

Pemodelan Perubahan Densitas dan Viskositas Magma serta Pengaruhnya terhadap Sifat Erupsi Gunung Kelud

Modelling of Magma Density and Viscosity Changes and Their Influences towards the Characteristic of Kelud Volcano Eruption

H. Humaida¹, K. S. Brotopuspito², H. d. pranowo², dan narSito²

¹BPPTK, PVMBG, Badan Geologi, Jln. Cendana 15, Yogyakarta

²Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, Jln. Kaliurang, Yogyakarta 55281

Sari

Erupsi Gunung Kelud pada tahun 2007 bersifat efusif berbeda dengan erupsi-erupsi terdahulu, yang secara umum bersifat eksplosif. Di antara faktor-faktor yang menentukan sifat erupsi tersebut adalah densitas dan viskositas magma. Untuk itu dilakukan suatu kajian terhadap perbedaan erupsi berdasarkan densitas dan viskositas magmanya. Metode yang digunakan adalah analisis geokimia batuan yang kemudian dibuat suatu pemodelan terhadap parameternya. Kajian terhadap erupsi yang bersifat eksplosif dititikberatkan pada data erupsi tahun 1990, sedangkan kajian terhadap erupsi yang bersifat efusif dilakukan terhadap data erupsi tahun 2007. Hasil kajian menunjukkan bahwa viskositas magma Gunung Kelud sangat bergantung pada besarnya konsentrasi H₂O sebagai salah satu komponen volatil dalam magma, dan suhu yang memberikan persamaan eksponensial. Semakin tinggi kandungan H₂O, semakin kecil nilai viskositasnya, demikian pula dengan semakin tingginya temperatur. Kandungan H₂O dalam cairan silika dapat memutuskan ikatan polimer cairan silika, karena polimer yang lebih pendek menghasilkan viskositas yang lebih rendah. Densitas cairan silika Gunung Kelud berkisar antara andesitis dan basaltis, tetapi lebih cenderung pada andesit. Material erupsi 1990 dibandingkan dengan 2007 memberikan hasil densitas cairan silika yang berbeda. Densitas cairan silika pada erupsi 1990 lebih kecil daripada tahun 2007, yang berarti sifat magma tahun 1990 lebih asam. Tingkat densitas cairan silika sangat tergantung pada suhu. Pada suhu 1073 K densitas magma Gunung Kelud 1990 sebesar 2810 kg/m³ dan tahun 2007 sebesar 2818 kg/m³. Sementara itu, densitas magma pada suhu 1673 K dalam erupsi tahun 1990 sebesar 2671 kg/m³ dan tahun 2007 sebesar 2682 kg/m³. Dalam pemodelan dengan menggunakan hukum gas ideal (Hukum Henry), kenaikan magma Gunung Kelud ke permukaan dapat memberikan perubahan sifat fisika. Evolusi tekanan aliran di dalam konduit dicirikan oleh tiga area yang berbeda, yaitu dari dasar konduit sampai tekanan jenuh, kemudian level antara pelepasan dan fragmentasi, serta level di atas fragmentasi, yang mengimplikasikan suatu penurunan gesekan dinding.

Kata kunci: Gunung Kelud, viskositas, densitas, magma, pemodelan

Abstract

The effusive eruption of Kelud Volcano in 2007 was different from the previous ones, which in general were more explosive. Among others, density and viscosity are factors that determine the type of eruption. Therefore, the study on the difference of the recent eruption style based on the density and viscosity of magma was carried out. The method used in this study was based on geochemical analysis of the rock and then a modeling was established by using the above parameter. The study on the explosive eruption was emphasized on the data of 1990 eruption, whereas the effusive eruption was based on the data of 2007 eruption. The result shows that the magma viscosity of Kelud Volcano depend on the H₂O concentration as one of the volatile compound in magma, and temperature which gives the exponential equation. The higher the increase of H₂O content the smaller the value of its viscosity as well as the higher the temperature. The

H₂O content in silica fluid can break the polymer bond of the silica fluid, because a shorter polymer will produce a lower viscosity. The density of the silica content of Kelud Volcano ranges between andesitic and basaltic types, but andesite is more likely. The fluid density of the material of 1990 eruption is different from 2007 eruption. Compared to the 2007, the 1990 eruption material gave a lower density value in its silica fluid than that of the 2007 one. The low density value of the silica fluid of the 1990 eruption material was reflecting a more acid magma. The level of density value of silica fluid depends on its temperature. At the temperature of 1073 K the density of the 1990 Kelud magma is 2810 kg/m³ and the 2007 magma is 2818 kg/m³, whereas at a temperature of 1673 K, the density is 2672 kg/m³ and 2682 kg/m³ of the 1990 and 2007 eruptions respectively. A modeling by using an ideal gas law of Henry's Law illustrated that the ascent of Kelud's magma to the surface may cause changes in its physical properties. The evolution of the flow pressure in the conduit is characterized by three different areas; based of the conduit until the pressure is saturated, then at the level between release and fragmentation, and then the level above the fragmentation, that implicates the decrease in the wall friction.

Keywords: *Kelud Volcano, viscosity, density, magma, modeling*

Pendahuluan

Gunung api muncul akibat magma dari dalam bumi bergerak naik ke permukaan. Naiknya magma ke permukaan disebabkan oleh aktivitas tektonik yang bermula dari ketidakseimbangan litostatik di dalam bumi yang mengakibatkan terjadinya perbedaan tekanan penyebab aliran massa. Penyebab kedua, naiknya magma ke permukaan adalah adanya konduksi panas dari kantong magma ke lapisan batuan terdekat yang berisi gas, air tanah, dan atau fluida lain yang disebut sebagai kantong fluida. Konduksi panas yang terus-menerus menyebabkan peningkatan suhu dan tekanan pada kantong fluida, hingga pada suatu saat tidak dapat menahan tekanan gas. Akibatnya magma mengalir, dan terjadilah erupsi.

Erupsi gunung api melepaskan gas dan melemparkan benda padat lainnya ke atmosfer dalam bentuk pecahan-pecahan batuan berupa blok, bom, dan lapili. Secara garis besar, ada dua tipe erupsi gunung api, yaitu erupsi efusif dan eksplosif. Erupsi efusif terjadi apabila produknya berbentuk aliran massa yang encer, umumnya komposisi magma basa seperti lava basal. Sementara erupsi eksplosif terjadi apabila magma bersifat asam - menengah, seperti riolit, dasit, andesit dengan konsentrasi gas yang tinggi. Tingginya konsentrasi gas menyebabkan lava terfragmentasi menjadi kepingan-kepingan batu, pasir, abu, dan sering diikuti oleh gas-gas vulkanik. Perbedaan tipe gunung api dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Salah satu faktor yang berpengaruh dalam penentuan tipe erupsi gunung api adalah sifat fisika magma, seperti viskositas dan densitas magma.

Sifat efusif erupsi Gunung Kelud pada tahun 2007 berbeda dengan erupsi sebelumnya, yang secara umum bersifat eksplosif. Untuk mengkaji perbedaan sifat erupsi tersebut, maka dilakukan kajian terhadap viskositas dan densitas magma yang merupakan sifat fisika magma yang memengaruhi sifat erupsi suatu gunung api.

Geologi Gunung Kelud

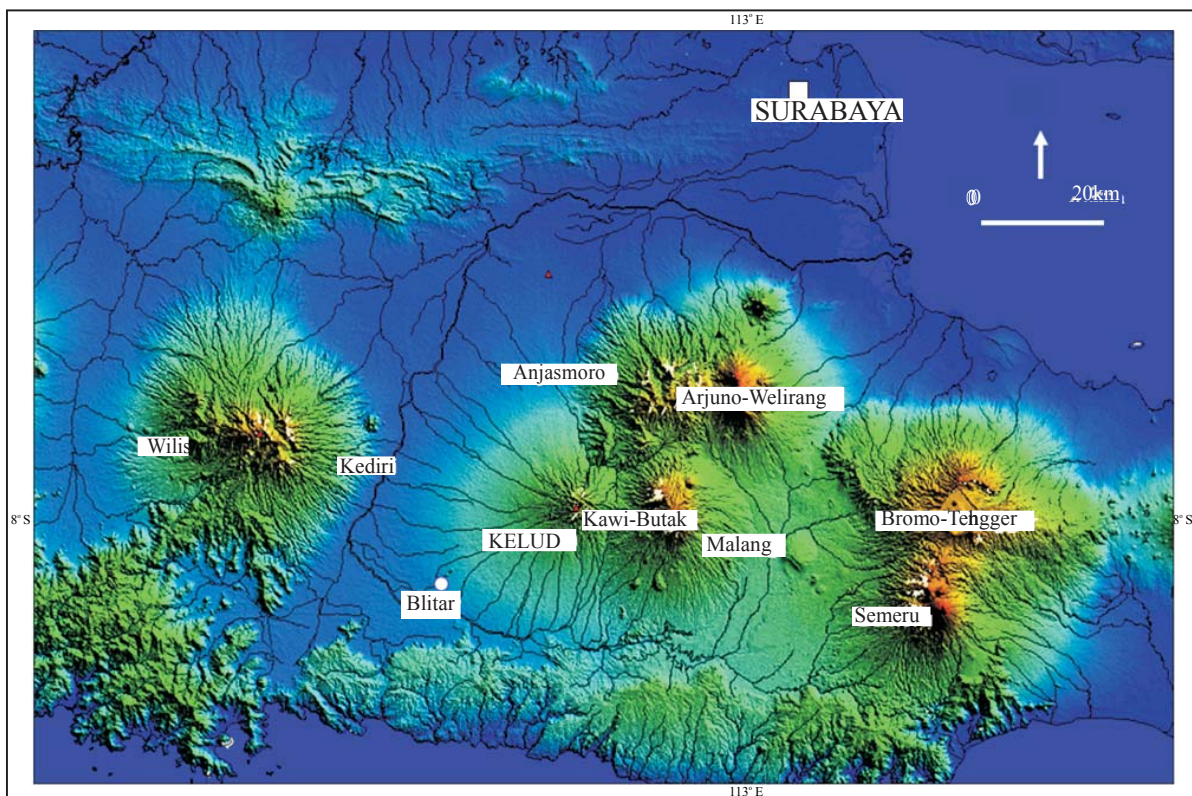
Gunung Kelud merupakan gunung api Kuartar yang merupakan produk proses tumbukan antara lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah lempeng Asia, tepatnya di sebelah selatan Jawa. Sebagai gunung api muda yang tumbuh pada zaman Kuartar Muda (Holosen), Gunung Kelud merupakan salah satu gunung api dalam deretan gunung api yang tumbuh dan berkembang di dalam Subzona Blitar dari Zona Solo; dimulai dari daerah bagian selatan Jawa bagian tengah (Gunung Lawu) hingga Jawa bagian timur (Gunung Raung), yang dibatasi gawir sesar Pegunungan Selatan (Zaennudin, 2008). Gunung api ini merupakan gunung api strato, akan tetapi tidak seperti gunung api strato yang lainnya seperti Gunung Merapi atau Semeru. Hal ini karena kerucutnya tidak begitu jelas, puncak tidak teratur, tajam dan terjal, serta kerucut yang rendah. Keadaan puncak-puncak tersebut disebabkan oleh sifat erupsi yang sangat merusak (eksplosif) disertai dengan pertumbuhan sumbat-sumbat lava, seperti puncak Sumbing, Gajahmungkur, dan puncak Kelud (Zaennudin, 2007).

Secara morfologis, Gunung Kelud dapat dibedakan menjadi lima satuan morfologi (Wirakusumah, 1991), yaitu: Satuan morfologi Puncak dan Kawah; Satuan Morfologi Tubuh Gunung Api; Satuan Morfologi Kerucut Samping; Satuan Morfologi Kaki dan Dataran, serta Satuan Morfologi Pegunungan sekitar.

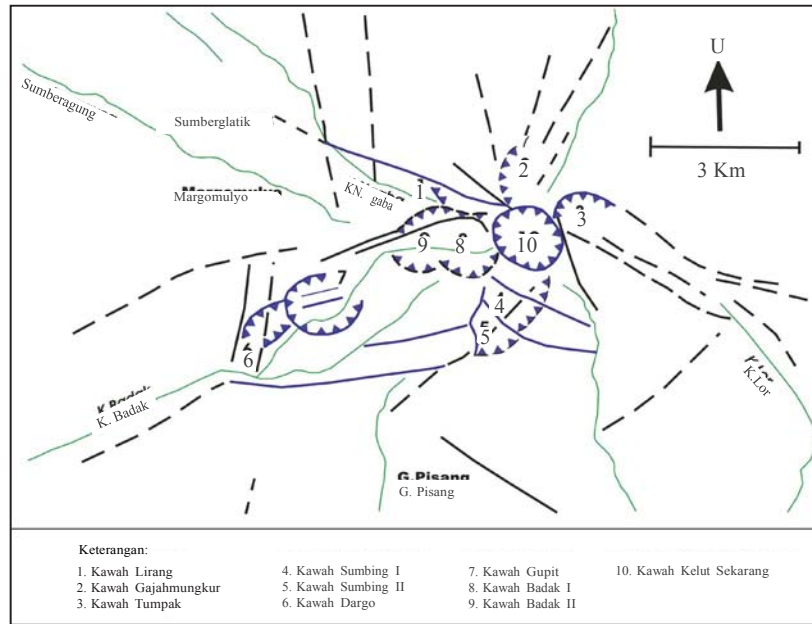
Gunung Kelud dengan puncak tertinggi 1731 m dpl merupakan salah satu gunung api aktif tipe A yang paling berbahaya di Indonesia (Kusumadinata drr. 1979). Dampak erupsinya seringkali menimbulkan korban jiwa yang tidak sedikit. Sejak terdeteksi hingga saat ini tidak kurang dari 15.000 jiwa menjadi korban erupsi gunung api tersebut. gunung api ini merupakan gunung api strato yang terletak di Kediri, Jawa Timur (Gambar 1). Sebelum erupsi November 2007, Gunung Kelud merupakan gunung api yang berdanau kawah. Kawah tersebut merupakan kawah terakhir dari rangkaian kawah yang terbentuk beberapa ratus ribu tahun yang lalu. Kawah ini merupakan pusat aktivitas erupsi sampai saat ini. Berdasarkan urutan umur kawah yang ada,

Gunung Kelud terisi oleh sumbat lava yang terdiri atas sumbat lava Lirang, Gajahmungkur, Tumpak, Sumbing I dan II, Durgo, Gupit, Badak I dan II, serta sumbat lava saat ini. Sumbat lava tertua terbentuk dua ratusan ribu tahun yang lalu. Sumbat-sumbat lava pada kawah-kawah merupakan pusat erupsi yang berpindah searah dengan jarum jam (Wirakusumah, 1991), (Gambar 2).

Antara tahun 1000 dan tahun 1990 erupsi Gunung Kelud terjadi sebanyak 31 kejadian dengan waktu istirahat antara 1 sampai 311 tahun, dengan rerata waktu istirahat adalah 24,21 tahun (Brotopuspito dan Wahyudi, 2007). Erupsi Gunung Kelud secara umum mempunyai sifat eksplosif. Erupsi terjadi dengan tanda yang minim, tidak terjadi erupsi dari kecil kemudian membesar, tetapi terjadi erupsi sangat singkat dan langsung membesar. Sifat erupsi tersebut disebabkan oleh besarnya kandungan gas dan kentalnya magma. Akan tetapi sifat erupsi ini berubah dari sifat eksplosif menjadi efusif pada aktivitas bulan November 2007 dengan membentuk kubah lava yang memenuhi danau kawah.



Gambar 1. Gunung Kelud merupakan gunung api strato tipe A yang berlokasi di Kediri Jawa Timur.



Gambar 2: Kronologi terbentuknya kawah Gunung Kelud (Wirakusumah, 1991).

Sifat erupsi suatu gunung api dipengaruhi oleh sifat-sifat geokimia maupun geofisika. Secara geokimiawi, komponen paling penting yang memengaruhi sifat erupsi suatu gunung api adalah komponen volatil (Wallace dan Anderson, 2000). Komponen volatil di Gunung Kelud memberikan gejala awal yang jelas pada saat aktivitasnya meningkat. Komponen-komponen volatil tersebut antara lain karbondioksida (CO₂), H₂O, sulfat, klorin, serta komponen kimia lainnya. Selain perubahan karakter geokimia yang berpengaruh terhadap perubahan sifat erupsi adalah karakter geofisika. Oleh karena itu, perlu suatu kajian untuk mengungkap karakter erupsi yang ada di Gunung Kelud yang ditinjau dari sudut geokimia, khususnya komponen volatil dan geofisika sebagai kajian pendukung.

Viskositas dan densitas Magma

Viskositas dan densitas magma adalah sifat fisika magma dan sebagai parameter yang signifikan untuk memahami proses aktivitas gunung api. Viskositas magma mengontrol mobilitas magma, densitas mengontrol arah gerakan relatif antara magma dan material padat (batuan fragmen dan kristal). Magma yang mempunyai viskositas rendah, seperti magma basalti, dapat membentuk lava yang sangat panjang

dengan aliran yang cepat. Sebaliknya, magma riolitit yang cukup kental sangat terbatas mengalir. Karena kentalnya magma riolitit, maka gelembung gas di perangkap oleh magma, mengalami ekspansi, dan dapat menyebabkan erupsi yang eksplosif.

Viskositas merupakan sifat suatu cairan atau gas yang berhubungan dengan hambatan alir gas/cairan itu sendiri akibat adanya gaya-gaya antar partikel yang mengalir. Viskositas magma didefinisikan sebagai perbandingan antara *shear stress* dan *strain rate*. Lava akan mengalir pada saat *shear stress* lebih besar dari *yield strength*. Viskositas bergantung pada komposisi/kandungan kristal, gelembung, gas (H₂O), serta temperatur dan tekanan.

Viskositas cairan silika turun dengan naiknya temperatur. Viskositas mempunyai simbol η dengan satuan *poise* atau *dyne.detik/cm²* (Pa.S = 10 *poise*). Beberapa order magnitudo diperoleh dari viskositas lelehan yang stabil dengan besaran viskositas sampai 10¹³ *poise*. Untuk menentukan besarnya viskositas, dapat digunakan persamaan Arrhenian (persamaan 1) terhadap magma di atas temperatur interval (200 - 300°C).

$$\eta = \eta_0 \exp(E/RT) \dots\dots\dots 1)$$

η adalah viskositas, η_0 suatu konstanta viskositas pada kondisi standar, E adalah energi aktivasi, R adalah konstanta gas, dan T adalah temperatur (K).

Akan tetapi pada 25 tahun terakhir, diperoleh bahwa secara umum magma bersifat non-Arrhenian yang disebabkan oleh adanya kandungan H₂O.

Persamaan non-Arrhenian yang digunakan untuk menentukan besarnya viskositas cairan silika dengan adanya kandungan H₂O adalah menggunakan model persamaan Vogel-Fulcher-Tammann (VFT).

$$\log | \eta(T, H_2O) = a(H_2O) + \frac{b(H_2O)}{T - c(H_2O)} \dots\dots\dots 2)$$

a, *b*, dan *c* adalah konstanta yang harus ditentukan terhadap cairan silika dengan menggunakan komposisi uji laboratorium. Hess dan Dingwell (1996) telah menggunakan model non-Arrhenian (persamaan 3) untuk menentukan viskositas cairan *hydrous-leucogranitic* (Hess and Dingwell, 1996)

$$\log | \eta = [a_1 + a_2 \ln(w)] + \frac{[b_1 + b_2 \ln(w)]}{T - [c_1 + c_2 \ln(w)]} \dots\dots\dots 3)$$

h adalah viskositas, *w* kandungan H₂O, *T* temperatur (K), dan *a*₁, *a*₂, *b*₁, *b*₂, *c*₁, dan *c*₂ adalah koefisien model regresi, yaitu: *a*₁ = -3,54, *a*₂ = 0,83, *b*₁ = 9601, *b*₂ = -2366, *c*₁ = 196, *c*₂ = 32.

Viskositas magma juga dipengaruhi oleh kristal yang terkandung di dalamnya. Viskositas magma meningkat dengan naiknya kandungan silika/kristal. Dalam magma *tholeiitic basaltic* viskositas pada 25 % vol kristal mempunyai viskositas sepuluh kali lebih tinggi dibanding dengan magma tanpa kristal. Viskositas kristal magma dapat diestimasi dengan persamaan 4.

$$\eta_{magma} = \eta_{melt} \left(\frac{1 - X}{X_0} \right)^{5/2} \dots\dots\dots 4)$$

X adalah volume fraksi kristal dan *X*₀ sebagai maksimum fraksi dalam padatan.

Percobaan di laboratorium pada cairan silikat multikomponen dan magma pada satu atmosfer menunjukkan kenaikan viskositas dengan penurunan temperatur. Percobaan laboratorium dilakukan karena pengukuran langsung viskositas magma tidak mungkin dilakukan. Contoh hasil pengukuran di laboratorium disajikan pada Tabel 1.

Sebagai pembanding (masing-masing pada temperatur 20 °C) Pitch = 10⁸, Glyserin = 10, air = 10⁻². Satu hal yang sangat terkenal dalam lelehan silikat adalah sebagian besar viskositas isothermal lelehan silikat turun dengan naiknya tekanan. Pada saat tekanan naik pada temperatur konstan, kecepatan viskositas akan turun lebih kecil pada magma basaltis dibandingkan pada magma andesitis. Viskositas

Tabel 1. Viskositas (η) dalam g/cm det pada Tekanan Atmosfer

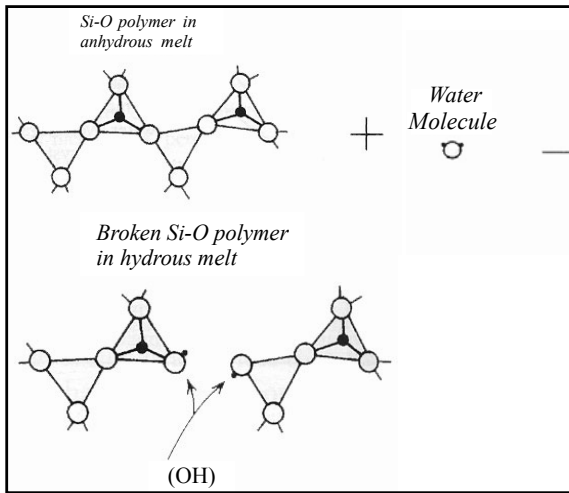
| Jenis lelehan | T (°C) | | |
|---|----------------------|---------------------|-----------------------|
| | 1150 | 1200 | 1300 |
| Ortoklas, KAlSi ₃ O ₈ | ~ - | 5 x 10 ⁸ | 1 x 10 ⁷ |
| Albit, NaAlSi ₃ O ₈ | ~1 x 10 ⁸ | 8 x 10 ⁶ | 4 x 10 ⁵ |
| Andesit basal | ~8 x 10 ⁴ | 3 x 10 ⁴ | 2.6 x 10 ² |
| Ovilin basal | ~9 x 10 ² | 5 x 10 ² | 2 x 10 ² |

turun kemungkinan berhubungan dengan perubahan pada bilangan koordinasi Al dari 4 menjadi 6 dalam lelehan, sehingga menurunkan jumlah pembentukan tetrahedra. Gerakan magma naik dengan kenaikan tekanan dan proses magmatik seperti pembentukan kristal dalam magma kemungkinan menjadi tinggi di bawah tekanan.

Densitas ukuran kepekatan atau kemampatan suatu zat merupakan perbandingan antara massa dan volume zat itu sendiri. Magma terdiri atas cairan silika, dan material lainnya, seperti kristal, gelembung gas, dan fragmen batuan. Cairan silika mengandung rantai panjang dan cincin polimer Si-O tetrahedra, bersama-sama kation (seperti Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺) dan anion (misal OH-, F-, Cl-, S-) yang terletak secara acak, berada dalam tetrahedra (Gambar 3). Densitas rangkaian Si-O, yang merupakan fungsi komposisi, tekanan, dan temperatur, mengontrol sifat-sifat fisika cairan, seperti densitas dan viskositas. Densitas cairan silika berbeda dengan densitas magma, karena cairan silika tidak mengandung kristal, gelembung, dan fragmen. Batuan ini akan memengaruhi densitas magma. Densitas cairan silika mempunyai rentang antara 2850 kg/m³ untuk basaltik sampai 2350 kg/m³ untuk riolit.

Ada beberapa cara untuk mengestimasi densitas cairan silika. Salah satu metode tersebut adalah dengan menggunakan hubungan linier antara volume molar cairan silikat dengan penambahan parsial volume molar komponen oksida. Nilai tersebut diestimasi dari komponen mayor oksida dalam magma yang diukur di laboratorium dengan mengukur sistem oksidasi yang sederhana. Dengan demikian, maka densitas cairan silika dapat ditentukan dengan persamaan 5.

$$\rho = \sum_{i=1}^N \frac{X_i M_i}{V_i} \dots\dots\dots 5)$$



Gambar 3. Rantai panjang dan cincin polimer Si-O tetrahedra.

ρ adalah densitas, V_i volume molar parsial komponen oksida i , X_i adalah fraksi komponen oksida i dan M_i adalah berat molar komponen oksida i .

Untuk menghitung densitas cairan silika, harus diketahui fraksi mol masing-masing oksida dalam cairan, massa molekul masing-masing oksida, dan fraksi volume masing-masing oksida pada suhu dan tekanan tertentu, (persamaan 6).

$$X_{SiO_2} = (mol\ SiO_2) / (Total\ mol\ seluruh\ oksida) \dots 6$$

Fraksi volume masing-masing oksida ditentukan dengan persamaan 7.

$$V_i(T, P, X) = \bar{V}_i + \left[\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial T} \right]_P (T - 1673) + \left[\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial P} \right]_T P \dots 7$$

Metode perhitungan tersebut menghasilkan pengukuran densitas cairan silikat dengan komposisi yang kompleks dalam magma dan biasanya digunakan untuk menghitung densitas magma. Densitas magma (campuran cairan silika dan gelembung) dapat dihitung dengan hukum gas ideal, (Hukum Henry).

$$\frac{1}{\rho} = \frac{n_{ex} RT}{P} + \int \dots 8$$

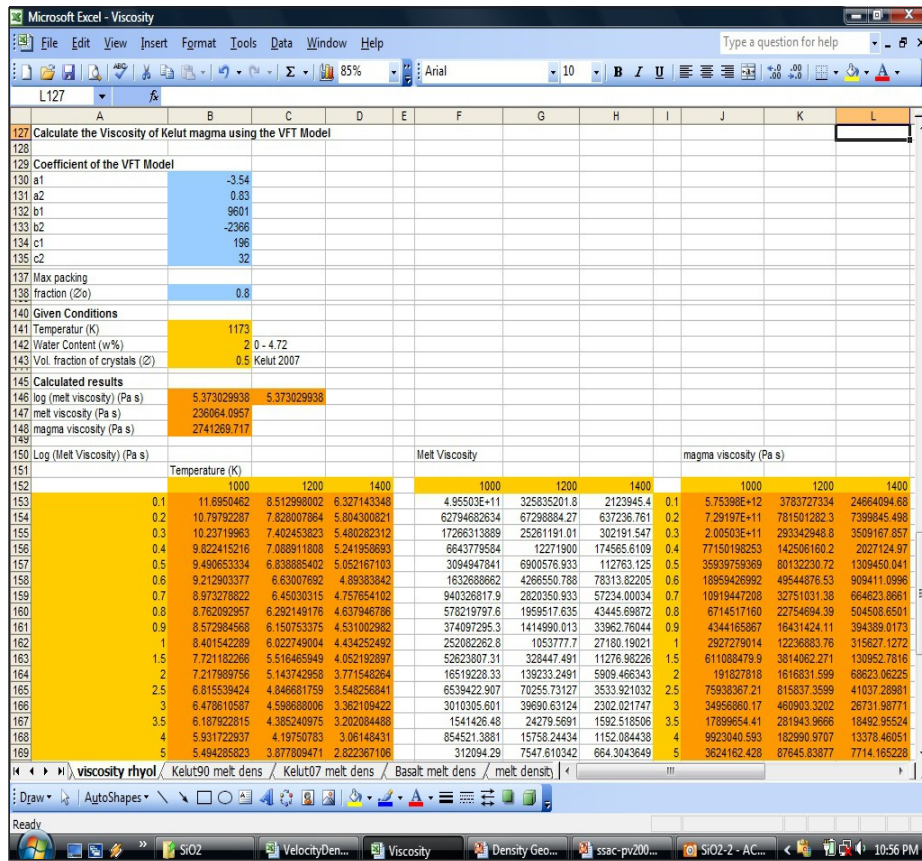
ρ adalah densitas campuran magma-gas, n_{ex} adalah fraksi massa volatil terlarut dalam magma pada kondisi tidak terjenuhkan, R adalah konstanta gas ($462\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) untuk uap H_2O , T temperatur (K), P tekanan (Pa), dan σ densitas cairan silika pada kondisi tertentu.

Hasil dan Pembahasan

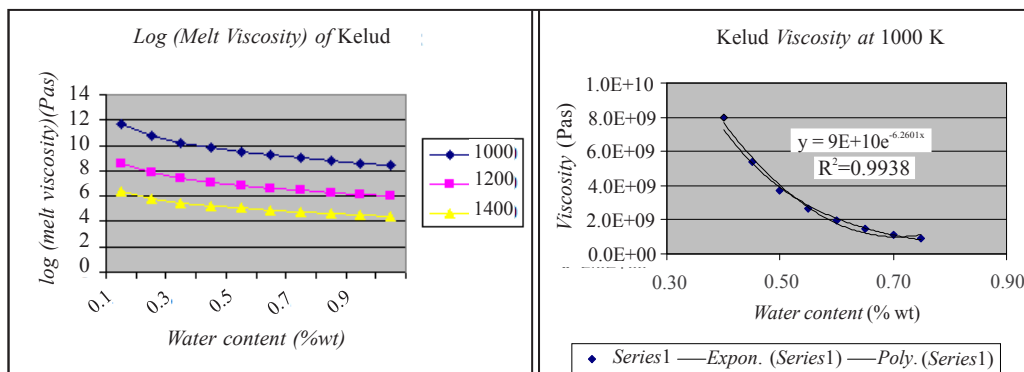
Kajian viskositas magma Gunung Kelud dilakukan berdasarkan data komposisi kimia (konsentrasi H_2O) maupun jumlah kristal hasil erupsi tahun 1990 dan 2007. Konsentrasi H_2O batuan magma Gunung Kelud bervariasi mulai dari batuan yang tidak mengandung H_2O sampai dengan 4,72 % berat. Sementara untuk banyaknya kristal yang ada dilakukan berdasarkan magma 2007, yaitu maks packing fraksi kristal (ϕ) sebesar 0,7 atau 70 %, dan volume fraksi kristal (V_f) sebesar 5 %. Dengan menggunakan variabel-variabel yang memengaruhi viskositas dan uji statistik dengan ANOVA, maka diperoleh hasil seperti yang terdapat pada Gambar 4 dan 5. Dari gambar terlihat bahwa efek kandungan H_2O terhadap besaran viskositas magma Gunung Kelud sangat bergantung pada besarnya konsentrasi H_2O dan suhu serta memberikan persamaan eksponensial. Semakin tinggi kandungan H_2O semakin kecil nilai viskositas, demikian pula dengan semakin tingginya temperatur. Kandungan H_2O dalam cairan silika dapat memutuskan ikatan polimer cairan silika, dan polimer yang lebih pendek menghasilkan viskositas yang lebih rendah.

Densitas yang merupakan suatu ukuran kemampatan atau kepadatan suatu zat digunakan untuk menerangkan bagaimana magma mengalir. Seperti halnya viskositas, kajian densitas Gunung Kelud sangat diperlukan. Dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah disampaikan sebelumnya, kajian densitas terhadap cairan silika maupun magma memberikan hasil seperti pada Gambar 6 dan 7.

Dari hasil tersebut terlihat bahwa densitas cairan silika Gunung Kelud terletak antara andesit dan riolit, akan tetapi sangat mendekati andesit. Hal ini sesuai dengan batuan yang telah dianalisis oleh Wirakusumah (1991), bahwa batuan Gunung Kelud merupakan batuan andesit. Material erupsi 1990 dibandingkan dengan 2007 memberikan hasil densitas cairan silika yang berbeda. Densitas cairan silika pada erupsi 2007 lebih besar daripada tahun 1990, yang berarti magma erupsi 2007 relatif lebih basa dibanding tahun 1990. Hal ini terjadi karena kandungan gas yang lebih besar pada erupsi 1990 bersifat eksplosif, dan tahun 2007 lebih masif. Lebih masifnya magma tahun 2007 diduga karena adanya sumbat lava 1990 yang sebagian besar masih berada



Gambar 4. Perhitungan hasil pemodelan viskositas Gunung Kelud dengan menggunakan VFT model.



Gambar 5. Grafik hasil pemodelan viskositas Gunung Kelud dan persamaan yang dihasilkan merupakan persamaan eksponensial.

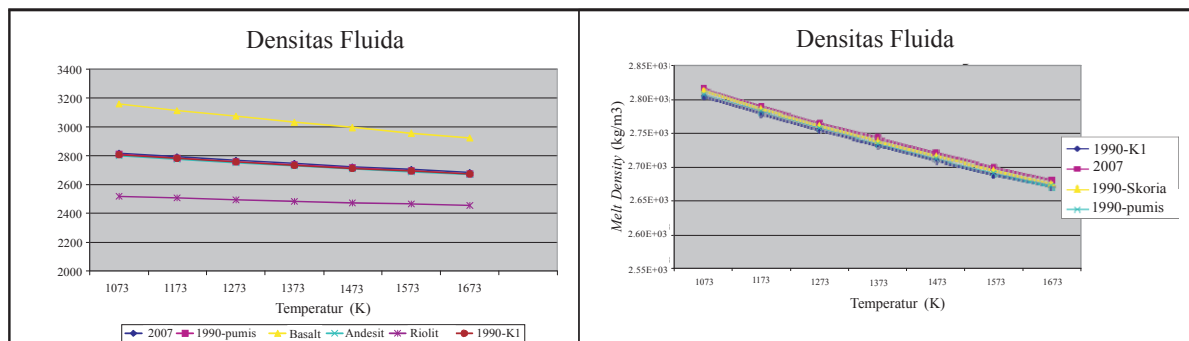
pada kondukt. Hal ini dibuktikan dengan adanya kristal-kristal plagioklas, piroksen, dan mineral opal yang terdapat sebagai fenokris berbentuk *euhedral* - *subhedral* (Zaennudin, 2008). Gejala ini merefleksikan bahwa munculnya kubah lava ke permukaan sebagian besar dalam kondisi yang sudah padat karena

kristal-kristal yang terdapat di dalamnya sebagian sudah berbentuk sempurna (*euhedral*) dan sebagian *subhedral*. Jadi, kondisi magma yang terdapat dalam kondukt sebagian besar telah membeku membentuk kristal-kristal tersebut di atas, tidak didominasi oleh magma yang masih dalam fase cair.

| Oxide | wt % | mass (g/mol) | mol | mole fraction | Partial Mol Vol (1e-6 m3/mol) | Thermal expansion (1e-6 m3/mol K) | Compressibility (1e-6 m3/mol Gpa) | Fraction Molar Volume (T,P,X) (m3/mol) | Fractional Density (kg/m3) |
|----------------------|----------|--------------|-----------|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|
| Kelud | | | | | | | | | |
| Temp (K) | 1673 | (Mi) | | (Xi) | | | | (Vi) | |
| Pressure (Gpa) | 1.00E+00 | molecular | | | | | | | |
| SiO2 | 54.07 | 60.08 | 0.899667 | 0.5616416 | 26.75 | 0 | -1.89 | 2.49E-05 | 1.36E+03 |
| TiO2 | 0.79 | 79.88 | 0.0098898 | 0.0061719 | 22.45 | 0.00724 | -2.31 | 2.01E-05 | 2.45E+01 |
| Al2O3 | 19.02 | 101.96 | 0.1865437 | 0.1164162 | 37.8 | 0 | -2.26 | 3.55E-05 | 3.34E+02 |
| Fe2O3 | 9.39 | 159.69 | 0.0588014 | 0.0366962 | 44.4 | 0.00909 | -2.53 | 4.19E-05 | 1.40E+02 |
| FeO | | 71.85 | 0 | 0 | 13.94 | 0.00292 | -0.45 | 1.35E-05 | 0.00E+00 |
| MnO | 0.2 | 70.94 | 0.0028193 | 0.0017594 | 13.94 | 0.00292 | -0.45 | 1.35E-05 | 9.25E+00 |
| MgO | 3.99 | 40.3 | 0.0990074 | 0.0617875 | 12.32 | 0.00327 | 0.27 | 1.26E-05 | 1.98E+02 |
| CaO | 8.38 | 56.08 | 0.1494294 | 0.0932543 | 16.95 | 0.00374 | 0.34 | 1.73E-05 | 3.02E+02 |
| Na2O | 1.7 | 61.99 | 0.0274238 | 0.0171143 | 29.03 | 0.00768 | -2.4 | 2.66E-05 | 3.98E+01 |
| K2O | 0.94 | 94.2 | 0.0099788 | 0.0062274 | 46.3 | 0.01208 | -6.75 | 3.96E-05 | 1.48E+01 |
| H2O | 0.05 | 18.02 | 0.0027747 | 0.0017316 | 26.27 | 0.00946 | -3.25 | 2.30E-05 | 1.36E+00 |
| CO2 | 0 | 44.01 | 0 | 0 | 33 | 0 | 0 | 3.30E-05 | 0.00E+00 |
| Sum | 98.53 | | 1.4466351 | 0.9028006 | | | | | |
| melt density (kg/m3) | 2.42E+03 | | | | | | | | 2421.287332 |

| | 2007 | 1990-pumice | Basalt | Andesit | Rhyolite | 1990-K1 | 2007 |
|------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 1373 | 2477.802888 | 2518.588813 | 3020.3734 | 2584.2122 | 2355.754771 | 2.51E+03 | 2477.802888 |
| 1423 | 2467.768992 | 2508.353315 | 3001.1224 | 2573.9049 | 2350.912935 | 2502.45862 | 2467.768992 |
| 1473 | 2457.993984 | 2498.381017 | 2982.3644 | 2563.8739 | 2346.219876 | 2492.346417 | 2457.993984 |
| 1523 | 2448.467693 | 2488.661646 | 2964.0802 | 2554.1081 | 2341.668699 | 2482.49973 | 2448.467693 |
| 1573 | 2439.18049 | 2479.185468 | 2946.2516 | 2544.5968 | 2337.252937 | 2472.907844 | 2439.18049 |
| 1623 | 2430.123253 | 2469.943258 | 2928.8616 | 2535.3297 | 2332.966519 | 2463.560639 | 2430.123253 |
| 1673 | 2421.287332 | 2460.926263 | 2911.8936 | 2526.2973 | 2328.803737 | 2454.448546 | 2421.287332 |

Gambar 6. Metode pemodelan penentuan densitas magma Gunung Kelud.

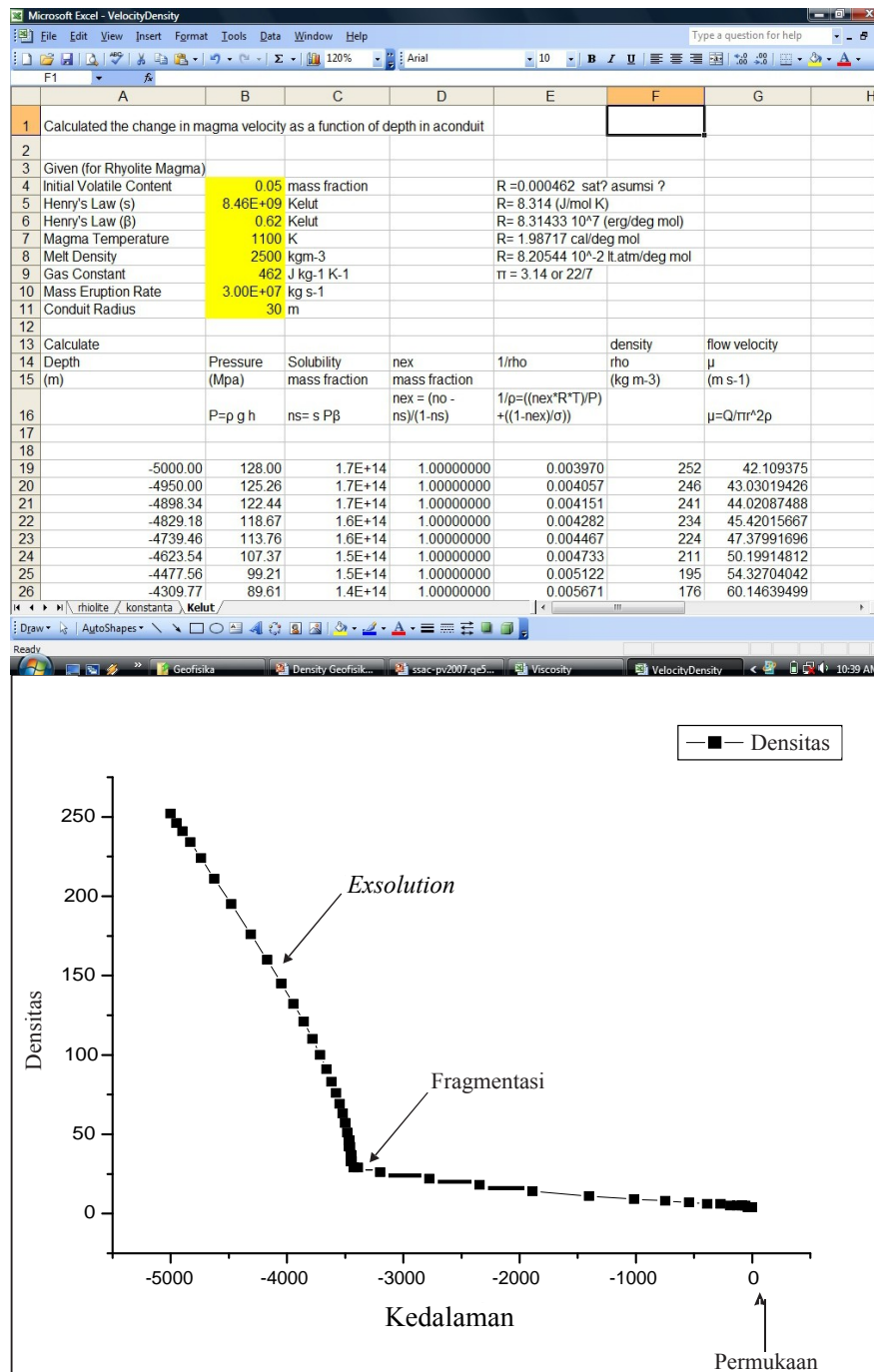


Gambar 7. Grafik hasil pemodelan besarnya densitas cairan silika Gunung Kelud dan dibandingkan dengan densitas riolit, basal, dan andesit.

Densitas cairan silika yang digunakan untuk menentukan densitas magma berdasarkan hasil penentuan densitas cairan magma Gunung Kelud dan kemudian dimasukkan ke dalam persamaan Hukum Henri (persamaan 8). Dengan memvariasikan kedalaman magma, maka besarnya densitas magma Gunung Kelud terdapat pada Gambar 8.

Dari hasil tersebut terlihat bahwa kenaikan magma ke permukaan dapat memberikan perubahan

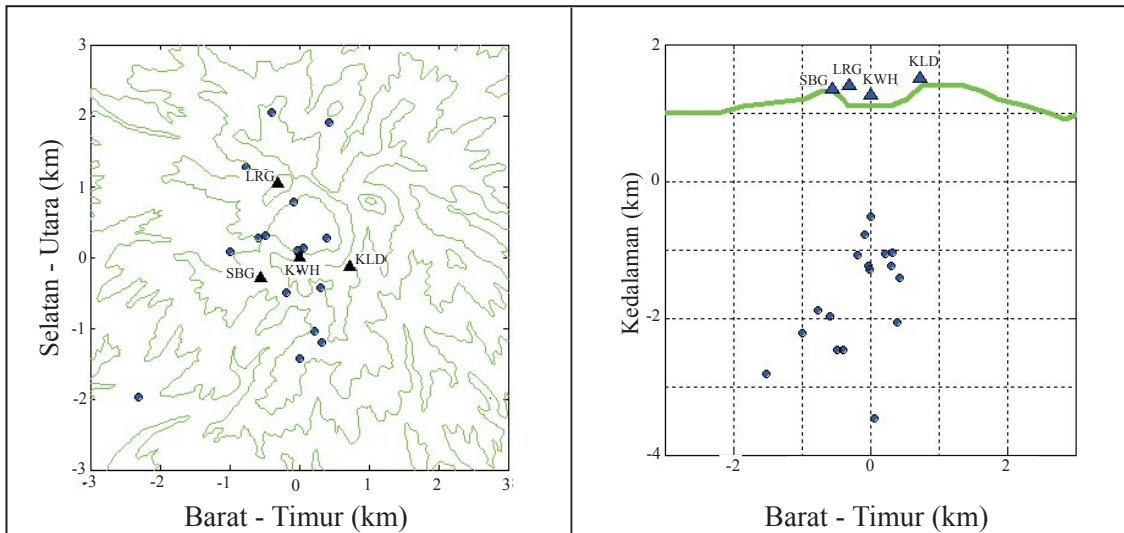
an sifat fisika. Evolusi tekanan aliran di dalam konduit dicirikan oleh tiga area yang berbeda, yaitu dari dasar konduit sampai tekanan jenuh, *level* antara pelepasan dan fragmentasi, serta di atas *level* fragmentasi. *Level* pertama terjadi pada saat pelepasan dimulai, tekanan aliran turun secara linier karena berat magma atau tegangan viskositas (*viscosity shear*). Pada *level* kedua, yaitu *level* antara pelepasan dan fragmentasi, tekanan turun



Gambar 8. Penentuan pemodelan densitas Gunung Kelud dan grafik fungsi kedalaman terhadap besarnya densitas magma.

dengan cepat, karena kenaikan dari viskositas magma yang besar. Sementara pada level ketiga, yaitu di atas *level fragmentation*, gesekan jauh lebih kecil dari sebelumnya, yang mengimplikasikan suatu penurunan gesekan dinding. Di awal

munculnya gempa vulkanik pada aktivitas Gunung Kelud, titik hiposentrum berada pada kedalaman +/- 3500 m, (Gambar 9) (Hidayati, 2009). Hal ini kemungkinan identik pada kedalaman terjadinya fragmentasi magma.



Gambar 9. Distribusi Hiposentrum pada saat mulai terjadinya kenaikan aktivitas Gunung Kelud, 10 September 2007, diawali dengan munculnya gempa vulkanik dalam pada kedalaman 3500 m (Hidayati, 2009) yang kemungkinan identik dengan level fragmentasi lava.

Kesimpulan

Magma merupakan batuan pijar yang meleleh dan mengandung gas merupakan bagian yang terpenting dalam memahami proses terjadinya gunung api. Lelehan batuan untuk membentuk magma dikontrol oleh tiga parameter fisik, yaitu temperatur, tekanan, dan komposisi.

Viskositas dan densitas magma adalah sifat fisika magma dan sebagai parameter yang signifikan untuk memahami proses aktivitas gunung api. Sementara viskositas mengontrol mobilitas magma, sedangkan densitas mengontrol arah gerakan relatif antara magma dan material padat (batuan fragmental dan kristal).

Viskositas magma Gunung Kelud sangat tergantung pada besarnya konsentrasi H_2O dan suhu memberikan persamaan eksponensial. Semakin tinggi kandungan H_2O semakin kecil nilai viskositas demikian pula dengan semakin tingginya temperatur. Kandungan H_2O dalam cairan silika dapat memutuskan ikatan polimer cairan silika, dan polimer yang lebih pendek menghasilkan viskositas lebih rendah.

Densitas cairan silika Gunung Kelud terletak antara andesit dan riolit, akan tetapi sangat mendekati andesit. Material erupsi 1990 dibandingkan dengan 2007 memberikan hasil densitas cairan silika yang berbeda, densitas cairan silika pada erupsi 1990 lebih kecil daripada tahun 2007.

Kenaikan magma ke permukaan dapat memberikan perubahan sifat fisika. Evolusi tekanan aliran di dalam konduit dicirikan oleh tiga area yang berbeda yaitu dari dasar konduit sampai tekanan jenuh, *level* antara pelepasan dan fragmentasi, dan di atas *level* fragmentasi, yang mengimplikasikan suatu penurunan gesekan dinding.

Ucapan Terima Kasih—Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungapian, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi yang telah memberikan dukungan untuk pelaksanaan kegiatan penelitian ini. Ucapan terimakasih juga tidak lupa penulis sampaikan kepada rekan-rekan di Seksi Pelayanan Laboratorium dan Seksi Metoda dan Teknologi Mitigasi BPPTK yang telah membantu melakukan analisis di laboratorium dan pelaksanaan kegiatan di lapangan, sehingga makalah ini dapat tersusun.

Referensi

- Brotospito, K.S. dan Wahyudi, 2007. Erupsi Gunungapi Kelud dan Nilai $-b$ Gempabumi di Sekitarnya. *Berkala Ilmiah MIPA*, 17(3).
- Hens dan Dingwell, 1996. Viscosities of hydrous leucogranitic melts: A non-Arrhenian model. *American Mineralogist*, 81, p.1297-1300.
- Hidayati, S., Kristianto, Basuki, A., dan Mulyana, I, 2009. Emergence of Lava Dome from the Crater Lake of Kelud Volcano, East Java. *Jurnal Geologi Indonesia*, 4(4), p.229-238.

- Kusumadinata, K., Hadian, R., Hamidi, S., dan Reksowirogo, L.D., 1979. Data Dasar Gunungapi Indonesia, *Direktorat Vulkanologi*, Bandung.
- Wallace, P. dan Anderson, Jr., A.T, 2000. Volatiles in Magmas. *Encyclopedia of Volcanoes*, Sigurdsson H. (ed), Academic Press, p.149-170.
- Wirakusumah, A.D., 1991. *Some studies of volcanology, petrology and structure of Mt. Kelud, East Java, Indonesia*. PhD Thesis, Victoria University, Wellington.
- Zaennudin, A., 2007. Penyelidikan Endapan Piroklastika Gunung Kelud, Jawa Timur. *Laporan Pengamatan dan Penyelidikan Gunungapi*, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- Zaennudin, A., 2008. Prakiraan Bahaya Erupsi Gunung Kelud, submitted to Jurnal Geologi Indonesia. [Http://www.vsi.esdm.go.id](http://www.vsi.esdm.go.id), Gunung Kelud, Gunungapi di P. Jawa, Gunungapi Indonesia, akses tanggal 20 Oktober 2008.