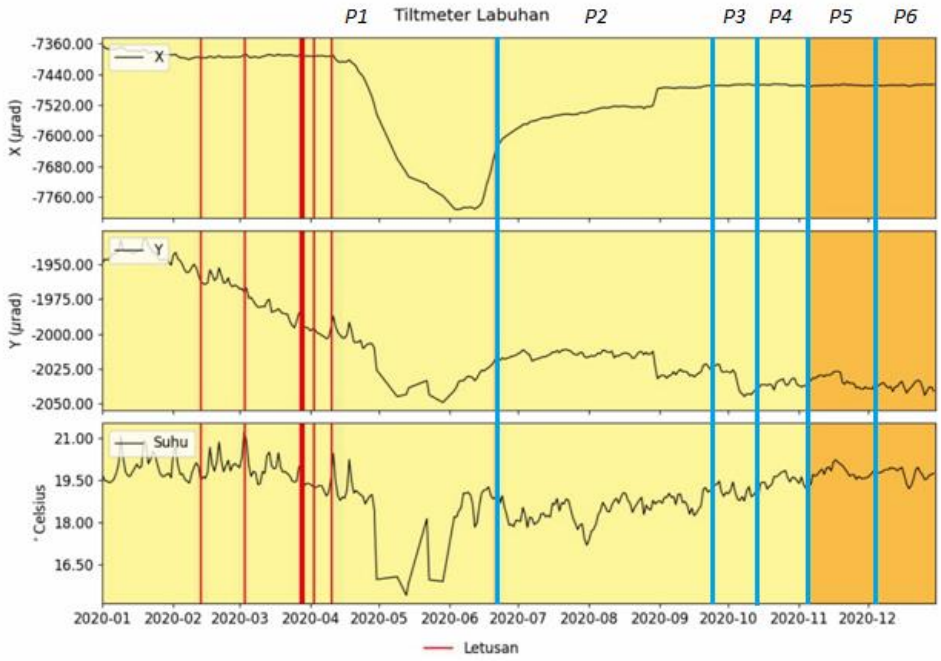


Gambar 4.5 Perubahan Ungkitan Komponen X (tangensial) dan Y (radial) Tahun 2020 pada Stasiun Selokopo

Data observasi pada Stasiun Selokopo yang diperoleh dari pengamatan ditunjukkan pada Gambar 4.5, dapat diketahui bahwa pada periode 1 perubahan nilai ungkitan yang terjadi pada komponen X maupun Y sama-sama menunjukkan kenaikan sehingga ungkitan berarah ke Timur Laut terhadap lokasi Stasiun Selokopo dan terjadi inflasi. Pada periode 2 sama-sama terjadi penurunan ungkitan komponen X dan komponen Y, hal ini menyebabkan ungkitan berarah ke Barat Dayaterhadap Stasiun Selokopo sehingga terjadi deflasi. Beda halnya dengan yang terjadi pada periode 3, ungkitan komponen X menunjukkan kenaikan, sedangkan komponen Y mengalami penurunan yang menyebabkan arah ungkitan ke Tenggara terhadap Stasiun Selokopo dan terjadi deflasi. Kemudian pada periode 4, ungkitan komponen X dan komponen Y sama-sama menunjukkan kenaikansehingga arah ungkitannya sama dengan periode 1 yaitu ke arah Timur Laut terhadap Stasiun Selokopo dan terjadi

inflasi.Adapun pada periode 5 perubahan ungkitan komponen X mengalami penurunan dan komponen Y mengalami kenaikan sehingga ungkitannya berarah ke Barat Laut terhadap Stasiun Selokopo dan terjadi inflasi. Sementara itu, pada periode 6 perubahan nilai ungkitan yang terjadi pada komponen X mengalami kenaikan dan komponen Y menunjukkan penurunan sehingga arah ungkitan berarah ke Tenggaraterhadap lokasi Selokopo dan terjadi deflasi.

4.1.4 Analisis Deformasi Stasiun Labuhan



Gambar 4.6 Perubahan Ungkitan Komponen X (tangensial) dan Y (radial) Tahun 2020 pada Stasiun Labuhan

Data observasi pada Stasiun Labuhan yang diperoleh dari pengamatan yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, dapat dilihat bahwa pada periode 1 perubahan nilai ungkitan yang terjadi pada komponen X maupun Y sama-sama menunjukkan penurunan dengan ungkitan berarah ke Timur Laut terhadap lokasi Stasiun Labuhan sehingga terjadi deflasi. Pada periode 2, ungkitan komponen X mengalami kenaikan, sedangkan komponen Y mengalami penurunan, hal ini

menyebabkan ungkitan berarah ke Barat Laut atau ke Utara terhadap Stasiun Labuhan sehingga terjadi deflasi. Kemudian pada periode 3, ungkitan komponen X tidak menunjukkan kenaikan maupun penurunan, atau dapat dikatakan tidak terjadi perubahan, sedangkan komponen Y mengalami penurunan yang menyebabkan arah ungkitan ke Utara terhadap Stasiun Labuhan dan terjadi deflasi. Pada periode 4, ungkitan komponen X mengalami penurunan, sedangkan komponen Y tidak mengalami perubahan, sehingga arah ungkitannya yaitu ke Timur terhadap Stasiun Labuhan. Sementara itu, pada periode 5 dan periode 6 menunjukkan perubahan yang sama dengan periode 3 sehingga berarah ke Utara terhadap Stasiun Labuhan dan terjadi deflasi.

4.1.5 Pembacaan Grafik Tiltmeter

Hasil pembacaan grafik tiltmeter ditunjukkan pada Tabel 4.1 di bawah. Pada data rekaman dapat diketahui bahwa deformasi paling besar terjadi di Stasiun Selokopo, selama periode 1 hingga 6 total besar ungkitan yaitu sebesar 20,5 μrad pada komponen X dan 40 μrad pada komponen Y. Adapun total besar ungkitan Stasiun Grawah yaitu 10 μrad pada komponen X dan 40 μrad pada komponen Y. sedangkan deformasi paling kecil terjadi di Stasiun Labuhan yaitu sebesar -121 μrad pada komponen X dan -95 μrad pada komponen Y. Perubahan nilai ungkitan dapat ditulisakan pada tabel dibawah beserta keterangannya.

Tabel 4.1 Perubahan Nilai Ungkitan Tiap Stasiun

Periode		Stasiun					
		Grawah	Ket.	Selokopo	Ket.	Labuhan	Ket.
1	X (μrad)	-3	Inflasi	70	Inflasi	-280	Deflasi
	Y (μrad)	50		20		-70	

2	X (μrad)	4	Inflasi	-60	Deflasi	160	Deflasi
	Y (μrad)	30		-5		-3	
3	X (μrad)	4	Deflasi	10	Deflasi	0	Deflasi
	Y (μrad)	-5		-10		-17	
4	X (μrad)	5	Deflasi	10	Inflasi	-1	Tetap
	Y (μrad)	-25		5		0	
5	X (μrad)	2	Deflasi	-10	Inflasi	0	Deflasi
	Y (μrad)	-5		35		-2	
6	X (μrad)	-2	Deflasi	0,5	Deflasi	0	Deflasi
	Y (μrad)	-5		-5		-3	

4.2 Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Model Mogi

Pada penelitian ini, lokasi sumber tekanan magma diperoleh menggunakan Model Mogi yang dikerjakan melalui perangkat lunak Matlab dan Excel. Prediksi lokasi sumber tekanan yang diperoleh melalui perbandingan data observasi dengan data teoritikal dari perhitungan Model Mogi.Perhitungan model Mogi digunakan untuk mengetahui apakah deformasi periode tersebut terpengaruhi oleh sumber magma dangkal (kantong magma) atau sumber magma dalam (dapur magma).Nilai parameter model yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

Tabel 4.2 Parameter Metode *Grid Search* Model Mogi

Parameter	*Range*
α (radius sumber (m))	100 – 1000
ΔP (perubahan tekanan (Pa))	10^6 - 10^{11}
d (kedalaman sumber (m))	2.400-0 mdpl 0-10.000 mdbl
x_c(bujur (UTM))	437200 – 440200
y_c(lintang (UTM))	9165000 – 9168000

Nilai parameter model untuk radius sumber (α) dan kedalaman sumber (d) yang digunakan berdasarkan referensi dari penelitian yang dilakukan oleh Aisyah et al (2018). Sedangkan nilai parameter model untuk perubahan tekanan (ΔP) yang digunakan berdasarkan referensi dari Lisowski (2007), dalam tulisannya dijelaskan bahwa besar perubahan tekanan pada sumber/kantung magma adalah 1 MPa hingga 100 GPa. Adapun nilai parameter model untuk koordinat sumber tekanan (lintang dan bujur) adalah berdasarkan *grid* yang dibuat pada area Gunung Merapi, *grid* yang dimaksud melingkupi wilayah Gunung Merapi dan seluruh stasiun tiltmeter.Nilai *poisson's ratio* yang digunakan pada perhitungan model Mogi adalah nilai *poisson's ratio* kerak bumi yaitu 0,25 (Masterlark, 2007). Pada perhitungan Model Mogi diperoleh prediksi lokasi sumber tekanan magma penyebab deformasi pada masing-masing periode ditunjukkan pada Tabel 4.3 di bawah ini.

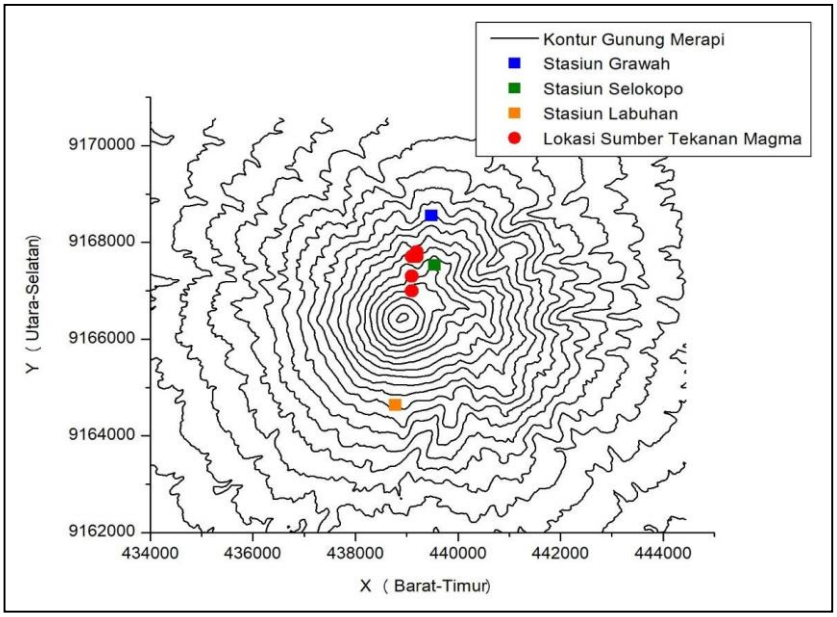
Tabel 4.3 Hasil Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma Gunung Merapi Menggunakan Model Mogi

Periode	x_c (UTM)	y_c (UTM)	α (m)	ΔP (m)	d dari puncak (m)	Residual
1	439100	9167000	500	$1{,}3\text{x}10^{7}$	2000	$2{,}85984\text{x}10^{-4}$
2	439100	9167300	400	$1{,}0\text{x}10^{7}$	1800	$1{,}66378\text{x}10^{-4}$
3	439200	9167800	400	$1{,}3\text{x}10^{7}$	2500	$1{,}68433\text{x}10^{-5}$
4	439100	9167000	400	$1{,}1\text{x}10^{7}$	2300	$1{,}72689\text{x}10^{-5}$
5	439200	9167700	500	$1{,}1\text{x}10^{6}$	1600	$3{,}46777\text{x}10^{-5}$
6	439100	9167700	600	$1{,}0\text{x}10^{6}$	2200	$0{,}14234\text{x}10^{-5}$

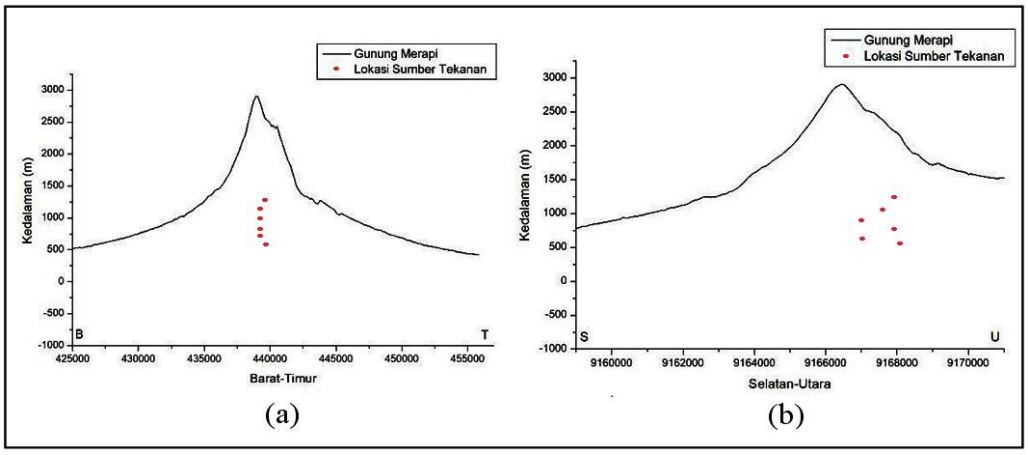
Pada penelitian yang dilakukan, diperoleh prediksi lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi tiap periode pengamatan bervariasi terhadap kedalaman,

namun masih berada pada wilayah yang sama, yaitu pada wilayah Utara dari puncak Gunung Merapi. Hasil tersebut didapatkan setelah ada kecocokan antara nilai data observasi dan data teoritis, sehingga muncul nilai residual terkecil sebagai acuan bahwa parameter tersebut merupakan parameter yang dicari. Menurut Ratdomopurbo dan Poupinet (1995) zona lembek yang berada pada kedalaman 1,5-2,5 km di bawah puncak diinterpretasikan sebagai kantong magma, sedangkan lokasi dapur magma diperkirakan berada pada kedalaman lebih dari 5 km.

Berdasarkan Tabel 4.3, dapat dilakukan *plotting* dan pemodelan secara 1D dan 2D untuk melihat posisi dan kedalaman sumber tekanan. Pemodelan ini dibuat dengan*software* Origin Pro 9 dengan memasukkan nilai kontur Gunung Merapi, koordinat masing-masing stasiun tiltmeter, dan koordinat lokasi sumber tekanan tiap periode. Pemodelan secara 2D dibuat dengan melakukan *cross section* peta topografi pada arah Barat-Timur dan Utara-Selatan, Pemodelan dalam 1D dan 2D ditampilkan seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.7 Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 1D



Gambar 4.8 Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 2D.
(a) Penampang Barat-Timur (b) Penampang Selatan-Utara

Berdasarkan hasil yang diperoleh, nilai kedalaman dari sumber tekanan Gunung Merapi bervariasi tiap periode pengamatan. Selain itu, inflasi yang terjadi pada tubuh Gunung Merapi menandakan telah terjadi aktivitas dari sumber magma yang menekan tubuh Gunung Merapi. Pada Gambar di atas tampak titik-titik di bawah permukaan model Gunung Merapi. Titik tersebut merupakan lokasi sumber tekanan magma, kedalamannya yaitu sekitar 1600 meter hingga 2500 meter dari puncak Gunung Merapi. Sementara itu, lokasi sumber tekanan magma berada di wilayah Utara Gunung Merapi, hal tersebut sesuai dengan nilai ungkitan pada rekaman tiltmeter yang menunjukkan deformasi paling besar yang terjadi di Stasiun Grawah dan Selokopo yang berada di sebelah Utara Gunung Merapi.

4.3 Estimasi Volume Suplai Magma

Perubahan volume suplai magma berhubungan dengan perubahan hidrostatik dan radius pada suatu sumber tekanan. Massa jenis magma berbeda dengan medium di sekitarnya, sehingga magma cenderung naik ke permukaan. Berdasarkan parameter yang diperoleh dari Model Mogi, estimasi volume suplai magma Gumung Merapi ditunjukkan pada Tabel 4.4 di bawah ini:

Tabel 4.4 Estimasi Volume Suplai Magma

Periode	Tekanan (Pa)	Jari-jari (m)	Volume (m^3)
1	$1{,}3x10^7$	500	3.419.808
2	$1{,}0x10^7$	400	1.346.878
3	$1{,}3x10^7$	400	1.750.942
4	$1{,}1x10^7$	400	1.481.566
5	$1{,}1x10^6$	500	289.368
6	$1{,}0x10^6$	600	454.571
Total Volume			8.743.136 m^3

Pada tabel di atas, dapat diketahui bahwa estimasi volume suplai magma cenderung variatif tiap periode. Hal ini dipengaruhi oleh perubahan tekanan (ΔP) dan radius sumber (α). Semakin besar perubahan sumber tekanan dan radiusnya, maka volume magma yang dihasilkan juga akan lebih besar begitupula sebaliknya.Artinya, perubahan sumber tekanan dan radius sumber berbanding lurus dengan volume suplai magmanya. Berdasarkan perhitungan volume, suplai magma terbesar ada pada periode pengamatan pertama dan volume suplai magma terkecil ada pada periode pengamatan ke lima. Adapun total volume suplai magma selama periode pengamatan sebesar 8.743.136 m^3. Aktivitas vulkanik gunungapi dipengaruhi oleh suplai pada kantung magma. Pada dasarnya magma terbentuk dari batuan yang meleleh karena tekanan dan temperatur tinggi di dalam perut bumi. Besamya suplai magma dari zona yang lebih dalam adalah penggerak utama dari aktivitas vulkanis. Dari kedalaman, suplai magma Gunung Merapi terkait dengan sistem tektonik yaitusubduksi antara Lempeng Indo-Australia dan

Lempeng Eurasia. Pada zona subduksi di kedalaman antara 60-150 km terjadi pelelehan karena tekanan dansuhutinggi. Pelelehan tersebut memproduksi magma asal yang disebut juga magma primitif. Magma primitifakan bermigrasi menuju permukaan yang digerakkan oleh efek tektonik. Pada proses migrasi magma, sistem tektonik merupakan faktor penting. Aktivitas tektonik menghasilkan zona lemah yang memberi kemudahan bagi magma untuk menerobos mencapai permukaan (BPPTKG, 2016).

Pada saat perjalanan menuju ke permukaan, magma memasuki zona tampungan magma yang disebut kantung magma atau dapur magma apabila ukurannya lebih besar. Naiknya magma disebabkan oleh batuan di sekitarnya yang sudah tidak mampu menahan tekanan akibat magma yang terus menerus terbentuk. Gunung Merapi memiliki dua zona tampungan magma yang menentukan sifat khas Merapi. Letak dapur magma dan kantung magma Gunung Merapi relatif tidak jauh, maka kenaikan tekanan di dapur magma akan menyebabkan aliran magma menuju ke kantung magma yang berada di atasnya. Kantung magma berfungsi sebagai katup bagi magma yang naik ke permukaan. Jumlah magma yang naik ke kantung magma menyebabkan terjadinya perubahan volume pada kantung magma tersebut (BPPTKG, 2016; Islamiyah et al., 2018).

Berdasarkan laporan dari Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (2020), Gunung Merapi hingga kini terus menunjukkan aktivitasnya. Aktivitas Gunung Merapi saat ini diperkirakan tidak melebihi aktivitas pada erupsi tahun 2006 dan periode pengamatan tahun 2010. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Aisyah et al. (2018) yaitu volume suplai magma pada erupsi tahun 2006 sebesar 9,7 ± 1 Juta m^3, sedangkan volume suplai magma

pada erupsi tahun 2010 sebesar 17,6 ± 0,8 Juta m^3. Hal ini mendukung hasil penelitian yang diperoleh, yaitu volume suplai magma Gunung Merapi pada tahun 2020 tidak lebih besar dari periode pengamatan tahun 2006 dan tahun 2010.

4.4 Gunungapi dalam Perspektif al-Quran dan Hadits

Gunungapi adalah tempat keluarnya magma atau material lain ke permukaan bumi membentuk suatu kerucut raksasa dan saat dilihat biasanya berbentuk kubah atau bukit yang biasa disebut dengan kawah dan kadang kawah tersebut terisi air membentuk suatu danau. Tujuan gunung diciptakan adalah sebagai penyeimbang antara bumi dan langit agar keduanya bisa tetap tegak. Apabila tidak ada gunung, bumi tidak akan selamat dan tidak akan terbentang dengan baik. Sehingga, gunungapi dapat menolong makhluk hidup yang ada di bumi dari goncangan lempeng yang berada di bawah permukaan. Hadis Rasulullah SAW menegaskan tentang keberadaan tujuh lapis bumi. Rasulullah SAW pernah bersabda:

"عن سعيد بن زيد بن عمرو بن نفيل أنه خاصمته أر وى- في حق زعمت أنه انتقصه لها-إلى مر وان فقال سعيد :أنا أنتقص من حقها شيئا؟ أشهد لسمعت رسول الله صلى الله عليه وسلم يق ول: منا أخذ شيرا من الأرض ظلما فإنه يطوقه يوم القيامة من سبع أرضين".(رواه البخارى)

"*Dari Said bin Zaid bin Amr bin Nufail, ia dibantah oleh para musuh terhadap hak kepemilikan sebidang tanah. Kemudian Sa'id berkata: Apakah aku mengambil sesuatu atau mengurangi haknya? Aku bersaksi, aku benar-benar mendengar Rasulullah SAW bersabda:"Barang siapa yang mengambil sejengkal tanah yang zhalim, sesungguhnya ia akan dibebani tujuh (lapis) bumi pada hari kiamat nanti"(H.R Bukhari: 2273).*

Jika dilihat dari redaksi hadis, maka terdapat dua kata kunci yaitu hadis tersebut secara umum melarang segala bentuk kedzaliman. Kemudian, banyak yang menyorot hadis ini dan kemudian dihubungkan dengan keadaan lapisan bumi yang menyatakan adanya 7 (tujuh) lapisan yang dimiliki bumi (*Software*

Maktabah Tsamilah).

Karena lapisan kedua bumi yang selalu aktif bergerak, maka Allah SWT pun kemudian mengukuhkan dan menguatkan bumi dengan adanya gunung-gunung di atas lapisan yang bergerak tersebut. Sebagaimana pasak tenda yang ditancapkan di atas tanah tempat tenda didirikan (Ahmad, 2011).Hal ini sudah dituliskan dalam Al-Qur'an Surat an-Naba' (78): 6-7 yang mengungkapkan pesan gunung sebagai "pasak":

أَلَمْ نَجْعَلِ ٱلأَرْضَ مِهَاداً﴿٦﴾ وَٱلْجِبَالَ أَوْتَاداً﴿٧﴾

"*Bukankah Kami telah menjadikan bumi sebagai hamparan?, dan gunung-gunung sebagai pasak*?" (An-Naba' [78]:6-7).

Menurut tafsir Ibnu Katsir, Firman Allah Ta'ala (أَلَمْ نَجْعَلِ ٱلأَرْضَ مِهَاداً)"*Bukankah Kami telah menjadikan bumi sebagai hamparan?*"Yakni terhampar bagi semua makhluk, dibentangkan bagi mereka sehingga bumi menjadi tenang, diam, dan permanen. (وَٱلْجِبَالَ أَوْتَاداً) "*Dan gunung-gunung sebagai pasak?*"Yakni Dia telah menjadikannya gunung-gunung itu sebagai pasak yang Dia pancangkan dan tancapkan serta tetapkan sehingga menjadi diam dan tidak mengguncangkan para penghuninya yang ada di atasnya (Abdullah, 2007).

Kemudian menurut tafsir al-Mishbah, kata (مهادا) *mihadan* terambil dari kata (مهد)*mahd* yakni *sesuatu yang disiapkan dan dihamparkan secara halus dan nyaman*. Allah SWT telah menyiapkan bumi ini sedemikian rupa, menetapkan dan mengatur sistemnya serta menentukan kadar-kadar yang berkaitan dengannya sehingga menjadi nyaman dihuni manusia. Seandainya tidak ada pengaturan itu, atau kadarnya berkurang berlebih atau berkurang sedikit, sehingga tidak terjadi keseimbangan, maka pastilah hidup di bumi ini akan sangat sulit, kalau enggan berkata mustahil.Kata(أوتادا)*autadan* adalah bentuk jamak dari kata (وتد)

*watad*yaitu *paku yang besar*. Jika kita mengarahkan pandangan ke alam sekitar, kita akan melihat langit bagaikan kemah yang besar. Masyarakat Arab lebih-lebih masa lampau sangat mengenal kemah, karena dalam perjalanan mereka selalu menggunakannya. Untuk memasang kemah diperlukan tali-tali dan pematok yang ditanam agar kemah tidak diterbangkan angin (Shihab, 2002). Ayat ini menggambarkan kepada mereka keadaan gunung-gunung yang berfungsi sebagai pematok-pematok bumi seperti halnya kemah yang juga memerlukan pematok agar tidak oleng. Di ayat lainnya Allah SWT juga berfirman:

خَلَقَ ٱلسَّمَٰوَٰتِ بِغَيْرِ عَمَدٍ تَرَوْنَهَا وَأَلْقَىٰ فِى ٱلأَرْضِ رَوَٰسِىَ أَن تَمِيدَ بِكُمْ وَبَثَّ فِيهَا مِن كُلِّ دَآبَّةٍ وَأَنزَلْنَا مِنَ ٱلسَّمَآءِ مَآءً فَأَنۢبَتْنَا فِيهَا مِن كُلِّ زَوْجٍ كَرِيمٍ﴿١٠﴾

"*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)*

Menurut Tafsir Ibnu Katsir, ayat di atas menyatakan *Dia menciptakan langit* yang demikian tinggi dan besar *tanpa tiang yang kamu melihatnya* dengan mata kepala seperti itu, *dan Dia meletakkan di* permukaan *bumi* yang merupakan hunian kamu *gunung-gunung* yang sangat kukuh sehingga tertancap kuat *supaya ia* yakni bumi itu *tidak goncang bersama kamu,* kendati ia lonjong dan terus berputar. Dengan Ayat ini Allah menjelaskan tentang kekuasaan-Nya yang agung dan menciptakan langit dan bumi serta segala isinya. (وَأَلْقَى فِي الْأَرْضِ رَوَاسِيَ)"*Dia meletakkan gunung-gunung (di permukaan bumi)*" yaitu gunung-gunung menancap ke dalam bumi dan memberatkannya agar bumi tidak menggoncangkan penghuninya di atas permukaan air. Untuk itu Dia berfirman: (أَن تَمِيدَ بِكُمْ) "*Supaya bumi itu tidak menggoyangkanmu.*" (Abdullah, 2007)

Pasak seperti paku tapi terbuat dari kayu (KBBI, 2021) yang umumnya ditancapkan dalam-dalam ke tanah. Maksud dari ayat tersebut bahwa gunung dijadikan Allah SWT sebagai pasak adalah adanya bagian gunung yang berfungsi sebagai pasak yang menancap dalam-dalam ke dalam tanah.

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

Kata "pasak" dalam al-Quran memiliki dua makna, yakni menurut bentuk dan fungsinya. Menurut bentuknya, sebuah pasak lebih banyak bagiannya berada di dalam tanah daripada bagian di luar tanah. Menurut fungsinya, sebuah pasak berfungsiagar barang yang ditancapi tidak bergerak, tidak bergoyang atau tetap pada tempatnya semula (Bakry, 2001).

Begitupula menurut ilmu geologi modern. Bagian yang terlihat di luar gunung hanya sebagian kecil yakni 1/3, sedangkan bagian yang tertanam di dalam bumi mencapai 2/3 bagian. Maka, sesungguhnya semua gunung yang kita lihat di dunia ini kecil jika dibandingkan dengan bagian gunung yang tertanam di dalam bumi (Mulyaningsih, 2006).

Ada banyak manfaat dan hikmah yang dapat diambil dari adanya peristiwa erupsi gunungapi. Salah satunya adalah gunung sebagai sumber bahan tambang, sebagaimana Allah berfirman dalam (Q.S Al-Hadiid [57]:25):

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِٱلْبَيِّنَٰتِ وَأَنزَلْنَا مَعَهُمُ ٱلْكِتَٰبَ وَٱلْمِيزَانَ لِيَقُومَ ٱلنَّاسُ بِٱلْقِسْطِ ۖ وَأَنزَلْنَا ٱلْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنَٰفِعُ لِلنَّاسِ وَلِيَعْلَمَ ٱللَّهُ مَن يَنصُرُهُۥ وَرُسُلَهُۥ بِٱلْغَيْبِ ۚ إِنَّ ٱللَّهَ قَوِىٌّ عَزِيزٌ ﴿٢٥﴾

"Sesungguhnya Kami telah mengutus rasul-rasul Kami dengan membawa bukti-bukti yang nyata dan telah Kami turunkan bersama mereka Al Kitab dan neraca (keadilan) supaya manusia dapat melaksanakan keadilan. Dan Kami ciptakan besi yang padanya terdapat kekuatan yang hebat dan berbagai manfaat bagi manusia, (supaya mereka mempergunakan besi itu) dan supaya Allah mengetahui siapa yang menolong (agama)Nya dan rasul-rasul-Nya padahal Allah tidak dilihatnya. Sesungguhnya Allah Maha Kuat lagi Maha Perkasa." (Q.S Al-Hadiid [57]:25)

Menurut Tafsir Ibnu Katsir, adapun firman Allah Swt.: {وَأَنزلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ}*Dan Kami ciptakan besi yang padanya terdapat kekuatan yang hebat.*Maksudnya, Kami jadikan besi itu sebagai sarana untuk menekan orang yang membangkang terhadap perkara yang hak dan mengingkarinya padahal hujah-hujah telah ditegakkan di hadapannya. Untuk itulah maka disebutkan oleh firman-Nya:{فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ}*yang padanya terdapat kekuatan yang hebat.* Yakni dapat dijadikan senjata seperti pedang, tombak, anak panah, dan tameng serta senjata lainnya.{وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ}*dan berbagai manfaat bagi manusia.*Yaitu dalam kehidupan mereka, karena besi itu dapat dijadikan sebagai sarana untuk pekerjaan mereka seperti cangkul, kapak, gergaji, pahat, alat untuk membajak tanah, bahan tambang, dan peralatan lainnya yang digunakan untuk keperluan pertanian, pertukangan serta alat-alat lainnya yang diperlukan oleh manusia(Abdullah, 2007).

Para ahli geologi telah meneliti bahwa di dalam gunung terdapat bermacam-macam warna bebatuan. Bebatuan yang di dapatkan sebagai akibat magma yang membeku di dekat permukaan atau sudah keluar ke permukaan secara meleleh membentuk lava kohoren, dan pada akhirnya menjadi bebatuan beku yang pada umumnya massif.Barang-barang tambang yang ada digunung ini dapat kita

dapatkan dengan usaha kita menggalinya sendiri atau kita memanfaatkan yang telah ada di sekitar gunung.Hal ini dapat terjadi dikarekan barang-barang tersebut ikut terbawa ketika terjadinya bencana gunung, sehingga tersebar di sekitar gunung tersebut. Barang tambang yang ada di gunung dapat berbeda dengan barang tambang lainnya karena barang tambang terbentuk salah satunya karena proses pemanasan yang ada di gunung dari aktivitas vulkanis gunung. Sehingga barang tambang yang ada memiliki keistimewaan tersendiri.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Deformasi permukaan yang terjadi di Gunung Merapi tahun 2020 dipantau dengan menggunakan 3 stasiun tiltmeter. Deformasi paling besar terjadi di Stasiun Selokopo, kemudian Stasiun Grawah yang keduanya terletak di wilayah Utara Gunung Merapi. Sedangkan deformasi paling kecil terjadi di Stasiun Labuhan yang terletak di wilayah Selatan GunungMerapi.
2. Estimasi lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi berdasarkan Model Mogi berada di kedalaman 1600 meter hingga 2500 meter dari puncak Gunung Merapi.
3. Estimasi volume suplai magma yang terkandung di dalam kantung magma Gunung Merapi selama periode pengamatan yaitu sebesar 8.743.136 m^3.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian serupa pada waktu yang akan datang yaitu penelitian dapat menggunakan metode deformasi dengan alat tiltmeter dan ditunjang dengan alat deformasi lainnya seperti GPS, EDM, dan InSAR agar hasil analisis deformasi yang diperoleh lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah. 2007. *Tafsir Ibnu Katsir Jilid 5*. Edisi Ketiga. Bogor: Pustaka Imam Asy-Syafi'i

Abdullah. 2007. *Tafsir Ibnu Katsir Jilid 6*. Edisi Ketiga. Bogor: Pustaka Imam Asy-Syafi'i

Abdullah. 2007. *Tafsir Ibnu Katsir Jilid 8*. Edisi Ketiga. Bogor: Pustaka Imam Asy-Syafi'i

Abidin, H.Z. 2002. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Edisi Ketiga. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

Abidin, H.Z. 2007. *Karakteristik Deformasi Gunungapi Ijen dalam periode 2002-2005 Hasil Estimasi Metode survey GPS*. Jurnal PROC. ITB Sains & Teknik, vol. 39, No 1&2, 2007, 1-22.

Ahmad, Yusuf Al-Hajj. 2011. *Sains Modern Menurut Perspektif Al-Qur'an dan As-Sunnah.* Johor Bahru: Perniagaan Jahabersa.

Aisyah, N., Iguchi, M., Subandriyo, Budisantoso, A., Hotta, K., & Sumarti, S. 2018. Combination of a Pressure Source and Block Movement for Ground Deformation Analysis at Merapi Volcano Prior to the Eruptions in 2006 and 2010. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 357*, 239-253.

Al-Qur'an Al Hadi. 2013. Pusat Kajian Hadis: Jakarta.

Andreastuti, S.D., Alloway, B.V. & Smith. I.E. M. 2000. A Detailed Tephrostratigraphic Framework at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: Implications for Eruption Predictions and Hazard Assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 100*, 51-67. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.05.001.

Asikin, S. 1979. *Geologi Struktur Tektonik Indonesia*. Bandung: Jurusan Teknik Geologi Institut Teknologi Bandung.

Bahlefi, A.R. 2013. *Analisis Deformasi Gunung Merapi Tahun 2012 dari Data Pengamatan GPS*. Semarang: Universitas Diponegoro.

Bakry, H. Oemar. 2001. *Tafsir Rahmat*.

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, Van. R.W. 1949. *The Geology of Indonesia*, Martinus Nyhoff, The Haque. Nederland.

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

BPPTKG. 2016. Pemantauan. Diakses tanggal 31 Maret 2021, dari https://merapi.bgl.esdm.go.id/pub/page.php?idf-11.

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

ESDM. (2014, June 13). Gunung Merapi Jawa Tengah. Diakses tanggal 29 Maret 2021, dari https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/data-dasar-gunungapi/542-g-merapi.

Grandis, H. 2009. Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika. *Himpunan Ahli Geofisika Indonesia*.

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

Hartanto, Y. 2017. Monitoring Gunungapi Menggunakan Tiltmeter. Diakses pada 17 Mei 2021, dari https://doeplayer.info/34972448-Monitoring-gunung-api-menggunakan-tiltmeter.html.

Islamiyah, O. R. A., Santoso, A. B., & Minarto, E. 2018. Estimasi Kedalaman dan Perubahan Volume Sumber Tekanan Gunung Merapi Berdasarkan Pengamatan Data Tiltmeter. Jurnal Sains dan Seni ITS, 7(2), 70-74.

Jamel, I., 2012. *Analisis Deformasi Gunung berapi Papandayan Berdasarkan Data Pengamatan GPS Tahun 2002 - 2011*. Bandung: Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB.

KBBI, 2021. *Kamus Besar Bahasa Indonesia* (KBBI). http://kbbi.web.id

Kiswiranti, D. & Kirbani, H. 2013. Analisis Statistik Temporal Erupsi Gunung Merapi. *Jurnal Fisika* Vol. 3 No. 1, Mei 2013: 37.

Kuang, S., 1996. *Geodetic Network Analysis & Optimal Design*. Michigan: Ann Arbor Press, Inc.

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

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

Lisowski, M. 2007. Analitycal Volcano Deformation Source Models. In. D. Dzurisin (Ed.), *Volcano Deformation: New Geodetic Monitoring Techniques.*Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49302-0.

Masterlark, M. 2007. *Magma Intrusion and Deformation Predictions: Sensitivities to the Mogi Assumption.Journal of Geophysical Research,* Vol. 112.

Mogi, K. (1958). Relations Between The Eruption of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces Around Them. *Earth Res Inst, 36,* 99- 134.

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

Musthafa, Ahmad Al-Maraghi. 1989. *Tafsir Al-Maraghiy.* Semarang: Tohaputra.

Newhall, C. G., Bronto, S., Alloway, B., Banks, N. G., Bahar, I., Del Marmol, M.A., Hadisantono, R. D., Holcomb, R. T., McGechin, J., Miksic, 3. N. Rubin, M. Sayudi, S.D., Sukhyar, R., Andreastuti, S., Tilling, R. 1., Torley, R., Trimble, D., & Wirakusumah, A.D. (2000). 10.000 Years of Explosive Eruption of Merapi Volcano, Central Java: Archaeological and Modern Implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1000*, 9-50. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00132-3.

Purnomo, B.J. 2014. Analisa Deformasi untuk Prediksi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Data Gps (Studi Kasus: Gunung Merapi, Daerah Istimewa Yogyakarta). *GEOID* Vol. 10, No. 01, Agustus 2014:81.

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.

Sambodo, Endro. 2012. *Ring Of Fire: Apakah Itu?*.https://endrosambodo1984. wordpress.com/2012/04/19/ring-of-fire-apakah-itu/ diakses pada tanggal 7 Februari 2021.

Sari, S. 2007. *Sistem Pemantauan Gunungapi dan Bencana Geologi: Analisis Deformasi Gunung Kelut Berdasarkan Data Tilt Tahun 2006 sampai Februari 2007 Sebagai Studi Kasus*. Purwokerto: Universitas Jendral Soedirman.

Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al-Mishbah Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an Volume 10*. Jakarta: Lentera Hati.

Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al-Mishbah Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an Volume 15*. Jakarta: Lentera Hati.

Software Maktabah Tsamilah. *Bukhari*. No. 2273.

USGS (2013, April 4). Volcano Monitoring Animation: Volcano Deformation. Diakses pada tanggal 14 Mei 2021, dari https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v-kc_T4buG2gE.

Wismaya, Y.G., Anjasmara, I.M., & Sulistiyani. 2016. Analisis Deformasi Gunung Merapi Berdasarkan Data Pengamatan GPS Februari-Juli 2015. Jurnal Teknik ITS, 5(2), 427-431.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Penurunan Rumus Model Mogi

$$\begin{pmatrix}\omega_x\\ \omega_y\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{\partial w}{\partial x}\\ \frac{\partial w}{\partial y}\end{pmatrix}$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}$$

Komponen X (ω_x) :

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\omega_x = \frac{\partial (a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} (d(x^2 + y^2 + d^2)^{-\frac{3}{2}}))}{\partial x}$$

$$\omega_x = a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} (d \frac{-3}{2} (x^2 + y^2 + d^2)^{-\frac{5}{2}} 2x)$$

$$\omega_x = a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} \left(\frac{-3\, dx}{(x^2 + y^2 + d^2)^{\frac{5}{2}}} \right)$$

$$\omega_x = a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} \left(\frac{-3\, dx}{R^5} \right)$$

Komponen Y (ω_y) :

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\omega_y = \frac{\partial (a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} (d(x^2 + y^2 + d^2)^{-\frac{3}{2}}))}{\partial y}$$

$$\omega_y = a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} (d \frac{-3}{2} (x^2 + y^2 + d^2)^{-\frac{5}{2}} 2y)$$

$$\omega_y = a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} \left(\frac{-3\, dy}{(x^2 + y^2 + d^2)^{\frac{5}{2}}} \right)$$

$$\omega_y = a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} \left(\frac{-3\, dy}{R^5} \right)$$

Persamaan Model Mogi :

$$\begin{pmatrix}\omega_x\\ \omega_y\end{pmatrix} = a^3 \Delta P \frac{(1-v)}{G} \begin{pmatrix}\frac{-3\, dx}{R^5}\\ \frac{-3\, dy}{R^5}\end{pmatrix}$$

Lampiran 2: Script Matlab Model Mogi

```
clear
clc

disp('-----PERIODE 1-----')

%stasiun
%SELOKOPO
    xs_SEL = 439544;
    ys_SEL = 9167528;
%GRAWAH
    xs_GRW = 439486;
    ys_GRW = 9168550;
%LABUHAN
    xs_LBH = 438783;
    ys_LBH = 9164633;

%didefinisikan
v = 0.25;
G = 30000000000;
zpuncak = 2900;

%looping parameter
alpha = [100:100:1000];
deltap = [1000000 10000000 100000000 1000000000 10000000000
100000000000];
d = [-2600:100:10000];
xc = [439000:50:440000];
yc = [9166900:50:9167900];

for i = 1:10;
for j = 1:6;
for k = 1:127;
for l = 1:21;
for m = 1:21;

%jarak horizontal komponen x(dx) dan y(dy)
dx_SEL(l) = xs_SEL - xc(l);
dy_SEL(m) = ys_SEL - yc(m);

dx_GRW(l) = xs_GRW - xc(l);
dy_GRW(m) = ys_GRW - yc(m);

dx_LBH(l) = xs_LBH - xc(l);
dy_LBH(m) = ys_LBH - yc(m);

%jarak stasiun terhadap sumber
R_SEL(l,m,k) = sqrt(dx_SEL(l)^2+dy_SEL(m)^2+(d(k)+zpuncak)^2);
R_GRW(l,m,k) = sqrt(dx_GRW(l)^2+dy_GRW(m)^2+(d(k)+zpuncak)^2);
R_LBH(l,m,k) = sqrt(dx_LBH(l)^2+dy_LBH(m)^2+(d(k)+zpuncak)^2);

%persamaan nilai ungkitan setiap komponen di setiap stasiun
Wx_SEL(i,j,k,l,m) = alpha(i)^3*deltap(j)*((1-v)/G)*((-
3*abs(dx_SEL(l)))/R_SEL(l,m,k)^5);
```

```
Wy_SEL(i,j,k,l,m) = alpha(i)^3*deltap(j)*((1-v)/G)*((-
3*abs(dy_SEL(l)))/R_SEL(l,m,k)^5);
Wx_GRW(i,j,k,l,m) = alpha(i)^3*deltap(j)*((1-v)/G)*((-
3*abs(dx_GRW(l)))/R_GRW(l,m,k)^5);
Wy_GRW(i,j,k,l,m) = alpha(i)^3*deltap(j)*((1-v)/G)*((-
3*abs(dy_GRW(l)))/R_GRW(l,m,k)^5);
Wx_LBH(i,j,k,l,m) = alpha(i)^3*deltap(j)*((1-v)/G)*((-
3*abs(dx_LBH(l)))/R_LBH(l,m,k)^5);
Wy_LBH(i,j,k,l,m) = alpha(i)^3*deltap(j)*((1-v)/G)*((-
3*abs(dy_LBH(l)))/R_LBH(l,m,k)^5);

%data observasi
Wx_obs_SEL = -35;
Wy_obs_SEL = -14;
Wx_obs_GRW = 8.5;
Wy_obs_GRW = 8;
Wx_obs_LBH = 0.11;
Wy_obs_LBH = 0.004;

%nilai residual observasi dan teoritis
Res_min_SEL(i,j,k,l,m) = sqrt((abs(Wx_obs_SEL)-
abs(Wx_SEL(i,j,k,l,m)))^2+(abs(Wy_obs_SEL)-
abs(Wy_SEL(i,j,k,l,m)))^2);
Res_min_GRW(i,j,k,l,m) = sqrt((abs(Wx_obs_GRW)-
abs(Wx_GRW(i,j,k,l,m)))^2+(abs(Wy_obs_GRW)-
abs(Wy_GRW(i,j,k,l,m)))^2);
Res_min_LBH(i,j,k,l,m) = sqrt((abs(Wx_obs_LBH)-
abs(Wx_LBH(i,j,k,l,m)))^2+(abs(Wy_obs_LBH)-
abs(Wy_LBH(i,j,k,l,m)))^2);

%nilai residual total
Res_total(i,j,k,l,m) = sqrt
(Res_min_SEL(i,j,k,l,m)+Res_min_GRW(i,j,k,l,m)+Res_min_LBH(i,j,k,l
,m));

end
end
end
end
end

%pencarian nilai residual terkecil
Rmin = min(min(min(min(min(Res_total)))))
[i,j,k,l,m] = ind2sub(size(Res_total),find(Res_total==Rmin))
```

```
clear
clc

%rigiditas
G = 30000000000;

%poisson ratio
v = 0.25;

%shear modulus of the host rock
u = 400000000

%effective bulk modulus of magma stored in recervoir
k = 1320000000

%radius sumber tekanan
alpha_1 = ;
alpha_2 = ;
alpha_3 = ;
alpha_4 = ;
alpha_5 = ;
alpha_6 = ;

%perubahan tekanan
delta_P1 = ;
delta_P2 = ;
delta_P3 = ;
delta_P4 = ;
delta_P5 = ;
delta_P6 = ;

%cavity volume change
Vcavity_1 = (delta_P1/G)*pi*alpha_1^3;
Vcavity_2 = (delta_P2/G)*pi*alpha_2^3;
Vcavity_3 = (delta_P3/G)*pi*alpha_3^3;
Vcavity_4 = (delta_P4/G)*pi*alpha_4^3;
Vcavity_5 = (delta_P5/G)*pi*alpha_5^3;
Vcavity_6 = (delta_P6/G)*pi*alpha_6^3;

%magma volume change
Vmagma_1 = Vcavity_1/(2*(1-v))*(1+((4*u)/(3*k)))
Vmagma_2 = Vcavity_2/(2*(1-v))*(1+((4*u)/(3*k)))
Vmagma_3 = Vcavity_3/(2*(1-v))*(1+((4*u)/(3*k)))
Vmagma_4 = Vcavity_4/(2*(1-v))*(1+((4*u)/(3*k)))
Vmagma_5 = Vcavity_5/(2*(1-v))*(1+((4*u)/(3*k)))
Vmagma_6 = Vcavity_6/(2*(1-v))*(1+((4*u)/(3*k)))
```

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 : **ALFITA SYIFAUL QOLBI**
NIM : **17640022**
Fakultas/ Jurusan : **Sains dan Teknologi/ Fisika**
Judul Skripsi : **Estimasi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Gunung Merapi Berdasarkan Data Tiltmeter Menggunakan Model Mogi**
Pembimbing I : **Drs. Abdul Basid, M.Si**
Pembimbing II : **Dr. Erna Hastuti, M.Si**

No	Tanggal	HAL	Tanda Tangan
1	17 Maret 2021	Konsultasi Bab I, II, dan III	
2	5 April 2021	Konsultasi Bab I, II, dan III dan Acc	
3	21 April 2021	Konsultasi Data	
4	8 Mei 2021	Konsultasi Program	
5	24 Oktober 2021	Konsultasi Data Hasil Bab IV	
6	26 Oktober 2021	Konsultasi Kajian Agama	
7	24 November 2021	Konsultasi Bab IV dan V	
8	20 Desember 2021	Konsultasi Kajian Agama dan Acc	
9	23 Desember 2021	Konsultasi Semua Bab, Abstrak dan Acc	

Malang, 23 Desember 2021
Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika,

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

Dipindai dengan CamScanner