



Analisis Tipikal Erupsi Gunung Lokon Periode Erupsi 2012-2013 Berdasarkan Karakterisasi Mikrostruktur Abu Vulkanik

Dolfi Paulus Pandara^{a*}

^aJurusan Fisika, FMIPA, Unsrat, Manado

KATA KUNCI

Gunung Lokon
Viskositas
Permeabilitas
Fragmentasi gelas
Vulkanian

ABSTRAK

Gunung Lokon yang berada di lengan utara Sulawesi adalah salah satu gunung api paling aktif di Indonesia. Perilaku erupsinya telah dipelajari melalui analisis mikrostruktur abu vulkanik. Tujuan dari karakterisasi mikrostruktur adalah untuk mengestimasi nilai dari viskositas dan permeabilitas magma. Karakterisasi mikrostruktur menggunakan XRD, FTIR, SEM/EDS/XRF dan μ CT. Abu vulkanik Lokon adalah mineral polimorf yang banyak mengandung kristal plagioklas. Abu Lokon mempunyai kandungan air 0,3 -0,6 % berat dan massa dasarnya terdiri dari partikel vesikular dan non vesikular. Viskositas dari magma Lokon adalah sekitar 10^7 Pa.s pada 1000°C dan fraksi volume kristal sekitar 0,45-0,5. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa reologi magma Lokon adalah bersifat non Newtonian dan mekanisme fragmentasinya adalah brittle fragmentation. Berdasarkan pada permeabilitas dan porositas yang dikuantisasi dengan μ CT dapat disimpulkan bahwa fragmentasi magmanya tidak dipicu oleh outgassing. Dinamika erupsi eksplosif dari Gunung Lokon pada 2012-2013 adalah erupsi vulkanian pada skala sedang.

KEYWORDS

Mount Lokon
Viscosity
Permeability
Glass fragmentation
Vulkanian

ABSTRACT

Lokon volcano where located on North arm of Sulawesi is one of the most active volcanoes in Indonesia. Behaviour of its eruptions have been learned through microstructure analysis of volcanic ash. The goal of microstructure characterization is estimate value of magma viscosity and permeability. Characterization of microstructure using XRD, FTIR, SEM/EDS/XRF and μ CT. Lokon volcanic ash is a polymorph minerals which contains many plagioclase crystal. Ash has water content between 0.3 - 0.6 % wt and its groundmass contains vesicular and non vesicular particles. Viscosity of Lokon magma is about 10^7 Pa.s at 1000°C and fraction of crystal volum between 0.45-0.5. These results showed that magma rheology of Lokon is non Newtonian and the mechanism of its fragmentation is brittle fragmentation. Based on permeability and porosity that quantified by μ CT, it is concluded that the brittle fragmentation is not triggered by outgassing. Dynamics of explosive eruption of Lokon volcano at 2012-2013 is moderate vulcanian eruption.

TERSEDIA ONLINE

01 Agustus 2017

1. Pendahuluan

Gunung Lokon merupakan salah satu gunungapi aktif di Indonesia yang sering erupsi (Badan Geologi, 2011). Aktivitas erupsinya dapat berupa lontaran bom vulkanik, jatuhnya pumis, lapili, hembusan gas beracun dan aliran awan panas

(Badan Geologi, 2011; Suparman dkk., 2013). Aktivitas tersebut berkaitan dengan dinamika aliran fluida magmatik dan proses-proses fisika yang terjadi di dalam konduitanya. Pada umumnya, dinamika erupsi suatu gunungapi dimulai dengan injeksi aliran magma segar yang kental dan bersuhu

*Corresponding author: Jurusan Fisika FMIPA UNSRAT, Jl. Kampus Unsrat, Manado, Indonesia 95115; Email address: dpandara@yahoo.com

tinggi. Injeksi aliran magma akan meningkatkan tekanan kantung magma dan menyebabkan magma naik di dalam saluran vulkanik. Proses tersebut akan diikuti desorpsi *volatile* dari magma cair membentuk gelembung gas di atas permukaan eksolusi (Gonnermann & Mangga, 2007). Pertumbuhan gelembung gas akan menyebabkan magma kental bergerak naik (Gonnermann & Mangga, 2007; Ida, Y, 2010). Aliran magma tersebut dapat diikuti proses *degassing* atau *outgassing* dan kristalisasi magma. Proses *degassing* atau *outgassing* berkaitan dengan aliran permeabel dan berperan dalam formasi sumbat magma atau kubah lava serta aliran lava (Diller, K., 2006; Kozono, T and T. Koyaguchi, 2010), sedangkan kristalisasi magma akan berperan pada proses fragmentasi (Burgisser, A., et al, 2011; Gonnermann & Mangga, 2007). Fragmentasi dan *Outgassing* merupakan dua proses waktu pendek yang menentukan perilaku erupsi. Transisi di antara erupsi eksplosif dan efusif dikontrol oleh proses waktu pendek ini. Bila faktor *outgassing* cukup besar, aliran gelembung magma akan efusif dan menghasilkan aliran lava (Ida, Y. 2010. Kozono T., and T. Koyaguchi, 2010)

Fragmentasi berkaitan dengan kemampuan magma untuk pecah menjadi potongan-potongan diskrit, sedangkan *outgassing* berkaitan dengan kemampuan gas lepas dari magma (Namiki & Manga, 2008). Proses-proses tersebut dipengaruhi oleh reologi magma dan kandungan gas di dalam magma (Takeuchi, 2011).

Parameter yang mengontrol proses fragmentasi dan *outgassing* adalah viskositas magma dan permeabilitas gas. Parameter-parameter tersebut dapat diinvestigasi melalui karakteristik parameter mikrostruktur abu vulkanik. Parameter mikrostruktur abu vulkanik merupakan parameter kontrol pada gerak magma dan kondisi-kondisi sebelum erupsi (Polacci et al., 2006; Shea T et al, 2010). Mikrostruktur abu vulkanik menyimpan informasi tentang sifat-sifat magma dan tahapan proses sejak magma naik dari kantung magma sampai keluar dari kawah. Melalui karakterisasi dan analisa mikrostruktur abu, mekanisme erupsi Gunung Lokon pada periode 2012-2013 dapat dipahami sebagai informasi yang penting dalam memprediksi perilaku erupsi di masa yang akan datang.

2. Material dan Metode

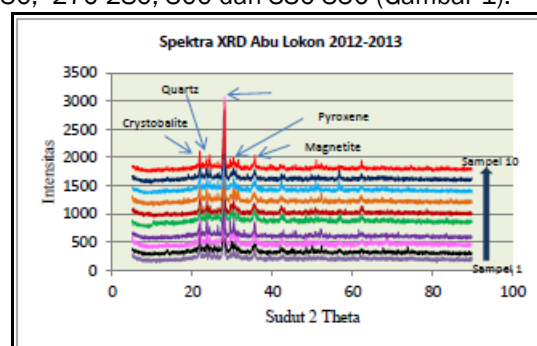
Karakterisasi morfologi, jenis mineral, komposisi kimia, dan kandungan air di dalam abu vulkanik hasil erupsi Gunung Lokon periode 2012-2013 dilakukan menggunakan SEM (Scanning Electron Microscopy), XRD (X-ray diffractometer), EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) dan XRF (X-ray Fluorescence) serta FTIR (Fourier Transform Infra Red). Hasil-hasil karakterisasi tersebut digunakan untuk mengestimasi parameter reologi yaitu viskositas magma. Sedangkan untuk menentukan kandungan vesikel dan parameter

permeabilitas, abu dikarakterisasi menggunakan mikrotomografi sinar X tiga dimensi (μ CT) dengan resolusi tinggi 30 μ m/pixel. Sampel abu dimasukkan ke dalam wadah berbentuk silinder dengan panjang 27 mm dan diameter 5 mm. Tegangan SkyScan1173 dioperasikan pada 100 kV dengan sumber arus 80 μ A. Hasil perekaman melalui rotasi sampel sebesar 3600 menghasilkan grafik mikro antara 1191 sampai 1625 buah untuk 5 buah sampel. Citra tekstur abu beserta parameter-parameter morfometriknya direkonstruksi dan dikalkulasi menggunakan perangkat lunak Nrecon, Ctan, dan ImageJ. Selanjutnya, permeabilitas abu dimodelkan menggunakan simulasi kisi Boltzmann, perangkat lunak Palabos dan Paraview (Latief F.D.E. et al, 2013)

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Karakterisasi XRD

Analisis kandungan fasa mineral pada abu vulkanik dengan menggunakan metode XRD menunjukkan bahwa abu vulkanik merupakan suatu mineral poliamorf. Spektrum XRD dari sampel abu yang dianalisis menunjukkan puncak-puncak spektral yang dominan tajam dan intensitas yang cukup tinggi yaitu pada sudut 2 theta sekitar 210-230, 270-280, 300 dan 330-350 (Gambar 1).



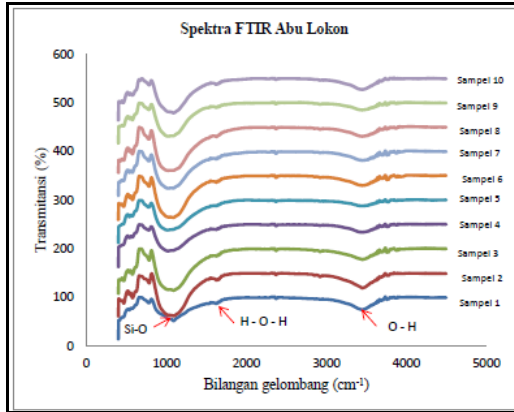
Gambar 1. Difraktogram Abu Lokon

Puncak-puncak spektral tersebut di atas berkaitan dengan massa dasar dari abu Lokon yang terdiri dari campuran mikrolit dan mineral silika (partikel gelas). Fase mikrolit berupa plagioklase ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), piroksen ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) dan oksida Fe-Ti. Plagioklase dan Piroksene merupakan fasa *silicious* dengan komponen kimia utama adalah SiO_2 . Mineral Plagioklase berupa Anorthite, mineral Piroksen berupa Diopside dan mineral oksida Fe-Ti berupa Magnetite. Sedangkan mineral silika merupakan fasa polimorf-kristalin (SiO_2) yang terdiri dari Crystobalite dan Quartz. Hasil ini mengindikasikan bahwa abu vulkanik yang dianalisis merupakan produk erupsi vulkanian (Giachetti et al, 2011).

Hasil FTIR

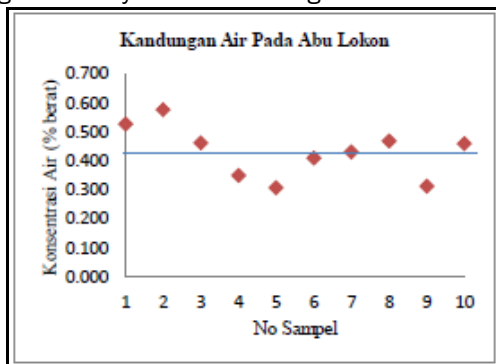
Karakterisasi FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectrophotometri*) dari abu Lokon menunjukkan vibrasi ikatan Si-O, H-O-H dan O-H bersesuaian dengan pita absorbansi sekitar 1018 cm^{-1} - $1093,64 \text{ cm}^{-1}$, 1523 cm^{-1} - $1627,9 \text{ cm}^{-1}$ dan $3448,72 \text{ cm}^{-1}$ - $3452,6 \text{ cm}^{-1}$ (Gambar 2). Absorbansi pita 1523 cm^{-1} - $1627,9 \text{ cm}^{-1}$ dan pita

3448,72 cm^{-1} – 3452,6 cm^{-1} dapat digunakan untuk menentukan kandungan air (*dissolved water*) menurut Hukum Lambert-Beer (Newman et al, 1986; Miwa T and A. Toramaru, 2013). Ketebalan efektif partikel gelas dapat diukur dari absorbansi ikatan Si-O pada pita 1018 cm^{-1} – 1093,64 cm^{-1} (Miwa T and A. Toramaru, 2013). Absorptivitas molar untuk pita yang berkaitan dengan kandungan air total (molekul air ditambah grup OH) adalah $75 \pm 4 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, dan densitas partikel gelas riolitik diasumsikan 2.430 g/L (Newman et al, 1986, Okumura et-al, 2003).



Gambar 2. Spektra FTIR Abu Lokon

Kandungan air terdapat pada partikel gelas merupakan indikator tekanan kantung magma dangkal. Kandungan air dalam abu Lokon pada 10 sampel abu yang dianalisis berkisar 0,3 – 0,6 % berat. Kandungan air pada level di atas 0,409 % berelasi dengan letusan yang disertai dentuman kuat dan tinggi kolom erupsi mencapai 2000 m atau lebih (Gambar 3). Hasil riset Miwa T and A. Toramaru (2013) menunjukkan bahwa partikel abu dengan kandungan air lebih dari 0,4 % berat relatif berkaitan dengan kandungan gelembung (VND) yang lebih banyak di dalam magma.



Gambar 3. Kandungan Air Abu Lokon

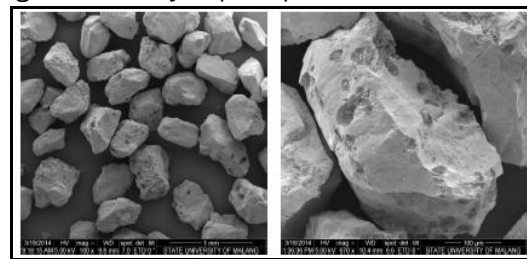
Hasil Karakterisasi SEM-EDS

Citra SEM abu Lokon (Gambar 4) menunjukkan bahwa massa dasar abu terdiri partikel ber vesikel dan yang tidak ber vesikel. Keberadaan vesikel berkaitan dengan kandungan gas termasuk H₂O di dalam magma. Komposisi kimia partikel abu vulkanik Gunung Lokon dikarakterisasi dengan XRF dan EDS yang difokuskan pada partikel yang ber vesikel (Tabel 1).

Tabel 1. Komposisi Kimia Abu Lokon

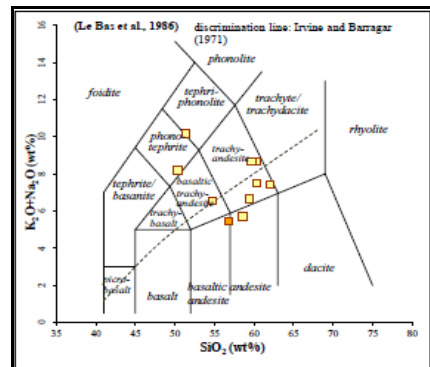
Senyawa Kimia	Sampel Abu (% Berat)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	24.04 /12	21.9 /12	11.12/ 12	24.12/ 12a	24.12 /12b	13.01 /13	8.01/ 13	16.01 /13	27.02 /13	20.03/ 13
SiO ₂	58.63	51.4	59.47	54.73	60.45	62.53	50.42	61.67	51.67	59.72
TiO ₂	0.89	1.12	1.74	1.3	0.61	1.08	0.6	1.39	0.92	1.32
Al ₂ O ₃	24.04	23.14	19.01	20.63	16.42	14.54	17.92	14.42	19.26	16.04
Fe ₂ O ₃	6.16	5.95	5.63	6.04	6.84	6.72	11.17	9.37	9.85	7.59
MnO	0.43	0.41	0.39	0.68	0.37	0.68	0.73	0.83	1.32	1.09
MgO	1.49	1.77	0.57	2.61	1.59	2.76	4.76	1.34	3.06	1.67
CaO	2.47	4.54	4.83	5.68	3.27	4.16	5.27	3.57	8.78	3.36
Na ₂ O	3.62	6.06	4.8	4.75	4.15	4.29	4.75	3.61	3.18	4.92
K ₂ O	2.07	4.08	1.84	1.80	4.51	3.185	3.44	4.04	0	3.76
P ₂ O ₅	0.2	1.59	1.73	1.80	1.79	0.79	0.97	1.8	1.98	0.52

Komposisi kimia menunjukkan bahwa magma Lokon pada periode 2012-2013 mempunyai kandungan SiO₂ yang cukup tinggi. Kandungan tersebut menyebabkan magma bersifat asam dan berkorelasi dengan letusan yang bersifat eksplosif yang dominan terjadi pada periode 2012-2013.



Gambar 4. Citra SEM Abu Lokon

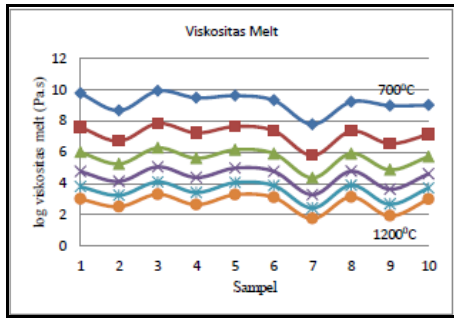
Komposisi keseluruhan sampel abu Lokon adalah basaltik-andesitik namun massa dasar partikel gelas adalah basaltic trachy-andesite sampai trachy-andesite berkaitan dengan kandungan kalium (K₂O) dan potassium (Na₂O) yang tinggi (Gambar 5). Hal ini menunjukkan bahwa magma pada periode letusan 2012-2013 merupakan magma baru (*fresh magma*) yang kaya kristal (*plagioclase*) dan berasal dari daerah kantung magma yang lebih dangkal. Kandungan Anorthite (*plagioclase*) dalam sampel abu mendukung bahwa magma berasal dari suatu perhentian sementara di kedalaman yang lebih dangkal dan berkaitan dengan proses kristalisasi yang terjadi selama erupsi (Preece, K. et al, 2013). Trachy-andesite yaitu magma dengan sedikit kandungan kuarsa tetapi didominasi alkali feldspar dan plagioklas serta piroksen seperti ditunjukkan pada spektra XRD. Magma tipe ini dapat menghasilkan letusan eksplosif Vulkanian bahkan Plinian.



Gambar 5. Tipe Magma Lokon

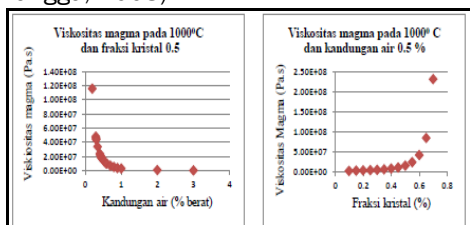
Berdasarkan data komposisi dan kandungan air abu vulkanik maka viskositas magma

dikuantifikasi. Di dalam perhitungan, temperatur magma divariasikan dari 700°C - 1200°C dan magma diasumsikan bersifat hidrous.



Gambar 6. Viskositas melt

Viskositas magma sangat bergantung kuat pada temperatur, kandungan SiO₂, kandungan air dan fraksi kristal dalam magma (Gambar 6 dan Gambar 7). Penurunan temperatur magma menyebabkan viskositas melt meningkat. Magma dengan jumlah komposisi SiO₂ di bawah 55% memiliki nilai viskositas yang lebih kecil. Komposisi SiO₂ yang lebih sedikit berkaitan dengan proses diferensiasi magma karena variasi tekanan dan temperatur saat magma berdinamika dari kedalaman ke tempat yang lebih atas. Semakin tinggi kandungan H₂O semakin kecil nilai viskositas. Kandungan H₂O dalam cairan silika dapat memutuskan ikatan polimer cairan silika, dan polimer yang lebih pendek menghasilkan viskositas yang lebih rendah (Mookherjee, M. et-al, 2008; Humaida dkk, 2011). Fraksi kristal dalam magma akan meningkatkan viskositas magma. Kandungan plagioklas yang dominan pada spektra XRD abu Lokon mengindikasikan bahwa fraksi kristal dalam magma cukup signifikan berelasi dengan viskositas magma. Peningkatan jumlah kristal dalam magma akan meningkatkan viskositas dan terbentuk jaringan kristal yang menghambat pertumbuhan gelembung gas dan mendorong terjadinya fragmentasi (Namiki and Mangga, 2008).



Gambar 7. Viskositas Magma

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada temperatur 1000 °C dan kandungan air antara 0.3 - 0.6 %, viskositas magma Lokon berada pada level 10⁷ Pa.s dengan fraksi volume kristal 0.45 - 0.5. Berdasarkan nilai viskositas tersebut maka mekanisme fragmentasi yang terjadi pada periode erupsi 2012-2013 dominan adalah fragmentasi magmatik berupa fragmentasi gelas (*brittle fragmentation*) (Alidibrov M. and D.B. Dingwell, 2000). Fragmentasi gelas terjadi karena magma bertransisi dari fasa cair (*ductile behaviour*) ke fasa gelas (*brittle behaviour*). Pada level fraksi kristal di atas, reologi magma Lokon adalah bertipe Non

Newtonian dimana viskositas bergantung pada laju regangan. Pada laju regangan yang besar magma berkelakuan sebagai padatan yang mekanisme kerapuhannya didominasi sifat elastik (*brittle*). Sedangkan pada laju regangan yang kecil, magma berkelakuan sebagai fluida kental dan mekanisme retaknya didominasi sifat plastis (*ductile*). Hasil ini terkonfirmasi dengan observasi visual yang menunjukkan bahwa erupsi Lokon pada periode 2012-2013 adalah erupsi magmatik ditandai dengan bunyi dentuman yang keras dan adanya lontaran material pijar.

Hasil Karakterisasi μ-CT

Tekstur abu Lokon (Gambar 4 dan Gambar 8) menunjukkan adanya gelembung gas (vesikel) di dalam magma. Hal ini menyatakan bahwa magma Lokon bersifat vesikular di mana viskositas mengisolir gas di dalam magma. Gas yang terperangkap akan mengalami ekspansi dan dapat keluar dari magma (*outgassing*).

Proses *outgassing* menentukan tipe letusan dan eksplosivitas erupsi. Proses ini ditentukan oleh parameter permeabilitas magma. Semakin banyak gelembung gas yang terperangkap semakin potensial terjadi letusan eksplosif. Kuantifikasi terhadap tekstur abu menghasilkan nilai-nilai parameter permeabilitas, porositas, rapat jumlah vesikel, tekanan ambang fragmentasi dan rapat energi ambang seperti ditampilkan pada Tabel 2. Parameter-parameter ini digunakan untuk menganalisa tipikal letusan yang terjadi.

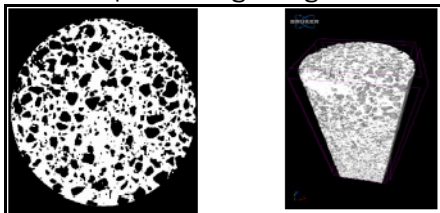
Permeabilitas akan mempengaruhi proses fragmentasi hanya jika koefisien permeabilitas (k) memiliki nilai di atas nilai kritis (~10⁻¹² m²) (Mueller et al, 2008). Bila nilai k > 10⁻¹² m², rapat energi ambang akan meningkat tajam dan permeabilitas bersifat memperlambat proses fragmentasi. Bila nilai permeabilitas semakin besar di atas nilai kritis maka semakin banyak gas yang dapat lolos (*outgassing*) sehingga rapat energi minimum yang diperlukan untuk terjadinya fragmentasi makin besar pula. Koefisien permeabilitas yang dikuantifikasi pada sampel dalam penelitian ini lebih kecil nilainya dibandingkan dengan nilai permeabilitas kritis. Hal ini berarti bahwa faktor *outgassing* bukan faktor penggerak utama terjadinya fragmentasi magma.

Tabel 2 Permeabilitas dan Porositas

Sampel No	Tanggal Erupsi	Φ		k (m ²)	p _{e,f} (MJ/m ³)	P ₀ (MPa)	VND (m ³)
		%					
2	21/9/2012	12.49	0.1249	2.21E-13	0.156	1.25	5.43E+14
3	11/12/2012	9.92	0.0992	4.46E-14	0.110	1.11	4.78E+14
7	8/1/2013	5.65	0.0565	4.41E-15	0.059	1.04	3.44E+14
6	13/1/2013	3.78	0.038	5.97E-16	0.038	1.01	3.15E+14
8	16/1/2013	12.53	0.125	3.81E-14	0.138	1.10	5.77E+14

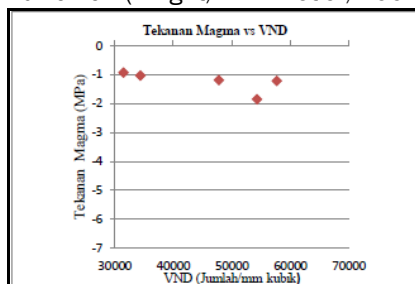
Proses fragmentasi bergantung pula pada porositas magma yang berkaitan dengan keluwesan aliran gas. Porositas menentukan jumlah total gas bertekanan lebih yang dapat tersimpan dalam magma. Semakin besar porositas akan semakin banyak gas yang dapat melakukan

penetrasi ke dalam matriks magma. Tekanan lebih gas di dalam matriks akan mengatasi kekuatan regangan matriks sehingga fragmentasi dapat terjadi. Semakin besar porositas maka ambang fragmentasi yang diperlukan semakin kecil. Hasil kuantisasi menunjukkan bahwa porositas sampel abu Lokon memiliki nilai yang kecil Hal ini berarti untuk terjadinya fragmentasi diperlukan tekanan ambang fragmentasi yang besar. Porositas yang rendah tidak mendukung untuk picuan fragmentasi digerakkan oleh proses *outgassing*.



Gambar 8. Struktur Pori Abu Lokon

Mekanisme yang mungkin untuk menyebabkan terjadinya fragmentasi magma adalah mekanisme dekompresi tekanan secara tiba-tiba yaitu mekanisme letusan Vulkanian. Hasil observasi visual terhadap profil letusan dan material piroklastik yang dihasilkan mendukung kesimpulan bahwa tipe erupsi magmatik Lokon pada periode 2012-2013 adalah tipe Vulkanian. Letusan Lokon pada periode ini didominasi oleh material abu dan ditemukan pula adanya bom kerak roti sebagai penanda letusan Vulkanian (Wright, H.M.N et al, 2007).



Gambar 9. Tekanan Magma

Kandungan vesikel yang lebih banyak dalam magma berkorelasi dengan kadar air yang lebih tinggi di dalam massa dasar abu. Magma yang mempunyai kadar air yang lebih tinggi berasal dari daerah yang lebih dalam di bawah kawah. Gambar 9 menunjukkan bahwa magma dengan kandungan vesikel yang lebih besar terkait dengan tekanan magma yang lebih tinggi (Toramaru, A., 2006). Tekanan yang lebih tinggi menunjukkan asal magma dari tempat yang lebih dalam. Tekanan yang tinggi akan mendorong magma lebih kuat sehingga kolom erupsi akan lebih tinggi. Magma yang mempunyai tekanan di atas 1 MPa berkaitan dengan letusan vulkanian yang tinggi kolom erupsinya lebih dari 2000 m. Tekanan yang tinggi disebabkan adanya akumulasi gas akibat proses degassing. Magma yang bersifat vesikular akan mengalami proses *degassing* dan akan menjadi magma miskin gas pada saluran vulkanik dangkal dan kristalisasi dan sebagian membentuk sumbat magma (Diller, K. et al, 2006; Burgisser, A., et al, 2010). Terjadi sirkulasi antara magma kaya vesikel dengan magma

yang miskin gas sebagai persiapan untuk terjadinya letusan Vulkanian (Miwa and Toramaru, 2013). Bila terjadi dekompresi akibat retakan pada sumbat magma maka terjadilah letusan vulkanian (Burgisser, A., et al, 2010; Diller, K., 2006).

4. Kesimpulan

Mikrostruktur abu letusan memberikan informasi bahwa magma lokon bersifat andesit dan vesikular. Variasi nilai viskositas terhadap kandungan air dan fraksi kristal menunjukkan bahwa reologi magma Lokon adalah Non Newtonian. Nilai permeabilitas dan porositas menunjukkan bahwa mekanisme vulkanian di Gunung Lokon tidak disebabkan oleh proses *outgassing* tetapi berkaitan dengan suatu dekompresi tekanan yang tiba-tiba di bawah sumbat magma. Berdasarkan kajian yang telah dilakukan di dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa tipikal erupsi eksplosif Gunung Lokon pada periode erupsi 2012-2013 adalah bertipe vulkanian moderat

Daftar Pustaka

- Alidibirov, M., and D.B. Dingwell. 2000. Three fragmentation mechanisms for highly viscous magma under rapid decompression. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 100 : 413-421
- Badan Geologi. 2011. Data Dasar Gunungapi Indonesia. Edisi Kedua. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia
- Burgisser, A., L. Arbareth, T.H. Druitt, and T. Giachetti. 2010. Pre-explosive conduit condition of the 1997 Vulcanian explosions at Soufriere Hills Volcano, Montserrat: II. Overpressure and depth distributions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (199) : 1-26. Doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.11.014
- Diller, K., Clarke, A.B., Voight, B. dan Neri, 2006, Mechanisms of conduit plug formation: Implication for vulcanian explosions: *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L20302, doi:10.1029/2006GL027391, 2006.
- Giachetti T, A. Burgisser, L. Arbaret, T.H. Druit, and K. Kelfoun. 2011. Quantitative textural analysis of Vulcanian pyroclasts (Montserrat) using multi-scale X-ray computed microtomography: comparison with results from 2D image analysis. *Bulletin of Volcanology (Article in press)* Doi: 10.1007/s00445-011-0472-1
- Gonnermann, H.M., and M. Manga. 2007. The Fluid Mechanics Inside Volcano. *The Annual Review of Fluid Mechanics* 39 : 321-356
- Humaida, K., K.S. Brotopuspito, H.D. Pranowo, dan Narsito. 2011. Pemodelan Perubahan Densitas dan Viskositas Magma Serta Pengaruhnya terhadap Sifat Erupsi Gunung Kelud. *Jurnal Geologi Indonesia* 6 : 227-237
- Ida, Y. 2010. Computer simulation of time dependent magma ascent processes involving bubbly and gassy flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 196 : 45-56

- Kozono T., and T. Koyaguchi. 2010. A simple formula for calculating porosity of magma in volcanic conduits during dome-forming eruptions. *Earth Planet Space* 62 : 483-488.
- Latief F.D.E, U. Fauzi and S. Feranie, 2013. Digital isolation technique for reconstruction and visualization of crack in micro CT- images of geothermal reservoir rock. *Microscopy and Analysis-Asia Pacific Issue* 103, March/April 2013
- Miwa T., A. Toramaru, and M. Iguchi. 2013. Conduit process in vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan: Inference from comparison of volcanic ash with pressure wave and seismic data. *Bulletin Volcanology* 75 : 685 (1-13)
- Mookherjee M., Stixrude L., and B. Karki. 2008. Hydrous silicate melt at high pressure *Nature* Vol 452, 2008
- Mueller, S., B. Scheu, O. Spieler, and D.B. Dingwell. 2008. Permeability control on magma fragmentation. *Geology* 36 (5) : 399-402
- Namiki A., and M. Manga. 2008. Transition between fragmentation and permeable outgassing of low viscosity magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 169 : 48-60
- Newman S., Stolper, E.M., and S. Epstein. 1986. Measurement of water in rhyolitic glasses: Calibration of an infrared spectroscopic technique. *American Mineralogist*, Volume 71, pages 1527-1541
- Okumura, S., Nakamura M., and S. Nakashima. 2003. Determination of molar absorptivity of IR fundamental OH-stretching vibration in rhyolitic glasses. *American Mineralogist*, Volume 88, pages 1657-1662, 2003.
- Preece K., Barclay J., Ralf Gertisser R., and R. A. Herd. 2013. Textural and micro-petrological variations in the eruptive products of the 2006 dome-forming eruption of Merapi volcano, Indonesia: Implications for sub-surface processes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. VOLGEO-05083; No of Pages 23
- Polacci M., D.R. Baker, L. Mancini, G. Tromba, and F. Zanini. 2006. Three-dimensional investigation of volcanic texture by X-ray microtomography and implications for conduit processes. *Geophysical Research Letters* 33 (L13312):1-5
- Suparman dkk, 2013. Erupsi Gunung Lokon berdasarkan kegempaan, deformasi, dan geokimia pada Januari 2013. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi* Vol 4 No 3 Desember 2013.
- Shea T, B.F. Houghton, L. Gurioli, K.V. Cashman, J.E. Hammer, and B.J. Hobden. 2010. Textural studies of vesicles in volcanic rocks: an integrated methodology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 190 : 271-289
- Takeuchi, S. 2011. Preruptive magma viscosity: An important measure of magma eruptibility. *Journal of Geophysical Research* 116(B10201) :1-19
- Toramaru, A. 2006. BND (bubble number density) decompression rate meter for explosive volcanic eruptions. *J Volcanol Geotherm Res.* 154(3-4):303-316
- Wright, H.M.N., Cashman K.V., Rosi M., and R. Cioni. 2007. Breadcrust bombs as indicators of Vulcanian eruption dynamics at Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Bull Volcanol* (2007) 69: 281-300 DOI 10.1007/s00445-006-0073-6