

SKRIPSI

**ANALISIS DEFORMASI UNTUK PREDIKSI LOKASI
SUMBER TEKANAN DAN VOLUME SUPLAI MAGMA
MENGUNAKAN DATA TILT (STUDI KASUS: GUNUNG
MERAPI)**

Disusun dan diajukan oleh

YUSRIN ANNISA

H061171007



**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2021

HALAMAN JUDUL

SKRIPSI

**ANALISIS DEFORMASI UNTUK PREDIKSI LOKASI
SUMBER TEKANAN DAN VOLUME SUPLAI MAGMA
MENGUNAKAN DATA TILT (STUDI KASUS: GUNUNG
MERAPI)**

Disusun dan diajukan oleh

YUSRIN ANNISA

H061171007



**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS DEFORMASI UNTUK PREDIKSI LOKASI SUMBER TEKANAN
DAN VOLUME SUPLAI MAGMA MENGGUNAKAN DATA TILT (STUDI
KASUS: GUNUNG MERAPI)**

Disusun dan diajukan oleh

YUSRIN ANNISA

H061171007

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian

Studi Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu

Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

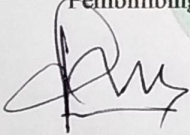
pada tanggal 12 April 2021


dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,


Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping,


Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, MT.Surv.
NIP. 196406161989031006


Muhammad Fawzy Ismullah Massinai, S.Si, MT.
NIP. 199111092019031010

Ketua Program Studi,


Dr. Muh. Almuhammad Hamzah, M.Eng.
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama : Yusrin Annisa
NIM : H061171007
Program Studi : Geofisika
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“Analisis Deformasi untuk Prediksi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai
Magma Menggunakan Data Tilt (Studi Kasus: Gunung Merapi)”

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka siaya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 12 April 2021

Yang Menyatakan


Yusrin Annisa

ABSTRAK

Gunung Merapi merupakan salah satu gunungapi di Indonesia yang memiliki aktivitas vulkanisme yang tinggi. Untuk meminimalisir dampak erupsi Gunung Merapi diperlukan suatu upaya berupa pemantauan aktivitas Gunung Merapi. Dalam penelitian ini dilakukan pemantauan deformasi Gunung Merapi menggunakan tiltmeter selama periode Juni hingga Desember 2020. Digunakan Model Mogi untuk mendapatkan estimasi lokasi sumber tekanan dan volume suplai magma Gunung Merapi. Deformasi permukaan yang terjadi di Gunung Merapi selama pengamatan dipantau dengan menggunakan 3 stasiun tiltmeter, di mana deformasi paling besar terjadi di Stasiun Selokopo kemudian Stasiun Grawah yang terletak di wilayah Utara Gunung Merapi. Sedangkan deformasi paling kecil terjadi di Stasiun Labuhan yang terletak di wilayah Selatan Gunung Merapi. Dari hasil penelitian ini didapatkan estimasi kedalaman sumber tekanan Gunung Merapi adalah berkisar pada kedalaman 400 meter hingga 900 meter dari puncak yang berada di wilayah Utara Gunung Merapi. Adapun volume suplai magma yang diperoleh selama periode pemantauan yaitu sebesar 10.2 Juta m³.

Kata Kunci: Deformasi; Gunung Merapi; Model Mogi; Lokasi Sumber Tekanan; Volume Suplai Magma.

ABSTRACT

Merapi volcano is one of the volcanoes in Indonesia which has a high volcanic activity. To minimize the impact of the eruption of Merapi volcano, an effort is needed in the form of monitoring the activities of Merapi volcano. In this research, monitoring of the deformation of Merapi volcano using a tiltmeter during the period Juny to December 2020. The Mogi's Model is used to obtain an estimate of the location of the pressure source and the volume of magma supply for Merapi volcano. Surface deformation that occurred at Merapi volcano during the observation was monitored using 3 tiltmeter stations, where the greatest deformation occurred at Selokopo Station then Grawah Station which is located in the Northern region of Merapi volcano. Meanwhile, the smallest deformation occurred at Labuhan Station which is located in the Southern area of Merapi volcano. From the results of this study, the estimated depth of the pressure source of Merapi volcano is around 400 meters to 900 meters from the peak in the North region of Merapi volcano. The volume of magma supply obtained during the monitoring period is 10.2 Mm³.

Keywords: Deformation; Merapi Volcano; Mogi's Model; Pressure Source Location; Magma Supply Volume.

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah Rabbil Alamin, segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul: “**Analisis Deformasi untuk Prediksi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Menggunakan Data Tilt (Studi Kasus: Gunung Merapi)**”, yang merupakan tugas akhir untuk melengkapi persyaratan mencapai gelar Sarjana Sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Dalam tulisan ini, penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari bimbingan, bantuan, dukungan, serta motivasi dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini, izinkan penulis menghanturkan ucapan terima kasih yang tak terhingga khususnya kepada kedua orang tua penulis, ayahanda **Iskandar**, ibunda **Hasmiati**, abang **Roni Darmawan** dan kakak **Reski Amalia** yang telah memberikan kasih sayang, motivasi dan do’a yang tak henti-hentinya, semoga Allah SWT senantiasa membalas semua kebaikan hati kalian.

Penulis juga ingin menyampaikan penghormatan, rasa terima kasih yang tulus serta penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. **Dr. Amiruddin, M.Si** selaku Dekan FMIPA Unhas dan **Dr. A. Ilham Latunra** selaku Wakil Dekan bidang Kemahasiswaan dan Alumni yang telah membimbing dalam masalah akademik maupun organisasi.

2. **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen Geofisika FMIPA Unhas yang telah berjuang membangun nama baik Geofisika Unhas.
3. **Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, MT.Surv** selaku Pembimbing Utama dan **Muh. Fawzy Ismullah M., S.Si, MT** selaku Pembimbing Pertama dan Penasihat Akademik yang telah banyak meluangkan waktu dan pikirannya serta memberi motivasi, masukan dan arahnya dalam penyusunan skripsi ini.
4. **Nurnaning Aisyah**, selaku pembimbing eksternal dari BPPTKG (Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi). Terimakasih atas segala waktu, ilmu, nasihat, dan segala hal yang diberikan untuk penulis, hingga akhirnya penulis mampu menyelesaikan skripsi seperti sekarang ini.
5. **Dr. Muh. Hamzah, M.Si** dan **Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si** selaku dosen penguji yang telah banyak memberi masukan, saran, serta kritiknya demi penyempurnaan skripsi ini.
6. **Alm. Dr. Lantu, M.Eng, Sc. DESS** selaku Penasihat Akademik yang telah banyak memberikan nasehat dan arahan kepada penulis. Semoga beliau ditempatkan di surga. *AL-FATIHAH*.
7. **Dosen-dosen Geofisika** yang telah memberikan ilmu serta bimbingan selama perkuliahan. Terima kasih kepada **Staf Pegawai** yang telah banyak membantu.

8. Saudara-saudara seperjuanganku **Geofisika'17**, sangat bersyukur bisa menjadi bagian dari kalian, terima kasih untuk suka duka selama ini.
9. Teman-teman **HIMAFI'17**, “Teguh dalam Keyakinan, Kukuh dalam Kebersamaan”.
10. Teman-teman **MIPA 2017**, “Kami Satu Kami Bersaudara”.
11. Kakak-kakak, teman-teman, dan adik-adik **HMGF FMIPA UNHAS** yang telah memberikan banyak bantuan dalam menghadapi dunia kampus.
12. Seluruh member dan alumni **SEG UNHAS SC**, terima kasih atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menjadi bagian dari organisasi yang luar biasa ini.
13. Teman-teman BPH dan staff **Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia (HMGI)**. Salam Kabinet Kencana Nusantara, Salam Berintegrasi Bersinergi.
14. Kakak-kakak **Sikola Inspirasi Alam (SIA)** yang selama ini telah memberi banyak sekali pelajaran bagi saya untuk saling “Berkumpul Berbagi Bahagia”.
15. Semua pihak yang tidak mampu penulis sebutkan satu persatu, yang telah banyak memberi bantuan dan kemudahan dalam proses penulisan ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini sangat jauh dari kesempurnaan dikarenakan keterbatasan kemampuan yang dimiliki oleh penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan berbagai kritik dan saran yang bersifat membangun demi kebaikan skripsi ini dan tentunya juga buat kebaikan penulis sendiri. Akhir kata, semoga Allah SWT memberikan segala kebaikan kepada seluruh pihak yang telah

memberikan bantuannya baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna terutama bagi penulis dan pihak-pihak terkait pada umumnya. Semoga Allah senantiasa melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya. Aamiin.

Makassar, 12 April 2021

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Yusrin Annisa', written in a cursive style.

Yusrin Annisa

DAFTAR ISI

LEMBAR SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
I.4 Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Gunungapi	5
II.1.1 Proses Pembentukan Gunungapi	7
II.2 Gunung Merapi	9
II.2.1 Sejarah Terbentuknya Gunung Merapi	10
II.2.2 Sejarah Letusan Gunung Merapi	11
II.2.3 Stasiun Pemantauan Gunung Merapi	14
II.3 Deformasi	17

II.3.1	Deformasi Gunung Merapi.....	18
II.3.2	Metode Deformasi	22
II.4	Monitoring Gunungapi Menggunakan Tiltmeter	23
II.5	Penentuan Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Menggunakan Model Mogi.....	26
II.5.1	Metode <i>Grid Search</i>	29
 BAB III METODOLOGI		
III.1	Peta Lokasi	31
III.2	Alat dan Bahan	32
III.3	Teknik/ Prosedur Penelitian	33
III.4	Bagan Alir	34
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
IV.1	Analisis Deformasi Menggunakan Data Tilt.....	35
IV.1.1	Analisis Deformasi Stasiun Grawah	37
IV.1.2	Analisis Deformasi Stasiun Selokopo.....	38
IV.1.3	Analisis Deformasi Stasiun Labuhan.....	39
IV.1.4	Pembacaan Grafik Tiltmeter	39
IV.2	Estimasi Lokasi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Model Mogi....	40
IV.3	Estimasi Volume Suplai Magma.....	45
 BAB V PENUTUP		
V.1	Kesimpulan	48
V.2	Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA		49

LAMPIRAN.....	53
----------------------	-----------

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Sebaran Gunungapi di Indonesia	6
Gambar 2.2 Penampang Tektonik	8
Gambar 2.3 Peta Lokasi Gunung Merapi	9
Gambar 2.4 Sketsa Penampang Skematik Evolusi Merapi Sejak Zaman Pra Merapi Sampai Saat Ini	11
Gambar 2.5 Grafik Statistik Letusan Gunung Merapi Sejak Abad 18, 19, dan 20	13
Gambar 2.6 Skema Jaringan Monitoring Gunung Merapi	14
Gambar 2.7 Jenis-Jenis Deformasi pada Benda	18
Gambar 2.8 Gejala Deformasi Pada Gunungapi Aktif	20
Gambar 2.9 Monitoring Gunungapi dengan Tiltmeter	24
Gambar 2.10 Urutan Inflasi ke Deflasi Berkaitan dengan Dinamika Magma dan Monitoring Tiltmeter dan GPS	25
Gambar 2.11 Model Mogi untuk Penentuan Sumber Tekanan Magma	26
Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian.....	31
Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian.....	34
Gambar 4.1 Arah Ungkitan dalam Kuadran	35
Gambar 4.2 Perubahan Ungkitan Komponen x ($\omega_{x_{obs}}$) dan y ($\omega_{y_{obs}}$) Periode Juni Hingga Desember 2020 pada (a) Stasiun Grawah, (b) Stasiun Selokopo, dan (c) Stasiun Labuhan	36
Gambar 4.3 Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 1 Dimensi.....	43

Gambar 4.4 Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 2 Dimensi. (a)
Penampang Barat-Timur. (b) Penampang Selatan-Utara43

Gambar 4.5 Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 3 Dimensi.....44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Lokasi Stasiun Tiltmeter	32
Tabel 4.1 Perubahan Nilai Ungkitan Tiap Stasiun	40
Tabel 4.2 Parameter Model <i>Grid Search</i> Model Mogi	41
Tabel 4.3 Hasil Prediksi Lokasi Sumber Tekanan Magma Gunung Merapi Menggunakan Model Mogi	42
Tabel 4.4 Estimasi Volume Suplai Magma	45

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I: Penurunan Rumus Model Mogi

Lampiran II: Script Matlab Model Mogi

Lampiran III: Script Matlab Volume Suplai Magma

Lampiran IV: Perbandingan Data Observasi dengan Data Teoritikal

Lampiran V: Pemodelan Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 1 Dimensi

Lampiran VI: Pemodelan Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 2 Dimensi

Lampiran VII: Pemodelan Lokasi Sumber Tekanan Magma dalam 3 Dimensi

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki 13% dari jumlah gunungapi di dunia, yaitu 129 gunungapi berstatus aktif dan 500 gunungapi berstatus tidak aktif, selain itu 60% dari jumlah gunungapi tersebar memiliki potensi letusan yang cukup besar. Keaktifan gunungapi tersebut berkaitan dengan letak Indonesia yang berada di antara 3 lempeng tektonik utama dunia yang dikenal sebagai *Pasific Ring of Fire*. Tiga lempeng tektonik yang dimaksud yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Lempeng Indo-Australia menunjam di bawah Lempeng Eurasia yang mengontrol aktifnya salah satu gunungapi di Pulau Jawa, yaitu Gunung Merapi (Romsiyatin & Basid, 2012; Gosal et al., 2018; MAGMA Indonesia, 2020).

Gunung Merapi (2986 mdpl) terletak di perbatasan empat kabupaten yaitu Kabupaten Sleman (Provinsi DIY), Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali, dan Kabupaten Klaten yang ketiganya termasuk di dalam wilayah Provinsi Jawa Tengah. Posisi geografinya terletak pada 7°32'30" LS dan 110°26'30" BT (ESDM, 2014). Gunungapi ini memiliki ciri fisik berupa *stratovolcano* dengan kubah-kubah lava sisa erupsi sebelumnya yang tertinggal di area puncak. Aktivitas Gunung Merapi relatif tinggi dengan fase istirahat atau periode antar erupsi yang relatif pendek, sehingga menarik berbagai ahli kebumihan untuk memahami proses yang terjadi di bawah gunungapi tersebut (Ramdhan et al., 2019).

Aktivitas gunungapi merupakan kejadian alami yang sulit diduga. Indikasi aktivitas suatu gunungapi antara lain adanya pertumbuhan kubah lava dan letusan paroksimal yang disertai awan panas. Aktivitas Gunung Merapi yang membahayakan adalah letusan yang disertai awan panas, semburan gas beracun, aliran lava pijar ataupun bahaya sekunder sebagai efek letusan. Letusan yang disertai awan panas sukar diperkirakan sehingga banyak yang tidak terselamatkan pada kejadian tersebut (Sari & Suparta, 2018).

Dampak negatif yang ditimbulkan oleh Gunung Merapi dapat dikurangi dengan melakukan pemantauan sebagai langkah awal dalam mitigasi bencana alam. Metode pemantauan aktivitas gunungapi yang telah diaplikasikan saat ini antara lain metode seismik, visual, deformasi, kimia gas, termal, gayaberat, geomagnetik, dan penginderaan jauh (Jamel et al., 2013). Metode deformasi banyak diaplikasikan dalam pemantauan gunungapi dengan berbagai macam sensor dan sistem. Tiltmeter adalah salah satu alat yang digunakan dalam pemantauan deformasi yang dapat menunjukkan perubahan kemiringan dari suatu gunungapi (Bahlefi et al., 2013).

Analisis deformasi menggunakan data tilt maupun data lainnya telah banyak digunakan, beberapa di antaranya pernah diteliti oleh Beauducel dan Cornet (1999) menggunakan alat GPS dan tiltmeter, kemudian penelitian serupa yang dilakukan oleh Aisyah et al. (2018) dengan menggunakan data EDM periode 2006 dan 2010. Pemantauan deformasi untuk menentukan estimasi lokasi sumber tekanan dan volume suplai magma suatu gunungapi penting dilakukan agar dapat mengetahui karakteristik mekanisme internal suatu gunungapi. Pemantauan tersebut diharapkan

dapat membantu dalam penyusunan langkah mitigasi bencana gunungapi sebagai upaya untuk meminimalisir korban jiwa maupun korban material.

Berdasarkan hal tersebut, penulis tertarik untuk melakukan kajian mengenai lokasi sumber tekanan dan volume suplai magma dengan menggunakan metode deformasi. Penelitian tersebut akan dituangkan ke dalam bentuk skripsi yang berjudul “Analisis Deformasi untuk Prediksi Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Menggunakan Data Tilt (Studi Kasus: Gunung Merapi)”

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Bagaimana deformasi permukaan Gunung Merapi?
2. Dimana lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi?
3. Berapa besar volume suplai magma Gunung Merapi?

I.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah melakukan analisis deformasi Gunung Merapi dengan menggunakan data tilt tahun 2020 pada tiga stasiun pengamatan, yaitu Stasiun Grawah, Selokopo, dan Labuhan. Data berupa data sekunder dalam bentuk grafik pembacaan tiltmeter. Wilayah studi berada di wilayah Gunung Merapi pada koordinat $7,50856^{\circ}$ - $7,59890^{\circ}$ LS dan $110,41073^{\circ}$ - $110,50149^{\circ}$ BT. Penentuan lokasi sumber tekanan dan volume suplai magma dengan menggunakan Model Mogi.

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui deformasi yang terjadi di permukaan Gunung Merapi.
2. Mengetahui lokasi sumber tekanan magma Gunung Merapi.
3. Mengetahui besar volume suplai magma Gunung Merapi.

BAB II

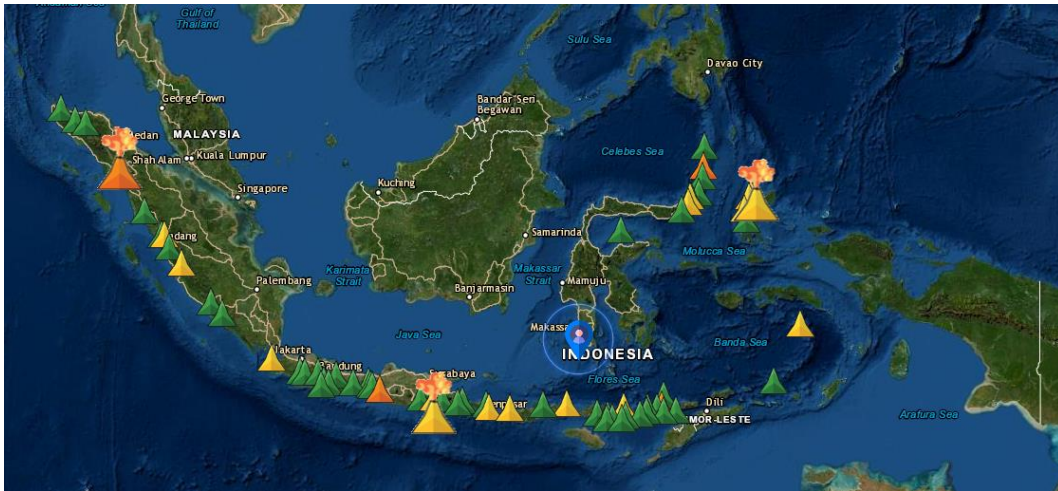
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Gunungapi

Vulkanologi merupakan ilmu yang mempelajari tentang vulkano, lava, magma, dan fenomena geologi dan geofisika yang menyertainya. Gunungapi adalah lubang atau rekahan pada kerak bumi yang mengeluarkan magma dan gas-gas dari dalam bumi. Aktivitas vulkanik meliputi keluarnya batuan yang kemudian membentuk pegunungan atau bentuk-bentuk seperti gunung dalam waktu tertentu (PVMBG, 2015). Sedangkan vulkanisme menurut Noor (2009) dapat didefinisikan sebagai tempat atau lubang di atas muka bumi yang mengeluarkan bahan atau bebatuan yang pijar atau gas yang berasal dari bagian dalam bumi ke permukaan, kemudian produknya akan disusun dan membentuk sebuah kerucut atau gunung.

Berdasarkan pengukuran *Very-Long Baseline Interferometry*, *VLBI* (Nurwihastuti et al., 2013) diketahui, saat ini Lempeng Samudera Indo-Australia bergerak ke Utara dengan kecepatan rata-rata 5,5 – 7 sentimeter per tahun, Lempeng Samudera Pasifik bergerak ke arah Barat Laut dengan kecepatan rata-rata lebih dari 7 sentimeter per tahun dan Eurasia bergerak ke arah Barat Daya dengan kecepatan rata-rata 2,6 – 4,1 sentimeter per tahun. Akibat dari pertemuan lempeng tersebut Indonesia memiliki gunungapi aktif sebanyak 129, terbanyak di dunia, dan menduduki peringkat pertama dengan jumlah korban jiwa terbanyak. Jalur gunungapi di Indonesia sepanjang 7000 km, dari Sumatera – Jawa – Bali – NT – Banda – Halmahera – Sulut, seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Karena satu

rangkaian, mekanisme atau karakter masing-masing gunung pun kurang lebih sama. Mekanismenya terjadi di bawah laut, tepatnya di lapisan litosfer bumi tempat terjadinya subduksi atau penunjaman akibat pergeseran Lempeng Indo-Australia, yakni tempat Indonesia dan gunung itu berada (Nandi, 2006; MAGMA Indonesia, 2020).



Gambar 2.1 Peta Sebaran Gunungapi di Indonesia (MAGMA Indonesia, 2020).

Berdasarkan catatan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, gunungapi aktif di Indonesia terbagi dalam tiga kelompok berdasarkan sejarah letusannya, yaitu (Bemmelen, 1949; Van Padang, 1951; Kusumadinata, 1979; MAGMA Indonesia, 2020):

- 1) Gunungapi Tipe A (79 buah), merupakan gunungapi yang memiliki catatan sejarah letusan sejak tahun 1600.
- 2) Gunungapi Tipe B (29 buah), merupakan gunungapi yang memiliki catatan sejarah letusan sebelum tahun 1600.

- 3) Gunungapi Tipe C (21 buah), merupakan gunungapi yang tidak memiliki catatan sejarah letusan, tetapi masih memperlihatkan jejak aktivitas vulkanik, seperti solfatara atau fumarol.

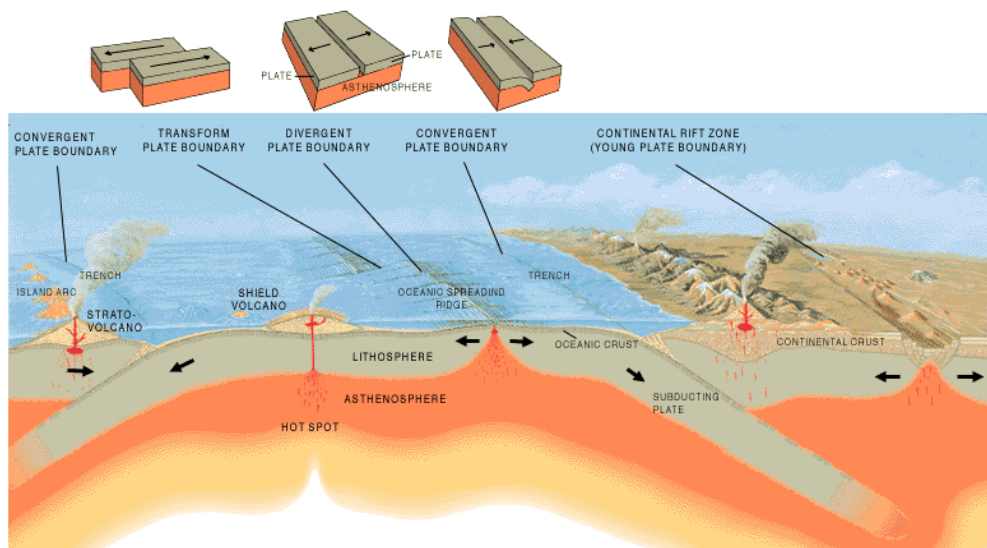
II.1.1 Proses Pembentukan Gunungapi

Pembentukan gunungapi secara ilmiah dapat dijelaskan dengan teori tektonik lempeng. Dasar teori ini mengacu pada konsep *Continental Drift* (Pergerakan Benua) yang diusulkan pertama kali oleh Alfred Lothar Wegener (1880-1930), seorang ahli meteorologi Jerman. Selanjutnya teori tektonik menjadi alat utama untuk menjelaskan fenomena geologis seperti gempa bumi dan gunungapi. Salah satu inti teori ini adalah bahwa struktur bumi paling atas terdiri dari lempeng-lempeng yang saling bergerak satu dengan lainnya (PVMBG, 2015).

Lempeng tektonik adalah potongan kerak bumi di mantel paling atas yang berbentuk tak beraturan dan ukurannya sangat bervariasi antara beberapa ratus kilometer sampai ribuan kilometer panjangnya dengan tebal sampai puluhan ribu kilometer. Gerakan lempeng tersebut bisa konvergen (saling mendekat atau menumpuk), divergen (saling menjauh) atau bergeser horizontal (transform) seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 di bawah. Sumber-sumber gempa dan gunungapi biasanya terjadi pada batas-batas pergerakan lempeng tersebut. Namun ada juga gunungapi yang tumbuh di tengah-tengah lempeng benua akibat adanya retakan disebut dengan *Hot Spot*. Jadi hiposenter gempa bumi dan lokasi gunungapi tidak acak, tetapi mengikuti pada pola tektoniknya (PVMBG, 2015).

Pergerakan antar lempeng ini menimbulkan empat busur gunungapi berbeda (ESDM, 2015):

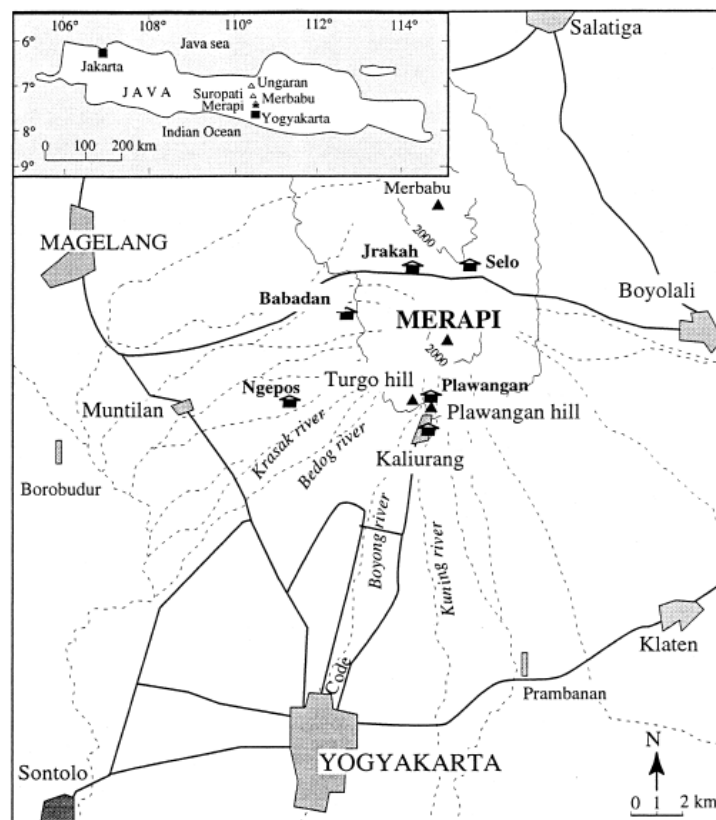
- 1) Pemekaran kerak samudera, lempeng bergerak saling menjauh sehingga memberikan kesempatan magma bergerak ke permukaan, kemudian membentuk busur gunungapi tengah samudera.
- 2) Tumbukan antar kerak, kerak samudera menunjam di bawah kerak benua. Akibat gesekan antar kerak tersebut terjadi peleburan batuan dan lelehan batuan ini bergerak ke permukaan melalui rekahan kemudian membentuk busur gunungapi di tepi benua.
- 3) Kerak benua menjauh satu sama lain secara horizontal, sehingga menimbulkan rekahan atau sesar. Sesar atau rekahan tersebut menjadi jalan ke permukaan lelehan batuan atau magma sehingga membentuk busur gunungapi tengah benua atau banjir lava sepanjang rekahan.
- 4) Penipisan kerak samudera akibat pergerakan lempeng memberikan kesempatan bagi magma menerobos ke dasar samudera, terobosan magma ini merupakan banjir lava yang membentuk deretan gunungapi perisai.



Gambar 2.2 Penampang Tektonik (USGS, 1999).

II.2 Gunung Merapi

Gunung Merapi (tinggi 2.986 m, diameter 28 km, luas 615,44 km² dan volume 612,57 km³) mempunyai tipe gunungapi *strato-volcano* dengan kubah lava, dibatasi oleh Gunung Merbabu (2000 m) di utaranya, sedang di sebelah selatannya terletak Dataran Yogyakarta. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.3, Gunung Merapi terletak di perbatasan Daerah Istimewa Yogyakarta (Sleman), Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali, dan Kabupaten Klaten (Jawa Tengah), dengan posisi geografi 7°32,5' LS dan 110°26,5' BT. Aktivitas Gunung Merapi diperkirakan telah berlangsung sejak 50.000 tahun yang lalu dengan volume rata-rata material yang dimuntahkannya dari dalam bumi sebesar 1.000.000 m³/tahun (Berthommier, 1990; Marliyani, 2010; Siswowidjoyo et al., 1995).



Gambar 2.3 Peta Lokasi Gunung Merapi (Voight et al., 2000).

Berdasarkan tatanan tektoniknya, Gunung Merapi terletak di zona subduksi, dimana Lempeng Indo-Australia menunjam di bawah Lempeng Eurasia yang mengontrol vulkanisme di wilayah Sumatera, Jawa, Bali dan Nusa Tenggara. Gunung Merapi muncul di bagian selatan dari kelurusan jajaran gunungapi di Provinsi Jawa Tengah mulai dari utara ke selatan yaitu Ungaran – Telomoyo – Merbabu – Merapi. Kelurusan ini merupakan sebuah sesar yang berhubungan dengan retakan akibat aktivitas tektonik yang mendahului vulkanisme di Jawa Tengah. Aktivitas vulkanisme ini bergeser dari arah utara ke selatan dan Gunung Merapi muncul paling muda (ESDM, 2014).

II.2.1 Sejarah Terbentuknya Gunung Merapi

Menurut Berthommier (1990) berdasarkan studi stratigrafi, sejarah Merapi dapat dibagi atas 4 bagian yaitu:

- 1) Pra Merapi (+ 400.000 tahun lalu)

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

- 2) Merapi Tua (60.000 – 8000 tahun lalu)

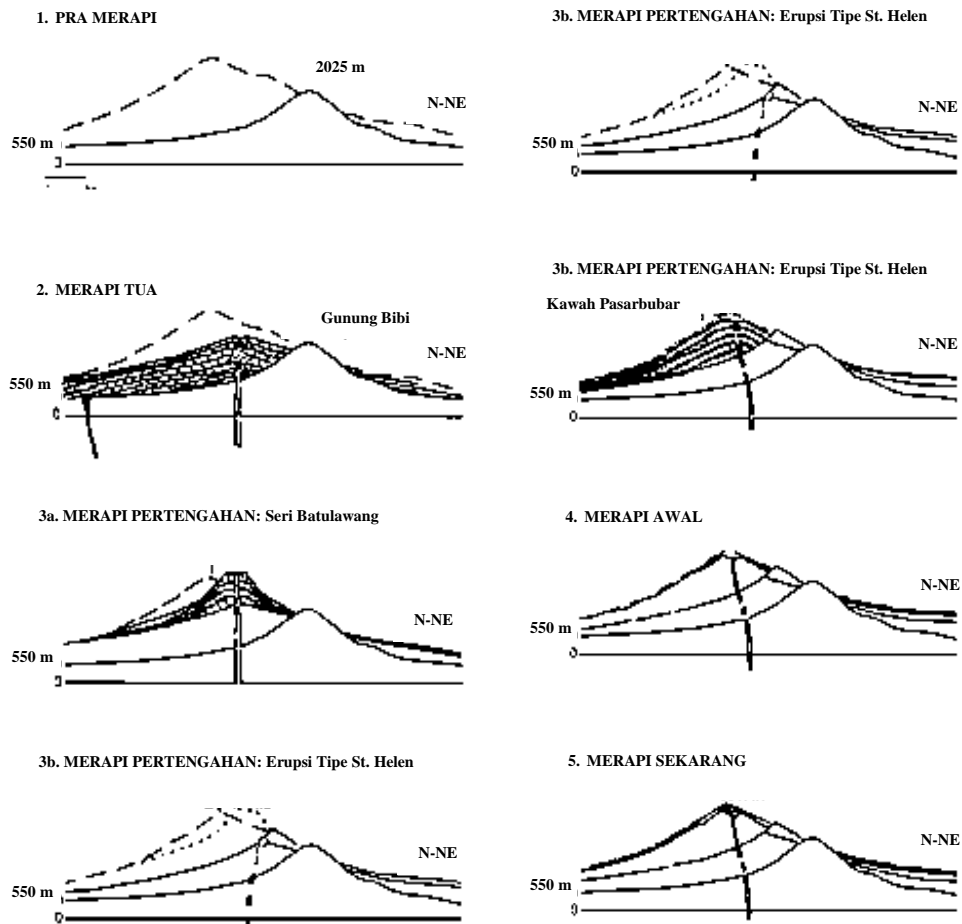
Pada masa ini mulai lahir yang dikenal sebagai Gunung Merapi yang merupakan fase awal dari pembentukannya dengan kerucut belum sempurna.

- 3) Merapi Pertengahan (8000 – 2000 tahun lalu)

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

- 4) Merapi Baru (2000 tahun lalu – sekarang)

Pada kawah Pasarubuar terbentuk kerucut puncak Merapi yang saat ini disebut sebagai Gunung Anyar yang saat ini menjadi pusat aktivitas Merapi. Adapun sketsa evolusi dari Gunung Merapi dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Sketsa Penampang Skematik Evolusi Merapi Sejak Zaman Pra-Merapi Sampai Saat Ini (Berthommier, 1990).

II.2.2 Sejarah Letusan Gunung Merapi

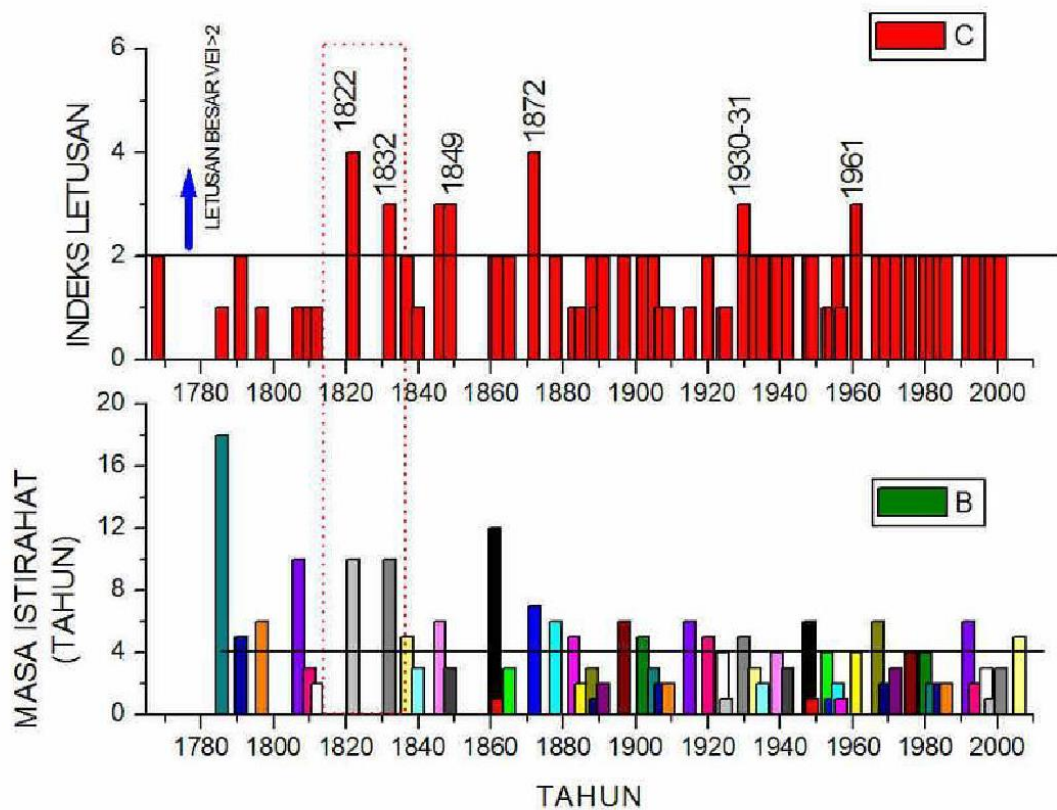
Sejarah letusan Gunung Merapi secara tertulis mulai tercatat sejak awal masa Kolonial Belanda sekitar abad ke-17. Letusan sebelumnya tidak tercatat secara jelas. Sedangkan letusan-letusan besar yang terjadi pada masa sebelum periode

Merapi baru, hanya didasarkan pada penentuan waktu relatif. Secara umum, sejarah letusan Gunung Merapi dapat dirangkum sebagai berikut (ESDM, 2014):

- 1) Pada periode 3000 - 250 tahun yang lalu tercatat lebih kurang 33 kali letusan, dengan 7 diantaranya merupakan letusan besar. Data tersebut menunjukkan bahwa letusan besar terjadi sekali dalam 150 - 500 tahun (Andreastuti et al., 2000).
- 2) Pada periode Merapi baru telah terjadi beberapa kali letusan besar yaitu abad ke-19 (tahun 1768, 1822, 1849, 1872) dan abad ke-20 yaitu 1930 - 1931. Erupsi abad ke-19 jauh lebih besar dari letusan abad ke-20, dengan awan panas mencapai 20 km dari puncak. Kemungkinan letusan besar terjadi sekali dalam 100 tahun (Newhall et al., 2000).
- 3) Aktivitas Merapi pada abad ke-20 terjadi minimal 28 kali letusan, letusan yang paling terjadi pada tahun 1931. Sudah $\frac{3}{4}$ abad tidak terjadi letusan besar.

Berdasarkan data yang tercatat sejak tahun 1600-an, Gunung Merapi meletus lebih dari 80 kali atau rata-rata sekali meletus dalam 4 tahun. Masa istirahat berkisar antara 1 - 18 tahun, artinya masa istirahat terpanjang yang pernah tercatat adalah 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 disimpulkan bahwa masa istirahat yang panjang, menentukan letusan yang akan datang relatif besar. Hal tersebut disebabkan karena berdasarkan fakta bahwa beberapa letusan besar, masa istirahatnya pendek. Sebaliknya pada saat mengalami istirahat panjang, letusan berikutnya ternyata kecil. Ada kemungkinan

juga bahwa periode panjang letusan pada abad ke-18 dan abad ke-19 disebabkan banyak letusan kecil yang tidak tercatat dengan baik, karena kondisi saat itu. Jadi besar kecilnya letusan lebih tergantung pada sifat kimia magma dan sifat fisika magma. Deskripsi singkat letusan Gunung Merapi yang tercatat disajikan pada Gambar 2.5 di bawah ini. Gambar tersebut menunjukkan grafik statistik letusan Gunung Merapi sejak abad ke-18. Pada abad ke-18 dan ke-19, letusan Gunung Merapi umumnya relatif besar dibanding letusan pada abad ke-20, sedangkan masa istirahatnya lebih panjang (ESDM, 2014).

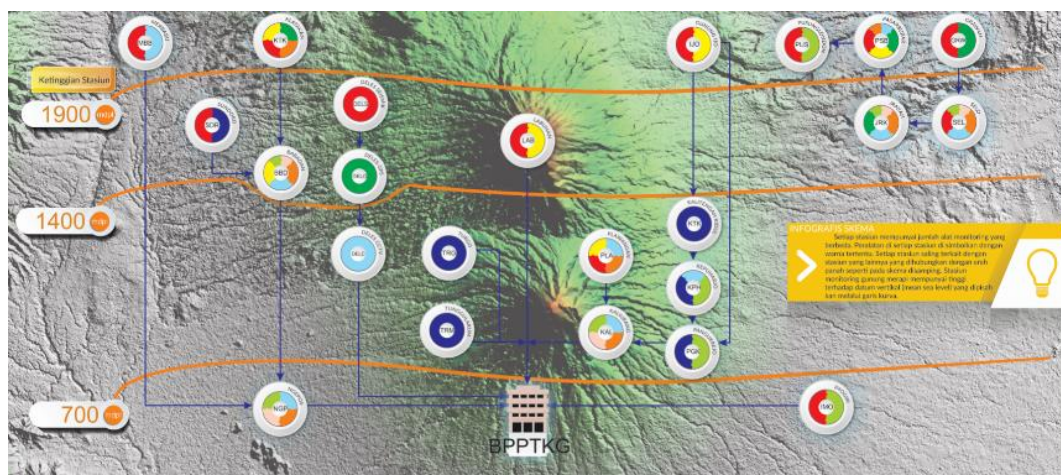


Gambar 2.5 Grafik Statistik Letusan Gunung Merapi Sejak Abad 18, 19, dan 20 (ESDM, 2014).

- 4) Erupsi tahun 2006, mengakibatkan terjadinya perubahan arah letusan dari Barat Daya ke arah Tenggara dengan membentuk bukaan kawah yang mengarah ke Kali Gendol.
- 5) 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 per hari. Pada tanggal 26 Oktober 2010 terjadi letusan pertama yang bersifat eksplosif disertai dengan awan panas dan dentuman menghasilkan material hasil erupsi 150 m³.

II.2.3 Stasiun Pemantauan Gunung Merapi

Gunung Merapi dan gunungapi lainnya pada umumnya akan memberikan tanda sebelum meletus. Tanda-tanda tersebut dipantau pada berbagai lokasi stasiun yang tersebar di berbagai lokasi di sekitar gunungapi tersebut. Stasiun Pemantauan Gunung Merapi dapat dilihat pada Gambar 2.6 di bawah.



Gambar 2.6 Skema Jaringan Monitoring Gunung Merapi. Merah: Pemantauan Seismik, Kuning: Pemantauan Tiltmeter, Hijau: Pemantauan GPS, Biru Muda: Kamera, Jingga: Pemantauan Curah Hujan, Merah Muda: Pemantauan Cuaca, Hijau: Repeater, Biru Tua: Sirene (BPPTKG, 2016).

Beberapa cara pemantauan pada 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 aktif selama 24 jam. Pengamatan visual paling penting yaitu perubahan morfologi kubah lava. Pengamatan tersebut penting karena akan memberikan informasi arah longoran 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 *reflector* 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 *reflector*, 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 menerus dari puncak dengan radio telemetri.

4) Pemantauan dengan GPS

GPS (*Global Positioning System*) adalah sistem navigasi yang berbasis satelit yang saling berhubungan yang berada 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 mempunyai suhu solfatara tinggi. Pemantauan kimia gas dilakukan secara terus menerus dari jarak yang aman dan diukur dengan *Correlation Spectrophotometer* (COSPEC) untuk mendeteksi intensitas 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 gempabumi di bawah gunungapi akan selalu meningkat sebelum terjadinya erupsi karena magma dan gas gunungapi yang mendorong ke permukaan melalui rekahan dan lorong-lorong. Ketika magma dan gas vulkanik berpindah akan menyebabkan retakan hingga pecahnya batuan. Retakan atau pun pecahnya batuan ini merupakan sumber getaran. Ketika batu pecah pada frekuensi tinggi, gempa bumi akan timbul. Aktivitas seismik tersebut dapat dipantau dengan menggunakan seismometer. Seismometer dapat mendeteksi gerakan tanah yang disebabkan oleh

beberapa fenomena, termasuk angin, *volcanic explotion*, longsor, lahar, dan gempa bumi.

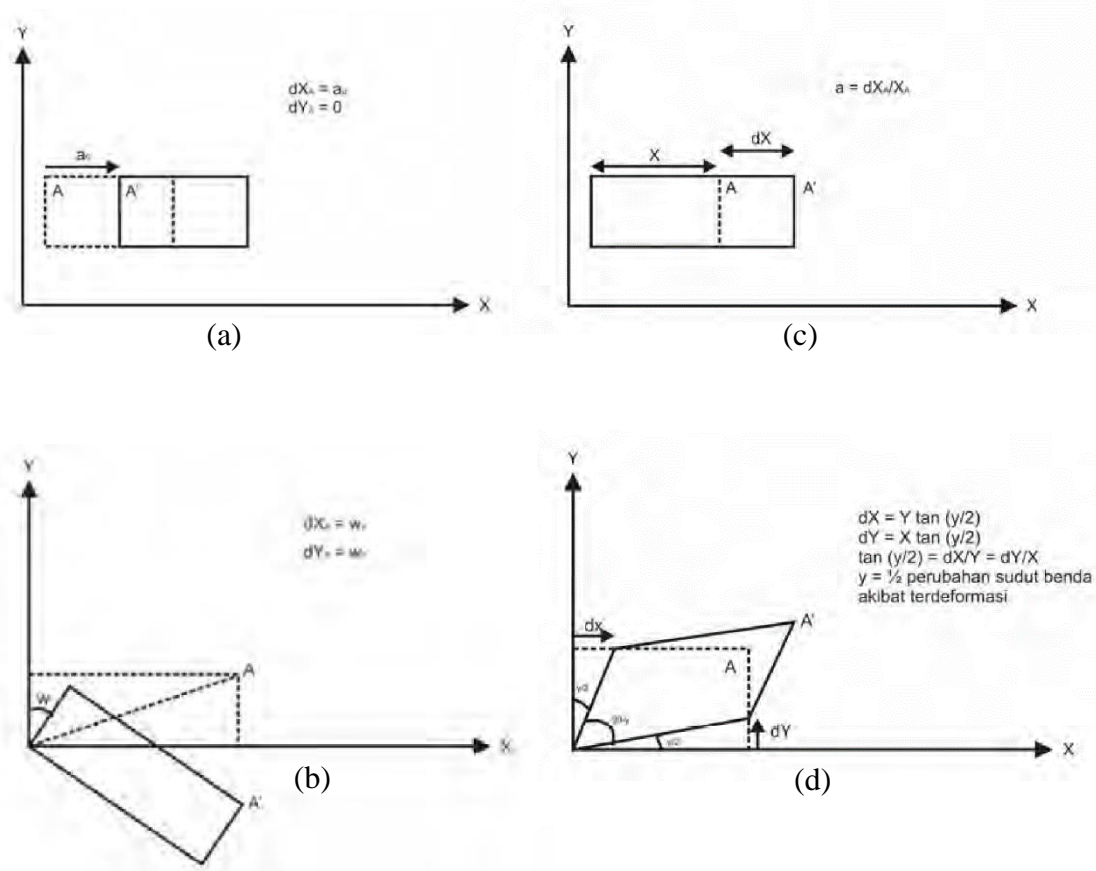
II.3 Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Secara umum juga dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Pergerakan secara absolut adalah gerakan pada suatu sistem referensi tertentu yang dilihat dari titik itu sendiri, sedangkan pergerakan secara relatif adalah gerakan pada suatu sistem referensi tertentu yang dilihat dari titik lain. Perubahan bentuk pada bahan/logam dapat dibedakan menjadi dua yaitu deformasi elastis (*non-rigid*) dan plastis (*rigid*). Efek-efek dari penyebab deformasi atau pergeseran pada suatu materi akan menciptakan reaksi yang sebanding dengan sifat geometrik dan jenis material dari materi yang terdeformasi tersebut. Beban atau gayaberat materi merupakan gaya penyebab deformasi. Bekerjanya gayaberat pada suatu materi yang disertai pengaruh gayaberat dari materi di sekitarnya dalam suatu selang waktu akan mempengaruhi bentuk geometri materi tersebut. Berdasarkan jenisnya deformasi yang terjadi pada suatu benda dapat dikelompokkan ke dalam empat jenis, yaitu (Andriyani et al., 2012):

- 1) Translasi, merupakan perpindahan posisi materi ini tanpa mengalami perubahan bentuk, sesuai dengan acuan.
- 2) Rotasi, merupakan perubahan posisi materi tanpa mengalami perubahan bentuk yang membentuk perubahan sudut (w) terhadap koordinat acuan.

- 3) Dilatasi, merupakan perubahan panjang materi (dX) terhadap panjang asalnya (X).
- 4) Distorsi, merupakan perubahan sudut dalam benda padat ketika terdeformasi.

Ilustrasi keempat jenis deformasi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah.



Gambar 2.7 Jenis-Jenis Deformasi pada Benda: (a) Translasi, (b) Rotasi, (c) Dilatasi, (d) Distorsi (Andriyani et al., 2012).

II.3.1 Deformasi Gunungapi

Deformasi gunungapi adalah perubahan bentuk gunungapi biasanya dalam dimensi mikro sampai dengan meter. Deformasi gunungapi terjadi karena aktivitas vulkanik berupa pergerakan magma di bawah permukaan yang berpengaruh pada perubahan

tekanan pada kantong magma. Akibatnya volume permukaan juga berubah sehingga menyebabkan tubuh gunungapi berubah. Pada prinsipnya deformasi dari tubuh gunungapi dapat berupa kenaikan permukaan tanah (inflasi) ataupun penurunan permukaan tanah (deflasi) (Sari, 2007).

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

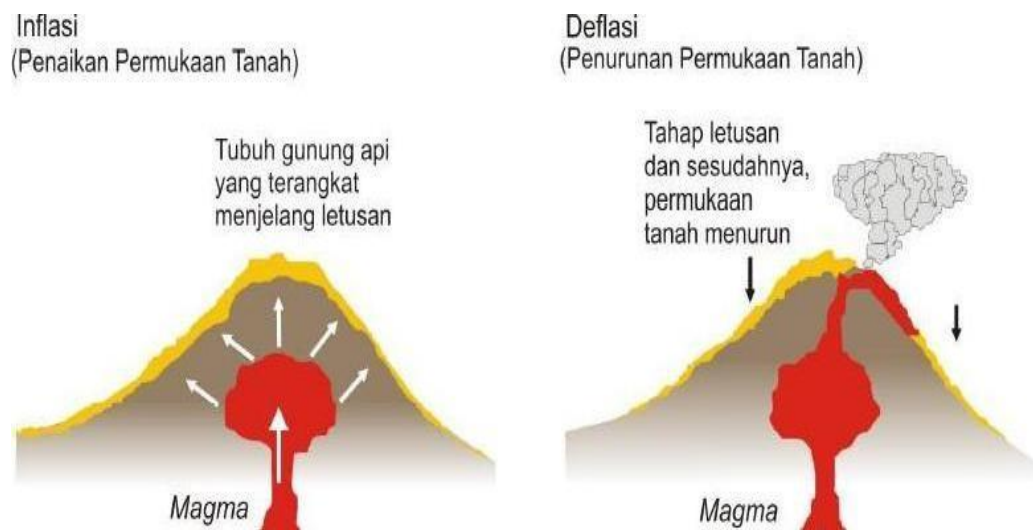
Secara garis besar gejala deformasi dapat berupa inflasi dan deflasi seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.8 (Mal & Singh, 1991).

1) Inflasi

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

2) Deflasi

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



Gambar 2.8 Gejala Deformasi Pada Gunungapi Aktif (Abidin, 2002).

Pemantauan deformasi gunungapi pada dasarnya adalah pemantauan perubahan bentuk permukaan gunungapi berupa pengembangan atau pengerutan yang diakibatkan oleh aktivitas gunungapi. Pemantauan deformasi gunungapi biasanya digunakan untuk menentukan pola dan kecepatan dari deformasi tubuh gunungapi pada arah horisontal dan vertikal. Data tersebut kemudian digabungkan dengan data dan informasi dari pemantauan menggunakan metode lain, sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan dan mengungkapkan karakteristik dari aktivitas magma (lokasi pusat tekanan) dalam tubuh gunungapi dan juga volume magma (Abidin, 2002).

Deformasi dibedakan menjadi 3 macam, di antaranya (Sari, 2007):

1) Deformasi Elastis

Ini terjadi jika *strain* yang dihasilkan berbanding lurus dengan *stress* yang bekerja. Apabila *stress* dihilangkan maka benda dapat kembali ke bentuk semula *origin shape*.

2) Deformasi *Viscous*

Merupakan *strain* yang bertambah kontinu terhadap *stress* yang bekerja pada suatu laju perbandingan, dan terbalik terhadap viskositasnya. Material *liquid* tidak mempunyai kekuatan dasar untuk menimbulkan *strain* ini.

3) Deformasi Plastis

Deformasi ini hampir sama dengan deformasi *viscous*, hanya saja deformasi plastis ini mempunyai kekuatan dasar sebelum deformasi *viscous* dimulai. Jadi saat *strain* sama dengan nol, besarnya *stress* tergantung dengan mediumnya.

Beberapa kemungkinan penyebab deformasi gunungapi antara lain (Asikin, 1979):

1) Aktivitas Vulkanik

Magma mempunyai tekanan tinggi sehingga cenderung untuk keluar ke permukaan. Tekanan yang besar menyebabkan deformasi di permukaan. Teknik deformasi diterapkan untuk mengetahui besarnya peregangan yang terjadi. Ketika magma bergerak ke permukaan ada beberapa perubahan yang dapat diukur seperti peningkatan seismik, deformasi *sub surface* serta beberapa tanda geofisika dan geokimia lainnya.

2) Pergeseran Sesar

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

disebut sesar. Pergerakan sesar ini dapat menyebabkan terjadinya pergeseran di permukaan tanah.

3) Kestabilan Lereng

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

II.3.2 Metode Deformasi

Letusan gunungapi umumnya selalu diikuti dengan gejala peruntuhan karena berkurangnya isi dari gunungapi setelah magma ditumpahkan. Tiltmeter merupakan suatu alat yang dapat mengukur kemiringan lereng (*slope*) hingga ketelitian 10^{-5} derajat. Setelah terjadi letusan kemiringan lereng negatif sedangkan sebelum letusan adalah positif. Selain Tiltmeter terdapat juga alat yang berfungsi pada pengamatan deformasi yaitu EDM (*Electronic Distance Measurement*) yang berfungsi untuk mengetahui perkembangan jarak dari puncak gunungapi ke pos pengamatan. Perubahan jarak ini dapat mengidentifikasi perkembangan aktivitas gunungapi. Ada juga GPS sebagai alat pemantau yang berfungsi mengetahui koordinat dan elevasi dari suatu gunungapi (Sari, 2007).

Pemantauan aktivitas gunungapi dengan metode deformasi dapat diklasifikasikan atas dua tipe, yaitu (Abidin, 2007):

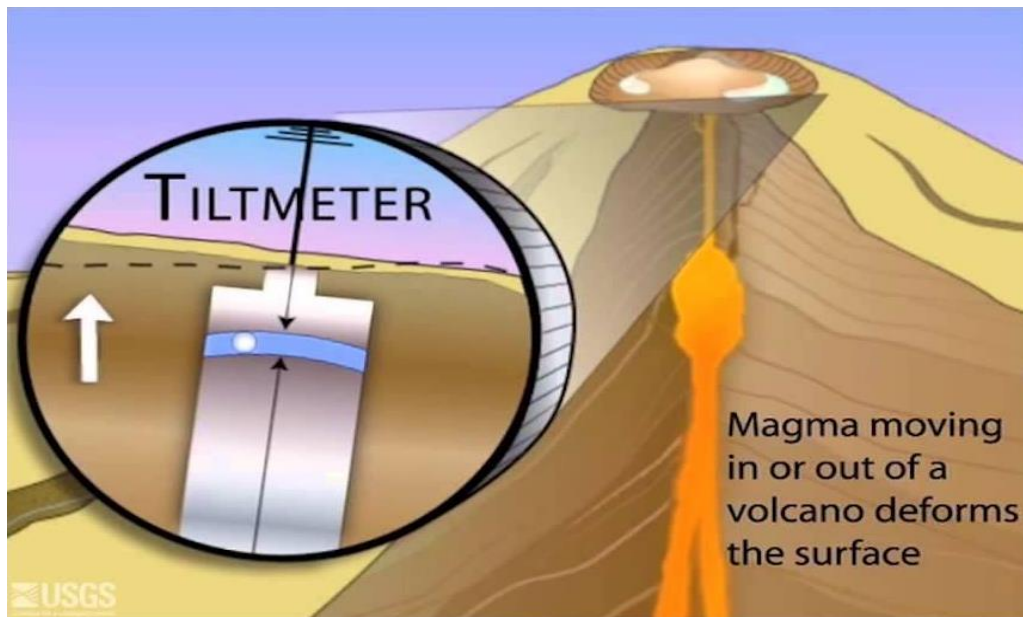
- 1) Metode episodik, pemantauan dilakukan secara berkala dalam selang waktu tertentu seperti jarak (dari EDM), arah (dari theodolit), beda tinggi (dari sipat datar), perubahan gayaberat (dari pengukuran mikrogravitasi), GPS, dan InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

- 2) Metode kontinu, pemantauan dilakukan secara terus menerus. Umumnya menggunakan sensor-sensor Tiltmeter, Extensiometer, dan Dilatometer.

Parameter-parameter deformasi dapat diperoleh dari besaran-besaran pergeseran hasil pemantauan deformasi gunungapi pada kala tertentu menggunakan alat-alat yang telah disebutkan tadi melalui analisis deformasi. Pemantauan aktivitas Gunung Merapi berdasarkan metode deformasi telah berkembang sejak tahun 1980an yang diawali dari penggunaan EDM. Saat ini telah dikembangkan dengan menggunakan tiltmeter dan GPS. Metode ini terbukti signifikan memberikan indikasi peningkatan yang mengawali erupsi Gunung Merapi tahun 1988, 1992, 2006, dan 2010 (Nandi, 2006).

II.4 Monitoring Gunungapi Menggunakan Tiltmeter

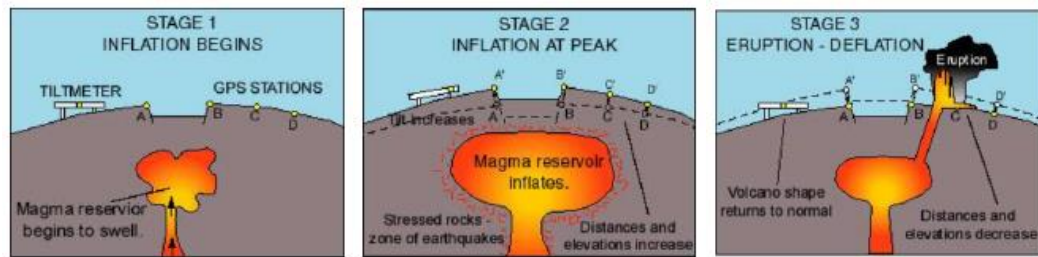
Tiltmeter merupakan alat pengukur deformasi gunung yang berfungsi untuk mendeteksi pengembangan atau pengempisan tubuh gunung. Tiltmeter juga digunakan untuk mengukur kemiringan pada suatu struktur di permukaan. Alat ini dapat dipakai untuk memonitor pergerakan magma pada gunungapi yang dapat mengakibatkan deformasi di permukaan akibat desakan magma seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.9 (Hartanto, 2017).



Gambar 2.9 Monitoring Gunungapi dengan Tiltmeter (USGS, 2013).

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

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



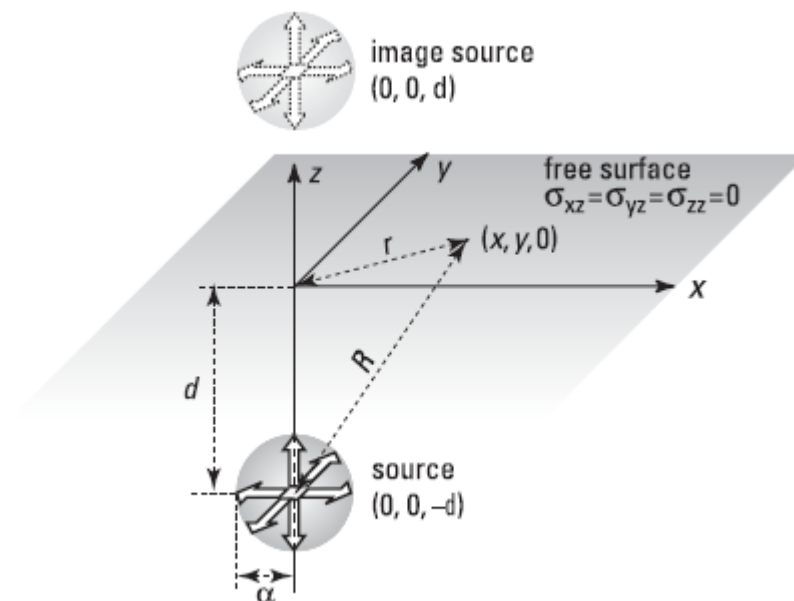
Gambar 2.10 Urutan Inflasi ke Deflasi Berkaitan dengan Dinamika Magma dan Monitoring Tiltmeter dan GPS (Hartanto, 2017).

Permukaan gunungapi akan berubah bentuk (deformasi) sebagai respon terhadap naiknya magma di bawah permukaan menuju ke puncak. Perubahan bentuk permukaan biasanya berupa kenaikan, penurunan, perubahan kemiringan lereng atau pengembangan dan pengempisan seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Tiltmeter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur perubahan sudut lokasi 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 kantor pusat (BPPTKG). Data lapangan dikonversi ke dalam satuan sudut (radian) dan digambarkan secara otomatis ke dalam grafik. Tiltmeter sangat peka terhadap pengaruh lokal kondisi puncak yang penuh asap solfatara, perubahan suhu siang dan malam yang drastis seringkali menyebabkan gangguan transmisi (Hartanto, 2017).

II.5 Penentuan Lokasi Sumber Tekanan dan Volume Suplai Magma Menggunakan Model Mogi

Pada sebagian besar gunungapi yang ada di dunia, data-data deformasi memberikan nilai yang penting dalam meninjau aspek-aspek umum guna kepentingan prediksi letusan yang akan terjadi selanjutnya. Seorang ilmuwan Jepang bernama Kiyoo Mogi, melalui publikasinya di tahun 1958 menandai dimulainya era modern pada studi deformasi gunung berapi. Lewat model yang dikembangkannya (*Mogi's model*), deformasi yang diamati dapat terjadi di permukaan merupakan hasil dari adanya peningkatan tekanan (*pressure*) dari sebuah sumber kecil, *spherical* (bola) di dalam ruangan elastik tak berhingga yang berbentuk setengah ruang (*half space*) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.11 di bawah.



Gambar 2.11 Model Mogi untuk Penentuan Sumber Tekanan Magma (Lisowski, 2007 in Dzurisin, 2007).

Volume inflasi maupun amblesan yang terukur di suatu permukaan sangat terkait dengan suplai atau berkurangnya volume magma dalam suatu kantong atau dapur

magma. Menurut perkembangannya, beberapa penelitian memodifikasi geometri sumber tekanan seperti geometri bola, *ellipse* dalam sistem yang tertutup maupun terbuka (Lisowski, 2007 in Dzurisin, 2007).

Deformasi pada suatu permukaan dapat teramati melalui perubahan posisi akibat perubahan tekanan hidrostatik (ΔP) pada suatu sumber tekanan. Pendekatan mengenai karakteristik sumber tekanan dapat dilakukan dengan penyederhanaan geometri sumber tekanan. Mogi (1958) mengemukakan suatu model untuk menjelaskan deformasi akibat perubahan tekanan hidrostatik (ΔP) pada suatu sumber tekanan. Geometri sumber tekanan dianggap berbentuk bola (*spher*) berjari-jari α , dimana $\alpha \ll d$, dengan d adalah kedalaman sumber tekanan. Sumber tekanan diasumsikan berada dalam medium homogen dan elastik dengan parameter elastisitas G (rigiditas). Perubahan tekanan hidrostatik (ΔP) yang menyebabkan deformasi terekam sebagai perubahan sudut ungkitan yang dipasang pada jarak r terhadap titik pengamatan dalam komponen radial (w_x) dan vertikal (w_y) dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{pmatrix} w_x \\ w_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$w = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-\nu)}{G} \left(\frac{d}{R^3} \right) \quad (2.2)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2} \quad (2.3)$$

$$y = y_s - y_c \quad (2.4)$$

$$x = x_s - x_c \quad (2.5)$$

$$\begin{pmatrix} w_x \\ w_y \end{pmatrix} = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-\nu)}{G} \begin{pmatrix} \frac{-3 d x}{R^5} \\ \frac{-3 d y}{R^5} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Dengan w_x : Nilai ungkitan (*tilt*) komponen horizontal (rad)
 w_y : Nilai ungkitan (*tilt*) komponen vertikal (rad)
 α : Jari-jari pusat tekanan (m)
 ΔP : Perubahan tekanan di kantung magma (Pa)
 ν : *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)
 x, y : 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 μ radian (ppm). Adapun volume suplai magma (ΔV_{magma}) gunungapi yang terjadi akibat deformasi dapat diperkirakan berdasarkan persamaan berikut ini (Lisowski, 2007 in Dzurisin, 2007; Johnson et al., 2000):

$$\Delta V_{cavity} = \frac{\Delta P}{G} \pi \alpha^3 \quad (2.7)$$

$$\frac{\Delta V_{cavity}}{\Delta V_{magma}} = \frac{2(1-\nu)}{\left\{1 + \frac{4\mu}{3k^*}\right\}} \quad (2.8)$$

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

Dengan ΔV_{cavity} : Perubahan volume saluran (m^3)
 ΔV_{magma} : Volume suplai magma (m^3)
 ν : *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)

II.5.1 Metode *Grid Search*

Salah satu cara untuk memperoleh solusi inversi non-linier menggunakan pendekatan global adalah dengan mengevaluasi secara sistematis (*systematic search*) harga fungsi obyektif untuk setiap model pada ruang model. Pada metode ini, ruang model didefinisikan terlebih dulu 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 seluruh ruang model yang telah didefinisikan. Pada metode pencarian sistematis setiap *grid* merepresentasikan satu sampel model yang harus dihitung responsnya untuk memperoleh harga fungsi obyektif yang berasosiasi dengan model tersebut. Oleh karena itu teknik pencarian sistematis seperti ini sering disebut pula sebagai teknik *grid search*. Informasi mengenai harga fungsi obyektif untuk semua *grid* pada ruang model dapat digunakan untuk menentukan solusi, yaitu model dengan harga fungsi obyektif minimum (Grandis, 2009).

Metode *Grid Search* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam melakukan prediksi sumber tekanan magma. Pada Metode *Grid Search* ruang model didefinisikan terlebih dahulu dengan menentukan interval (batas minimum dan maksimum) harga setiap parameter model yang mungkin. Kemudian dilakukan

diskritisasi (memecah daerah perhitungan menjadi beberapa daerah-daerah kecil yang disebut *grid*) pada interval tersebut sehingga diperoleh *grid* yang meliputi seluruh ruang model yang telah didefinisikan. Nilai kuadrat selisih pergeseran teoritis dan observasi dinotasikan dengan R_{min}^2 , dalam persamaan 2.6 dilakukan dengan memberikan variasi nilai radius sumber tekanan (α), perubahan tekanan (ΔP) dan lokasi sumber (x_c, y_c, d) sampai diperoleh nilai $R_{min}total$ terkecil (Wismaya et al., 2016).

$$R_{min}Sta_{1,...,n} = \sqrt{(w_{x_{obs}}Sta_{1,...,n} - Sta_{1,...,n})^2 + (w_{y_{obs}}Sta_{1,...,n} - w_{y_{teo}}Sta_{1,...,n})^2} \quad (2.10)$$

$$R_{min}total = \sqrt{(R_{min}^2Sta_1) + (R_{min}^2Sta_{...}) + (R_{min}^2Sta_n)} \quad (2.11)$$

Dengan $R_{min}Sta_{1,...,n}$: Residual minimum antara pergeseran horisontal 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)