

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Gunung Api**

Gunung api merupakan rekahan dalam kerak bumi tempat keluarnya cairan magma, gas, abu vulkanik atau material lainnya ke permukaan bumi. Material yang dierupsikan ke permukaan bumi umumnya membentuk kerucut terpancung. Gunung api terbentuk dari pergerakan lempeng seperti pemekaran kerak benua yang bergerak saling menjauh sehingga magma yang terdapat di dalam bergerak ke permukaan bumi hingga membentuk busur gunung api tengah samudera, lalu tumbukan kerak benua dimana kerak samudera menunjam ke bawah kerak benua sehingga mengakibatkan gesekan antar kerak dan menghasilkan peleburan batuan serta lelehan yang akan bergerak ke permukaan melalui rekahan dan terbentuk busur gunung api di tepi benua, gunung api juga bisa terbentuk ketika kerak benua yang menjauh secara horizontal sehingga menimbulkan rekahan atau patahan yang akan menghasilkan lelehan batuan dan membentuk busur gunung api serta penipisan kerak samudera akibat pergerakan lempeng sehingga magma akan mudah menerobos ke dasar samudera dan membentuk deretan gunung api perisai. Berdasarkan tinggi rendahnya derajat fragmentasi, luas, kuat dan lemahnya erupsi serta tinggi tiang asap maka gunung api dibagi menjadi beberapa tipe erupsi yaitu :

- a. Tipe Hawaiian, merupakan erupsi eksplosif dari magma basaltik, umumnya berupa semburan lava pijar dan sering diikuti leleran lava secara simultan, terjadi pada celah atau kepundan sederhana.
- b. Tipe Strombolian, merupakan erupsi yang hampir sama dengan tipe Hawaiian berupa semburan lava pijar dari magma yang dangkal, umumnya terjadi pada gunung api yang sering aktif di tepi benua atau di tengah benua.
- c. Tipe Plinian, merupakan erupsi yang sangat eksplosif dari magma berviskositas tinggi atau magma asam, komposisi magma yang bersifat andesitik hingga riolitik.

Terdapat beberapa klasifikasi gunung api di Indonesia yaitu :

- a. Tipe A merupakan gunung api yang pernah mengalami erupsi magmatik sekurang-kurangnya satu kali sesudah tahun 1600 seperti Gunung Merapi, Gunung Bromo, Gunung Tangkuban Parahu, Gunung Sinabung, Gunung Semeru dan lain-lain.
- b. Tipe B merupakan gunung api sesudah tahun 1600 belum lagi menunjukkan tanda-tanda erupsi magmatik, namun gunung api tipe B memperlihatkan kegiatan seperti kegiatan solfatara atau mengeluarkan gas-gas oksida belerang.
- c. Tipe C merupakan gunung api yang erupsinya tidak diketahui dalam sejarah manusia, namun masih terdapat tanda-tanda kegiatan masa lampau berupa lapangan solfatara atau fumarol pada tingkat lemah (Badan Geologi, 2011).

Berikut terdapat tabel sebaran dari tipe gunung api di Indonesia :

Tabel 2.1 Sebaran dan Tipe Gunung Api (Sumber: ESDM, 2008)

Daerah	Jumlah Gunung Api		
	Tipe-A	Tipe-B	Tipe-C
Sumatera	13	12	6
Jawa	21	9	5
Bali	2	-	-
Lombok	1	-	-
Sumbawa	2	-	-
Flores	16	3	
Laut Banda	8	1	-
Sulawesi	6	2	-
Kep. Sangihe	5	-	-
Halmahera	5	2	-

## 2.2 Gempa Vulkanik

Dengan adanya peningkatan aktivitas gunung api dapat menimbulkan gempa vulkanik. Gempa vulkanik terjadi karena adanya aktivitas kantong magma atau lava panas yang terdapat di dalam gunung api. Pada umumnya gempa vulkanik memiliki intensitas kecil sehingga sulit dirasakan, biasanya hanya dapat diketahui dari rekaman seismogram yang terpasang di sekitar gunung api, gempa vulkanik bisa dirasakan di sekitar gunung api jika terjadi erupsi besar. Terdapat beberapa jenis gempa vulkanik sebagai berikut :

a. Gempa Letusan

Gempa yang diakibatkan oleh terjadinya letusan, amplitudo maksimum dari gempa tersebut merupakan magnitudo letusannya. Gerakan awal dari gempa letusan adalah rekaman berupa naik dan turun atau ke atas dan ke bawah.

b. Gempa Tremor

Gempa Tremor merupakan gempa yang terus menerus terjadi di sekitar gunung api. Gempa Tremor menandakan aktivitas kegempaan di sekitar gunung api sedang tinggi.

c. Gempa Tremor Harmonik

Tremor harmonik merupakan gempa yang dialami gunung api akibat pelepasan dari fluida atau energi dari dalam gunung api, hanya yang membedakan gempa tremor harmonik dengan non harmonik adalah kedalaman episentrum gempa tersebut.

d. Gempa Hembusan

Gempa ini terjadi akibat pergerakan fluida magmatik (gas) yang dimanifestasikan dalam bentuk keluarnya asap ke permukaan. Hembusan hanya akan terekam apabila tekanan yang dihasilkan cukup kuat, namun hembusan tidak selalu menandakan akan terjadi letusan.

### 2.3 Deformasi Gunung Api

Deformasi dapat diartikan sebagai perubahan secara fisik berupa perubahan ukuran maupun bentuk dikarenakan dikenai suatu gaya. Mekanisme dalam deformasi erat hubungannya dengan tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). *Stress* merupakan sepasang gaya yang sama besar yang berlawanan arah yang bekerja pada suatu satuan luas. Sedangkan *strain* merupakan besarnya deformasi yang diakibatkan oleh suatu *stress* yang bekerja pada suatu benda atau dapat dikatakan deformasi merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan perubahan dalam bentuk permukaan gunung berapi atau tanah di sekitarnya.

Dalam deformasi gunung api, perubahan yang dimaksud adalah perubahan posisi dari titik pantau GPS yang diletakkan di sekitar tubuh gunung api bila dilihat secara kuantitatif, perubahan secara geometrik ini dipengaruhi oleh beberapa hal,

seperti suatu gaya, fenomena fisik batuan (elastik, nonelastik atau rigid), dan waktu. Dalam fenomena deformasi suatu gunung api, aktivitas erupsi sangat berhubungan erat dengan aktivitas magma. Aktivitas ini akan mencerminkan dan mengidentifikasi sebuah peningkatan tekanan di dalam tubuh gunung api yang disebabkan oleh adanya gerakan magma di bawah permukaan (Vidyan dkk, 2013).

Pelaksanaan tugas akhir ini akan menganalisis perubahan posisi titik pantau GPS dengan mengestimasi nilai pergeseran secara horizontal dan vertikal, sebagai berikut :

a. Deformasi Vertikal

Untuk mengestimasi nilai pergeseran secara vertikal, dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$du = ut_2 - ut_1 \quad (2.1)$$

Keterangan :

$du$  = Nilai pergeseran *up*

$ut_1$  = Nilai komponen *u* pada kala awal

$ut_2$  = Nilai komponen *u* pada kala akhir

b. Deformasi Horizontal

Untuk mengestimasi nilai pergeseran secara horizontal, dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$dn = nt_2 - nt_1 \quad (2.2)$$

$$de = et_2 - et_1 \quad (2.3)$$

Keterangan :

$dn$  = Nilai pergeseran *north*

$nt_1$  = Nilai komponen *n* pada kala awal

$nt_2$  = Nilai komponen *n* pada kala akhir

$de$  = Nilai pergeseran *east*

$et_1$  = Nilai komponen *e* pada kala awal

$et_2$  = Nilai komponen *e* pada kala akhir

- c. Standar deviasi untuk pergeseran titik pantau GPS dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\sigma_{dr} = \sqrt{\sigma(et_2)^2 + \sigma(et_1)^2} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\sigma_{dr}$  = Standar deviasi untuk pergeseran titik pantau GPS

$\sigma et_1$  = Standar deviasi untuk komponen n,e,u pada kala pertama

$\sigma et_2$  = Standar deviasi untuk komponen n,e,u pada kala akhir

Bahkan untuk gunung api aktif yang sudah lama tidak menunjukkan aktivitasnya, dengan adanya sebuah fenomena deformasi dipercaya sebagai salah satu indikasi adanya peningkatan aktivitas dari sebuah gunung api. Deformasi pada permukaan tubuh gunung api yang berupa vektor pergeseran titik serta vektor kecepatan perubahannya diyakini dapat memberikan informasi mengenai karakteristik dan dinamika dari kantong magma. Informasi mengenai gejala dimodelkan untuk menentukan lokasi kedalaman, bentuk, ukuran, dan perubahan-perubahan dari tekanan sumber penyebab terjadinya deformasi (Abidin, 2007).



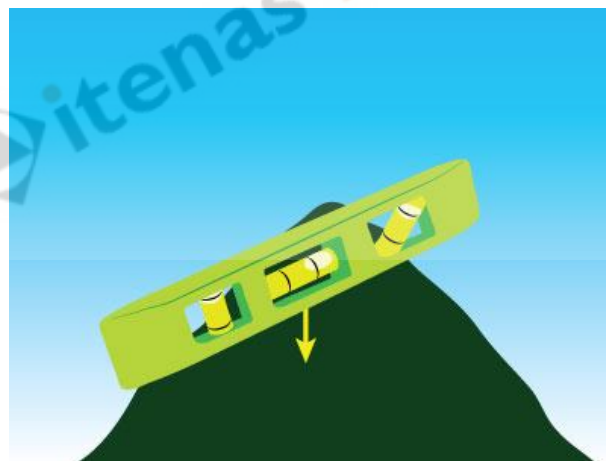
Gambar 2.1 Gejala Deformasi Gunung Api: Inflasi dan Deflasi (Sumber: Suganda dkk, 2007 diadaptasi dari Abidin, 2001)

Menurut Abidin (2007) prinsip dari aktivitas gunung api berupa inflasi yaitu pengangkatan permukaan tanah di sekitar gunung api akibat adanya magma yang naik di dalam tubuh gunung api dan deflasi yaitu penurunan yang terjadi setelah

periode letusan karena tekanan magma yang telah berkurang, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2. Pergeseran posisi pada suatu titik di tubuh gunung api akibat adanya aktivitas deformasi dapat terjadi baik dalam arah horizontal maupun vertikal. Pada gunung api dengan kantong magma jauh di bawah permukaan atau laju kenaikan magma yang lambat, nilai deformasi yang teramati akan relatif kecil. Sedangkan pada gunung api dengan kantong magma yang relatif dangkal atau laju kenaikan magma yang cepat, nilai pergeseran titik dapat mencapai puluhan meter (Abidin, 2007).

Untuk melakukan survei pemantauan deformasi suatu gunung api ada beberapa metode pelaksanaannya yaitu :

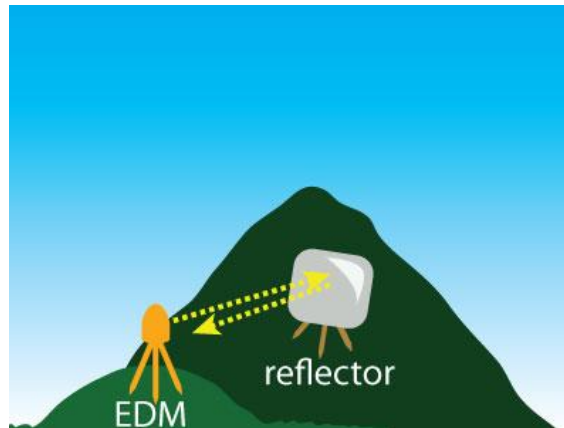
1. Menggunakan tiltmeter yaitu alat kecil berisi cairan dan gelembung, dengan mengisi tiltmeter dengan cairan yang menghantarkan listrik dan menempatkan elektroda di sepanjang tiltmeter nantinya akan menghasilkan sinyal listrik yang sesuai dengan arah dan tingkat kemiringan permukaan tanah.



Gambar 2.2 Alat Tiltmeter ditempatkan di Gunung Berapi (Sumber: *The Science and Learning Center*)

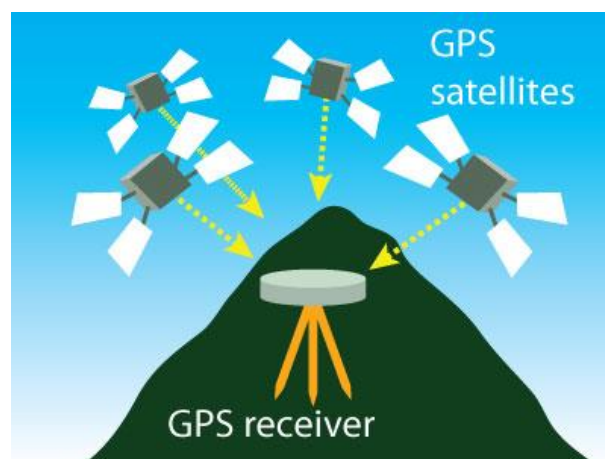
2. Menggunakan Electronic Distance Measurement (EDM) yaitu alat reflektif yang ditempatkan di permukaan tanah gunung api. EDM diarahkan ke alat reflektif tersebut, lalu EDM menyinari laser cahayanya akan dipantulkan kembali oleh reflektor dan diterima kembali oleh EDM. Dengan menghitung jumlah waktu yang dibutuhkan sinar laser untuk kembali ke

EDM, dapat dihitung jarak antara EDM dan reflektor, jika jarak berubah maka sedang terjadi deformasi pada gunung api tersebut.



Gambar 2.3 Electronic Distance Measurement (EDM) (Sumber: *The Science and Learning Center*)

3. *Global Positioning System (GPS)*, dapat digunakan untuk mengukur perubahan posisi *receiver* GPS. Perangkat GPS bekerja dengan menerima sinyal dari jaringan satelit GPS yang terus-menerus mengorbit bumi. Satelit-satelit ini mengirimkan informasi tentang posisi satelit pada waktu yang tepat. Jika perangkat GPS menerima informasi ini dari setidaknya empat satelit, maka perangkat GPS dapat menentukan jarak untuk setiap satelit dan secara tepat menghitung posisinya di permukaan bumi. Sehingga para peneliti menggunakan GPS secara tepat mengukur perubahan posisi titik-titik tetap di permukaan tanah dan mengungkapkan laju serta arah terjadinya deformasi (*The Science and Learning Center*).



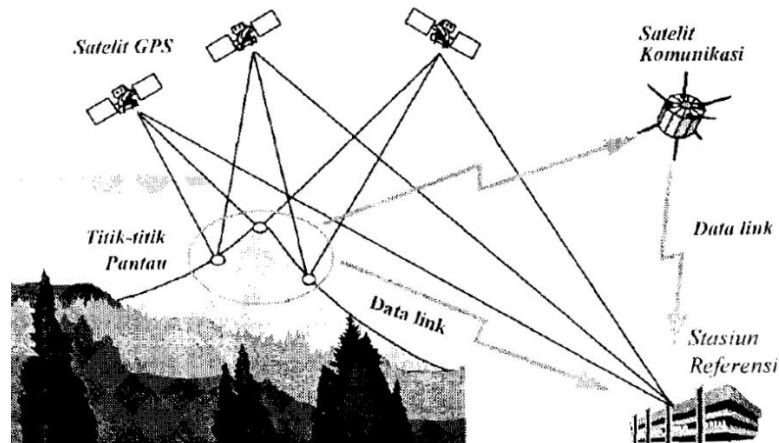
Gambar 2.4 Mengukur Perubahan Posisi dengan GPS (Sumber: *The Science and Learning Center*)

4. Metode *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) merupakan suatu teknik penginderaan jauh yang digunakan untuk mengekstraksi informasi tiga dimensi dari permukaan bumi dengan pengamatan fase gelombang radar. Teknik InSAR juga sering digunakan untuk pemantauan perubahan (deformasi) suatu area hingga kelitian orde cm. Untuk mendapatkan orde ketelitian hingga cm maka metode pengolahan data InSAR dilakukan dengan secara diferensial. Pada metode ini digunakan beberapa pasang interferogram sekaligus untuk mendeteksi perubahan permukaan tanah (Haniah, 2011). Citra SAR yang akan diolah secara interferometri khususnya dari satelit sering disebut dengan citra kompleks atau *Single Look Complex* (SLC) yang mana setiap *pixel* tersusun atas informasi amplitudo dan fase (Ismullah, 2004).
5. Metode *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), TLS memiliki kemampuan untuk mengambil data berupa *point clouds* yang sangat rapat dan akurat dalam waktu yang cepat dan pengambilan data yang relatif mudah. *Point clouds* adalah sekumpulan koordinat tiga dimensi (x,y,z) (Quintero, 2008). Kekurangan dalam pelaksanaan pemantauan menggunakan TLS yaitu peralatan masih sangat mahal, mobilitas alat masih relatif sulit dan kualitas hasil pengukuran dipengaruhi lingkungan dan objek.

#### **2.4 Penentuan Posisi dengan GPS secara Kontinu**

Prinsip dari metode penentuan aktivitas gunung api secara kontinu yaitu pemantauan terhadap perubahan koordinat beberapa titik yang mewakili gunung tersebut dari waktu ke waktu. Pada metode ini beberapa alat penerima sinyal (*receiver*) GPS ditempatkan di beberapa titik pantau pada punggung dan puncak gunung yang akan dipantau, serta pada suatu pusat pemantau (stasiun referensi) yang merupakan pusat pemroses data. Pusat pemantau merupakan suatu lokasi yang telah diketahui koordinatnya dan sebaiknya ditempatkan dekat dengan gunung api tetapi tidak terpengaruh deformasi.





Gambar 2.5 Pemantauan Gunung Api Secara Kontinu dengan GPS  
(Sumber: Abidin, H.Z., 2000)

Koordinat titik-titik pantau tersebut kemudian ditentukan secara teliti dengan GPS, relatif terhadap pusat pemantau dengan menggunakan metode penentuan posisi diferensial secara *real-time* dengan menggunakan data pengamatan fase. Untuk itu data pengamatan GPS dari titik pantau harus dikirimkan secara *real-time* ke pusat pemantau untuk diproses bersama dengan data pengamatan GPS dari pusat pemantau.

Dalam proses pemantauan aktivitas geometrik gunung api dengan GPS jika jarak antara kedua titik pantau secara sistematis semakin memanjang dari waktu ke waktu atau beda tinggi antara titik-titik pantau dengan pusat pemantau semakin besar secara kontinu maka dapat dikatakan bahwa gunung api tersebut akan meletus. Untuk mendapatkan kesimpulan yang lebih komprehensif tentang aktivitas gunung api maka informasi geometrik yang diberikan oleh GPS sebaiknya diintegrasikan dengan informasi-informasi vulkologis lainnya yang bersifat fisika, kimiawi dan biologi (Abidin, 2000).

## 2.5 Penentuan Posisi GPS Kinematik

Mengikuti perkembangan kebutuhan GPS dalam kehidupan manusia telah banyak dikembangkan metode-metode penentuan posisi dengan GPS, salah satu metode yang telah banyak digunakan dalam penentuan posisi objek yang bergerak adalah metode penentuan posisi secara kinematik. Penentuan posisi secara kinematik merupakan penentuan posisi dari titik-titik yang bergerak dan *receiver*

GPS tidak dapat berhenti pada titik tersebut sehingga dapat dikatakan data pengamatan GPS pada metode ini merupakan data pengamatan GPS kontinu. Maksud dari GPS kontinu yaitu memiliki data pengamatan GPS diskrit yang memiliki interval pengamatan yang sangat rapat yaitu 5 sekon hingga 30 sekon. Dengan interval yang sangat rapat tersebut objek yang bergerak dapat ditentukan posisinya setiap interval waktu atau epok (Abidin, 2006).

GPS kinematik banyak digunakan dalam berbagai keperluan riset geodetik. Salah satu dari penerapan metode tersebut adalah untuk pemantauan deformasi gunung api. Secara umum metode survei yang digunakan adalah metode penentuan posisi diferensial dengan menggunakan data pengamatan GPS kontinu sehingga pada posisi titik pantau deformasi ditentukan relatif terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya atau disebut stasiun referensi (Kuncoro, 2012).

Strategi pengolahan data yang diterapkan pada pengamatan GPS kinematik adalah dengan melakukan proses pengurangan data pengamatan GPS antar titik pantau dengan stasiun referensi pada waktu yang bersamaan, sehingga kesalahan dan bias dari data dapat dieliminasi dan direduksi. Secara otomatis, ketika kesalahan dan bias dapat direduksi dengan baik dan benar maka didapat ketelitian posisi yang memiliki tingkat akurasi dan presisi yang lebih baik. Ketelitian posisi yang diberikan oleh teknologi GPS kinematik sekitar 1-5 cm, dengan asumsi bahwa ambiguitas fase dapat ditentukan secara benar (Abidin, 2006).

## **2.6 Gunung Tangkuban Parahu**

Gunung Tangkuban Parahu merupakan salah satu gunung api aktif yang terletak di Kabupaten Subang dan Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Gunung ini termasuk ke dalam jenis gunung Stratovolcano yaitu memiliki lapisan pada dinding kawah karena mengeluarkan abu, batuan dan kerikil. Gunung Tangkuban Parahu memiliki ketinggian 2.087 m dpl. Gunung Tangkuban Parahu secara geografis terletak pada koordinat  $6^{\circ}45'34''$  LS dan  $107^{\circ}36'56''$  BT. Gunung Tangkuban Parahu memiliki 10 kawah yang terdiri dari Kawah Ratu, Kawah Upas, Kawah Baru, Kawah Lanang, Kawah Ecoma, Kawah Jurig, Kawah Siluman, Kawah Domas, Kawah Jarian dan Pangguyangan Badak.

Gunung Tangkuban Parahu memiliki karakter letusan dapat dibagi menjadi tiga fasa yaitu :

1. Fasa eksplosif yang menghasilkan piroklastik dan mengakibatkan terjadinya lahar
2. Fasa efusif menghasilkan banyak aliran lava dengan komposisi andesit basaltis
3. Fasa pembentukan atau pertumbuhan Gunung Tangkuban Parahu umumnya eksplosif kecil dan diselingi erupsi freatik

Erupsi Gunung Tangkuban Parahu dapat digolongkan sebagai erupsi kecil, leleran lava diperkirakan kemungkinannya terjadi. Berdasarkan pengalaman sejak abad ke-19, gunung ini tidak pernah menunjukkan erupsi magmatik besar kecuali erupsi abu tanpa diikuti oleh leleran lava, awan panas ataupun lontaran batu pijar. Erupsi freatik umumnya dominan dan biasanya diikuti oleh peningkatan suhu solfatara dan fumarol di beberapa kawah yang aktif yaitu Kawah Ratu, Kawah Baru, dan Kawah Domas. Material vulkanik yang dilontarkan umumnya abu yang sebarannya terbatas di sekitar daerah puncak hingga beberapa kilometer. Semburan lumpur hanya terbatas di daerah sekitar kawah. Pada waktu peningkatan kegiatan, asap putih fumarol atau solfatara kadang diikuti oleh peningkatan gas-gas vulkanik seperti gas racun CO dan CO<sub>2</sub>. Bila akumulasi gas-gas racun di sekitar kawah aktif semakin tinggi, daerahnya dapat diklasifikasikan ke dalam daerah bahaya primer terbatas. Bahaya sekunder seperti banjir lahar tidak pernah terjadi dalam waktu sejarah dan longsoran lokal terjadi di dalam kawah dan lereng atas yang terjal (Badan Geologi, 2014)

## **2.7 Perangkat Lunak TRACK 1.30**

TRACK merupakan salah satu fitur yang terdapat pada GAMIT atau GLOBK yang mana didesain untuk melakukan pengolahan terhadap hasil pengamatan GPS kinematik. Untuk mendapatkan hasil yang baik, perangkat lunak TRACK suatu posisi diasumsikan sebagai fungsi dari waktu, yang mana akan sangat membantu dalam proses menyelesaikan masalah pembulatan nilai ambiguitas fase. TRACK menggunakan Melbourne-Wubben Wide Lane (MW-WL) untuk menyelesaikan

nilai ambiguitas fase L1-L2, dan mengkombinasikan teknik tersebut untuk menyelesaikan koreksi *cycles slips* pada L1-L2 secara terpisah.

TRACK memanfaatkan data *Carrier Phase* yang dipancarkan oleh GPS dan data pengamatan *pseudorange* untuk memperkirakan posisi relatif tiga dimensi dari stasiun kontrol darat dan orbit satelit, pengaruh keterlambatan zenith atmosfer, dan parameter orientasi bumi lainnya (Floyd, 2018). 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 *Receiver Independent Exchange* (RINEX) yang diperoleh dari hasil pengamatan GPS, kemudian data tersebut diproses dengan menyusun *script* 'track.cmd' yang mana pada *script* tersebut berisikan *file* yang dibutuhkan untuk menjalankan perintah pengolahan data. *Command* yang digunakan dapat dilihat dibawah ini.

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

Keterangan :

1. -f : *Script* track.cmd
2. -d : *Day of Year* atau hari yang akan diolah
3. -w : *Data precise orbit* dengan format .Sp3

Beberapa *function* yang digunakan dalam pembuatan *script* TRACK berupa *command*, diuraikan seperti berikut :

- a. *Obs\_file* : Digunakan untuk memberikan kode input pada setiap *file* RINEX yang digunakan. Tipe 'F' diatur sebagai stasiun tetap (pos), sedangkan 'K' disini diatur sebagai titik pantau di lapangan (GPS kinematik).
- b. *Nav\_file* : Digunakan untuk memberikan informasi orbit *file* dalam format .Sp3 yang sesuai dengan tanggal data RINEX yang ingin diproses.

- c. *Mode\_long* : Digunakan untuk memberikan pengaturan panjang data yang ingin diproses.
- d. *Site\_pos* : Digunakan untuk memasukkan setiap koordinat apriori pada stasiun pengamatan yang digunakan.
- e. *Sum\_file* : Digunakan untuk menghasilkan *file* ringkasan pada saat proses pengolahan dilakukan.
- f. *Res\_root* : Digunakan untuk menghasilkan *file* '.LC' yang mana pada saat proses plotting data inilah yang dibutuhkan untuk melakukan proses *plotting time series*.
- g. *Out\_type.NEU* : Digunakan untuk memberikan spesifikasi jenis *output* yang akan dihasilkan.
- h. *Float\_type* : Digunakan untuk memberikan spesifikasi batas nilai ambiguitas.

Setelah memiliki data *input* yang diperlukan seperti yang tertera diatas, fitur *Run* dari TRACK dapat dijalankan. Hasil akhir dari proses pengolahan data menggunakan TRACK berupa *Processing Summary* dan *file* (.LC) yang berisikan pergeseran koordinat titik pantau ITBR dan SUCI disetiap epok.

## 2.8 Vektor Pergeseran

Vektor pergeseran merupakan besaran yang menyatakan perubahan suatu titik pengamatan dalam selang waktu tertentu, sehingga bisa menjadi indikator terjadinya deformasi di daerah pengamatan (Rusmen, 2012). Nilai vektor pergeseran didapat dari selisih koordinat selama pengamatan yang terdiri dari komponen horizontal dan komponen vertikal.

Untuk mendapatkan nilai vektor pergeseran digunakan kurva linear dari data hasil pengamatan, fungsi linear yang digunakan dengan rumus sebagai berikut :

$$y = a + bx \quad (2.5)$$

$$a = \frac{\sum XY.n - \sum X.\sum Y}{\sum X^2.n - (\sum X)^2} \quad (2.6)$$

$$b = \frac{\sum X^2 \cdot \sum Y - \sum X \cdot \sum XY}{\sum X^2 \cdot n - (\sum X)^2} \quad (2.7)$$

Dimana  $y$  merupakan nilai regresi linear pada titik pantau ITBR (*north, east, up*),  $X$  merupakan epok pengamatan,  $Y$  merupakan nilai pergeseran komponen north, east, up,  $n$  merupakan banyaknya data pengamatan,  $a$  merupakan konstanta, dan  $b$  merupakan nilai kemiringan garis linear.

Untuk analisa fungsi linear menggunakan metode kuadrat terkecil yaitu metode yang digunakan untuk mendapatkan kepresisian pergeseran yang terjadi di titik pantau ITBR dan SUCI. Perhitungan menggunakan metode kuadrat terkecil dapat dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$X = (A^T P A)^{-1} (A^T P F) \quad (2.8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin(2\pi t_1) & \cos(2\pi t_1) & \sin(4\pi t_1) & \cos(4\pi t_1) \\ 1 & t_2 & \sin(2\pi t_2) & \cos(2\pi t_2) & \sin(4\pi t_2) & \cos(4\pi t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n & \sin(2\pi t_n) & \cos(2\pi t_n) & \sin(4\pi t_n) & \cos(4\pi t_n) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$AX = L + V \quad (2.12)$$

$$\sigma_o^2 = \frac{v^2 v}{n-u} \quad (2.11)$$

$$\Sigma_{xx} = (A^T P A)^{-1} \sigma_o^2 \quad (2.13)$$

Dimana  $X$  menunjukkan parameter yang akan diperkirakan ( $a$  dan  $b$ ),  $A$  merupakan matriks desain,  $P$  merupakan matriks bobot,  $F$  merupakan matriks pengamatan,  $V$

merupakan matriks residu pengamatan,  $n$  adalah jumlah pengamatan dan  $u$  adalah jumlah parameter. Dengan menghitung menggunakan metode kuadrat terkecil maka kepresisian pergeseran didapat dari akar kuadrat variansinya (Kuncoro, 2013).

## 2.9 Uji Statistik Pergeseran

Uji statistik dilakukan menggunakan *t-distribution* atau dikenal sebagai *student's distribution (t-student)*, yang dimana dilakukan untuk menguji nilai pergeseran yang didapat benar mengindikasikan terjadinya deformasi atau *error*. *T-Student* biasa digunakan dalam pengujian hipotesis untuk memeriksa validitas sebuah sampel terhadap populasi dan untuk menurunkan interval kepercayaan rata-rata populasi yang mempunyai set sampel yang relatif kecil (Wolf dan Ghilani, 1997).

Uji statistik dilakukan untuk mengetahui titik-titik yang mengalami pergeseran dengan membandingkan resultan pergeseran horizontal titik-titik pengamatan dengan standar deviasi resultan pergeseran horizontalnya. Pengujian ini dilakukan dengan cara menguji variabel pergeseran titik  $P_{xy}$  dari sesi pengamatan  $x$  ke sesi pengamat  $y$  yang nilainya dapat dihitung menggunakan rumus :

$$P_{xy} = \sqrt{dN_{xy}^2 + dE_{xy}^2} \quad (2.16)$$

Adapun standar deviasi dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\sigma P_{xy} = \sqrt{\sigma dN_{xy}^2 + \sigma dE_{xy}^2} \quad (2.17)$$

Hipotesis nol yang dilakukan pada uji statistik ini adalah titik pengamatan tidak bergeser dalam selang waktu  $x$  dan  $y$ , hipotesis alternatif merupakan titik pengamatan bergeser dalam selang waktu  $x$  dan  $y$ , sehingga :

$$\text{Hipotesis nol} \quad H_0 : P_{xy} = 0$$

$$\text{Hipotesis alternatif} \quad H_1 : P_{xy} \neq 0$$

Rumus statistik yang digunakan dalam menguji pergeseran titik pengamatan adalah :

$$T = \frac{P_{xy}}{\sigma P_{xy}} \quad (2.18)$$

Terakhir dilakukan uji hipotesis signifikan seperti yang tercantum pada persamaan. Pergeseran dinyatakan signifikan atau hipotesis nol ditolak jika (Ghilani, 1997) :

$$T > t_{df, \alpha/2} \quad (2.19)$$

Keterangan :

$P_{xy}$  : Pergeseran titik pengamatan

$\sigma P_{xy}$  : Standar deviasi  $P_{xy}$

$\sigma dN_{xy}, \sigma dE_{xy}$  : Standar deviasi komponen n dan e

$T$  : Besaran yang menunjukkan signifikansi pergeseran

$df$  : Derajat kebebasan

$\alpha$  : Level signifikansi yang digunakan

Nilai  $df$  yang merepresentasikan derajat kebebasan (*degrees of freedom*) diartikan sebagai banyaknya pengamatan bebas total pengamatan sampel, dengan data pergeseran titik diturunkan dari data pengamatan beberapa satelit dengan lama pengamatan pada masing-masing titik GPS di area Gunung Tangkuban Parahu selama 1-24 jam dengan interval waktu 15 detik, maka dapat diasumsikan  $df$  bernilai tak hingga. Selang kepercayaan yang digunakan pada pengamatan ini yaitu 95% sehingga nilai dari  $T > t_{df, \alpha/2}$  adalah 1,960. Nilai pada tabel *t-student* dinyatakan sebagai t syarat untuk menentukan titik mana yang lolos uji pengamatan. Titik yang lolos uji pengamatan dianggap mewakili keadaan yang sebenarnya dan menggambarkan pergeseran titik yang terjadi.



## 2.10 Perhitungan Perubahan Baseline

Untuk melakukan perhitungan perubahan baseline diperlukan nilai pergeseran koordinat titik pantau SUCI dan titik pantau ITBR yang relatif terhadap titik referensi POSP. Rumus untuk menghitung baseline (B) yaitu menggunakan rumus :

$$B = \sqrt{dN^2 + dE^2 + dU^2} \quad (2.14)$$

Nilai perubahan baseline (dB) didapat dari selisih nilai baseline ke-n dengan nilai baseline awal dan untuk menghitung nilai standar deviasi perubahan baseline sebagai berikut :

$$\sigma dB = \sqrt{\left(\frac{\partial dB}{\partial N} \sigma N\right)^2 + \left(\frac{\partial dB}{\partial E} \sigma E\right)^2 + \left(\frac{\partial dB}{\partial U} \sigma U\right)^2} \quad (2.15)$$

Keterangan :

- dB : Perubahan baseline (m)
- $\sigma dB$  : Standar deviasi perubahan baseline (m)
- $\sigma N$  : Standar deviasi komponen n (m)
- $\sigma E$  : Standar deviasi komponen e (m)
- $\sigma U$  : Standar deviasi komponen u (m)

## 2.11 Ketentuan Pengamatan Baseline

Untuk mendapatkan nilai koordinat hasil pengukuran kinematic dengan tingkat ketelitian yang tinggi, metode pengamatan relatif positioning atau biasa dikenal dengan differensial GPS ini mampu mengeliminasi beberapa komponen kesalahan (komponen waktu dan komponen atmosfer) yang muncul dalam pengukuran GPS. Metode ini membutuhkan satu atau lebih titik untuk referensi sehingga penentuan posisi objek dilakukan dengan pengolahan jarak (baseline) ke titik referensi (Abidin, 1994).

Pengolahan data setelah pengamatan memberikan hasil yang lebih baik karena menggunakan precise orbit untuk mengkoreksi kesalahan yang muncul dalam pengamatan. Terdapat beberapa ketentuan dalam pengamatan baseline menggunakan GPS sebagai berikut :

1. Sebaiknya receiver GPS yang digunakan pada suatu survei memiliki merek dan tipe yang sama karena jika digunakan tipe yang berbeda akan menimbulkan masalah seperti teknik pemrosesan sinyal yang berbeda, ketelitian time-tagging yang berbeda. Pada penelitian ini titik pantau ITBR dan SUCI menggunakan tipe receiver GR10 antena AR20 Leica.
2. Baseline tidak terlalu panjang (<20km) karena semakin panjang baseline pengaruh kesalahan orbit dan refraksi ionosfir akan semakin besar.
3. Lama pengamatan GPS sebaiknya juga memperhitungkan panjang baseline sebagai berikut :

Tabel 2.2 Lama Pengamatan GPS (Sumber: Abidin, 1994)

Jumlah Satelit	Panjang Baseline	Siang Hari	Malam Hari
<i>Rapid Static</i>			
4 atau 5	< 5 km	5-10 menit	5 menit
4 atau 5	5-10 km	10-20 menit	5-10 menit
4 atau 5	10-15 km	>30 menit	5-20 menit
<i>Static</i>			
4 atau 5	15-30km	1-2jam	1 jam
4 atau 5	>30 km	2-3 jam	2 jam

Lama pengamatan lebih panjang akan terjadi perubahan geometri yang lebih besar, perubahan kondisi atmosfer yang lebih bervariasi, ketelitian posisi yang lebih baik, dan jika menggunakan interval pengamatan yang lebih kecil akan menghasilkan data yang lebih banyak tetapi hanya meningkatkan presisi bukan akurasi. Jika menggunakan GPS Kinematik, dilihat dari hasil penelitian Agustan (2018) mengolah baseline 17 meter, 31 km, 110 km menghasilkan panjang baseline yang lebih pendek memberikan tingkat ketelitian koordinat yang lebih bagus hingga centimeter dibandingkan dengan hasil yang diberikan dari pengolahan baseline yang lebih panjang. Tingkat ketelitian ini utamanya disebabkan oleh kondisi atmosfer yang berbeda sehingga mempengaruhi perambatan gelombang.

## 2.12 Penelitian Terdahulu

Penelitian menggunakan metode GPS kinematik untuk memantau deformasi pada gunung api telah dilakukan pada beberapa studi kasus, diantaranya yaitu *Correlation Between Volcanic Seismic and Kinematic GPS Processing on Sinabung Volcano in Februari 2017* disusun oleh Siregar (2017) dari ITB, dalam skripsinya dijelaskan tujuan dari penelitian untuk menganalisis perpindahan titik pantau GPS kinematik disekitar Gunung Api Sinabung dan menganalisis baseline antara dua titik pantau GPS kinematik serta mengaitkan komponen seismik vulkanik dengan hasil pemrosesan GPS kinematik Gunung Api Sinabung. Data yang digunakan yaitu data GPS kontinu dari PVMBG dan data seismik vulkanik dari Observatorium Gunung Api Sinabung. Data observasi GPS diproses menggunakan RTKLIB Ver 2.4.2 dalam mode penentuan posisi kinematik, yang nantinya akan menghasilkan perpindahan deret waktu kinematik dari setiap stasiun pengamatan GPS per komponen, hasil perpindahan deret waktu kinematik ini kemudian digunakan untuk memeriksa baseline deret waktu kinematik dan dianalisis per komponen setelahnya, dan mengkolerasikan sinyal seismik vulkanik dengan hasil seri waktu GPS kinematik.

Selanjutnya penelitian serupa juga dilakukan oleh Kuncoro., dkk (2012), dari Teknik Geodesi dan Geomatika ITB dalam jurnal yang berjudul “Analisis Metode GPS Kinematik Menggunakan Perangkat Lunak RTKLIB”. Dalam jurnal tersebut dijelaskan tujuan dari penelitian ini yaitu melakukan pengujian terhadap kemampuan perangkat lunak RTKLIB menggunakan data GPS dengan berbagai variasi panjang baseline pada saat tidak terjadi gempa serta pendeteksian *offset* gempa dari hasil pengolahan baseline pengamatan GPS kontinu pada saat tidak terjadi gempa. Data yang digunakan yaitu beberapa data pengamatan GPS kontinu *Sumatran GPS Array* (SuGAR) pada saat tidak terjadi gempa dan saat terjadi gempa Mentawai tahun 2010, beberapa data pengamatan GPS kontinu pada jaring *International GNSS Service* (IGS) di Jepang pada saat tidak terjadi gempa dan saat terjadi gempa Honshu tahun 2011 dan beberapa data pengamatan GPS kontinu.

Selanjutnya penelitian yang dilaksanakan oleh Sopian (2020) mengambil studi kasus Gunung Api Sinabung. Penelitian yang dilakukan memiliki tujuan untuk

mengetahui besar pergeseran di setiap titik stasiun pengamatan GPS pada saat terjadinya erupsi Gunung Api Sinabung dan mengetahui fenomena deformasi yang terjadi ketika aktivitas erupsi pada setiap stasiun pengamatan GPS. Data yang digunakan dalam pengolahan ini adalah data GPS pada tanggal 22 Mei 2016 dan 4 hingga 5 Februari 2017 di setiap stasiun pengamatan yaitu LKWR, KBYK, MRDG dan SNBG. Untuk mendapatkan perubahan koordinat dengan menggunakan perangkat lunak TRACK dan menggunakan perangkat lunak Matlab R2015b untuk *plotting time series* pergeseran.

