# BAB 2
# LANDASAN TEORI

## 2.1 Gunung Api

Gunung api adalah lubang kepundan atau rekahan dalam kerak bumi tempat keluarnya cairan magma atau gas atau cairan lainnya ke permukaan bumi. Gunung api terbentuk sejak jutaan tahun lalu hingga sekarang (VSI ESDM, 2008). Magma keluar ke permukaan bumi melalui rekahan-rekahan yang memiliki bagian terbuka cukup lebar, yang terjadi pada kerak bumi. Berdasarkan pada teori tektonik lempeng, ketika dua buah lempeng saling bertumbukan atau ketika pada saat dua buah lepeng terpisah, terbentuk celah yang terbuka (rekahan), ditambah desakan yang cukup besar dari material magma itu sendiri, maka magma akan dapat mencapai permukaan bumi dan membentuk gunung api (Andreas, 2001).

Secara umum gunung api aktif adalah gunung yang masih aktif melakukan aktivitas vulkaniknya seperti letusan atau erupsi. Aktivitas vulkanik didefinisikan sebagai proses naiknya magma yang terkandung di dalam gunung tersebut ke permukaan bumi. Aktivitas gunung api dapat dikelompokan menjadi dua jenis yaitu aktivitas vulkanik dan non vulkanik. Aktivitas non vulkanik biasanya diasosiasikan tidak identik dengan penyebab terjadinya gunung api, namun biasanya hanya menghasilkan fenomena alam disekitar gunung api, namun biasanya hanya menghasilkan fenomena alam disekitar gunung api seperti sumber air panas (*geyser*) yang berasal dari air magma (*juvenile water*) berfase gas yang naik ke atas, kemudian membentuk fasa cair dikarenakan terjadi penurunan temperatur, solfatar yang merupakan endapan belerang disekitar lubang kepundan, fumarol yang merupakan uap panas dan kering, dipancarkan melalui lubang kepundan. Sedangkan bencana gunung api biasanya identik dengan aktivitas vulkanik gunung api (Andreas, 2001).

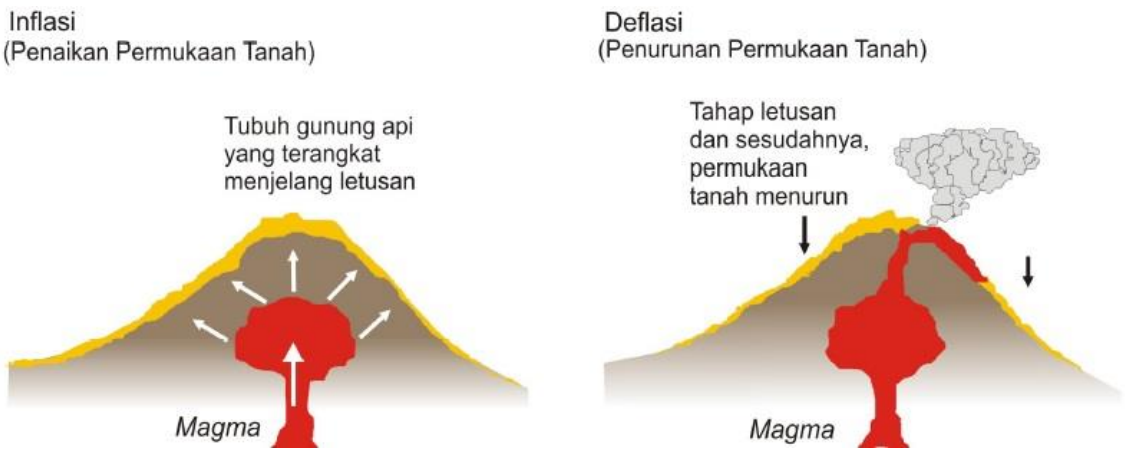
Di Indonesia terdapat 3 Klasifikasi gunung api, yaitu:

1. Tipe A : gunung api yang pernah mengalami erupsi magmatik sekurang-kurangnya satu kali sesudah tahun 1600.
2. Tipe B : gunung api yang sesudah tahun 1600 belum lagi mengadakan erupsi magmatik, namun masih memperlihatkan gejala kegiatan seperti kegiatan solfatara.
3. Tipe C : gunung api yang erupsinya tidak diketahui dalam sejarah manusia, namun masih terdapat tanda-tanda kegiatan masa lampau berupa lapangan solfatara/fumarola pada tingkat lemah.

## 2.2 Deformasi Gunung Api

Menururut (Kuang, 1996) Deformasi merupakan perubahan fisik dari suatu bahan karena dikenai gaya-gaya. Perubahan tersebut dapat berupa perubahan ukuran ataupun bentuk. Prinsipnya beban terhadap benda terdeformasi adalah suatu gaya yang melakukan aksi terhadap benda padat sehingga terjadinya deformasi. Letusan gunung api sering diawali dengan deformasi berupa kenaikan permukaan tanah yang cukup besar. Untuk gunung api yang sudah lama tidak menunnjukan aktivitasnya, deformasi bisa dijadikan indikator yang dapat dipercayai sebagai munculnya kembali aktivitas gunung api tersebut. Deformasi permukaan gunung api yang berupa vektor pergeseran titik dan vektor kecepatan perubahannya dapat memberikan informasi tentang karakteristik dan dinamika dari dapur magma. Informasi deformasi tersebut dapat dimodelkan untuk menentukan lokasi, kedalaman, bentuk, ukuran dan perubahan-perubahan tekanan sumber penyebab deformasi.

Menurut (Kurnia, 2013) Deformasi gunung api dapat diartikan sebagai perubahan bentuk gunung api dapat berupa pembumbungan (inflasi) atau pengerutan (deflasi) yang disebabkan oleh adanya aktivitas gunung api berupa tekanan yang berada dalam tubuh gunung api tersebut seperti dapat dilihat pada gambar 2.1. Sumber tekanan ini diakibatkan oleh pergerakan magma atau gas, pergerakan tersebut pada puncaknya dapat menjadi sebuah letusan berupa keluarnya sumber tekanan tersebut ke permukaan.




Gambar 2.1 Inflasi dan Deflasi pada Gunung Api

(Sumber: Abidin, 2001)

1. Inflasi

   Inflasi adalah proses dimana terjadinya 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 api. Inflasi sering dijadikan sebagai tanda-tanda akan erupsi pada gunung api.

2. Deflasi

   Deflasi adalah proses dimana terjadinya penurunan permukaan tanah, umumnya terjadi sesudah masa letusan, saat tekanan magma di dalam tubuh gunung api telah melemah tapi pada beberapa kasus deflasi juga terjadi selama letusan.

Pada sebuah gunung api adanya aktivitas magma akan selalu menghasilkan deformasi, meski tidak selalu menghasilkan erupsi (Haerani, 2009). Deformasi yang maksimum akan terjadi menjelang terjadinya erupsi tersebut. Inflasi maupun deflasi merupakan bentuk umum yang deformasi yang terjadi pada gunung api. Ilustrasi inflasi dan deflasi dapat dilihat pada Gambar 2.1.

## 2.3 Pemantauan Aktivitas Gunung Api

Pemantauan aktivitas vulkanik dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai metode, salah satu yang dapat dilakukan untuk memantau aktivitas gunung api adalah dengan metode deformasi. Salah satu tujuan pemantauan

aktivitas gunung api yaitu untuk mitigasi bencana dan untuk mengumpulkan data geologi, geofisika, dan geokimia yang nantinya bisa berguna untuk memprediksi letusan/erupsi gunung api. Prinsip dasar pemantauan aktivitas gunung api yaitu pemantauan terhadap perubahan posisi dari beberapa titik koordinat yang mewakili gunung tersebut secara kontinu. Titik koordinat tersebut didapatkan dari beberapa stasiun pemantauan GPS yang dipasang di sekitar gunung api serta sebuah stasiun referensi yang dipasang pada daerah yang dianggap stabil. Pada dasarnya, metode deformasi bertujuan untuk mendapatkan pola dan kecepatan deformasi permukaan dalam arah vertikal dan horizontal (Abidin, 2007).

## 2.4 Pemantauan Deformasi Gunung Api

Prinsip dari pengamatan aktivitas gunung api secara kontinu dengan sistem berbasis satelit pada dasarnya yaitu pemantauan terhadap perubahan koordinat beberapa titik yang mewakili gunung tersebut dari waktu ke waktu. Pada metode ini beberapa sinyal (*receiver*) sistem berbasis satelit ditempatkan pada beberapa titik pantau yang ditempatkan pada punggung dan puncak gunung yang akan dipantau serta pada suatu tempat pemantauan (stasiun referensi) yang merupakan pusat pemrosesan data. Pusat pemantau adalah suatu lokasi yang telah diketahui koordinatnya dan sebaiknya ditempatkan dikota terdekat dengan gunung api yang bersangkutan (Abidin, 2007).

Deformasi yang disebabkan oleh intrusi magma merupakan awalan dari terjadinya erupsi gunung api. Sebelum terjadi erupsi, permukaan tanah mengembang akibat tekanan yang meningkat di dalam magma *chamber* dangkal yang disebabkan oleh pergerakan magma yang naik. Magma yang dilepaskan menyebabkan terjadinya deflasi dari lereng gunung api (Gambar 2.1). Menurut (Van der Laar, 1996) serta (Dvorak dan Dzurisin,1997) deformasi permukaan gunung api, yang berupa vektor pergeseran titik dan vektor kecepatan perubahannya dapat memberikan informasi tentang karakteristik dan dinamika dari kantong (reservoir) magma. Informasi gejala tersebut dapat dimodelkan untuk menentukan lokasi, kedalaman, bentuk, ukuran dan perubahan-perubahan tekanan sumber penyebab deformasi. Gejala deformasi gunung api akan menyebabkan

pergeseran posisi suatu titik di tubuh gunung api. Pergeseran posisi tersebut dapat terjadi baik dalam arah horizontal maupun vertikal (Kurnia, 2013).

Vektor pergeseran yaitu besaran yang menyatakan perubahan posisi yang terjadi terhadap stasiun pengamatan dalam selang waktu tertentu. Perubahan posisi tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan kecepatan pergeseran dengan cara menghitung selisih dari sesi pertama pengamatan setiap stasiun terhadap suatu sesi tertentu. Nilai pergeseran yang dapat bernilai minus (-) atau plus (+). Nilai tersebut dapat mempengaruhi arah pergeseran (Abidin, 2006). .

Pola dan tingkat perpindahan permukaan memperlihatkan tingkat dari meningkatnya tekanan di dalam magma (Dvorak & Dzurisin, 1997) sehingga memberikan informasi penting mengenai keadaan gunung api. Karena deformasi tanah cenderung mendahului terjadinya erupsi baik dalam periode jam hingga bulan, maka monitoring geodetik adalah monitoring yang tepat untuk *hazard mitigation*. (Jamel, 2013).

Analisis yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah pergeseran, yaitu analisis yang menunjukkan perubahan posisi suatu benda dengan menggunakan data perbedaan posisi yang didapat pengamatan dan model pada waktu yang sama. Analisis deformasi bertujuan untuk menentukan kuantitas pergeseran dan parameter-parameter deformasi yang mempunyai karakteristik dalam ruang dan waktu (Chrzanowski dkk, *1986*).

## 2.5 Pemantauan Deformasi dengan GPS

Pengamatan deformasi menggunakan GPS merupakan salah satu metode yang sangat efektif karena dapat mengamati perubahan bentuk permukaan secara kontinu, GPS juga tidak memerlukan keterlihatan antar titik pengamatan sehingga posisi titik GPS dapat tersebar dan menggambarkan bentuk gunung api secara keseluruhan, dan yang terakhir GPS dapat menghasilkan data dengan ketelitian hingga orde mm (milimeter) dengan menggunakan metode *Differential Positioning* (Abidin, 2007). Penentuan posisi metode diferensial merupakan teknik penentuan posisi secara *real time* dengan menggunakan dua *receiver* atau

lebih. Alat pertama terletak pada *base station* dan alat kedua atau selebihnya sebagai *rover* (Abidin, 2006).

### 2.5.1 Penentuan Posisi GPS Kinematik

Penentuan posisi secara kinematik (*kinematic positioning*) merupakan penentuan posisi dari titik-titik yang bergerak dan *receiver* GPS tidak dapat atau tidak mempunyai kesempatan untuk berhenti pada titik-titik tersebut. Penentuan posisi kinematik ini dapat dilakukan secara absolut ataupun diferensial dengan menggunakan data pesudorange dan/atau fase. Hasil penentuan posisi dapat diperlukan saat pengamatan (*real-time*) ataupun sesudah pengamatan (*post processing*). Berdasarkan pada jenis data yang digunakan serta metode penentuan posisi yang digunakan, ketelitian posisi kinematik yang diberikan oleh GPS dapat berkisar dari tingkat rendah (penentuan posisi absolut dengan pseudorange) sampai tingkat tinggi (penentuan posisi diferensial dengan fase)(Abidin, 2006).

Penentuan posisi kinematik-diferensial dengan data fase dapat memberikan ketelitian tipikal sekitar 1 – 5 cm dengan asumsi bahwa ambiguitas fase dapat ditentukan secara benar. Untuk mencapai ketelitian tersebut, ambiguitas fase harus ditentukan dengan menggunakan jumlah data yang terbatas dan juga selagi receiver GPS bergerak. Metode ini dapat digunakan untuk penentuan posisi objek -objek yang diam maupun bergerak (Abidin, 2006). Metode diferensial kinematik GPS merupakan teknik penentuan posisi relatif, dan berdasarkan cara pemberian koreksinya terdiri atas *post-processing* kinematik *differential* GPS dan *Real-Time Kinematic Differential* GPS

Gambar 2.2 Konsep Kinematik *Post-Processing*

(Sumber: Abidin, 2006)

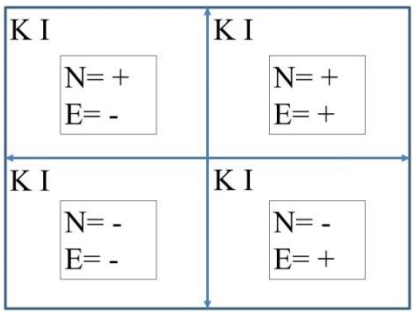
Penentuan posisi kinematik-diferensial dengan data fase ini diimplementasikan dengan menggunakan satu atau beberapa stasiun referensi. Penggunaan lebih dari satu referensi akan lebih baik karena dapat memperluas cakupan dari pengamatan. Dengan menggunakan satu stasiun referensi, metode ini hanya bisa digunakan untuk jarak baseline sekitar 10-15 km. Untuk baseline

yang lebih panjang umumnya nilai ambiguitas fase akan semakin sukar ditentukan secara benar karena residu dari kesalahan dan bias yang tersisa setelah proses pengurangan data akan relatif semakin signifikan (Abidin, 2006).

## 2.6 Nilai Pergeseran Pengamatan

Nilai pergeseran adalah besaran yang menyatakan perubahan suatu titik pantau sehingga bisa menjadi indikator terjadinya deformasi di daerah pengamatan. Sistem koordinat toposentrik lokal dipilih sebagai format data yang dipakai dalam proses hitungan *linier fit* untuk menghitung pola dan pergeseran (Purnomo, 2014). Titik acuan dalam pengolahan adalah menggunakan stasiun SNBG dengan pertimbangan dikarenakan jaraknya yang jauh dari tubuh Gunung Api Sinabung dengan jarak 9 km, yang mana hal tersebut dapat diasumsikan bahwa titik pengamatan GPS SNBG tidak terkena dampak aktivitas Gunung Api Sinabung (Kriswati, 2013).

Dalam penelitian tugas akhir ini, arah horizontal terfokus pada jarak dari nilai pergeseran yang diolah. Nilai pergeseran tersebut dapat bernilai *minus* (-) atau *plus* (+) yang dapat mempengaruhi dari arah pergeseran. Berikut adalah Gambar 4.2 mengenai penentuan arah nilai pergeseran. Nilai pergeseran didapat dari hasil perhitungan menggunakan metode *least square method* data hasil pengolahan. Dari hasil tesebut akan membentuk *Trend* yang berupa hasil nilai pergeseran pada setiap sumbu koordinat disetiap titiknya. Gambar 2.3 merupakan cara penentuan arah dan nilai pergeseran dalam kuadran.




Gambar 2.3 Arah dan nilai pergeseran dalam kuadran

(Sumber : Purnomo, 2014)

### 2.6.1 Menghitung Nilai Pergeseran Pengamatan

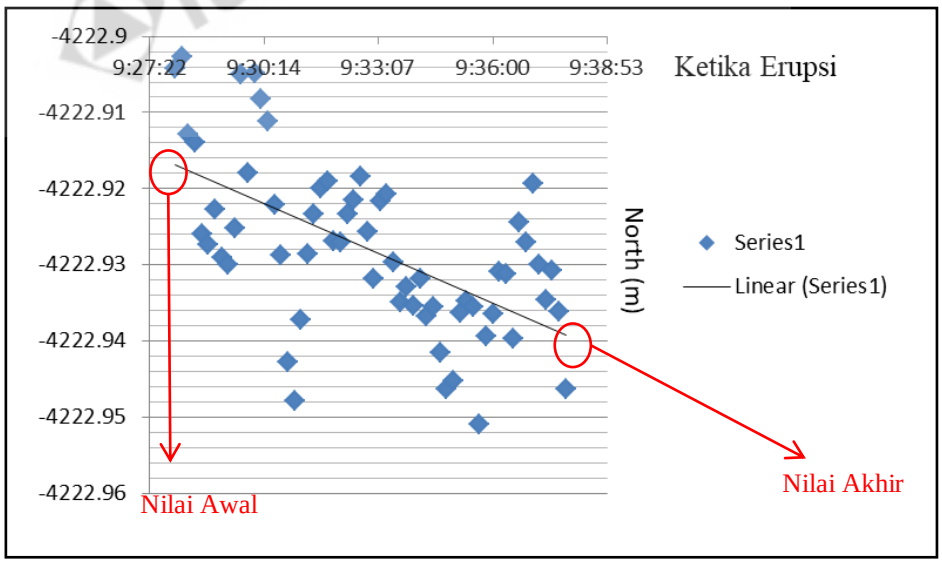
Vektor pergeseran / nilai pergeseran dapat dihitung dengan menggunakan metode kuadrat terkecil dimana vektor merupakan gradien garis dari deret waktu perubahan posisi. Dari deret waktu perubahan posisi yang ada dapat diestimasi model linier dengan melakukan proses *fitting* untuk semua data dalam suatu interval waktu. Analisis linier adalah hubungan secara linier antara satu variabel independen ($X$) dengan variabel dependen ($Y$). Analisis ini untuk mengetahui arah hubungan antara variabel independen dengan variabel dependen apakah positif atau negatif dan untuk untuk memprediksi nilai variabel independen mengalami kenaikan atau penurunan (Wismaya,2016). Secara matematis, model linier diperoleh dari persamaan berikut (Wolf dan Ghilani, 2006 pada Kuncoro, 2013) :

$$y_m = ax_m + \mathrm{b} \qquad \textbf{...(2.1)}$$

Dari hasil tersebut akan dihasilkan nilai $y_n$ akhir dan $y_i$ awal pada setiap stasiun.

$$y_n = ax_n + \mathrm{b} \qquad \textbf{...(2.2)}$$

$$y_i = ax_i + \mathrm{b} \qquad \textbf{...(2.3)}$$




Gambar 2.4 Contoh model linier

Dimana y adalah matriks yang berisi nilai perubahan posisi pada stasiun (*north*, *east*, atau *up*), $x$ adalah matriks epok pengamatan di stasiun, $a$ adalah gradien

garis, dan b adalah suatu konstanta. Pembobotan dilibatkan dalam mengestimasi nilai parameter $a$ dan b sehingga dapat dituliskan :

$$X = (A^T PA)^{-2}(A^T PL) \qquad \textbf{...(2.4)}$$

Dimana X adalah matriks parameter yang diestimasi (a dan b), A adalah matriks desain, P adalah matriks bobot yang diperoleh dari $\frac{1}{\sigma 2}$, dan L adalah matriks pengamatan. Model linier direpresentasikan oleh a dan b dimana a merupakan vektor kecepatan pergerakan untuk setiap stasiun pengamatan GPS dengan satuan mm. Selain nilai pergeserannya, diestimasi juga kepresisian dengan persamaan variansi kovariansi parameter :

$$\sum xx = \sigma^2 \times (A^T\ PA)^{-2} \qquad \textbf{...(2.5)}$$

Sedangkan $\sigma^2$ (variansi aposteriori) adalah :

$$\sigma^2 = \frac{A^T PV}{n-u} \qquad \textbf{...(2.6)}$$

Dimana V merupakan matriks residu pengamatan (V = AX - L), P adalah matriks bobot, n adalah jumlah pengamatan, dan u adalah jumlah parameter. Dengan demikian, kepresisian kecepatan pergerakan merupakan akar kuadrat dari variansinya atau diagonal matriks variansi kovariansi parameter. Dari hasil tersebut maka dapat ditentukan kepresisian pada setiap nilai hasil model linier pada $y_n$ akhir dan $y_i$ awal :

$$\sigma y_n = \sqrt{(\frac{\partial y_n}{\partial a}\sigma a)^2 + (\frac{\partial y_n}{\partial b}\sigma b)^2} \qquad \textbf{...(2.7)}$$

$$\sigma y_i = \sqrt{(\frac{\partial y_i}{\partial a}\sigma a)^2 + (\frac{\partial y_i}{\partial b}\sigma b)^2} \qquad \textbf{...(2.8)}$$

Dari persamaan diatas maka didapat turunan seperti di bawah ini :

$$\sigma y_n = \sqrt{(x_n.\sigma a^2) + (a.x_n.\sigma b)^2} \qquad \textbf{...(2.9)}$$

$$\sigma y_i = \sqrt{(x_i.\sigma a^2) + (a.x_i.\sigma b)^2} \qquad \textbf{...(2.10)}$$

Setelah perhitungan diatas didapat maka selanjutnya kita dapat menentukan rumus sebagai berikut pada setiap komponen (*north, east, up).*

$$\overrightarrow{E} = ydEn - ydEi \qquad \textbf{...(2.11)}$$

$$\overrightarrow{N} = ydNn - ydNi \qquad \textbf{...(2.12)}$$

$\vec{E}$ adalah nilai pergeseran pada komponen *East* $dan\,\overrightarrow{N}$ adalah nilai vektor pada komponen *North*.

$$Ur = \sqrt{d\overrightarrow{N}^{\,2} + d\overrightarrow{E}^{\,2}} \qquad \textbf{...(2.13)}$$

$$Uz = dUn - dUi \qquad \textbf{...(2.14)}$$

$U_r$ adalah nilai deformasi horizontal dan $U_z$adalah nilai deformasi vertikal.

$$\sigma_{\overrightarrow{N}} = \sqrt{(\sigma dN_n)^2 + (\sigma dN_i)^2} \qquad \textbf{...(2.15)}$$

$$\sigma_{\overrightarrow{E}} = \sqrt{(\sigma dE_n)^2 + (\sigma dE_i)^2} \qquad \textbf{...(2.16)}$$

$$\sigma U_r = \sqrt{(\sigma\overrightarrow{N})^2 + (\sigma\overrightarrow{E})^2} \qquad \textbf{...(2.17)}$$

$$\sigma U_z = \sqrt{(\sigma dU_n)^2 + (\sigma dU_i)^2} \qquad \textbf{...(2.18)}$$

$\sigma_N, \sigma_E$ , $\sigma_U$ ketelitian pada setiap komponen (*north, east) dan* $\sigma U_r$ ketelitian pada deformasi horizontal dan $\sigma U_z$ deformasi vertikal.

## 2.7 Uji Statistik T-Student

Nilai pergeseran yang telah dihitung dalam 3 *event* pengamatan perlu dilakukan uji statistik agar secara kualitatif mengindikasikan baik atau tidaknya hasil pengolahan. Uji statistik dilakukan dengan cara menguji variabel pergeseran titik (Pij) dari sesi pengamatan i ke sesi j. Uji statistik dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P_{ij} = \sqrt{dN_{ij}^{\;2} + dE_{ij}^{\;2}} \qquad \textbf{...(2.19)}$$

Adapun standar deviasi dihitung dengan menggunakan rumus 2.20.

$$\sigma P_{iJ} = \sqrt{\sigma dN_{iJ}{}^2 + \sigma dE_{iJ}{}^2} \qquad \textbf{...(2.20)}$$

Hipotesis nol yang digunakan pada uji statistik ini adalah titik pengamatan tidak bergeser dalam selang I dan j sehingga:

Hipotesis nol H0 : Pij = 0

Hipotesis alternatif Ha : Pij ≠ 0

Statistik yang digunakan dalam menguji pergeseran titik-titik pengamatan adalah:

$$T = \frac{P_{iJ}}{\sigma P_{iJ}} \qquad \textbf{...(2.21)}$$

Pergeseran dinyatakan signifikan atau hipotesis nol ditolak jika (Wolf a.d Ghilani, 1997):

$$T > tdf, \frac{\alpha}{2} \qquad \textbf{...(2.22)}$$

Keterangan:

$P_{ij}$ = Pergeseran titik pengamatan

$\sigma P_{iJ}$ = Standar deviasi $P_{ij}$

$\sigma dN_{iJ}$ = Standar deviasi komponen N

$\sigma dE_{iJ}$ = standar deviasi komponen E

T = Besaran yang menunjukkan signifikansi pergeseran

df = Derajat kebebasan

α = Level signifikan yang digunakan

Digunakan tabel *t-distribution* dengan selang kepercayaan 95 % sehingga nilai pad *event* ketika 2.021 dan *event* sebelum dan sesudah 2.045.

## 2.8 Model Mogi

Aktivitas Magmatik pada sumber tekanan reservoir magma merupakan penyebab adanya deformasi pada gunung api. Deformasi pada gunung api berupa inflasi dan deflasi dapat dilihat dari pola vektor pergeseran. Berdasarkan vektor pergeseran tersebut dapat di tentukan keberadaan sumber magma, bentuk dan lokasi sumber magma tersebut (Jamel, 2013)

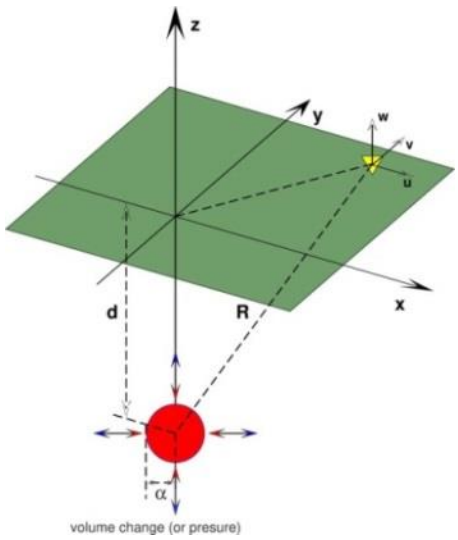
Pusat tekanan atau pusat sumber dilatasi sering disebut “Model Mogi” setelah Kiyoo Mogi (Mogi, 1958) menyimpulkan bahwa pengukuran secara

geodetik mengenai perubahan elevasi dan pergeseran horizontal berhubungan dengan letusan di jepang dan Hawaii dihasilkan dari peningkatan dan penurunan aktivitas dapur magma di dalam gunung api. Model Mogi merupakan solusi statis untuk menentukan medan pergeseran pada sumber tekanan *spherical* yang berada di dalam perut gunung yang merupakan bagian kerak bumi yang diasumsikan elastik. Model intrusi magma ini secara luas digunakan untuk memprediksi pengamatan deformasi dari gunung api. Model Mogi mensimulasikan sumber tekanan yang berupa bola/ bulatan kecil yang terpancang sebuah ruang dalam gunung api yang homogen, isotropis (sifat mekanik seragam pada setiap arah) dan mempunyai faktor rasio poison (Haerani, 2009).

Menurut (Kumalasari, 2019) (Mogi, 1958) mengasumsikan bahwa kerak bumi merupakan medium setengah elastik dan deformasi yang terjadi pada gunung api disebabkan oleh sumber tekanan berupa titik yang terletak pada kedalaman tertentu. Apabila terjadi perubahan hidrostatis pada bola tersebut maka akan terjadi deformasi secara simetris. Dijelaskan dalam buku *volcano deformation* bahwa perubahan posisi suatu titik (*displacement*) di permukaan yang diakibatkan oleh perubahan tekanan hidrostatis di dalam rongga kerak bumi dengan radius lebih kecil dari kedalaman (a<<d) dinyatakan dalam persamaan model mogi sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-V)}{G} \begin{pmatrix} \frac{X}{R^3} \\ \frac{Y}{R^3} \\ \frac{Z}{R^3} \end{pmatrix} \qquad \textbf{...(2.23)}$$

Dimana d adalah kedalaman sumber tekanan, r adalah jarak radial sumber tekanan terhadap titik pantau, △V adalah perubahan volume sumber tekanan, v adalah poisons ratio, G adalah shear modulus, dan △P adalah perbahan tekanan. (Mogi,1958) mengasumsikan pusat tekanan diasumsikan berada di bawah kawah yang merupakan suatu celah yang terbuka dan memiliki akses terhadap sumber magma. Metode ini masih menjadi metode yang paling banyak digunakan untuk memodelkan deformasi permukaan dari berkurang atau bertambahnya aktivitas dapur magma (Kurnia, 2013). Gambar 2.5 contoh skematik mogi.




Gambar 2.5 Skematik Mogi Model

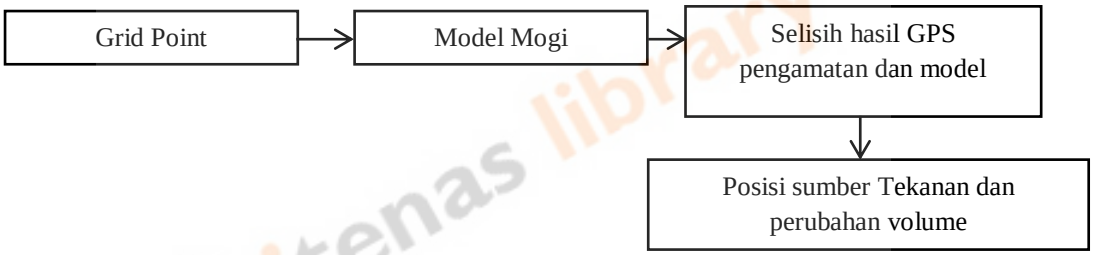
(Sumber: Milczarek, 2019)

$\alpha$ adalah jari – jari sumber tekanan, u dan v Pergeseran sumbu horizontal, w pergeseran sumbu vertikal, R merupakan jarak radial antara sumber tekanan dengan stasiun pengamatan, d adalah kedalaman sumber tekanan.

Dalam penelitian ini perhitungan untuk menentukan lokasi dari sumber tekanan ini menggunakan Software Matlab dan Sphere. u, v, dan w adalah perubahan posisi pada titik *x,y,0* dan $R = \sqrt{x2 + y2 + d2}$ adalah jarak radial dari satu titik ke permukaan. Kecepatan supply magma ke dalam pusat tekanan dapat di estimasi dengan menggunakan hubungan antara volume permukaan yang terdeformasi dengan kecepatan lava *discharge.* Hubungan antara volume permukaan yang terdeformasi ($\triangle V_{uplift}$) dengan perubahan volume pada pusat tekananan ($\triangle V_{injection}$) dinyatakan sebagai persamaan $\triangle V_{uplift}$ = 2(1-v) $\triangle V_{injection}$ dengan v adalah *poisons ratio* atau $\triangle V = \frac{\triangle P}{G} \pi\alpha^2$ (Fialko,2001 dalam Kumalasari, 2019)

Data vektor pergeseran titik-titik pada tubuh gunung api yang telah diperoleh di atas kemudian digunakan untuk menentukan karakteristisiik (lokasi dan perubahan volume) dari penyebab terjadinnya pergeseran posisi titik-titik tersebut. Dalam penelitian ini Model Mogi, yang diilustrasikan pada Gambar 2.5.

Dengan mengasumsikan bahwa vektor Pergeseran yang diperoleh dari hasil pengamatan tersebut di atas merepresentasikan deformasi aktual yang dialami gunung Sinabung, maka Model Mogi dapat digunakan untuk mengestimasikan lokasi pusat tekanan penyebab deformasi tersebut (Theresia, 2004). Perhitungan Model Mogi dalam penelitian ini menggunakan program Sphere dengan Matlab, output program adalah model mogi, selisih model dan pengamatan, lokasi posisi tekanan dan perubahan volume yang terjadi akibat deformasi. Untuk menentukan nilai parameter terbaik dari model dalam aplikasi Sphere digunakan *metode grid search* yaitu dengan mencari *fs* (*finess function*) antara pengamatan dan model terkecil. Dari hasil tersebut lalu didapatkan parameter terbaik dari model mogi, parameter yang dihasilkan adalah merupakan nilai terbaik yang dihasilkan dalam penelitian. Skema pengolahan pada sphere dapat dilihat pada Gambar 2.6.




Gambar 2.6 Skema pengolahan menggunakan Sphere

## 2.9 Uji Chi-Square

Menurut (Kuncoro, 2013) Uji *chi square* ditujukan untuk mengevaluasi kualitas dari hasil estimasi. Uji *chi square* ($\chi^2$) melakukan evaluasi terhadap residu antara vektor pergerakan pengamatan dengan vektor pergerakan model. Apabila residu ini minimum dan memenuhi syarat yang ditentukan (sebagai contoh dengan menggunakan selang kepercayaan 95% atau $2\sigma$) maka hasil estimasi parameter dinyatakan sebagai hasil yang memiliki kualitas yang baik. Nilai *chi square* ditentukan dengan menggunakan persamaan matriks 2.24.

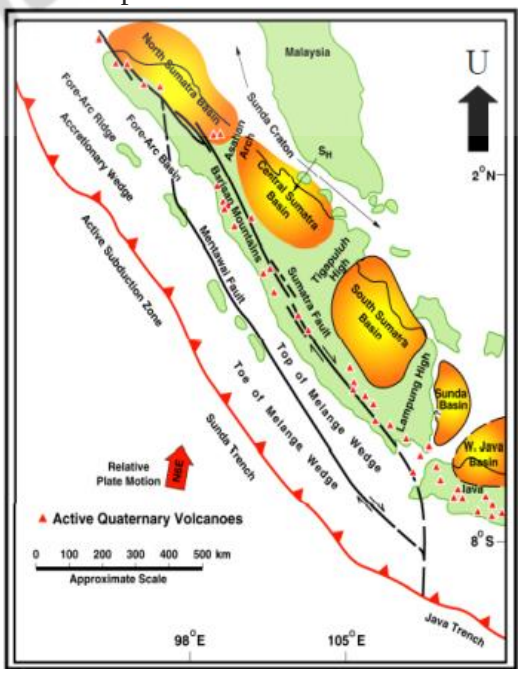
$$\chi^2 = E^T {C_E}^{-1} E \qquad \textbf{...(2.24)}$$

Dimana E adalah vektor residu E=(Vx-vx, Vy-vy, Vz-vz) dan C adalah matriks variansi kovariansi. V merupakan vektor pergeseran dan v merupakan vektor pergeseran model. Rasion antara variansi hasil estimasi dan variansi teoritis dapat diestimasi dengan $\chi^2/v$ dimana v adalah derajat kebebasan/ukuran lebih

yang pada kasus pengestimasian parameter deformasi. Variansi teoritis diasumsikan nilainya sekitar 1 untuk suatu model yang baik (Kuncoro, 2013). Menurut (Bevington,1969) pada prinsipnya nilai $X^2/v$ sekitar 1 menunjukkan bahwa tingkat kecocokan antara observasi dan estimasi sesuai dengan varian kesalahan.

## 2.10 Karakteristik Gunung Api Sinabung

Gunung Api Sinabung, yang terletak di Sumatra Utara, adalah bagian dari rantai vulkanik sepanjang 5000 km di sepanjang busur Sunda. (Diament dkk., 1992). Busur Sunda adalah batas konvergen antara Lempeng Laut Indo-Australia dan bagian selatan Lempeng Benua Eurasia ditunjukkan pada Gambar 2.7 Gunung Sinabung merupakan salah satu gunung api di Dataran Tinggi, Kabupaten Karo, Sumatera Utara, Indonesia. Koordinat puncak gunung Sinabung adalah 3° 10’12” LU dan 98° 23’31” BT dengan puncak tertinggi gunung ini adalah 2.460 meter diatas permukan laut (mdpl) yang menjadi puncak tertinggi di Sumatera Utara. Gunung Sinabung memiliki ketinggian 2.460 meter di atas permukaan laut yang di klasifikasikan sebagai gunung api aktif tipe strato (Sopian, 2019). Lokasi Gunung Sinabung dapat dilihat pada Gambar 2.8

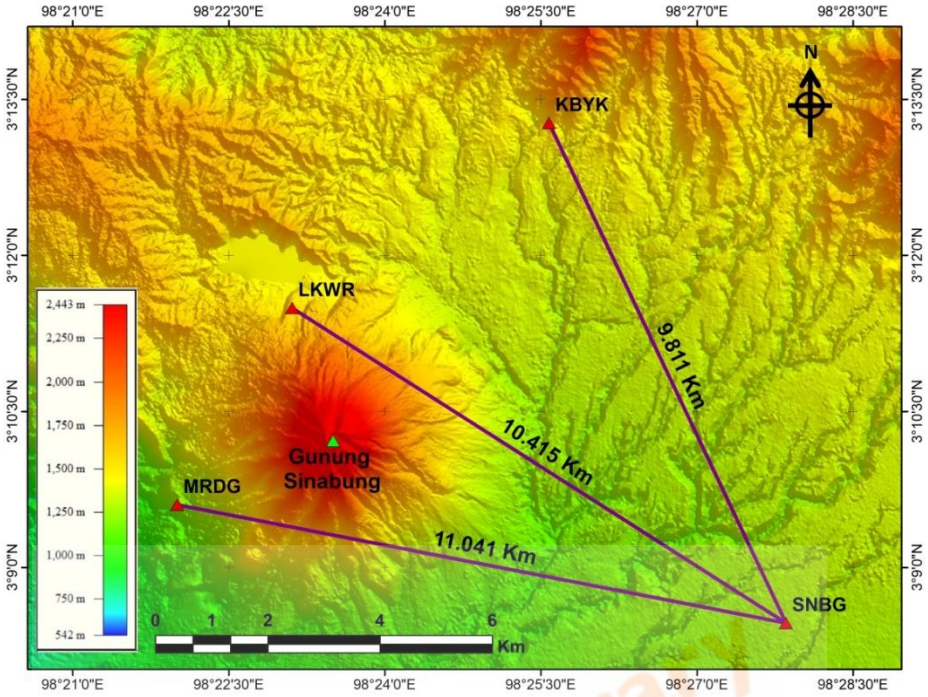



Gambar 2.7 Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Benua Eurasia

Gambar 2.8 Lokasi penelitian
(Sumber: Goggle, 2020)

## 2.11 Data Pengamatan GPS Gunung Api Sinabung

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pengamatan GPS secara kontinu yang diperoleh dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) yang terjadi pada tahun 2019, data yg diambil adalah pada tanggal 09 Juni 2019 , pada tanggal tersebut terjadi erupsi besar. Erupsi ini terekam di seismogram dengan durasi ± 9 menit 17 detik (BNPB, 2019). Pertimbangan memilih tanggal 09 Juni 2019, sebagai studi kasus karena intensitas aktivitas vulkanik sangat tinggi pada saat itu. Ada empat stasiun pengamatan GPS yang aktif digunakan sampai sekarang. Dalam penelitian ini stasiun GPS yang digunakan adalah LKWR (Laukawar), MRDG (Mardingding), KBYK (Kabayakan) dan SNBG (Sinabung). Dimana LKWR, KBYK dan MRDG adalah titik pengamatan GPS, sedangkan SNBG sebagai titik referensi. Metode penentuan posisi GPS yang digunakan adalah diferensial, di mana data GPS diproses dalam mode penentuan posisi kinematik.




Gambar 2.9 Jarak antara titik-titik pengamatan GPS

Jarak antara masing-masing titik pengamatan GPS relatif terhadap stasiun pengamatan SNBG (Sinabung) adalah; KBYK-SNBG berjarak 9,8 km, LKWR-SNBG berjarak 10,4 km, dan MRDG-SNBG berjarak 11,04 km (Siregar, 2017).

## 2.12 Pengolahan Data GPS Kinematik Menggunakan TRACK 1.30

TRACK merupakan salah satu fitur yang terdapat pada GAMIT/GLOBK yang mana didesain untuk melakukan pengolahan terhadap hasil pengamatan GPS kinematik. Untuk mendapatkan hasil yang baik, pada TRACK suatu posisi diasumsikan sebagai fungsi dari waktu, yang mana akan sangat membantu dalam proses menyelesaikan masalah pembulatan nilai ambiguitas. TRACK menggunakan pelebaran jalur **Melbourne-Wubbena** (MW-WL) untuk menyelesaikan nilai ambiguitas phase L1-L2, dan mengkombinasikan teknik tersebut untuk menyelesaikan koreksi *cycles slips* pada L1-L2 secara terpisah (Floyd, 2018).

TRACK memanfaatkan data *Carrier Phase* yang dipancarkan oleh GPS dan data pengamatan pseudorange untuk memperkirakan posisi relatif 3 dimensi

dari stasiun kontrol darat dan orbit satelit, pengaruh keterlambatan zenith atmosfer, dan parameter orientasi bumi lainnya (King, 2015).

Tahapan pengolahan data pada penelitian ini mencakup proses mengestimasi tiga dimensi posisi relatif stasiun bumi dan orbit satelit menggunakan TRACK 1.30. Masing-masing data *'rinex'* yang diperoleh dari hasil pengamatan GPS, kemudian data tersebut diproses dengan menyusun *script 'track.cmd'* yang mana pada *script* tersebut berisikan *file-file* yang dibutuhkan untuk menjalankan perintah pengolahan data. *Command* yang digunakan dapat dilihat dibawah ini.

```
track -f <command file>-d <day> -w <week>
```

Keterangan:

'-f ': *Script track.cmd*

'-d ': DOY yang ingin diolah ;

'-w ': Data orbit IGS (SP3) yang berisikan koordinat tetap bumi.

Beberapa *function* yang digunakan dalam pembuatan *script* TRACK, diuraikan seperti berikut.

- *'Obs_file'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk memberikan kode input pada setiap *file rinex* yang digunakan. Tipe 'F' diatur sebagai stasiun tetap (pos), sedangkan 'K' disini diatur sebagai stasiun pengamatan dilapangan (GPS Kinematik).
- *'Nav_file'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk memberikan informasi orbit *file '.SP3'* yang sesuai dengan tanggal data *rinex* yang ingin diproses.
- *'Mode_long'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk memberikan pengaturan panjang data yang ingin diproses.
- *'Site_pos'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk memasukkan setiap koordinat apriori pada stasiun pengamatan yang digunakan.
- *'Sum_file'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk menghasilkan file ringkasan pada saat proses pengolahan dilakukan.

- *'Res_root'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk menghasilkan *file '.LC'* yang mana pada saat proses *plotting* data inilah yang dibutuhkan untuk melakukan proses *plotting time series*.
- *'Out_type.NEU'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk memberikan spesifikasi jenis *output* yang akan dihasilkan.
- *'Float_type'*: Dimana pada *'Command'* ini digunakan untuk memberikan spesifikasi batas nilai *ambiguitas*.

Setelah memiliki data input yang diperlukan seperti yang tertera diatas, barulah fitur *automatic batch processing* dari TRACK dapat dijalankan. Hasil akhir dari proses pengolahan data menggunakan TRACK berupa *Processing Summary,* dan *file* (.LC) yang berisikan pergeseran koordinat pada setiap epok (Sopian, 2019)

## 2.13 Ringkasan Studi-Studi Deformasi Gunung Api

Terdapat beberapa penelitian yang terkait dengan kebencanaan gunung api khususnya yang dapat menjadi rujukan serta masukan terkait pada metode pengamatan GPS kinematik. Beberapa penelitian tersebut akan dijabarkan pada uraian dibawah ini.

Penelitian yang dilakukan oleh Kurnia dkk, (2013) yang berjudul Estimasi Kedalaman Pusat Tekanan dan Volume Magma dari Hasil Perbandingan Nilai Maksimum Deformasi Horizontal dan Vertikal Hasil Pengamatan GPS *Real-Time* Kontinu memiliki tujuan untuk mengetahui estemasi kedalaman pusat tekanan dan volume magma dari hasil perbandingan nilai maksimum deformasi horizontal dan vertikal hasil dari pengamatan GPS *Real-Time* secara kontinyu mengunakan Model Mogi. Pemantauan yang dilakukan dengan pengamatan GPS *real time* kontinu pada tiga titik pantau, yaitu GRKI, LKWR, dan SKNL. Deformasi horizontal dan vertikal yang digunakan adalah memiliki nilai kurang dari 0,5 meter. Hasil dari nilai maksimum deformasi horizontal adalah 0,410 meter; nilai maksimum deformasi vertikal adalah 0,326 meter; dan didapatkan nilai kedalaman pusat tekanan estimasi adalah 11.358,887 meter = 11,4 km dengan simpangan baku (±) 412,925 meter = 0,4 km dari puncak kawah Gunung api

Sinabung dan hasil volume magma estimasi Gunung api Sinabung adalah 266.155.980,655 $m^3$ dengan simpangan baku (±) 6.574.227,425 $m^3$.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Purnomo dkk, (2014) dengan judul Analisa Deformasi Untuk Prediksi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Data GPS. Bertujuan untuk mengkaji pola posisi, arah dan besar pergeseran pada Gunung Merapi pada bulan September 2013-Maret 2014. Dalam penelitian ini menggunakan Model Mogi untuk prediksi sumber tekanan. Dari hasil analisa yang dilakukan mulai bulan September 2013 sampai 31 Maret 2014, didapatkan nilai pergeseran horisontal untuk stasiun DELS sebesar 0,010801005 dan vertikal sebesar -0,02366, pergeseran horisontal untuk stasiun GRWH sebesar 0.046374924 dan vertikal sebesar 0,04096, dan pergeseran horizontal untuk stasiun KLAT sebesar 0.013173629 dan vertikal sebesar -0.01479. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa tubuh gunung Merapi sedang mengalami deformasi dengan sifat deformasinya adalah inflasi. Sedangkan posisi pusat tekanan magma adalah 7°32’2,13” LS; 110°26’51,57” BT dengan kedalaman ± 7140,5084 m relatif dari puncak. Volume magma adalah 41.788.427,5957 $m^3$ dan dapat digunakan untuk prediksi skala erupsi mendatang.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Siregar dkk, (2017) yang memiliki tujuan dari penelitian tersebut yaitu untuk menganalisis perpindahan pada setiap titik-titik GPS pengamatan kinematik disekitar Gunung Api Sinabung pada tanggal 4 dan 8 Februari 2017 dan menganalisis *baseline* antara dua titik pengamatan GPS kinematik pada bulan Februari 2017 serta mengetahui korelasi antara komponen *volcanic seismic* dengan hasil pengolahan GPS kinematik menggunakan *software* RTKLIB Ver.2.4.2. Pada tanggal 4 Februari; sebelum letusan terjadi, perubahan dalam perpindahan pada komponen Utara-Selatan dan Timur-Barat, dimana pada tanggal 4 Februari; Sebelum letusan terjadi stasiun pengamatan GPS LKWR berpindah ke Arah Tenggara, kemudian berubah ke arah Barat Laut, hal ini menunjukkan kekuatan besar yang datang pada saat sebelum letusan dimulai, terutama pada komponen Timur-Barat, yang mana itu pertama kali perpindahan ke arah Timur dengan jangkauan sekitar 6 cm dekat ke arah tubuh Gunung api, kemudian setelah mencapai puncaknya, berubah arah ke Barat,

ketika letusan terjadi, berubah kembali ke Arah Tenggara. Korelasi antara seismik z-komponen dan kinematis GPS pengolahan pada komponen naik turun di LKWR pada tanggal 4 Februari menunjukkan korelasi positif, pola dilihat dalam 5 menit sebelum letusan, 5 menit selama letusan terjadi, dan 5 menit setelah letusan.

Dengan judul penelitian Analisis Deformasi Gunung Api Papandayan Berdasarkan Data Pengamatan GPS Tahun 2002 – 2011 yang dilakukan oleh Jamel dkk, (2013) bertujuan untuk menentukan kecepatan pergeseran titik-titik Gunung api Papandayan, memprediksi letak sumber tekanan magma Gunung api Papandayan menggunakan Mogi Model, dan memberikan informasi mengenai pergeseran titik-titik pengamatan. Untuk pengolahan data GPS digunakan Bernese 5.0. Dari hasil penelitian ini didapatkan sumber tekanan berada pada posisi $107^{o}$ 44’7” BT, $7^{o}$19’13” LS dimana sumber tekanan pertama berada pada kedalaman 1.500 m dengan volume 500.000 $m^3$ sedangkan sumber tekanan kedua berada pada kedalaman 4.500 m dengan volume 5.000.000 $m^3$. Pada sumber tekanan pertama terjadi proses deflasi dan proses inflasi terjadi pada sumber tekanan kedua, kecepatan pergeseran titik-titik pengamatan GPS pada Gunung api Papandayan per tahun dari tahun 2003 – 2011 berkisar dari rentang 1,3 mm/tahun – 2 cm/tahun. Pada tahun 2003 - 2005, terdapat dua sumber magma yaitu sumber dalam dan sumber dangkal dimana di sana terjadi proses inflasi. Pada tahun 2005-2008 hanya satu sumber yang mempengaruhi dimana di sana terjadi proses deflasi. Pada tahun 2008 - Juli 2011 terdapat dua sumber magma yang mempengaruhi dimana di sana terjadi proses deflasi dan inflasi. Pada Juli 2011 - Agustus 2011 terdapat satu sumber magma dimana di sana terjadi proses inflasi. Pada tahun 2003 - Agustus 2011 terdapat dua sumber magma dimana di sana terjadi proses deflasi dan inflasi.

Dengan judul penelitian Analisis Deformasi Gunung Merapi Berdasarkan Data Pengamatan GPS Februari-Juli 2015 yang diilakukan oleh Wismaya dkk. (2016) bertujuan untuk mengetahui posisi, arah dan kecepatan besar pergeseran pada saat letusan Gunung Merapi. Dari analisis unsur deformasi tersebut, dapat diketahui karakteristik deformasi pada Gunung Merapi. Untuk pengloahan data GPS digunakanlah *scientific software* yaitu GAMIT/GLOBK. Dari hasil analisis

yang dilakukan selama 6 bulan, yaitu bulan Februari hingga Juli 2015 didapatkan nilai pergeseran horizontal sebesar 0,01822 meter menuju ke arah barat laut dan vertikal sebesar -0,06924 meter dengan sifat deflasi untuk stasiun DELS, horizontal sebesar 0,030508 meter menuju ke arah barat daya dan vertikal sebesar -0,00875 meter dengan sifat deflasi untuk stasiun GRWH, horizontal sebesar 0,025822 meter menuju ke arah tenggara dan vertikal sebesar 0,07725 meter dengan sifat inflasi untuk stasiun KLAT.

itenas library