



TUGAS AKHIR - RG 091536

**ANALISA DEFORMASI KAWASAN VULKANIK AKTIF
DENGAN MENGGUNAKAN DATA *GPS*
SEPTEMBER 2013-MARET 2014
(Studi Kasus : Gunung Merapi,DIY)**

BUDI JOKO PURNOMO
NRP 3510 100 048

Dosen Pembimbing
Ira Mutiara Anjasmara,ST.,M.Phil,Ph.D
Nurnaning Aisyah, S.Si

JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL ASSIGNMENT - RG 091536

**DEFORMATION ANALYSIS OF VOLCANIC ACTIVE AREA BY
USING GPS DATA SEPTEMBER 2013-MARCH 2014
(Case Study: Merapi Mount, DIY)**

**BUDI JOKO PURNOMO
NRP 3510 100 048**

Supervisor

**Ira Mutiara Anjasmara, ST., M.Phil, Ph.D
Nurnaning Aisyah, S.Si**

**DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014**

**ANALISA DEFORMASI KAWASAN VULKANIK AKTIF
DENGAN MENGGUNAKAN DATA GPS
SEPTEMBER 2013-MARET 2014
(Studi Kasus: Gunung Merapi, DIY)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Jurusan S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

BUDI JOKO PURNOMO
NRP. 3510 100 048

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Ira Mutiara Anjasmara, ST., M.Phil., Ph.D (Pembimbing 1)
NIP. 19781231 200212 2 001

Nurnaning Aisyah, S.Si (Pembimbing 2)
NIP. 19780223 200604 2 001

SURABAYA, JULI 2014

**ANALISA DEFORMASI KAWASAN VULKANIK AKTIF
DENGAN MENGGUNAKAN DATA GPS
SEPTEMBER 2013-MARET 2014**

(Studi Kasus: Gunung Merapi, Daerah Istimewa Yogyakarta)

Nama Mahasiswa : Budi Joko Purnomo
NRP : 3510 100 048
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Ira Mutiara Anjasmara, ST.,M.Phil,Ph.D

Abstrak

Gunung Merapi adalah salah satu gunungapi paling aktif di Indonesia yang terletak di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. Gunung Merapi memiliki periode letusan yang relatif cepat yaitu sekitar 4 tahun sekali. Dengan aktivitas vulkanik yang tinggi dapat mengakibatkan perubahan deformasi pada tubuh Gunung Merapi pada bulan September 2013-Maret 2014.

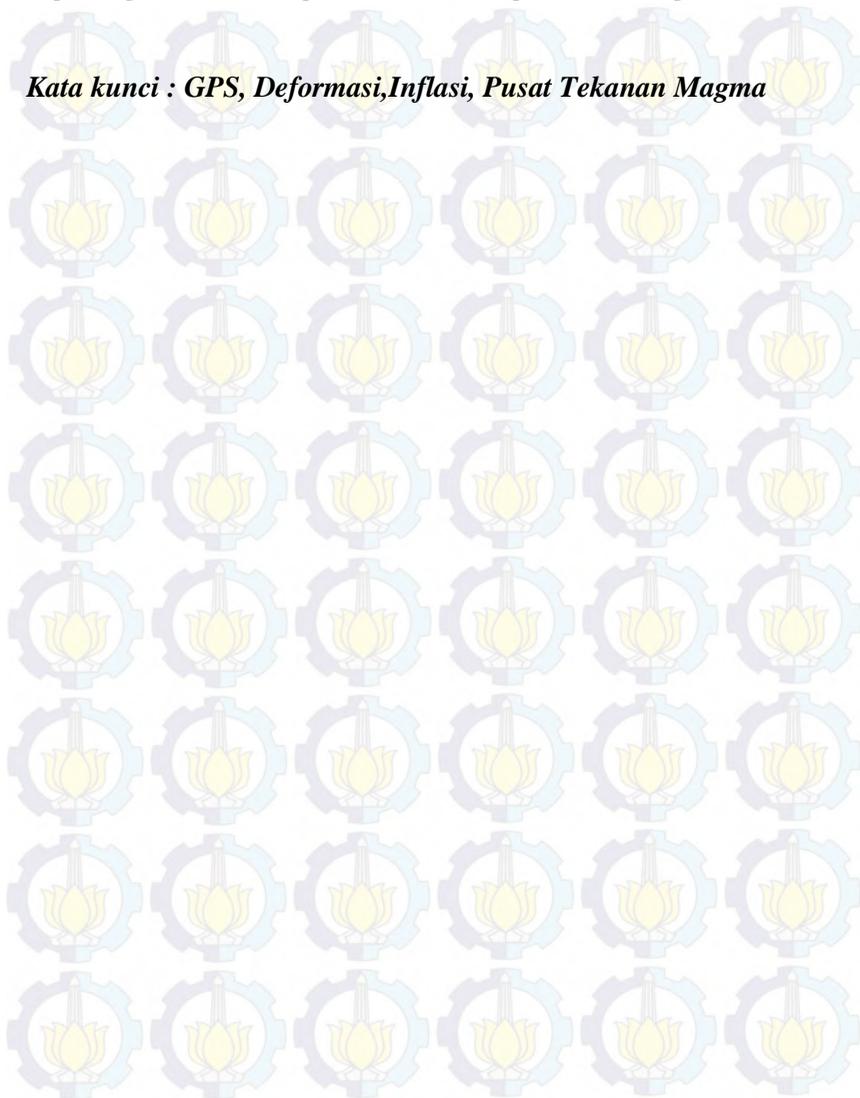
Pada penelitian terdahulu oleh Aisyah, dkk (2013) dijelaskan erupsi Merapi tahun 2010 telah memicu pergerakan tubuh gunung merapi baik vertikal maupun horisontal, sehingga diadakan penelitian dengan menggunakan GPS untuk meneliti pergerakan.

Metode yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah metode deformasi dengan menggunakan alat ukur GPS. Karakteristik deformasi yang dikaji meliputi posisi, arah, dan besar pergeseran. Software yang digunakan adalah scientific software GAMIT. Untuk prediksi sumber tekanan menggunakan model Mogi.

Dari hasil analisa yang dilakukan mulai bulan September 2013 sampai 31 Maret 2014, didapatkan nilai pergeseran horisontal untuk stasiun DELS sebesar 0.010 m dan vertikal sebesar -0.023 m, pergeseran horisontal untuk stasiun GRWH sebesar 0.046 m dan vertikal sebesar 0.040 m, dan pergeseran horisontal untuk stasiun KLAT sebesar 0.013 m dan vertikal sebesar -0.014 m. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa tubuh gunung Merapi sedang mengalami deformasi dengan sifat deformasi inflasi. Sedangkan posisi pusat tekanan magma adalah

7°32'2.129" LS ;110°26'51.57' BT dengan kedalaman ± 7140.508 m relatif dari puncak. Volume magma adalah 41788427.595 m³ dan dapat digunakan untuk prediksi skala erupsi mendatang.

Kata kunci : GPS, Deformasi, Inflasi, Pusat Tekanan Magma



**DEFORMATION ANALYSIS OF VOLCANIC ACTIVE
AREA BY USING GPS DATA SEPTEMBER 2013-MARCH
2014**

(Case Study: Merapi Mount, Yogyakarta)

Name : Budi Joko Purnomo
NRP : 3510 100 048
Department : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Supervisor : Ira Mutiara Anjasmara, ST,M.Phil,Ph.D

Abstract

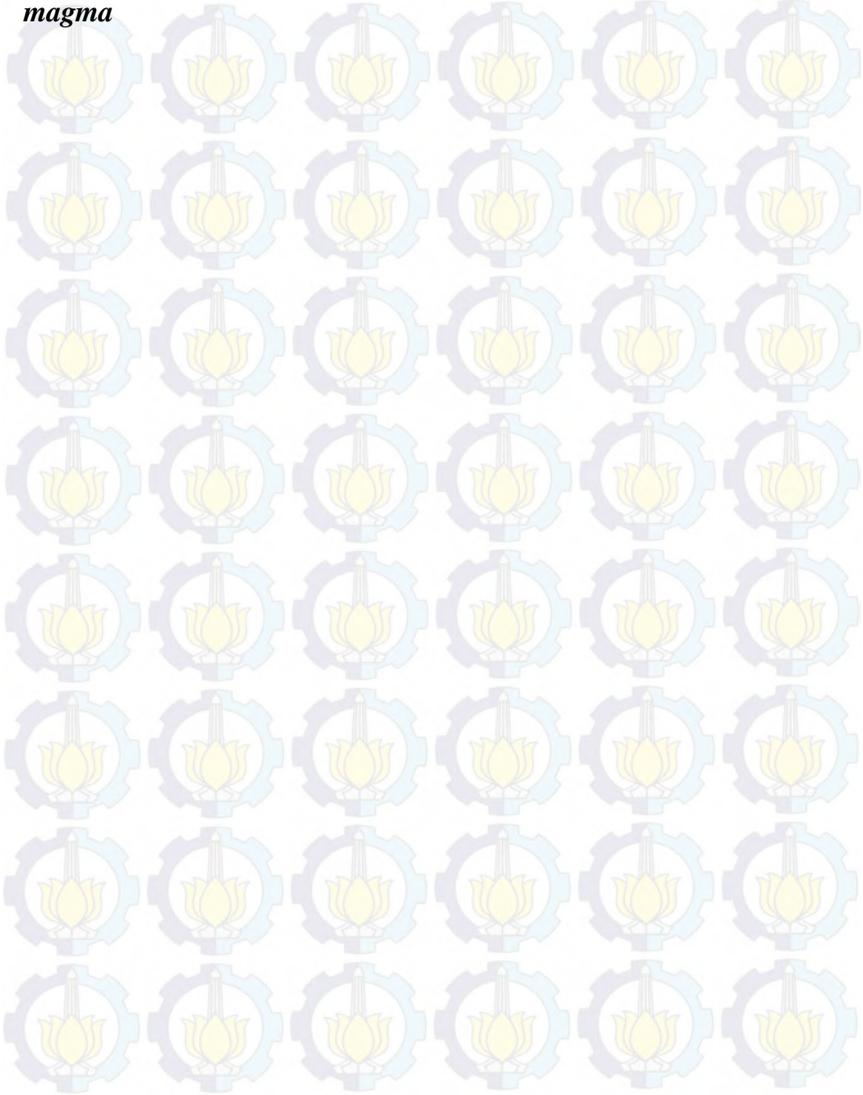
Merapi Mount is one of the most active volcanoes in Indonesia which situated in DI Yogyakarta Province and Central Java Province. Merapi Mount has erupted with a rapid period e.g every 4 years. The high activities are suspected as a cause of deformation in Merapi at September 2013 – March 2014.

In previous research, Aisyah, et al (2013) explained that Merapi eruption in 2010 has triggered the volcano body movement both vertically and horizontally, so that the research conducted by using GPS to examine the movement.

The method used in this research is measuring deformation using GPS observation. Deformation characteristics will include the position, direction, and velocity value. For processing , a scientific software by GAMIT used and for the prediction the model Mogi pressure source is used.

The results show that from September 2013 to March 2014, the value obtained for the horizontal displacement at 0.010 m and vertical displacement at -0.023 m for DELS station, the horizontal displacement at 0.046 m and vertical displacement at 0.040 m for GRWH station, the horizontal displacement at 0.013 m and vertical displacement at -0.014 m for KLAT station,. This value indicates that the body is undergoing deformation of Merapi Mount to the nature of the deformation is inflation. While the position of the center of pressure of the magma is $7^{\circ} 32' 2.129''$ LS; $110^{\circ} 26' 51.57''$ BT with a depth of ± 7140.508 m relative of the peak. The volume of magma is 41788427.595 m³ and can be used to predict the next eruption scale.

Keyword : GPS, Deformation, Inflation, center of pressure of the magma



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisa Deformasi Kawasan Vulkanik Aktif Dengan Menggunakan Data *GPS* September 2013-Maret 2014 (Studi Kasus : Gunung Merapi, Daerah Istimewa Yogyakarta)”.

Selesainya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak, karena itu penulis sampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu selesainya tugas akhir ini, terutama kepada :

1. Bapak Djoko Trapsilo dan Ibu Jami,S.pd selaku orang tua serta Nurhidayah Alfianita selaku adik yang telah memberikan dukungan dan doa yang tak pernah putus.
2. Bapak Dr.Ir M.Taufik selaku Kaprodi Teknik Geomatika yang sudah memberi ijin untuk melaksanakan tugas akhir.
3. Ibu Ira Mutiara Anjasmara, ST, M.Phil-Phd selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis. Terimakasih atas kesempatan, bimbingan serta dukungan hingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini.
4. Bapak Khomsin, ST, MT selaku koordinator tugas akhir penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan yang telah Bapak berikan.
5. Ibu Hepi Hapsari Handayani, ST, M.sc, selaku dosen wali penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan yang telah Ibu berikan.
6. Seluruh Bapak dan Ibu dosen serta karyawan Teknik Geomatika ITS, yang telah memberikan semangat, harapan, dukungan, ilmu dan bimbingannya.
7. Ibu Dra. Sri Sumarti selaku kepala seksi Merapi yan telah memberikan izin untuk bisa melakukan Tugas Akhir di kantor Badan Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG)

8. Ibu Nurnaning Aisyah, S.Si selaku pembimbing yang telah mengenalkan banyak hal baru tentang gunung Merapi, memberikan ilmu, tempat dan kesempatan untuk penulis belajar di kantor Badan Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG).
9. Pak Akbar Kurniawan yang telah membagi ilmunya, memberikan bantuan dan masukan dalam pengolahan data.
10. Anggih, Zulkarnaen, Pramastya, Lutfi, Fikry Bamahry, Reyzansza yang telah memberikan bantuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
11. Kepada keluarga besar Angkatan 2010 yang selama ini menjadi keluarga saat kuliah. Terima kasih atas dukungan dan doa teman-teman.
12. Semua pihak yang telah membantu , yang tidak mungkin penulis sebutkan satu per satu

Dengan segala keterbatasan, Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun penulis harapkan untuk pebaikan di masa yang akan datang.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2014

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTARTABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Gunung Api.....	5
2.2 Gunung Merapi.....	8
2.3 Deformasi.....	10
2.3.1 Deformasi Gunung Api	14
2.3.2 Pemantauan Deformasi dengan <i>GPS</i>	16
2.4 Pengamatan <i>GPS</i>	17
2.4.1 Penentuan Posisi dengan <i>GPS</i>	18
2.4.2 Penentuan Tinggi dengan <i>GPS</i>	21
2.4.3 Kesalahan dan Bias.....	22
2.5 Pemantauan Gunung Api dengan <i>GPS</i>	25
2.6 Penentuan Lokasi Sumber Tekanan(Model Mogi).....	27
2.6.1 Penentuan Lokasi Sumber Tekanan Dan Volum Suplai Magma	29
2.7 Uji Statistik	33

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian	37
3.2 Data dan Peralatan	38
3.2.1 Data.....	38
3.2.2 Peralatan	39
3.3 Tahapan Penelitian.....	42
3.4 Tahapan Pengolahan Data	44

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengolahan Data GPS.....	51
4.1.1 Pengolahan GAMIT	51
4.1.2 Pengolahan GLOBK.....	53
4.2 Deteksi Outliers	56
4.3 Kecepatan Vektor Pergeseran	58
4.4 Analisis Kecepatan Pergeseran	59
4.5 Penentuan Posisi Tekanan Magma dan Volume Suplai Magma	62
4.6 Analisis Deformasi	66

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	71
5.1 Saran	72

DAFTAR PUSTAKA
BIOGRAFI PENULIS
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penampang Melintang Gunung Api	6
Gambar 2.2	Gambar Gunung Merapi.....	9
Gambar 2.3	Konfigurasi <i>Volcano Explotion Index</i> (VEI)	10
Gambar 2.4	Translasi Materi Searah Sumbu X.....	12
Gambar 2.5	Rotasi Materi	12
Gambar 2.6	Regangan Normal	13
Gambar 2.7	Regangan Geser.....	13
Gambar 2.8	Gejala Deformasi Pada Gunung Api Aktif.....	15
Gambar 2.9	Metode Penentuan Posisi Dengan <i>GPS</i>	19
Gambar 2.10	Penentuan Posisi Metoda Absolut	19
Gambar 2.11	Penentuan Posisi Metoda Diferensial	20
Gambar 2.12	Sistem Tinggi.....	21
Gambar 2.13	Kesalahan <i>Ephemeris</i>	23
Gambar 2.14	Pemantauan Gunung Api Dengan Menggunakan <i>GPS</i> Secara Kontinyu	26
Gambar 2.15	Model Mogi Untuk Penentuan Sumber Tekanan Magma	28
Gambar 2.16	Skema Perubahan Jarak Miring Akibat	30
Gambar 3.1	Peta Lokasi Penelitian	37
Gambar 3.2	Lokasi Stasiun Pemantaun <i>GPS</i> di Gunung Merapi	39
Gambar 3.3	Diagram Tahap Penelitian	42
Gambar 3.4	Diagram Tahap Pengolahan Data	44
Gambar 4.1	Contoh <i>File</i> Hbudia.14244	55
Gambar 4.2	Contoh <i>File</i> Globk_Comb.Cmd.....	56
Gambar 4.3	Contoh <i>File</i> Glogr_Comb.Cmd.	57
Gambar 4.4	Contoh <i>Plotting</i> Pibase_Budi.Bptk	58
Gambar 4.5	Contoh <i>Plotting Time Series North</i> Stasiun BPTK Yang Belum Dikurangi Data Outliers Pibase_Budi.Bptk.....	59
Gambar 4.6	Contoh <i>Plotting Time Series North</i> Stasiun BPTK Yang Sudah Dikurangi Data OutliersPibase_Budi.Bptk.....	59

Gambar 4.7	Arah dan Kecepatan Pergeseran Dalam Kuadran	60
Gambar 4.8	Arah dan Kecepatan Pergeseran	61
Gambar 4.9	Grafik Regresi Penentuan Nilai k	65
Gambar 4.10	Program Mogi	66
Gambar 4.11	Ilustrasi Posisi Kedalaman Sumber Tekanan Magma	67
Gambar 4.12	Pusat Tekanan Magma, Arah dan Kecepatan Pergeseran	68
Gambar 4.13	<i>Plotting Time Series</i> Dels Up	69
Gambar 4.14	Grafik Perubahan Tinggi Titik Dels	70
Gambar 4.15	<i>Plotting Time Series</i> Grwh Up	70
Gambar 4.16	Grafik Perubahan Tinggi Titik Grwh	71
Gambar 4.17	<i>Plotting Time Series</i> Klat Up	71
Gambar 4.18	Grafik Perubahan Tinggi Titik Klat	72



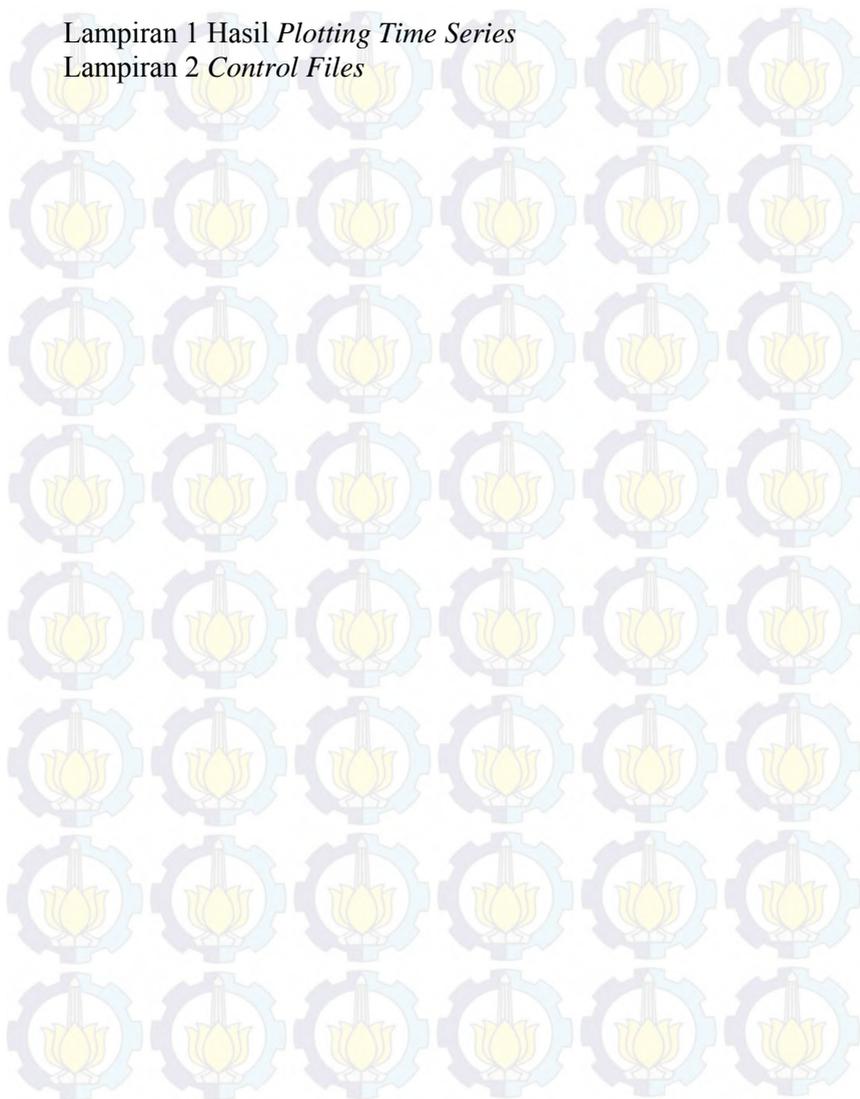
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Distribusi dan tipe gunung api di Indonesia	7
Tabel 3.1 Lokasi Data Pengamatan GPS.....	38
Tabel 3.2 Lokasi Data Pengamatan GPS.....	38
Tabel 4.1 Kecepatan pergeseran pengolahan dengan titik ikat BPTK	56
Tabel 4.2 Hasil Uji Statistik Vektor Pergeseran Horizontal Pengolahan Titik Ikat BPTK.....	61
Tabel 4.3 Hasil Uji Statistik Vektor Pergeseran Vertikal Pengolahan Titik Ikat BPTK.....	61
Tabel 4.4 Dis Nilai Pergeseran Pengolahan Dengan Titik Ikat BPTK	61
Tabel 4.5 Perhitungan Nilai K dengan Konsep Regresi	63
Tabel 4.6 Parameter metoda grid search Model.....	64
Tabel 4.7 Hasil prediksi sumber magma tekanan Gunung Merapi menggunakan program MOGI.....	63
Tabel 4.8 Nilai Pergeseran Pengolahan Dengan Titik Ikat BPTK	66
Tabel 5.1 Nilai pergeseran.....	71

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil *Plotting Time Series*

Lampiran 2 *Control Files*





BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang memiliki banyak gunung api yang masih aktif dan sering mengalami erupsi. Ada sekitar 129 gunung api aktif dan 271 titik erupsi yang merupakan konsekuensi dari interaksi dan tumbukan antara beberapa lempeng (Katili dan Siswamidjojo, 1994 dalam Jamel, 2012). Di Pulau Jawa terdapat sekitar 34 gunung api aktif yang sewaktu-waktu bisa terjadi erupsi.

Salah satu gunung api di Pulau Jawa yang masih aktif adalah Gunung Merapi. Gunung Merapi berada di Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. Area studi ini terletak di posisi geografis Lintang $7^{\circ} 32' 5''$ S ; Bujur $110^{\circ} 26' 5''$ E. Lereng sisi selatan berada dalam administrasi Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan sisanya berada dalam wilayah Provinsi Jawa Tengah, yaitu Kabupaten Magelang di sisi barat, Kabupaten Boyolali di sisi utara dan timur, serta Kabupaten Klaten di sisi tenggara. Gunung Merapi memiliki ketinggian 2.968 m dpl, (per 2006). Gunung Merapi adalah gunung termuda dalam rangkaian gunung berapi yang mengarah ke selatan dari Gunung Ungaran. Gunung ini terbentuk karena aktivitas di zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke bawah Lempeng Eurasia menyebabkan munculnya aktivitas vulkanik di sepanjang bagian tengah Pulau Jawa. Puncak yang sekarang ini tidak ditumbuhi vegetasi karena aktivitas vulkanik tinggi. Puncak ini tumbuh di sisi barat daya puncak Gunung Batulawang yang lebih tua.

Letusan gunung api umumnya didahului dengan beberapa gejala fenomena awal, seperti aktivitas seismik, terjadinya deformasi, adanya perubahan temperatur, serta adanya perubahan harga percepatan gaya berat dikawasan gunung api. Aktifitas vulkanik gunung api mempengaruhi

aktivitas di lingkungan gunung api tersebut. Oleh sebab itu, pemantauan aktivitas vulkanik gunung api sangat diperlukan. Metode pemantauan aktivitas gunung api yang telah diaplikasikan saat ini, yaitu antara lain metode seismik, metode visual, metode deformasi, metode kima gas, metode termal, metode gaya berat, metode geomagnetik, metode penginderaan jauh (Lipman and Mullineaux, 1981 dalam Andreas, 2001). Metode deformasi banyak diaplikasikan dalam pemantauan gunung api dengan berbagai macam sensor dan sistem. Metode pemantauan deformasi umumnya menggunakan data terestris. Salah satunya menggunakan GPS.

Pemantauan deformasi dengan GPS dapat di bagi dua yaitu pemantauan secara kontinyu dan pemantauan secara episodik. Prinsip pemantauan deformasi secara kontinyu yaitu pemantauan terhadap perubahan koordinat beberapa titik yang mewakili sebuah gunung api dari waktu ke waktu. Metode ini, menggunakan beberapa alat penerima sinyal (receiver) GPS yang ditempatkan pada beberapa titik pantau pada punggung dan puncak gunung api, serta pada suatu pusat pemantau (stasiun referensi) yang merupakan pusat pemroses data. Data dan informasi deformasi permukaan selanjutnya digunakan untuk mengungkapkan karakteristik dari aktivitas magnetik gunung api. Gejala deformasi gunung api akan menyebabkan pergeseran posisi suatu titik tubuh dari gunung api. Pergeseran tersebut bisa terjadi baik secara horizontal maupun vertikal.

Dengan adanya pemantauan deformasi menggunakan GPS secara kontinyu dapat diperoleh informasi mengenai pergeseran suatu titik tanah sehingga dapat diketahui gejala-gejala vulkanik dari Gunung Merapi. Dari data perubahan deformasi yang terjadi, dapat diketahui pusat tekanan magma pada gunung Merapi. Informasi yang didapatkan menjadi langkah awal dalam upaya mitigasi bencana Gunung Merapi.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengetahui karakteristik dan besar deformasi Gunung Merapi?
2. Bagaimana menentukan vektor pergeseran deformasi Gunung Merapi?
3. Bagaimana memprediksi posisi kedalaman sumber tekanan magma berdasarkan model Mogi ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Wilayah studi berada di wilayah Gunung Merapi.
2. Penelitian mengenai karakteristik dan analisa deformasi Gunung Merapi menggunakan *GPS* dengan pengamatan secara kontinyu serta menentukan kecepatan pergeserannya.
3. Pengolahan data *GPS* menggunakan *scientific software GAMIT*
4. Menentukan posisi kedalaman sumber tekanan magma berdasarkan model Mogi
5. Data yang digunakan adalah data *GPS* pada pengamatan secara kontinyu tahun September 2013-Maret 2014 dengan stasiun pengamatan berada di Klatakan, Grawah, Deles, dan Kantor BPPTKG.

1.4 Tujuan

Tujuan Tugas Akhir ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik dan besar deformasi Gunung Merapi.
2. Menentukan vektor pergeseran deformasi Gunung Merapi.
3. Memprediksi posisi kedalaman sumber tekanan magma berdasarkan model Mogi.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gunung Api

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 api merujuk kepada material pijar yang keluar dari dalam inti bumi (Kusnandar, 2004 dalam Jamel 2012). Gunung api adalah lubang atau saluran yang menghubungkan suatu wadah berisi bahan yang disebut magma (Koesoemadinata dalam Yunazwardi, 2004).

Istilah gunung api terbentuk dari kata gunung dan api. Morfologi daratan yang memiliki relief membumbung biasa disebut gunung, dan peristilahan api yaitu dari material pijar yang keluar dari dalam inti bumi. Menurut definisi gunung api yaitu tempat dimana magma keluar permukaan bumi (Andreas, 2001). Secara harfiah istilah gunung api adalah lubang atau saluran yang menghubungkan suatu wadah berisi bahan yang disebut magma (Mulyo, 2004 dalam Yunazwardi, 2010). 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 lempeng 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).

Gunung api didefinisikan juga sebagai lubang kepundan atau rekahan dalam lempeng bumi tempat keluarnya cairan magma atau gas atau cairan lainnya ke permukaan bumi. Material yang di erupsikan ke permukaan bumi umumnya membentuk kerucut terpancung. Gunung api terbentuk sejak jutaan tahun lalu hingga sekarang. Pengetahuan tentang

gunung api berawal dari perilaku manusia dan manusia purba yang mempunyai hubungan dekat dengan gunung api. Hal tersebut diketahui dari penemuan fosil manusia di dalam endapan vulkanik dan sebagian besar penemuan fosil itu ditemukan di Afrika dan Indonesia berupa tulang belulang manusia yang terkubur oleh endapan vulkanik. (VSI ESDM,2008).

Aktivitas vulkanik didefinisikan sebagai proses naiknya magma yang terkandung di dalam gunung tersebut ke permukaan bumi. Aktifitas gunung api dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu aktifitas vulkanik dan non vulkanik. Aktifitas non vulkanik biasanya diasosiasikan tidak identik dengan penyebab terjadinya 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 temperature, solfatar yang merupakan endapan balerang disekitar lubang kepundan, fumarol yang merupakan uap panas dan kering, dipancarkan melalui lupang kepundan. Sedangkan bencana gunung api biasanya identik dengan aktifitas vulkanik gunung api (Andreas, 2001).



Gambar 2.1 Penampang Melintang Gunung Api (VSI ESDM, 2008)

Di Indonesia gunung api terbentuk karena proses tumbukan antar lempeng. Tumbukan lempeng ini terjadi di daratan dan di lautan yang menyebabkan gunung api terdapat di daratan (Gunung api Merapi, Gunung api Lokon dan sebagainya) dan gunung api terdapat di lautan (Gunung api Anak Krakatau, Gunung api Karangetang dan sebagainya). Lempeng saling bertabrakan (subduksi) dimana salah satu lempeng menghujam di bawah lempeng lain yang menyebabkan lempeng akan melengkung dan merekah sehingga memungkinkan magma naik ke permukaan bumi dan membentuk gunung api. Secara umum gunung api aktif adalah gunung yang masih aktif melakukan aktivitas vulkaniknya seperti letusan atau erupsi. Aktivitas vulkanik adalah proses naiknya magma yang terkandung di dalam gunung tersebut ke permukaan bumi. Aktivitas vulkanik gunung api terlihat dari letusan yang terjadi.

Tabel 2.1 Distribusi dan tipe gunung api di Indonesia
(Sumber: Katili dan Siswowidjojo, 1994 dalam Andreas,2001)

Pulau/Kawasan	Jumlah Gunung Api			Total
	Tipe-A	Tipe-B	Tipe-C	
Sumatra	12	12	6	30
Jawa	21	8	5	34
Bali	2	-	-	2
Nusa Tenggara	20	3	5	28
Laut Banda	9	1	-	10
Sulawesi	6	2	5	13
Sangihe	5	-	-	5
Halmahera dan Sekitarnya	5	2	-	7
Total	80	28	21	129

Klasifikasi gunung api di Indonesia :

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 erupsimagnetik, 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 tingkah lemah.

2.2 Gunung Merapi

Gunung Merapi adalah gunung berapi di bagian tengah Pulau Jawa dan merupakan salah satu gunung api teraktif di Indonesia. Gunung yang memiliki ketinggian puncak 2.968 m dpl (per 2006) pada lereng sisi selatan berada dalam administrasi Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan sisanya berada dalam wilayah Provinsi Jawa Tengah, yaitu Kabupaten Magelang di sisi barat, Kabupaten Boyolali di sisi utara dan timur, serta Kabupaten Klaten di sisi tenggara. Diantara 127 gunung api aktif yang terletak di Indonesia mungkin Merapi termasuk yang paling terkenal. Banyak aspek yang membuat gunung api ini menarik selain yang pertama tentu saja aktivitas vulkaniknya. Selain itu, Merapi terletak di bagian tengah pulau Jawa tepat berada di jantung budaya Jawa yang kental sehingga aspek kultural, mitologi dan aspek sosial politiknya juga menarik. Merapi termasuk sering erupsi (meletus) sehingga secara vulkanologis menguntungkan untuk menjadi laboratorium alam dalam rangka melakukan ujicoba berbagai peralatan dan metodologi penelitian.

Gunung Merapi adalah gunung termuda dalam rangkaian gunung berapi yang mengarah ke selatan dari Gunung

Ungaran. Gunung ini terbentuk karena aktivitas di zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke bawah Lempeng Eurasia menyebabkan munculnya aktivitas vulkanik di sepanjang bagian tengah Pulau Jawa. Puncak yang sekarang ini tidak ditumbuhi vegetasi karena aktivitas vulkanik tinggi. Puncak ini tumbuh di sisi barat daya puncak Gunung Batulawang yang lebih tua.



Gambar 2.2 Gambar Gunung Merapi (BPPTKG, 2014)

Proses pembentukan Gunung Merapi telah dipelajari dan dipublikasi sejak 1989 dan seterusnya. Berthomier, seorang sarjana Prancis, membagi perkembangan Merapi dalam empat tahap (BPPTKG, 2014). Tahap pertama adalah Pra-Merapi (sampai 400.000 tahun yang lalu), yaitu Gunung Bibi yang bagiannya masih dapat dilihat di sisi timur puncak Merapi. Tahap Merapi Tua terjadi ketika Merapi mulai terbentuk namun belum berbentuk kerucut (60.000 - 8000 tahun lalu). Sisa-sisa tahap ini adalah Bukit Turgo dan Bukit Plawangan di bagian selatan, yang terbentuk dari lava basaltik. Selanjutnya adalah Merapi Pertengahan (8000 - 2000 tahun lalu), ditandai dengan terbentuknya puncak-puncak tinggi, seperti Bukit Gajahmungkur dan Batulawang, yang tersusun dari lava andesit. Proses pembentukan pada masa ini ditandai dengan

aliran lava, breksiasi lava, dan awan panas. Aktivitas Merapi telah bersifat letusan efusif (lelehan) dan eksplosif. Diperkirakan juga terjadi letusan eksplosif dengan runtuhnya material ke arah barat yang meninggalkan morfologi tapal kuda dengan panjang 7 km, lebar 1-2 km dengan beberapa bukit di lereng barat. Kawah Pasarubur (atau Pasarubrah) diperkirakan terbentuk pada masa ini. Puncak Merapi yang sekarang, Puncak Anyar, baru mulai terbentuk sekitar 2000 tahun yang lalu. Dalam perkembangannya, diketahui terjadi beberapa kali letusan eksplosif dengan VEI 4 berdasarkan pengamatan lapisan tefra (BPPTKG).

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
General Description	Non-Explosive	Small	Moderate	Moderate-Large	Large	Very Large			
Volume of Tephra (m ³)		1x10 ⁴	1x10 ⁶	1x10 ⁷	1x10 ⁸	1x10 ⁹	1x10 ¹⁰	1x10 ¹¹	1x10 ¹²
Cloud Column Height (km)									
Above crater	<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25				
Above sea level							>25		
Qualitative Description	"Gentle,"	"Effusive"		"Explosive"		"Cataclysmic," "paroxysmal," "Severe," "violent," "terrific"		"colossal"	
Eruption Type (see fig. 7)		← Strombolian		← Vulcanian		← Plinian		← Ultra-Plinian	
	← Hawaiian								
Duration (continuous blast)		<1 hr		1-6 hrs	6-12 hrs		>12 hrs		
Maximum explosivity									
	Lava flow					Explosion or Nube ardente			
		Dome or mudflow							
Tropospheric Injection	Negligible	Minor	Moderate	Substantial					
Stratospheric Injection	None	None	None	Possible	Definite	Significant			
Eruptions	976	1239	3808	1083	412	168	50	6	0

Gambar 2.3 Konfigurasi *Volcano Explotion Index* (VEI)(BPPTKG,2014)

2.3 Deformasi

Deformasi adalah perubahan kedudukan, pergerakan secara absolut atau relatif dari posisi suatu materi atau perubahan kedudukan dalam dimensi yang linear (Andreas, 2001). Deformasi erat kaitannya dengan perubahan posisi, dimensi dan kedudukan suatu materi atau objek. Perubahan yang terjadi secara umum disebabkan gaya berat atau beban yang terjadi pada objek tersebut. Sumber beban atau gaya yang bekerja ini bisa dari luar objek maupun dari dalam objek.

Pergerakan atau perubahan posisi yang terjadi dapat ditinjau dari dua sisi. Jika ditinjau dari sisi atau titik pada objek itu sendiri, dinamakan dengan pergerakan titik absolut. Sedangkan jika ditinjau dari titik yang lain, dinamakan dengan pergerakan titik relatif (Yunazwardi, 2010). Jika dilihat dari sifat keelastisitasan pada batuan, deformasi dapat dibagi menjadi tiga kelompok. Berikut adalah jenis-jenis deformasi ditinjau dari elastisitasnya(Yunazwardi, 2010):

1. Deformasi Elastik

Benda yang mengalami deformasi elastik akan kembali ke bentuk semula ketika gaya deformasi yang bekerja pada benda tersebut telah selesai bekerja. Biasanya terletak pada zona aseismik dan bisa menyebabkan terjadinya instrusi dan ekstrusi yang diikuti dengan erupsi puncak.

2. Deformasi Plastik

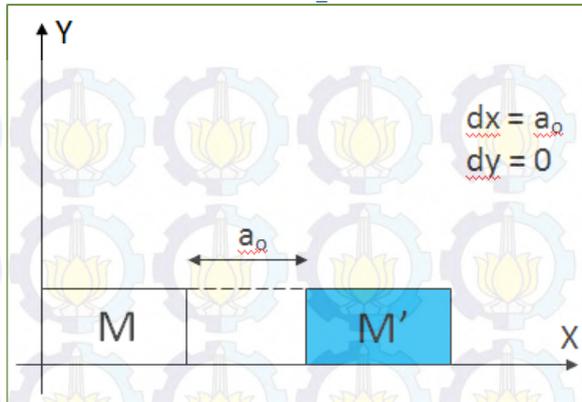
Jika benda yang mengalami deformasi tetap tidak kembali ke bentuk semula meski gaya yang bekerja padanya telah selesai, maka dikatakan benda tersebut dikatakan telah mengalami deformasi plastik. Termasuk zona seismik aktif, destruktif, intrusi dan ekstrusi. Bisa menyebabkan erupsi samping, dooming dan juga rekahan.

3. Deformasi Visco Elastik

Proses deformasi ini terjadi di antara deformasi elastik dan plastik, yaitu ketika benda tidak benar-benar kembali ke posisi awal meski gaya yang bekerja pada benda itu telah selesai.

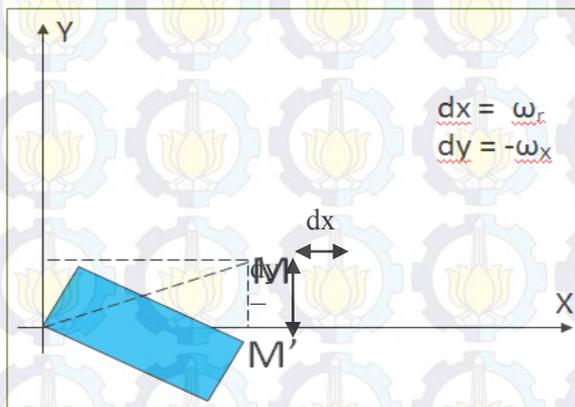
Berdasarkan jenisnya deformasi yang terjadi pada suatu benda dapat dikelompokkan kedalam 4 jenis, yaitu(Andriyani, 2012):

1. Translasi materi yang bersifat kaku, yaitu perubahan posisi materi tanpa mengalami perubahan bentuk sesuai sumbu acuan. Gambar 2.4 menunjukkan deformasi jenis ini.



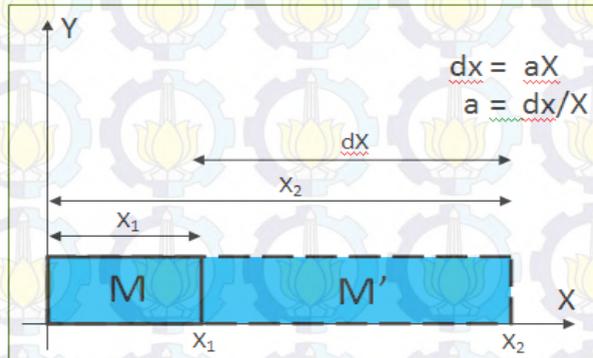
Gambar 2.4 Translasi Materi Searah Sumbu X
(Andriyani, 2012)

2. Rotasi, yaitu perubahan posisi materi yang membentuk sudut terhadap koordinat acuan tanpa mengalami perubahan bentuk. Gambar 2.5 menunjukkan deformasi jenis ini.



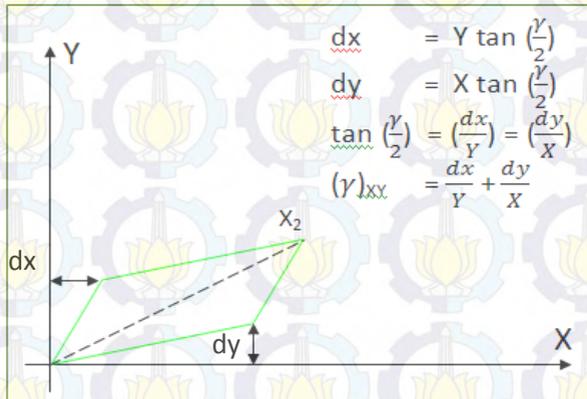
Gambar 2.5 Rotasi Materi (Andriyani, 2012)

3. Regangan normal, yaitu perbandingan perubahan panjang (dx) terhadap panjang asalnya. Gambar 2.6 menunjukkan deformasi jenis ini.



Gambar 2.6 Regangan Normal (Andriyani, 2012)

4. Regangan geser, yaitu perubahan bentuk dalam benda padat ketika terdeformasi. Gambar 2.7 menunjukkan deformasi jenis ini.



Gambar 2.7 Regangan Geser (Andriyani, 2012)

Analisis deformasi bertujuan untuk menentukan kuantitas pergeseran dan parameter-parameter deformasi yang mempunyai karakteristik dalam ruang dan waktu (Chrzanowski, 1986 dalam Andriyani, 2012). Parameter deformasi ini didapat dari hasil pergeseran koordinat titik objek dalam pengamatan yang dilakukan berkala maupun kontinu. Secara garis besar tahapan-tahapan yang dilakukan dalam analisis deformasi yaitu (Andriyani, 2012):

1. Penyelenggaraan kerangka dasar
2. Pengolahan data
3. Analisis nilai pergeseran yang terjadi pada benda yang terdeformasi
4. Penentuan model deformasi yang sesuai

Analisis deformasi dapat dilakukan secara geometrik yaitu analisis regangan dengan hanya mengamati status geometri (ukuran dan dimensi) pada objek yang diamati. Data hasil pengamatan geodetik terhadap efek-efek respon suatu materi terhadap gaya yang bekerja padanya dapat membantu untuk menyusun suatu model matematik yang mewakili jenis deformasi. Analisis geometrik ini dapat dikelompokkan menjadi 2 jenis, yaitu:

1. Pergeseran, yaitu analisis yang menunjukkan perubahan posisi suatu benda dengan menggunakan data perbedaan posisi yang didapat dari perataan data pengamatan pada kala berbeda.
2. Regangan, yaitu analisis yang menunjukkan perubahan posisi, bentuk, dan ukuran suatu benda dengan menggunakan data pengamatan geodetik langsung atau data regangan yang diperoleh dari data pengamatan geodetik perubahan posisi.

2.3.1 Deformasi Gunung Api

Deformasi pada gunung api terjadi karena aktivitas vulkanik berupa pergerakan magma di bawah permukaan yang berpengaruh pada perubahan tekanan pada kantong magma. Akibatnya volum permukaan juga

berubah sehingga menyebabkan tubuh gunung api berubah. Umumnya adanya pergerakan magma di bawah permukaan merupakan indikasi awal akan terjadi erupsi dan kenaikan tekanan akan menghasilkan deformasi di permukaan (*ground deformation*)(Abidin, 2000). Secara garis besar gejala deformasi dapat berupa inflasi dan deflasi, yaitu:

1. Inflasi

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

2. Deflasi

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.



Gambar 2.8 Gejala Deformasi Pada Gunung Api Aktif (Abidin,2000)

2.3.2 Pemantauan Deformasi dengan GPS

GPS adalah sistem radio navigasi dan penentuan posisi menggunakan satelit milik Amerika Serikat. Nama formal dari sistem satelit militer ini adalah NAVSTAR *GPS*, kependekan dari *NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*. Sistem yang dapat digunakan oleh banyak orang sekaligus dalam segala cuaca ini, didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga-dimensi yang teliti, dan juga informasi mengenai waktu, secara kontinyu di seluruh dunia.

Dalam konteks studi deformasi gunung berapi dengan metode survei *GPS*, ada beberapa keunggulan dan keuntungan dari *GPS* yang perlu dicatat, yaitu antara lain (Jamel, 2012):

1. *GPS* dapat mencakup suatu kawasan yang relatif luas tanpa memerlukan saling keterlihatan antar titik-titik pengamatan. Dengan karakteristik seperti ini, *GPS* dapat memantau sekaligus beberapa gunung berapi yang berdekatan.
2. *GPS* memberikan nilai vektor koordinat serta pergerakan titik (dari minimum dua kala pengamatan) dalam tiga dimensi (dua komponen horisontal dan satu komponen vertikal), sehingga dapat informasi deformasi yang lebih baik dibandingkan metode-metode terestris yang umumnya memberikan informasi deformasi dalam satu atau dua dimensi.
3. *GPS* memberikan nilai vektor pergerakan titik dalam suatu sistem koordinat referensi yang tunggal dan stabil baik secara spasial maupun temporal. Dengan itu maka *GPS* dapat digunakan untuk memantau deformasi gunung atau gunung-gunung berapi dalam kawasan yang luas secara konsisten dari waktu ke waktu.

4. *GPS* dapat memberikan nilai vektor pergerakan dengan tingkat presisi sampai beberapa mm, dengan konsistensi yang tinggi baik secara spasial maupun temporal. Dengan tingkat presisi yang tinggi dan konsisten ini maka diharapkan besarnya pergerakan titik yang kecil sekalipun akan dapat terdeteksi dengan baik.
5. *GPS* dapat dimanfaatkan secara kontinu tanpa tergantung waktu (siang maupun malam), dalam segala kondisi cuaca. Dengan karakteristik semacam ini maka pelaksanaan survei *GPS* untuk studi deformasi gunung berapi dapat dilaksanakan secara efektif dan fleksibel.

Pemantauan deformasi gunung berapi dengan metode survei *GPS* ini sudah diterapkan pada banyak gunung berapi di luar negeri.

2.4 Pengamatan GPS

Pengamatan yang digunakan dalam penentuan posisi antara lain menggunakan *pseudorange* dan *carrier phase*. *Pseudorange* merupakan jarak antara satelit dengan *receiver* pada epok tertentu yang didapatkan dari penerimaan sinyal dari satelit GPS.

Persamaan pada data pengamatan GPS melalui jarak semu (*pseudorange*) dan jarak fase (*phase range*) (Abidin,2007) :

$$P_i = \rho + d\rho + d_{trop} + d_{ion_i} + (dt - dT) + MP_i + \vartheta P_i \quad \dots(2.1)$$

$$L_i = \rho + d\rho + d_{trop} - d_{ion_i} + (dt - dT) + MC_i - \lambda_i \cdot N_i + \vartheta PC_i \quad \dots(2.2)$$

Dimana:

P_i : *pseudorange* pada frekuensi f_i (m), ($i=1,2$)

L_i : jarak fase pada frekuensi f_i (m), ($i=1,2$)

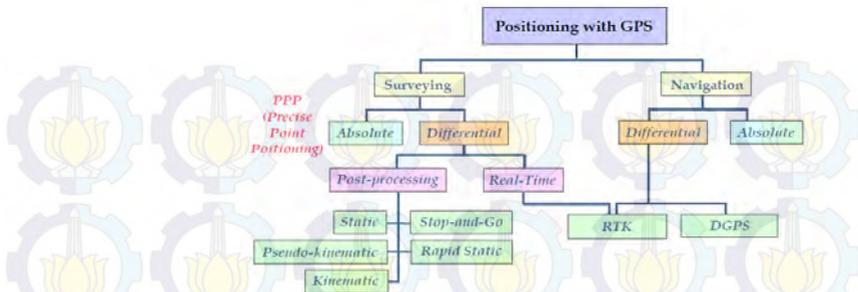
ρ : jarak geometris antara pengamat dengan satelit

- c : cepat rambat gelombang
 λ : panjang gelombang
 dp : kesalahan jarak yang diakibatkan kesalahan orbit
 $dtrop$: bias yang disebabkan oleh refraksi troposfer (m)
 $dion$: bias yang disebabkan oleh refraksi ionosfer (m)
 dt, dT : kesalahan pada jam *receiver* dan jam satelit (m)
 MPi, MCi : efek *multipath* pada hasil pengamatan P_i dan L_i (m)
 $N1, N2$: *ambiguitas fase* dari sinyal L1 dan L2 (dalam jumlah gelombang)
 $\vartheta P_i, \vartheta C_i$: gangguan (*noise*) dalam hasil pengamatan P_i dan L_i (m)

2.4.1 Penentuan Posisi dengan GPS

Pada prinsipnya penentuan posisi dengan GPS merupakan metode pengikatan ke belakang (*resection*) dengan pengukuran jarak ke beberapa satelit yang telah diketahui koordinatnya. Dua prinsip utama penentuan posisi adalah metode absolut dan diferensial (Abidin, 2002).

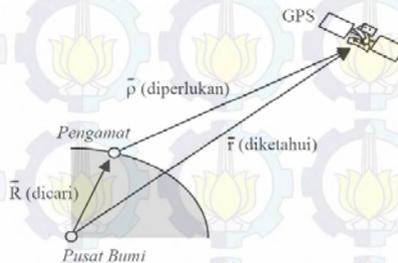
Pada pelaksanaannya, prinsip penentuan posisi dasar dengan satelit navigasi dapat diklasifikasikan atas beberapa metode penentuan posisi tergantung pada mekanisme pengaplikasian. Patut dicatat disini bahwa posisi yang diberikan oleh satelit adalah posisi 3 dimensi (X,Y,Z ataupun L,B,h). Metode penentuan posisi dengan satelit navigasi dapat dikelompokkan atas beberapa metode yaitu seperti terlihat pada Gambar 2.9



Gambar 2.9 Metode Penentuan Posisi Dengan GPS (Abidin,2002)

1. Metode Absolut

Pada dasarnya penentuan posisi menggunakan satelit dilakukan dengan mengukur vektor jarak (ρ) dari satelit ke titik yang akan ditentukan posisinya. Dengan catatan bahwa posisi satelit (r) telah diketahui letak relatif terhadap pusat bumi, dan posisi titik (P) yang akan diperoleh juga relatif terhadap pusat bumi (Abidin, 2002). Penentuan posisi dengan menggunakan metode absolut tampak dari Gambar 2.10 di bawah ini :



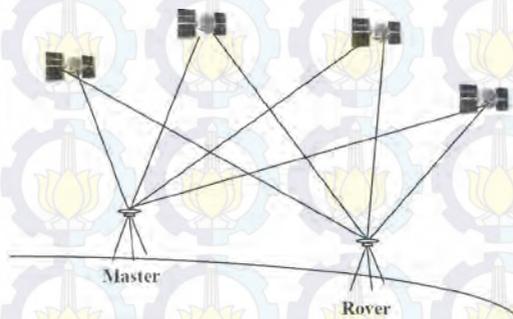
Gambar 2.10 Penentuan Posisi Metoda Absolut (Abidin, 2002)

Pada metode ini penentuan posisi suatu titik tidak bergantung terhadap titik lainnya (hanya digunakan

satu receiver), sehingga kesalahan jam receiver masih besar pengaruhnya. Oleh karena itu metode ini tidak digunakan dalam pengukuran yang membutuhkan ketelitian posisi yang tinggi. Ada 4 (empat) parameter yang akan ditentukan nilainya dalam metode absolut, yaitu 3 (tiga) parameter koordinat (X, Y, Z atau L, B, h) dan parameter kesalahan jam satelit. Parameter bisa didapatkan dengan solusi dari minimal 4 (empat) persamaan, dimana tiap persamaan diturunkan dari model matematika pengukuran jarak ke satelit. Jadi dibutuhkan minimal 4 (empat) satelit untuk bisa mendapatkan posisi dengan metode absolut.

2. Metode Diferensial

Sering pula disebut sebagai metode penentuan posisi relatif. Pada metode diferensial, posisi suatu titik ditentukan relatif terhadap titik lain yang telah diketahui koordinatnya. Titik yang akan ditentukan posisinya dinamakan rover, sedangkan titik yang telah diketahui koordinatnya dinamakan master. Metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut ini.

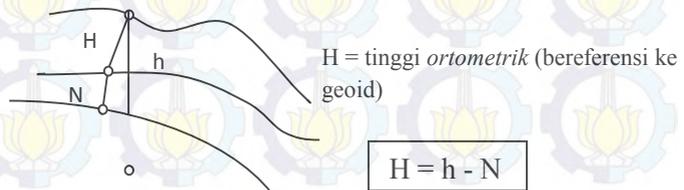


Gambar 2.11 Penentuan Posisi Metoda Diferensial
(Abidin, 2007)

Pengurangan data pengamatan dapat dilakukan pada metode ini, akibatnya beberapa jenis kesalahan dan bias yang biasa muncul dalam pengukuran *GPS* dapat dieliminasi atau direduksi. Dengan demikian metode ini dapat memberikan data dengan akurasi dan presisi yang tinggi sehingga pada akhirnya presisi dan akurasi posisi yang diinginkan akan ikut meningkat.

2.4.2 Penentuan Tinggi dengan GPS

Ketinggian titik yang diberikan GPS adalah ketinggian titik di atas permukaan *ellipsoid*, yaitu *ellipsoid* WGS '84. Tinggi *ellipsoid* (h) tidak sama dengan dengan tinggi *orthometrik* yang merupakan tinggi di atas geoid yang diukur sepanjang garis gaya berat melalui titik tersebut.



Gambar 2.12. Sistem Tinggi (Abidin, 2007)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketelitian komponen tinggi GPS umumnya 2-3 kali lebih rendah dibandingkan ketelitian komponen horisontalnya. Misalkan saat ini ketelitian horisontal sudah dapat mencapai 2 milimeter, maka komponen tingginya menjadi 3 kali lipatnya, yaitu mencapai 6 milimeter. Ada dua penyebab utama dalam hal ini, yaitu (Abidin,2007):

- a. Satelit-satelit GPS yang bisa diamati hanya yang berada diatas horison (*one-sided geometry*). Pada

dasarnya hal ini secara geometrik tidak optimal, juga karena tidak ada satelit diatas dan dibawah pengamat, maka tidak akan ada efek pengeliminasian kesalahan seperti halnya dalam kasus komponen horisontal. Pada komponen horisontal, adanya satelit disebelah barat dan timur ataupun di utara dan selatan dari pengamat akan memungkinkan adanya pengeliminasian tersebut.

- b. Efek kesalahan dan bias (ionosfer, troposfer, dan orbit) umumnya adalah pada jarak, yaitu menyebabkan jarak menjadi semakin panjang atau dapat juga menjadi semakin pendek. Dalam hal ini maka yang paling terpengaruh adalah komponen tinggi

2.4.3 Kesalahan dan Bias

Pada saat pengambilan data menggunakan GPS, sinyal satelit akan dipengaruhi oleh beberapa kesalahan dan bias. Kesalahan dan bias pada dasarnya dapat dikelompokkan menjadi:

1. Satelit , seperti kesalahan *ephemeris*, jam satelit, dan *selective availability* (SA)
2. Medium propagansi, seperti bias ionosfer dan bias troposfer
3. *Receiver* GPS, seperti kesalahan jam *receiver*, kesalahan yang terkait dengan antenna, dan *noise*
4. Data pengamatan, *ambiguitas fase* dan *cycle slips*
5. Lingkungan sekitar GPS *receiver* seperti *multipath* dan *imaging*

Kesalahan dan bias GPS harus diperhitungkan secara benar dan baik, karena besar dan karakteristik dari kesalahan dan bias tersebut akan mempengaruhi ketelitian informasi (posisi, kecepatan, percepatan, waktu) yang diperoleh serta proses penentuan ambiguitas fase dari sinyal GPS. Berikut ini

karakteristik dari sebagian kesalahan dan bias akan dijelaskan secara umum (Abidin,2007):

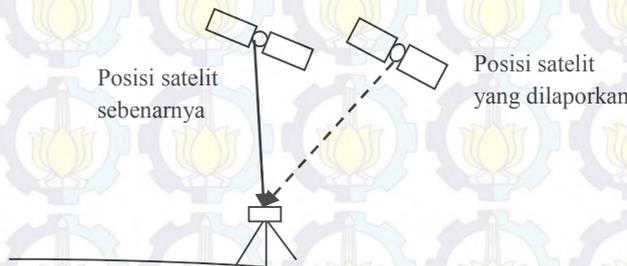
a. Kesalahan *Ephemeris* (Orbit)

Kesalahan *Ephemeris* (Orbit) adalah kesalahan dimana orbit satelit yang dilaporkan oleh *ephemeris* satelit tidak sama dengan orbit satelit yang sebenarnya. Dengan kata lain, posisi satelit yang dilaporkan tidak sama dengan posisi yang sebenarnya. Penyebab kesalahan *ephemeris* diantaranya:

- Proses perhitungan orbit satelit oleh stasiun-stasiun pengontrol yang tidak teliti
- Kesalahan pada saat memprediksi orbit untuk periode waktu setelah *uploading* ke satelit

Ada beberapa cara untuk mengatasi efek kesalahan ini antara lain:

- Menerapkan metode *differensial positioning*
- Memperpendek panjang *baseline*
- Memperpanjang waktu pengamatan
- Tentukan parameter kesalahan orbit dalam proses estimasi
- Menggunakan informasi orbit yang lebih teliti seperti *precise ephemeris*



Gambar 2.13 Kesalahan *Ephemeris*

b. Bias Ionosfer

Ionosfer merupakan bagian dari lapisan atas atmosfer dimana terdapat sejumlah elektron dan ion bebas yang mempengaruhi perambatan gelombang radio. Sinyal GPS memancarkan sinyalnya ke *reciever* melewati ionosfer, akibatnya ion-ion tersebut akan mempengaruhi propagasi sinyal satelit terutama pada kecepatan sinyal.

Untuk mereduksi kesalahan bias ionosfer, hal-hal yang dilakukan adalah:

- Menggunakan data GPS dari dua frekuensi, L1 dan L2
- Melakukan pengurangan (*differencing*) data pengamatan
- Memperpendek panjang *baseline*
- Melakukan pengamatan pada pagi atau malam hari
- Menggunakan model ionosfer (model *Bent* atau *Klobuchar*)
- Menggunakan parameter koreksi yang dikirimkan oleh sistem WADGPS (*Wide Area Differential GPS*)

c. Bias Troposfer

Ketika melalui lapisan troposfer, sinyal GPS akan mengalami refraksi, yang menyebabkan perubahan kecepatan dan arah sinyal GPS. Bias troposfer ini akan mempengaruhi kecepatan sehingga akan menghasilkan ukuran jarak yang kurang teliti. Lapisan troposfer ini memperlambat data waktu dan data fase.

d. *Multipath*

Multipath merupakan fenomena dimana sinyal dari satelit tiba di antenna GPS melalui dua atau lebih lintasan yang berbeda (Abidin, 2007). Dalam hal ini, satu sinyal merupakan sinyal langsung dari satelit ke

antenna, sedangkan yang lainnya merupakan sinyal-sinyal tidak langsung yang dipantulkan oleh benda-benda (seperti: gedung, jalan raya, mobil, pepohonan, dll) di sekitar antenna sebelum tiba di antenna. Perbedaan panjang lintasan menyebabkan sinyal-sinyal tersebut berinterferensi ketika tiba di antenna yang mengakibatkan kesalahan pada hasil pengamatan. Kesalahan akibat *multipath* akan menghasilkan ukuran jarak yang kurang teliti. *Multipath* akan mempengaruhi hasil ukuran *pseudorange* dan *carrier phase*.

e. *Cycle slip*

Cycle slip merupakan ketidak-kontinuan dalam jumlah gelombang penuh dari fase gelombang pembawa yang diamati, karena sinyal ke *receiver* terputus pada saat pengamatan sinyal. Ada beberapa hal yang bisa membuat *Cycle slip* pada saat pengamatan, antara lain:

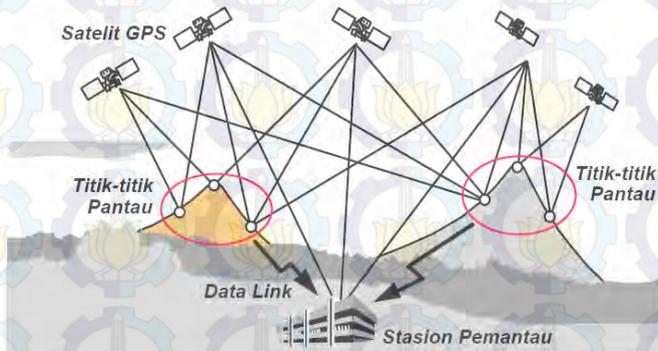
- Mematikan dan menghidupkan *receiver* dengan sengaja.
- Terhalangnya sinyal GPS akibat terhalang pohon atau bangunan.
- Pengaruh aktivitas ionosfer dan *multipath*
- Adanya kerusakan di dalam *receiver* sehingga tidak dapat menerima gelombang secara penuh

2.5 Pemantauan Gunung Api dengan GPS

Prinsip dari metode pemantauan aktivitas gunung api dengan *GPS* pada dasarnya sangat mudah. Yaitu pemantauan terhadap perubahan koordinat dari beberapa titik yang mewakili gunung tersebut dari waktu ke waktu. Pada metode ini, beberapa *receiver GPS* ditempatkan di beberapa titik pantau yang ditempatkan pada punggung dan puncak gunung yang akan dipantau, serta pada suatu pusat pemantau (stasiun referensi) yang merupakan pusat pemrosesan data. Pusat

pemantau adalah suatu lokasi yang telah diketahui koordinatnya dan sebaiknya ditempatkan di kota yang terdekat dengan gunung api tersebut.

Koordinat titik-titik pantau kemudian ditentukan secara teliti dengan *GPS* yang relatif terhadap pusat pemantau, dengan menggunakan metode penentuan posisi differensial secara *realtime* dengan menggunakan data pengamatan fase. Data pengamatan *GPS* dari titik-titik pantau harus dikirimkan secara *realtime* ke pusat pemantau untuk di proses bersamaan dengan data pengamatan *GPS* di pusat pemantau. Berikut ini adalah ilustrasi pemantauan deformasi gunung api dengan menggunakan *GPS*.



Gambar 2.14 Pemantauan Gunung Api dengan Menggunakan *GPS* Secara Kontinyu (Abidin, 2007)

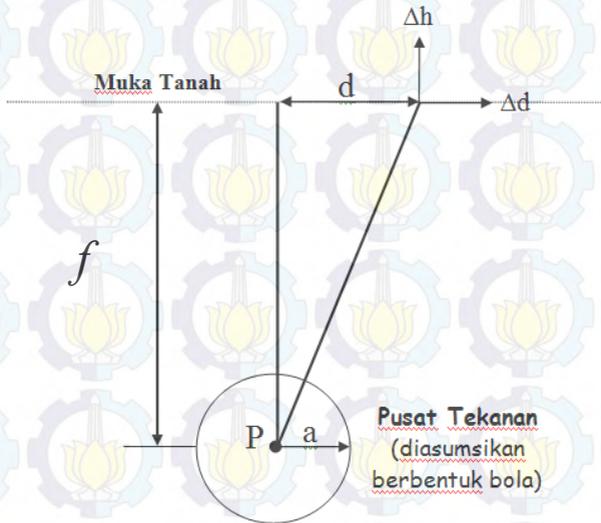
Dengan melakukan pemantauan deformasi gunung api yang berada dalam suatu wilayah secara sekaligus, maka karakteristik korelasi antar deformasi pada gunung-gunung api tersebut dapat dipelajari dan selanjutnya dapat digunakan untuk meningkatkan pemahaman kita tentang aktivitas vulkanik di wilayah-wilayah gunung api tersebut secara menyeluruh.

2.6 Penentuan Lokasi Sumber Tekanan (Model Mogi)

Deformasi yang terukur di permukaan yang disebabkan oleh aktivitas internal gunung berapi dapat memberikan informasi mengenai lokasi kantong maupun dapur magma. Pada sebagian besar gunung api yang ada di dunia, data-data deformasi memberikan nilai yang penting dalam meninjau aspek-aspek umum guna kepentingan prediksi letusan yang akan terjadi selanjutnya. Seorang ilmuwan Jepang bernama Kiyoo Mogi, melalui publikasinya di tahun 1958 menandai dimulainya era modern pada studi deformasi gunung berapi. Lewat model yang dikembangkannya (*Mogi's model*), deformasi yang diamati dapat terjadi di permukaan merupakan hasil dari adanya peningkatan tekanan (*pressure*) dari sebuah sumber kecil, *spherical* (bola) di dalam ruangan elastic tak berhingga yang berbentuk setengah ruang (*half space*). Model yang dikembangkan ini juga mensimulasikan efek dari peningkatan tekanan magma di dalam dapur magma yang terpendam jauh di dalam sebelum terjadi letusan. Pengembangan model Mogi sejauh ini telah mempertimbangkan pengaruh dari topografi dalam tiga dimensi dan pengaruh bentuk dapur magma yang *nonspherical* dan *non axisymmetrical*. Volum inflasi maupun amblesan yang terukur di suatu permukaan sangat terkait dengan suplai atau berkurangnya volum magma dalam suatu kantong ataupun dapur magma. Dalam perkembangannya, beberapa penelitian memodifikasi geometri sumber tekanan seperti geometri bola, *ellips* dalam sistem yang tertutup maupun terbuka (Dzurisin, 2007 dalam Bahlefi, 2013). Dengan mengasumsi bahwa kerak bumi tersusun atas ruang yang elastis (*elastic half space*), maka sumber deformasinya adalah sebuah bentuk kecil berbentuk *spherical* dengan perluasan bersifat radial (*radial expansion*) dan memberikan tekanan hidrostatik ke batuan di sekitarnya.

Dalam penelitian ini, pengukuran menggunakan model Mogi secara umum untuk mendapatkan gambaran model sumber tekanan (*pressure source model*) dari deformasi yang

diamati dipermukaan menggunakan perangkat *GPS*. Deformasi permukaan yang terukur oleh *GPS* diturunkan menjadi bentuk vektor pergeseran yang mewakili deformasi yang terjadi di tubuh *volcano* dan daerah sekitarnya. Dengan mengasumsikan bahwa kerak bumi tersusun atas ruang yang elastis (*elastic half space*), maka sumber deformasinya adalah sebuah titik kecil berbentuk *spherical* dengan perluasan bersifat radial (*radial expansion*) dan memberikan tekanan hidrostatik ke batuan di sekitarnya. Model Mogi secara umum ditunjukkan oleh gambaran dan formula berikut :



Gambar 2.15 Model Mogi Untuk Penentuan Sumber Tekanan Magma

Model Mogi secara umum ditunjukkan oleh gambaran dan formula berikut:

$$\Delta d = \frac{a^3 \Delta P}{(4/3)\mu (f^2 + d^2)^{3/2}} \quad \dots(2.3)$$

$$\Delta h = \frac{a^3 \Delta P}{(4/3)\mu} \frac{f}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \dots(2.4)$$

Keterangan:

Δd : Perubahan horisontal (*Horizontal Displacement*)

Δh : Perubahan vertikal (*Vertical Displacement*)

d : Jarak antara stasiun pemantauan terhadap *crater*

a : Jari-jari sumber tekanan

f : kedalaman sumber tekanan

ΔP : Tekanan hidrostatik

μ : Rigiditas medium

2.6.1 Penentuan Lokasi Sumber Tekanan Dan Volum Suplai Magma

Estimasi lokasi sumber tekanan dan volume suplai dari beberapa konsep model menghasilkan nilai yang hampir sama, walaupun model geometri sumber tekanan berbeda (Dieterich and Decker, 1975 dalam Bahlefi, 2013). Estimasi dengan menggunakan model inversi dibutuhkan sampai memperoleh pendekatan terbaik, yaitu melalui linierisasi fungsi non linier. Metoda *Grid Search* digunakan untuk penentuan lokasi sumber tekanan, yaitu ditentukan pada saat diperoleh nilai residual terkecil antara pergeseran horisontal observasi dan teoritis atau model.

Mengacu persamaan 2.3 dan 2.4 dengan mengambil nilai k sebagai nilai intensitas yang mewakili besarnya jari-jari dan tekanan hidrostatik serta korelasinya terhadap rigiditas medium. Penyederhanaan kedua persamaan tersebut, sehingga menjadi persamaan 2.5 dan 2.6 dengan keterangan notasi seperti pada persamaan

$$\Delta d = k \frac{d}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \quad \dots(2.5)$$

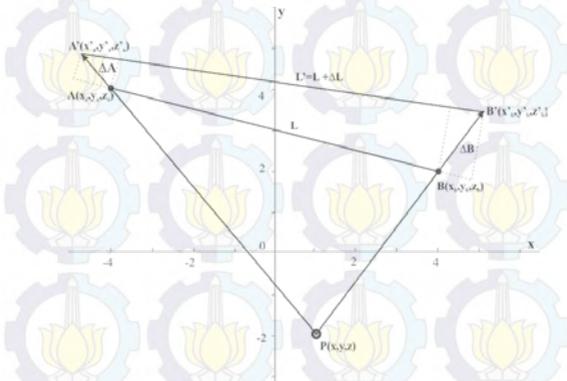
$$\Delta h = k \frac{f}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \quad \dots(2.6)$$

$$k = \frac{3a^3 \Delta P}{4\mu} \quad \dots(2.7)$$

Keterangan :

k : Nilai intensitas

Skema perubahan posisi dua buah titik pengamatan $A(x_a, y_a, z_a)$ dan $B(x_b, y_b, z_b)$ akibat adanya tekanan pada $P(x, y, z)$ ditunjukkan pada Gambar 2.16. Perubahan posisi tersebut $A'(x'_a, y'_a, z'_a)$ dan $B'(x'_b, y'_b, z'_b)$ menyebabkan perubahan jarak miring di antara kedua titik dari L menjadi L' sebesar ΔL .



Gambar 2. 16 Skema Perubahan Jarak Miring Akibat (Iguchi, 2011)

Jarak horisontal suatu stasiun navigasi B (Gambar 2.16) terhadap sumber tekanan yang terletak di (x, y, z) digambarkan dalam persamaan 2.8. Pergeseran pada stasiun B merupakan nilai pergeseran relatif terhadap stasiun referensi, sebagai contoh pada Gambar 2.16 adalah A . Diakibatkan oleh data observasi dengan metoda *GPS* memberikan akurasi yang lebih presisi pada komponen horisontal, maka digunakan nilai pergeseran horisontal dan mengabaikan pergeseran vertikal. Selanjutnya melalui persamaan 2.8 dan 2.9, pergeseran horisontal dapat dihitung secara teoritis. Dalam hal ini posisi sumber tekanan diasumsikan di bawah *crater*.

$$d = \sqrt{(x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2} \quad \dots(2.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta d_{teoritis,b} &= \Delta d_b - \Delta d_a \quad \dots(2.9) \\ &= k \left[\frac{d_b}{(d_b^2 + f^2)^{3/2}} e_b - \frac{d_a}{(d_a^2 + f^2)^{3/2}} e_a \right] \end{aligned}$$

Keterangan:

d : Jarak antara stasiun navigasi terhadap terhadap *crater*

d_b : Jarak antara stasiun navigasi B terhadap terhadap *crater*

d_a : Jarak antara stasiun referensi A terhadap terhadap *crater*

f : kedalaman sumber tekanan

x_b, y_b : Posisi bujur dan lintang stasiun navigasi

x_s, y_s : Posisi bujur dan lintang *crater*

x_a, y_a : Posisi bujur dan lintang stasiun referensi

e_b, e_a : Vektor satuan dari sumber ke stasiun navigasi B dan stasiun referensi A

Δd_a : Pergeseran horisontal di stasiun referensi

Δd_b : Pergeseran horisontal di stasiun navigasi B

$\Delta d_{teoritis,b}$: Pergeseran horisontal teoritis di stasiun navigasi B

Apabila stasiun referensi A diasumsikan tidak bergerak, maka nilai pergeserannya di stasiun A adalah nol. Pergeseran horisontal teoritis memiliki dua komponen yaitu pergeseran horisontal komponen Timur Barat (Bujur) dinotasikan $\Delta d_{x,i}$ dan pergeseran horisontal komponen Utara Selatan (Lintang) dinotasikan $\Delta d_{y,i}$. Nilai kuadrat selisih pergeseran horisontal teoritis dan observasi dinotasikan dengan Rs , memenuhi persamaan 2.11. Metoda *Grid Search* dilakukan dengan memberikan variasi nilai intensitas k dan lokasi sumber (x_s, y_s, f) sampai dengan diperoleh nilai residual Rs terkecil.

$$Rs = \sqrt{\sum_{i=1}^N Rs_{x,i}^2 + \sum_{i=1}^N Rs_{y,i}^2} \dots (2.11)$$

dengan,

$$Rs_{x,i} = \Delta d_{x(observasi,i)} - \Delta d_{x(teoritis,i)}$$

$$Rs_{y,i} = \Delta d_{y(observasi,i)} - \Delta d_{y(teoritis,i)}$$

Keterangan:

Rs : Nilai Residual antara pergeseran horisontal teoritis dan observasi

$Rs_{x,i}$: Nilai Residual pergeseran horisontal komponen Timur Barat pada iterasi ke i

$Rs_{y,i}$: Nilai Residual pergeseran horisontal komponen Utara Selatan pada iterasi ke i

$\Delta d_{x(\text{observasi},i)}$: Pergeseran horisontal observasi komponen

Timur Barat

$\Delta d_{y(\text{observasi},i)}$: Pergeseran horisontal observasi komponen

Utara Selatan

$\Delta d_{x(\text{teoritis},i)}$: Pergeseran horisontal teoritis komponen

Timur Barat

$\Delta d_{y(\text{teoritis},i)}$: Pergeseran horisontal teoritis komponen Utara

Selatan

Model matematis mengenai estimasi lokasi sumber dan volume suplai magma telah berkembang pesat. Proses aliran magma ke permukaan yang terakumulasi dalam dapur atau kantong magma menginteraksi batuan disekitarnya. Pola deformasi yang terukur di permukaan terkait dengan proses vulkanis yang ditransmisikan ke permukaan melalui properti mekanik batuan. Observasi deformasi permukaan dapat digunakan untuk memprediksi model sumber tekanan. Pemodelan tersebut, bagaimanapun, tidak dapat memberikan gambaran berupa nilai yang unik mengenai sumber tekanan penyebab deformasi. Model selalu menggunakan beberapa asumsi untuk menyederhanakan kompleksitas parameter yang terkait. Akan tetapi banyak yang dapat diinterpretasikan dan dipelajari dari ketidakunikan suatu model (Dzurusin, 2007 dalam Bahlefi, 2013). Berkembangnya pemodelan estimasi sumber tekanan menghasilkan beberapa model dengan konsep geometri sumber yang bervariasi.

2.7 Uji Statistik

Dalam melakukan uji hipotesis, ada banyak faktor yang menentukan, seperti apakah sampel yang diambil berjumlah banyak atau hanya sedikit; apakah standar deviasi populasi diketahui; apakah varians populasi diketahui (Bukhori, 2011);

metode parametrik apakah yang dipakai, dan seterusnya. Langkah-langkah untuk menguji suatu hipotesis adalah:

1. Menentukan hipotesa nol (H_0) dan hipotesa alternatif. H_0 merupakan hipotesis nilai para meter dengan dibandingkan dengan hasil perhitungan dari sampel. H_0 ditolak hanya jika hasil perhitungan dari sampel tidak mungkin memiliki kebenaran terhadap hipotesis yang ditentukan terjadi. H_a diterima jika H_0 ditolak.
2. Menentukan tingkat signifikansi yang digunakan. Tingkat signifikansi merupakan standar statistik yang digunakan untuk menolak H_0 . Jika ditentukan tingkat signifikansi 5% ($\alpha = 0.05$). H_0 ditolak hanya jika hasil perhitungan dari sampel sedemikian berbeda dengan nilai dugaan(yang dihipotesakan).
3. Memilih uji statistik.
4. Menentukan statistik tabel. Nilai statistik tabel dipengaruhi oleh:
 - a. Tingkat kepercayaan
 - b. derajat kebebasan
 - c. jumlah sampel yang didapat.
5. Menentukan statistik hitung
6. Mengambil keputusan

Uji-t termasuk dalam golongan statistika parametrik. Statistik uji ini digunakan dalam pengujian hipotesis. Uji-t digunakan ketika informasi mengenai nilai variance (ragam) populasi tidak diketahui. Asumsi pengambilan uji t pada penelitian ini antara lain:

1. Datanya berdistribusi normal.
2. Data kurang dari 30 sampel.
3. Kedua kelompok data dependen (berpasangan).
4. Variabel yang dihubungkan berbentuk numerik dan kategorik (dengan hanya 2 kelompok).

Untuk menguji kebenaran nilai penurunan yang didapatkan, dilakukan uji dengan menggunakan *general linear hypothesis*. Uji hipotesa tersebut antara lain:

Hipotesa nol : $H_0 : \Delta H_{i,j} = 0$

Hipotesa tandingan : $H_a : \Delta H_{i,j} \neq 0$

Uji statistik : $t = \frac{\Delta dh_{ij}}{\hat{\sigma}(\Delta dh_{ij})}$

H_0 = titik tidak mengalami penurunan

H_1 = titik mengalami penurunan

Uji statistik dilakukan dengan *student-t test*, hipotesa nol akan ditolak bila

$$|t| > t_{df, \alpha/2}$$

Dimana df merupakan derajat kebebasan, dan α adalah derajat kesalahan.

H_0 diterima, jika $t_{hitung} > t_{tabel}$

H_0 ditolak, jika $t_{hitung} \leq t_{tabel}$

Dari uji tersebut, H_0 diterima jika nilai t hitung lebih kecil dari pada nilai distribusi t pada tabel sehingga dari pernyataan ini, titik tersebut tidak mengalami penurunan maupun kenaikan. H_0 ditolak jika nilai uji t lebih besar dari nilai distribusi t pada tabel sehingga dari pernyataan ini, titik tersebut mengalami penurunan ataupun kenaikan.



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak di kawasan Gunung Merapi, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. Area studi ini terletak di posisi geografis Lintang $7^{\circ}32'5''S$;Bujur $110^{\circ}26'5''E$. Lereng sisi selatan berada dalam administrasi Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan sisanya berada dalam wilayah Provinsi Jawa Tengah, yaitu Kabupaten Magelang di sisi barat, Kabupaten Boyolali di sisi utara dan timur,serta Kabupaten Klaten di sisi tenggara. Gunung merapi memiliki ketinggian 2.968 m dpl, (per 2006).



Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian (BIG,2014)

Tabel 3. 1 Lokasi Data Pengamatan GPS
(BPPTKG, 2014)

No	Stasiun	Lokasi
1	BTK	BPPTKG, Yogyakarta
2	DELS	Deles, Klaten
3	GRWH	Grawah, Boyolali
4	KLAT	Klatakan, Magelang

3.2. Data dan Peralatan

3.2.1 Data

1. Data *RINEX*

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah data pengamatan *GPS* berupa data *RINEX* pada bulan September tahun 2013 sampai Maret tahun 2014. Data tersimpan setiap jam dalam format Rinex dengan sampling pengukuran tiap 1 detik. Data *GPS* bersumber dari hasil pemantauan online. Data pengamatan *GPS* diunduh di Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) Yogyakarta. Data pengamatan yang digunakan adalah data pengamatan *GPS* BTK, *GPS* DELS, *GPS* GRWH, *GPS* KLAT.

Tabel 3. 2 Lokasi Data Pengamatan GPS
(BPPTKG, 2014)

No	Stasiun	Lokasi
1	BTK	BPPTKG, Yogyakarta
2	DELS	Deles, Klaten
3	GRWH	Grawah, Boyolali
4	KLAT	Klatakan, Magelang



Gambar 3.2 Lokasi stasiun pemantaun GPS di Gunung Merapi

2. Ada 3 *file* data tambahan yaitu : *file* gelombang pasang surut (otl_FES2004.grd), *file* atmosfer (atmdisp_YYYY), *file* pemodelan cuaca (vmf1grd.YYYY) dapat yang diunduh melalui <ftp://everest.mit.edu/pub/GRIDS/>.
3. Data sekunder yang dibutuhkan saat pengolahan akan diunduh otomatis oleh *software* GAMIT/GLOBK

3.2.2 Peralatan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu :

1. *Hardware*
 - a. Stasiun GPS Online

- b. Laptop *HP*
- c. Laptop *Lenovo Ideapad*
- d. Laptop *Acer 4750G*

2. Software

Software yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. Sistem Operasi *Linux Ubuntu 12.04* dan *Windows 7*.
- b. Leica Geo Office 8.1

Software ini digunakan untuk menggabungkan data *RINEX* yang tersimpan setiap 1 jam menjadi data *RINEX* yang tersimpan setiap 1 hari.

- c. Software *GAMIT* dan *GLOBK*

GAMIT (GPS Analysis Package Developed at MIT) adalah sebuah paket perangkat lunak ilmiah untuk pengolahan data pengamatan GPS yang dikembangkan oleh MIT (Massachusetts Institute of Technology) dan SIO (Scripps Institution of Oceanography). Perangkat lunak ini dapat menghasilkan posisi relatif tiga dimensi dari pengamat dengan tingkat ketelitian tinggi karena data yang digunakan selain data broadcast ephemeris, juga digunakan data precise ephemeris. *GLOBK* adalah satu paket program yang dapat mengkombinasikan hasil pemrosesan data survei terestris ataupun data survei ekstra terestris. Data input pada *GLOBK* adalah matriks kovarian dari koordinat stasiun, parameter rotasi bumi, parameter orbit, dan koordinat hasil pengamatan lapangan. Ada tiga fungsi yang biasa dilakukan dalam menggunakan *GLOBK* (*GLOBK reference manual, 2011*), yaitu:

1. Mengkombinasikan hasil pengolahan individual (misal: harian) untuk menghasilkan koordinat stasiun rata-rata dari pengamatan yang dilakukan lebih dari satu hari.
2. Melakukan estimasi koordinat stasiun dari pengamatan individual, yang digunakan untuk

menggeneralisasikan data runtut waktu (*time series*) dari pengamatan teliti harian atau tahunan.

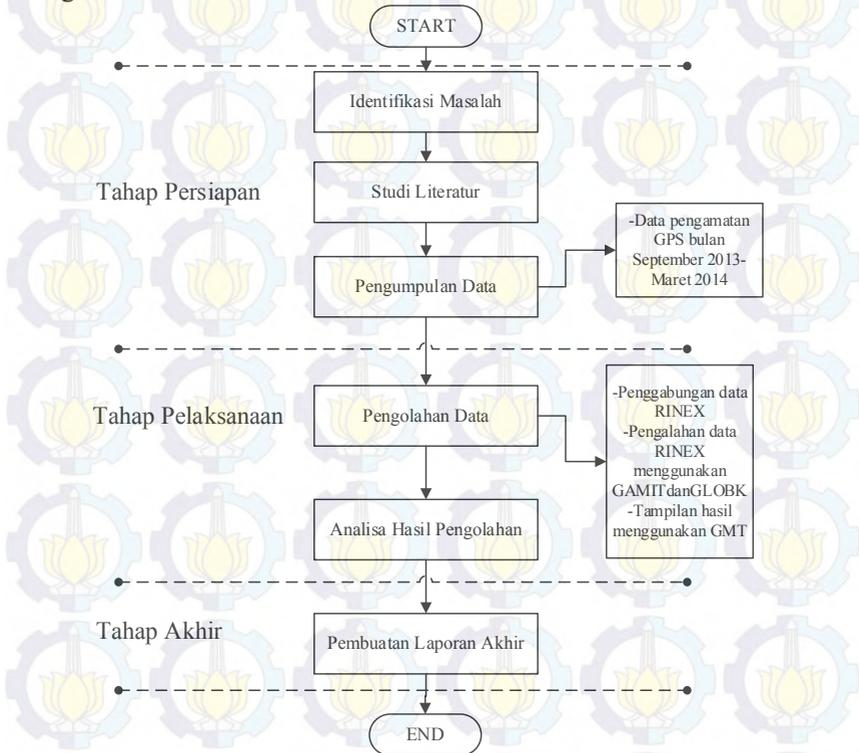
3. Mengkombinasikan sesi pengamatan individu dengan koordinat stasiun dianggap stokastik. Hasilnya adalah *coordinate repeatabilities* untuk mengevaluasi tingkat presisi pengukuran harian atau tahunan.

d. *Software GMT*

GMT (Generic Mapping Tools), digunakan untuk plotting data grafik koordinat lokal time series dari hasil pengolahan yang secara otomatis terintegrasi dengan dengan perangkat lunak GAMIT/GLOBK dan perhitungan kecepatan (*velocity*) pergeseran secara time series. Perangkat lunak ini diunduh dari <ftp://ftp.soest.hawaii.edu/gmt>.

3.3 Tahapan Penelitian

Secara garis besar tahapan dari penelitian ini tertuang dalam diagram alir berikut :



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

Penjelasan dari diagram alir di atas dijabarkan di bawah ini:

1. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana menganalisa perubahan deformasi dan kecepatan pergeseran dari titik-titik pemantauan deformasi.

2. Studi Literatur

Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan referensi yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur yang dilakukan meliputi:

- Pengkajian metode-metode pemantauan deformasi Gunung Api
- Pengkajian mengenai isu dan permasalahan terkait mengenai lokasi wilayah penelitian
- Studi literatur mengenai analisa deformasi dan kecepatan pergeseran titik-titik pemantaun deformasi menggunakan *GPS*.

3. Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan semua data yang diperlukan untuk penelitian. Data diperoleh dari hasil pemantaun menggunakan *GPS* di stasiun-stasiun pemantauan secara kontinyu oleh BPPTKG pada bulan September tahun 2013 sampai dengan bulan Maret tahun 2014.

4. Pengolahan Data

Pada tahapan ini, data yang sudah dikumpulkan kemudian diproses dengan menggunakan *software* pengolah data *GPS* yaitu LGO untuk penggabungan data *RINEX*, *GAMIT* dan *GLOBK* untuk pengolahan data *RINEX* dan *GMT* untuk menampilkan hasil pengolahan. Prediksi sumber tekanan magma menggunakan model Mogi.

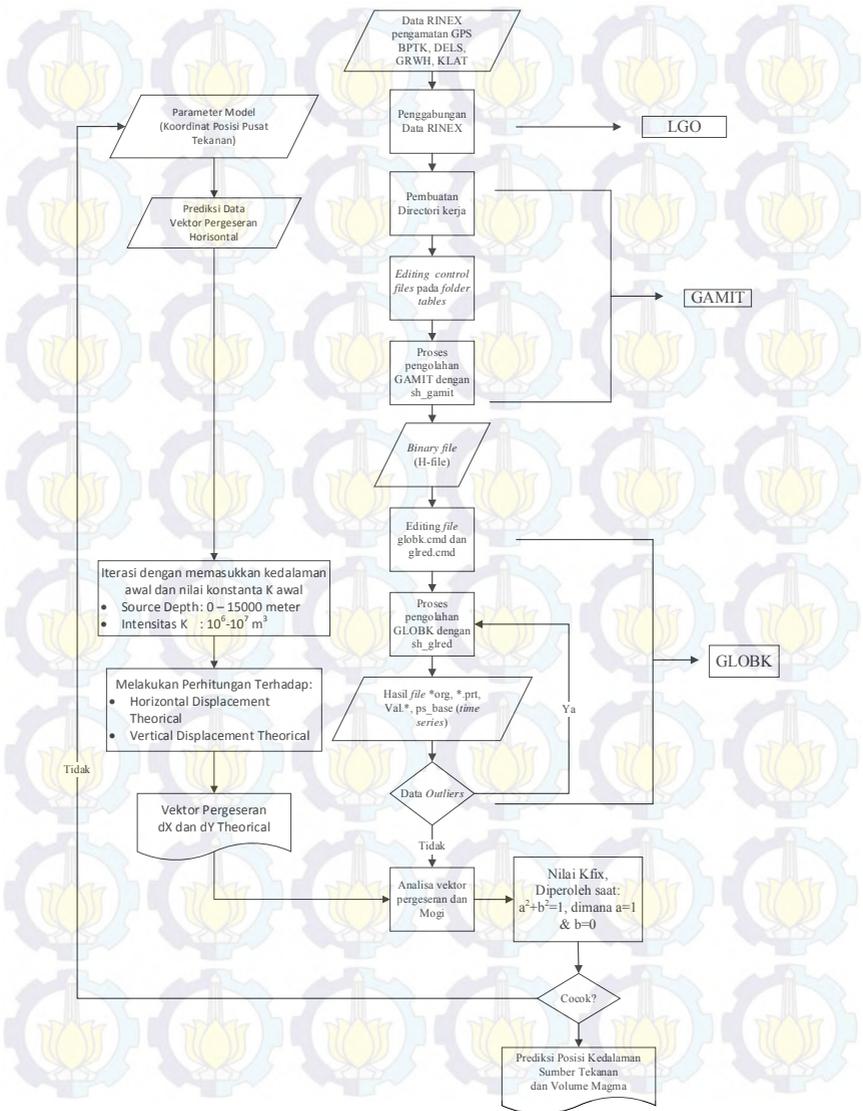
5. Analisa Hasil Pengolahan

Setelah data selesai diolah, maka akan dilakukan analisa terhadap hasil pengolahan. Pada tahap ini, hasil dari pengolahan akan dialisa perubahan dan kecepatan pergeseran deformasinya dari waktu ke waktu.

6. Pembuatan Laporan Akhir

Tahapan ini merupakan tahap akhir dari penelitian yang dilakukan.

3.4 Tahapan Pengolahan Data



Gambar 3.4 Diagram Alir Pengolahan Data

1. Pengumpulan Data

Download data *RINEX* dari pusat data di kantor BPPTKG Yogyakarta.

2. Penggabungan data *RINEX*

Data *RINEX* yang diperoleh berupa data pengamatan per-jam, untuk mendapatkan data *RINEX* dalam 1 hari (*Day of Year*)

maka dilakukan penggabungan menggunakan *software Leica Geo Office 8.1*.

3. Pembuatan Direktori Kerja

Direktori kerja untuk pengolahan data dengan *GAMIT* dibuat di bawah direktori proses yang terletak di bawah direktori *HOME* (~). Direktori *HOME* berada pada */Users/user*.

Penelitian ini menggunakan rentang waktu selama 1 tahun oleh sebab itu dalam pengolahannya digunakan *automatic batch processing* untuk mempercepat dan memudahkan dalam pengolahan. Direktori kerja diatur sesuai dengan standar pengolahan dengan *automatic batch processing* dimana direktori kerja berisi folder .

4. *Editing control files* pada *folder tables*

Control Files pada *folder tables* merupakan *link* dari *folder tables* pada *software GAMIT/GLOBK* saat menjalankan perintah *sh_setup -yr 2013*. *Control files* yang perlu di-edit adalah :

1. *File *.apr*, berisi koordinat pendekatan dari masing-masing stasiun pengamatan yang digunakan pada saat proses *GLOBK*.
2. *File lfile*, berisi koordinat pendekatan dari stasiun pengamatan global. Koordinat dari stasiun BPTK, DELS, GRWH, KLAT didapatkan data apriori dari masing-masing *RINEX*-nya.

3. *File station.info*. *File station.info* berisi informasi tentang stasiun titik yang diolah diantaranya *receiver type*, *antenna type*, informasi waktu (*session start* dan *session stop*). *Receiver type* digunakan untuk memasukkan kode *receiver* yang digunakan, dan *antenna type* digunakan untuk memasukkan kode dari tipe antena. Informasi pada antena yaitu *Ant Ht* digunakan untuk memasukkan tinggi antena, *HtCod* digunakan untuk kode menentukan pusat fase (sesuai dengan antena).
4. *File sittbl*. *file* ini digunakan untuk memasukkan *constraint* dari setiap stasiun yang diolah dengan menggunakan perangkat lunak GAMIT. *File* ini sudah berisi dengan nilai *constraint* untuk stasiun global yang dapat digunakan sebagai titik ikat.
5. *File sestbl*. *file sestbl* merupakan *file* skenario yang digunakan untuk pengolahan. Bagian yang diedit adalah pada *choice of experiment*.
6. *File sites.defaults*, adalah *file* yang digunakan dalam *automatic batch processing*. *File* ini digunakan untuk mengontrol penggunaan stasiun dalam pengolahan dengan GAMIT dan GLOBK. Pengisian *file* ini berisi nama dari stasiun yang digunakan dalam pengolahan.
7. *File process.defaults*, *control file* ini digunakan untuk menentukan lokasi direktori yang digunakan pada *automatic batch processing*. *File* ini juga digunakan untuk menentukan *file* navigasi yang digunakan serta *apr file* yang digunakan pada GLOBK.
8. *File* gelombang pasang surut (*otl_FES2004.grd*), *file* atmosfer (*atmdisp_YYYY*), *file* pemodelan cuaca (*vmfl.grd.YYYY*) merupakan *file* penunjang.

5. Pengolahan menggunakan *GAMIT*

Untuk menjalankan pengolahan *GAMIT* dengan *automatic batch processing* dengan menjalankan perintah berikut ini pada direktori kerja.

```
sh_gamit -s yyyy ddd1 ddd2 -expt <expt> -nogifs >
sh_gamit.log &
```

Keterangan :

yyyy = tahun data yang diolah

ddd₁ = DOY awal data yang diolah

ddd₂ = DOY akhir data yang diolah

expt = nama *experiment* yang sudah ditentukan pada *sites.defaults*.

Hasil yang didapat dari pengolahan *GAMIT* adalah *folder* sebanyak DOY yang diolah. Setiap *folder* DOY terdapat H-file hasil pengolahan *GAMIT* yang memiliki nama dengan pola h[expt]a.yydd, dimana [expt] adalah nama *experiment*, yy adalah dua angka terakhir pada tahun, dan ddd adalah DOY dari data yang diolah.

6. *Editing file globk_comb.cmd dan glorg_comb.cmd.*

Sebelum masuk ke pengolahan *GLOBK*, hal yang dilakukan adalah *Editing file globk_comb.cmd dan glorg_comb.cmd*, yang dapat dicopy dari folder ~/gg/tables, kemudian *file* tersebut ditempatkan di *folder* gsoln pada *project* 2013. Untuk mendapatkan output koordinat UTM dan koordinat Geodetis, maka pada di *edit* dengan prt_opt GDLF CMDS GEOD UTM, Untuk mendapatkan output panjang *baseline* pada org_opt diedit dengan PSUM CMDS GDLF BLEN.

7. Pengolahan menggunakan *GLOBK*

Selanjutnya menjalankan pengolahan *GLOBK* untuk menghasilkan kecepatan pergeseran secara *time series*.

```
sh_glred -s YYYY1 DDD1 YYYY2 DDD2 -expt NNNN -
opt H G E
```

Keterangan :

YYYY ₁	= Tahun awal data yang diolah
DDD ₁	= Hari akhir data yang diolah
YYYY ₂	= Tahun akhir data yang diolah
DDD ₂	= Hari akhir data yang diolah
Expt	= nama <i>experiment</i> yang sudah ditentukan pada sites.defaults.
H	= memindah h-file kedalam direktori glbf
G	= membentuk file ekstensi .gdl pada setiap harinya kedalam direktori gsoln
E	= <i>plotting time series</i>

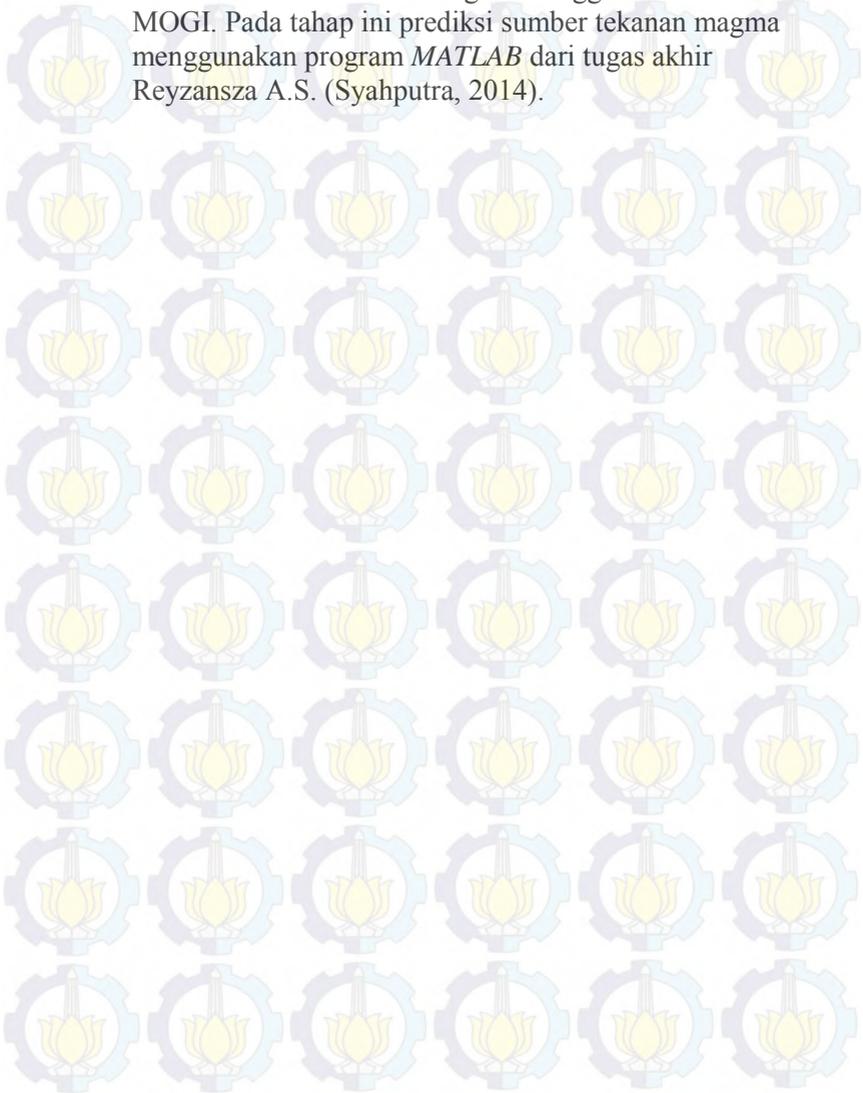
Hasil dari menjalankan GLOBK ini adalah *file* dengan ekstensi .prt dan .org berisi nilai koordinat sistem kartesian 3D (X, Y, Z), sistem koordinat lokal dalam easting (E), northing (N), dan up (U), koordinat geodetis (Lintang, Bujur, Tinggi); dan koordinat UTM (UTM N, UTM E, dan UTM U) dari tiap stasiun yang terdapat pada H-*file*. Kemudian *file plotting time series* dari *software* GMT dengan pola *file* pbase_[expt].[GNSS], dimana [expt] adalah nama *experiment*, dan GPS adalah nama stasiun GPS yang diolah. Setelah itu terdapat *file* yang berisi tentang koordinat lokal toposentris (*easting, northing, up*) dengan pola nama VAL.[expt], [expt] adalah nama *experiment*.

8. Deteksi data *Outlier*

Outliers adalah data yang menyimpang terlalu jauh dari data lainnya dalam suatu rangkaian data. Agar analisis dari hasil tidak menjadi bias atau tidak sesuai dengan sebenarnya, maka perlu dihilangkan. Data dapat dilihat di *file* Val.<expt>, <expt> adalah nama *experiment*. Kemudian dilakukan dengan cara pengolahan ulang dengan melakukan proses pengolahan GLOBK kembali dengan tidak mengikutsertakan data *folder* DOY yang ter-*outliers*.

9. Prediksi sumber tekanan

Prediksi sumber tekanan magma menggunakan model MOGI. Pada tahap ini prediksi sumber tekanan magma menggunakan program *MATLAB* dari tugas akhir Reyzansza A.S. (Syahputra, 2014).





“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengolahan Data GPS

4.1.1 Pengolahan GAMIT

Pengolahan data *GPS* menggunakan *GAMIT* untuk mendapatkan *folder* sebanyak *DOY* yang diolah. Setiap *folder* *DOY* terdapat H-file hasil pengolahan *GAMIT* yang memiliki nama dengan pola $h[\text{expt}]a.yyddd$, dimana $[\text{expt}]$ adalah nama *experiment*, yy adalah dua angka terakhir pada tahun, dan ddd adalah *DOY* dari data yang diolah.

Berikut adalah langkah-langkah pengolahan menggunakan *GAMIT* :

1. *Editing control files* pada *folder tables*

Control Files pada *folder tables* merupakan *link* dari *folder tables* pada *software GAMIT/GLOBK* saat menjalankan perintah *sh_setup -yr 2013*. *Control files* yang perlu di-edit adalah :

1. *File *.apr*, berisi koordinat pendekatan dari masing-masing stasiun pengamatan yang didapat dari data apriori dari masing-masing *RINEX*-nya untuk digunakan pada saat proses *GLOBK*.
2. *File lfile*, berisi koordinat pendekatan dari stasiun pengamatan global. Koordinat dari stasiun *BPTK*, *DELS*, *GRWH*, *KLAT* didapatkan data apriori dari masing-masing *RINEX*-nya.
3. *File station.info*. *File station.info* berisi informasi tentang stasiun titik yang diolah diantaranya *receiver type*, *antenna type*, informasi waktu (*session start* dan *session stop*). *Receiver type* digunakan untuk memasukkan kode *receiver* yang digunakan, dan *antenna type* digunakan untuk memasukkan kode dari tipe antena. Informasi pada antena yaitu *Ant Ht*

digunakan untuk memasukkan tinggi antenna, HtCod digunakan untuk kode menentukan pusat fase (sesuai dengan antenna).

4. *File* sittbl. *file* ini digunakan untuk memasukkan *constraint* dari setiap stasiun yang diolah dengan menggunakan perangkat lunak GAMIT. *File* ini sudah berisi dengan nilai *constraint* untuk stasiun global yang dapat digunakan sebagai titik ikat.
 5. *File* sestbl. *file* sestbl merupakan *file* skenario yang digunakan untuk pengolahan. Bagian yang diedit adalah pada *choice of experiment*. Untuk *Base* local menggunakan BASELINE.
 6. *File* sites.defaults, adalah *file* yang digunakan dalam *automatic batch processing*. *File* ini digunakan untuk mengontrol penggunaan stasiun dalam pengolahan dengan GAMIT dan GLOBK. Pengisian *file* ini berisi nama dari stasiun yang digunakan dalam pengolahan.
 7. *File* process.defaults, *control file* ini digunakan untuk menentukan lokasi direktori yang digunakan pada *automatic batch processing*. *File* ini juga digunakan untuk menentukan *file* navigasi yang digunakan serta *apr file* yang digunakan pada GLOBK.
 8. *File* gelombang pasang surut (otl_FES2004.grd), *file* atmosfer (atmdisp_YYYY), *file* pemodelan cuaca (vmfl.grd.YYYY) merupakan *file* penunjang.
2. Setelah *Editing Control File*, selanjutnya untuk menjalankan pengolahan GAMIT dengan *automatic batch processing* dengan menjalankan perintah berikut ini pada direktori kerja.

```
sh_gamit -s yyyy ddd1 ddd2 -expt <expt> -nogifs >  
sh_gamit.log &
```

Keterangan :

yyyy = tahun data yang diolah
 ddd₁ = DOY awal data yang diolah
 ddd₂ = DOY akhir data yang diolah
 expt = nama *experiment* yang sudah ditentukan pada *sites.defaults*.
 nogifs = tidak menggunakan dile *gifs*

Hasil yang didapat dari pengolahan *GAMIT* adalah *folder* sebanyak DOY yang diolah. Setiap *folder* DOY terdapat H-file hasil pengolahan *GAMIT* yang memiliki nama dengan pola *h[expt]a.yyddd*, dimana *[expt]* adalah nama *experiment*, *yy* adalah dua angka terakhir pada tahun, dan *ddd* adalah DOY dari data yang diolah.

```
GAMIT H-file Version 2.0  

Parallel Q-file: qbudia.244  

SOLVE version: 10.46 2013/1/15 10:45 (Linux)  

Running time: 2014/ 5/28 11: 3:40  

Owner: MIT Operator: bptk  

M-file name: mbudia.244  

Datum: geocentric coordinates  

Models: SP E-rot IERS10 11 SE-tide IERS03 15 O-load FES2004E 3  

Atm-load 0 Atm-tide 0 Hydrol-load 0
```

Gambar 4.1 Contoh *file* *hbudia.14244*.

4.1.2 Pengolahan GLOBK

Untuk pengolahan data secara *time series* pada *GLOBK* dengan menggunakan *sh_glred*. *Sh_glred* melakukan pengolahan data setiap harinya yang kemudian diplot sebagai *time series*. Hasil plot dengan menggunakan *sh_glred* dapat diketahui dari folder *gsoln* dengan nama *psbase_[expt].[GPS]*, *expt* adalah nama project, *site* adalah nama stasiun GPS.

Berikut langkah-langkah untuk melakukan proses GLOBK :

1. *Editing file globk_comb.cmd dan glorg_comb.cmd.*

Sebelum masuk ke pengolahan GLOBK, hal yang dilakukan adalah *Editing file globk_comb.cmd* dan *glorg_comb.cmd*, yang dapat dicopy dari folder `~/gg/tables`, kemudian *file* tersebut ditempatkan di *folder gsoln* pada *project 2013*.

```
* GLOBK command file to generate daily time series and to combine
* h-files over 2 to 30 days.
* For combination, set COMB as a globk command-line option to
* invoke the saving of the output h-file
* Last edited by rwk 130701

* << column 1 must be blank if not comment >>

* This group of commands must appear before any others:
srt_file @.srt
srt_dir +1
eq_file ~/gg/tables/itrf08_comb.eq
# Optionally add a second eq_file for analysis-specific renames
* End commands that must appear first

* ITRF2008 augmented by now-defunct sites and recent IGS solutions;
# matched to itrf08_comb.eq
apr_file ~/gg/tables/itrf08_comb.apr
# Optionally add additional apr files for other sites
x ../tables/apr_file regional.apr

* Set maximum chi2, prefit coordinate difference (m), and rotation
(mas) for an h-file to be used;
max_chi1 13 3 100
# increase tolerances to include all files for diagnostics
x max_chi 100 5.0 20000

# Not necessary unless combining h-files with different a priori EOP
in_pmu ../tables/pmu.usno
* Invoke glorg
org_cmd glorg_comb.cmd
* Print file options
prt_opt NOPR
prt_opt NOPR GDLF GEOD UTM
org_opt PSUM CMDS GDLF BLEN
```

Gambar 4. 2 Contoh *file globk_comb.cmd*.

Untuk mendapatkan output koordinat UTM dan koordinat Geodetis, maka pada di *edit* dengan prt_opt GDLF CMDS GEOD UTM, Untuk mendapatkan output panjang *baseline* pada org_opt diedit dengan PSUM CMDS GDLF BLEN.

```
* Glog command file for daily repeatabilities or combinations
* Last edited by rwk 130701

* Parameters to be estimated
  pos_org xtran ytran ztran yrot zrot
# or if translation-only
x pos_org xtran ytran ztran

* Downweight of height relative to horizontal (default is 10)
# Heavy downweight if reference frame robust and heights suspect
x cnd_hgt 1000

* Controls for removing sites from the stabilization
# Vary these to make the stabilization more robust or more precise
stab_it 4 0.8 3.0
x stab_it 4 0.5 4.0

* A priori coordinates
# ITRF2008 may be replaced by an apr file from a priori velocity solution
apr_file ~/gg/tables/itrf08_comb.apr
x apr_file ../tables/regional.apr

* List of stabilization sites
# This should match the well-determined sites in the apr_file
stab_site clear
source ~/gg/tables/igb08_hierarchy.stab_site
x source ../tables/regional_stab_site
```

Gambar 4. 3 Contoh *file glrog_comb.cmd*.

2. Pengolahan menggunakan *GLOBK*

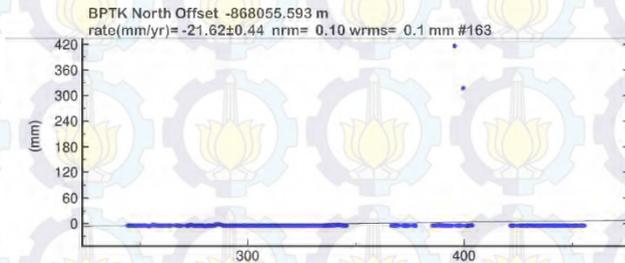
Selanjutnya menjalankan pengolahan *GLOBK* untuk menghasilkan kecepatan pergeseran secara *time series*.

```
sh_glred -s YYYY1 DDD1 YYYY2DDD2 -expt NNNN  
-opt H G E
```

Keterangan :

YYYY₁ = Tahun awal data yang diolah
 DDD₁ = Hari akhir data yang diolah
 YYYY₂ = Tahun akhir data yang diolah
 DDD₂ = Hari akhir data yang diolah
 Expt = nama *experiment* yang sudah ditentukan pada sites.defaults.
 H = memindah h-file kedalam direktori glbf
 G = membentuk file ekstensi .gdl pada setiap harinya kedalam direktori gsoln
 E = *plotting time series*

Berikut gambar 4.4 adalah contoh tampilan dari *plotting time series* dari titik BPTK (psbase_budi.BPTK). File psbase_[expt].[GPS] lainnya dapat dilihat pada lampiran *plotting time series*.



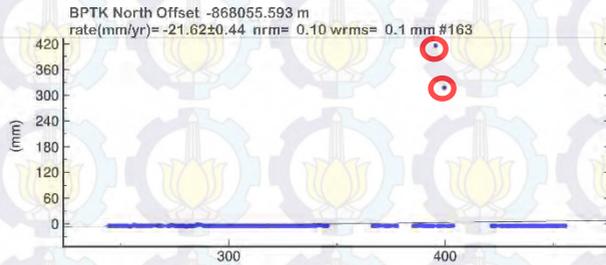
Gambar 4. 4 Contoh *plotting* psbase_budi.BPTK.

Nilai Offset adalah nilai koordinat awal, dan rate (mm/yr) nilai kecepatan pergeseran north. Nilai nrms adalah Normalized Root Mean Square dan nilai wrms adalah Weighted Root Mean Square.

4.2 Deteksi Outliers

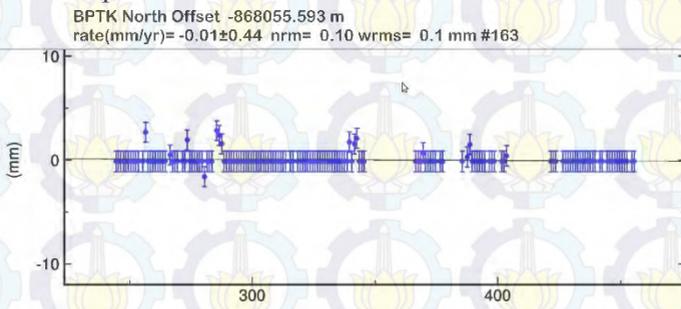
Outliers adalah data yang menyimpang terlalu jauh dari data lainnya dalam suatu rangkaian data. Adanya data outliers ini akan membuat analisis terhadap serangkaian data menjadi bias,

atau tidak mencerminkan fenomena yang sebenarnya. Hasil plotting time series masih terdapat data outliers sehingga perlu dihilangkan. Data yang dihilangkan dengan cara mencari data yang koordinatnya menyimpang terlalu jauh dari data lainnya, kemudian melakukan pengolahan ulang. Data koordinat time series dapat dilihat pada file Val.[expt] dalam folder gsoln.



Gambar 4. 5 Contoh *plotting time series north* stasiun BPTK yang belum dikurangi data *outliers* ,psbase_budi.BPTK.

Gambar 4.5 adalah hasil plotting time series north stasiun BPTK yang belum dikurangi data outliers. Data outliers ditunjukkan pada lingkaran merah. Titik warna biru menunjukkan sebaran koordinat perhari, garis hitam menggambarkan fitting line dari time series, dan garis biru disetiap titik merupakan besar nilai sigma dari tiap koordinat.



Gambar 4. 6 Contoh *plotting time series north* stasiun BPTK yang sudah dikurangi data *outliers* ,psbase_budi.BPTK.

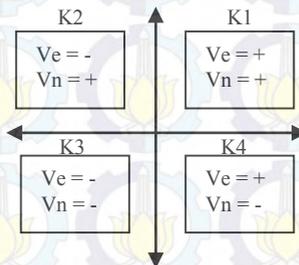
4.3 Kecepatan Vektor Pergeseran

Kecepatan pergeseran adalah besaran yang menyatakan perubahan suatu titik pantau dalam selang waktu tertentu 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 kecepatan pergeseran. Titik acuannya adalah sesi pertama pengamatan masing-masing stasiun, sehingga pergeseran titik yang sama pada sesi selanjutnya mengacu kepada pengamatan sesi pertama. Kecepatan pergeseran dapat di lihat pada *plotting time series* pada *file* pbase_[expt].[GPS] bagian *rate* (mm/yr), atau dapat dilihat

Tabel 4.1 Kecepatan pergeseran pengolahan dengan titik ikat BPTK.

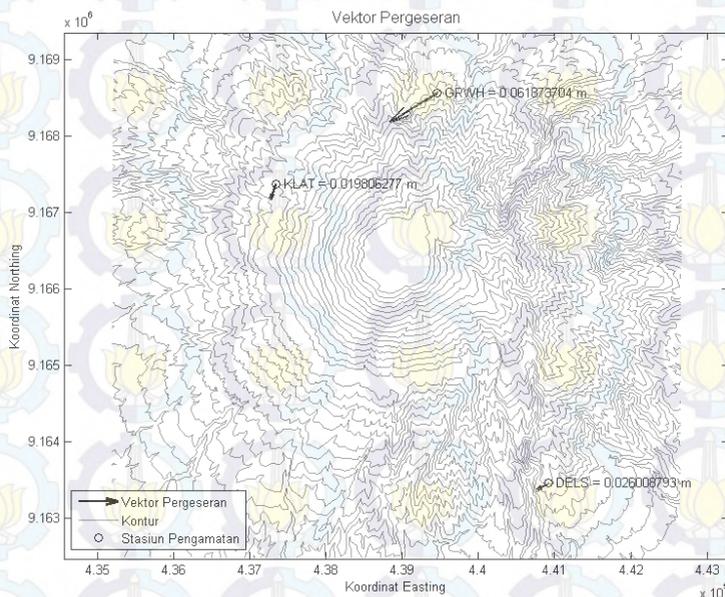
No.	Site	September 2013 – Maret 2014		
		V_e (m/tahun)	V_n (m/tahun)	V_u (m/tahun)
1	DELS	-0.005±0.008	-0.009±0.008	-0.024±0.008
2	GRWH	-0.024±0.011	-0.040±0.011	0.041±0.011
3	KLAT	-0.012±0.005	-0.004±0.005	-0.015±0.005

Dalam penelitian tugas akhir ini, arah dan kecepatan pergeseran 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 4.7 mengenai penentuan arah dan kecepatan pergeseran dibagi dalam 4 kuadran (K).



Gambar 4.7 Arah dan kecepatan pergeseran dalam kuadran.

Hasil *plotting* kecepatan pergeseran (*velocity*) stasiun pengamatan berdasarkan data pengamatan GPS bulan September 2013-Maret 2014 dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB. Gambar 4.8 merupakan *plotting* arah dan kecepatan pergeseran (*velocity*) dari data pengamatan GPS DELS, GRWH, KLAT dengan titik ikat BPTK.



Gambar 4.8 *Plotting* arah dan kecepatan pergeseran.

4.4 Analisis Kecepatan Pergeseran

Gambar 4.8 menunjukkan arah vektor pergeseran (*velocity*) yang menjauh dari pusat tekanan magma diproyeksikan pada permukaan. Kecepatan vektor

pergeseran yang telah dihitung selama satu tahun pengamatan perlu dilakukan uji statistik agar secara kualitatif mengindikasikan baik atau tidaknya hasil pengolahan. Uji statistik ini dilakukan dengan cara menguji variabel pergeseran titik (P_{ij}) dari sesi pengamatan i ke sesi j yang nilainya dapat dihitung menggunakan rumus :

$$P_{ij} = \sqrt{(dn_{ij}^2 + de_{ij}^2)} \dots \dots \dots (4-1)$$

Adapun standar deviasi dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Std P_{ij} = \sqrt{(sd dn_{ij}^2 + sd de_{ij}^2)} \dots \dots \dots (4-2)$$

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

Hipotesis nol $H_0 : P_{ij} = 0$

Hipotesis Alternatif $H_a : P_{ij} \neq 0$

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

$$T = P_{ij}/Std P_{ij} \dots \dots \dots (4-3)$$

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

$$T > tdf, \frac{\alpha}{2} \dots \dots \dots (4-4)$$

Keterangan :

P_{ij} = Pergeseran titik pengamatan

$Std P_{ij}$, $Sd dn_{ij}^2$, $Sd de_{ij}^2$ = Standar deviasi P_{ij} , standar deviasi komponen n dan e

T = Besaran yang menunjukkan signifikansi pergeseran

df = Derajat kebebasan

α = Level signifikan yang digunakan

df diasumsikan tak terhingga karena data yang diamati sangat banyak, oleh karena itu digunakan tabel *t-distribution* dengan selang kepercayaan 95 % sehingga nilai $T > tdf, \frac{\alpha}{2}$ adalah 1,960. Tabel berikut menunjukkan terjadi pergeseran di semua stasiun pengamatan.

Tabel 4. 2 Hasil Uji Statistik Vektor Pergeseran Horizontal Pengolahan Titik Ikat BPTK

Site	Vn (m/th)	Ve (m/th)	std n	std e	P	std P	T	Pergeseran
DELS	-0.009	-0.005	0.0008	0.0008	0.011	0.001	9.919	Ya
GRWH	-0.040	-0.024	0.0011	0.0011	0.046	0.002	29.279	Ya
KLAT	-0.004	-0.012	0.0005	0.0005	0.013	0.001	20.250	Ya

Tabel 4. 3 Hasil Uji Statistik Vektor Pergeseran Vertikal Pengolahan Titik Ikat BPTK

Site	Vu (m/th)	std u	P	std P	T	Pergeseran
DELS	-0.024	0.008	-0.024	0.008	3.113	Ya
GRWH	0.041	0.011	0.041	0.011	3.664	Ya
KLAT	-0.015	0.005	-0.015	0.005	3.229	Ya

Inflasi dan deflasi merupakan fenomena terjadinya kenaikan dan penurunan permukaan tanah pada gunungapi. Sehingga nilai pergeseran pada gunungapi tidak hanya melibatkan nilai horizontal (*easting* dan *northing*) saja, akan tetapi juga melibatkan nilai tinggi (*up*) pada perhitungan pergeseran. Berikut tabel 4.4 adalah nilai pergeseran dari nilai pergeseran *easting*, *northing*, *up* dari masing-masing data pengamatan GPS.

Tabel 4. 4 Nilai Pergeseran Pengolahan Dengan Titik Ikat BPTK

No.	Site	September 2013 – Maret 2014		
		Ve (m/tahun)	Vn (m/tahun)	Vu (m/tahun)
1	DELS	-0.005±0.008	-0.009±0.008	-0.024±0.008
2	GRWH	-0.024±0.011	-0.040±0.011	0.041±0.011
3	KLAT	-0.012±0.005	-0.004±0.005	-0.015±0.005

4.5 Penentuan Posisi Tekanan Magma dan Volume Suplai Magma

Pada penelitian tugas akhir ini dalam penentuan posisi tekanan magma menggunakan program pemodelan sumber tekanan magma pada *MATLAB* pada tugas akhir Reyzansza A.S(program MOGI)(Syahputra, 2014).

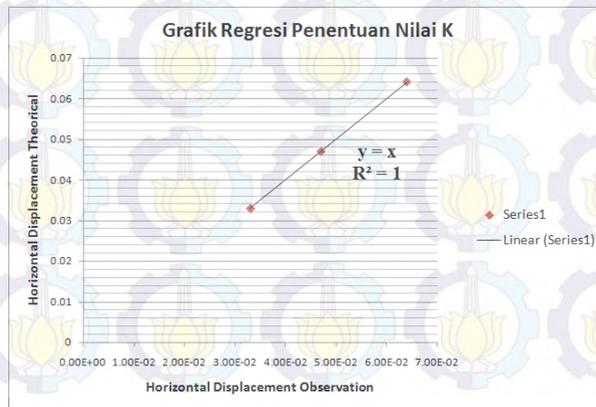
Pada penelitian tugas akhir ini, digunakan hasil dari pengolahan titik ikat BPTK sebagai dasar untuk perhitungan prediksi kedalaman pusat tekanan magma. Untuk mendapatkan nilai k sebenarnya, perlu dilakukan proses iterasi sampai didapat nilai pergeseran horisontal teoritis yang sama dengan pergeseran observasi. Dalam pemodelan sumber tekanan dengan geometri bola (Mogi), nilai intensitas k ditentukan melalui metoda *grid search* antara perubahan horisontal model dan observasi hingga diperoleh nilai kuadrat terkecil atau resultan a dan b bernilai 1, k awal diasumsikan dari volume rata-rata yang dikeluarkan oleh suatu proses erupsi. Dalam hal ini k awal adalah 10^7 yang merupakan volume rata-rata erupsi Gunung Merapi dengan VEI 2. Nilai *input* kedalaman yang dilakukan secara *trial and error* pada penelitian ini dilakukan dengan *range* 2 meter sebanyak 20000x iterasi. Jika Resultan dari a dan b telah bernilai 1, maka *looping*/iterasi secara otomatis akan berhenti karena nilai konstanta k terbaik didapat pada saat resultan a dan b bernilai 1.

Estimasi ini juga berdasarkan pada nilai pergeseran horisontal yang memiliki orde millimeter yang relatif kecil bila dibandingkan dengan perubahan jarak miring yang terukur menjelang erupsi Gunung Merapi 2010 dengan volume material erupsi mencapai 10^8 (Aisyah, 2013). Oleh sebab itu, diasumsikan bahwa pergeseran horisontal dalam orde millimeter disebabkan oleh perubahan nilai k dengan intensitas 10^7 (BPPTKG, 2010). Iterasi pertama dilakukan dengan memasukkan k awal dan kedalaman bervariasi dari 0 hingga 20 km.

Tabel 4. 5 Perhitungan Nilai K dengan Konsep Regresi

Kedalaman	a	b	k	Resultan
.
.
.
5640	9.25E-18	-0.996316	10036975.36	0.996316
5638	0	-0.996902	10031077.95	0.996902
5636	0	-0.997488	10025183.77	0.997488
5634	-9.25E-18	-0.998074	10019292.82	0.998074
5632	1.11E-16	-0.998661	10013405.1	0.998661
5630	-1.20E-16	-0.999249	10007520.6	0.999249
5628	-1.11E-16	-0.999836	10001639.33	0.999836
5626	-9.25E-18	-1.000424	9995761.288	1.000424

Iterasi pertama menghasilkan persamaan linier seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9. Iterasi terus dilakukan hingga memperoleh nilai selisih terkecil antara perubahan horisontal yang terukur oleh model dan hasil observasi, seperti terlihat pada Gambar 4.9. Nilai intensitas k terpenuhi pada saat persamaan linier memberikan gradient dan resultan a b mendekati 1. Nilai intensitas k terbaik untuk Model Mogi adalah 9995761.2875.

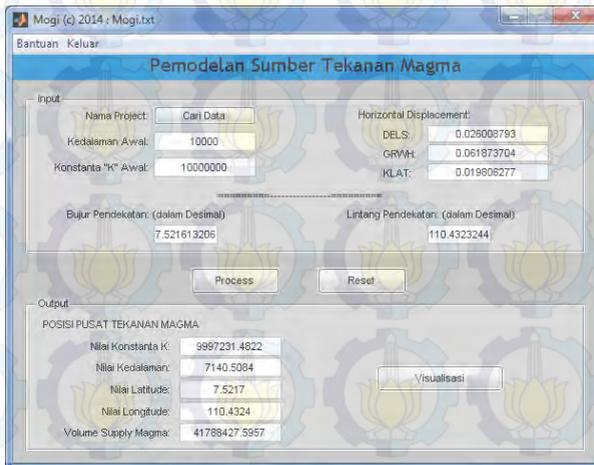
Gambar 4. 9 Grafik Regresi Penentuan Nilai k .

Tabel 4.5 adalah hasil dari iterasi nilai K awal (10000000 untuk merapi: VEI 2), dan dihasilkan nilai Kfix 9995761.2875. Kolom a merupakan nilai parameter regresi a, sedangkan kolom b merupakan nilai parameter yang didapat dari iterasi nilai K awal dan kedalaman 20000. Nilai *k fix* didapat sampai nilai pada kolom resultan bernilai 1, atau nilai a=0 dan b=1. Resultan merupakan akar dari penjumlahan nilai kuadrat a dan kuadrat b. Gambar 4.16 menunjukkan bahwa nilai *horizontal displacement observation* akan sama nilainya dengan *horizontal displacement theoretical* saat nilai resultan a dan b adalah 1. Nilai parameter a dan b dihitung dengan persamaan regresi.

Dalam penentuan sumber tekanan dibutuhkan parameter awal berupa lintang,bujur,kedalaman dan intnsitas magma.

Tabel 4. 6 Parameter metoda grid search Model (Gunung Merapi) (BPPTKG, 2013)

Parameter	Range	Iterasi
Bujur	110°25'56.36"BT–110°27'52.86"BT	20000
Lintang	7° 31' 17.80"LS– 7° 34' 4.06"LS	20000
Kedalaman	0 – 20000 m	20000
Intensitas	$10^6 - 10^7 \text{ m}^3$	20000



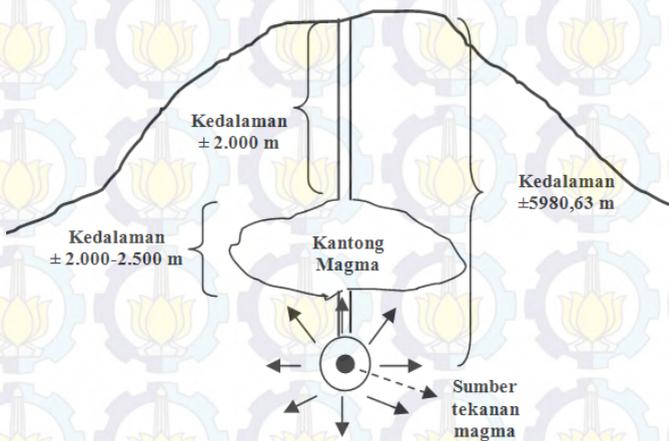
Gambar 4. 10 Program Mogi.

Dengan memasukkan nilai awal dari setiap parameter di atas ke dalam program Mogi, akan didapatkan nilai konstanta K yang sebenarnya yang kemudian disubstitusi sehingga didapat nilai kedalaman terbaik terhadap 3 titik pengamatan.

Tabel 4. 7 Hasil prediksi sumber magma tekanan Gunung Merapi menggunakan program MOGI.

Nilai K	9997231.482
Nilai Kedalaman	7140.5084 m
Lintang	7° 32' 2.1" LS
Bujur	110° 26' 51.57" BT
Volume supply magma	41788427.5957 m ³

Tabel 4.7 adalah hasil prediksi sumber tekanan magma pada kedalaman awal 10000 m, konstanta awal 10000000. Sumber tekanan magma berada di koordinat 7°32'2.1" LS ;110°26'51.57" BT dengan kedalaman 7140.504 m dibawah puncak Gunung Merapi.



Gambar 4. 11 Ilustrasi posisi kedalaman sumber tekanan magma.

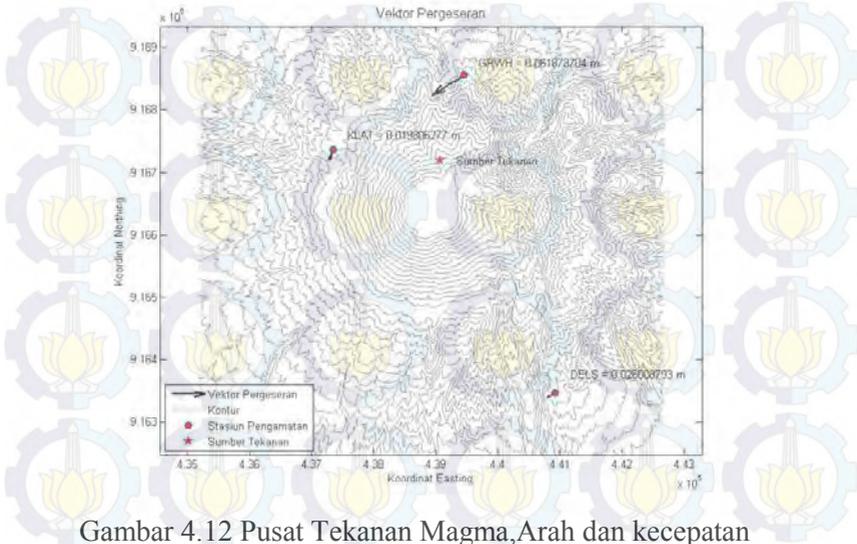
4.6 Analisa Deformasi

Pada penelitian tugas akhir ini, pengolahan data dilakukan dengan titik ikat BPTK. Hasil dari pengolahan menunjukkan adanya perubahan yang ditunjukkan pada *plotting time series* pada file *psbase_[expt].[GPS]* yang dapat dilihat didalam *folder* *gsoln* pada direktori kerja. Untuk melihat besar nilai perubahan dapat dilihat dalam file *Val.budi* yang terdapat didalam *folder* *gsoln*.

Tabel 4. 8 Nilai Pergeseran Pengolahan Dengan Titik Ikat BPTK

Site	September 2013-Maret 2014			Pergeseran (m/th)	Keterangan
	Vn (m/th)	Ve (m/th)	Vu (m/th)		
DELS	-0.009	-0.005	-0.024	0.026	Inflasi
GRWH	-0.040	-0.024	0.041	0.062	Inflasi
KLAT	-0.004	-0.012	-0.015	0.020	Inflasi

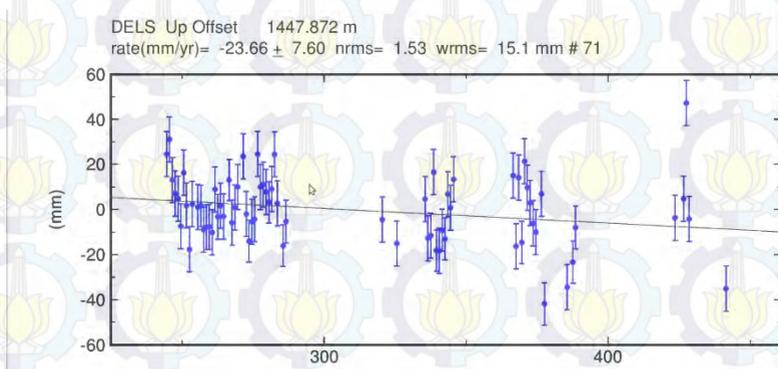
Gunung Merapi pada bulan September 2013 – Maret 2014 terjadi deflasi dengan pergeseran titik pengamatan GPS DELS sebesar 0.026 m dan GPS KLAT sebesar 0.061 m dan inflasi pada GPS GRWH sebesar 0.019 m.



Gambar 4.12 Pusat Tekanan Magma, Arah dan kecepatan pergeseran.

Dari hasil *plotting velocity* menunjukkan bahwa deformasi cenderung menjauhi pusat tekanan magma dan arah vektor pergeseran dari titik DELS menuju ke barat daya, titik GRWH menuju barat daya dan titik KLAT menuju selatan.

Dari hasil *plotting time series* dapat diketahui perubahan tinggi titik-titik pengamatan. Titik DELS mengalami penurunan sebesar 0.023 m/tahun, titik GRWH mengalami kenaikan 0.040 m/tahun, titik KLAt mengalami penurunan 0.014 m/tahun.

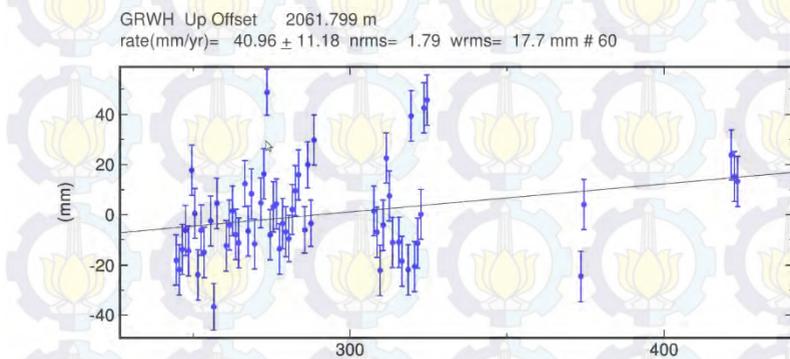


Gambar 4.13 *Plotting time series DELS UP.*

Pada gambar 4. 13 menunjukkan adanya penurunan pada titik DELS yang ditunjukkan oleh garis yang turun dari nilai tinggi ke rendah.



Gambar 4.14 Grafik Perubahan Tinggi Titik DELS.

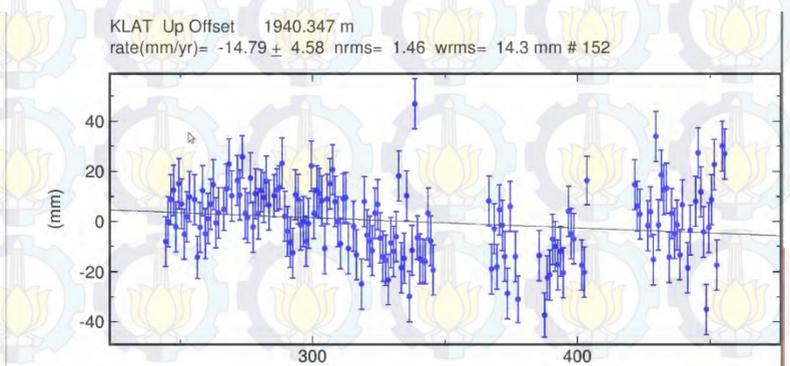


Gambar 4.15 *Plotting time series GRWH UP.*

Pada gambar 4.15 menunjukkan adanya kenaikan pada titik GRWH yang ditunjukkan oleh garis yang turun dari nilai rendah ke tinggi.



Gambar 4.16 Grafik Perubahan Tinggi Titik GRWH.



Gambar 4.17 *Plotting time series KLAT UP.*

Pada gambar 4.17 menunjukkan adanya penurunan pada titik KLAT yang ditunjukkan oleh garis yang turun dari nilai tinggi ke rendah.



Gambar 4.18 Grafik Perubahan Tinggi Titik KLAT.

Selanjutnya, menghitung kedalaman titik tekanan magma, nilai dan arah yang digunakan adalah dari pengolahan titik ikat BPTK. Perhitungan kedalaman titik tekanan magma dilakukan dengan menggunakan model Mogi. Sumber tekanan magma berada di koordinat $7^{\circ}32'2.1''$ LS ; $110^{\circ}26'51.57''$ BT dengan kedalaman sebesar ± 7140.508 m. Volume supply magma sebesar 41788427.595 m³. Dari penilitan tugas akhir ini, kondisi Gunung Merapi dikatakan masih dalam fase normal walaupun telah terjadi inflasi dari pengolahan dengan titik ikat BPTK pada bulan September 2013-Maret 2014.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis penelitian tugas akhir yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Arah pergeseran pada bulan September 2013 – Maret 2014 menunjukkan arah yaitu GPS DELS menuju ke arah barat daya, GPS GRWH menuju ke arah barat daya, dan GPS KLAT menuju ke arah selatan. Berdasarkan titik ikat BPTK, Gunung Merapi pada bulan September 2013–Maret 2014 terjadi *inflasi* dengan pergeseran titik pengamatan GPS DELS sebesar 0.026 m GPS KLAT sebesar 0.061 m dan GPS GRWH sebesar 0.019 m.

Tabel 5.1 Nilai pergeseran

Site	September 2013-Maret 2014			Pergeseran (m/th)
	Vn (m/th)	Ve (m/th)	Vu (m/th)	
DELS	-0.009	-0.005	-0.024	0.026
GRWH	-0.040	-0.024	0.041	0.062
KLAT	-0.004	-0.012	-0.015	0.020

2. Pusat tekanan magma Gunung Merapi berada di koordinat $7^{\circ}32'2.1''$ LS ; $110^{\circ}26'51.57''$ BT dengan kedalaman sebesar ± 7140.5084 m. Volume supply magma sebesar 41788427.5957 m³. Dari penilitan tugas akhir ini, kondisi Gunung Merapi dikatakan masih dalam fase normal walaupun telah terjadi inflasi dari pengolahan dengan titik ikat BPTK pada bulan September 2013-Maret 2014.

5.2 Saran

Dari beberapa kesimpulan di atas, dapat dikemukakan saran-saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut :

1. Proses pengolahan pada *software scientific* GPS GAMIT secara *automatic batch* akan terhenti apabila ada kekosongan data pada DOY, sehingga perlu diperhatikan dalam kelengkapan ketersediaan data.
2. Untuk mengetahui pergerakan pusat tekanan magma, dilakukan perhitungan model Mogi dengan data perbulan yang lengkap perharinya agar mengetahui kecepatan pergeserannya.
3. Dalam penentuan sumber tekanan magma perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut agar mendapatkan hasil yang lebih akurat.
4. Selalu memperhatikan *lfile* agar tidak berubah, karena proses secara *automatic batch* akan melakukan *updating* secara otomatis pada koordinat pendekatan yang mengakibatkan hasil *output* koordinatnya yang berbeda dengan koordinat sebelumnya.
5. Dalam mitigasi bencana perlu didukung dengan metode data yang lain seperti metode seismik, metode geokimia, metode gaya berat, metode geomagnetik, dan metode penginderaan jauh agar hasilnya lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. 2000. Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya. PT PradnyaPramita, Jakarta: Cetakan kedua.
- Abidin, H.Z. 2002. Andrew Jones, dan Joenil Kahar. Survei dengan GPS. Cetakan Kedua. Jakarta : PT Pradnya Paramita
- Abidin, H.Z. 2007. Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya. Jakarta : PT Pradnya Paramita
- Agung, Sidiq Purnama. 2012. Studi Kinerja Perangkat Lunak Leica Geo Office 8.1 Untuk Pengolahan Data GPS Baseline Panjang. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika. ITB.
- Aisyah, Nurnaning. 2013. Analisa deformasi dari data tilt dan estimasi perubahan volume magma Merapi tahun 2006 dengan model MogiI. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Andreas, Heri. 2001. Analisis deformasi Gunung berapi Papandayan Memanfaatkan Parameter Baseline Hasil Survei GPS. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika. ITB.
- Andriyani, Gina. 2012. Kajian Regangan Selat Bali Berdasarkan Data GNSS Kontinu Tahun 2009 – 2011. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi Universitas Diponegoro.
- BPPTKG. Sejarah Merapi. www.merapi.bgl.esdm.go.id/informasi diakses pada tanggal 25 Januari 2014 pada pukul 20.34 WIB
- BIG. Peta Dinding. http://www.bakosurtanal.go.id/assets/News/peta_dinding/DIY.zip diakses pada tanggal 25 Januari 2014 pada pukul 20.19 WIB
- Bahlefi, Andika Rizal. 2013. Analisis Deformasi Gunung Merapi Tahun 2012 Dari Data Pengamatan GPS. Program Studi Teknik Geodesi. Universitas Diponegoro.

Bukhori, Imam . 2011. Model Estimasi Uplift Dan Subsidence Dari Hasil Ukuran Gps Menggunakan Metode Polinomial Di Area Lumpur Sidoarjo. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geomatika ITS.

Hadiyanto, Eko Yudha . 2011. Studi Deformasi Gunung Merapi Menggunakan Teknologi Interferrometry Synthetic Aperture Radar (InSAR). Tugas Akhir Program Studi Teknik Geomatika ITS.

Iguchi, M., Takayama, T., Yamazaki, T., Tada, M. and Suzuki, 2011, Movement of Magma at Sakurajima Volcano Revealed by GPS Observation. Ann. Disast. Prev. Res. Inst. Kyoto University., 51B, 241-246.

Jamel, Ilham. 2012. Analisis Deformasi Gunung berapi Papandayan Berdasarkan Data Pengamatan GPS Tahun 2002 - 2011. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika. ITB.

Kusnandar, Arif. 2004. Studi Karakteristik Deformasi Gunung berapi Papandayan Sebelum Letusan dan Setelah Letusan November 2002. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika. ITB.

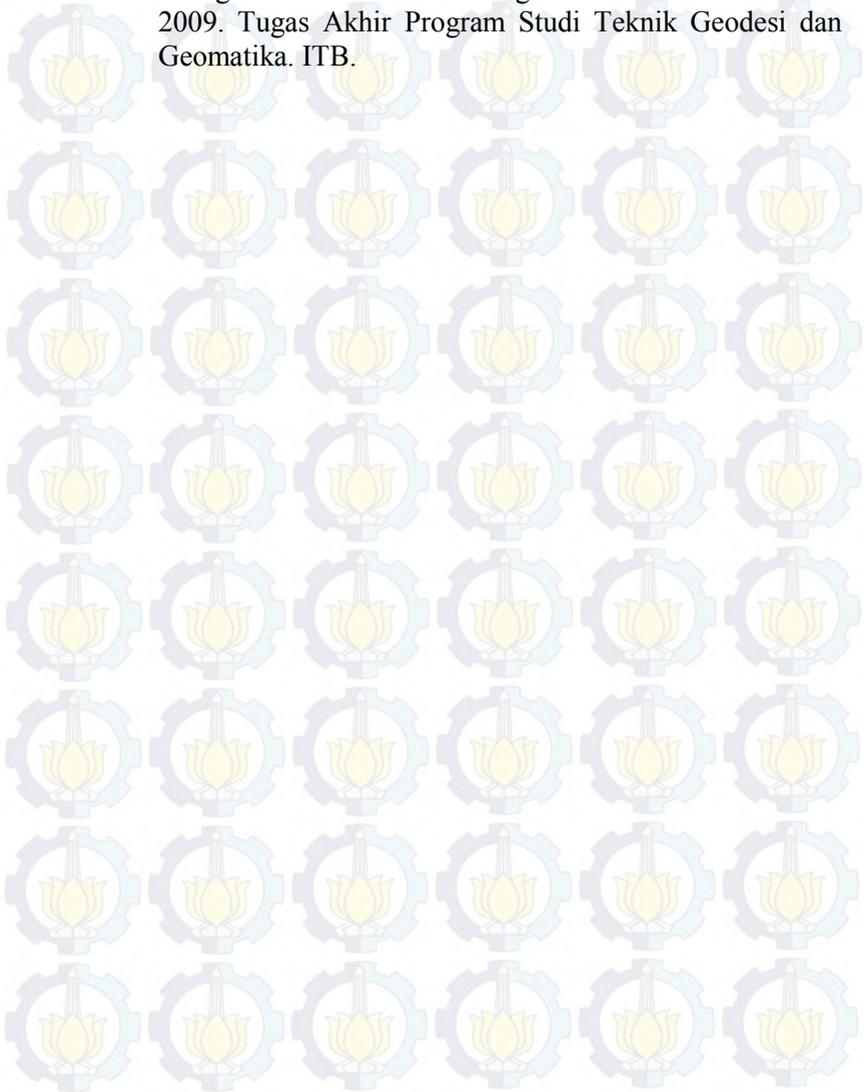
Kelompok Keilmuan ITB. Pemantauan Deformasi gunung berapi Guntur dengan GPS. http://geodesy.gd.itb.ac.id/?page_id286 diakses pada tanggal 25 Januari 2014 pukul 19.47 WIB

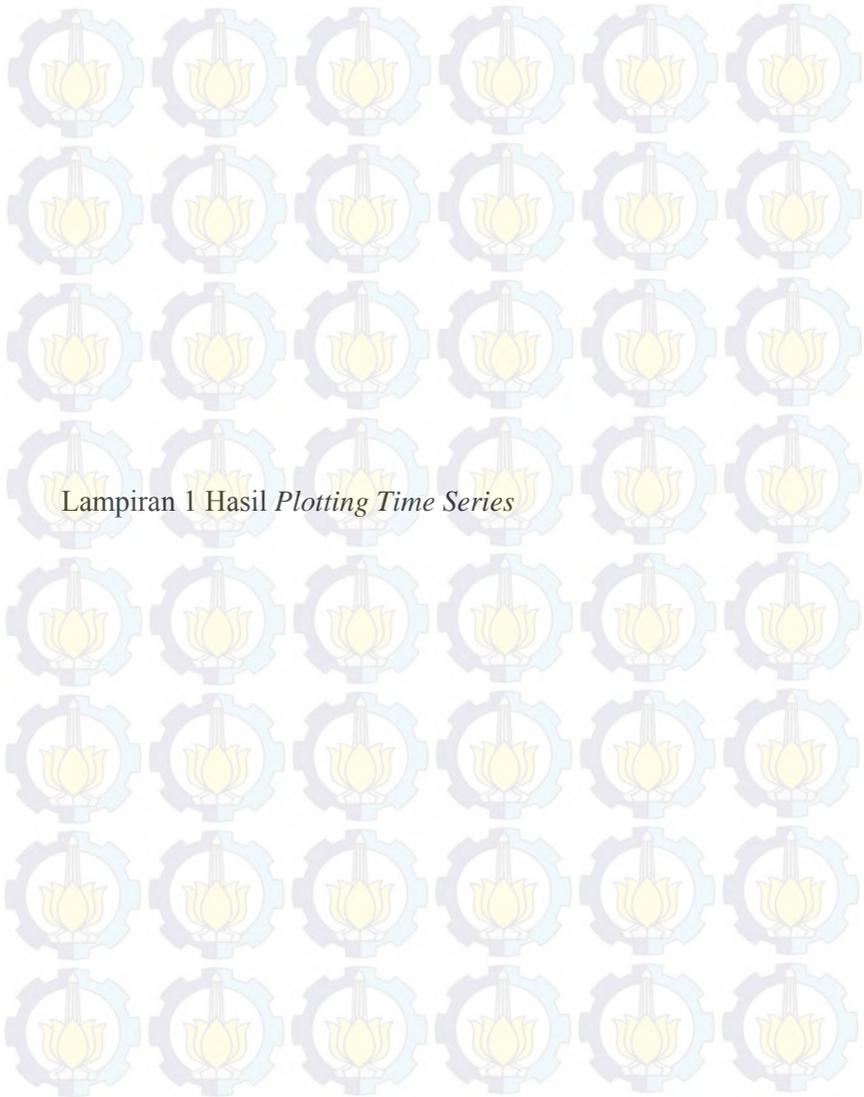
Syahputra, Reyzansza Anandio. 2014. Pemodelan Deformasi Dari Data GPS untuk Penentuan Lokasi Pusat Tekanan Magma Kawasan Vulkanik Aktif Menggunakan Model Mogi. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geomatika ITS.

VSI ESDM. 2008. Pengenalan Gunung Api. Badan Geologi. Bandung: ESDM.

Wolf, Paul R dan D. Ghilani, Charles. 2006. Adjustment Computations Spatial Data Analysis. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.

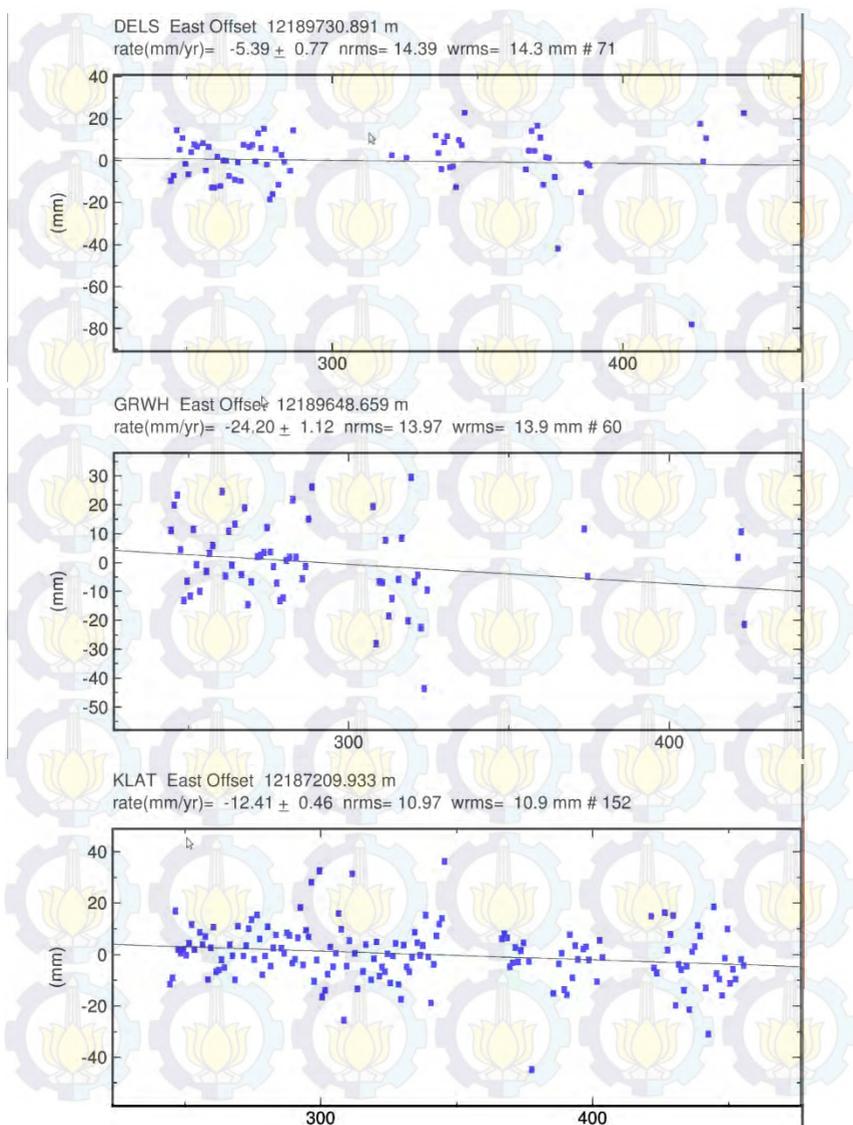
Yunazwardi, Mutiara. 2010. Analisis Deformasi Gunung berapi talang Berdasarkan Data Pengamatan GPS tahun 2005-2009. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika. ITB.





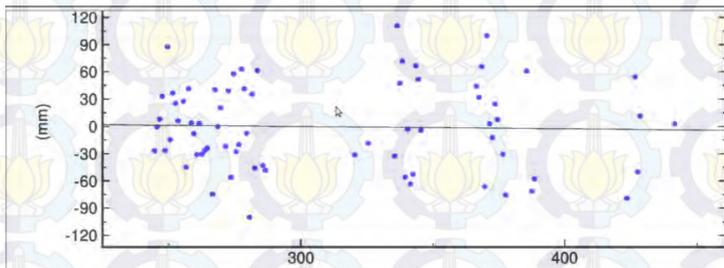
Lampiran 1 Hasil *Plotting Time Series*

Time series Easting DELS,GRWH,KLAT

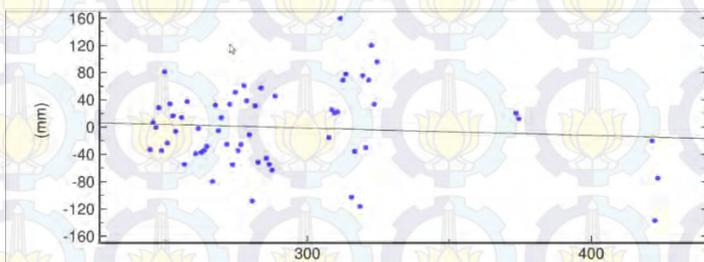


Time series Northing DELS,GRWH,KLAT

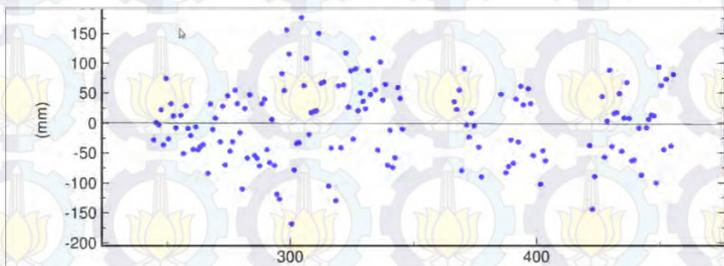
DELS North Offset -842442.994 m
rate(mm/yr)= -14.59 @!+_0.77 nrms= 46.26 wrms= 46.1 mm



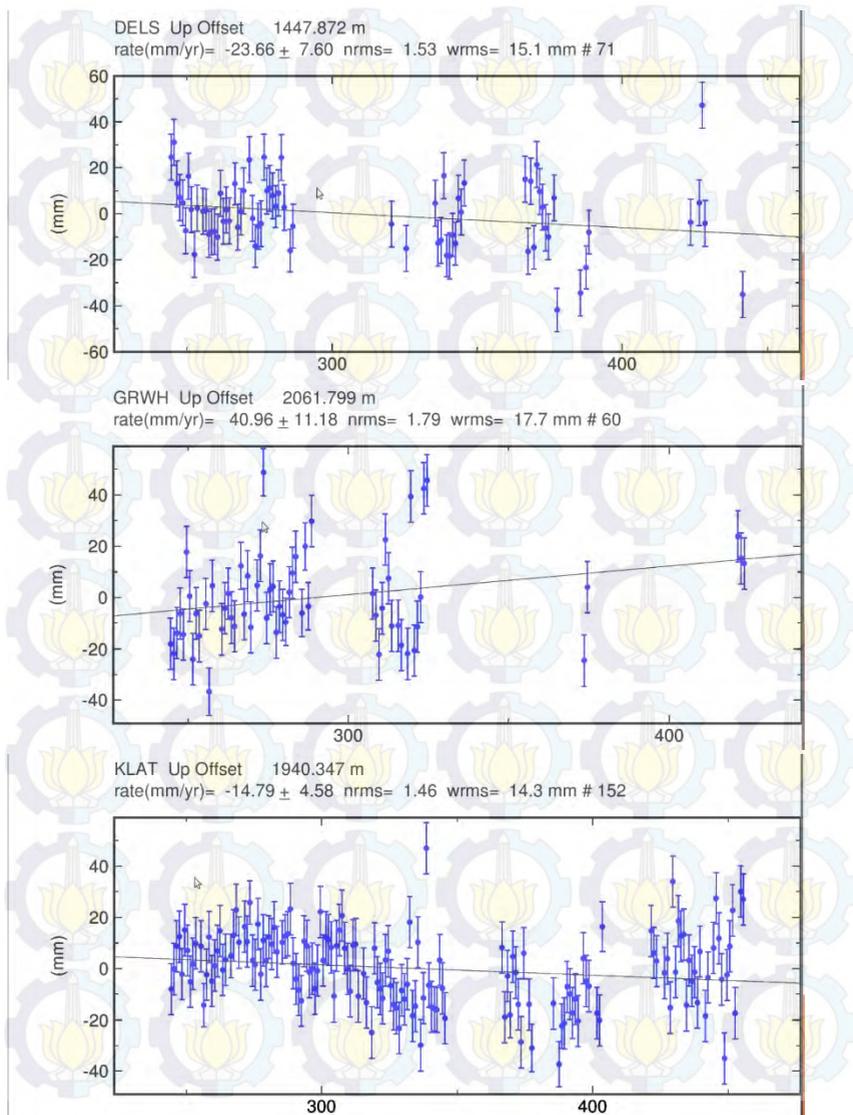
GRWH North Offset -837301.808 m
rate(mm/yr)= -24.89 @!+_1.11 nrms= 59.96 wrms= 59.7 mm

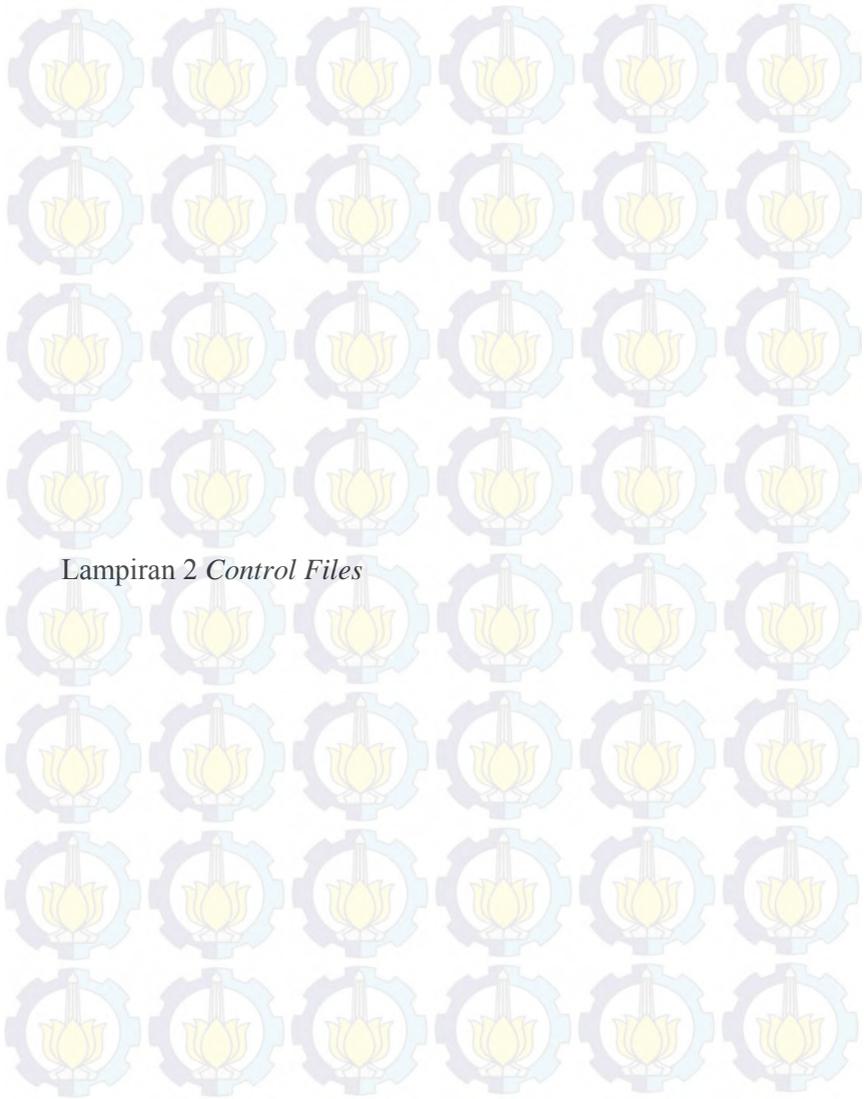


KLAT North Offset -838504.425 m
rate(mm/yr)= 24.05 @!+_0.45 nrms= 66.82 wrms= 66.5 mm



Time series Up DELS,GRWH,KLAT





Lampiran 2 *Control Files*

**.apr*

BPTK_GPS	-2201257.63	5923941.95	-859659.19	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67
DELS_GPS	-2211195.53	5925239.43	-834612.36	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67
GRWH_GPS	-2210279.29	5926947.27	-829626.58	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67
KLAT_GPS	-2208197.88	5927424.95	-830796.43	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67

lfile.

BPTK_GPS	-2201257.63	5923941.95	-859659.19	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67
DELS_GPS	-2211195.53	5925239.43	-834612.36	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67
GRWH_GPS	-2210279.29	5926947.27	-829626.58	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67
KLAT_GPS	-2208197.88	5927424.95	-830796.43	0.0000	0.0000	0.0000	2013.67

Station.info

Station.info written by MSTINF user bpptk on 2014-05-26 09:43

* Reference file : station.info

*

*

*SITE	Station Name	Session Start	Session Stop	Ant Ht	HtCod	Ant N	Ant E	Receiver Type
Vers	SwVer	Receiver SN	Antenna Type	Dome	Antenna SN			
BPTK	BPTK	2013 244 0 0 0	9999 999 0 0 0	0.0000	DHARP	0.0000	0.0000	LEICA GX1220
2.14	2.14	455456	LEIAX1202	UNKN				mstinf: BPTK2440.13o
DELS	DELS	2013 244 0 0 0	9999 999 0 0 0	0.0000	DHARP	0.0000	0.0000	LEICA GR10
1.00	1.00	1700057	LEIAR10	NONE				mstinf: DELS2440.13o
GRWH	GRWH	2013 244 0 0 0	9999 999 0 0 0	0.0000	DHARP	0.0000	0.0000	LEICA GR10
1.00	1.00	1700145	LEIAR10	NONE				mstinf: GRWH2440.13o
KLAT	KLAT	2013 244 0 0 0	9999 999 0 0 0	0.0000	DHARP	0.0000	0.0000	LEICA GR10
1.00	1.00	1700158	LEIAR10	NONE				mstinf: KLAT2440.13o

Sittbl.

SITE FIX --COORD.CONSTR.--

<<default for regional stations >>

ALL NNN 100. 100. 100.

BPTK BPTK_GPS NNN 0.001 0.001 0.01

Sestbl.

Session Table

Processing Agency = MIT

<< Controls must begin in column 1 >>

Choice of Experiment = BASELINE ; BASELINE/RELAX./ORBIT

Type of Analysis = 1-ITER ; 1-ITER(autclnprefit and conditional redo) / 0-ITER (no postfitautcln) / PREFIT

AUTCLN redo = Y ; Y/N; 3rd soln only if needed, assume 'Y' if 'Type of analysis = 1-ITER'

Sites.default

Replace 'expt' with your experiment name and edit the following to list sites needed from external archive

DELS_GPS budi localrx xstinfo

GRWH_GPS budi localrx xstinfo

KLAT_GPS budi localrx xstinfo

BPTK_GPS budi localrx xstinfo

Process.default

```
# Directory path for RINEX archives (search all levels); e.g. /data18/simon
set rnxfile = "/home/bpptk/budi/rinexfile/"

##GAMIT
# Set sampling interval, number of epochs, and start time for processing

setsint = '30'
setnepc = '2880'

setstime = '0 0'

# Variables for updating tables
setstinf_unique = "-u"
setstinf_nosort = "-nosort"
setstinf_slthgt = "2.00"

# Set "Y" to use RINEX header coordinates not in lfile or apr file
setuse_rxc = "N"

# Broadcast orbits
setbrdc = 'auto'
```

Biodata Penulis



Budi Joko Purnomo Penulis lahir di Ngawi, 18 April 1992. Anak pertama dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya antara lain di SDN Tambakromo 3 Geneng, Ngawi, SMP N 2 Ngawi, dan SMA N 2 Ngawi. Selepas tamat SMA tahun 2010, penulis yang biasa dipanggil Budi ini diterima pada Program Studi Teknik Geomatika FTSP-ITS dengan NRP 3510 100 048 melalui program SNMPTN. Penulis mengambil penelitian tugas akhir di bidang keahlian ilmu Geodinamika

dengan judul “Analisa Deformasi Kawasan Vulkanik Aktif Dengan Menggunakan Data *GPS* September 2013-Maret 2014 (Studi Kasus : Gunung Merapi, Daerah Istimewa Yogyakarta)”. Penulis aktif dalam keanggotaan organisasi Himpunan Mahasiswa Geomatika ITS (HIMAGE-ITS) antara lain menjadi Kabiro Olahraga Departemen Seni dan Olahraga (2011-2012, Sekretaris Departemen Dalam Negeri (2012-2013), dan penulis juga aktif dalam keanggotaan organisasi kemahasiswaan Badan Eksekutif Lembaga Mahasiswa FTSP (BE-LM FTSP) sebagai anggota divisi KWU (2011-2012). Penulis juga pernah terlibat dalam beberapa pekerjaan terkait pengukuran dan pemetaan antara lain pengukuran perencanaan pipa air untuk pabrik Mayora Medan (2014), pemasangan titik bor untuk pondasi gedung di Balikpapan oleh CV. Surabaya Satu (2012), pengukuran sedimentasi sungai di Banyu Urip, Surabaya (2011).