

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gunung Api

Gunung api merupakan salah satu fenomena alam yang terdapat baik di daratan maupun di lautan. Gunung adalah bentuk tanah yang menonjol di atas wilayah sekitarnya, sedangkan definisi api dalam gunung api adalah material pijar yang keluar dari dalam inti bumi. Gunung api adalah lubang atau saluran yang menghubungkan suatu wadah yang berisi bahan yang disebut magma [7]. Gambar 2.1 menunjukkan gunung api.



Gambar 2.1 Gunung Api [8]

Gunung api di Indonesia terbentuk karena proses tumbukan antar lempeng. Lempeng tersebut adalah lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik. Untuk itu klasifikasi gunung api di Indonesia menjadi 3 tipe yaitu [9]:

1. Tipe A merupakan tipe gunung api yang melakukan kegiatan erupsi magmatik sesudah tahun 1600.
2. Tipe B merupakan tipe gunung api yang sejak tahun 1600 tidak menunjukkan kegiatan erupsi magmatik tetapi masih memperlihatkan indikasi yang ditandai oleh adanya solfara.

3. Tipe C merupakan tipe gunung api yang pusat erupsinya tidak diketahui dalam sejarah kegiatannya, tetapi memperlihatkan ciri-ciri kegiatan masa lampau yang ditunjukkan oleh lapangan fumarola.

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 kepermukaan bumi. Aktivitas gunung api dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu aktivitas vulkanik dan non vulkanik. Aktivitas non vulkanik biasanya tidak identik dengan penyebab terjadinya gunung api, namun hanya menghasilkan fenomena alam disekitar gunung api seperti air panas, sedangkan bencana gunung api biasanya identik dengan aktivitas vulkanik gunung api [10]. Peningkatan aktivitas gunung api dapat menimbulkan gempa bumi. Gempa pada gunung api berupa gempa vulkanik biasanya untuk intensitas kecil hanya dapat diketahui dari rekaman seismograf yang terpasang di sekitar gunung api aktif. Skala letusan yang besar gempa vulkanik akan dirasakan pada daerah sekitar gunung api. Gempa vulkanik terbagi dalam 4 jenis [11]:

1. Gempa vulkanik A, merupakan gempa yang bersumber di bawah gunung api pada kedalaman 1-20 km dan terjadi pada gunung api aktif. Penyebab dari gempa ini adalah adanya magma yang naik pada permukaan yang disertai rekahan-rekahan.
2. Gempa vulkanik B, merupakan gempa yang terjadi pada kedalaman dari 1 km dari kawah gunung api aktif.
3. Gempa letusan, merupakan gempa yang diakibatkan oleh terjadi letusan. Gerakan awal dari gempa letusan adalah rekaman berupa naik dan turun ke atas atau ke bawah.
4. Gempa tremor, merupakan gempa yang menerus terjadi di sekitar gunung api. Jenis gempa ini dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu tremor harmonik dan guguran.

Aktivitas erupsi gunung api tidak hanya diakibatkan oleh kegempaan vulkanik, meliputi kegempaan lain. Kegempaan lain yang terjadi pada gunung api sebagai berikut [12]:

1. Gempa tornillo, merupakan gempa yang terjadi pada gunung api diakibatkan ada patahan gempa.
2. Gempa *low frequency*, merupakan getaran yang terkait dengan peningkatan jumlah fluida dalam tubuh gunung api.
3. Gempa awan panas, merupakan material aliran suspensi dari batu, kerikil pasir yang keluar bersamaan dengan gas vulkanik.
4. Gempa guguran, merupakan getaran yang diakibatkan oleh guguran atau longsor material dari tubuh gunung api, tergolong gelombang permukaan.
5. Gempa hembusan, merupakan getaran yang segera disusul dengan pelepasan uap air dan gas vulkanik dari kawah yang membumbung ke udara yang nampak sebagai semburan asap berwarna cerah.

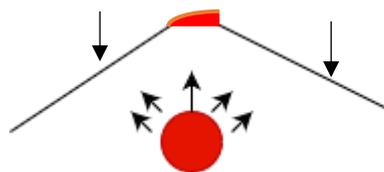
Akibat dari gempa vulkanik dan kegempaan lain yang terjadi di sekitar gunung api, menyebabkan terjadi perubahan kedudukan, atau pergerakan dari posisi pada gunung api.

2.2 Deformasi

Deformasi adalah perubahan kedudukan, pergerakan secara absolut dan relatif dari posisi suatu gunung api atau perubahan kedudukan dimensi yang linear [10]. Deformasi pada umumnya mengandung pengertian perubahan fisik dari suatu bahan karena kenaikan gaya. Perubahan tersebut berupa perubahan ukuran ataupun perubahan bentuk mekanika deformasi dengan melihat hubungan dengan *stress* dan *strain*. *Stress* adalah sepasang gaya yang sama besar tetapi berlawanan arah yang bekerja pada satuan luas, sedangkan *strain* adalah besarnya deformasi yang diakibatkan oleh kegiatan *stress* yang bekerja pada suatu benda [12].

Objek dari deformasi terdiri dari translasi, rotasi, dan regangan. Translasi merupakan perpindahan posisi sesuai dengan sumbu koordinat acuan tanpa mengalami perubahan bentuk. Rotasi adalah perubahan posisi tanpa mengalami perubahan bentuk yang membentuk perubahan sudut terhadap koordinat acuan. Regangan merupakan deformasi yang terjadi per unit panjang pada suatu bentuk [11]. Jenis dari deformasi dapat dibagi menjadi dua yakni deformasi statik yang bersifat permanen dan deformasi sesaat yang bersifat dinamis. Suatu titik atau objek dikatakan bergerak secara absolut apabila dikaji dari perilaku pergerakan titik sendiri dan dikatakan relatif apabila gerakan titik objek tersebut dikaji dari titik yang lain [10].

Mengetahui terjadinya deformasi pada suatu tempat atau objek diperlukan survei atau pengamatan yaitu survei deformasi dan geodinamika. Survei deformasi dan geodinamika adalah survei geodetik yang digunakan untuk mempelajari fenomena-fenomena deformasi. Fenomena deformasi yang disebabkan oleh alam seperti aktivitas gempa bumi. Fenomena yang lain adalah fenomena deformasi dan geodinamika yang disebabkan oleh aktivitas gunung api. Gambar 2.2 menunjukkan fenomena yang disebabkan oleh aktivitas gunung api.



Gambar 2.2 Deformasi Akibat Aktivitas Gunung Api

2.3 Deformasi Menggunakan GNSS pada Gunung Api

Erupsi gunung api umumnya diawali dengan beberapa gejala dan fenomena awal seperti meningkatnya aktivitas seismik, terjadinya deformasi dari tubuh gunung api adanya perubahan komposisi dan kecepatan dari semburan gas, adanya perubahan-perubahan temperatur pada gunung api, oleh karena itu untuk dapat memprediksi terjadinya letusan gunung api, maka gejala dan

fenomena awal tersebut yang menjadi dasar aktivitas gunung api yang harus dilakukan pengamatan secara maksimal dan kontinu pada gunung api [13].

Pengamatan deformasi menggunakan *Global Navigation Satellite System* (GNSS) mempunyai ketelitian posisi titik mencapai mm. *Global Navigation Satellite System* (GNSS) merupakan sistem penentuan posisi berbasis satelit yang menyediakan posisi tiga dimensi, kecepatan, dan informasi waktu kepada pengguna yang berada di dekat permukaan bumi selama 24 jam [14]. GNSS untuk mengukur jarak dengan pengamatan jarak minimal 4 satelit. Prinsip metode ini dengan cara menempatkan beberapa titik ukur di beberapa lokasi sekitar gunung api, koordinatnya secara teliti dengan menggunakan metode survei GNSS. Koordinat yang didapat dari pengukuran GNSS tersebut diikatkan pada stasiun referensi yang berada di luar zona deformasi gunung api [15]. Pengamatan deformasi gunung api dengan menggunakan GNSS pada prinsipnya dilakukan secara episodik dan kontinu. Pengamatan secara episodik, koordinatnya dari beberapa titik GNSS yang dipasang pada gunung api.

Pengamatan deformasi dengan metode GNSS penentuan posisi yang digunakan secara *real time*. Prinsip pengamatan deformasi gunung api menggunakan alat GNSS adalah melakukan pengamatan perubahan koordinat yang mewakili gunung dari waktu ke waktu. Kegiatan pengamatan deformasi gunung api, GNSS penerima sinyal ditempatkan pada punggung gunung yang akan dipantau dan terdapat suatu pusat pengamatan yang merupakan acuan dari koordinat penentuan sekaligus pusat pemrosesan data. Koordinat pergeseran titik yang dihasilkan dari pengamatan akan relatif terhadap pusat pengamatan [16].

Sinyal-sinyal dari satelit dengan GNSS penerima dalam jumlah dan waktu yang ditentukan, kemudian dapat diproses untuk mendapatkan informasi posisi, kecepatan ataupun waktu secara cepat dan teliti [17]. Pengamatan GNSS dalam sinyal satelit akan mengalami beberapa kesalahan bias ketika

melakukan pengambilan data, kesalahan dan bias yang terjadi pada sinyal satelit GNSS yaitu :

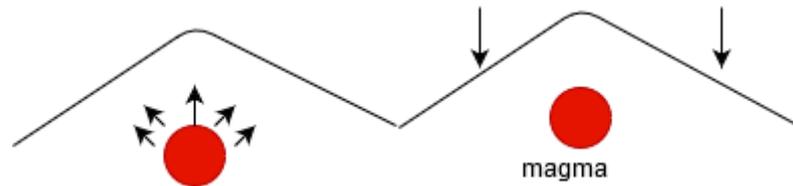
1. Kesalahan orbit satelit merupakan kesalahan kesalahan yang disebabkan posisi orbit satelit yang dilaporkan oleh *ephemeris* satelit tidak sama dengan orbit satelit yang sebenarnya.
2. Kesalahan jam *receiver* merupakan kesalahan yang terjadi jam satelit yang dilaporkan tidak sama dengan jam yang diterima *receiver* GNSS.
3. Kesalahan ambiguitas fase merupakan kesalahan jumlah gelombang penuh yang tidak terukur oleh *receiver*.
4. Kesalahan *cycle slips* merupakan kesalahan ketidak-kontinuan dalam jumlah gelombang yang diamati, karena sinyal ke *receiver* terputus pada saat pengamatan sinyal.
5. Bias troposfer merupakan kesalahan yang disebabkan oleh refraksi lapisan atmosfer sehingga akan mempengaruhi hasil ukuran jarak yang kurang teliti.
6. Bias ionosfer merupakan kesalahan pada lapisan ionosfer yang memperlambat kecepatan sinyal mengakibatkan hasil ukuran jarak menjadi kurang teliti.

Keunggulan dan keuntungan dari pengamatan GNSS dalam studi deformasi gunung api [2]:

1. Pengamatan GNSS dapat mencakup wilayah luas tanpa memerlukan keterlihatan antar titik pengamatan. Karakteristik seperti ini, GNSS dapat memantau gunung api yang berdekatan.
2. Pengamatan GNSS memberikan nilai vektor koordinat dalam komponen horizontal dan komponen vertikal.
3. Pengamatan GNSS dapat memberikan nilai vektor pergerakan dengan tingkat presisi secara spasial maupun temporal.

Deformasi yang dapat diamati dari pengamatan GNSS pada gunung api umumnya berupa kenaikan dan penurunan permukaan tanah. Deformasi permukaan gunung api yang berupa vektor pergeseran titik dan vektor

kecepatan perubahannya, dapat memberikan informasi tentang karakteristik dan dinamika dari kantong magma. Informasi gejala deformasi tersebut dapat dimodelkan untuk menentukan lokasi, kedalaman, bentuk, ukuran dan perubahan-perubahan tekanan sumber penyebab deformasi [12]. Gambar 2.3 menunjukkan deformasi tanah akibat aktivitas gunung api.



Gambar 2.3 Deformasi Tanah Akibat Aktivitas Gunung Api

Gambar 2.3 menunjukkan aktivitas tubuh gunung api yang mengalami kenaikan menjelang letusan dan tahap letusan sesudah permukaan tanah yang mengalami penurunan. Aktivitas letusan yang terjadi pada gunung membuat gunung mengalami perubahan dari bentuk semula. Mengetahui besar perubahan pergeseran yang terjadi pada gunung api dapat dilakukan dengan menghitung pergeseran menggunakan metode perataan kuadrat terkecil.

2.4 Transformasi

2.4.1 Transformasi Geosentrik ke Toposentrik

Transformasi yang digunakan yaitu transformasi geosentrik ke toposentrik. Transformasi koordinat ke dalam sistem toposentrik (n, e, u) , koordinat toposentrik pusat sumbunya berada dipermukaan bumi. Transformasi koordinat geosentrik ke toposentrik ditunjukkan pada persamaan 2.1 sampai 2.3 [18].

$$\begin{pmatrix} n \\ e \\ u \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$(2.2)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} XA - Xo \\ YA - Yo \\ ZA - Zo \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_o \cos\lambda_o & -\sin\varphi_o \sin\lambda_o & \cos\varphi_o \\ -\sin\lambda_o & \cos\lambda_o & 0 \\ \cos\varphi_o \cos\lambda_o & \cos\varphi_o \sin\lambda_o & \sin\varphi_o \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Keterangan :

- n, e, u : Koordinat toposentrik
 φ_o, λ_o : Koordinat geodetik
 Xo, Yo, Zo : Koordinat titik ikat
 XA, YA, ZA : Koordinat titik pemantauan
 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$: Selisih antara koordinat kartesian geosentrik
 R : Matriks rotasi

2.4.2 Transformasi Kerangka Referensi Lempeng Sundland

Transformasi kerangka referensi lempeng Sundland dilakukan untuk mengurangi efek lempeng, transformasi yang diamati mengacu pada ITRF2000. Transformasi lempeng Sundland ditunjukkan persamaan 2.4 sampai 2.13 [19].

$$a = \cos^{-1}[\sin \lambda_x \sin \lambda_p + \cos \lambda_x \cos \lambda_p \cos(\varphi_p - \varphi_x)] \quad (2.4)$$

$$C = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \lambda_p \sin(\varphi_p - \varphi_x)}{\sin a}\right) \quad (2.5)$$

$$v = \omega R \sin a \quad (2.6)$$

$$\beta = 90 + C \quad (2.7)$$

$$ve_{slb} = v \sin \beta \quad (2.8)$$

$$vn_{slb} = v \cos \alpha \quad (2.9)$$

$$ve_{slbr} = ve - ve_{slb} \quad (2.10)$$

$$vn_{slbr} = vn - vn_{slb} \quad (2.11)$$

$$de_{slbr} = de - ve_{slb} \quad (2.12)$$

$$de_{slbr} = de - ve_{slb} \quad (2.13)$$

$$dn_{slbr} = dn - vn_{slb}$$

Keterangan :

λ_x	: Bujur euler pole
λ_p	: Bujur titik
φ_x	: Lintang euler pole
φ_p	: Lintang titik
C	: Parameter untuk menghitung kecepatan
v	: Kecepatan yang dihasilkan dari titik karena pergerakan lempeng Sundland menuju ITRF2000
R	: Jari-jari bumi
ω, β	: Kecepatan sudut, kecepatan azimuth titik
ve_{slb}, vn_{slb}	: Kecepatan titik karena pergerakan lempeng Sundland komponen timur-barat, kecepatan titik karena pergerakan lempeng Sundland komponen utara-selatan
ve_{slbr}, vn_{slbr}	: Kecepatan titik mengacu pada lempeng Sundland komponen timur-barat, kecepatan titik mengacu pada lempeng Sundland komponen utara-selatan
de_{slbr}, dn_{slbr}	: Perpindahan titik komponen timur-barat, perpindahan titik komponen utara-selatan

2.5 Uji Statistik

Pengujian statistik yang dilakukan yaitu uji tabel distribusi normal. Pengujian dilakukan dengan cara menguji variabel pergeseran titik nilainya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.14 [6].

$$P = \sqrt{dn^2 + de^2} \quad 2.14$$

Sedangkan untuk menentukan standar deviasi dari setiap stasiun pengamatan dihitung menggunakan persamaan 2.15.

$$std = \sqrt{sd dn^2 + sd de^2} \quad 2.15$$

Pergeseran titik dan standar deviasi telah didapatkan maka dilakukan pengujian pada setiap stasiun pengamatan menggunakan persamaan 2.16.

$$T = P/std \quad 2.16$$

Persamaan 2.17 menunjukkan pergeseran dinyatakan baik atau tidaknya jika

$$T > tdf \quad 2.17$$

Keterangan :

- dn, de : Vektor komponen utara-selatan, vektor komponen timur-barat
- P : Pergeseran titik
- $sd\ dn$: Standar deviasi dn
- $sd\ de$: Standar deviasi de
- std : Standar deviasi pergeseran titik
- T : Nilai pengujian pergeseran titik
- tdf : Nilai uji t dari tabel distribusi normal

Nilai df diasumsikan tak terhingga karena data pengamatan yang digunakan sangat banyak sehingga digunakan tabel distribusi normal dengan selang kepercayaan 50%. Nilai dari uji hipotesis adalah sebesar 0.67 sehingga rumus 2.17 dianggap baik apabila telah melebihi nilai [6].

2.6 Inflasi dan Deflasi

Transformasi digunakan untuk mempermudah perhitungan pergeseran dan mengurangi efek lempeng, dari perhitungan pergeseran didapatkan hasil untuk menentukan terjadi inflasi dan deflasi. Gambar 2.4 menunjukkan gunung api inflasi dan deflasi.



Gambar 2.4 Inflasi dan Deflasi [20]

Inflasi dan deflasi dapat diperoleh dari hasil vektor pergeseran dan perubahan jarak. Fenomena pada suatu periode dikatakan inflasi jika pergeseran lebih dari 50% pada stasiun pengamatan dari hasil vektor pergeseran menunjukkan menjauhi kawah. Fenomena pada suatu periode dikatakan deflasi jika lebih dari 50% pada stasiun pengamatan dari hasil vektor pergeseran menunjukkan mendekati kawah. Fenomena pada suatu periode dikatakan inflasi jika perubahan jarak menjauhi kawah. Fenomena pada suatu periode dikatakan deflasi jika perubahan jarak mendekati kawah. Deformasi berupa inflasi terjadi karena proses pergerakan magma ke permukaan yang menekan permukaan tanah di atasnya. Inflasi sering dijadikan sebagai tanda-tanda akan terjadinya letusan pada gunung api. Deformasi berupa deflasi terjadi setelah letusan gunung. Pada saat itu tekanan magma di dalam tubuh gunung telah melemah atau kembali dalam posisi semula. Gejala deformasi gunung api menyebabkan pergeseran posisi pada titik tubuh gunung api [2].