

## ANALISA DEFORMASI UNTUK PREDIKSI SUMBER TEKINAN MAGMA MENGGUNAKAN DATA GPS (Studi Kasus: Gunung Merapi, Daerah Istimewa Yogyakarta)

Budi Joko Purnomo<sup>1</sup>, Ira Mutiara Anjasmara<sup>1</sup>, Nurnaning Aisyah<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Geomatika FTSP-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111

<sup>2</sup>Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi<sup>2</sup>), BPPTKG, Yogyakarta 55166  
Email : ira@geodesy.its.ac.id, aisyahnaning@gmail.com

### 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 relative 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.

Metode yang digunakan pada penelitian 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 0.010801005 dan vertikal sebesar -0.02366, pergeseran horisontal untuk stasiun GRWH sebesar 0.046374924 dan vertikal sebesar 0.04096, dan pergeseran horisontal untuk stasiun KLAT sebesar 0.013173629 dan vertikal sebesar -0.01479. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa tubuh gunung Merapi sedang mengalami deformasi dengan sifat deformasinya adalah inflasi. Sedangkan posisi pusat tekanan magma adalah  $7^{\circ}32'2.129''$  LS ;  $110^{\circ}26'51.57''$  BT dengan kedalaman  $\pm 7140.5084$  m relatif dari puncak. Volume magma adalah  $41788427.5957$  m<sup>3</sup> dan dapat digunakan untuk prediksi skala erupsi mendatang.

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

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

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.

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 (Jamel, 2012). 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. Gejala deformasi gunung api akan menyebabkan pergeseran posisi suatu titik tubuh dari gunung api. Pergeseran tersebut bisa terjadi baik secara horizontal maupun vertical (Bahlefi, 2013).

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 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) (BPPTKG, 2014).

**Data Dan Peralatan**

**- Data**

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Data *RINEX*

Data pengamatan *GPS* yang digunakan adalah 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 2.1 Lokasi data pengamatan GPS**

NO	STASIUN	LOKASI
1	BTK	Kantor Pusat BPPTKG, Yogyakarta
2	DELS	Desa Deles, Klaten
3	GRWH	Desa Grawah, Boyolali
4	KLAT	Desa Klatakan, Magelang

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/>. Data sekunder yang dibutuhkan saat pengolahan akan diunduh otomatis oleh *software GAMIT/GLOBK*

**- Peralatan**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Perangkat Keras (Hardware)
  - a. Stasiun *GPS Online*
  - b. *Laptop*
2. Perangkat Lunak (Software)
  - a. Sistem Operasi *Linux Ubuntu 12.04*
  - b. *Leica Geo Office 8.1*
  - c. *Software GAMIT dan GLOBK*
  - d. *Software Generic Mapping Tools (GMT)*

**Pengolahan Data**

Berikut penjelasan tahap pengolahan data:

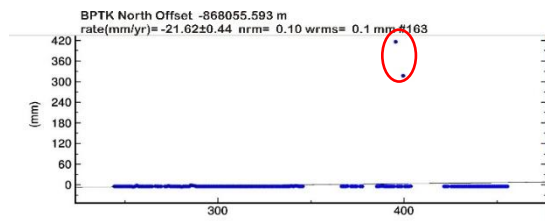
1. Pengumpulan Data  
*Download* data *RINEX* dari pusat data di kantor BPPTKG Yogyakarta.
2. Penggabungan data *RINEX*  
Data *RINEX* yang diperoleh berupa data pengamatan per-jam, untuk mendapatkan data *RINEX* dalam 1 hari (*Day of Year*) maka dilakukan penggabungan menggunakan *software LGO 8.1*.
3. Pembuatan Direktori Kerja
4. *Editing control files* pada *folder tables*
5. 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 &`
6. *Editing file globk\_comb.cmd* dan *glorg\_comb.cmd*.
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`
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.
9. Prediksi sumber tekanan.  
Prediksi sumber tekanan magma menggunakan model *MOGI*. Pada tahap ini prediksi sumber tekanan magma

menggunakan program *MATLAB* yang sudah ada.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Deteksi *Outliers*

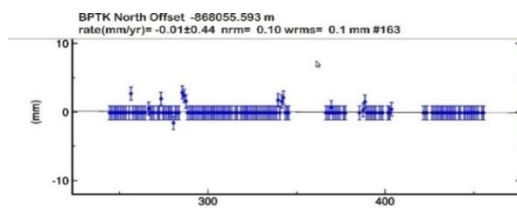
*Outliers* adalah data yang menyimpang terlalu jauh dari data lainnya dalam suatu rangkaian data. Adanya data *outliers* ini akan membuat analisis terhadap serangkaian data menjadi bias, atau tidak mencerminkan fenomena yang sebenarnya. Hasil plotting time series masih terdapat data *outliers* sehingga perlu dihilangkan. Data koordinat time series dapat dilihat pada file Val.[expt] dalam folder gsoln.



Gambar 1. contoh *plotting time series north* stasion BPTK yang belum dikurangi data *outliers*, psbase\_budi.BPTK.

### 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. Kecepatan pergeseran dapat di lihat pada *plotting time series* pada file psbase\_[expt].[GPS] bagian *rate* (mm/yr).

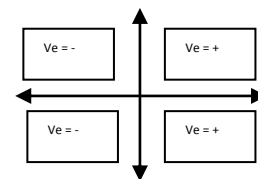


Gambar 2. contoh *plotting time series north* stasion BPTK yang sudah dikurangi data *outliers*, psbase\_budi.BPTK.

Tabel 1. Kecepatan pergeseran pengolahan dengan titik ikat BPTK.

No.	Site	September 2013 – Maret 2014		
		Ve (mm/tahun)	Vn (mm/tahun)	Vu (mm/tahun)
1	DELS	-5.39 ±0.77	-9.36 ±0.77	-23.66 ±7.60
2	GRWH	-24.20 ±1.12	-39.56 ±1.12	40.96 ± 11.18
3	KLAT	-12.41 ±0.45	-4.42 ± 0.45	-14.79 ±4.58

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 3.4 mengenai penentuan arah dan kecepatan pergeseran dibagi dalam 4 kuadran (K) (Abidin, 2007).



Gambar 3. Arah dan kecepatan pergeseran dalam kuadran.

Hasil *plotting* kecepatan pergeseran (*velocity*) menggunakan *software* *MATLAB*. Gambar 3.5 merupakan *plotting* kecepatan pergeseran (*velocity*) dari data pengamatan GPS DELS, GRWH, KLAT dengan titik ikat BPTK.

### Analisis Kecepatan Pergeseran

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:

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

Adapun standar deviasi dihitung dengan menggunakan rumus :

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

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

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

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

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

$$T = P_{ij} / \text{Std } P_{ij} \quad (3)$$

Pergeseran dinyatakan signifikan atau hipotesis nol ditolak jika (Wolf, 2006):

$$T > df, \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

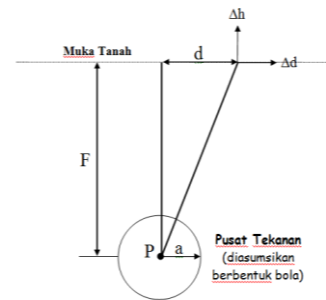
Keterangan :

- $P_{ij}$  = Pergeseran titik pengamatan
- $\text{Std } P_{ij}, Sd \text{ dn}_{ij}^2, Sd \text{ de}_{ij}^2$  = Standar deviasi  $P_{ij}$ , standar deviasi komponen n dan e
- T = Besaran yang menunjukkan signifikansi pergeseran
- df = Derajat kebebasan
- $\alpha$  = Level signifikan yang digunakan

Digunakan tabel *t-distribution* dengan selang kepercayaan 95 % sehingga nilai  $T > tdf, \alpha/2$  adalah 1,960 dimana menunjukkan terjadi pergeseran di semua stasiun pengamatan.

### Penentuan Posisi Tekanan Magma dan Volume Suplai 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*) (Iguchi, 2003). Pada penelitian tugas akhir ini dalam penentuan posisi tekanan magma menggunakan program pemodelan sumber tekanan magma pada *MATLAB* yang Reyzansza A.S (program MOGI) (Syahputr, 2014)



Gambar 5. Model Mogi Untuk Penentuan Sumber Tekanan Magma (Bahlefi, 2013)

Model Mogi secara umum ditunjukkan oleh gambaran dan formula berikut:

$$\Delta d = \frac{a^3 \Delta P}{\left(\frac{4}{3}\right) \mu \left(f^2 + d^2\right)^{3/2}} \quad (5)$$

$$\Delta h = \frac{a^3 \Delta P}{\left(\frac{4}{3}\right) \mu \left(f^2 + d^2\right)^{3/2}} \quad (6)$$

Keterangan:

- $\Delta d$  : Perubahan horisontal (*Horizontal Displacement*)
- $\Delta h$  : Perubahan vertikal (*Vertical Displacement*)
- $d$  : Jarak antara stasiun pemantauan terhadap *crater*
- $a$  : Jari-jari sumber tekanan
- $f$  : kedalaman sumber tekanan
- $\Delta P$  : Tekanan hidrostatik
- $\mu$  : Rigiditas medium

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.

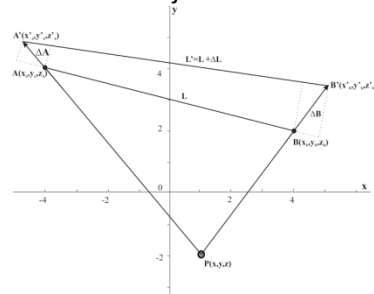
Mengacu persamaan 5 dan 6 dengan mengambil nilai  $k$  sebagai nilai intensitas yang mewakili besarnya jari-jari dan tekanan hidrostatik serta korelasinya terhadap rigiditas medium. Penyederhanaan kedua persamaan tersebut, sehingga menjadi persamaan 2.6 dan 2.7 dengan keterangan notasi seperti pada persamaan

$$\Delta d = k \frac{d}{\left(f^2 + d^2\right)^{3/2}} \quad (7)$$

$$\Delta h = k \frac{f}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \quad (8)$$

$$k = \frac{3a^3 \Delta P}{4\mu} \quad (9)$$

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  $P(x_s, y_s, z_s)$  ditunjukkan pada Gambar 3.7. 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  $\Delta L$ .



Gambar 3.7 Skema perubahan jarak miring akibat (Iguchi, 2011)

Jarak horisontal suatu stasiun navigasi  $B$  (Gambar 3.7) terhadap sumber tekanan yang terletak di  $(x_s, y_s, z_s)$  digambarkan dalam persamaan 3.10. 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 3.10 dan 3.11, pergeseran horisontal dapat dihitung secara teoritis. Dalam hal ini posisi sumber tekanan diasumsikan di bawah *crater*.

$$d = \sqrt{(x_b - x_s)^2 + (y_b - y_s)^2} \quad (10)$$

$$\Delta d_{teoritis, b} = \Delta d_b - \Delta d_a \quad (11)$$

$$= k \left[ \frac{d_b}{(f^2 + d_b^2)^{3/2}} e_b - \frac{d_a}{(f^2 + d_a^2)^{3/2}} e_a \right] \quad (12)$$

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  $A$
- $\Delta d_a$  : Pergeseran horisontal di stasiun referensi
- $\Delta d_b$  : Pergeseran horisontal di stasiun navigasi  $B$
- $\Delta d_{teoritis, b}$  : Pergeseran horisontal teoritis di stasiun navigasi  $B$

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. Iterasi pertama dilakukan dengan memasukkan  $k$  awal dan kedalaman bervariasi dari 0 hingga 20 km.

**Tabel 2. Parameter metoda grid search Model (BPPTKG,2013)**

Parameter	Range	Iterasi
Bujur	110,4323244 – 110,4646846	20000
Lintang	7,521613206 – 7,567797353	20000
Kedalaman	0 – 20000 m	20000
Intensitas	$10^6 - 10^7 \text{ m}^3$	20000

**Tabel 3. Hasil prediksi sumber magma tekanan Gunung Merapi menggunakan program MOGI.**

Nilai K	9997231.482
Nilai Kedalaman	7140.5084 m
Lintang	-7.5339
Bujur	110.4476
Volume supply magma	41788427.5957 m <sup>3</sup>

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.

## PENUTUP

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 0.026008793 m GPS KLAT sebesar 0.061873704 m dan GPS GRWH sebesar 0.019806277 m.

2. Sumber tekanan magma berada di koordinat 7°32'2.129" LS ;110°26'51.57' BT dengan kedalaman 7140.5048 m dibawah puncak Gunung Merapi. 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.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. 2007. Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya. Jakarta : PT Pradnya Paramita.
- Bahlefi, Andika Rizal. 2013. Analisis Deformasi Gunung Merapi Tahun 2012 Dari Data Pengamatan GPS. Program Studi Teknik Geodesi. Universitas Diponegoro.
- BPPTKG. Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi. Sejarah Merapi. [www.merapi.bgl.esdm.go.id/informasidi](http://www.merapi.bgl.esdm.go.id/informasidi) akses pada tanggal 25 Januari 2014 pada pukul 20.34 WIB
- Iguchi, M., Takayam, 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 Merapi Papandayan Berdasarkan Data Pengamatan GPS Tahun 2002 - 2011. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika. ITB
- 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.
- Wolf, Paul R dan D. Ghilani, Charles. 2006. Adjustment Computations Spatial Data Analysis. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.