Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 2 No. 2 Juni 2007: 73-86

Determinasi sumber tekanan dan analisis regangan utama di Gunung Api Papandayan untuk mengetahui korelasi dengan kegempaan

Ony Kurnia Suganda[1], Dina Anggreni Sarsito[2],
Hasanuddin Zaenal Abidin[2], dan Aris Kusnandar[2]

[1] Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi,
Jln. Diponegoro 57, Bandung
[2]Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesha 10, Bandung

Sari

Gunung Api Papandayan terletak di sebelah selatan kota Garut, sekitar 70 km dari kota Bandung, Jawa Barat. Berbagai metode pengamatan telah dilakukan dalam mengamati aktivitas Gunung Papandayan ini, baik secara periodik ataupun kontinu. Salah satu metode pengamatan yang dilakukan secara periodik adalah survei GPS (*Global Positioning System*). Pada dasarnya survei ini dilakukan guna mengetahui pola dan kecepatan deformasi yang terjadi pada tubuh Gunung Papandayan, baik secara horizontal maupun vertikal, dan juga unsur-unsur deformasi lainnya, seperti regangan dan vektor pergeseran. Dari hasil analisis unsur-unsur deformasi ini, dapat diketahui karakteristik deformasi yang terjadi pada gunung api tersebut. Selain itu, dibuat juga pemodelan guna menentukan lokasi dan besarnya sumber tekanan yang menjadi penyebab deformasi di gunung api ini berdasarkan model Mogi. Dengan membandingkan aktivitas gempa dangkal dan karakteristik deformasi hasil estimasi pengamatan survei GPS, baik sebelum, selama, ataupun sesudah letusan, dapat diketahui adanya korelasi antara aktivitas kegempaan dengan karakteristik deformasinya. Dari hasil pengamatan selama delapan kali survei GPS, ternyata deformasi Gunung Api Papandayan memiliki laju yang cepat, menurun dan menaiknya gempa dangkal langsung diikuti dengan terjadinya deflasi dan inflasi. Demikian juga sumber tekanannya bergerak naik turun berarah barat daya - timur laut.

Kata kunci: Survei GPS, regangan, korelasi, deformasi, kegempaan

Abstract

Papandayan volcano is located in the southern part of Garut regency, about 70 km southeast of Bandung, West Java. Monitoring the activities of Papandayan volcano has been done using various methods both continously and periodically, one of them is deformation method using repeated GPS (Global Positioning System) survey. GPS survey method is basically used to obtain the pattern and speed of the deformation body of the volcano, both in horizontal and vertical directions and also could be used to determined the location and size of the strain source of deformation based on Mogi model. By describing the shallow seismic activities before and after the eruption, this could show us the correlation of deformation characteristic and its seismic activities. By the result of eight GPS campaigns show that the deformation acceleration is running rapidly, where the fluctuation of shallow seismic activities are directly followed by inflation and deflation of volcano body. Pressure source movement running up and down to southwest-northeast direction. This correlation will lead us to the more comprehensive phenomena of a volcanic eruption, especially in Papandayan volcano.

***Keywords**: GPS survey, strain, correlation, deformation, seismicity*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Gunung Api Papandayan adalah salah satu gunung api aktif di Indonesia, yang terletak di wilayah Kabupaten Garut, Jawa Barat, pada posisi geografis 7° 19' LS dan 107° 44' BT, dengan ketinggian 2.662 meter di atas permukaan laut dan merupakan jenis gunung api tipe A (Gambar 1).

Berdasarkan catatan sejarah, gunung api ini pertama kali meletus pada tahun 1772, menelan korban sekitar dua ribu jiwa dan melenyapkan banyak sekali perkampungan, terutama di wilayah sebelah timur lautnya. Letusan kedua terjadi antara tahun 1923 sampai 1925 selama dua tahun, jenis letusannya semacam *Sector Faillure* meskipun proses hidrothermal berperan pada letusan tersebut. Lama waktu berlalu catatan letusan gunung api ini hanya dua saja, hingga pada bulan Juni 1998. Gunung api ini kembali memperlihatkan aktivitas vulkanik yang cukup berarti dengan terjadinya peningkatan jumlah gempa menurut catatan seismik, juga terjadinya semburan lumpur dan gas pada lubang fumarol kawah, yaitu pada kawah Mas, yang mencapai ketinggian kira-kira lima meter. Letusan terakhir terjadi pada tanggal 11 November 2002 yang meningkatkan aktivitas vulkanis di Gunung Papandayan, letusan besar terjadi 13 – 20 November 2002, aktivitas menurun hingga tanggal 21 Desember 2002. Akibat letusan ini terjadi longsoran pada dinding kawah Nangklak dan banjir di sepanjang aliran sungai Cibeureum Gede hingga ke sungai Cimanuk sejauh 7 km, yang merendam beberapa unit rumah dan menyebabkan erosi besar sepanjang alirannya. Penelitian dilaksanakan dengan menggunakan sumber daya (manusia, peralatan, dan perangkat lunak) yang ada di KK (Kelompok Kerja) Geodesi, Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, FTSL ITB dan PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi) Bandung, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.

Permasalahan

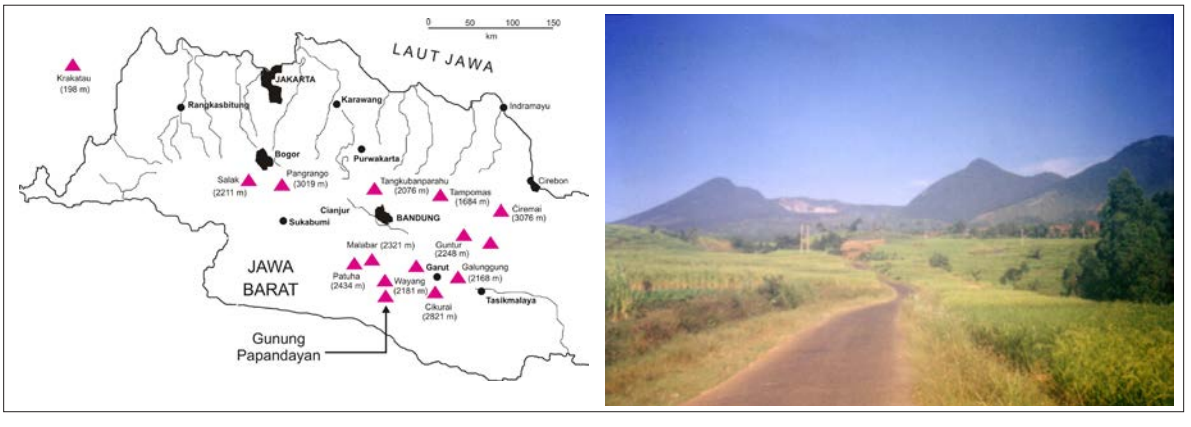
Pada prinsipnya deformasi dari tubuh gunung api dapat berupa penaikan permukaan tanah (inflasi) ataupun penurunan permukaan tanah (deflasi) (Gambar 2).

Dengan memahami tingkat korelasi data deformasi hasil observasi GPS (*Global Positioning System*) dengan data seismisitas (kegempaan), maka dimungkinkan sistem peringatan dini yang andal, serta sistem mitigasi bencana dari fenomena bencana alam gunung api yang tepat, baik dalam bentuk sistem, maupun rekayasa.

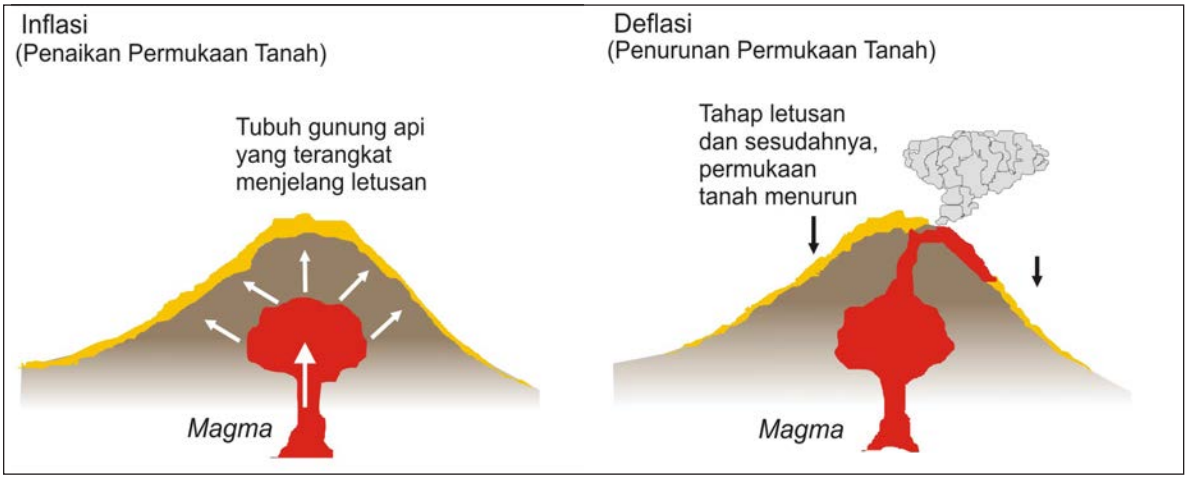
Pendekatan Masalah

Dalam penelitian ini penyelesaian masalah didekati dengan mengkombinasikan studi kajian, survei lapangan, serta pengolahan data untuk mendapatkan informasi deformasi gunung api. Beberapa aspek yang akan diteliti, yaitu:

- Pemantauan deformasi pada tubuh Gunung Papandayan menggunakan metode survei yang berbasiskan pengamatan satelit GPS.
- Studi korelasi data hasil observasi GPS dengan data seismisitas Gunung Papandayan.



Gambar 1. Peta lokasi dan potret Gunung Api Papandayan (Abidin, 2003).



Gambar 2. Gejala deformasi pada gunung api aktif (Abidin 2001).

Maksud dan Tujuan

Penelitian ini dimaksudkan agar dapat melengkapi upaya monitoring yang optimal terhadap aktivitas vulkanis di Gunung Papandayan. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi masukan bagi PVMBG untuk lebih mengoptimalkan upaya yang sudah ada.

Tujuan penelitian ini diharapkan dapat:

- Menghasilkan suatu konsep, metode teknis, dan mekanisme operasional yang baik dan optimal dari sistem pemantauan deformasi gunung api berbasis GPS dan metode seismik.
- Memberikan pemahaman yang baik terhadap semua aspek dan permasalahan dengan mengkombinasikan metode GPS dan seismik untuk pemantauan deformasi gunung api.
- Kontribusi ilmiah dalam deformasi dengan metode kombinasi GPS dan seismik.
- Meningkatkan pemahaman tentang karakteristik deformasi gunung api, berikut dinamika pusat tekanan (dapur magma) penyebab deformasinya.

Prosedur dan Metodologi

Pemantauan Deformasi Gunung Api dengan Metode Survei GPS

Pemantauan deformasi gunung api dengan menggunakan GPS pada prinsipnya dapat dilakukan secara episodik atau kontinu. Dalam pengamatan secara episodik, koordinat beberapa titik GPS yang dipasang di gunung api, ditentukan secara berkala dalam selang waktu tertentu. Dengan menganalisis perbedaan koordinat pada setiap periode, maka karakteristik deformasi gunung api dapat ditentukan dan dianalisis. Beberapa kelebihan GPS dalam konteks pemantauan deformasi, yaitu:

1) GPS memberikan nilai vektor pergeseran tubuh gunung api dalam tiga dimensi (dua komponen horizontal dan satu komponen vertikal).

2) GPS memberikan nilai vektor pergerakan tubuh gunung api dalam suatu sistem koordinat referensi yang tunggal.

3) GPS dapat memberikan nilai vektor pergerakan dengan tingkat presisi sampai beberapa milimeter, dengan konsistensi yang tinggi baik secara spasial maupun temporal.

4) GPS dapat dimanfaatkan secara kontinu tanpa bergantung pada waktu (siang maupun malam), dalam segala kondisi cuaca.

Pemantauan Aktivitas Gunung Api menggunakan Metode Seismik

Pemantauan kegempaan gunung api pada dasarnya dilakukan untuk mengetahui aktivitas gunung api yang selanjutnya diharapkan dapat memprediksi terjadinya erupsi. Untuk memperoleh informasi mengenai aktivitas gunung api ini, dilakukan beberapa kegiatan, yaitu:

- Penentuan frekuensi gempa (f), waktu tiba gelombang P (Tp), dan gelombang S (Ts) atau selisih waktu tiba gelombang S dan P (Ts-Tp)
- Pembacaan amplitudo maksimum (A_{maks}) dan lama gempa
- Perhitungan magnitudo gempa (M) hasil

pembacaan amplitudo maksimum (A_{maks})

- Perhitungan energi gempa vulkanik (E) berdasarkan harga magnitudo (M)
- Penentuan magnitudo (M), amplitudo (A) dengan frekuensi kejadian gempa N(A)
- Penentuan aktivitas seismik tahunan (a) untuk pengamatan T tahun
- Besarnya frekuensi gempa (f)

Korelasi Karakteristik Deformasi dan Kegempaan

Secara teoretis deformasi gunung api akan berkorelasi dengan seismisitasnya. Meskipun deformasi dan seismisitas gunung api akan berkorelasi, tapi karakteristik dan pola korelasinya akan berbeda bergantung pada struktur geologi serta struktur sistem ventilasi magmanya. Atas pertimbangan itu, maka dalam penelitian ini korelasi hasil kedua metode tersebut akan diteliti, diterapkan, diuji, dan dianalisis.

Pelaksanaan dan Pembahasan

Pelaksanaan Survei GPS

Survei GPS dilakukan pada titik-titik pengamatan yang lokasi dan distribusinya ditunjukkan pada Gambar 3, sedang beberapa stasiun GPS ditunjukkan pada Gambar 4. Sampai saat ini secara keseluruhan sudah delapan kali survei GPS yang dilakukan di kawasan Gunung Papandayan, (Tabel 1). Semua survei dilakukan oleh tim KK Geodesi ITB bekerja sama dengan PVMBG. Pada Survei kedelapan ini dilakukan penambahan dan pemasangan tujuh titik baru, yaitu CLLY, KMA1 (pengganti KMAS), NGL1 (pengganti NGLK), ALUN, CSRN, SEIS (pengikatan koordinat seismogram), dan WNGR. Adapun tujuan penambahan ini adalah untuk keperluan penggantian titik-titik monitor lama yang hilang saat terjadi letusan serta densifikasi jaring pemantauan Gunung Papandayan.

Semua survei GPS dilaksanakan dengan menggunakan *receiver* GPS tipe geodetik dua-frekuensi. Pada empat survei yang pertama digunakan tiga *receiver* Ashtech Z-XII3 dan dua Leica sistem 300. Pada survei yang kelima, keenam, ketujuh, dan kedelapan digunakan tujuh *receiver*, yaitu dengan menggunakan tambahan dua *receiver* yaitu Leica sistem 500. Lama sesi pengamatan GPS pada survei tersebut umumnya berkisar sekitar 8 sampai 16 jam.

Pengolahan Data Survei GPS

Pengolahan data kedelapan survei GPS dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ilmiah BERNESSE 4.2 (Beutler *et al*., 2001). Pengolahan dilakukan secara radial dari titik POS1 sebagai titik referensi untuk perhitungan, dan koordinatnya ditentukan dari titik BAKOSURTANAL sebagai titik geodetik orde-0 dari Jaring Kerangka Geodetik Nasional. Untuk seluruh perhitungan digunakan orbit satelit yang teliti (*precise ephemeris*), dan residu bias troposfir dan ionosfir diestimasi dalam proses penghitungan.

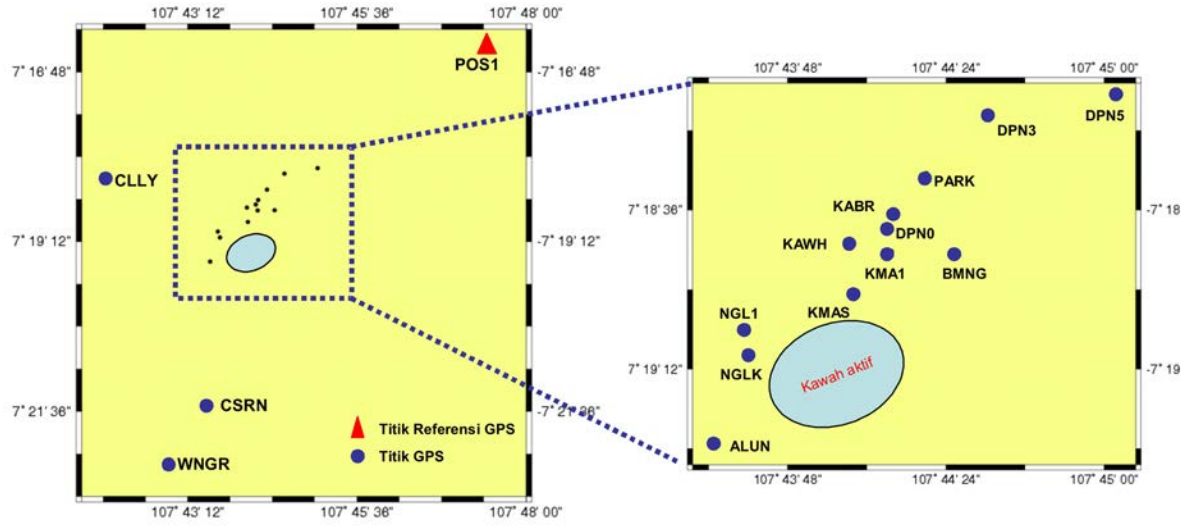
Deviasi standar komponen koordinat titik yang diperoleh dari seluruh delapan survei ditunjukkan pada Gambar 5. Secara umum terlihat bahwa tingkat presisi komponen horizontal koordinat (*Easting* dan *Northing*) mempunyai deviasi standar lebih baik dari 4 mm, dan secara umum sekitar level 1-2 mm. Sedangkan komponen tinggi elipsoid mempunyai deviasi standar lebih baik dari 7 mm, secara umum sekitar 2-5 mm.

Perubahan Koordinat dan Panjang *Baseline*

Dari data koordinat yang diperoleh sepanjang delapan pengamatan, perubahan yang sangat signifikan terjadi pada kala 5-6, ketika terjadi letusan 11 November 2002 (Gambar 6). Perubahan vertikal secara positif dan sangat signifikan terjadi pada seluruh titik pantau (BM) pada saat terjadi letusan (kala 5-6), terutama pada titik KWAH, KMAS, dan DPN0, yang berlokasi di sekitar kawah. Kemudian kembali ke posisi semula (berubah negatif) secara bertahap kala 6-7 dan 7-8. Secara horizontal juga deformasi terjadi secara mencolok pada kala 5–6, terutama pada *baseline* yang berhubungan dengan titik KWAH, KMAS, dan DPN0 (Gambar 7).

Analisis Vektor Pergeseran

Salah satu cara mengetahui pola deformasi yang terjadi pada badan gunung api adalah dengan mempelajari pola vektor pergeseran masing-masing koordinat pengamatan GPS. Arah vektor pergerakan masing-masing kala pengamatan dipisahkan dalam komponen horizontal (*northing-easting*) (Gambar

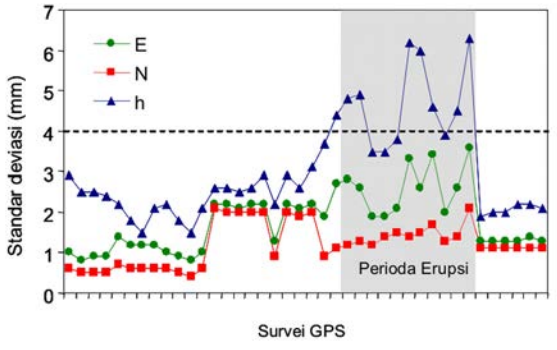


Gambar 3. Stasiun-stasiun pengamatan GPS di Gunung Api Papandayan.

Gambar 4. Beberapa stasiun GPS di Gunung Api Papandayan, sehari menjelang letusan 20 November 2002.

Tabel 1. Pelaksanaan Survei GPS di Gunung Api Papandayan

Survei GPS	Waktu Survei	Stasiun Pengamatan
Survei - 1	22-23 Oktober 1998	POS1, NGLK, KAWH, PARK, BMNG
Survei - 2	25-26 Maret 1999	POS1, NGLK, KAWH, PARK, BMNG
Survei - 3	23-24 Desember 1999	POS1, NGLK, KAWH, PARK, BMNG
Survei - 4	23-24 Juni 2001	POS1, NGLK, KAWH, PARK, BMNG
Survei - 5	11-12 Agustus 2002	POS1, NGLK, KAWH, PARK, BMNG, DPN0, DPN3, DPN5, KMAS
Survei - 6	13-15 November 2002	POS1, PARK, DPN0, DPN3, DPN5
	17 November 2002	POS1, PARK, DPN0
	18 November 2002	POS1,DPN0, KMAS, KWAH
	19 November 2002	POS, BKMG
Survei - 7	9-10 Juni 2003	POS1, KAWH, PARK, BMNG, DPN3, DPN5, KWAH2
Survei - 8	14–17 Agustus 2005	POS1, KAWH, PARK, BMNG, DPN3, DPN5, KABR, CLLY, KMA1, NGLK1, ALUN, CSRN, WNGR, SEIS



Gambar 5. Deviasi standar koordinat mencakup 8 survei (Abidin, 2003).

8) dan komponen vertikal (Gambar 9).

Analisis Regangan

Parameter deformasi Gunung Papandayan ditentukan menggunakan model pendekatan dua dimensi (2D) trilaterasi. Pada masing-masing titik dibuat jaring segitiga yang membentuk trilaterasi Gambar 10. Model ini menggunakan asumsi bahwa tensor deformasi merupakan fungsi parameter regangan dan rotasi. Regangan utama perhitungan model ini secara keseluruhan memperlihatkan kecenderungan pola arah regangan yang hampir sama.

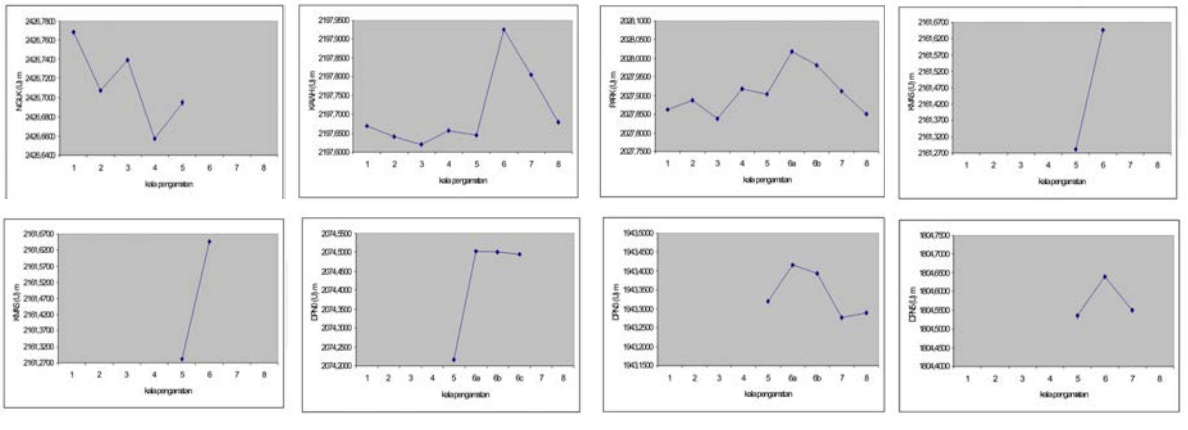
Analisis Sumber Tekanan (Mogi Model)

Sumber tekanan pada deformasi Gunung Papandayan diestimasi menggunakan pendekatan model Mogi (1958), yang mengasumsikan bahwa kerak bumi merupakan medium setengah elastik dan deformasi yang terjadi disebabkan oleh sumber tekanan berupa bola magma yang terletak pada kedalaman tertentu. Apabila terjadi perubahan hidrostatis pada bola tersebut, maka akan terjadi deformasi secara simetris. Hasil penentuan perkiraan sumber tekanan pada deformasi Gunung Papandayan dapat dilihat pada Gambar 11. Lokasi pusat tekanan terbaik ditentukan dengan harga RMS terkecil (Tabel 2). Titik yang menjadi pusat salib sumbu koordinat adalah titik PARK, jadi lokasi pusat tekanan ini relatif terhadap titik pantau PARK.

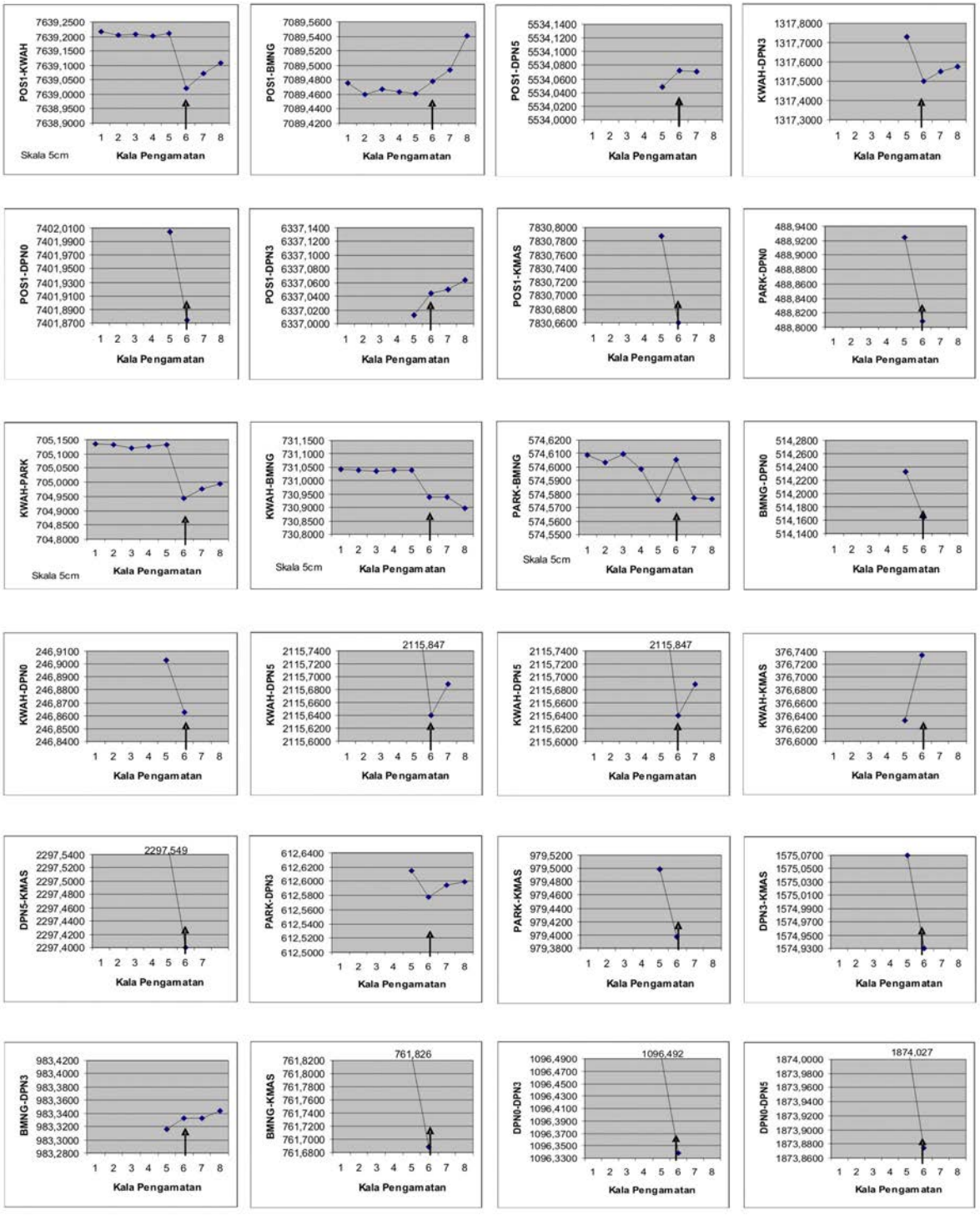
Dari keterangan gambar di atas terlihat bahwa kedalaman sumber tekanan bergerak naik menjelang letusan 11 November 2002, dari -3,2 km (PT1) menjadi 1,1 km (PT5), dan bergerak menurun kembali setelah letusan, menjadi -2,9 km (PT6). Selain model Mogi (1958), ada beberapa model lainnya dalam menentukan sumber tekanan, yaitu: model Yokoyama (1968) dan model *Line Source* (Walsh and Decker, 1971 dan Yamashina, 1986), Pada masa yang akan datang akan dicoba menentukan sumber tekanan dengan menggunakan ketiga model tersebut, baik di Gunung Papandayan ataupun gunung api lainnya.

Analisis Informasi Kegempaan

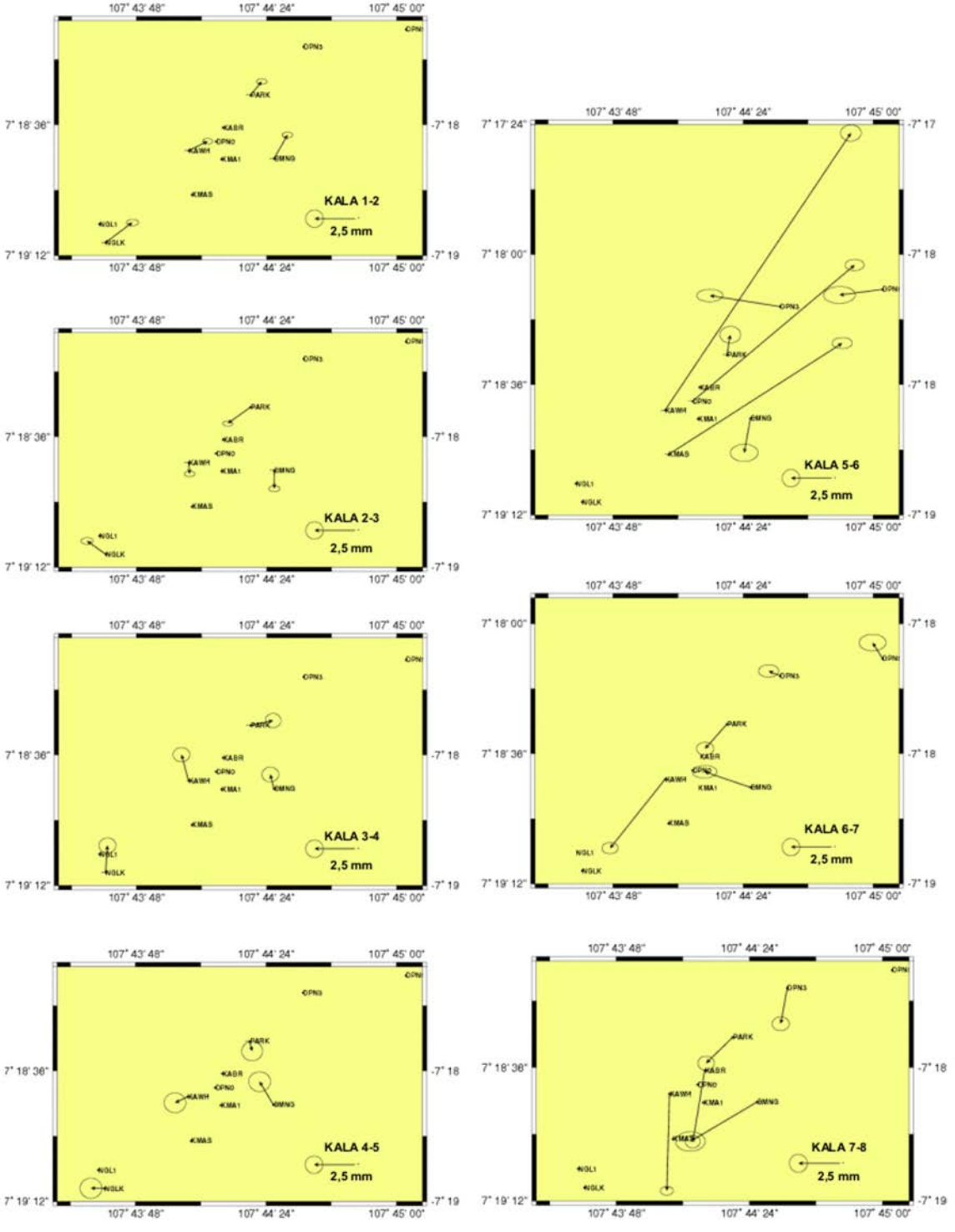
Data informasi seismisitas Gunung Papandayan diperoleh dari PVMBG Bandung. Adapun ketersediaan data detail hanya ada untuk tahun 2000 sampai dengan 2005. Data tahun 1998 dan



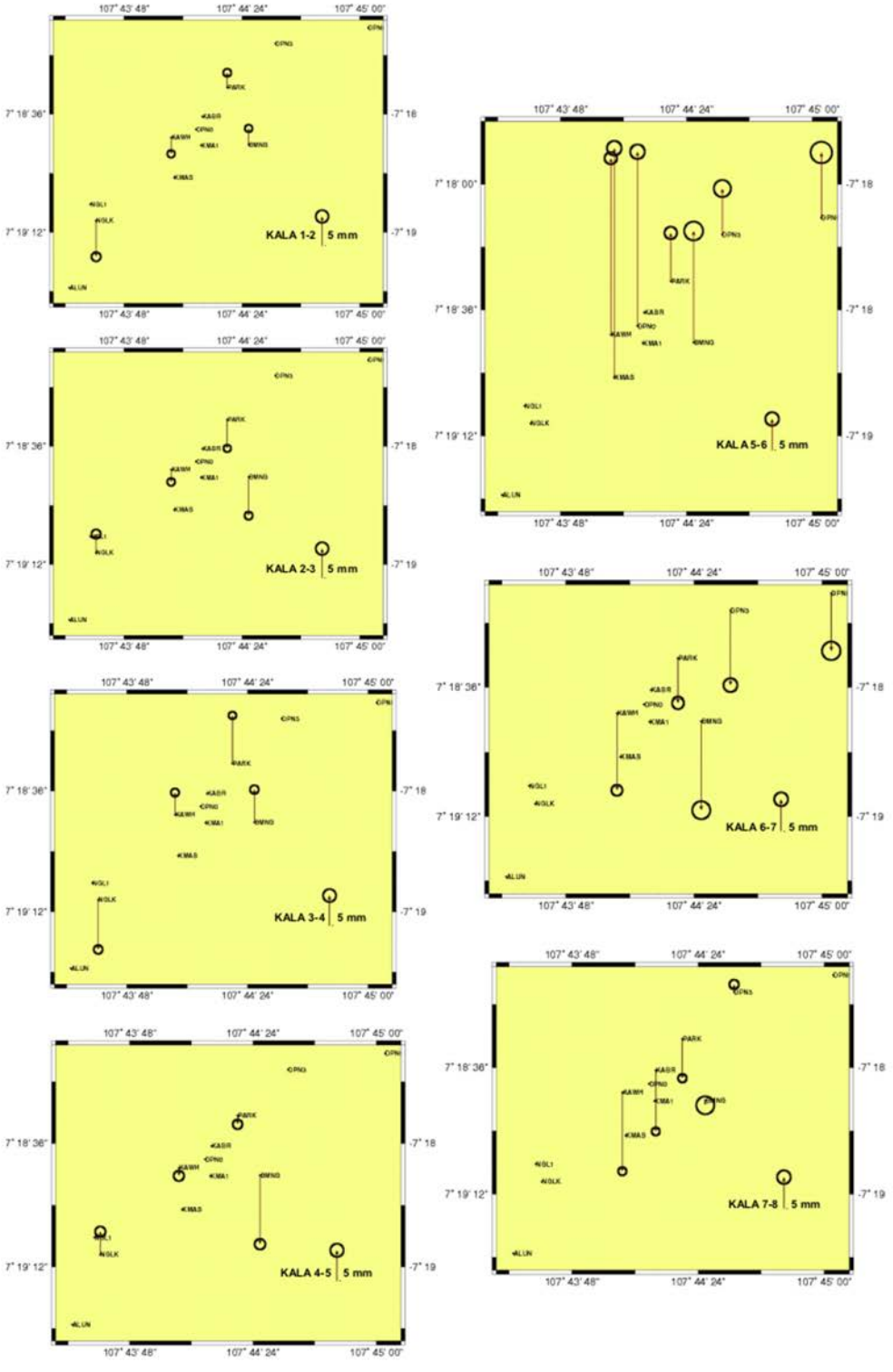
Gambar 6. Perubahan koordinat ttik pengamatan GPS pada arah vertikal (survei 1-8), perubahan signifikan terjadi pada kala 5-6, dimana terjadi letusan pada survei ke-6.



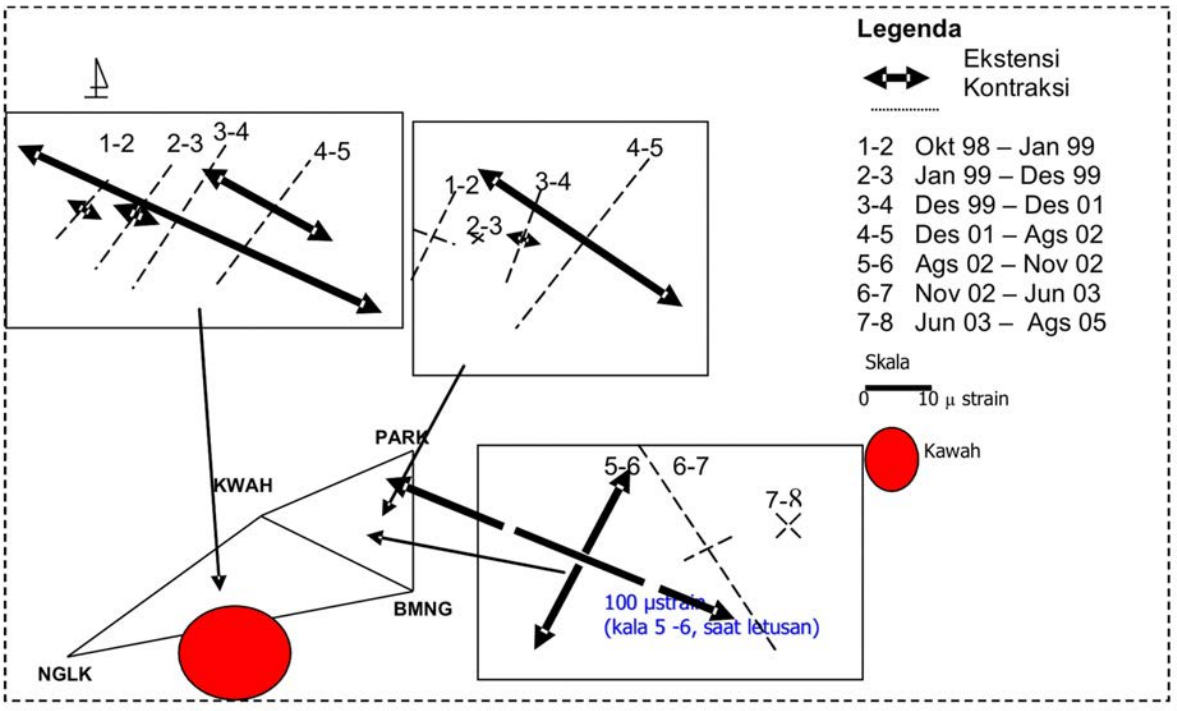
Gambar 7. Perubahan panjang *baseline* koordinat titik pengamatan GPS (survei 1-8), tanda panah adalah letusan yang terjadi pada survei ke-6.



Gambar 8. Vektor pergeseran dalam arah horisontal, deformasi yang signifikan diakibatkan oleh letusan yang terjadi pada survei ke-6. Nampak pada kala 5-6 (periode 11-12 Agustus 2002 sampai 13-19 November 2002), vektor pergeseran maksimum terjadi sebesar 2,5–16 cm pada titik KWAH, KMAS, dan DPN0.



Gambar 9. Vektor pergeseran dalam arah vertikal, deformasi yang signifikan diakibatkan oleh letusan terjadi pada survei ke-6. Nampak pada kala 5-6 (periode 11-12 Agustus 2002 sampai 13-19 November 2002), perubahan vertikal maksimum terjadi sebesar 28-38 cm pada titik KWAH, KMAS, dan DPN0.



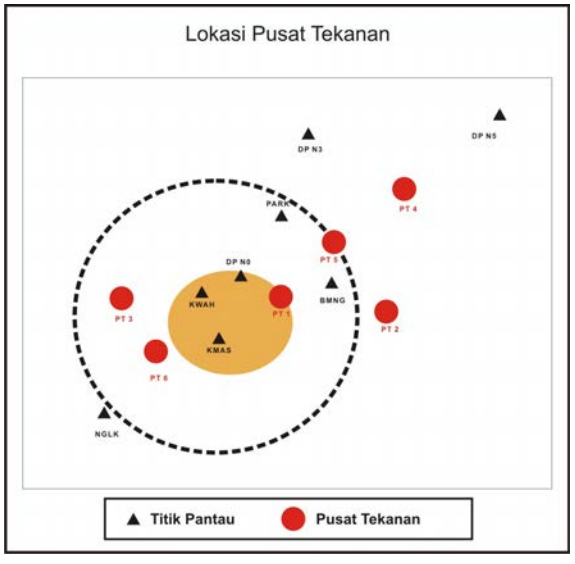
Gambar 10. Orientasi, arah dan besaran regangan utama; tampak regangan utama terjadi sangat besar pada saat letusan 11 November 2002, yaitu kala 5-6 pada areal trilaterasi BMNG-PARK-KWAH.

Tabel 2. Lokasi Pusat Tekanan Gunung Api Papandayan berdasarkan Model Mogi dan Data GPS

Kala Pengamatan	Parameter Lokasi Pusat Tekanan				
	X (Km)	Y (Km)	f (Km)	K (m^3)	RMS
Okt 98 - Mar 99	0,0	-0,6	3,2	0,9998749	$2,732E^{-07}$
Mar 99 - Des 99	0,6	-0,7	3,2	0,9998921	$1,997E^{-07}$
Des 99 - Jun 01	-0,9	-0,6	3,0	1,0000284	$2,351E^{-07}$
Jun 01 - Agu 02	0,7	0,2	2,8	0,9999742	$1,945E^{-07}$
Agu 02 - Nov 02	0,3	-0,2	1,1	0,9999966	$1,746E^{-07}$
Nov 02 - Jun 03	-0,7	-1,0	2,9	0,9999447	$4,331E^{-07}$

1999 hanya ada jumlah gempa vulkaniknya saja. Sebagai akibatnya tidak dapat dilakukan perhitungan akumulasi energi gempa. Analisis hiposenter tidak mungkin dilakukan karena peralatan seismogram yang digunakan hanya satu komponen. Aktivitas gempa vulkanik sepanjang tahun 2000 sampai dengan 2005 mengalami kenaikan yang tajam, terutama pada tahun 2002 dimana erupsi terjadi. Dari Januari 2000 sampai dengan Agustus 2005, Gunung Papandayan secara statistik didominasi oleh gempa vulkanik tipe B (dangkal).

Analisis lanjut dilakukan dalam selang waktu yang sama antar kala pengamatan GPS, sehingga diharapkan dapat diperoleh pola energi gempa bumi vulkanik dengan fenomena deformasi di permukaan badan gunung api yang terdeteksi



Keterangan Gambar:
PT1 = Lokasi pusat tekanan pada kala pengamatan Okt 98 – Mar 99, kedalaman 3,2 km
PT2 = Lokasi pusat tekanan pada kala pengamatan Mar 99 – Des 99, kedalaman 3,2 km
PT3 = Lokasi pusat tekanan pada kala pengamatan Des 99 – Jun 01, kedalaman 3,0 km
PT4 = Lokasi pusat tekanan pada kala pengamatan Jun 01 – Agu 02, kedalaman 2,8 km
PT5 = Lokasi pusat tekanan pada kala pengamatan Agu 02 – Nov 02, kedalaman 1,1 km
PT6 = Lokasi pusat tekanan pada kala pengamatan Nov 02 – Jun 03, kedalaman 2,9 km

Gambar 11. Lokasi pusat tekanan berdasarkan data GPS dengan metode model Mogi.

melalui pengukuran GPS. Akumulasi energi gempa bumi terbesar adalah pada selang pengamatan kala ke 5-6, yaitu terjadi akumulasi energi sebesar $2{,}51E^{+15}$ erg hanya dalam selang waktu 3 bulan, ketika terjadi erupsi (Gambar 12).

Analisis Deformasi dan Korelasinya dengan Pola kegempaan

Analisis Deformasi Komponen Horizontal

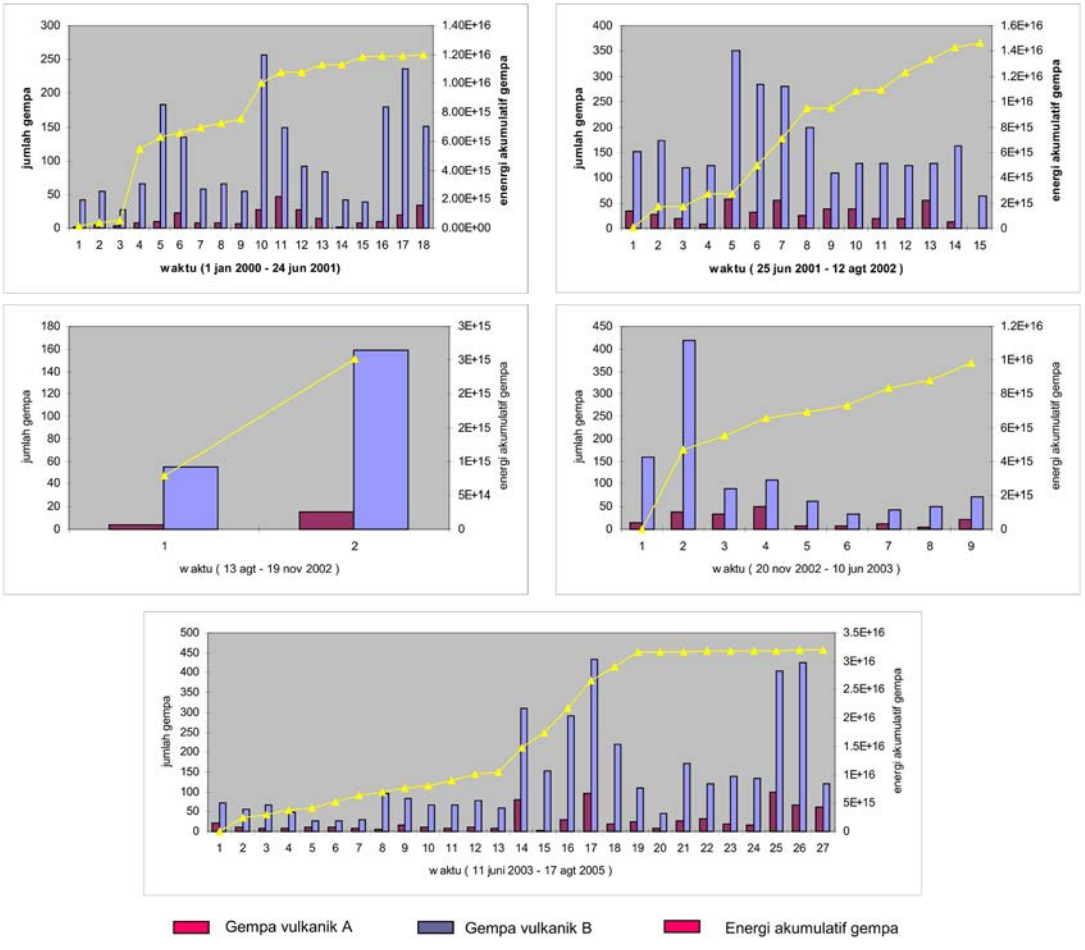
Vektor pergeseran horizontal yang terjadi antara kala 1–2 semua titik bergeser ke arah timur laut dalam fraksi milimeter. Pada kala 2–3 titik pantau cenderung bergeser ke selatan sampai barat daya, kecuali titik Nangklak (NGLK) yang bergeser ke utara, pergeserannya seragam terjadi dalam fraksi milimeter. Pada kala 3–4 pergeseran yang tejadi terhadap titik–titik pantau cenderung mengarah ke utara, kecuali titik Parkir (PARK) dengan besar pergeseran dalam milimeter. Pada kala 4–5 semua titik pantau bergeser ke arah barat daya dengan besaran pergeseran yang lebih besar bila dibandingkan dengan pergeseran yang terjadi pada kala 1 sampai 4, tetapi masih tetap berada dalam fraksi milimeter.

Dari seragamnya arah, besar, dan pola pergeseran yang terjadi pada kala 1 sampai 4, dapat diasumsikan bahwa gaya endogen diduga berasal dari pengaruh gerakan sumber tekanan yang sama (penelitian ini tidak menyertakan pengukuran gaya berat, sehingga tidak diketahui pasti penyebab tekanan; gas, air atau magma, penyebab tekanan diduga magma). Kedalaman pusat tekanan yang menimbulkan pergeseran titik pantau pada kala tersebut relatif berada pada kedalaman yang sama, yaitu -3,0 sampai -3,2 km (Gambar 11), sedangkan pergeseran yang terjadi pada kala 4–5 yang relatif lebih besar bila dibandingkan dengan kala sebelumnya dapat disimpulkan karena letak sumber tekanan yang berada pada kedalaman yang berbeda, yaitu -2,8 km di bawah titik PARK.

Vektor pergeseran yang terjadi pada kala 5–6, titik pantau bergerak menuju arah timur laut dalam fraksi sentimeter - desimeter kecuali titik BMNG, DPN3, dan DPN5 yang bergeser ke barat laut. Hal ini karena pusat tekanan berada dekat dengan permukaan, tepatnya pada kedalaman -1,1 km (Gambar 11). Pada periode ini gunung api mengalami erupsi. Pada kala 6–7, titik pantau seragam bergeser ke arah barat daya dan barat laut, atau menjauhi titik POS1. Besar pergeseran mencapai sentimeter - desimeter dengan arah pergerakan yang secara garis besar berlawanan arah dengan arah pergeseran pada kala sebelumnya. Hal ini terjadi karena berpindahnya pusat tekanan menjadi lebih dalam dengan kedalaman -2,9 km. Sementara pada kala 7–8, titik pantau secara hampir seragam bergeser ke arah selatan dengan besaran dalam milimeter, dan relatif hampir sama.

Analisis Deformasi Komponen Vertikal

Perubahan ketinggian yang terjadi dengan titik referensi adalah titik POS1 pada kala 1-5 yang memperlihatkan bahwa perubahan yang terjadi pada titik–titik pantau seragam tidak melebihi 10



Gambar 12. Statistik akumulasi energi gempa vulkanik dari Januari 2000 sampai dengan Agustus 2005.

cm, namun pada kala 5-6 semua titik mengalami perubahan tinggi positif yang sangat signifikan mencapai perubahan sebesar +38 cm (KMAS), +29 cm (DPN0), +28 cm (KWAH). Lonjakan perubahan tinggi yang cukup besar ini adalah karena keadaan aktivitas vulkanik di Gunung Papandayan pada survei ke-6 sedang aktif, pusat tekanan cukup dekat dengan permukaan (Gambar 11).

Perubahan ketinggian yang terjadi dari titik–titik pantau relatif terhadap titik DPN3 memperlihatkan bahwa pada kala 5–6 terjadi inflasi/ekstensi (pembubungan) dengan perubahan ketinggian yang mencapai +38 cm, dan setelah kala tersebut deformasi yang terjadi adalah deflasi/kontraksi (pengkerutan) yang ditandai dengan adanya penurunan ketinggian dari titik pantau. Terlihat bahwa adanya kekonsistenan deformasi yang terjadi.

Korelasi Deformasi dan Kegempaan

Pada kala 1–2, informasi kegempaan kurang, maka korelasinya tidak dapat diketahui secara jelas. Demikian juga kala 2-3, informasi kegempaan kurang, korelasi tidak jelas. Kala 3-4, rata-rata gempa vulkanik sebesar 108 kejadian perbulan dan total energi $1{,}2E^{+16}$ erg. Korelasinya; inflasi di sekitar kawah dengan arah barat laut - tenggara pada trilaterasi NGLK-BMNG-KWAH (Gambar 10) sebesar 45 µ*strain*. Kegempaan ini memicu inflasi di sekitar kawah. Kala 4–5, akumulasi energi gempa adalah berkisar $1{,}47E^{+16}$ erg dengan rata-rata keja-

dian gempa vulkanik 193 kejadian perbulan dimana sepanjang perioda ini terjadi 1911 gempa vulkanik B (dangkal). Korelasinya, telah terjadi peregangan pada trilaterasi NGLK-BMNG-KWAH, sebesar 10 µ*strain* dan BMNG-KWAH-PARK sebesar 25 µ*strain* arah barat laut - tenggara, dan juga terjadi deflasi dengan besaran yang hampir sama, namun dengan arah tegak lurus terhadap arah peregangan (Gambar 10).

Kala 5-6, akumulasi energi adalah $2{,}51E^{+15}$ erg dalam kurun waktu 3 bulan dengan jumlah gempa vulkanik B sebesar 279 (total gempa vulkanik 593). Akumulasi energi ini sangat besar sekali, sehingga menyebabkan terjadinya deformasi yang sangat besar berupa inflasi yang terjadi ke segala arah sebesar 100 µ*strain* pada trilaterasi BMNG-KWAH-PARK. Hal ini menyebabkan runtuhnya titik pantau NGLK, sehingga trilaterasi NGLK-BMNG-KWAH tidak dapat dianalisis. Kala 6–7, aktivitas seismik dalam selang 7 bulan relatif menurun dibandingkan periode sebelumnya, yaitu rata-rata gempa 87 kali perbulan. Pada kala ini terjadi pembalikan deformasi yang berupa deflasi yang terjadi ke segala arah sebesar 50 µ*strain*.

Antara kala 7–8, yaitu pada bulan Oktober 2004 hingga Juni 2005 sebelum survei ke-8 (Agustus 2005) dilakukan, terjadi peningkatan akumulasi energi gempa secara ekstrim. Akan tetapi deformasi hasil survei ke-8 ini memperlihatkan deflasi yang kecil, sebesar 2–5 µ*strain*. Hal ini disebabkan oleh deformasi yang terjadi di Gunung Papandayan memiliki laju yang cepat. Menurunnya intenstitas kegempaan langsung diikuti dengan deflasi, sehingga pada saat survei ke-8 dilakukan, kegempaan sudah kembali normal dan posisi titik-titik pantau yang terdeformasi telah kembali ke posisi semula. Hal ini dibuktikan pula oleh kondisi deformasi saat mendekati letusan, tiga bulan menjelang letusan November 2002, yaitu pada bulan Agustus 2002 saat survei ke-5 dilaksanakan. Deformasi yang terjadi tidak signifikan, berbeda dengan saat survei dilakukan pada waktu periode letusan, ketika deformasi yang terjadi sangat signifikan. Hal ini menandakan bahwa laju deformasi yang terjadi di Gunung Papandayan adalah cepat, dan umumnya mempunyai rheologi bersifat elastis, terutama pada bagian tubuh dan kawah, kecuali titik KWAH mempunyai rheologi plastis yang terbukti dengan tidak kembalinya ke posisi awal walaupun gaya penyebabnya telah menurun.

Kesimpulan dan Saran

Dari hasil yang diperoleh pada penelitian ini dapat disimpulkan:

- Metode survei GPS dengan *receiver* tipe Geodetik dua frekuensi mempunyai ketelitian yang relatif cukup tinggi (level presisi mm), ditunjang dengan perencanaan survei yang cermat, strategi pengamatan yang ketat, strategi pengolahan data yang baik, serta menggunakan perangkat lunak ilmiah untuk pengolahan datanya.
- Adanya korelasi yang erat antara aspek geodetis dengan aspek geologi/geofisika di Gunung Papandayan
- Karakteristik deformasi Gunung Papandayan mempunyai laju deformasi yang cepat, terbukti dengan deformasi yang tidak signifikan tiga bulan menjelang letusan (menjelang letusan, Agustus 2002 atau survei ke-5), dan menjadi sangat besar saat terjadi letusan November 2002. Demikian sebaliknya, deformasi tidak signifikan pada kala 7–8 (pasca letusan, Juni 2003 – Agustus 2005), padahal pada kurun waktu tersebut terjadi peningkatan akumulasi energi gempa yang ekstrim (Oktober 2004 - Juni 2005) atau dua bulan sebelum survei ke-8 dilaksanakan. Ini berarti deformasinya berbanding linier dengan intensitas kegempaan, akan tetapi dengan laju yang cepat.
- Laju deformasi yang cepat ini karena adanya pusat tekanan yang dangkal (1,1 km) dan rheologi tubuh Gunung Papandayan yang lebih bersifat elastis.
- Deformasi Gunung Papandayan berada pada ambang aktivitas normal jika regangan pada trilaterasi NGLK-BMNG-KWAH dan BMNG-KWAH-PARK sebesar < 50 µ*strain*.
- Kala 1-4, sumber tekanan memperlihatkan pergerakan timur - barat (PT1, PT2, dan PT3), sedangkan kala 4-7, arah gerakan timur laut - barat daya (PT4, PT5, dan PT6).

Saran yang diusulkan dalam kaitannya dengan analisis deformasi Gunung Papandayan adalah:

- Pengamatan seismik secara kontinu menggunakan minimal tiga stasiun dalam kaitannya

dengan penentuan hiposenter, untuk menduga keberadaan sumber tekanan atau *dapur magma*(?).

- Untuk mengetahui korelasi energi dan deformasi yang terjadi diperlukan pemantauan geometrik secara kontinu seiring dengan pemantauan kegempaan.

- Laju deformasi yang cepat menjadikan diperlukannya pengamatan deformasi episodik dengan lebih sering, terutama saat aktivitas kegempaannya meningkat tajam.

- Seperti diketahui bahwa proses hidrothermal mempengaruhi kegiatan Gunung Papandayan. Maka jika memungkinkan sebaiknya dilakukan pengamatan gaya berat secara simultan dengan GPS.

Ucapan Terima Kasih---Dengan tersusunnya makalah ini penulis mengucapkan terimakasih kepada Dr. Suparto Siswowidjojo atas saran dan kritik yang sangat berharga, juga kepada Dr. Ir. Mas Atje Purbawinata dan Ir. Yan Saut Simatupang, PVMBG, atas bantuan dan fasilitas yang diberikan. Kepada rekan-rekan di KK Geodesi ITB kang Heri, kang Gamal dan kang Dudi, penulis berterimakasih atas dukungan dan saran-sarannya.

Acuan

Abidin, H.Z., 2000. *Penentuan Posisi Dengan GPS dan Aplikasinya*. P.T. Pradnya Paramita, Jakarta. Edisi ke 2. ISBN 979-408-377-1. 268 hal.

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., dan Kimata, F., 2003. Ground Deformation during Papandayan Volcano 2002 Eruption as Detected by GPS Surveys. *Prosiding ITB Sains dan Teknologi*, Vol. 35B, No. 1, 2003, h. 45-60.

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., dan Weber., R., 2001. Bernese GPS software version 4.2. Dalam: U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez (Eds.). *Astronomical Institute*, University of Berne, 515 hal.

Mogi, K., 1958. Relation between the Eruption of Various Volcanoes and the Deformation of the Ground Surface Around Them. *Bulletin Earthquake Research Institute*, Tokyo Univ. Vol. 36, h. 99-134.

Walsh, J.B. and Decker, R.W., 1971. Surface Deformation Associated with Volcanism, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76 No. 14 p. 3291-3302.

Yamashina, K., 1986. Stress and Volcanic Eruptions. *Bulletin Earthquake Research Institute*, The University of Tokyo, Vol. 20, Part 2, p. 101-119 (in Japanese).

Yokoyama, I., 1986. Crustal Deformation Caused by the 1914 Eruption of Sakurajima Volcano, Japan and Its Secular Changes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 30, p. 283-302, Elsevier Scince Publishers B.V., Amsterdam – Printed in Netherlands.