



Karakteristik Deformasi Gunungapi Ijen dalam Periode 2002-2005 Hasil Estimasi Metode Survei GPS

Hasanuddin Z. Abidin¹, Muhammad Hendrasto², Heri Andreas¹,
Muhammad Gamal¹, Mipi A. Kusuma¹, Umar Rosadi², Iyan Mulyana²,
Dedi Mulyadi², Ony K. Suganda², Bambang H. Purwanto² & Fumiaki Kimata³

¹Kelompok Keilmuan Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB,
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, e-mail: hzabidin@gd.itb.ac.id

²Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Jl. Diponegoro 57, Bandung

³Research Center for Seismology and Volcanology and Disaster Mitigation
(RCSVDM), Nagoya University, Japan

Abstrak. Pemantauan aktivitas gunungapi dapat dilakukan dengan berbagai metode, dimana salah satunya adalah metode deformasi. Metode ini dapat diimplementasikan menggunakan beragam sensor dan teknik, dimana salah satunya adalah teknik yang menggunakan pengamatan terhadap satelit GPS (Global Positioning System). Makalah ini menjelaskan penggunaan metode survei GPS secara periodik untuk studi deformasi Gunungapi Ijen, gunungapi aktif tipe-A yang terletak di Jawa Timur. Dari hasil survei GPS yang telah dilaksanakan pada Juni 2002, April 2004, Juni 2004 dan Agustus 2005 teramati bahwa pada saat aktivitas gunung Ijen meningkat, pergeseran titik-titik pengamatan dapat mencapai sekitar 1-2 dm, baik dalam komponen horisontal maupun vertikal. Deformasi dalam level ini belum disertai dengan aktivitas letusan dari gunung Ijen.

Kata kunci: *deformasi; GPS; gunungapi; Ijen.*

Abstract. Monitoring of volcano activity can be done using several methods, which one of them is the deformation method. This method can be implemented by utilizing various sensors and techniques, which one of them is based on the observations to GPS (Global Positioning System) satellites. This paper describes the use of GPS survey method for studying the deformation of Ijen volcano, a type-A active volcano located in East Java. The results of GPS surveys conducted on June 2002, April 2004, June 2004 and August 2005 show that during the increase activity of Ijen, the observed displacements of GPS stations can reach the amount of about 1-2 dm, both in horizontal and vertical components. This level of deformation however, was not followed by the eruption of Ijen volcano.

Keywords: *deformation; GPS; Ijen; volcano.*

1 Pendahuluan

Ada beberapa metode pemantauan aktivitas gunungapi yang telah diaplikasikan

sekarang ini [1, 2], yaitu antara lain metode seismik, metode deformasi, metode kimia gas, metode termal, dan metode penginderaan jauh (dengan menggunakan sistem video, foto udara dan citra satelit). Metode-metode ini akan melibatkan sistem peralatan/sensor tersendiri, dan disamping itu dapat diimplementasikan secara episodik maupun kontinyu. Metode yang paling banyak digunakan untuk pemantauan gunungapi di Indonesia saat ini adalah metode seismik. Metode seismik yang menggunakan sensor seismometer ini pada dasarnya digunakan untuk mengevaluasi aktivitas yang terjadi di dalam gunungapi. Disamping metode seismik, metode deformasi pun cukup banyak diaplikasikan dalam pemantauan gunungapi dengan menggunakan berbagai macam sensor atau sistem, dan metode ini dianggap punya potensi yang sangat besar untuk berkontribusi dalam pemantauan aktivitas gunungapi. Metode ini pada dasarnya ingin mendapatkan pola dan kecepatan dari deformasi permukaan gunungapi, baik dalam arah horisontal maupun vertikal.

Pada prinsipnya deformasi dari tubuh gunungapi dapat berupa kenaikan permukaan tanah (inflasi) ataupun penurunan permukaan tanah (deflasi). Deformasi yang berupa inflasi umumnya terjadi karena proses gerakan magma ke permukaan yang menekan permukaan tanah di atasnya. Dalam hal ini deformasi yang maksimal biasanya teramati tidak lama sebelum letusan gunungapi berlansung. Sedangkan deformasi berupa deflasi umumnya terjadi selama atau sesudah masa letusan. Pada saat itu tekanan magma di dalam tubuh gunungapi telah melemah dan permukaan tanah cenderung kembali ke posisinya semula. Gejala deformasi gunungapi akan menyebabkan pergeseran posisi suatu titik di tubuh gunungapi. Pergeseran posisi tersebut dapat terjadi baik dalam arah horisontal maupun vertikal. Menurut Van der Laat [3], nilai pergeseran ini bisa mencapai puluhan meter pada gunungapi silisik yang membentuk kubah lava. Pada gunungapi yang kantong magmanya masih jauh di bawah permukaan atau gerakan naiknya magma relatif lambat, deformasi yang teramati relatif kecil, kadang-kadang nilai *strain* nya lebih kecil dari 0,1 ppm (*part per million*) per tahun.

Pemantauan deformasi suatu gunungapi dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai macam sensor atau sistem. Metode deformasi ini pada dasarnya ingin mendapatkan pola dan kecepatan dari gerakan tubuh gunungapi, baik dalam arah horisontal maupun vertikal. Menurut McGuire [4], data dan informasi deformasi permukaan ini dapat digunakan untuk mengungkapkan beberapa hal tentang karakteristik dari aktivitas magmatik gunungapi yang bersangkutan, seperti: perubahan dari fluks magma (untuk kantong magma yang bersifat tetap), serta lokasi, bentuk, dan perkembangan kantong magma baru yang terbentuk karena proses intrusi. Pemantauan deformasi gunungapi dengan metode deformasi umumnya dapat diklasifikasikan atas dua tipe, yaitu metode episodik dan metode kontinyu.

Pada metode episodik, pemantauan dilakukan secara berkala dalam selang waktu tertentu. Metode deformasi episodik ini umumnya menggunakan data-data pengamatan terestris, seperti jarak (dari EDM, *Electronic Distance Measurement*), arah (dari theodolit), beda tinggi (dari sipat datar), dan perubahan gaya berat (dari pengukuran mikrogravitas); dan sekarang ini juga mulai menggunakan data pengamatan GPS [5] dan juga INSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*). Sedangkan pada metode deformasi kontinyu pemantauan dilakukan terus menerus secara otomatis. Metode deformasi kontinyu ini umumnya menggunakan sensor-sensor tiltmeter, extensiometer, dan dilatometer, yang hanya mengkarakterisir deformasi yang sifatnya relatif lokal. Patut ditekankan di sini bahwa GPS yang dikombinasikan dengan sistem telemetri/komunikasi data juga mulai banyak digunakan untuk memantau deformasi gunungapi secara kontinyu. Untuk gunung-gunungapi yang lebih aktif, sehubungan dengan adanya tuntutan ketersediaan informasi deformasi dalam waktu yang relatif cepat, maka pemantauan secara kontinyu dengan GPS akan lebih efektif dibandingkan dengan penggunaan metode survei GPS.

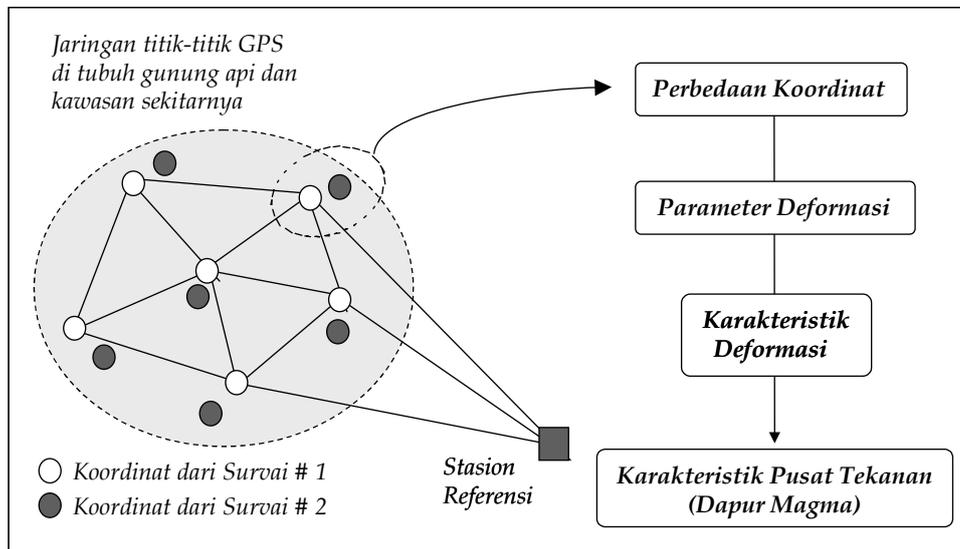
Makalah ini akan menjelaskan penggunaan metode survei GPS secara periodik untuk studi deformasi gunung Ijen. Karakteristik deformasi G. Ijen yang diperoleh dari empat survei GPS yang telah dilaksanakan pada Juni 2002, April 2004, Juni 2004 dan Agustus 2005 akan dijelaskan dan didiskusikan.

2 Prinsip 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 [5, 6].

Prinsip dari metode pemantauan aktivitas gunung berapi dengan metode Survei GPS pada dasarnya relatif mudah, yaitu pemantauan terhadap perubahan koordinat dari beberapa titik yang mewakili gunung tersebut secara periodik. Pada metode ini, beberapa alat penerima sinyal (receiver) GPS ditempatkan pada beberapa titik pantau yang ditempatkan pada punggung dan puncak gunung yang akan dipantau, serta pada suatu stasion referensi yang dianggap sebagai titik stabil. Koordinat dari titik-titik pantau tersebut kemudian ditentukan secara teliti dengan GPS, relatif terhadap stasion referensi, dengan menggunakan metode penentuan posisi diferensial menggunakan data pengamatan fase [6]. Selanjutnya dengan mempelajari perubahan koordinat

titik-titik pantau tersebut, baik terhadap stasion referensi maupun di antara sesama titik pantau secara periodik, maka karakteristik deformasi dan magmatik gunung berapi yang bersangkutan dapat dipelajari dan dianalisa, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Pemantauan deformasi gunungapi secara episodik dengan menggunakan metode survei GPS.

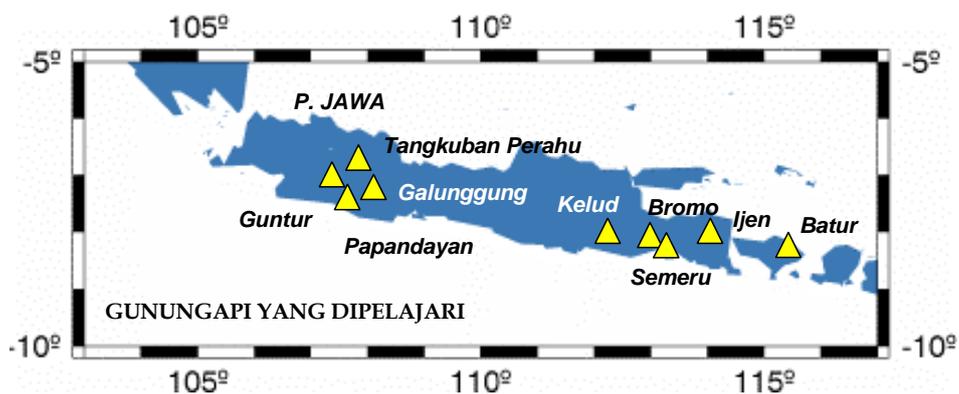
Dalam konteks studi deformasi gunungapi dengan metode survei GPS, ada beberapa keunggulan dan keuntungan dari GPS yang perlu dicatat, yaitu antara lain:

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 gunungapi 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-gunungapi 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 kontinyu tanpa tergantung waktu (siang maupun malam), dalam segala kondisi cuaca. Dengan karakteristik semacam ini maka pelaksanaan survei GPS untuk studi deformasi gunungapi dapat dilaksanakan secara efektif dan fleksibel.

Pemantauan deformasi gunungapi dengan metode survei GPS ini sudah diterapkan pada banyak gunungapi di luar negeri. Di Indonesia beberapa gunungapi telah dipantau karakteristik deformasinya dengan metode survei GPS, dimana lokasi dari gunung-gunungapi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 berikut. Pelaksanaan survey-survei GPS di gunung-gunungapi tersebut dilaksanakan bersama-sama oleh Dept. Teknik Geodesi ITB bekerjasama dengan Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Beberapa hasil dari studi deformasi gunungapi dengan metode survei GPS tersebut diberikan di Abidin, et al [8-15].



Gambar 2 Beberapa gunungapi yang dipantau.

3 Gunungapi Ijen

Gunungapi Ijen merupakan gunungapi strato berdanau kawah yang terletak di Kecamatan Licin dan Kecamatan Sempol, Kabupaten Banyuwangi dan Bondowoso, Jawa Timur. Gunung ini berjarak sekitar 33 km dari Banyuwangi dengan posisi geografi sekitar $8^{\circ}3,5'$ LS dan $114^{\circ}14,5'$ BT. Ketinggian danau kawah Gunung Ijen mencapai 2145 m dan tepi kawahnya mencapai 2386 dari permukaan laut [16]. Saat ini kawah Ijen berukuran sekitar 1160 m x 1160 m, dengan danau kawah Ijen berukuran sekitar 910 m x 600 m serta mempunyai kedalaman sampai 200 m. Bentuk dan konfigurasi dari kawah dan danau kawah

Gunung Ijen ditunjukkan pada Gambar 3 berikut, yang merupakan citra satelit dari *Google Earth* [17].



Gambar 3 Gunungapi Ijen.

Letusan yang pertama kali tercatat dalam sejarah letusan Gunung Ijen terjadi pada tahun 1796 yang diperkirakan berupa letusan preatik. Selanjutnya juga tercatat letusan atau peningkatan aktivitas pada tahun-tahun 1817, 1917, 1936, 1952, 1962, 1976, 1991, 1993, 1999, 2000, 2001 dan 2004 [16]. Letusan yang pernah terjadi di Gunung Ijen adalah preatik dan magmatik. Letusan preatik lebih sering terjadi karena Gunung Ijen berdanau kawah. Adanya kontak langsung atau tidak langsung antara air dengan magma membentuk uap yang bertekanan tinggi yang menyebabkan terjadinya letusan. Dari sejarah kegiatannya, sejak tahun 1991 letusan preatik terjadi setiap satu sampai 3 tahun sekali. Sedangkan tahun 1917 sampai 1991 periode letusan tercatat 6 sampai 16 tahun sekali. Letusan besar yang menelan korban manusia adalah pada tahun 1817.

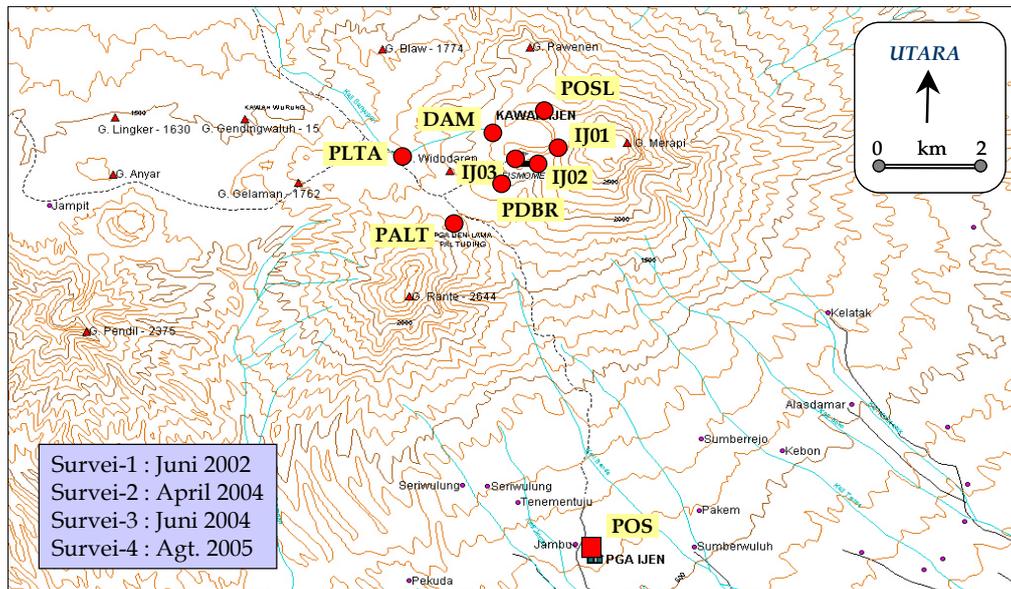
Pemantauan aktifitas Gunung Ijen dilakukan dari Pos Pengamatan Gunungapi

(PGA) yang berlokasi di Kampung Pangsungsari, Licin, Kecamatan Glagah, Kabupaten Banyuwangi. Pemantauan dilaksanakan secara visual maupun menggunakan instrumen. Pengamatan visual yang langsung dipantau dari Pos PGA antara lain: suhu udara, curah hujan arah angin, bau gas belerang, serta tinggi dan warna hembusan asap kawah. Pengamatan secara visual yang dilakukan secara rutin setiap minggu oleh pengamat Gunungapi Ijen dengan cara pemeriksaan puncak yang meliputi danau kawah yaitu: warna air danau kawah, suhu udara, suhu air permukaan danau, tinggi dan tekanan uap air danau kawah serta solfatara yang meliputi asap solfatara, warna, tekanan dan bau gas dari solfatara.

Pemantauan aktivitas vulkanik secara terus-menerus dilakukan dengan peralatan seismometer yang dipasang di sekitar kawah Ijen, yang datanya ditelemetrikan ke perekam gempa di PGA Ijen. Hasil rekaman seismograf menunjukkan seismisitas G. Ijen didominasi oleh gempa-gempa dangkal vulkanik (VB) dan tremor menerus, tetapi gempa vulkanik dalam (VA), tektonik lokal, tektonik jauh, hembusan terekam juga. Pengukuran suhu solfatara, mata air panas Sibanteng dan suhu air danau dilakukan secara rutin seminggu sekali, sedangkan pengamatan geokimia, geofisika dan geodetik lainnya dilakukan secara temporer. Dalam kaitannya dengan survei GPS, pengamatan telah dilaksanakan pada Juni 2002, April 2004, Juni 2004 dan Agustus 2005.

4 Survei GPS di Gunungapi Ijen

Sampai saat ini, survei GPS untuk studi deformasi gunung Ijen telah dilaksanakan sebanyak empat kali, yaitu Juni 2002, April 2004, Juni 2004 dan Agustus 2005. Pengukuran GPS dilaksanakan di delapan titik pemantau yang lokasi dan distribusinya ditunjukkan pada Gambar 4. Tiga titik GPS, yaitu IJ01, IJ02 dan IJ03, terletak di bibir kawah aktif. Titik DAM terletak di pinggir danau kawah di dekat hulu sungai Banyupahit. Titik PDBR terletak di jalan menuju kawah, tepatnya di Pondok Bundar (PDBR), titik PLTA di kawasan pembangkit listrik Sungai Banyupait (PLTA), titik POSL terletak di tebing kawah sebelah Utara. Titik PALT terletak di kawasan Paltuding yang merupakan pos kehutanan dan pos permulaan di pinggir jalan raya untuk mendaki ke kawah Ijen. Sebagai titik referensi digunakan titik POS di halaman Pos Pengamatan Gunungapi Ijen. Karena jaraknya yang relatif jauh dari Ijen, titik POS dapat diasumsikan stabil dan tidak dipengaruhi oleh deformasi gunungapi Ijen.



Gambar 4 Lokasi dan distribusi titik-titik pengamatan GPS di Gunung Ijen.

Pengukuran GPS di titik-titik pengamatan dilaksanakan menggunakan *receiver* GPS tipe geodetik dua-frekuensi. Lama pengamatan di setiap titik umumnya berkisar antara 2 sampai 13 jam, sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 1. Lama pengamatan di titik POS umumnya jauh lebih panjang.

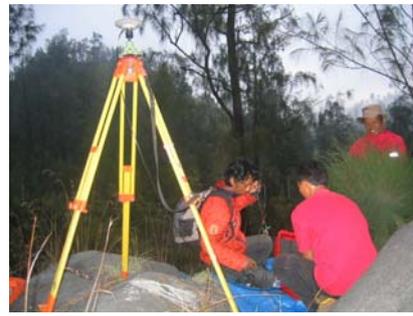
Tabel 1 Waktu dan lama pengamatan GPS di G. Ijen.

Survey GPS	Mulai Pengamatan	Titik Pengamatan (Lama Pengamatan dalam jam)
Survey - 1	24 Juni 2002	POS (23.8), PALT (10.3), IJ01 (6.0), IJ02 (6.5), IJ03 (7.3)
Survey - 2	24 April 2004	POS (58.0), PALT (3.2), IJ01 (3.0), IJ02 (3.1), IJ03 (3.4), PDBR (2.4), PLTA (3.0), DAM (2.8)
Survei - 3	25 Juni 2004	POS (25.1), PALT (13.1), IJ01 (7.5), IJ02 (7.1), IJ03 (6.6), PDBR (8.1), PLTA (13.3), DAM (7.0)
Survei - 4	17 Agustus 2005	POS (63.0), PALT (8.5), IJ01 (6.0), IJ03 (6.1), PDBR (7.6), PLTA (8.7), DAM (6.0), POSL (6.1)

Contoh pelaksanaan survei GPS di titik-titik pengamatan ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Titik POS



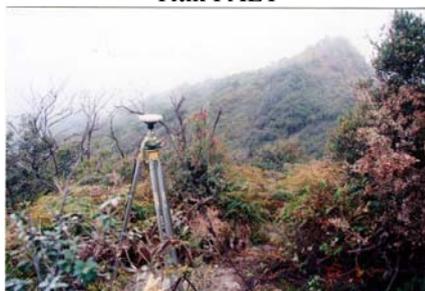
Titik PLTA



Titik PALT



Titik IJ01



Titik IJ02



Titik IJ03



Titik DAM



Titik PDBR

Gambar 5 Titik-titik pengamatan GPS di Gunung Ijen.

Dalam konteks pelaksanaan survei GPS perlu dicatat bahwa menurut [18], sejak bulan April-Mei 2004 terjadi peningkatan aktivitas gunung Ijen yang puncaknya terjadi pada Oktober 2004. Selanjutnya aktivitas Ijen menurun dan pada Februari 2005 statusnya kembali ke aktif normal. Dengan kata lain survei-survei GPS ke 1 dan 4 dilaksanakan pada saat aktivitas Ijen dalam status aktif normal, sedangkan survei-survei ke 2 dan 3 dilaksanakan pada saat terjadi peningkatan aktivitas gunung Ijen.

5 Pengolahan Data dan Hasil

Pengolahan data survei GPS dilaksanakan menggunakan dua tipe software GPS, yaitu tipe ilmiah dan tipe komersial. Software tipe ilmiah Bernese 4.2 [19]. digunakan untuk menentukan koordinat titik POS dari titik geodetik orde-nol dan juga stasiun IGS Indonesia yang berada di Bakosurtanal, Cibinong. Sedangkan software komersial SkiPro digunakan untuk menentukan koordinat titik-titik GPS lainnya relatif terhadap titik POS yang telah ditentukan koordinatnya. Untuk seluruh perhitungan digunakan orbit satelit yang teliti (*precise ephemeris*).

Koordinat geodetik (Lintang, Bujur, Tinggi Ellipsoid atau L,B,h) titik-titik dalam jaring GPS berikut simpangan bakunya, yang diperoleh dari proses pengolahan data keempat survei GPS yang telah dilaksanakan di G. Ijen, diberikan pada Tabel 2. Koordinat geodetik diberikan dalam datum WGS 1984. Berdasarkan nilai deviasi standar setiap komponen koordinat yang berada pada level beberapa mm, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 6, dapat disimpulkan bahwa pengolahan data GPS telah dilaksanakan dengan baik.

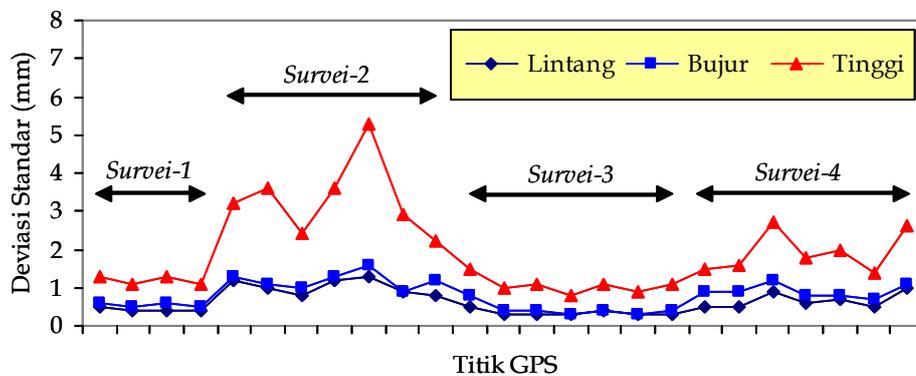
Tabel 2 Koordinat titik-titik GPS di Gunung Ijen.

Titik	L	σ_L (mm)	B	σ_B (mm)	h (m)	σ_h (mm)
Survei GPS-1						
POS	8° 08' 48,46409" S	0	114° 15' 25,32452" E	0	769,1810	0
IJ01	8° 03' 51,58501" S	0,5	114° 14' 37,09581" E	0,6	2365,5294	1,3
IJ02	8° 03' 47,36753" S	0,4	114° 14' 25,92873" E	0,5	2419,3326	1,1
IJ03	8° 03' 43,91977" S	0,4	114° 14' 22,18861" E	0,6	2409,9782	1,3
IJ04	8° 04' 26,92606" S	0,4	114° 13' 24,41208" E	0,5	1902,5797	1,1
Survei GPS-2						
POS	8° 08' 48,46409" S	0	114° 15' 25,32452" E	0	769,1810	0
IJ01	8° 03' 51,58663" S	1,2	114° 14' 37,09499" E	1,3	2365,5121	3,2
IJ02	8° 03' 47,36691" S	1,0	114° 14' 25,92896" E	1,1	2419,4466	3,6
IJ03	8° 03' 43,91931" S	0,8	114° 14' 22,18930" E	1,0	2410,0315	2,4
PALT	8° 04' 26,92419" S	1,2	114° 13' 24,41641" E	1,3	1902,6816	3,6
PDBR	8° 03' 54,06107" S	1,3	114° 14' 11,68379" E	1,6	2227,9978	5,3
PLTA	8° 03' 45,63049" S	0,9	114° 12' 58,12176" E	0,9	1750,0104	2,9
DAM	8° 03' 30,72460" S	0,8	114° 14' 15,12986" E	1,2	2223,1114	2,2

Tabel 2 Koordinat titik-titik GPS di Gunung Ijen (Lanjutan).

Titik	L	σ_L (mm)	B	σ_B (mm)	h (m)	σ_h (mm)
Survei GPS-3						
POS	8° 08' 48,46409" S	0	114° 15' 25,32452" E	0	769,1810	0
IJ01	8° 03' 51,58508" S	0,5	114° 14' 37,09710" E	0,8	2365,6474	1,5
IJ02	8° 03' 47,36579" S	0,3	114° 14' 25,92879" E	0,4	2419,4995	1,0
IJ03	8° 03' 43,91799" S	0,3	114° 14' 22,18873" E	0,4	2410,1103	1,1
PALT	8° 04' 26,92528" S	0,3	114° 13' 24,41341" E	0,3	1902,6533	0,8
PDBR	8° 03' 54,06085" S	0,4	114° 14' 11,69047" E	0,4	2227,9977	1,1
PLTA	8° 03' 45,63003" S	0,3	114° 12' 58,12230" E	0,3	1749,9651	0,9
DAM	8° 03' 30,72314" S	0,3	114° 14' 15,12995" E	0,4	2223,1265	1,1
Survei GPS-4						
POS	8° 08' 48,46409" S	0	114° 15' 25,32452" E	0	769,1810	0
IJ01	8° 03' 51,58449" S	0,5	114° 14' 37,09629" E	0,9	2365,6724	1,5
IJ03	8° 03' 43,91878" S	0,5	114° 14' 22,18948" E	0,9	2410,1055	1,6
PALT	8° 04' 26,92572" S	0,9	114° 13' 24,41308" E	1,2	1902,6715	2,7
PDBR	8° 03' 54,06196" S	0,6	114° 14' 11,69147" E	0,8	2228,0087	1,8
PLTA	8° 03' 45,63015" S	0,7	114° 12' 58,12303" E	0,8	1749,9941	2,0
DAM	8° 03' 30,72457" S	0,5	114° 14' 15,13075" E	0,7	2223,0959	1,4
POSL	8° 03' 15,46975" S	1,0	114° 14' 46,81446" E	1,1	2410,0050	2,6

Dari Gambar 6 terlihat bahwa sesuai dengan teori, komponen tinggi mempunyai deviasi standar yang relatif lebih rendah dibandingkan komponen horizontal (Lintang, Bujur). Gambar ini menunjukkan bahwa dari keempat survei, deviasi standar dari survei-2 relatif lebih rendah dibandingkan dengan ketiga survei lainnya. Hal ini disebabkan waktu pengamatan di setiap titik yang relatif lebih pendek dibandingkan pada tiga survei lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 sebelumnya.



Gambar 6 Deviasi standar komponen koordinat titik GPS di Gunung Ijen.

Dari nilai koordinat titik-titik pengamatan GPS di Gunung Ijen dari waktu ke waktu, dapat diturunkan beberapa parameter lainnya, seperti vektor pergeseran

titik, perubahan jarak horisontal, perubahan beda tinggi, serta lokasi sumber tekanan; yang kesemuanya bermanfaat untuk mempelajari karakteristik deformasi Gunung Ijen. Dalam studi deformasi G. Ijen ini, vektor pergeseran dari stasion GPS (dE, dN, dh) merupakan selisih dari koordinat stasion tersebut (E, N, h) yang diperoleh dari dua survei GPS yang berdekatan, dimana (E, N) adalah komponen *Easting* dan *Northing* dalam sistem proyeksi UTM dan h adalah komponen tinggi geodetik.

Dalam studi ini, untuk mengecek signifikansi secara statistik dari vektor pergeseran hasil estimasi GPS tersebut, *congruency test* [20] diterapkan untuk variabel berikut:

$$\delta d_{ij} = (dE_{ij}^2 + dN_{ij}^2 + dh_{ij}^2)^{1/2}, \quad (1)$$

dimana δd_{ij} adalah pergeseran titik dalam periode dari epok i sampai epok j .

Hipotesa nol yang digunakan pada uji statistik ini adalah titik tidak bergeser dalam selang dari kala i ke kala j , sehingga:

$$\text{hipotesa nol} \quad H_0 : \delta d_{ij} = 0, \quad (2)$$

$$\text{hipotesa alternatif} \quad H_a : \delta d_{ij} \neq 0. \quad (3)$$

Statistik yang digunakan untuk uji pergeseran ini adalah:

$$T = \delta d_{ij} / \sigma(\delta d_{ij}), \quad (4)$$

dimana $\sigma(\delta d_{ij})$ adalah deviasi standar dari δd_{ij} . Statistik T mempunyai distribusi Student (t) kalau hipotesa nol adalah benar. Selang dimana hipotesa nol ini ditolak adalah [21]:

$$T > t_{df, \alpha/2}, \quad (5)$$

dimana df adalah derajat kebebasan dan α adalah level signifikan yang digunakan untuk uji statistik. Karena dalam kasus survei GPS, data pergeseran titik diturunkan dari data pengamatan beberapa satelit selama 3 – 10 jam dengan interval waktu 15 detik maka dapat diasumsikan $df \rightarrow \infty$. Dalam studi ini level kepercayaan 99% (i.e. $\alpha=1\%$) digunakan, dimana nilai $t_{\infty, 0,005}$ adalah 2,576 [21].

Karakteristik deformasi G. Ijen selanjutnya dipelajari dengan menggunakan vektor pergeseran horisontal dan vertikal dari titik-titik pengamatan GPS yang telah lulus uji statistik di atas.

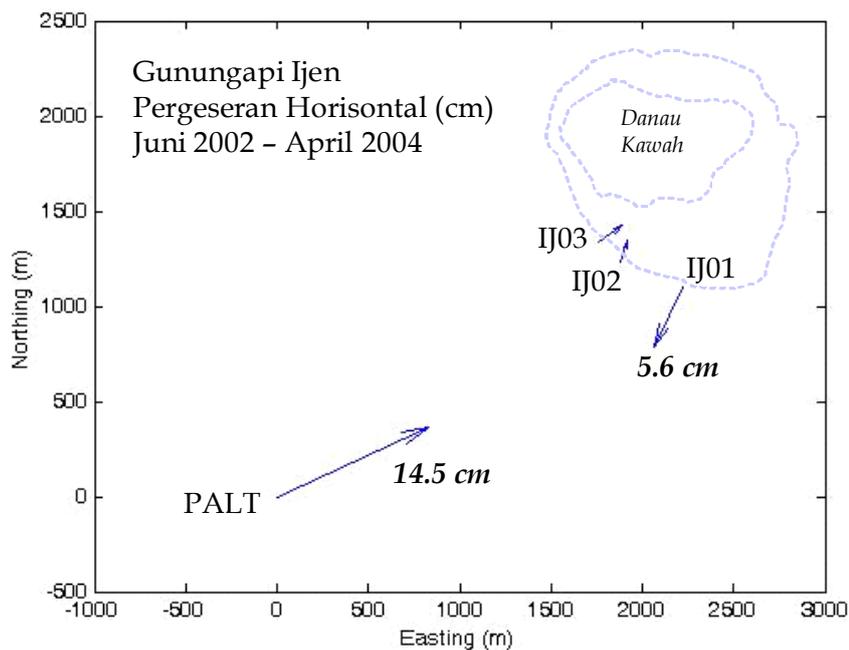
6 Karakteristik Deformasi Gunung Ijen

Berdasarkan vektor pergeseran horisontal dan vertikal dari hasil empat survei GPS, akan dipelajari karakteristik deformasi Gunung Ijen pada tiga periode di

antara waktu-waktu survei tersebut.

6.1 Periode Juni 2002 sampai April 2004

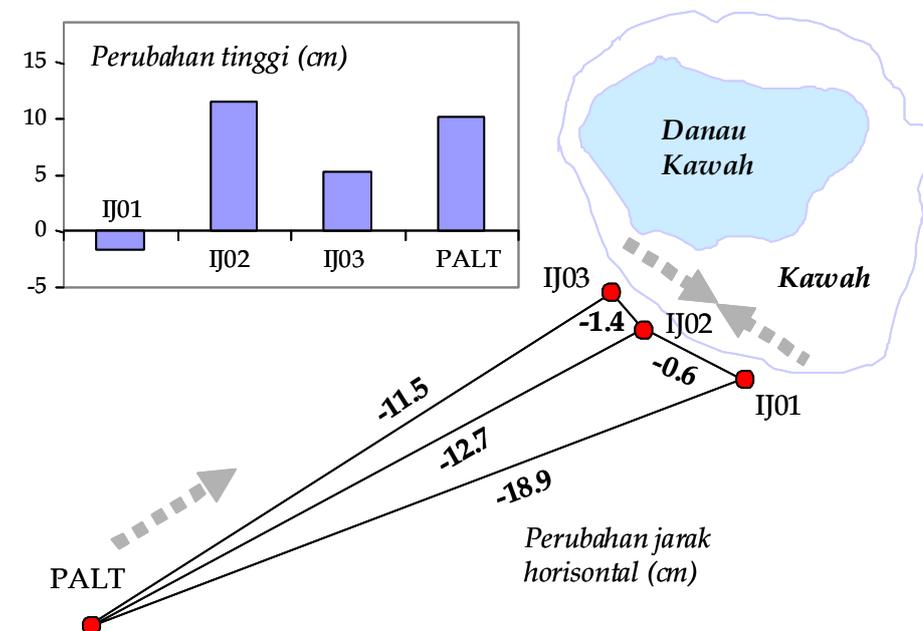
Vektor pergeseran horizontal titik-titik GPS dari waktu ke waktu diperoleh dengan mengurangkan koordinat horizontal titik (Easting dan Northing UTM) yang bersangkutan dari dua waktu pengamatan yang berurutan. Gambar 7 berikut menunjukkan vektor pergeseran horizontal pada periode (Juni 2002-April 2004).



Gambar 7 Vektor pergeseran horizontal pada periode (Juni 2002-April 2004).

Untuk memahami vektor pergeseran ini perlu dicatat bahwa menurut Hendrasto [18], aktivitas gunung Ijen meningkat sejak April-Mei 2004 yang puncaknya terjadi pada Oktober 2004; kemudian menurun dan pada Februari 2005 statusnya kembali ke aktif normal. Oleh sebab itu pada periode survei GPS ke 1 dan 2 ini, yaitu antara Juni 2002 dan April 2004, vektor pergeseran akan merefleksikan aktivitas awal dari G. Ijen. Karena pusat tekanan masih relatif dalam dan dalam proses pergerakan ke permukaan maka titik PALT akan tertekan ke arah kawah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, dengan pergeseran sekitar 14.5 cm. Pada periode ini pergeseran titik-titik di kawasan puncak (IJ01, IJ02, dan IJ03) relatif lebih kecil, yaitu dalam orde beberapa cm.

Peningkatan aktivitas awal ini juga ditunjukkan dengan adanya pemendekan jarak horisontal antara titik PALT dengan titik-titik IJ01, IJ02 dan IJ03, seperti diilustrasikan pada Gambar 8, karena adanya pergeseran titik PALT yang relatif besar ke arah kawah (lihat Gambar 7 sebelumnya). Gambar 8 menunjukkan bahwa terdapat pemendekan jarak horisontal dari titik PALT sampai kawah sekitar 12 sampai 19 cm, atau terjadi kontraksi sekitar 52 sampai 76 ppm (*part per million*). Jarak antara titik-titik di kawah juga memendek sekitar 1-2 cm, yang menunjukkan adanya kompresi di kawasan puncak akibat adanya peregangan pada tubuh gunungapi di bawahnya akibat lokasi pusat tekanan yang relatif masih dalam. Disamping itu pada periode ini juga teramati adanya kenaikan tinggi dari titik-titik PALT, IJ02 dan IJ03 sekitar 5 sampai 12 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 8, serta penurunan tinggi titik IJ01 sekitar 2 cm. Dari fakta ini bisa disimpulkan bahwa pada periode ini lokasi pergerakan pusat tekanan ke permukaan kemungkinan berada di sebelah Barat garis penghubung PALT dan IJ01.

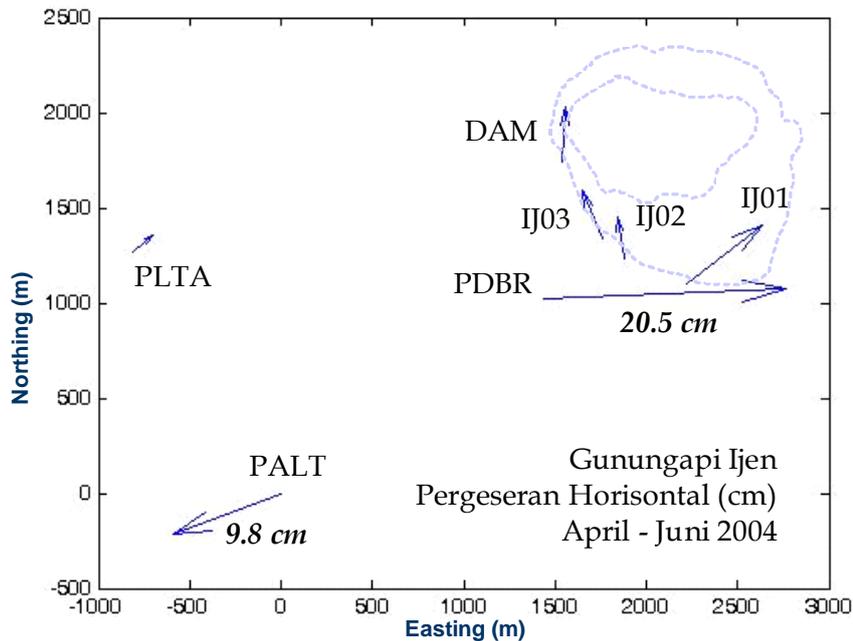


Gambar 8 Perubahan tinggi dan jarak horisontal pada periode (Juni 2002-April 2004).

6.2 Periode April 2004 sampai Juni 2004

Vektor pergeseran horisontal pada periode survei GPS ke 2 dan 3, yaitu antara April 2004 dan Juni 2004, ditunjukkan pada Gambar 9, dan merepresentasikan

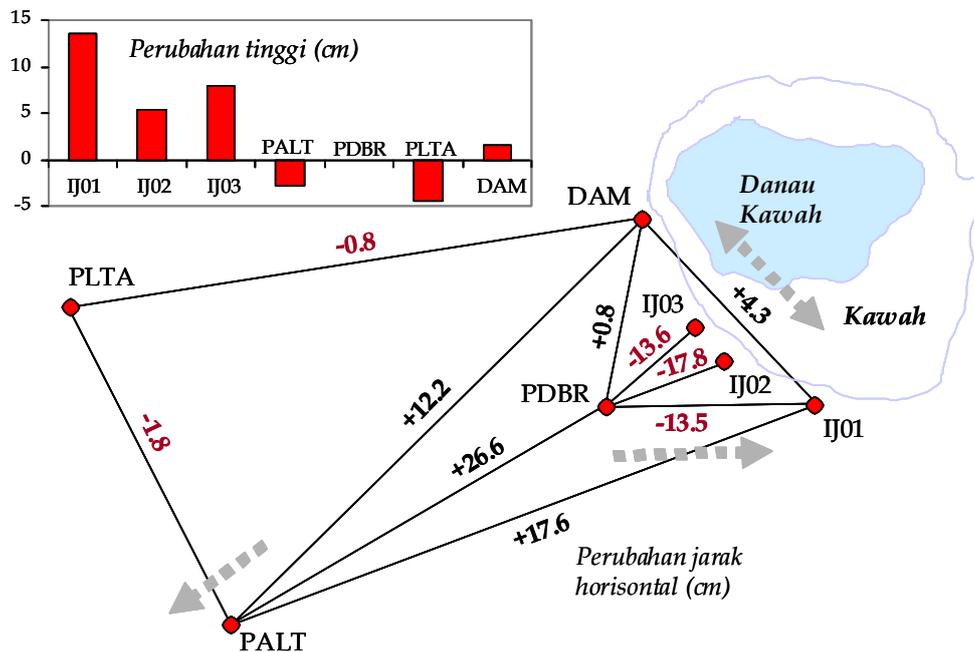
aktivitas Gunung Ijen yang semakin meningkat.



Gambar 9 Vektor pergeseran horizontal pada periode (April - Juni 2004).

Dari Gambar 9 ini terlihat bahwa pusat tekanan semakin mendekati permukaan dan menekan titik-titik PALT dan PDBR ke arah yang berlawanan. Kalau melihat arah vektor pergeseran titik-titik PALT dan PDBR yang berlawanan ini, kemungkinan pada periode ini lokasi pusat tekanan sudah berada antara ketinggian titik-titik tersebut. Melihat nilai pergeseran titik-titik PDBR dan PALT yang masing-masing sekitar 20,5 cm dan 9,8 cm, kemungkinan pusat tekanan ini berlokasi lebih dekat ke titik PDBR pada periode ini.

Fenomena aktivitas gunung Ijen yang semakin meningkat ini juga ditunjukkan oleh perubahan jarak horizontal antar titik dan tinggi titik pengamatan yang ditunjukkan pada Gambar 10. Dari perubahan jarak horizontal terlihat adanya fenomena ekspansi (dilatasi) di kawasan kawah dan tubuh gunung di bawahnya, yang ditunjukkan dengan adanya pemanjangan jarak antara titik IJ01 dan DAM yang memotong kawah sekitar 4 cm. Disamping itu juga terlihat adanya peregangan dalam arah horizontal antara PALT dan DAM, IJ01 dan PDBR dalam orde sekitar 1-3 dm. Peregangan yang mendesak titik PDBR ini juga menyebabkan pemendekan jarak antara PDBR dengan IJ02 dan IJ03 di kawasan kawah.

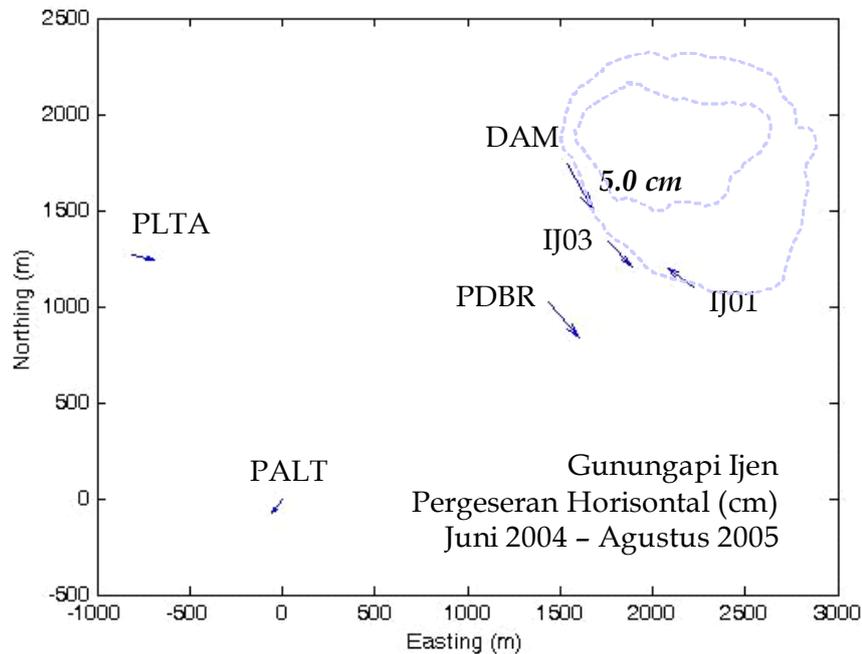


Gambar 10 Perubahan tinggi dan jarak horisontal pada periode (April - Juni 2004).

Proses penekanan yang semakin mendekati puncak dalam periode ini juga ditunjukkan dengan adanya kenaikan tinggi titik-titik IJ01, IJ02, IJ03 dan DAM yang berada di kawasan puncak, serta penurunan titik-titik PALT dan PLTA yang berada di kaki gunung (lihat Gambar 10). Patut dicatat bahwa tinggi titik PDBR relatif tidak berubah pada periode ini. Ini mengindikasikan bahwa lokasi pusat tekanan pada periode ini kemungkinan mempunyai ketinggian yang relatif sama dengan titik PDBR.

6.3 Periode Juni 2004 sampai Agustus 2005

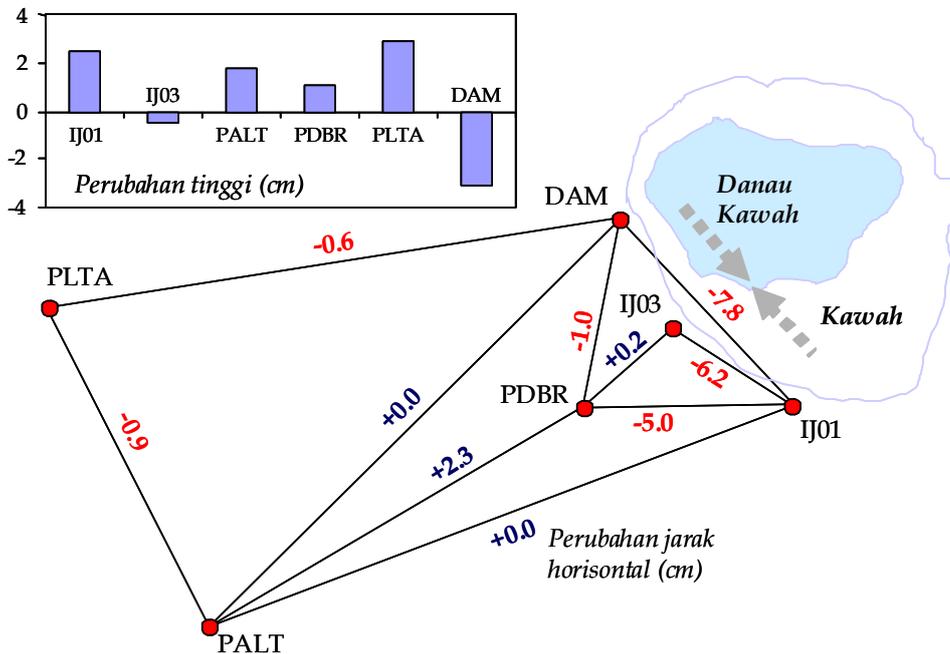
Periode antara survei GPS ke 3 dan 4 meliputi periode peningkatan aktivitas Gunung Ijen dari Juni 2004 sampai Oktober 2004 (sekitar 3-4 bulan), dan selanjutnya periode penurunan aktivitas dari Oktober 2004 sampai Februari 2005 (sekitar 4-5 bulan). Karena vektor GPS hanya merepresentasikan pergeseran dari awal sampai akhir pengamatan secara deskriptif, maka nilai vektor pergeseran akan hanya menunjukkan resultan dari kedua proses dan terutama menunjukkan proses relaksasi aktivitas dari Juni 2004 sampai Agustus 2005, seperti terlihat pada Gambar 11, tanpa secara jelas menunjukkan dampak dari kenaikan aktivitas dari Juni sampai Oktober 2004. Proses relaksasi ini juga terlihat pada perubahan jarak horisontal dan tinggi titik pengamatan yang ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 11 Vektor pergeseran horisontal pada periode (Juni 2004 – Agustus 2005).

Gambar 12 menunjukkan bahwa pada periode (Juni 2004 – Agt. 2005) secara umum terdapat pemendekan jarak antar titik-titik di kawasan puncak, yaitu antara IJ01 dan DAM, IJ01 dan PDBR, IJ01 dan IJ03 serta PDBR dan DAM. Pemendekan jarak yang menunjukkan adanya proses relaksasi aktivitas ini berkisar antara 1 sampai 8 cm. Fenomena relaksasi yang relatif lebih kecil juga terjadi di kawasan antara PALT, PLTA dan DAM, yaitu dalam orde 1 cm atau lebih kecil.

Kalau kita bandingkan vektor-vektor pergeseran titik yang diperoleh dari empat survei GPS, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, 8 dan 10 sebelumnya, terlihat bahwa setelah aktivitas Gunung Ijen kembali ke status aktif normal, titik-titik pengamatan yang sebelumnya bergeser selama proses peningkatan aktivitas gunungapi, tidak kembali ke posisinya semula. Fenomena ini ditunjukkan pada contoh yang diberikan pada Tabel 3. Dari Tabel ini terlihat bahwa setelah aktivitas Ijen mereda dan kembali ke status aktif normal, posisi dari titik-titik IJ01, IJ03 dan PALT pada Agustus 2005 masih berbeda sekitar 1-3 cm untuk komponen horisontal serta sekitar 9-14 cm untuk komponen vertikal, dibandingkan posisinya pada Juni 2002 yang notabene pada saat itu aktivitas Ijen juga berada dalam status aktif normal.



Gambar 12 Perubahan tinggi dan jarak horisontal pada periode (Juni 2004 – Agt. 2005).

Tabel 3 Perubahan koordinat dari Survei-1 (Juni 2002) ke Survei-4 (Agustus 2005)

Titik	dE (cm)	dN (cm)	dh (cm)
IJ01	1,5	1,6	14,3
IJ03	2,7	3,1	12,7
PALT	3,1	1,1	9,2

7 Kesimpulan dan Catatan Penutup

Dari hasil survei GPS yang telah dilaksanakan pada Juni 2002, April 2004, Juni 2004 dan Agustus 2005 teramati bahwa pada saat aktivitas gunung Ijen meningkat, pergeseran titik-titik pengamatan dapat mencapai sekitar 1-2 dm, baik dalam komponen horisontal maupun vertikal. Meskipun begitu perlu dicatat bahwa deformasi dalam level ini belum disertai dengan aktivitas letusan dari gunung Ijen.

Berdasarkan pengalaman tim peneliti selama ini, dapat disimpulkan bahwa metode survei GPS mempunyai kemampuan untuk mempelajari deformasi

gunungapi dengan ketelitian relatif (vektor pergeseran titik) yang cukup tinggi, yaitu sampai level presisi sampai beberapa mm. Meskipun begitu, pencapaian tingkat ketelitian yang tinggi ini bukanlah suatu hal yang mudah. Untuk mencapai tingkat kepresisian mm tersebut diperlukan penggunaan receiver GPS tipe geodetik dua-frekuensi, perencanaan survei yang cermat, strategi pengamatan yang cermat, serta strategi pengolahan data yang baik dengan memanfaatkan perangkat lunak ilmiah untuk pengolahan datanya. Dengan kemampuannya untuk memantau sinyal deformasi pada tingkat ketelitian yang cukup tinggi tersebut, maka studi deformasi gunung Ijen dengan menggunakan metode survei GPS ini akan terus dilanjutkan. Untuk mendapatkan sinyal deformasi yang lebih baik dan lebih andal, penguatan jaringan GPS dengan penambahan beberapa titik baru juga sebaiknya direalisasikan untuk survei-survei selanjutnya. Gambar 13 menunjukkan salah satu alternatif dari jaring pemantau GPS yang telah diperkuat dengan rencana beberapa lokasi titik baru.

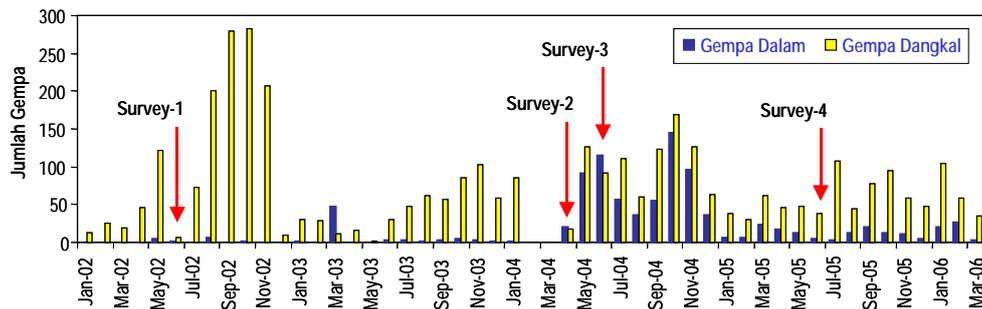


Gambar 13 Alternatif penguatan jaring GPS di Gunung Ijen.

Akhirnya perlu ditekankan bahwa dalam konteks kegiatan studi deformasi gunung Ijen ini, disamping melanjutkan pelaksanaan metode survei GPS, korelasi yang lebih komprehensif dan sistematis antara karakteristik deformasi yang diperoleh dari GPS dengan karakteristik seismisitas, geologis, magmatis

dan hidrologis dari gunung Ijen dan kawasan sekitarnya, juga perlu dilaksanakan secara baik.

Sebagai contoh, kalau kita amati jumlah gempa vulkanik yang terukur di gunungapi Ijen dari awal 2002 sampai awal 2006 yang diberikan pada Gambar 14, serta kita korelasikan dengan pola deformasi yang diperoleh dari survei GPS seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, terlihat secara umum adanya pola korelasi yang positif. Meskipun begitu secara detil, korelasi antara pola kegempaan dan pola deformasi gunungapi Ijen ini masih tetap perlu diteliti lebih lanjut untuk mendapatkan karakteristik korelasinya yang lebih baik.



Gambar 14 Jumlah gempa vulkanik gunungapi Ijen.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat terlaksana berkat adanya kerjasama dan dukungan dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) dan Kelompok Keilmuan Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB. Dalam hal ini kami ucapkan banyak terima kasih pada Dr. Mas Atje Purbawinata dan Ir. M. Hendrasto MSc dari PVMBG, untuk dukungan administratif, transportasi dan akomodasi sekaligus dukungan moralnya bagi kerjasama ini. Ucapan terima kasih yang khusus juga perlu kami sampaikan pada para mahasiswa program studi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB, para staf PVMBG serta pengamat Gunungapi Ijen yaitu pak Heri, pak Zaini, dan pak Slamet yang telah banyak membantu tim peneliti dalam suksesnya pelaksanaan survei GPS di kawasan gunung Ijen.

Daftar Pustaka

- [1] McGuire B., Kilburn, C.R.J. & Murray, J. (eds), *Monitoring Active Volcanoes*, UCL Press Limited, London, 421 pp., 1995.
- [2] Scarpa, R. and R.I. Tilling (eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer Verlag, Berlin, 841 pp, 1996.

- [3] Van der Laat, R., *Ground-Deformation Methods and Results*, In Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards by R. Scarpa and R.I. Tilling (eds.), Springer Verlag, Berlin, pp. 147-168, 1996.
- [4] McGuire, W.J., *Monitoring Active Volcanoes – an Introduction*, In Monitoring Active Volcanoes by B. McGuire, C.R.J. Kilburn, and J. Murray (Eds), pp. 1-31, UCL Press Limited, London, 421 pp, 1995.
- [5] Abidin, H.Z., *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*, P.T. Pradnya Paramita, Jakarta, Second edition, ISBN 979-408-377-1, 268 pp, 2000.
- [6] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J., *Global Positioning System, Theory and Practice*. Third, Revised Edition, Springer Verlag, Wien, 1994.
- [7] Abidin, H.Z., Suganda, O.K., Kusuma, M.A., Meilano, I., Setyadji, B., Muhardi, D., Sukhyar, R., Kahar, J. & Tanaka, T., *Monitoring the Deformation of Guntur Volcano (West Java, Indonesia) Using GPS Survey Method: Status and Future Plan*, Proceedings of International Symposium on Natural Disaster Prediction and Mitigation, Kyoto, December 1-5, pp. 81-88, 1997.
- [8] Abidin, H.Z., *Monitoring The Deformation of Volcanoes In Indonesia Using Repeated GPS Survey Method: Status, Results and Future Plan*, Proceedings of the International Workshop on Advances in GPS Deformation Monitoring, ISBN: 1-86308-073-2, Curtin University, Perth, 24-25 September, Paper no. 18, 1998.
- [9] Abidin, H.Z., Suganda, O.K., Kusuma, M.A., Meilano, I., Gamal, M., Widodo, M.S., Rizos, C., *Hasil Awal Survei GPS untuk Pemantauan Deformasi G. Kelut dan G. Batur*, *Survey dan Pemetaan*, Jurnal Ikatan Surveyor Indonesia, ISSN: 0125-9466, **XII**(5), Oktober, 13-18, 1999.
- [10] Abidin, H.Z., Suganda, O.K., Kusuma, M.A., Meilano, I., Darmawan, D., Gamal, M., Tanaka, T. & Wirakusumah, A.D., *On The Strategy of Mogi Model Implementation for Pressure Source Estimation Using GPS Vector Displacements*, Paper presented at General Assembly of IAVCEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior) 2000, Denpasar, Bali, 18-22 July, 2000.
- [11] Abidin, H.Z., Darmawan, D., Kusuma, M.A., Hendrasto, M., Suganda, O.K., Gamal, M., Kimata, F. & Rizos, C., *Studi Deformasi Gunung Kelut dengan Metode Survei GPS*, *Surveying & Geodesi*, Jurnal Ilmiah Jurusan Teknik Geodesi ITB, ISSN: 0852-0569, **XI**(2), Mei, 11-18, 2001.
- [12] Abidin, H.Z., Hendrasto, M., Andreas, H., Darmawan, D., Kusuma, M.A., Gamal, M., Suganda, O.K., Kusnadi, I. & Wirakusumah, A.D., *Studi Deformasi Gunungapi Batur dengan Metode Survei GPS*, *Surveying & Geodesi*, Jurnal Ilmiah Jurusan Teknik Geodesi ITB,

- ISSN: 0852-0569, XII(3), September, 1-10, 2002.
- [13] Abidin, H.Z., Andreas, H., Gamal, M., Hendrasto, M. & Suganda, O.K., *The Use of GPS Surveys Method for Volcano Deformation Monitoring in Indonesia*, Proceedings of the 7th South East Asian Survey Congress, Hongkong, 3-7 Nov, in CD-Rom, 2003.
 - [14] Abidin, H.Z., Andreas, H., Gamal, M., Hendrasto, M., Suganda, Ony K., Purbawinata, M.A., Irwan Meilano & Kimata, F., *The Deformation of Bromo Volcano as Detected by GPS Surveys Method*, Journal of Global Positioning Systems, **3**(1-2), 16-24, 2004.
 - [15] Abidin, H.Z., Andreas, H., Gamal, M., Suganda, O.K., Meilano, I., Hendrasto, M., Kusuma, M.A., Darmawan, D., Purbawinata, M.A., Wirakusumah, A.D. & Kimata, F., *Ground De-formation of Papandayan Volcano Before, During and After Eruption 2002 as Detected by GPS Surveys*, GPS Solutions, Springer-Verlag GmbH, ISSN: 1080-5370 (Paper) 1521-1886 (Online), DOI: 10.1007/s10291-005-0009-1, 2005.
 - [16] DVMBG, Situs internet dari *Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi*. Alamat situs: <http://www.vsi.esdm.go.id/> (26 Desember 2005).
 - [17] Google Earth, Situs internet dari *Google Earth*. Alamat situs; <http://earth.google.com/> (26 Desember 2005).
 - [18] Hendrasto, M., *Komunikasi Pribadi*, Kepala Seksi Pengamatan Gunungapi wilayah Jawa Tengah dan Timur, Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Selasa, 3 Januari, 2006.
 - [19] Beutler, G., Bock, H., Brockmann, E., Dach, R., Fridez, P., Gurtner, W., Hugentobler, U., Ineichen, D., Johnson, J., Meindl, M., Mervant, L., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T., Weber, R., *Bernese GPS software version 4.2*. U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez (eds.), Astronomical Institute, University of Berne, 515 pp, 2001.
 - [20] Caspary, W.F., *Concepts of Network and Deformation Analysis*. Monograph 11, School of Surveying, The University of New South Wales, Kensington, NSW, Australia, 183 pp, 1987.
 - [21] Wolf, Paul R. & Ghilani, C.D., *Adjustment Computations, Statistics and Least Squares in Surveying and GIS*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 564 pp, 1997.