

Deformasi Gunung Kelud Pascapembentukan Kubah Lava November 2007

N. HAERANI¹, M. HENDRASTO¹, dan H. Z. ABIDIN²

¹Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi
Jln. Diponegoro No. 57 Bandung 40122

²Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesha No. 10 Bandung 40132

SARI

Erupsi Gunung Api Kelud pada tahun 2007 diawali dengan peningkatan kegempaan pada September 2007. Letusan tersebut berakhir dengan terbentuknya kubah lava di danau kawah pada 3 November 2007. Kejadian ini merupakan peralihan sifat erupsi yang sebelumnya eksplosif menjadi efusif. Pada pengamatan dengan metode GPS selama tiga sesi, yaitu: April, Agustus, dan Oktober 2008 terlihat bahwa pola vektor pergeseran tiap titik ukur lebih dominan dipengaruhi oleh gaya-gaya yang bekerja akibat aktivitas struktur geologi terutama fase penstabilan kerak setelah fase akhir erupsi November 2007. Pergeseran yang diakibatkan oleh aliran magma bersifat minor, dan terjadi hanya pada titik-titik ukur yang berada di dekat Kubah Lava dengan kedalaman relatif dangkal, serta berasosiasi dengan zona aseismik. Deformasi yang terjadi akibat migrasi magma ke permukaan kemudian dihitung untuk mengetahui besarnya *supply* magma dari sumber yang lebih dalam ke kantong magma yang lebih dangkal (injeksi magma). Perbandingan besarnya *supply* magma terhadap magma yang diinjeksi menggambarkan kondisi deformasi yang terjadi selama April - Oktober 2008. Pada periode tersebut Gunung Kelud masih mengalami inflasi (pengembangan). Inflasi ini menunjukkan bahwa aktivitas magma masih terjadi, tapi bersifat semu karena tidak didukung oleh manifestasi di permukaan. Kenyataan tersebut bisa terjadi karena ketidaksinambungan data atau merupakan bagian dari kecenderungan deflasi.

Kata kunci: kubah lava, deformasi, metode GPS, lokasi pusat tekanan, *supply* magma, injeksi magma

ABSTRACT

The eruption of Kelud Volcano in 2007 was started with an increase in the seismic activity on September 2007. It was ended with a lava dome formation inside the crater lake on 3 November 2007. This phenomenon showed the change of eruption behavior compared to the last eruption on February 1990 that was an explosive one. Result from the GPS observation method during three periods, which are: April, August, and October 2008 showed that the vector displacement on each measured point was affected dominantly by structural geology forces as a crustal stabilisation after the last phase of November 2007 eruption. There was also a minor displacement as the result of magma migration around the points that were close to the lava dome. The magma migration occurred in a relatively shallow depth and was associated with an aseismic zone. The deformation that occurred as a result of magma migration toward the surface was calculated to determine the magma supply and magma injected. The result then was compared to illustrate a mechanism of deformation during April – October 2008. The comparison of magma supply and magma injected within these periods showed that the inflation still occurred, but it was not supported by a surface manifestation. This inflation could be false because of data discontinuity, or it is actually a part of deflation trend.

Keywords: lava dome, deformation, GPS method, pressure source location, magma supply, injected magma

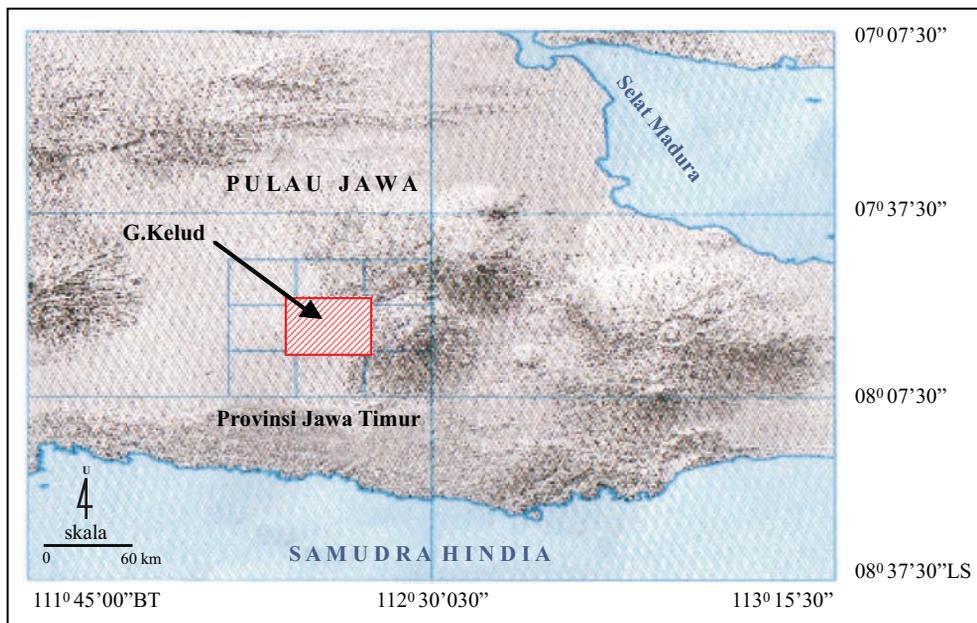
PENDAHULUAN

Gunung Kelud merupakan salah satu gunung api aktif di Jawa Timur (Gambar 1) yang selama ini memiliki sifat letusan eksplosif, dan pada umumnya menimbulkan korban jiwa. Peningkatan jumlah gempa dimulai pada September 2007, dan realisasi kegiatan tersebut adalah pembentukan kubah lava pada awal November 2007. Kegiatan Gunung Kelud yang tercatat dalam sejarah sejak tahun 1000 sebagian besar berupa letusan bersifat eksplosif yang berpusat di danau kawah. Ketika terjadi peningkatan kegiatan kegempaan yang sangat kuat pada akhir 2007, diduga bahwa letusan yang akan terjadi merupakan letusan besar yang eksplosif sebagaimana yang terjadi pada tahun 1990. Namun, peningkatan kegempaan dalam kurun waktu yang relatif lama ini tidak berakhir dengan letusan eksplosif, tetapi efusif dengan pembentukan kubah lava di danau kawah. Ini adalah fenomena baru bagi Gunung Kelud.

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui karakteristik deformasi yang terjadi di Gunung Kelud pascapembentukan kubah lava pada November 2007 sampai Oktober 2008, berdasarkan data GPS. Karakteristik deformasi yang dikaji meliputi: arah dan besar pergeseran, perkiraan pusat tekanan,

dan *supply* magma. Pendekatan dilakukan dengan menggunakan dua model berbeda, yaitu Model Mogi dan Model Pipa Tertutup. Model Mogi dipilih karena sudah sangat umum diaplikasikan di daerah gunung api, sedangkan Model Pipa Tertutup karena kondisi Gunung Kelud saat ini tersumbat kubah lava.

Karena peralihan sifat letusan Gunung Kelud dari eksplosif, sifat letusan pada umumnya, menjadi efusif dengan pembentukan kubah lava pada November 2007, selanjutnya disebut Kubah Lava 2007, maka penelitian ini mencoba untuk memahami dinamika deformasi yang terjadi di permukaan sebagai implikasi mekanisme yang terjadi di kantong magma atau pun pada kerak bumi di sekitar Gunung Kelud. Untuk itu penelitian dilakukan dengan pendekatan berdasarkan model-model yang ada, guna mengetahui mekanisme deformasi yang berlangsung, serta memperkirakan faktor apa saja penyebab deformasi Gunung Kelud pascapembentukan kubah lava tahun 2007. Pendekatan dilakukan dengan mengidentifikasi perubahan lokasi pusat tekanan dan *supply* magma berdasarkan beberapa sesi pengambilan data GPS. Hasil yang diperoleh dikorelasikan dengan beberapa data pendukung, misalnya kegempaan, geologi, EDM (*Electro-optic Distance Measurement*), dan *tilt*.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian.

METODE DAN DATA

Penelitian deformasi Gunung Kelud pascapembentukan Kubah Lava November 2007 dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan mekanisme deformasi yang terjadi. Lokasi dan geometri pusat tekanan diprediksi dengan menggunakan dua model berbeda, yaitu Model Mogi dan Model Pipa Tertutup. Penentuan lokasi pusat tekanan dengan menggunakan kedua model ini kemudian divalidasi dengan data kegempaan, EDM, *tilt*, dan geologi.

Tujuh belas titik ukur ditetapkan di sekitar Pos Pengamatan Gunung Api Kelud di Desa Margomulyo hingga Kawah/Kubah Lava 2007 (Gambar 2). Pengambilan data GPS dilakukan dalam bulan-bulan April, Agustus, dan Oktober 2008. *Receiver* yang digunakan adalah Leica tipe GX1220, 1230, dan SR520, dengan tipe antena Leix1202 dan Leiat 502. Lama pengamatan minimum sepuluh jam dengan *sampling interval* setiap lima belas detik. Data yang diperoleh diolah dengan menggunakan perangkat lunak Bernese versi 5.0 (Dach drr., 2007).

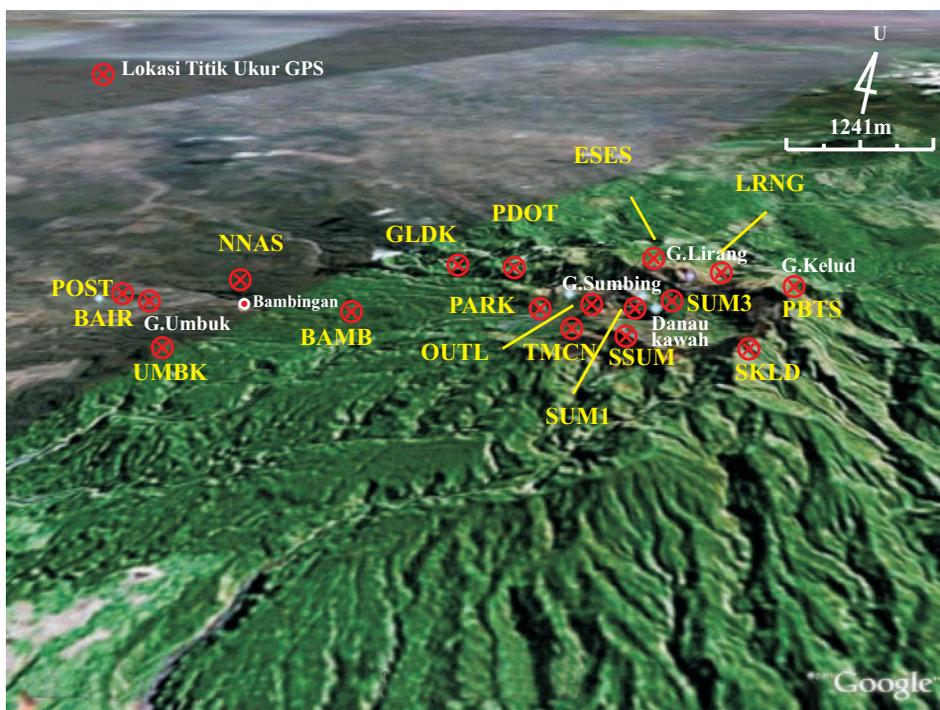
Model perhitungan dilakukan dengan Model Mogi (Mogi, 1958) yang sudah sangat umum di-

aplikasikan di daerah gunung api, dan Model Pipa Tertutup (Bonaccorso dan Davis, 1999). Model Pipa Tertutup dipilih untuk digunakan di Gunung Kelud sesuai dengan kondisi lapangan Gunung Kelud saat ini karena kawahnya tersumbat oleh kubah lava, sehingga menyerupai pipa tertutup (tersumbat).

Perhitungan lokasi pusat tekanan dilakukan berdasarkan nilai pergeseran pada Model Mogi (persamaan 1) dan Model Pipa Tertutup (persamaan 6). Metode yang digunakan dalam perhitungan lokasi pusat tekanan adalah metode inversi *best fit optimization* atau pengepasan kurva. Metode ini dipilih karena paling sederhana.

Parameter yang diberikan akan langsung digunakan dalam model perhitungan tanpa harus mencari turunan rumus terkecil untuk mengetahui pengaruh satu parameter terhadap parameter lainnya. Dengan metode optimasi *best fit* ini, maka waktu perhitungan akan lebih cepat dan tidak memerlukan kapasitas komputer yang terlalu besar.

Metode optimasi *best fit* merupakan metode perhitungan dengan memberikan nilai secara bertahap. Langkah perhitungan dalam metode ini dilaksanakan dengan cara:



Gambar 2. Lokasi titik ukur GPS Gunung Kelud; © 2008 Europa Technologies, Image © 2008 Digital Globe, Image © 2008 Terra Metrics.

- Membuat *input* variabel/parameter X, Y, kedalaman, rigiditas, tekanan, dan radius.
- Memasukkan setiap variabel ke dalam rumus/model.
- Menguji model dengan data sintesis; dan semua parameter nilainya di dapat.
- Memberi deviasi (rentang) pada setiap nilai variabel yang telah didapat.
- Memasukan satu persatu nilai ke dalam model.
- Membandingkan nilai hasil perhitungan dengan hasil pengamatan.

Nilai yang diambil adalah nilai residual terkecil secara *arbitrary* (sedapatnya dari beberapa kali perhitungan). Nilai residual berikut adalah:

$$\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{deformasi}_{\text{observasi}})_i - (\text{deformasi}_{\text{kalkulasi}})_i}$$

Pemberian parameter-parameter dalam perhitungan dilakukan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- Lokasi pusat tekanan adalah satu (*single pressure source*).
- Lokasi pusat tekanan *valid* jika bersesuaian dengan zona aseismik.
- Estimasi radius dan kedalaman pusat tekanan diperoleh dari hasil penelitian kegempaan.
- Parameter tekanan pada daerah gunung api sebesar 1 MPa untuk *moderate explosive*, dan 10 MPa untuk *large explosive* (Wilson, 1980).
- *Shear modulus* (rigiditas) efektif sekitar 1 GPa (Davis dr., 1974; Rubin dan Pollard, 1988; Bonaccorso, 1996). Nilai rigiditas untuk batuan kerak 10.000 – 30.000 MPa, sedangkan pada batuan dengan banyak rekahan dan batuan sedimen nilainya lebih rendah, sekitar 100 sampai 1000 Pa. Nilai rigiditas juga dapat dihitung secara bebas dengan menggunakan kecepatan gelombang gempa sekunder (V_s), dengan rigiditas $= \rho V_s$, $V_p/V_s = 1,79$, $\rho = 2,60 - 2,90 (x 10^3) \text{ kg/m}^3$ untuk kedalaman 0 - Moho (Widiyantoro, 2004).

Setelah hasil perhitungan diperoleh, akan dilakukan interpretasi mengenai deformasi yang terjadi dikaitkan dengan fenomena alam dan disesuaikan dengan data metode lain yang pernah dilakukan sebelumnya. Lokasi pusat tekanan disesuaikan dengan fenomena alam, yaitu pada Kubah Lava November 2007. Dengan demikian nilai X dan Y sudah diketahui, sedangkan parameter lain akan di-

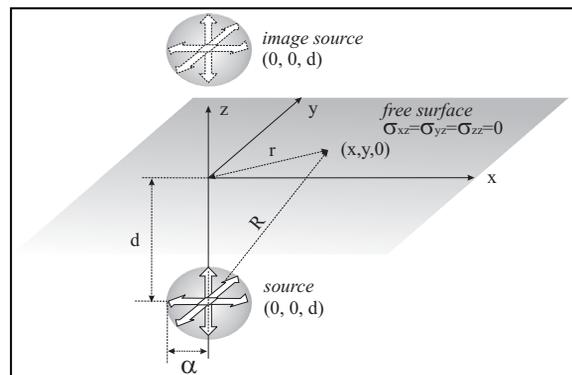
cari untuk dilakukan perhitungan selanjutnya. Posisi X dan Y dihitung dari titik referensi (titik POST), yaitu X= 6,206 km dan Y=-1,348 km. Kedalaman diasumsikan tegak lurus di bawah Kubah Lava November 2007. Nilai kedalaman (Z) dihitung dari puncak Gunung Kelud (1.731 m dpl). Jika dihitung dari dasar Kubah Lava 2007, maka dikurangi dengan ketinggian dasar Kubah Lava 2007 yaitu pada 1.197 m dpl, atau terdapat selisih 537 m (ketinggian puncak Gunung Kelud dikurangi ketinggian dasar kubah lava).

Perhitungan dilakukan dua kali, yaitu terhadap 17 titik ukur dan 7 titik ukur di sekitar Kubah Lava 2007. Perhitungan dengan menggunakan hanya 7 titik ukur terdekat ke Kubah Lava 2007 dimaksudkan untuk mendapatkan pergeseran yang betul-betul merupakan akibat aktivitas vulkanik.

Model Mogi

Metode yang digunakan adalah menurut Kiyoo Mogi (1958) untuk mendapatkan solusi analitis dari titik pusat tekanan diawali dengan menentukan efek akibat tekanan hidrostatik pada kerak bumi. Kerak bumi dianggap memiliki sifat elastis isotropik (sifat mekanis seragam pada setiap arah). Permukaan yang terbebas dari tegangan (*stress*) direkonstruksi dengan memproyeksikan titik pusat tekanan yang sebenarnya ke sisi bidang yang berlawanan (Gambar 3).

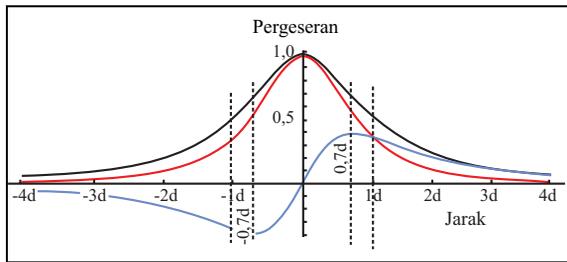
Perubahan posisi suatu titik (*displacement*) di permukaan yang diakibatkan oleh perubahan tekanan hidrostatik di dalam rongga kerak bumi dengan radius lebih kecil dari kedalaman ($\alpha \ll d$) dinyatakan dengan persamaan:



Gambar 3. Koordinat sistem dan hubungan geometri digunakan untuk menghitung deformasi permukaan dari titik pusat tekanan (Lisowski, 2007; dalam Dzurisin, 2007).

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \alpha^3 \Delta P \begin{pmatrix} \frac{x}{R^3} \\ \frac{y}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

u, v, w adalah perubahan posisi pada titik $(x, y, 0)$ dan $R = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}$ adalah jarak radial dari pusat rongga ke satu titik di permukaan. ν adalah *Poisson's ratio*, G adalah *shear modulus*, ΔP adalah perubahan tekanan pada rongga (Gambar 4 dan 5).

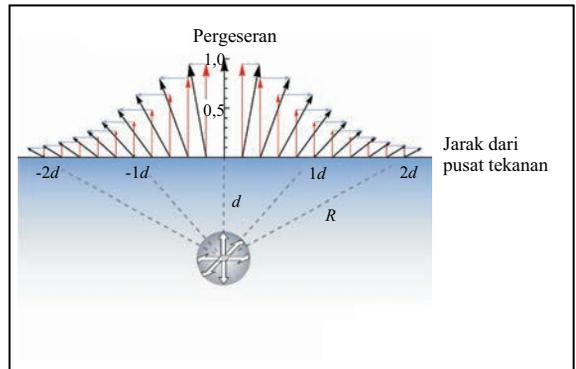


Gambar 4. Penampang pergeseran *axisymmetric*, vertikal-merah, horizontal-biru. Garis hitam adalah total magnitudo dari pergeseran sebagai fungsi dari jarak horizontal kedalaman sumber (Lisowski, 2007; dalam Dzurisin, 2007).

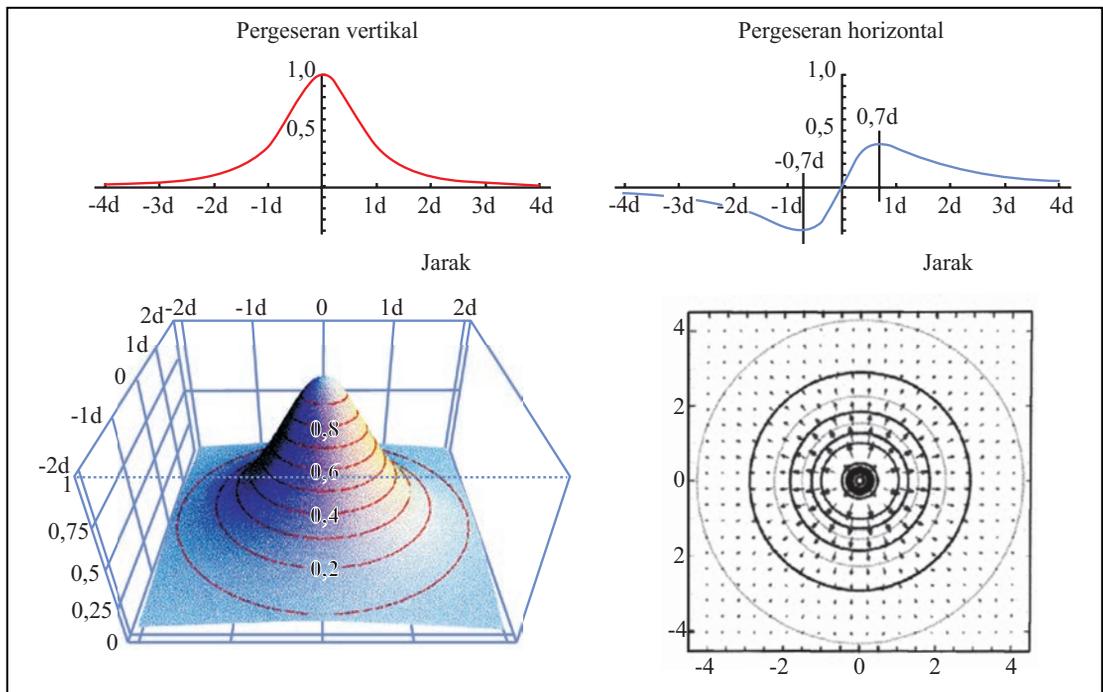
Vektor pergeseran berarah radial terhadap sumber (Gambar 4 dan 6) mempunyai magnitudo:

$$U_r = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-\nu)}{G} \frac{1}{R^2} \dots\dots\dots(2)$$

Magnitudo bervariasi dan berbanding terbalik dengan jarak dari pusat rongga. Lokasi dari pusat (titik tengah dan kedalaman) dapat ditentukan dengan mengukur dua buah vektor pergeseran. Perbandingan $(w/U_r)r$ dengan $U_r = \sqrt{u^2 + v^2}$ sama dengan kedalaman sumber.



Gambar 6. Komponen vektor pergeseran permukaan yang diakibatkan oleh pembungkungan pusat tekanan (Lisowski, 2007; dalam Dzurisin, 2007).



Gambar 5. Pergeseran vertikal dan horizontal akibat pembungkungan pusat tekanan (Lisowski, 2007; dalam Dzurisin, 2007).

Kecepatan *supply* magma ke dalam pusat tekanan dapat diestimasi dengan menggunakan hubungan antara volume permukaan yang terdeformasi dengan kecepatan *lava discharge*. Menurut Delaney dan McTigue (1994) hubungan antara volume permukaan yang terdeformasi (ΔV_{uplift}) dengan perubahan volume pada pusat tekanan ($\Delta V_{injection}$) dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$\Delta V_{uplift} = 2(1 - \nu)\Delta V_{injection} \dots\dots(3)$$

dengan ν adalah *Poisson's ratio* dari batuan induk.

Jika terjadi lava injeksi dan juga lava *discharge*, maka nilai bersih $\Delta V_{injection}$ adalah residual dari ΔV_{supply} (volume *supply* dari zona lebih dalam) dikurangi $\Delta V_{discharge}$ (volume *lava discharge*):

$$\Delta V_{injection} = \Delta V_{supply} - \Delta V_{discharge} \dots\dots(4)$$

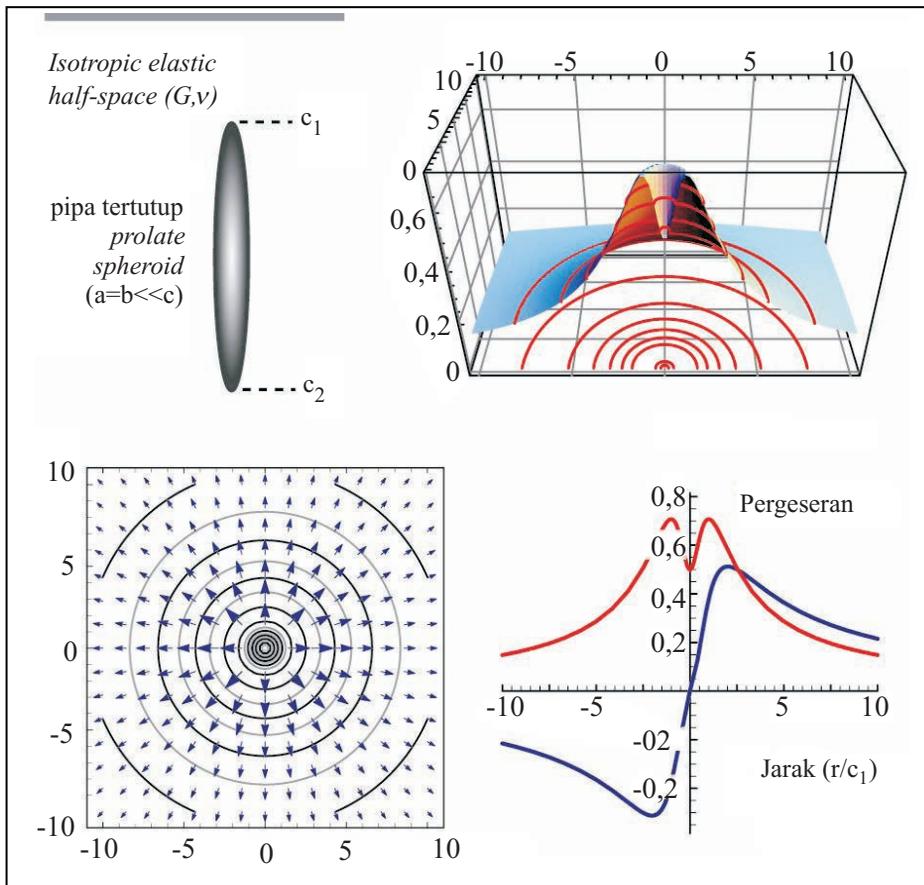
Dari persamaan (3) dan (4) berdasarkan model Mogi, serta nilai $\nu = 0,25$ dan $\Delta V_{uplift} = 2\pi\Delta K$ (Eaton, 1962), diperoleh persamaan :

$$\Delta V_{supply} = \Delta V_{discharge} + \frac{4}{3}\pi\Delta K \dots\dots(5)$$

$K : 3a^3 \Delta p (4\mu)$, dengan a : radius pusat tekanan, Δp : perubahan tekanan, μ : rigiditas, $\mu = \lambda$ (Nishi dr., 1998 dan 2006).

Model Pipa Tertutup

Model Pipa Tertutup (Bonaccorso dan Davis, 1999) digunakan untuk konduit yang tersumbat atau kantong magma yang berbentuk cerutu (Gambar 7). Konduit mengangkut magma dari kantong magma ke permukaan. Pada saat tidak terjadi erupsi, magma di dalam konduit akan membeku dan membentuk sumbat, sehingga tekanan pada sistem magmatis akan meningkat.



Gambar 7. Model Pipa Tertutup dan prediksi pergeseran di permukaan (Lisowski, 2007; dalam Dzurisin, 2007).

Distribusi deformasi permukaan yang diakibatkan oleh pembungkungan (inflasi) pipa tertutup berbeda dengan yang terjadi pada *half-space* (model Mogi). Ada dua faktor yang harus dipertimbangkan, yaitu: (1) hampir semua konduit berukuran relatif lebih kecil dibandingkan dengan kantong magma, dan (2) deformasi yang terjadi bervariasi, membentuk sumber yang memanjang dengan nilai *Poisson's ratio* yang berbeda-beda.

Pergeseran pada pipa tertutup dinyatakan dengan persamaan:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{\alpha^2 \Delta P}{4G} \left(\frac{c_1^3}{R_1^3} + \frac{2c_1(-3+5\nu)}{R_1} + \frac{5c_2^3(1-2\nu) - 2c_2 r^2(-3+5\nu)}{R_2^3} \right) \frac{x}{r^2} \\ v &= \frac{\alpha^2 \Delta P}{4G} \left(\frac{c_1^3}{R_1^3} + \frac{2c_1(-3+5\nu)}{R_1} + \frac{5c_2^3(1-2\nu) - 2c_2 r^2(-3+5\nu)}{R_2^3} \right) \frac{y}{r^2} \\ w &= -\frac{\alpha^2 \Delta P}{4G} \left(\frac{c_1^2}{R_1^3} + \frac{2(-2+5\nu)}{R_1} + \frac{c_2^2(3-2\nu) - 2r^2(-2+5\nu)}{R_2^3} \right) \end{aligned} \right\} (6)$$

dengan c_1 : kedalaman bagian atas pipa, c_2 : dasar pipa, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$: jarak horizontal dari sumber, $R_1 = \sqrt{r^2 + c_1^2}$ dan $R_2 = \sqrt{r^2 + c_2^2}$: jarak dari suatu titik di permukaan ke bagian atas dan dasar pipa (Gambar 7).

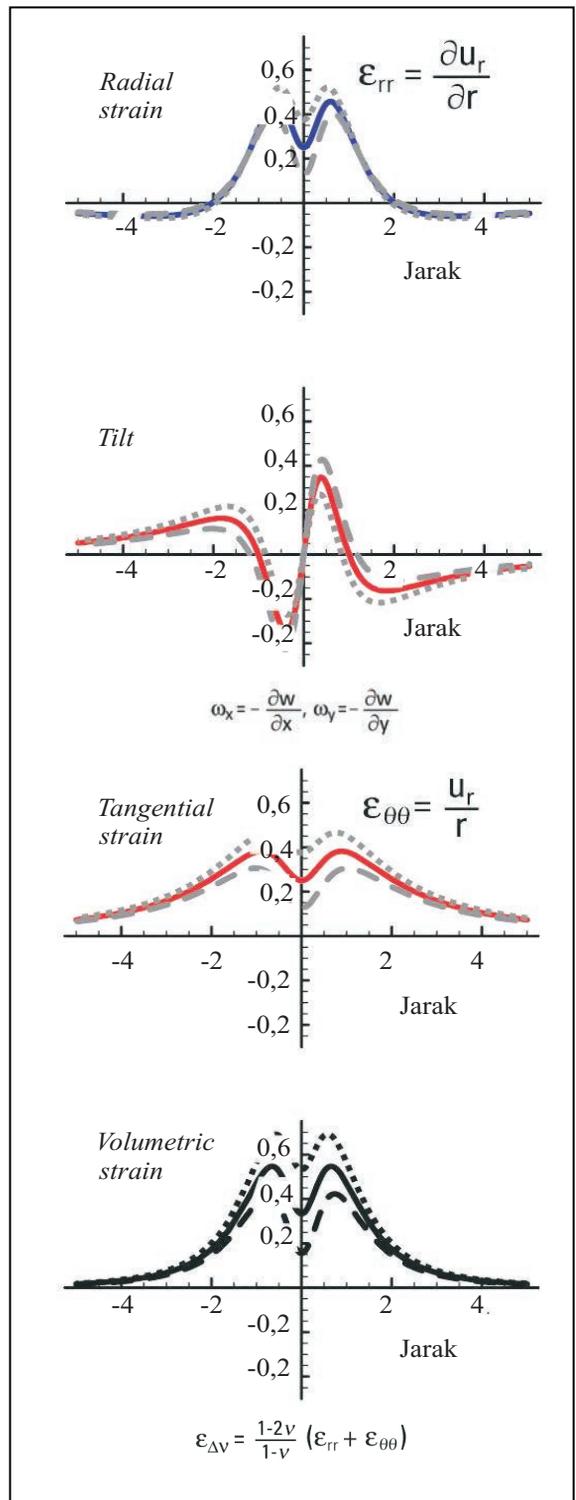
Variasi deformasi bergantung pada jarak vertikal pipa. Pipa yang lebih pendek akan menghasilkan pergeseran vertikal yang kecil pada daerah dekat sumber, serta pergeseran horizontal dan vertikal yang kecil pada daerah yang jauh dari sumber. *Strain* permukaan dan *tilt* untuk pipa tertutup (Gambar 8) lebih bervariasi dan menurun lebih lambat terhadap jarak.

Model pipa tertutup selain untuk merepresentasikan konduit yang tersumbat, juga dapat merepresentasikan kantong magma dalam yang mempunyai sumbu minor lebih kecil daripada sumbu mayor (*prolated spheroid*) (Gambar 9).

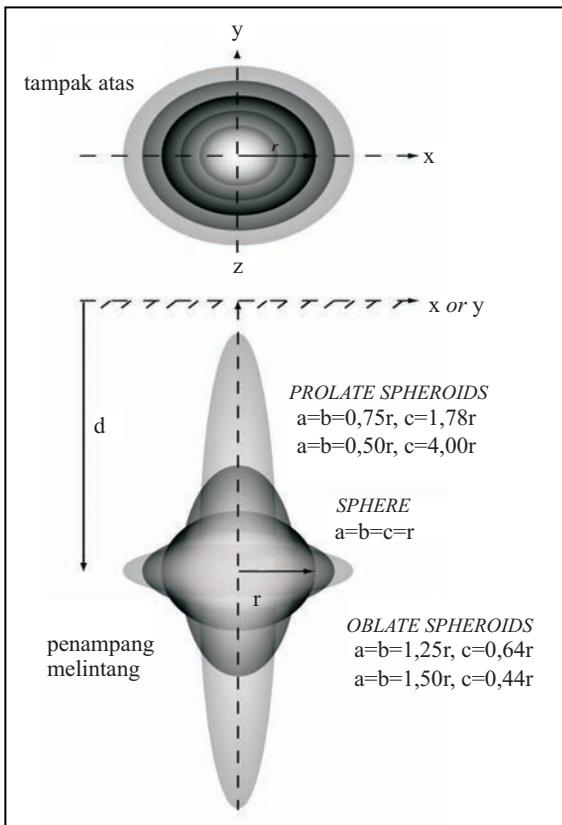
HASIL PENGAMATAN

Vektor Pergeseran

Hasil plot arah vektor (Tabel 1, Gambar 10, dan Gambar 11) menunjukkan pola yang relatif searah (tidak berbentuk radial), tetapi dengan nilai pergeseran yang berbeda. Karena itu dianggap bahwa pola arah vektor tersebut memang merupakan implikasi aktivitas deformasi (bukan karena kesalahan pengolahan). Sebagai pembanding dapat dilihat bahwa



Gambar 8. Penampang *strain* dan *tilt* permukaan inflasi suatu pipa tertutup yang memiliki panjang tak terhingga dengan bagian atas pipa pada kedalaman c_1 (Lisowski, 2007; dalam Dzurisin, 2007).



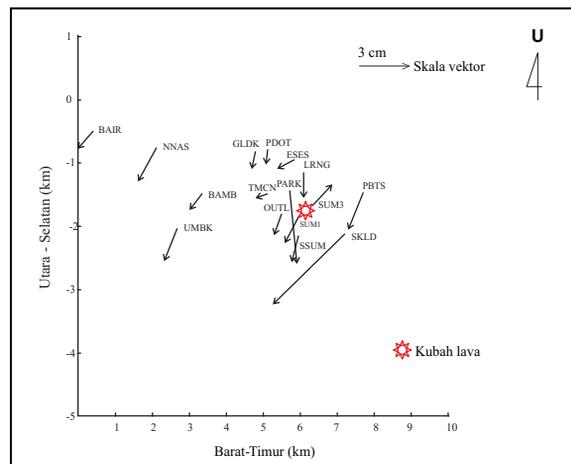
Gambar 9. Beberapa contoh volume yang sama pada rongga spheroidal dengan kedalaman d. Prolate (elongate) spheroid yang memiliki sumbu minor sama dengan atau lebih kecil daripada sumbu mayor ($a=b < c$). Oblate spheroid memiliki sumbu $a=b > c$ (Lisowski, 2007; dalam Dzurisin, 2007).

pola pergerakan arah vektor sebelum efusif November 2007 dan awal tahun 2008 (Februari) yang diolah dengan perangkat lunak *Leica Geo Office Versi 2.0*, menunjukkan pola relatif sama (Gambar 12).

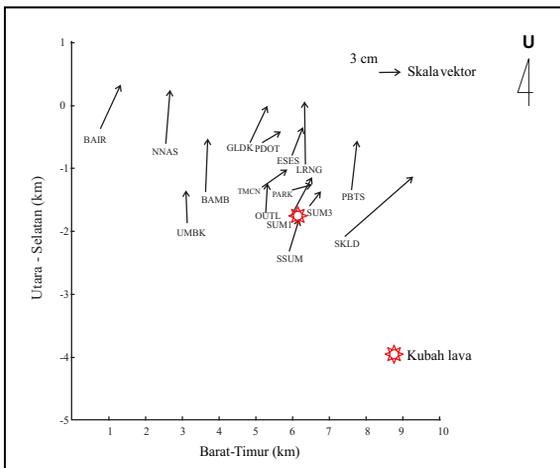
Besar dan arah vektor pergeseran titik-titik ukur relatif searah, yaitu: selatan - barat daya pada periode April - Agustus 2008, dan timur laut pada periode Agustus - Oktober 2008. Hal ini diinterpretasikan bahwa deformasi yang terjadi di Gunung Kelud pada periode April - Oktober 2008 didominasi oleh deformasi akibat aktivitas tektonik (struktur geologi), yaitu gerak yang disebabkan oleh pergeseran bidang sesar dan atau perekahan pada zona-zona lemah di sekitar bidang sesar. Deformasi vulkanik, yaitu yang diakibatkan oleh pergerakan magma, hanya bersifat minor. Deformasi akibat tektonik yang terjadi merupakan kelanjutan dari fase akhir efusif November 2007. Penentuan mekanisme gempa vulkanik A

Tabel 1. Besar Pergeseran Komponen Utara dan Timur Titik Ukur GPS Gunung Kelud

No	Titik Ukur	dN (m)	dE (m)	dh (m)
Agustus 2008 terhadap April 2008				
1	BAIR	-0,011	-0,044	-0,0009
2	BAMB	-0,005	-0,041	0,0022
3	NNAS	-0,011	-0,050	0,0109
4	GLDK	0,001	-0,042	-0,0475
5	PDOT	0,003	-0,040	-0,023
6	ESES	-0,010	-0,038	0,8976
7	LRNG	0,003	-0,049	1,0005
8	PARK	0,005	-0,033	-0,0082
9	OUTL	-0,001	-0,043	-0,0156
10	TMCN	-0,007	-0,035	-0,8623
11	SUM1	-0,007	-0,048	-0,2115
12	SUM3	0,022	-0,023	-0,0063
13	SSUM	0,000	-0,043	-0,8931
14	SKLD	-0,054	-0,067	0,008
15	PBTS	-0,008	-0,052	0,0036
16	UMBK	-0,006	-0,049	-1,1228
Oktober 2008 terhadap Agustus 2008				
1	BAIR	0,022	0,037	-0,005
2	BAMB	0,004	0,042	-0,0269
3	NNAS	0,007	0,043	-0,028
4	GLDK	0,016	0,033	0,0176
5	PDOT	0,018	0,021	0,0144
6	ESES	0,011	0,029	-0,9373
7	LRNG	0,001	0,046	-1,0197
8	PARK	0,019	0,017	-0,0355
9	OUTL	0,001	0,015	-0,3094
10	TMCN	0,019	0,022	0,0116
11	SUM1	0,011	0,031	0,0769
12	SUM3	0,011	0,023	-0,0186
13	SSUM	0,009	0,032	-0,0108
14	SKLD	0,058	0,044	-0,0028
15	PBTS	0,006	0,039	0,3588
16	UMBK	0,002	0,032	-0,0138



Gambar 10. Hasil plot vektor pergeseran observasi titik-titik ukur GPS Gunung Kelud periode April-Agustus 2008.

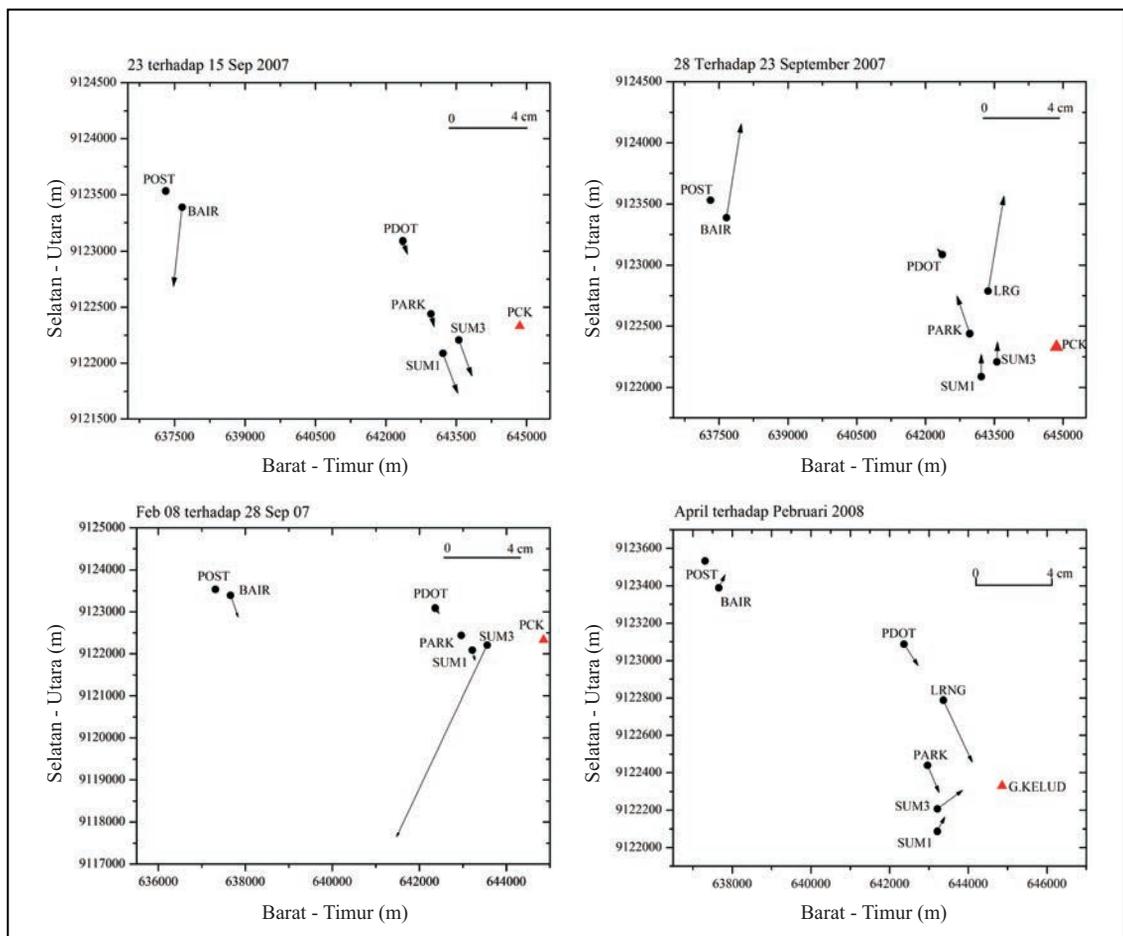


Gambar 11. Hasil plot vektor pergeseran observasi titik-titik ukur GPS Gunung Kelud periode Agustus-Oktober 2008.

menunjukkan solusi sesar naik-geser (*oblique*) berarah relatif barat - timur. Setelah periode tersebut deformasi yang terjadi merupakan mekanisme penstabilan blok-blok sesar di bagian utara dan selatan, sehingga arah vektor yang relatif searah merupakan implikasi dari gerak penstabilan blok tersebut.

Pengaruh minor deformasi vulkanik dilihat dari titik SKLD yang mempunyai besar vektor pergeseran relatif besar dan titik SUM3 mempunyai arah vektor yang berlawanan (radial) dibandingkan titik lain. Diasumsikan bahwa pada titik SKLD dan SUM3 ini terjadi pengaruh deformasi vulkanik (terdekat ke sumber magma) yang disertai juga dengan deformasi akibat tektonik.

Arah vektor tiap titik ukur pada periode April - Oktober 2008 ini juga dikorelasikan dengan hasil pengukuran EDM dari titik POS ke titik PDT dan



Gambar 12. Hasil plot vektor pergeseran titik-titik ukur GPS Gunung Kelud sebelum erupsi November 2007 dan awal tahun 2008 (Februari).

SUM. Pengukuran terakhir yang dilakukan pada Februari 2008 menunjukkan adanya pemendekan ke arah titik POST (arah barat daya dari titik pengukuran GPS dan EDM). Arah pemendekan ini sesuai dengan kecenderungan arah vektor pergeseran titik ukur GPS pada periode April - Agustus 2008.

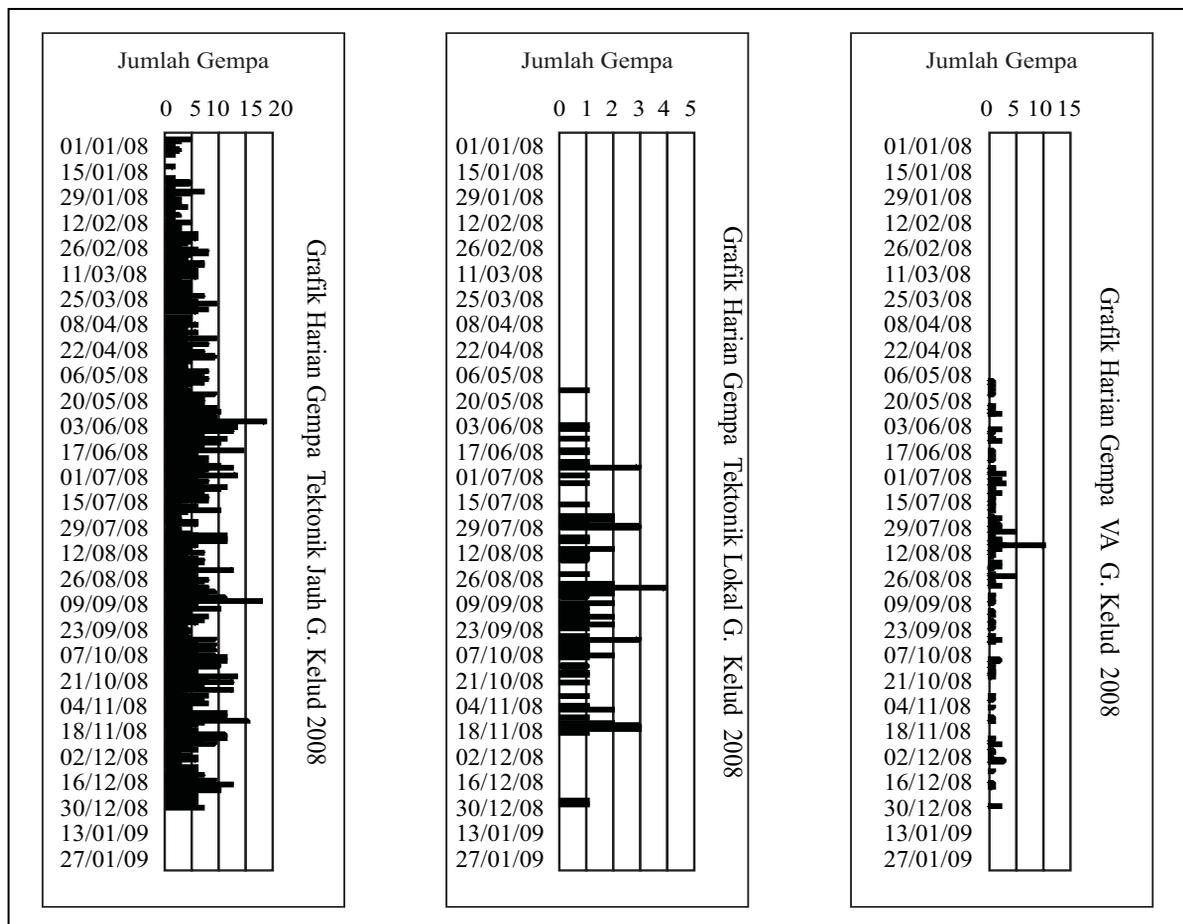
Grafik data gempa harian selama periode April - Oktober 2008 (Gambar 13) menunjukkan masih terjadinya gempa-gempa vulkanik A (VA), gempa tektonik lokal, dan gempa tektonik jauh. Dengan demikian deformasi yang terjadi di Gunung Kelud selama periode tersebut selain dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik juga oleh aktivitas tektonik.

Dengan menampalkan (*overlay*) arah vektor pergeseran dengan peta interpretasi geologi (Gambar 14), yang di dalamnya menggambarkan struktur geologi yang berkembang di Gunung Kelud dan

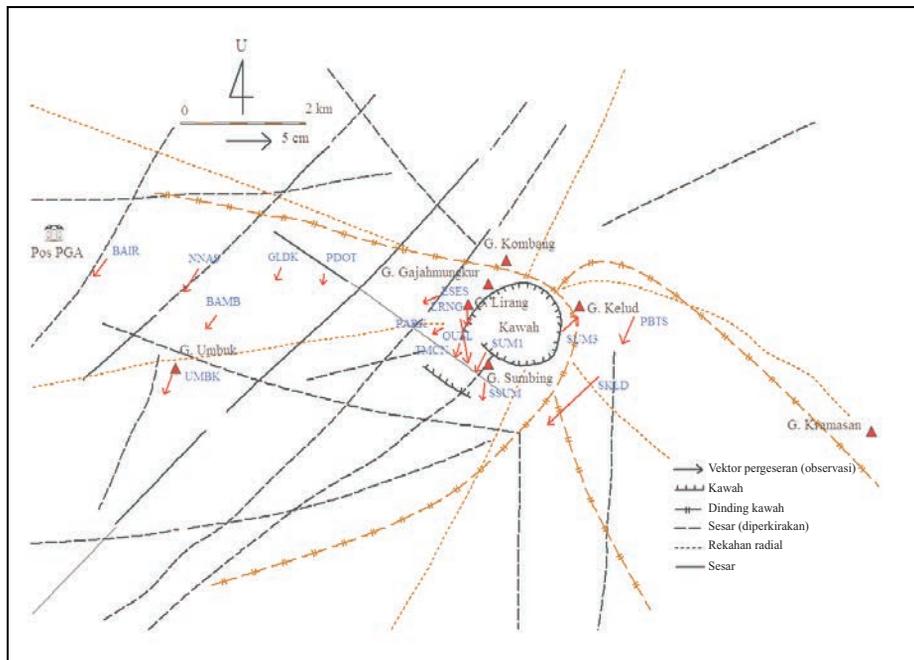
sekitarnya, terlihat bahwa sebaran titik ukur GPS berada pada zona-zona struktur geologi yang cukup kompleks. Hal ini menambah kuat dugaan bahwa sebagian besar pergeseran yang terjadi adalah akibat aktivitas struktur geologi.

Lokasi Pusat Tekanan

Estimasi lokasi pusat tekanan dengan menggunakan Model Mogi dan Pipa Tertutup dilakukan pertama kali dengan memberikan parameter-parameter perhitungan agar didapat kurva yang bersesuaian dengan titik-titik ukur pengamatan (kurva pergeseran). Tidak semua titik ukur tersentuh oleh garis kurva, sehingga dalam perhitungan lokasi pusat tekanan ini masih memberikan nilai residual, yaitu nilai yang menunjukkan seberapa jauh nilai yang diprediksi dengan nilai aktual (nilai observasi).



Gambar 13. Grafik jumlah harian gempa vulkanik A (VA), gempa tektonik lokal, dan gempa tektonik jauh Gunung Kelud tahun 2008.



Gambar 14. Penampalan titik-titik ukur GPS Gunung Kelud dan vektor pergeseran periode April-Agustus 2008 terhadap peta interpretasi struktur geologi (modifikasi dari Pratomo, 1992).

Parameter-parameter yang diberikan dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3, sedangkan hasil perhitungan lokasi pusat tekanan dapat dilihat pada Tabel 4. Asumsi lokasi pusat tekanan adalah area yang memberikan nilai residual terendah. Untuk keperluan perhitungan diambil nilai pergeseran terkecil dari suatu titik ukur, dalam hal ini untuk periode April - Agustus 2008 digunakan titik PARK, sedangkan untuk periode Agustus - Oktober 2008 digunakan titik OUTL.

Pada Tabel 4 di atas terlihat bahwa jika perhitungan lokasi pusat tekanan menggunakan nilai vektor pergeseran Horizontal, maka model mendekati kondisi sebenarnya (nilai residual kecil). Sementara jika menggunakan data vektor pergeseran vertikal, maka nilai residual model lebih besar. Nilai residual ini diperoleh dari metode pengepasan kurva, dan menunjukkan seberapa dekat nilai pengamatan dengan nilai yang diberikan oleh Rumus Mogi (persamaan 1) dan Rumus Pipa Tertutup (persamaan 6).

Gambar 15 - 22 menunjukkan hasil perhitungan dengan metode *best fit optimization/curve fitting*.

Supply Magma

Perhitungan *supply* magma dilakukan berdasarkan data gempa harian selama tahun 2008 (pascapem-

bentukan kubah lava) yang menunjukkan masih adanya gempa-gempa frekuensi rendah, dan gempa fase banyak, yang mengindikasikan masih terjadinya aliran magma, aliran gas, dan atau ekspansi magma pada kedalaman yang relatif dangkal (Suantika, 2007).

Besarnya *lava discharge* diambil dari nilai volume kubah lava berdasarkan perhitungan dari citra satelit sebesar $\pm 16 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ilustrasi hubungan *supply* magma, *magma injected*, dengan *magma discharge* serta korelasinya dengan deformasi yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 23.

PEMBAHASAN DAN TINJAUAN MODEL YANG DIGUNAKAN

Deformasi yang terjadi di Gunung Kelud selama periode April - Oktober 2008 akan dikorelasikan dengan aktivitas fisis untuk mendapatkan interpretasi mengenai mekanisme deformasi yang mungkin terjadi. Karakteristik deformasi yang terjadi secara geometris dikaitkan dengan aktivitas dan stuktur geologi.

Arah vektor pergeseran tiap komponen pada April - Agustus 2008 menunjukkan komponen Utara mengalami nilai negatif (pemendekan) demikian juga

Tabel 2. Parameter Perhitungan Lokasi Pusat Tekanan Periode April - Agustus 2008

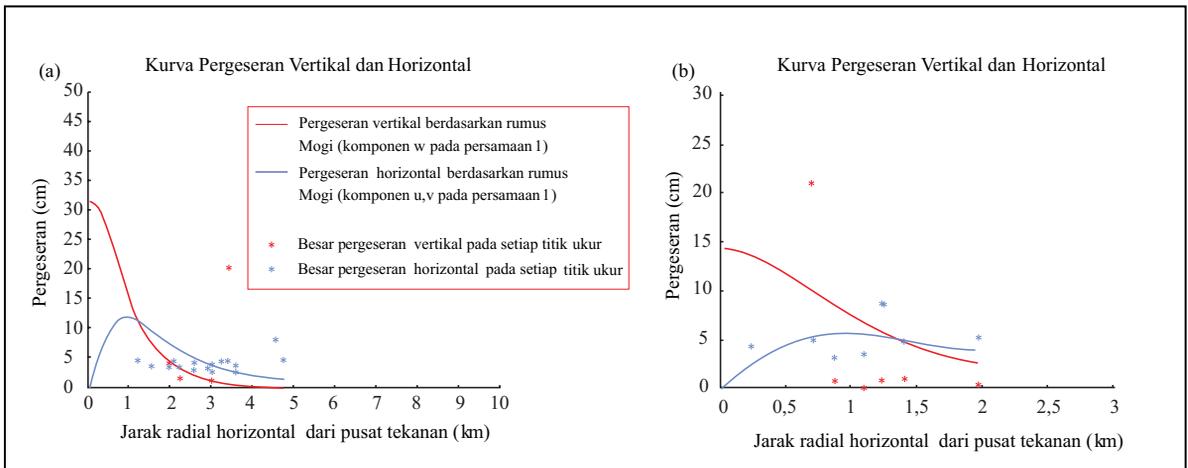
Parameter	Kisaran		Increment	Satuan
	Model Mogi	Model Pipa Tertutup		
X (Barat-Timur)	0 – 10	0 – 10	0,5	km
Y (Utara-Selatan)	-10 – 5	-5 – 5	0,5	km
Rigiditas (G)	3,8 – 4,0	1,5 – 1,7	2	N/m
Tekanan (dP)	275 – 350	175 – 200	2	Bar
Radius (α)	300 – 350	100 – 140	2	km
Kedalaman (d)	1,2 – 1,4	-	2	km
Kedalaman atas pipa (c1)	-	1,2 – 1,8	2	km
Kedalaman bawah pipa (c2)	-	2,7 – 3,0	2	km
Titik ukur referensi	PARK			

Tabel 3. Parameter Perhitungan Lokasi Pusat Tekanan Periode Agustus - Oktober 2008

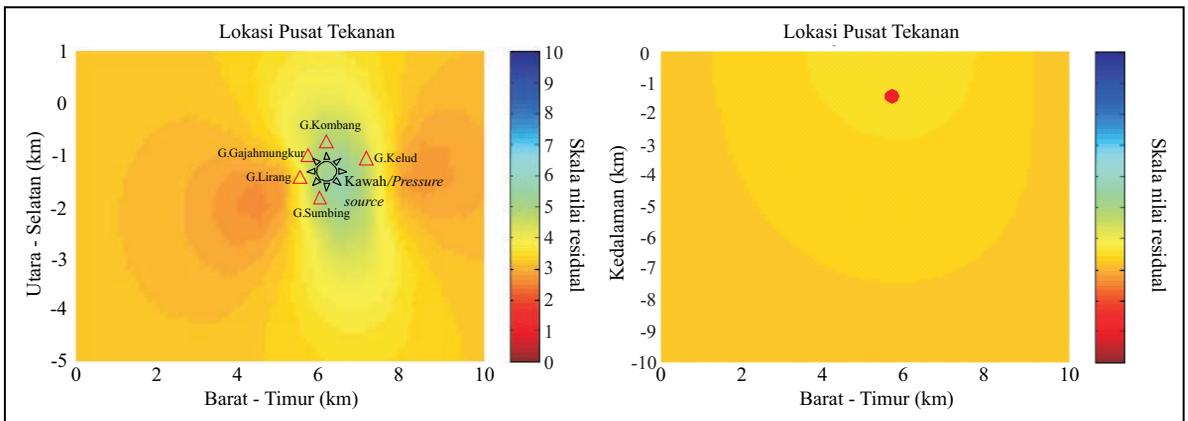
Parameter	Kisaran		Increment	Satuan
	Model Mogi	Model Pipa Tertutup		
X (Barat-Timur)	0 – 10	0 – 10	0,5	km
Y (Utara-Selatan)	-5 – 5	-5 – 5	0,5	km
Rigiditas (G)	3,8 – 4,0	1,5 – 1,7	2	N/m
Tekanan (dP)	200 – 225	175 – 200	2	Bar
Radius (α)	300 – 350	100 – 140	2	km
Kedalaman (d)	1,2 – 1,4	-	2	km
Kedalaman atas pipa (c1)	-	1,2 – 1,8	2	km
Kedalaman bawah pipa (c2)	-	2,7 – 3,0	2	km
Titik ukur referensi	OUTL			

Tabel 4. Hasil Perhitungan Lokasi Pusat Tekanan Gunung Kelud

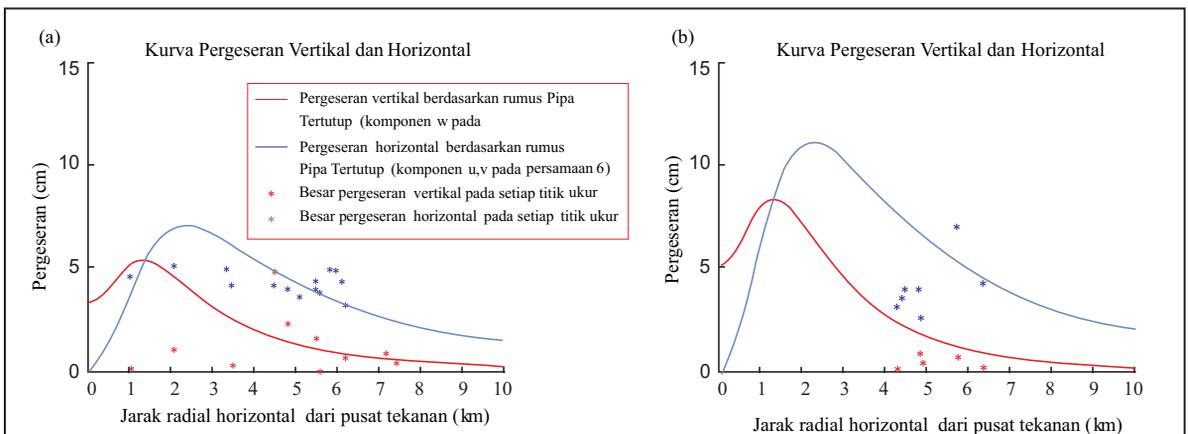
Waktu	Parameter	Model		Satuan
		Mogi	Pipa Tertutup	
April - Agustus 2008	X (Barat-Timur) dari POST	6,206	6,206	km
	Y (Utara-Selatan) dari POST	-1,348	-1,348	km
	Kedalaman (d) dari Puncak	1,222	-	km
	Intensitas (K)	2,45x10 ⁸	1,62x10 ⁸	m ³
	Kedalaman atas pipa (c1) dari puncak	-	1,287	km
	Kedalaman bawah pipa (c2) dari puncak	-	2,956	km
	Residual horizontal	6,282	2,459	cm
	Residual vertikal	33,354	31,939	cm
Agustus - Oktober 2008	X (Barat-Timur) dari POST	6,206	6,206	km
	Y (Utara-Selatan) dari POST	-1,348	-1,348	km
	Kedalaman (d) dari puncak	1,226	-	km
	Kedalaman atas pipa (c1) dari puncak	-	1,545	km
	Kedalaman bawah pipa (c2) dari puncak	-	2,770	km
	Intensitas (K)	6,29x10 ⁸	2,21x10 ⁸	m ³
	Residual horizontal	7,491	2,563	cm
	Residual vertikal	17,047	16,891	cm



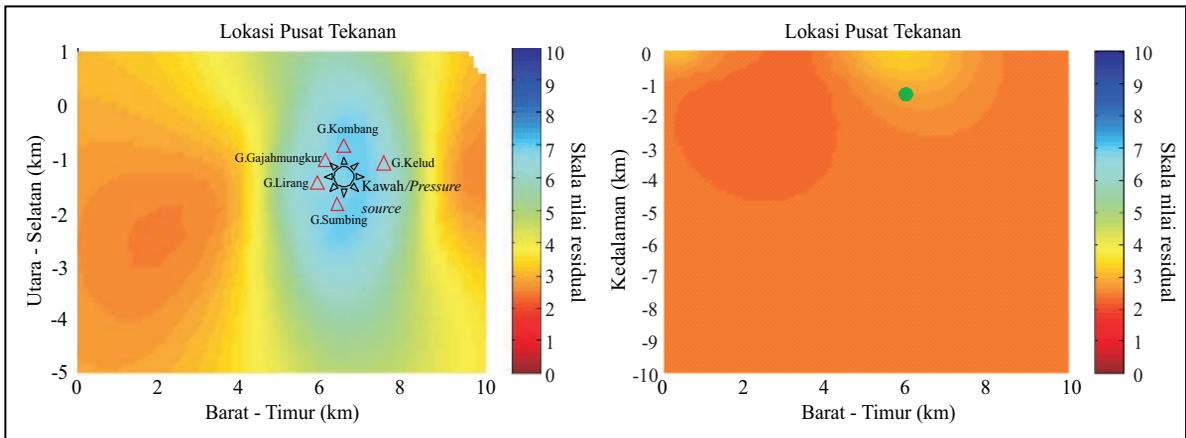
Gambar 15. Kurva pergeseran vertikal (merah) dan horizontal (biru) berdasarkan Model Mogi untuk periode April - Agustus 2008. (a). Perhitungan untuk semua titik ukur, (b). Hanya titik ukur di dekat Kubah Lava 2007.



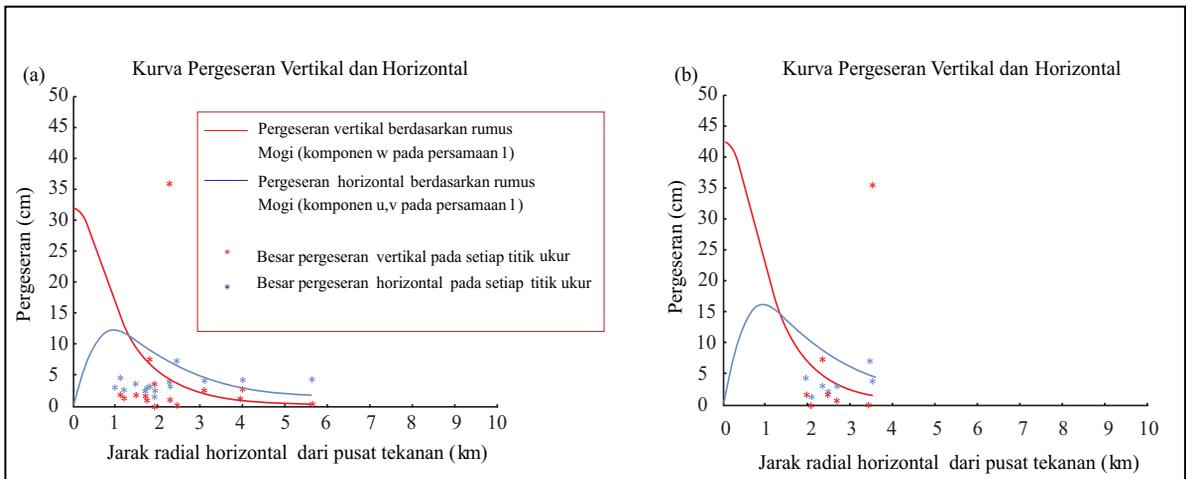
Gambar 16. Perhitungan lokasi pusat tekanan berdasarkan Model Mogi untuk periode April - Agustus 2008.



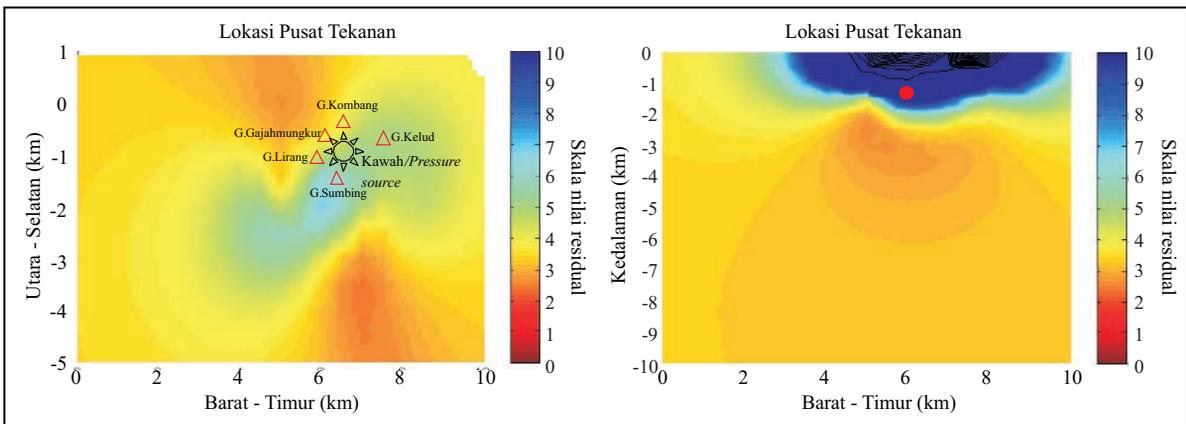
Gambar 17. Kurva pergeseran vertikal (merah) dan horizontal (biru) berdasarkan Model Pipa Tertutup untuk periode April - Agustus 2008. (a). Perhitungan untuk semua titik ukur, (b). Hanya titik ukur di dekat Kubah Lava 2007.



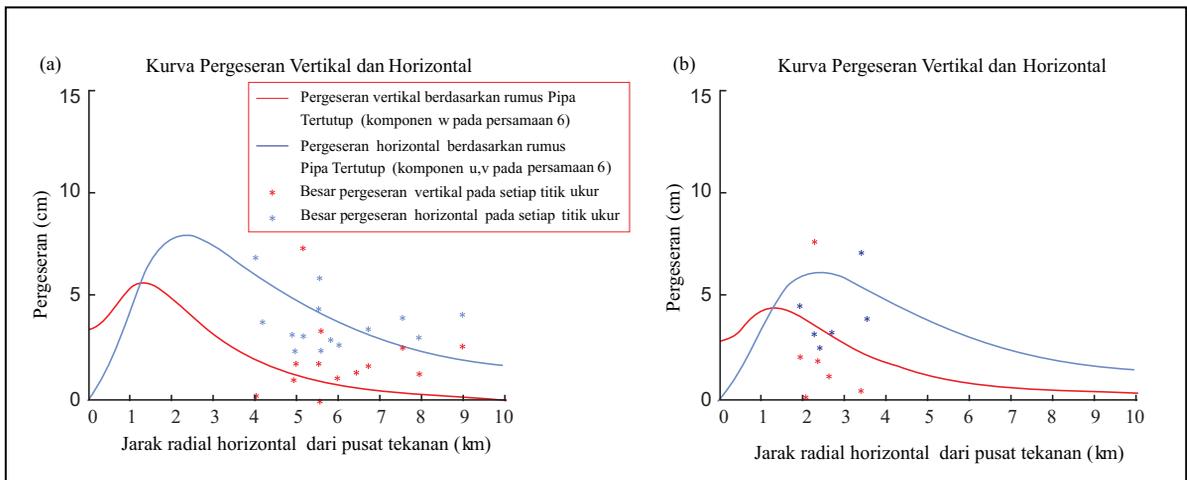
Gambar 18. Perhitungan lokasi pusat tekanan berdasarkan Model Pipa Tertutup untuk periode April - Agustus 2008.



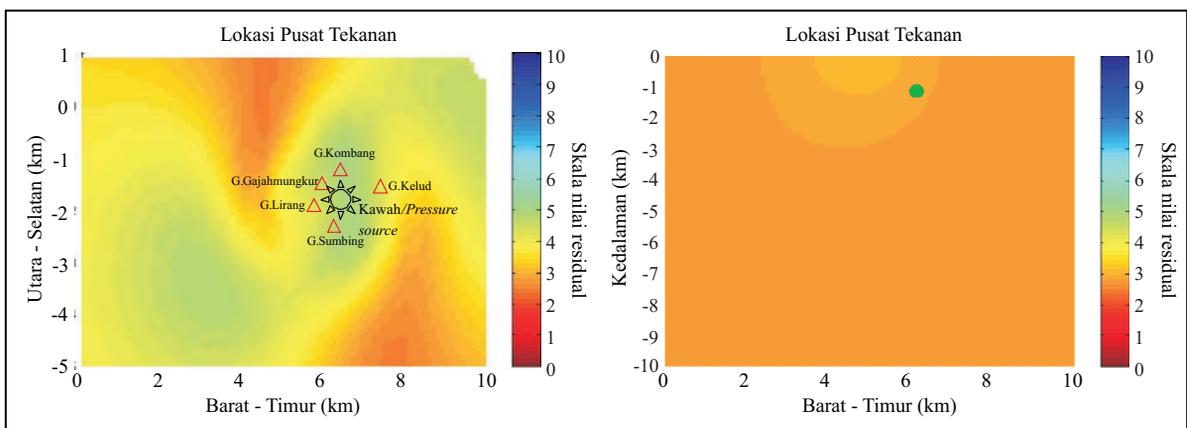
Gambar 19. Kurva pergeseran vertikal (merah) dan horizontal (biru) berdasarkan Model Mogi untuk periode Agustus - Oktober 2008. (a). Perhitungan untuk semua titik ukur, (b). Hanya titik ukur di dekat Kubah Lava 2007.



Gambar 20. Perhitungan lokasi pusat tekanan berdasarkan Model Mogi untuk periode Agustus - Oktober 2008.



Gambar 21. Kurva pergeseran vertikal (merah) dan horizontal (biru) berdasarkan Model Pipa Tertutup untuk periode Agustus - Oktober 2008. (a). Perhitungan untuk semua titik ukur, (b). Hanya titik ukur di dekat Kubah Lava 2007.



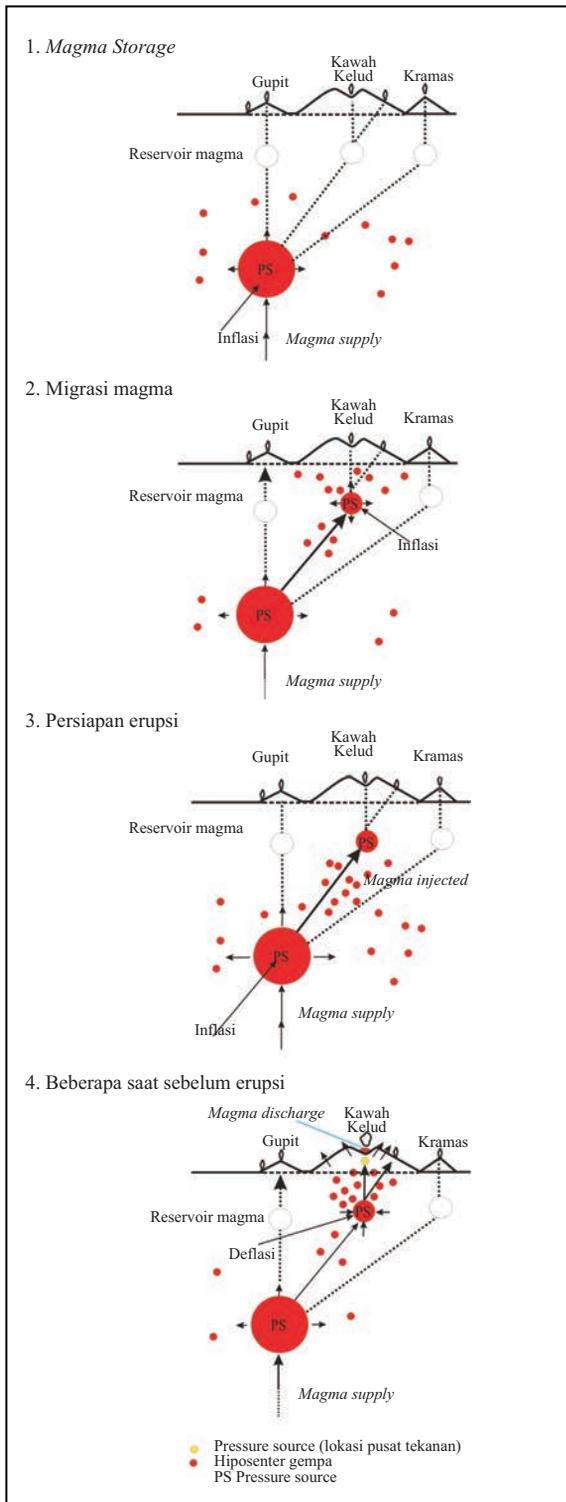
Gambar 22. Perhitungan lokasi pusat tekanan berdasarkan Model Pipa Tertutup untuk periode Agustus - Oktober 2008.

dengan komponen Timur yang didominasi oleh nilai negatif. Pada Agustus - Oktober 2008, komponen Utara dan Timur semuanya bernilai positif (pemanjangan). Proses penyusutan dan pengembangan ini mengindikasikan bahwa aktivitas vulkanik dan atau tektonik di daerah Gunung Kelud pada periode April - Oktober 2008 masih terjadi, dan merupakan fase penstabilan kerak akibat adanya *pressure release* dan cenderung menuju ke arah penyusutan (deflasi).

Deformasi akibat aktivitas vulkanik masih terjadi, walaupun intensitasnya tidak dominan. Hal ini diindikasikan oleh vektor pergeseran terbesar pada titik SKLD dan arah vektor berlawanan pada titik SUM3, serta adanya proses penyusutan dan pengembangan yang ditafsirkan berasosiasi de-

ngan masih terjadinya pengurangan dan penambahan volume magma pada kantong magma. Selain itu, data kegempaan menunjukkan bahwa selama periode April - Oktober 2008 masih terjadi gempa-gempa yang berasosiasi dengan ekspansi magma.

Hasil perhitungan *supply* magma (Tabel 5), menunjukkan bahwa untuk periode Agustus - Oktober 2008 Gunung Kelud masih mengalami inflasi. Tetapi ditinjau dari manifestasi permukaan, yaitu pertumbuhan kubah lava relatif konstan yang diindikasikan oleh jumlah gempa-gempa fase banyak, vulkanik B, dan frekuensi rendah tidak berfluktuasi. Besar vektor pergeseran yang relatif sama pada setiap titik ukur, menunjukkan bahwa deformasi bersifat konstan. Perhitungan volume dari *tilt* (Su-



Gambar 23. Ilustrasi mekanisme magma: magma supply, magma injected, dan magma discharge. Magma supply > magma injected= inflasi, magma supply < magma injected= deflasi, magma supply = magma injected = stabil.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Supply Magma Gunung Kelud

Model	Magma supply (m ³)	Magma injected (m ³)	Deformasi
Mogi	1,63 x 10 ⁹	1,61 x 10 ⁹	Supply > injected = inflasi
Pipa Tertutup	2,63 x 10 ⁸	2,47 x 10 ⁸	Supply > injected = inflasi

antika, 2007) sebesar 46 x 10⁶ m³ dan diperlukan energi sebesar 3,7 x 10¹⁴ Joule. Sementara yang dikeluarkan (volume kubah lava) hanya sekitar 16 x 10⁶ m³. Dengan demikian, masih ada volume magma di bawah permukaan yang harus di-drive ke permukaan oleh sisa energi. Hal ini berimplikasi pada masih terjadinya inflasi di Gunung Kelud pada periode Agustus - Oktober 2008.

Inflasi yang terjadi bisa juga merupakan hasil yang semu karena ketidaksinambungan data. Mungkin saja fase yang terjadi selama April - Oktober 2008 adalah fase deflasi, tetapi karena data yang diolah bersifat diskrit, maka hasil yang muncul adalah inflasi. Padahal bisa saja inflasi ini adalah bagian dari kecenderungan deflasi.

Lokasi pusat tekanan lateral (X dan Y) diperoleh dari manifestasi permukaan saat ini, yaitu berada di Kubah Lava 2007. Validasi kedalaman pusat tekanan dilakukan dengan menggunakan data hiposentrum gempa. Hiposentrum gempa vulkanik B (berasosiasi dengan migrasi magma) selama September 2007 sampai November 2007 (pada saat erupsi aktif) menunjukkan kisaran kedalaman 2 sampai 3 km di bawah puncak, atau 1,4 sampai 2,4 km di bawah kawah. Kedalaman pusat tekanan hasil perhitungan kedua model menunjukkan kedalaman 1,2 sampai 1,5 km di bawah puncak, atau 0,7 sampai 1 km di bawah kawah. Dengan demikian kedalaman pusat tekanan berada pada zona aseismik yang sangat dangkal.

Dengan mengadopsi persamaan 3 tentang perhitungan volume permukaan yang terdeformasi (ΔV_{uplift}), maka diperoleh hasil dari Model Mogi sebesar 2,42 m³ sedangkan Model Pipa Tertutup sebesar 3,70 m³. Berdasarkan hasil tersebut diketahui bahwa dengan Model Mogi, volume permukaan yang terdeformasi lebih besar. Hal ini karena bentuk reservoir magma berbentuk bola yang berakibat tekanan terjadi ke segala arah. Sementara itu, dengan Model Pipa Tertutup volume permukaan yang terdeformasi relatif lebih kecil. Implikasi volume ini adalah besarnya energi yang diperlukan untuk mengeluarkan material; volume yang lebih besar

memerlukan energi yang lebih besar, sehingga jika terjadi erupsi maka skala erupsi akan besar.

Korelasi antara aspek deformasi dengan aktivitas fisis Gunung Kelud selama periode April - Oktober 2008 disajikan sebagai berikut:

Pola vektor pergeseran relatif pada periode April-Agustus 2008 arah selatan-barat daya, sedangkan periode Agustus-Oktober 2008 arah timur laut. Selama periode tersebut terjadi stabilisasi blok sesar naik di bagian utara dan selatan sebagai kelanjutan dari fase eusif November 2007.

Selama periode tersebut di atas diperoleh besaran vektor pergeseran pada titik ukur yang relatif sama, antara 3 – 5 cm. Karena nilai deformasi relatif konstan, diduga bentuk kantong magma tidak beraturan sehingga distribusi tekanan tidak terkonsentrasi dan distribusi tekanan hanya terkonsentrasi pada satu titik, sehingga menyebabkan tidak adanya akumulasi tekanan.

Adanya titik ukur di dekat Kubah Lava 2007 dengan vektor pergeseran terbesar dengan arah yang berlawanan, secara fisis dapat diartikan bahwa deformasi vulkanik terjadi karena pertumbuhan kubah dengan *rate* kenaikan magma konstan.

Penentuan lokasi pusat tekanan dengan Model Mogi memberikan kisaran residual yang lebar, dilihat dari gambar kontur residual warna biru tua yang menunjukkan harga residual tinggi, sedangkan dengan Model Pipa Tertutup kisaran harga residual relatif lebih rendah. Harga residual ini menunjukkan bahwa penentuan dengan Model Pipa Tertutup (untuk Gunung Kelud) memberikan hasil yang lebih baik karena lebih mendekati kondisi lapangan yang sebenarnya.

Pemilihan Model Mogi adalah karena model ini sudah banyak diaplikasikan dan sudah sangat umum digunakan di daerah gunung api. Sudah banyaknya penelitian tentang Model Mogi menghasilkan turunan persamaan yang dapat digunakan untuk aplikasi lebih lanjut (misalnya dalam kasus ini untuk menghitung *supply* magma), sedangkan Model Pipa Tertutup belum banyak diaplikasikan. Penerapan model ini harus disesuaikan dengan kondisi fisis gunung api yang akan diteliti. Pemilihan Model Pipa Tertutup untuk Gunung Kelud mengacu pada adanya pertumbuhan kubah lava. Model ini pernah diaplikasikan di Gunung St. Helens, USA, pada tahun 2004 dengan kondisi fisis yang relatif sama dengan Gunung Kelud yang menghasilkan kubah lava.

Pada Model Pipa Tertutup belum banyak dilakukan penelitian, perhitungannya hanya terbatas untuk pergeseran vertikal dan horizontal saja, sehingga untuk perhitungan *supply* magma mengadopsi pada persamaan yang digunakan dalam Model Mogi.

Pada Model Mogi, reservoir magma diasumsikan hanya berbentuk bola, sedangkan pada Model Pipa Tertutup diasumsikan berbentuk bola, *ellips prolate* ataupun *ellips oblate*, sehingga interpretasi yang diberikan oleh model ini bisa lebih bervariasi.

Model Mogi maupun Model Pipa Tertutup mengasumsikan bahwa lapisan batuan bersifat homogen isotropis. Untuk daerah gunung api yang umumnya aktivitas struktur geologi sangat intens, sifat batuan akan sangat heterogen, sehingga pergeseran yang terjadi tidak murni karena pengaruh aktivitas magma, tetapi akan dipengaruhi juga oleh aktivitas tektonik. Sebagai contoh implikasinya adalah adanya titik yang jauh dari sumber aktivitas (misalnya titik erupsi atau kubah lava), tetapi mengalami pergeseran. Implikasi lain adalah penentuan lokasi pusat tekanan bisa tidak tepat.

Sifat heterogen batuan terlihat dari nilai rigiditas yang diperoleh oleh kedua model. Nilai ini menunjukkan hasil yang relatif berbeda. Rigiditas yang diperoleh oleh Model Mogi lebih besar, sehingga nilai tekanannya pun akan besar karena pada Model Mogi tekanan diasumsikan ke segala arah (termasuk ke arah bawah) sehingga akan memberikan nilai yang besar, sedangkan pada Model Pipa Tertutup tekanan dominan ke arah horizontal. Dengan demikian, untuk kasus Gunung Kelud, model yang lebih baik adalah Model Pipa Tertutup.

KESIMPULAN

- Deformasi yang terjadi di Gunung Kelud pada periode April – Oktober 2008 terjadi akibat pengaruh aktivitas vulkanik dan aktivitas struktur geologi.
- Deformasi akibat struktur geologi maupun akibat aktivitas vulkanik keduanya mempunyai *rate* yang konstan. Hal ini ditunjukkan oleh besar pergeseran yang relatif sama pada setiap periode serta dikorelasikan dengan jumlah gempa yang tidak berfluktuatif.
- Pada periode April - Oktober 2008 masih terjadi migrasi magma. Penentuan besarnya

migrasi baik dengan menggunakan Model Mogi maupun Model Pipa Tertutup menunjukkan kondisi inflasi.

- Penentuan lokasi pusat tekanan dengan menggunakan Model Mogi dan Model Pipa Tertutup hasilnya tidak jauh berbeda. Tetapi ditinjau dari nilai residual, Model Pipa Tertutup memberikan hasil yang relatif lebih baik, khususnya di Gunung Kelud.

Ucapan Terima Kasih—Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Surono (Kepala PVMBG Badan Geologi) dan rekan-rekan kerja di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, yang telah membantu dalam penyediaan data dan diskusi.

ACUAN

- Bonaccorso, A. dan Davis, P.M., 1999. Model of ground deformation from Vertical Volcanic Conduits with Application to Eruptions of Mount St.Helens and Mount Etna. *Journal Geophysics Research*, 104(B5), h.10531-10542.
- Bonaccorso, A., 1996. Dynamic inversion of ground deformation data for modelling volcanic sources (Etna 1991-1993). *Geophysics Research Letter*, 23(5), h.4261-4268.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., dan Meindl, M., 2007. *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern.
- Davis, P.M., Hastie, L.M., dan Stacey, F.D., 1974. Stresses within an active volcanoes: with particular reference to Kilauea. *Tectonophysics*, 22, h.363-375.
- Delaney, P.T. dan McTigue, D.F., 1994. Volume of magma accumulation or withdrawal estimated from surface uplift or subsidence, with application to the 1960 collapse of Kilauea volcano. *Bulletin Vulcanology*, 56, h.417-424.
- Eaton, J.P., 1962. Crustal structure and volcanism in Hawaii. *American Geophysic Union, Geophysic Monogram*, 6, h.13-29.
- Lisowski, M., 2007. Analytical Volcano Deformation Source Models. Dalam: Dzurisin, D., 2007. *Volcano deformation, Geodetic monitoring techniques*, Praxis publishing Ltd., Chichester, UK.
- Mogi, K., 1958. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 36, h.99-134.
- Nishi, K., Ono, H., dan Mori, H., 1998. Global positioning measurements of ground deformation caused by magma intrusion and lava discharge: the 1990-1995 eruption at Udenzake volcano, Kyushu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 89, h. 23-34
- Nishi, K., Hendrasto, M., Mulyana, I., Rosadi, U., dan Purbawinata, M.A., 2006. Micro-tilt changes prior to the summit explosions at Semeru volcano, Indonesia. Submitted for *International Merapi Workshop, CVGHM, Yogyakarta*.
- Pratomo, I., 1992. *Etude de l'eruption de 1990 du Volcan Kelut (Java Est-Indonesie): son apport a l'interpretation de l'activite historique du volcan*. These, Universite Blaise Pascal, tidak dipublikasikan.
- Rubin, A.M. dan Pollard, D.D., 1988. Dike- induced faulting in rift zones of Iceland and Afar. *Geology*, 16, h.413-417.
- Suantika, G., 2007. Laporan tanggap darurat letusan Gunung Kelud November 2007. *Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi*, Bandung.
- Widiyantoro, S., 2004. Fisika Interior Bumi. Program Studi Geofisika, Institut Teknologi Bandung.
- Wilson, L., 1980. Relationship between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic eruptions. *Journal Volcanology and Geothermal Research*, 8, h.297-313.