

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gunung Agung

Gunung secara harfiah berarti sebuah bentuk tanah yang menonjol di atas wilayah sekitarnya yang merupakan bukit yang sangat besar dan tinggi (biasanya tingginya lebih dari 600 m). Sedangkan definisi api yang digunakan dalam istilah Gunung Agung merujuk kepada material pijar yang keluar dari dalam inti bumi (Kusnandar, 2004).

Menurut Kusumadinata (1979) Gunung Agung memiliki nama lain Piek Van Bali, berada di wilayah Kecamatan Rendang, Kabupaten Karangasem, Provinsi Bali tepatnya pada posisi geografis $8^{\circ} 20' 30''$ Lintang Selatan dan $115^{\circ} 30' 30''$ Bujur Timur dan memiliki ketinggian 3.014 meter di atas permukaan laut setelah letusan pada tahun 1963. Untuk mencapai puncak Gunung Agung dapat ditempuh dari tiga jurusan yaitu dari Pasar Agung (selatan puncak), dari Budakeling lewat Nangka (tenggara puncak), dan dari Besakih (barat daya puncak).

Gunung Agung merupakan gunungapi tipe A karena pernah mengalami erupsi magmatik sekurang – kurangnya satu kali sesudah tahun 1600. Pada tahun 2017 tepatnya 21 November terjadi erupsi pada pukul 17.05 WITA. Letusan diawali oleh Gempa Tremor *Low – Frequency*. Asap yang teramati bertekanan sedang dengan warna kelabu tebal dan dengan ketinggian maksimum sekitar 700 m di atas puncak. Abu letusan bertiup lemah ke arah Timur – Tenggara (Martanto, 2017). Kemudian jumlah gempa vulkanik meningkat cukup signifikan pada tanggal 25 November 2017 sebelum terjadi erupsi kembali pada pukul 17.30 WITA dengan kolom abu teramati berwarna kelabu – kehitaman yang bertekanan sedang setinggi 1500 meter di atas puncak Gunung Agung. Abu letusan pada erupsi kedua ini bertiup lemah ke arah Barat. Pada tanggal 26, dan 27 November 2017 erupsi terjadi kembali dengan ketinggian kolom abu mencapai 3000 m di atas puncak, hasil dari data visual, dan instrumental aktivitas Gunung Agung menunjukkan bahwa aktifitas vulkanik saat ini berada pada tingkatan sangat tinggi sehingga probabilitas untuk terjadi erupsi lebih besar menjadi semakin meningkat, maka terhitung mulai tanggal

27 November 2017 pukul 06.00 WITA status Gunung Agung dinaikkan dari level III (Siaga) ke level IV (Awas) (Kasbani, 2017).

2.2 Pengamatan Deformasi

Deformasi merupakan perubahan kedudukan, pergerakan secara absolut dan relatif dari posisi suatu materi (Gunung Agung) atau perubahan kedudukan dimensi yang linear. Deformasi pada umumnya mengandung pengertian perubahan fisik dari suatu bahan karena dikenai gaya-gaya. Perubahan tersebut berupa perubahan ukuran ataupun perubahan bentuk, mekanika deformasi akan lebih mudah dijelaskan dengan melihat *strain* (regangan) (Andreas, 2001).

Deformasi dapat diamati dengan jelas apabila letusan gunung api yang eksplosif ditandai dengan deformasi berupa kenaikan permukaan tanah yang relatif cukup besar. Bahkan untuk Gunung Agung yang sudah lama tidak menunjukkan aktivitasnya deformasi dapat digunakan sebagai suatu indikator yang dapat dipercaya dari kebangkitan kembali aktivitas Gunung Agung tersebut. Deformasi permukaan Gunung Agung, 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 (Elvien, 2004).

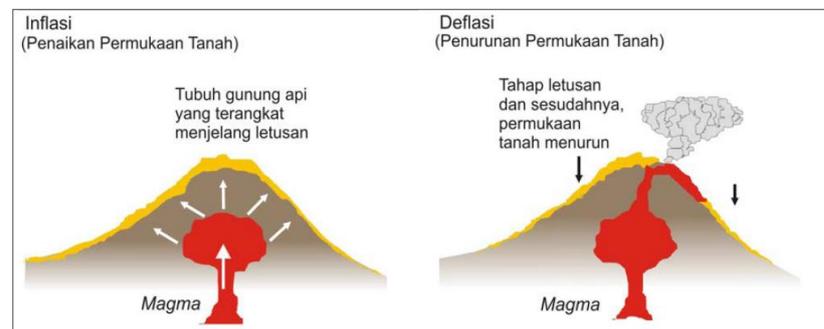
Menurut Abidin (2002) Gejala deformasi terbagi menjadi dua, yaitu:

- Inflasi (Penaikan 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 Agung. Inflasi sering dijadikan sebagai tanda-tanda akan terjadinya erupsi pada Gunung Agung

- Deflasi (Penurunan Permukaan Tanah)

Umumnya terjadi selama atau sesudah masa letusan. Pada saat itu tekanan magma di dalam tubuh Gunung Agung telah melemah tapi pada beberapa kasus deflasi juga terjadi selama letusan.



Sumber : Abidin (2007)

Gambar 2.1 Gejala Deformasi Pada Gunung Aktif

Deformasi pada gunung api disebabkan beberapa faktor yang membentuk karakteristiknya dilihat dari pergerakan magma dan resultan pergeseran titik pengamatan (Ishihara, 1990) dalam (Yunazwardi, 2010), yaitu:

- Tektonik atau patahan menyebabkan deformasi terjadi secara regional.
- Aktivitas lokal biasa disebabkan oleh aktivitas gunung api seperti adanya rekahan, pembebanan material gunung api dan peningkatan densitas material gunung api.
- Adanya gangguan minor seperti dinamika temperatur, pasang surut, tekanan atmosfer, rekahan kecil dan gangguan manusia dapat pula menyebabkan deformasi.

2.3 Pengamatan Deformasi Menggunakan Survei GPS

Pengamatan deformasi gunung api dengan memanfaatkan teknologi GPS membutuhkan beberapa titik ukur untuk membentuk suatu kerangka (jaringan) yang disebar di daerah sekitar Gunung Agung. Kemudian koordinat - koordinat teliti yang didapat dari pengukuran GPS tersebut diikatkan terhadap stasiun referensi yang berada di luar zona deformasi Gunung Agung. Titik pantau atau stasiun pengamatan yang dipasang di sekitar tubuh Gunung Agung akan diamati secara kontinu (Abidin dkk. 1998).

Pemantauan deformasi Gunung Agung menggunakan metode pengamatan GPS dapat menghasilkan informasi deformasi yang baik. Informasi tersebut dianggap baik karena ketelitian posisi titik hingga ke level mm. Untuk mendapatkan tingkat ketelitian yang tinggi tersebut, maka perlu dilakukan eliminasi atau reduksi

dari kesalahan dan bias atmosfer yang dapat mengurangi ketelitian dari posisi satelit GPS (Abidin dkk. 1998).

Menurut Suganda dkk. (2007) Ada beberapa kelebihan GPS dalam konteks pemantauan deformasi, yaitu:

- GPS memberikan nilai vektor pergeseran tubuh gunung api dalam tiga dimensi (dua komponen horizontal dan satu komponen vertikal).
- GPS memberikan nilai vektor pergerakan tubuh gunung api dalam suatu sistem koordinat referensi yang tunggal.
- GPS dapat memberikan nilai vektor pergerakan dengan tingkat presisi sampai beberapa milimeter, dengan konsistensi yang tinggi baik secara spasial maupun temporal.
- GPS dapat dimanfaatkan secara kontinu tanpa bergantung pada waktu (siang maupun malam), dalam segala kondisi cuaca.

Dalam Tugas Akhir ini akan dibahas mengenai pemantauan deformasi menggunakan alat yang berbasis metode ekstraterestrial atau metode berdasarkan pengukuran atau pengamatan ke objek atau benda luar angkasa lain (termasuk satelit), yaitu GPS. Metode penentuan posisi GPS yang dilakukan adalah dengan metode survei secara diferensial, *post-processing*, dan statik. Pengamatan dilakukan secara kontinu dimulai dari bulan September tahun 2017 hingga bulan Desember tahun 2017.

GPS merupakan singkatan dari *Global Positioning System*. GPS merupakan sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang dimiliki dan dikelola oleh Amerika Serikat. Sistem ini di desain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga dimensi serta informasi mengenai waktu, secara kontinu di seluruh dunia tanpa bergantung waktu dan cuaca, kepada banyak orang secara simultan (Abidin, 2007). Metode GPS ini dapat mengukur pergerakan vertikal maupun horizontal pada Gunung Agung.

Pada penentuan posisi metode diferensial, posisi suatu titik ditentukan relatif terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya (stasiun referensi). Dengan menggunakan metode diferensial dapat meningkatkan tingkat akurasi dan presisi posisi yang diperoleh karena pada metode ini beberapa kesalahan dan bias dari data

dapat dieliminasi atau direduksi dengan proses pengurangan (*differencing*) data yang diamati oleh dua *receiver* GPS pada waktu yang bersamaan (Abidin, 2007).

2.4 Pengolahan Data GPS Menggunakan Perangkat Lunak GAMIT/GLOBK 10.7

GAMIT adalah paket analisis GPS komprehensif yang dikembangkan di MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) dan SIO (*Scripps Institution of Oceanography*). Perangkat lunak ini digunakan untuk mengestimasi tiga dimensi posisi relatif stasiun bumi dan orbit satelit. Perangkat lunak ini dirancang untuk berjalan di bawah sistem operasi UNIX mendukung XWindows, sejauh ini MIT telah menerapkan versi untuk Sun (OS/4 dan Solaris2), HP, IBM / RISC, DEC, dan LINUX berbasis Intel workstation. Jumlah maksimum stasiun dan sesi disesuaikan oleh dimensi yang ditetapkan pada waktu kompilasi dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan kemampuan komputasinya. Hasil komputasi *RINEX* juga dipengaruhi modifikasi dari TEQC. Hasil modifikasi TEQC bisa untuk penggabungan data *RINEX*, pemotongan data *RINEX*, cek kualitas hasil *RINEX*, dll. Hasil dari GAMIT adalah solusi parameter estimasi dan covariances yang dapat diolah di GLOBK untuk memperkirakan posisi stasiun, kecepatan, parameter orbital dan rotasi bumi. Dengan rilisnya GAMIT 10.7 dan GLOBK dapat dijalankan dengan sedikit kemudahan karena adanya inovasi baru (Herring, 2014).

Menurut Herring (2015) dalam pengolahannya, GAMIT memerlukan delapan jenis input data, yaitu :

- a. Raw data dari pengamatan GNSS.
- b. L-file, yang berisi koordinat dari semua stasiun pengamatan atau titik ikat yang digunakan dalam bentuk koordinat geosentrik.
- c. File station.info yang berisi informasi stasiun yang dipakai seperti lokasi stasiun, tinggi antenna, model antenna, model receiver, waktu pengamatan, serta firmware yang digunakan.
- d. File session.info yang berisi informasi dari data yang akan diolah. Informasi tersebut antara lain DOY, sesi pengamatan, sampling rate, dan nomor satelit.

- e. File navigasi, bias berupa RINEX (*Receiver Independent Exchange Format Navigation Messages*) maupun efemeris yang disediakan IGS.
- f. File sestbl yang membuat control tabel mengenai karakteristik proses yang dijalankan oleh GAMIT.
- g. File sittbl yang digunakan untuk memberikan konstrain pada setiap stasiun pengamatan yang digunakan.
- h. File GPS ephemeris yang diperoleh dari IGS dalam format SP3.

Hasil akhir dari pengolahan data GNSS menggunakan GAMIT adalah :

- Q-file, berisi semua informasi hasil pengolahan data pengamatan GNSS dengan GAMIT. Data ini disajikan dalam dua versi *Biasses-free Solution* dan *Biasses-fixed Solution*.
- H-file yang berisi hasil pengolahan dengan *Loosely Constraint Solution* berupa parameter-parameter yang digunakan serta matriks varian kovarian pada pengolahan lanjutan dengan GLOBK.
- Autcln.summary-file yang berisi tentang data statistik hasil editing dengan autcln.

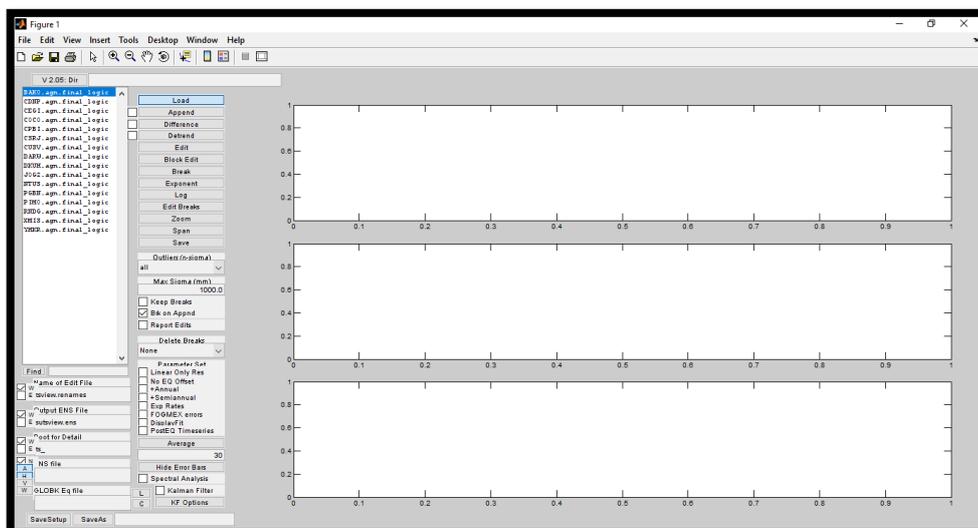
GLOBK merupakan paket program untuk melakukan analisis dan pengolahan lanjutan dari data pengukuran GNSS setelah diolah menggunakan GAMIT/GLOBK memerlukan file input berupa h-file yang dihasilkan dari pengolahan menggunakan perangkat lunak GAMIT. Kunci dari h-file yang digunakan dalam GLOBK adalah matriks varian kovarian dari data koordinat stasiun, parameter rotasi bumi, parameter orbit, dan koordinat hasil pengamatan lapangan (Herring, 2015). GLOBK dapat menjalankan tiga mode aplikasi yaitu :

1. Mengkombinasikan hasil pengolahan individual untuk menghasilkan koordinat stasiun rata - rata dari pengamatan yang dilakukan lebih dari satu hari;
2. Mengkombinasikan hasil pengamatan bertahun-tahun untuk menghasilkan koordinat stasiun.
3. Melakukan estimasi koordinat stasiun dari pengamatan individu. Data ini akan digunakan untuk menggeneralisasikan data deret waktu dari pengamatan harian atau tahunan.

2.5 Plugin Tsview

Plugin tsview merupakan sebuah perangkat lunak yang ditujukan untuk menilai kualitas deret waktu yang dihasilkan oleh GLRED berjalan dan dapat menghasilkan *file* kontrol untuk GLOBK yang nantinya akan menghapus perkiraan posisi stasiun pengamatan yang memiliki kualitas buruk serta memperhitungkan selang waktu di dalam deret waktu tersebut. File deret waktu dapat berupa format *multibase* globk (opsi *-tahun*) atau format seri waktu PBO (opsi keluaran globk pbo dan *tssum* atau *tscn*). *File multibase* diasumsikan dimulai dengan *mb_* lalu *file* terpisah untuk N, E, dan U. File PBO diasumsikan memiliki format *.pos*. Hanya satu jenis file dalam direktori yang dapat digunakan yaitu, jika *file* *mb_* ditemukan, *file* *.pos* maka tidak akan terbaca.

Tsview biasanya dijalankan dari direktori yang berisi file deret waktu yang dihasilkan oleh *multibase* dengan opsi *-tahun* diekstraksi terlebih dahulu dengan perintah *tssum*. Ketika format PBO digunakan, maka analisis yang berbeda dapat dibandingkan. Nama format pbo antara lain berbentuk *<cen>. <type> _ <frame>* *.pos* dengan 3-char *cen*, tipe 5-char (mis., *Final*) dan *frame* 5-char (mis., *Igs05*, *snf10*, *frame*). *Tsview* tidak dapat secara internal mengubah kerangka referensi, oleh karena itu perbandingan seri waktu harus menggunakan *frame* yang sama. *Tsfit* dapat digunakan untuk mengubah *frame* referensi serta menghasilkan *file* deret waktu baru (Herring dan McClusky, 2010).



Gambar 2.2 Tampilan Program *Plugin Tsview*

2.6 Ina-CORS

Menurut BIG (2019) (Indonesia *Continuously Operating Reference Station* (Ina-CORS) merupakan jaring kontrol geodetik aktif di Indonesia berupa stasiun *Global Navigation Satellite System* (GNSS) permanen di permukaan bumi yang dilengkapi dengan alat perekam sinyal satellite GNSS, antena, dan sistem komunikasi data. Stasiun tersebut dapat menerima sinyal dari satelit GNSS secara terus menerus selama 24 jam setiap hari dan bisa memberikan layanan koreksi posisi pada pengguna. Dalam pelaksanaannya, Ina-CORS bisa dimanfaatkan oleh pengguna untuk berbagai tingkat kebutuhan mulai dari kebutuhan praktis hingga saintifik.

Dalam hal keperluan praktis, Ina-CORS dapat dimanfaatkan untuk keperluan survei, pemetaan, bahkan untuk keperluan navigasi teliti. Hal ini dikarenakan kemampuan Ina-CORS dalam memberikan layanan koreksi posisi berupa koreksi *Real Time Kinematic* (RTK) untuk pengguna yang membutuhkan hasil penentuan posisi secara seketika. Dalam hal keperluan lain yang tidak membutuhkan hasil penentuan posisi seketika, pengguna bisa mendapatkan hasil penentuan posisi secara *post-processing*. Contoh kegiatan penentuan posisi banyak dilakukan pada kegiatan seperti: pemetaan dasar rupa bumi, survei rekayasa *engineering*, penyusunan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW), Rencana Detail Tata Ruang (RDTR), Pendaftaran Tanah Sistematis Langsung (PTSL), dan pekerjaan terkait konstruksi.

Terkait dengan hal yang bersifat saintifik, Ina-CORS bisa dimanfaatkan untuk menjaga tingkat keakurasian dan kepresisian dari kerangka dasar geodetik yang telah dibangun sehingga bisa mendukung penyelenggaraan kerangka referensi pemetaan nasional yang akurat dan penyelenggaraan pemetaan dasar. Selain itu Ina-CORS bisa juga dimanfaatkan untuk monitoring pergerakan lempeng bumi, studi geodinamika, riset atmosfer, ionosfer, serta untuk keperluan gempa bumi dan tsunami.

Beberapa pemanfaatan Ina-CORS antara lain:

- Memelihara sistem referensi pemetaan nasional;
- Mendukung percepatan survei dan pemetaan yang akurat;

- Layanan survei pemetaan secara real time;
- Percepatan pelaksanaan Kebijakan Satu Peta;
- Percepatan reformasi agraria nasional;
- Dukungan penegasan batas wilayah untuk batas daerah dan batas negara;
- Dukungan penyusunan rencana tata ruang wilayah;
- Dukungan kegiatan mitigasi kebencanaan (gempa bumi, tsunami, longsor, erupsi gunung api, penurunan muka tanah, dll);
- Pemantauan deformasi kerak bumi;
- Dukungan sistem navigasi.

2.7 *International GNSS Services (IGS)*

IGS didirikan oleh International Association of Geodesy (IAG) pada tahun 1993 dan operasi formalnya dimulai tahun 1994. IGS beranggotakan organisasi dan badan multinasional yang menyediakan data GNSS, informasi orbit GNSS, serta data dan informasi pendukung penelitian geodetik dan geofisika lainnya. Disamping itu, IGS juga turut membangun spesifikasi dan standar nasional yang berkaitan dengan data dan informasi GNSS (IGS, 2004).

Saat ini terdapat lebih dari 350 stasiun GNSS dual frekuensi yang beroperasi secara terus-menerus. Di Indonesia sendiri terdapat lima buah stasiun IGS yang beroperasi masing-masing dengan kode bako milik BIG yang berada di Cibinong, Jawa Barat. Lalu ada stasiun BNOA di Benoa, Bali, JOG2 di Yogyakarta dan BTNG di Bitung, Sulawesi Utara yang keduanya dimiliki oleh PGF. Masing - masing stasiun IGS dilengkapi *receiver* GNSS, menghasilkan data *raw* orbit dan data *tracking*.

Produk dari IGS mendukung kegiatan saintifik seperti pengembangan dan perluasan *International Earth Rotation Service (IERS)*, *International Terrestrial Reference Frame (ITRF)*, memantau deformasi dari lempeng bumi dan variasi dari kenaikan muka air laut. Sebagai contoh, untuk penggunaan di pemantauan geodinamik yang menggunakan metode GNSS. Pada proses pengolahan data IGS dari stasiun terdekat dapat disertakan dengan data hasil pengamatan GNSS. Tujuannya adalah untuk menyamakan koordinat dari stasiun tersebut ke nilai ITRF

nya. Data pengamatan GNSS tersebut dapat dianalisis dengan ketelitian maksimum dan bobot penghitungan yang minimum, dan juga hasil pengolahan tersebut akan terdefiniskan dengan baik dalam ITRF yang merupakan *reference frame* global (IGS, 2004).

2.8 Menghitung Nilai Pergeseran

Menurut Saputra, dkk. (2015) Kecepatan pergeseran adalah sebuah laju perpindahan dari sebuah kerangka acuan dan merupakan fungsi dari waktu. Kecepatan pergeseran mengacu pada tingkat dimana sebuah objek berubah posisi dari posisi awal. Dalam hal ini dapat diartikan bahwa perpindahan posisi adalah perpindahan dari posisi awal menuju posisi berikutnya. Dalam kecepatan pergeseran ini dapat digambarkan pergeseran objek, misalkan pergerakan lempeng yang ada di Indonesia yaitu pergerakan lempeng di pulau Jawa atau pergerakan lempeng di pulau Sumatra dan pulau-pulau lainnya. Karena bicara tentang kecepatan pergeseran, maka biasanya disertakan juga arah pergerakannya misalkan ke arah utara, selatan, timur, dan barat.

Untuk mendapatkan vektor pergeseran maka perlu digunakan fungsi kurva *fitting* dengan menggunakan data hasil dari pengolahan GPS. Fungsi kurva yang digunakan merupakan fungsi linier yang berfungsi untuk mendapatkan pola pergeseran yang berupa gambaran deret waktu (*time series*) dalam pengamatan. Hal ini penting agar dapat diketahuinya besaran perubahan setiap titik pada arah timur-barat (E-W) dan utara-selatan (N-S) (Zulfakriza, 2010) dalam (Wicaksono, 2019).

Secara matematis, model linier diperoleh dari persamaan berikut (Wolf dan Ghailani, 2006) dalam (Kuncoro, 2013):

$$y_m = ax_m + b \quad \dots(2.1)$$

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

$$y_n = ax_n + b \quad \dots(2.2)$$

$$y_i = ax_i + b \quad \dots(2.3)$$

Dimana y adalah matriks yang berisi nilai perubahan posisi pada stasiun (*north*, dan *east*), x adalah matriks epok pengamatan di stasiun, a adalah gradient

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

$$X = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad \dots(2.4)$$

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, dapat diestimasi juga kepresisian kecepatan pergerakan dengan persamaan variansi kovariansi parameter:

$$\Sigma_{xx} = \hat{\sigma}^2 X (A^T P A) \quad \dots(2.5)$$

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

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^t P V}{n-u} \quad \dots(2.6)$$

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:

$$\sigma y_n = \sqrt{\left(\frac{\partial y_n}{\partial a} \sigma a\right)^2 + \left(\frac{\partial y_n}{\partial b} \sigma b\right)^2} \quad \dots(2.7)$$

$$\sigma y_i = \sqrt{\left(\frac{\partial y_i}{\partial a} \sigma a\right)^2 + \left(\frac{\partial y_i}{\partial b} \sigma b\right)^2} \quad \dots(2.8)$$

$$\text{Menjadi : } \sigma y_n = \sqrt{(x_n \cdot \sigma a^2) + (a \cdot x_n \cdot \sigma b)^2} \quad \dots(2.9)$$

$$\sigma y_i = \sqrt{(x_i \cdot \sigma a^2) + (a \cdot x_i \cdot \sigma b)^2} \quad \dots(2.10)$$

Setelah perhitungan diatas didapat maka selanjutnya dapat dijabarkan sebagai berikut pada setiap komponen (*north, east*).

$$\vec{E} = y d E_n - y d E_i \quad \dots(2.11)$$

$$\vec{N} = y d N_n - y d N_i \quad \dots(2.12)$$

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

$$\sigma_N = \sqrt{(\sigma y d N_n)^2 + (\sigma y d N_i)^2} \quad \dots(2.13)$$

$$\sigma_E = \sqrt{(\sigma y d E_n)^2 + (\sigma y d E_i)^2} \quad \dots(2.14)$$

σ_N, σ_E ketelitian pada setiap komponen (*north, east*)

2.9 Uji Statistik Menggunakan Uji Distribusi *T-Student*

Pada penelitian ini uji statistik yang digunakan adalah uji distribusi *t-student* dimana uji statistik ini dilakukan terhadap nilai pergeseran dari setiap titik pengamatan untuk mengetahui adanya deformasi pada Gunung Agung. Uji statistik dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P_{ij} = \sqrt{y d N_{ij}^2 + y d E_{ij}^2} \quad \dots(2.15)$$

$$\sigma P_{ij} = \sqrt{\sigma y d N_{ij}^2 + \sigma y d E_{ij}^2} \quad \dots(2.16)$$

Keterangan :

P_{ij} : Pergeseran titik pengamatan

$y d N_{ij}^2$: Nilai pergeseran komponen *north*

$y d E_{ij}^2$: Nilai pergeseran komponen *east*

σP_{ij} : Standar deviasi dari pergeseran horizontal

$\sigma y d N_{ij}^2$: Standar deviasi besar pergeseran titik arah *north*

$\sigma y d E_{ij}^2$: Standar deviasi besar pergeseran titik arah *east*

Hipotesa nol (awal) yang digunakan adalah titik tidak bergeser signifikan, sedangkan hipotesa alternatif adalah titik mengalami pergeseran signifikan.

Hipotesa nol $H_0 : V_r = 0$

Hipotesa alternatif $H_0 : V_r \neq 0$

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

$$t = \frac{P_{ij}}{\sigma P_{ij}} \quad \dots(2.17)$$

Dimana pergeseran dinyatakan signifikan atau hipotesa ditolak yaitu:

$$t > t_{v,\alpha/2} \quad \dots(2.18)$$

$$V = n - 2 \quad \dots(2.19)$$

Keterangan :

t : Besaran yang menunjukkan signifikan atau tidaknya pergeseran titik

v : Derajat kebebasan

n : Jumlah pengamatan

2.10 Menghitung Nilai Regangan Menggunakan *Grid_Strain*

Menurut Anggarini, dkk (2012) Regangan atau *strain* didefinisikan sebagai perubahan relatif dari posisi partikel-partikel suatu benda yang ditimbulkan karena adanya stress terhadap posisi asalnya. Regangan merupakan salah satu bentuk dari adanya deformasi.

Dalam Tugas Akhir ini nilai regangan dihitung menggunakan perangkat lunak *Grid_Strain* (Teza dkk. 2007). Metode ini memungkinkan penentuan hanya pada deformasi horizontal saja. Pada prinsipnya perangkat ini menghitung nilai regangan dari tensor gradien kecepatan pada titik pusat setiap segitiga. Untuk menjalankan program ini diperlukan beberapa data seperti berikut:

- *ns* = station identifier (an integer number)
- *e* = east coordinate, expressed in m
- *n* = north coordinate, expressed in m
- *ve* = east velocity, or east displacement expressed in mm
- *vn* = north velocity, or north displacement expressed in mm
- *eve* = rms error on *ve*, mm
- *evn* = rms error on *vn*, mm
- *a* = length of major half-axis of error ellipse, mm optional
- *b* = length of minor half-axis of error ellipse, mm optional
- *theta* = azimuth of major axis of error ellipse, degrees optional

Perhitungan regangan menggunakan *Grid_Strain* dilakukan menggunakan pendekatan *Modified Least Square (MLS)* (Teza dkk. 2007). Diberikan sebuah kerangka referensi, dimana $X_0 = (X_{10}, X_{20})$ adalah posisi titik P yang dikelilingi oleh N yang memiliki posisi dan koordinat $X_{(n)} = (X_{1(n)}, X_{2(n)})$ dan $u_{(n)} = (u_{1(n)}, u_{2(n)})$. Dalam pendekatan linear, pergeseran di sekitar P dapat di modelkan menggunakan persamaan berikut (Teza, dkk. 2007):

$$\mathbf{u}_{(n)} = \mathbf{L}_{ij} \cdot \Delta x_{j(n)} + U_i \quad \dots(2.20)$$

Dimana :

$$\Delta x_{j(n)} = \mathbf{X}_{j(n)} - \mathbf{X}_{j0} \quad = \text{Posisi relatif dari EP ke-n dan P (center of mass)}$$

$$\mathbf{L}_{ij} = \partial_j u_i = \partial u_i / \partial x_j \quad = \text{Elemen dari gradient pergeseran L}$$

$$U_i \quad = \text{Konstanta}$$

Kondisi bidang regangan di asumsikan sama, sehingga komponen dari gradien pergeseran dan kesalahannya dapat diestimasi dengan metode pendekatan *least square*. Model fungsional dari *least square* adalah:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{l} \quad \dots(2.21)$$

$$\mathbf{u} = [\mathbf{u}(1) \ \mathbf{u}(2) \ \dots \ \mathbf{u}(n)]^T \quad \dots(2.22)$$

Dimana matriks A =

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x_{1(1)} & \Delta x_{2(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{1(1)} & \Delta x_{2(1)} \\ 1 & 0 & \Delta x_{1(2)} & \Delta x_{2(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{1(2)} & \Delta x_{2(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \Delta x_{1(N)} & \Delta x_{2(N)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{1(N)} & \Delta x_{2(N)} \end{bmatrix} \quad \dots(2.23)$$

Dimana :

A = Informasi mengenai posisi dari EP

l = Parameter vektor yang berisi komponen gradien pergeseran \mathbf{L}_{ij} yang akan diestimasi

u = *pseudo-observable vector*

Disini, matriks A diasumsikan memiliki nilai kesalahan yang dapat diabaikan, yaitu hanya kesalahan pada *pseudo-observable vector* yang diperhitungkan. Dalam pendekatan *Least Square*, vektor residual e turut dipertimbangkan dan model linier $\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{l} + \mathbf{e}$ dianggap sebagai pengganti persamaan (2.24).

Vektor parameter l dihitung dengan meminimalisasi vektor residual. Diberikan W adalah matriks kovarian dari data. Data yang digunakan di asumsikan tidak berkorelasi, W adalah $2N \times 2N$ matriks diagonal.

$$\mathbf{W} = \sigma_D^2 \text{diag}(\sigma_{1(1)}^{-2} \ \sigma_{2(1)}^{-2} \ \sigma_{1(2)}^{-2} \ \sigma_{2(2)}^{-2} \ , \dots \ , \sigma_{1(n)}^{-2} \ , \sigma_{2(n)}^{-2}) \quad \dots(2.24)$$

$$\partial_D^2 = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{j=1}^2 \sum_{n=1}^N \partial_{j(n)}^2 \quad \dots(2.25)$$

Dalam hal ini :

$\partial_{j(n)}^2$ = Varian dari komponen j dari vektor pergeseran n

Residual e minimum didapatkan dari meminimalkan bentuk kuadrat $\frac{e^T W e}{2\partial_D}$,

sehingga didapat persamaan :

$$A^T W A I = A^T W u \quad \dots(2.26)$$

Keterangan :

$$\hat{I} = (A^T W A)^{-1} A^T W u \quad \dots(2.27)$$

$$D(\hat{I}) = \frac{1}{2r\partial_D^2} (u - A I)^T W (u - A I) (A^T W A)^{-1} \quad \dots(2.28)$$

$$r = 2N - 6 \quad \dots(2.29)$$

r = redundansi dari *least square*

Dari persamaan (2.24) sampai dengan (2.29) terbukti bahwa data yang dipengaruhi oleh *uncertainty* yang besar memiliki efek yang kecil terhadap proses estimasi. Jadi kontribusi dari satu atau lebih EP dapat dikurangi atau dikecualikan dengan mempertimbangkan faktor pembobotan yang tepat menambah *correspondings error*. Titik grid ke-ij didefinisikan dengan rumus

$$x_{ij} = (x_i, x_j) = (x_{min} + \Delta x, y_{min} + j\Delta y) \quad \dots(2.30)$$

Keterangan :

x_{min}, y_{min} = Koordinat dari *starting point*

$(\Delta x, \Delta y)$ = *Grid sides*

N_x, N_y = titik perpotongan sepanjang sumbu X dan sumbu Y

MLS pada prinsipnya sama dengan hitung perataan pada umumnya, perbedaannya ada pada penerapan faktor pembobotan yang diadopsi dari (Shen dkk. 1996) dalam (Riyadi dan Prasidya, 2016) pada hitungan. Faktor pembobotan berguna untuk mereduksi kontribusi stasiun yang jauh dari titik grid. Fungsi pembobotan yang digunakan adalah $\exp(-d/d_0)$ dimana d adalah jarak antara titik grid dengan titik grid stasiun dan d_0 adalah nilai faktor skala.

Hasil dari perhitungan menggunakan perangkat lunak *Grid_Strain* ini berupa nilai regangan ekstensi, kompresi, dan arah regangan (*principal directions*). Nilai ini diperoleh dari persamaan berikut :

$$L = \varepsilon + \Omega \quad \dots(2.31)$$

Adapun matriks L, $\varepsilon + \omega$ disajikan pada persamaan berikut :

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} u_x & \frac{\partial}{\partial y} u_x \\ \frac{\partial}{\partial y} u_y & \frac{\partial}{\partial x} u_y \end{bmatrix} = E + \Omega \quad \dots(2.32)$$

$$E = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} u_x & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y} u_x + \frac{\partial}{\partial x} u_y \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y} u_x + \frac{\partial}{\partial x} u_y \right) & \frac{\partial}{\partial y} u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \quad \dots(2.33)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y} u_x + \frac{\partial}{\partial x} u_y \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y} u_x + \frac{\partial}{\partial x} u_y \right) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \quad \dots(2.34)$$

Keterangan :

E = Regangan tensor

Ω = Elemen rotasi tensor pergeseran L

u_i = Pergeseran u_x (u_y) untuk $i = 1$ ($i=2$)

∂_i = Operator derivative parsial

2.11 Generic Mapping Tools

GMT merupakan kumpulan sekitar 80 kode program berbasis open source untuk memanipulasi data geografis dan cartesian (termasuk untuk *filtering*, analisis kecenderungan (*trend*), *gridding*, proyeksi, dll.), dan menghasilkan ilustrasi *PostScript* mulai dari plot x-y sederhana, peta kontur hingga *digital surface model* dengan pencahayaan artifisial dalam pandangan perspektif 3D. Dalam program GMT juga terdapat 40 suplemen program khusus untuk disiplin ilmu yang sangat spesifik. GMT mendukung lebih dari 30 proyeksi peta dan transformasi serta menyediakan data pendukung seperti garis pantai (data GSHHG), sungai, dan batas-batas administrasi dan poligon negara (data DCWopsional).

GMT dikembangkan dan dikelola oleh Paul Wessel, Walter H. F. Smith, Remko Scharroo, Joaquim Luis dan Florian Wobbe dengan bantuan dari sejumlah sukarelawan global, dan didukung oleh National Science Foundation. Program ini

dirilis di bawah GNU *Lesser General Public License* versi 3 serta versi-versi selanjutnya yang lebih baru. Mengingat fleksibilitasnya serta sifatnya yang *open source*, banyak orang di seluruh dunia menggunakan GMT untuk kepentingan dunia kerja. Sebagian besar pengguna GMT adalah ahli kebumihuman dan oseanografi, namun sesungguhnya tidak ada batasan untuk jenis aplikasi yang dapat memanfaatkan GMT. Secara umum, GMT dapat digunakan dalam penelitian medis, teknik, fisika, matematika, ilmu sosial dan biologi, lembaga perikanan, perusahaan minyak, serta berbagai instansi pemerintah (Wessel dkk. 2013).

2.12 Ringkasan Studi Analisis Deformasi Gunung Agung

Terdapat beberapa penelitian terkait deformasi Gunung Agung khususnya yang dapat menjadi referensi serta masukan terkait penelitian deformasi yang dilakukan di Gunung Agung Kecamatan Rendang, Kabupaten Karangasem, Provinsi Bali, Provinsi Jawa Timur. Beberapa penelitian yang terkait dapat dilihat sebagai berikut:

A. Analisis Deformasi Dan Pemetaan Potensi Dampak Aliran Lava Pada Kawasan Gunung Agung:

Pada penelitian yang dilakukan Pratomo, dkk. (2018) membahas mengenai analisis deformasi dan pemetaan potensi dampak aliran lava pada kawasan Gunung Agung. Dalam melakukan penelitian deformasi yang terjadi pada Gunung Agung, metode yang digunakan adalah metode penginderaan jauh. Data yang digunakan adalah citra satelit radar, *digital elevation model* (DEM) dan citra optis untuk membuat peta mitigasi bencana. Karakteristik deformasi yang dikaji meliputi posisi, besar pergeseran dan sifat deformasi vertikal yang terjadi. Hasil penelitian didapatkan nilai deformasi di tubuh gunung sebelum erupsi adalah $0,047 \pm 0,035$ m dalam rentang 27 Oktober 2017 hingga 20 November 2018 atau $0,715 \pm 0,035$ m/tahun dan setelah erupsi sebesar $-0,172 \pm 0,053$ m dalam rentang 2 Desember 2017 hingga 7 Januari 2018 atau $-1,744 \pm 0,053$ m/tahun.

B. Analisis Deformasi Gunungapi Agung Berdasarkan Data Pengamatan GPS Periode 2016 - 2018.

Pada penelitian yang dilakukan Hartono (2019) membahas mengenai analisis deformasi di Gunung Agung. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa deformasi pada setiap titik pantau pada saat erupsi/letusan terjadi di Gunungapi Agung pada tanggal 21 November 2017 dan 25 November 2017 berdasarkan *Kinematics time series*-nya. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan mengumpulkan data pengamatan GPS kontinyu dari setiap titik stasiun pengamatan GPS yang berada di Gunungapi Agung pada tahun 2016-2018. Proses pengolahan data menggunakan perangkat lunak TRACK yang dimana hasil dari pengolahan tersebut dilakukan *plotting* deret waktu menggunakan perangkat lunak MATLAB yang bertujuan untuk mendapatkan hasil grafik perpindahan posisi dari setiap stasiun pengamatan GPS yang digunakan dalam 3 dimensi (X, Y, dan Z). Pada tanggal 21 November 2017, deformasi pada 3 stasiun pengamatan yaitu CEGI, DKUH, dan PGBN cenderung bergerak ke arah Barat Daya, sedangkan salah satu stasiun pengamatan yaitu YHKR cenderung bergerak ke arah Timur Laut, serta telah terjadi deflasi pada semua titik pengamatan. Pada tanggal 25 November 2017, deformasi cenderung terjadi inflasi pada semua titik pengamatan. Deformasi pada semua stasiun pengamatan cenderung bergerak ke arah Barat Laut.

C. Pengolahan Data GPS Geodetik Untuk Analisis Deformasi Erupsi Gunung Agung – Bali

Pada penelitian yang dilakukan (Zahrudin, dkk. 2018) membahas mengenai analisis deformasi di Gunung Agung. Pengamatan deformasi gunung api dengan memanfaatkan teknologi GPS pada prinsipnya membutuhkan beberapa titik ukur untuk membentuk suatu kerangka (jaringan) yang disebar didaerah sekitar gunung api. Kemudian koordinat yang didapat dari pengukuran GPS tersebut diikatkan terhadap stasiun referensi yang berada di luar zona deformasi gunung api. Berdasarkan analisis yang dilakukan, terdapat 4 periode pengamatan yaitu pada periode pertama dan kedua sebelum erupsi pergerakan vektor pergeseran stasiun pengamatan Gunung Agung bergerak menjauhi titik puncak dan terjadi inflasi terbesar pada stasiun CEGI sebesar 27,80 mm (masa erupsi awal), pada periode ketiga semua vektor pergeseran bergerak kembali menuju ke arah puncak gunung ditambah dengan deflasi salah satu yang terbesar adalah CEGI sebesar 26,50 mm

(*recovery* pasca erupsi). Dan pada periode keempat, semua vektor bergerak ke arah timur laut akibat pergerakan sesar gunung agung. Sehingga disimpulkan aktivitas vulkanik Gunung Agung sebelum erupsi berakibat vektor pergeseran seluruh stasiun pengamatan menjauhi puncak gunung dan terjadi inflasi sedangkan setelah erupsi arah vektor pergeseran menuju puncak gunung serta terjadi deflasi.

D. Sumber Tekanan Penyebab Deformasi Gunung Agung 2017 - 2019

Pada penelitian yang dilakukan (Kriswati, dkk. 2020) membahas mengenai sumber tekanan penyebab deformasi pada Gunung Agung. Perubahan deformasi di tubuh Gunung Agung secara signifikan mulai terlihat sejak awal Agustus 2017 berupa inflasi yang diikuti oleh keluarnya lava pada 18 September 2017 dan peningkatan jumlah letusan pada 21 November 2017. Periode erupsi ini dicirikan dengan deflasi laju tinggi hingga 30 November 2017 diikuti deflasi dengan laju rendah hingga April 2018. Proses inflasi kembali terdeteksi mengawali letusan yang terjadi pada Mei – pertengahan Juni 2018 yang disusul deflasi hingga Juli 2018 bersamaan dengan berakhirnya periode erupsi yang pertama ini. Deformasi yang menyertai aktivitas erupsi periode Januari – Juni 2019 didahului oleh inflasi yang terjadi pada Agustus – Desember 2018. Proses deflasi terjadi selama periode erupsi Januari – Juni 2019. Hasil pemodelan sumber tekanan mendapatkan sumber tekanan berupa retas di bagian barat-selatan puncak Gunung Agung pada kedalaman 5 - 6 km di bawah puncak. Retas pada periode inflasi merupakan retas terbuka (*opening dike*) dengan arah (*strike*) 111° dan kemiringan (*dip*) 81° dan pada periode deflasi model berupa sebuah retas tertutup (*closing dike*) dengan *strike* 126° dan *dip* 27° .

E. Pemanfaatan Data Pengamatan GNSS Stasiun Sugar (*Sumatran Gps Array*) Dan Ina-Cors (*Indonesian Continously Operating Reference Station*) Untuk Estimasi Nilai Dan Pola Regangan Tektonik Dalam Bentuk Grid Di Patahan Sumatra Tahun 2012-2013.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Riyadi dan Prasidya (2016) menggunakan gabungan data stasiun permanen GPS *Ina-CORS (Indonesian Continously Operating Reference Station)* dan *SUGAR (Sumatran GPS Array)* pada kurun waktu 2012-2013. Pemakaian dua sumber data ini bertujuan untuk

mendapatkan estimasi regangan yang lebih rapat. Pengolahan data GPS menggunakan perangkat lunak ilmiah GAMIT/GLOBK. Estimasi koordinat final dan kecepatan pergeseran stasiun dilakukan dengan modul GLOBK. Perhitungan regangan dalam bentuk grid-grid dilakukan dengan metode *Modified Least Square (MLS)* memakai program *grid_strain*. Analisis hasil dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian ini dengan penelitian sebelumnya dan model regangan global.

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis, diketahui masih aktifnya struktur Patahan Sumatra dan subduksi lempeng tektonik Eurasia dan Indo - Australia. Secara umum terdapat tiga wilayah yang memiliki nilai regangan yang seragam. Pada bagian utara, terdapat regangan ekstensi dan kompresi dengan nilai yang cukup besar yaitu $-1,72 \times 10^{-7}$ $\mu\text{strain/yr}$ s.d. $3,56 \times 10^{-7}$ $\mu\text{strain/yr}$. Pada bagian tengah, terdapat dominasi regangan kompresi sebesar $-3,331 \times 10^{-8}$ $\mu\text{strain/yr}$ s.d. $-1,11 \times 10^{-7}$ $\mu\text{strain/yr}$. Pada bagian selatan, terdapat regangan ekstensi dan kompresi dalam nilai yang kecil, yaitu sebesar $-7,98 \times 10^{-8}$ $\mu\text{strain/yr}$ s.d. $2,11 \times 10^{-7}$ $\mu\text{strain/yr}$. Nilai regangan yang besar menunjukkan tingginya aktifitas tektonik di wilayah tersebut, sedangkan nilai regangan yang kecil menunjukkan aktifitas tektonik cukup rendah di wilayah tersebut.