Erupsi Gunung Lokon berdasarkan kegempaan, deformasi, dan geokimia pada Januari 2013

The eruption of Mount Lokon based seismicity, deformation, and geochemistry in January 2013

Yasa Suparman, Ugan B. Saing dan Akhmad Zaennudin

Badan Geologi, Jln. Diponegoro No. 57, Bandung 40122

ABSTRAK

Periode erupsi Gunung Lokon terjadi sejak tahun 2011 yang diawali oleh letusan freatik pada 22 Februari 2011, kemudian berlanjut dengan letusan yang terjadi pada 26 Juni 2011 dan letusan-letusan lainnya baik letusan freatik, freatomagmatik dan magmatik. Data kegempaan menunjukkan bahwa peningkatan kegiatan Gunung Lokon ditandai dengan meningkatnya Gempa Vulkanik (VA dan VB), Tremor dan Gempa Hembusan. Gempa Letusan dengan energi yang besar diawali dengan meningkatnya kejadian Gempa Vulkanik atau terekamnya Gempa Vulkanik dengan energi besar pada sehari atau beberapa jam sebelumnya. Interval waktu yang pendek antara peningkatan Gempa Vulkanik dengan terjadinya letusan menunjukkan bahwa Gunung Lokon masih belum stabil. Data deformasi menunjukkan bahwa terjadi inflasi pada saat sebelum terjadinya letusan. Nilai fluks SO₂ serta rasio Cl/SO₄ hasil analisis *ash leachate* pada Januari 2013 masih relatif sama dibandingkan tahun 2011 dan 2012.

Kata kunci: Gunung Lokon, letusan Lokon, gempa vulkanik

ABSTRACT

Lokon eruption period occured since 2011 was started by phreatic eruption on 22nd February 2011, followed by 26th June 2011 eruption and continous with phreatic; phreatomagmatic and magmatic eruptions. Seismic data shows that the increasing of Lokon activity charactarized by increased of Volcanic earthquakes (VA and VB), Tremor and Hembusan earthquakes. Large energy of explosion earthquakes begins with the increasing of volcanic earthquakes or volcanic earthquakes being recoreded with large of energy on a day or few hours before. Short time interval between increasing of volcanic earthquake and the occurrence of eruption showed that Lokon volcano is still not stable yet. Deformation data indicate that inflation occurred before the eruption. Value of SO₂ fulks and Cl/SO₄ ratio from results of ash leachate analysis in January 2013 remained relatively stable compared to 2011 and 2012.

Keywords: Lokon Volcano, Lokon eruption, volcanic earthquakes

Naskah diterima 12 September 2013, selesai direvisi 4 November 2013 Korespondensi, email: yasa@vsi.esdm.go.id

PENDAHULUAN

Gunung Lokon terletak di Tomohon-Sulawesi Utara merupakan salah satu gunung api yang sering meletus. Berdasarkan bentuk morfologinya, puncak Gunung Lokon berdampingan dengan puncak Gunung Empung dengan jarak antara keduanya 2,3 km sehingga merupakan gunung api kembar, oleh karena itu sering disebut Kompleks Gunung Api Lokon-Empung (Kusumadinata, 1979; Mulyadi et al., 1990). Secara geografis Puncak Gunung Lokon terletak pada 1°21,5' LU dan 124°47' BT dengan ketinggian 1579,5 m dpl., sedangkan puncak Gunung Empung pada 1°22' LU dan 124°47' BT mencapai ketinggian 1340 m dpl. Pada punggungan (sadel) antara Gunung Lokon dan Empung terdapat Kawah Tompaluan (1210 m dpl.) yang merupakan kawah aktif dan pusat aktivitas vulkanik saat ini.

Periode letusan yang terjadi sejak tahun 2011 diawali oleh letusan freatik pada 22 Februari 2011 yang menghembuskan material halus ke udara dan melemparkan bongkah batuan ke sekitar Kawah Tompaluan. Letusan ini kemudian berlanjut dengan letusan yang terjadi pada 26 Juni 2011 dan letusan-letusan lainnya, baik letusan freatik, freatomagmatik, dan magmatik (Zaennudin, 2012). Dengan semakin meningkatnya aktivitas letusan Gunung Lokon dan adanya ancaman terjadinya letusan magmatik yang disertai lontaran material pijar, pasir, dan hujan abu tebal maka tanggal 10 Juli 2011 pukul 22.00 WITA, status kegiatan Gunung Lokon ditingkatkan dari Siaga (Level III) menjadi Awas (Level IV). Pada 24 Juli 2011, pukul 22.00 WITA, status kegiatan Gunung Lokon diturunkan dari Awas (Level IV) menjadi Siaga (Level III).

Letusan Gunung Lokon tahun 2011 terjadi setelah 8 tahun istirahat, dimana letusan terakhir terjadi pada tahun 2003. Dalam interval 8 tahun tersebut, terdapat masa istirahat selama 4 tahun dan masa peningkatan kegiatan dimulai pada Desember 2007 atau 4 tahun sebelum terjadi letusan 2011 (Kristianto et al., 2012). Data kegempaan menunjukkan bahwa peningkatan kegiatan Gunung Lokon ditandai dengan meningkatnya Gempa Vulkanik (VA dan VB), Tremor dan Gempa Hembusan. Data kegempaan Gunung Lokon pada Januari 2011 – Desember 2012 menunjukkan bahwa Gempa Letusan masih sering terekam dan aktivitas kegempaan masih sangat tinggi (Gambar 1). Pada tulisan ini akan dibahas aktivitas Gunung Lokon berdasarkan data kegempaan, deformasi dan geokimia pada Januari 2013. Dari data tersebut diharapkan dapat diketahui karakteristik data kegempaan, deformasi, dan geokimia pada letusan Gunung Lokon serta tingkat aktivitas Gunung Lokon.

METODA PENELITIAN

Metoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah metoda seismik, deformasi menggunakan EDM (*Electrooptical Distance Measurement*) dan tiltmeter, serta geokimia. Pemantauan kegempaan Gunung lokon menggunakan 5 stasiun seismik yang terdiri dari stasiun Empung (EMP), Sea (SEA), Kinilow (KIN), Tatawiran (TTW) dan Wailan (WLN). Namun pada periode Januari - Februari 2013, pemantaun kegempaan hanya menggunakan stasiun seismik KIN dan WLN, karena stasiun seismik lainya tidak beroperasi dengan baik akibat terkena letusan. Pada metoda seismik dilakukan perhitungan energi gempa vulkanik dan Le-



Gambar 1. Data Kegempaan Gunung Lokon, 1 Januari 2011 – 31 Desember 2012.

tusan sejak Januari – 2 Februari 2013, analisis tremor dilakukan dari St. Wailan dengan menghitung *azimuth* dan *incident angle*.

Metoda deformasi merupakan metoda pemantauan aktivitas vulkanik berdasarkan pada perubahan deformasi dari tubuh Gunung Lokon. Peningkatan kegiatan suatu gunung api pada umumnya ditandai oleh terjadinya penggelembungan (inflasi) permukaan tanah akibat adanya tekanan dari dalam tubuh gunung api tersebut, dan sebaliknya bila aktivitas mengalami penurunan maka akan ditandai dengan terjadinya pengempisan (deflasi) dari tubuhnya. Pengukuran deformasi yang digunakan yaitu Tiltmeter dan EDM. Tiltmeter menggunakan prinsip ungkitan, merupakan alat untuk mengukur kemiringan tubuh gunung pada sumbu X dan Y. Pada pengukuran EDM, bila terjadi inflasi maka terjadi pemendekan jarak miring antara dua titik benchmark yang diukur dan sebaliknya bila terjadi pemanjangan jarak artinya mengalami deflasi. Pengukuran deformasi yang digunakan yaitu *Tilting* dan EDM.

Pada metoda geokimia dilakukan pengukuran fluks SO₂ asap gunung api dengan metoda *Gas Remote Sensing* menggunakan alat DOAS (*Differential Optical Absorption Spectrometer*) dan analisis abu letusan Gunung Lokon. Fluks SO₂ merupakan besarnya sinar ultraviolet yang diserap oleh sebanyak konsentrasi gas SO₂ dalam asap gunung api di sepanjang jalur optik (*optical path*) dalam interval lebar asap (*plume*) dikalikan dengan kecepatan dari asap tersebut yang berlangsung pada panjang gelombang 304 – 320 nm. Abu letusan gunung api mempunyai kandungan *volatile/gas* (terutama gas HF, HCl, dan SO₂) yang terikat (teradsorpsi) di bagian permukaan abu. Ikatan adsorpsi gas-abu dapat lepas dengan cara melarutkan abu dalam air dan memanaskannya pada temperatur di bawah titik didih air. Gas HF, HCl, dan SO₂ yang lepas kemudian larut dalam air membentuk ion F, Cl, dan SO₄ dalam larutan. Larutan ini disebut sebagai *ash leachate*, dan konsentrasinya dapat diukur dengan menggunakan alat *Ion Chromatography* (IC). Melalui perhitungan selanjutnya rasio anion (F/Cl dan Cl/SO₄) dapat diperoleh.

HASIL PENGAMATAN DAN ANALISIS

Kegempaan

Kegempaan Gunung Lokon dipantau secara menerus dengan peralatan analog maupun digital di Pos Pengamatan Gunun gapi (PGA) Gunung Lokon – Gunung Mahawu di Kakaskasen, Tomohon. Pemantauan kegempaan Gunung Lokon menggunakan 5 stasiun seismik yang terdiri dari stasiun Empung (EMP), Sea (SEA), Kinilow (KIN), Tatawiran (TTW) dan Wailan (WLN). Namun pada periode Januari 2013, pemantaun kegempaan hanya menggunakan stasiun seismik KIN dan WLN, karena stasiun seismik lainya tidak beroperasi dengan baik akibat terlanda material letusan. Data gempa analog ditransmisikan dengan gelombang radio dari stasiun WLN menuju Pos PGA Gunung Lokon.

Aktivitas kegempaan didominasi oleh Gempa Hembusan dan Tremor Vulkanik (Gambar 2). Selama 1 Januari – 2 Februari 2013 terekam Gempa Letusan sebanyak 28 kejadian yang diawali dengan peningkatan Gempa Vulkanik Dalam (VA) dan Gempa Vulkanik Dangkal



Gambar 2. Data Harian Kegempaan Gunung Lokon, 1 Januari – 2 Februari 2013. Amplituda tremor merupakan amplituda maksimum.

(VB). Peningkatan jumlah Gempa Vulkanik Dalam (VA) selalu diikuti oleh peningkatan Gempa Vulkanik Dangkal (VB). RSAM per 10 menit kegempaan Gunung Lokon pada 1 Januari – 2 Februari 2013 menunjukkan *trend* yang berfluktuatif, berkesesuaian dengan peningkatan aktivitas kegempaan terutama Tremor Vulkanik.

Gempa Vulkanik (VA dan VB) serta Gempa Letusan dihitung energinya yang kemudian diplot berdasarkan urutan kejadiannya (Gambar 3). Gambar 3 menunjukkan bahwa Gempa Letusan dengan energi yang besar diawali dengan meningkatnya kejadian Gempa Vulkanik atau terekamnya Gempa Vulkanik dengan energi besar pada sehari atau beberapa jam sebelumnya. Energi Gempa Vulkanik, VA dan VB, kemudian dikumulatifkan untuk dapat mengetahui korelasinya dengan energi Gempa Letusan (Gambar 4). Energi Gempa Letusan pada 3 Januari – 2 Februari 2013 masih relatif stabil dan berkorelasi dengan besarnya akumulasi energi Gempa Vulkanik.

Tremor yang terekam pada akhir Januari 2013 pada umumnya mempunyai kisaran frekuensi 3 – 5 Hz (Gambar 5). Penentuan sumber tremor dilakukan dengan menghitung azimuth dan *incident angle* berdasarkan perbandingan polarisasi yang diestimasi berdasarkan koherensi dan kovariansi matriks (Haney, 2009). *Incident angle* merupakan sudut antara arah gelombang dengan garis normal pada station seismik. Dengan demikian semakin besar nilai *incident angle* maka sumber gempa semakin dangkal.



Gambar 3. Energi Gempa Vulkanik (VA, VB) dan Gempa Letusan Gunung Lokon, 3 Januari – 2 Februari 2013.



Gambar 4. Kumulatif Energi Gempa Vulkanik dan Energi Gempa Letusan Gunung Lokon, 3 Januari – 2 Februari 2013.

Hasil perhitungan azimuth dan *incident angle* menunjukkan nilai yang acak yang disebabkan tercampurnya antara sinyal dengan *noise*, akan tetapi terlihat nilai dominan dari arah tremor mempunyai *back azimuth* 36° atau 324° NE dari *Station* WLN (Wailan) dan nilai *incident angle* pada kisaran 63⁰ – 97⁰ (Gambar 6). Dengan mengetahui tinggi stasiun serta jaraknya terhadap kawah maka dapat diperkirakan kedalaman sumber tremor, yaitu pada sekitar 850



Gambar 5. Frekuensi Tremor Vulkanik Gunung Lokon pada 29 Januari 2013, Pukul 10.10 WITA.

m di bawah Kawah Tompaluan hingga hampir dekat permukaan Kawah Tompaluan.

Deformasi

Pengukuran deformasi di Gunung Lokon dilakukan dengan tiltmeter dan EDM (*Electrooptical Distance Measurement*).

Tiltmeter

Tiltmeter yang digunakan merupakan *borehole tiltmeter*, dengan *interval sampling* 1 detik, berlokasi di stasiun WLN yang berjarak $\pm 1,5$ km dari Kawah Tompaluan. Data *Tiltmeter* pada Januari 2013 terlihat berfluktuatif dengan nilai 0,02 – 1,95 µRadian (Gambar 7). Pada umumnya teramati perubahan *trend* data *tiltmeter* pada ± 40 menit – 4 jam sebelum letusan Gunung Lokon.

EDM

Pengukuran EDM dilakukan pada 2 *baseline*, yaitu Pos – Kebun dan Pos – Lava. Pengukuran

tidak dapat dilakukan setiap hari karena terkendala cuaca yang pada umumnya sering tertutup kabut atau abu dari letusan dan hembusan asap Gunung Lokon. Pengukuran EDM menunjukkan bahwa jarak miring kedua *baseline* berfluktuatif. Analisis regresi linier terhadap hasil pengukuran menunjukkan adanya pemanjangan, akan tetapi analisis tersebut kurang tepat diterapkan pada data.

Selama survei EDM dilakukan terjadi beberapa kali letusan yaitu pada 24 Januari 2013 pukul 05.10 WITA, 31 Januari 2013 pukul 06.54 dan 10.44 WITA. Hembusan yang menghasilkan asap berwarna kelabu tebal dengan tinggi 400 m terjadi pada 28 Januari 2013 pukul 13.06 WITA. Jarak miring kedua *baseline* sebelum terjadinya hembusan pada 28 Januari 2013 dan letusan 31 Januari 2013 menunjukkan adanya pemendekan sekitar 1 – 2 cm. Pengukuran EDM 28 Januari 2013 pukul 08.30 WITA menunjukkan pemendekan dengan nilai relatif



Gambar 6. Arah dan incident angle Tremor Vulkanik Gunung Lokon pada 29 Januari 2013, pukul 10.10 WITA

besar pada kedua baseline, yaitu sekitar 2 cm, hembusan terjadi pukul 13.06 WITA, pengukuran pukul 13.00 – 13.30 WITA menunjukkan pemanjangan jarak pada kedua baseline. Pengukuran EDM sebelum letusan 2 Februari 2013 hanya dapat dilakukan sekali setelah terjadinya letusan 31 Januari 2013 sehingga tidak diperoleh data pembanding antara kedua letusan tersebut.

Geokimia

Pengamatan geokimia dilakukan dengan melakukan pengukuran fluks SO₂ asap gunung api dengan metoda *Gas Remote Sensing* meng-gunakan alat DOAS (*Differential Optical Absorption Spectrometer*) dan *ash leachete* dari abu letusan Gunung Lokon.

DOAS

Pengukuran fluks gas sulfur dioksida (SO₂) asap gunung api dilakukan dengan metoda Gas Remote Sensing menggunakan alat DOAS (*Differential Optical Absorption Spectrometer*) dengan software pengolah data Ultra-7. Pengukuran fluks SO₂ asap Gunung Lokon dilakukan dari lokasi *Hotel Lokon Boutique Resort* berjarak 3,5 km dari kawah aktif Tompaluan dengan posisi DOAS pada 01°21'31,2" LU-124°49'51,0" BT. Fluks SO₂ Gunung Lokon dari hasil pengukuran secara *horizontal scanning* diperlihatkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Gambar 9 memperlihatkan bahwa fluks SO₂ dari 22 – 31 Januari 2013 tampak berfluktuasi (naik-turun). Pada tanggal 22 Januari 2013 nilai fluks SO₂



Gambar 7. Data Tiltmeter Gunung Lokon, 3 Januari – 2 Februari 2013. Garis vertikal menunjukkan letusan Gunung Lokon.



Gambar 8. Data pengukuran EDM Gunung Lokon, 23 Januari – 2 Februari 2013. Garis vertikal menunjukkan letusan Gunung Lokon. Garis merah merupakan garis regresi linier.



Gambar 9. Fluks SO₂ Gunung Lokon pada 22 – 31 Januari 2013. Jam pengukuran dalam waktu Indonesia Barat (WIB) dikarenakan permasalahan *setting* alat.

rata-rata 95 ton/hari kemudian turun menjadi 58 ton/hari pada 23 Januari 2013, dan pada jam 23.15 WITA terjadi letusan. Nilai fluks SO₂ naik kembali menjadi 140 ton/hari pada 24 Januari 2013 dan 228 ton/hari pada 25 Januari 2013. Pada 26 – 27 Januari tidak ada pengukuran karena cuaca mendung berkabut dan hujan. Pasca curah hujan yang tinggi, nilai fluks SO₂ pada 28 Januari 2013 masih naik menjadi 237 ton/hari, tetapi menurun menjadi 145 ton/ hari pada 29 Januari 2013 dan 117 ton/hari pada 30 Januari 2013. Kemudian terjadi letusan pada 31 Januari 2013 jam 6.54 dan 10.44 WITA. Sekitar 2 jam setelah letusan terakhir ini nilai fluks SO₂ naik kembali menjadi 163 ton/hari. Pada 1 Februari 2013 tidak dilakukan pengukuran karena cuaca mendung dan hujan.

Pada 2 Februari 2013 pengukuran fluks SO₂ dilakukan selama \pm 3 jam. Pada interval waktu ini terjadi 10 kali letusan sehingga fluks SO₂ yang dilepaskan dari vent tanpa letusan tidak bisa ditentukan. Dari Gambar 10 terlihat bahwa fluks SO₂ sangat rendah (15 ton/hari) saat terjadi letusan pertama (tinggi letusan 2000 m). Selepas letusan pertama fluks naik hingga 84 ton/hari lalu turun kembali hingga 61 ton/hari. Dalam interval penurunan fluks ini terjadi lagi tiga kali letusan berintensitas lebih kecil. Kemudian letusan istirahat selama \pm 1,5 jam. Selama waktu tanpa letusan ini, fluks SO₂ naik hingga maksimum 138 ton/hari, lalu tren turun kembali hingga 58 ton/hari. Sebelum letusan kelima terjadi fluks sempat naik lebih dahulu menjadi 81 ton/hari. Selanjutnya terjadi letusan keenam sampai kesepuluh, disini fluks SO₂ relatif berfluktuasi mendatar pada kisaran 60 – 80 ton/ hari.

Data menunjukkan bahwa fluks SO₂ bernilai rendah saat terjadi letusan. Hal ini karena partikel abu telah menghalangi sinar ultraviolet matahari akibatnya gas SO₂ tidak dapat menyerap sinar ultraviolet secara optimal sehingga fluks SO₂ yang terukur pun menjadi kecil.

Ash Leachate

Abu letusan gunung api mempunyai kandungan *volatilel* gas (terutama gas HF, HCl, dan SO₂) yang terikat (teradsorpsi) di bagian permukaan abu. Ikatan adsorpsi gas-abu dapat lepas dengan cara melarutkan abu dalam air dan



Gambar 10. Fluks SO2 Gunung Lokon pada 2 Februari 2013.

memanaskannya pada temperatur di bawah titik didih air. Gas HF, HCl, dan SO₂ yang lepas kemudian larut dalam air membentuk ion F, Cl, dan SO₄ dalam larutan. Larutan ini disebut sebagai *ash leachate*, dan konsentrasinya dapat diukur dengan menggunakan alat *Ion Chromatography* (IC).

Rasio *anion Fluor* (F) terhadap Klorida (Cl) dan Klorida terhadap Sulfat (SO_4) dalam abu letusan Gunung Lokon dari letusan bulan Januari - Februari 2013 diperlihatkan pada Tabel 1. Nilai rasio anion F/Cl dan Cl/SO₄ tampak bervariasi dari letusan yang satu ke letusan yang lain. Nilai rasio tertinggi untuk Cl/SO₄ adalah 1,65 (16 Januari 2013) dan untuk F/Cl adalah 0,27 (8 Januari dan 2 Februari 2013). Sedangkan nilai rasio terendah untuk Cl/SO₄ adalah 0,42 (2 Februari 2013) dan untuk F/Cl adalah 0,21 (24 Januari 2013).

Komposisi Kimia Abu Letusan

Analisis abu letusan dilakukan di Laboratoium

Tabel 1. Data F/Cl dan ${\rm Cl/SO}_4$ dalam Abu Letusan Gunung Lokon

Waktu Letusan	Rasio F/Cl	Rasio Cl/SO ₄
2 Januari 2013	0.26	0,83
8 Januari 2013	0.27	0,83
16 Januari 2013	0.22	1,65
24 Januari 2013	0.21	1,52
2 Februari 2013	0.27	0,42

BPPTK Yogyakarta. Data kimia abu letusan Gunung Lokon tanggal 16 Januari 2013 menunjukkan komposisi silika (SiO₂) sebesar 56,37%, Al₂O₃ 16,93%, Fe₂O₃ 8,47%, CaO, 8,08%, dan unsur kimia lainnya masing-masing kurang dari 3%. Komposisi kimia selengkapnya ditampilkan dalam Tabel 2. Komposisi kimia abu letusan tersebut mencerminkan magma Gunung Lokon bersifat andesit basaltik.

PEMBAHASAN

Tabel 2. Komposisi Kimia Abu Letusan Gunung Lokon 16 Januari 2013

Unsur Kimia	Satuan	Abu Letusan 16-01-2013
SiO ₂	% berat	56,37
Al2O ₃	% berat	16,93
Fe ₂ O ₃	% berat	8,47
CaO	% berat	8,08
MgO	% berat	2,57
Na ₂ O	% berat	2,77
K ₂ O	% berat	2,62
TiO_2	% berat	0,83
MnO	% berat	0,12
P_2O_5	% berat	0,28
H_2O	% berat	0,50
HD	% berat	0,44

Aktivitas vulkanik Gunung Lokon pada Januari – 2 Februari 2013 masih tinggi yang ditandai oleh sering terjadinya letusan/ letusan. Data kegempaan menunjukkan bahwa peningkatan kegiatan Gunung Lokon ditandai dengan meningkatnya Gempa Vulkanik (VA dan VB), Tremor dan Gempa Hembusan (Kristianto *et al.*, 2012). Dominasi Tremor pada umumnya menghasilkan letusan abu dengan tinggi kolom letusan berkisar 100 – 250 m sedangkan dominasi peningkatan pada Gempa Vulkanik Dalam menghasilkan letusan abu dengan tinggi kolom letusan berkisar 1500 – 3500 m (Kristianto *et al.*, 2012). Gempa Vulkanik Gunung Lokon pada umumnya memiliki S-P 0,25 – 1 detik. Penentuan sumber gempa vulkanik dilakukan pada Juli – Desember 2011 (Zaennudin, 2012). Hasil penentuan hiposenter ini menunjukkan bahwa kedalaman gempa vulkanik umumnya berkisar antara 0,7 – 6 km di bawah Kawah Tompaluan (Gambar 11). *Epicenter* gempa umumnya berkumpul di sekitar kawah, namun beberapa gempa teramati berasal dari sebelah barat daya kawah. Secara umum episenter gempa terlihat membentuk arah tenggara – barat laut. Kejadian Gempa Vulkanik, VA dan VB, pada Januari 2013 muncul secara selaras dimana tidak ada jeda waktu yang lama antara keduanya (Gambar 3). Penulis menginterpretasikan bahwa hal ini dikarenakan kondisi konduit Gunung Lokon pada Januari 2013 relatif lebih terbuka bila dibandingkan pada masa istirahat, serta terjadi peningkatan aktivitas berupa migrasi magma dan atau gas yang relatif menerus yang menekan ke konduit dan menimbulkan patahan akibat *over pressure* se-



Gambar 11. Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Lokon, Juli – Desember 2011. Bintang menunjukkan lokasi seismometer. Bulatan menunjukkan sumber gempa (Zaennudin, 2012).

hingga terjadi gempa vulkanik. Suparman *et al.*, (2010) menyimpulkan bahwa mekanisme sumber gempa vulkanik, VA dan VB, di Gunung Lokon merupakan mekanisme *double couple* (DC) yang disebabkan akibat patahan/ faulting.

Kristianto *et al.*, (2012) membandingkan antara energi Gempa Vulkanik, Tremor dan Letusan. Perhitungan energi dilakukan menggunakan parameter amplituda dan lama gempa (Gambar 12), memperlihatkan bahwa energi letusan lebih berkorelasi dengan besarnya kumulatif energi gempa vulkanik dibandingkan dengan kumulatif energi tremor. Energi tremor, yang terdiri dari variabel amplituda dan lama gempa tremor, tidak berkorelasi dengan besarnya energi letusan. Gambar 12 memperlihatkan bahwa tremor dengan amplituda dan lama gempa yang besar tidak menghasilkan energi letusan yang besar.

Tremor yang terekam pada akhir Januari 2013 pada umumnya mempunyai kisaran frekuensi sekitar 4 Hz. Berdasarkan model Vibrasi Konduit (Seidl *et al.*, 1981) getaran tremor disebabkan oleh terjadinya getaran pipa konduit akibat adanya gerakan *turbulent* uap dan gas dalam magma. Getaran *turbulent* ini diperkirakan



Gambar 12. Energi Gempa Letusan dibandingkan dengan energi Gempa Vulkanik dan Tremor G. Lokon pada Juli 2011 (Kristianto *et al.*, 2012).

disebabkan oleh adanya beda tekanan pada konduit sedangkan frekuensi getaran tremor ditentukan oleh geometri konduit. *Incident angle* dari tremor Gunung Lokon menunjukkan bahwa sumber tremor berada pada sekitar 850 meter di bawah Kawah Tompaluan hingga hampir dekat permukaan Kawah Tompaluan. Analisis Sompi dilakukan dengan *software seismovolcanolysis* (Lessage, 2009) pada tremor Gunung Lokon dan menunjukkan bahwa frekuensi yang terkandung berada pada kisaran 3-5Hz dengan nilai Q = 5 (Gambar 13). Nilai Q yang rendah menunjukkan bahwa gempa tersebut mempunyai kandungan gas yang rendah, dimana untuk sumber dengan kandungan gas tinggi (*basalt-gas* atau *water-gas*) mempunyai nilai Q lebih dari 80 (Chouet, 2003). Berdasarkan hal tersebut diatas, penulis menginterpretasikan bahwa terekamnya tremor bukan sebagai prekursor terjadinya letusan Gunung Lokon. Prekursor utama letusan Gunung Lokon adalah terekamnya rentetan/*swarm* Gempa Vulkanik. Erupsi ekplosif Gunung Lokon diperkirakan bukan karena kandungan gas yang tinggi pada magma, akan tetapi karena terjadinya *overpressure* akibat akumulasi tekanan pada penutup bagian atas konduit (*magma plug*). Zaennudin (2012) menyimpulkan bahwa tipe letusan



Gambar 13. Analisa sompi Tremor Gunung Lokon pada 29 Januari 2013 pukul 10.10 WITA.

Gunung Lokon merupakan tipe vulkanian yang ditandai dengan adanya bom kerak roti (bread crust bomb) yang ditemukan di sekitar kawah setelah letusan. Terjadinya swarm Gempa Vulkanik sebelum letusan disebabkan terjadinya overpressure dimana tekanan magma melebihi tekanan batuan di sekitarnya. Terjadinya overpressure ini didorong oleh proses degassing yang terjadi di dalam konduit. Jika magma bersifat permeable dan batuan di sekitarnya pun permeable maka gas yang terkandung dalam magma akan mudah keluar menuju permukaan. Proses ini akan membentuk area di bagian permukaan magma bersifat porositas rendah, dengan densitas yang lebih tinggi dibanding dengan bagian lainnya, sehingga menciptakan adanya penutup pada bagian atas konduit (magma plug). Dengan adanya prosses degassing yang menerus dan mendorong adanya magma plug maka akan terjadi overpressure yang ditandai dengan terjadinya swarm Gempa Vulkanik menjelang letusan.

Pemantauan secara menerus aktivitas Gunung Lokon dilakukan dengan monitoring aktivitas kegempaan dan deformasi menggunakan tiltmeter. Gambar 14 menunjukkan data tiltmeter serta energi Gempa Vulkanik dihubungkan dengan energi Gempa Letusan Gunung Lokon. Gempa Letusan dengan energi yang besar diawali dengan meningkatnya kejadian dan energi Gempa Vulkanik atau terekamnya Gempa Vulkanik dengan energi besar pada sehari atau beberapa jam sebelumnya. Energi Gempa Letusan pada Januari – 2 Februari 2013 masih relatif stabil dan berkorelasi dengan besarnya akumulasi energi Gempa Vulkanik. Data tiltmeter secara umum menunjukkan adanya penurunan trend pada sebelum terjadinya letusan dan mengalami peningkatan setelah terjadinya letusan yang mempunyai energi letusan yang besar.

Data pengukuran jarak menggunakan EDM memperlihatkan adanya pemendekan sekitar 1 – 2 cm, yang diindikasikan sebagai inflasi, pada saat sebelum terjadinya letusan dan kemudian jarak miring memanjang atau kembali normal sesaat setelah terjadinya letusan. Kondisi ini diinterpretasikan bahwa sumber tekanan yang menimbulkan deformasi di Gunung Lokon merupakan sumber dangkal. Analisa regresi pada data EDM dapat diterapkan dengan letusan sebagai interval/pembatas data untuk regresi.

Penurunan fluks SO₂ sebelum letusan terjadi diperkirakan karena adanya penyumbatan (plug) pada bagian atas dari vent akibat infiltrasi air ke dalam lubang letusan atau akibat perbedaan densitas dan viskositas magma antara bagian atas dan bawah dalam konduit/vent dimana magma bagian atas lebih "cool" dan lebih "dense" sehingga akhirnya menghambat release gas SO2 ke udara. Setelah overpressure maka akan terjadi letusan, lalu SO₂ dapat lepas ke atmosfer dan fluksnya akan meningkat beberapa waktu lamanya. Jika proses suplai fluida dari kedalaman relatif kecil dan lambat maka proses/ siklus penyumbatan akan terjadi kembali dan menyebabkan gas SO₂ tertahan dan fluks SO₂ menurun. Gambar 15 menunjukkan bahwa nilai fluks SO₂ pada Januari 2013 ini relatif sama dengan Juli 2011. Ini mencerminkan tidak ada peningkatan gas SO₂ yang dilepaskan ke atmosfer.

Untuk gunung api yang meletus beberapa kali dalam satu periode letusan seperti Gunung Lokon ini, rasio anion dapat digunakan untuk me-



Gambar 14. Analisis sompi Tremor Gunung Lokon pada 29 Januari 2013 pukul 10.10 WITA.



Gambar 15. Tiltmeter dan Kumulatif energi Gempa Vulkanik, energi Gempa Letusan.

lihat perkembangan aktivitas letusan. Contoh aplikasinya, bila rasio Cl/SO₄ memperlihatkan tren menurun dari satu letusan ke letusan berikutnya maka dapat diinterpretasikan aktivitas vulkanik/letusan memperlihatkan tren menurun atau sebaliknya bila rasio Cl/SO4 meningkat maka tren aktivitas vulkanik/letusan masih meningkat. Besar kecilnya rasio anion ini juga dapat menggambarkan besar kecilnya letusan. Gambar 16 menunjukkan rasio Cl/SO₄ dan F/ Cl dalam abu letusan Gunung Lokon dari Juli 2011 – Februari 2013. Rasio Cl/SO₄ pada 2013 masih relatif stabil dibandingkan tahun 2011 dan 2012 (Kristianto drr., 2012). Rasio SO_4 , Cl, dan F untuk jenis magma utama sangat berbeda. Pada suatu diagram segitiga, andesit dan dasit cenderung memiliki kandungan F relatif rendah, sedangkan andesit memiliki kandungan

S relatif paling besar dari semua komposisi. Dasit memiliki kandungan Cl relatif lebih besar daripada andesit, dan basalt-andesit umumnya memiliki proporsi F jauh lebih tinggi. Sementara leachate basalt memiliki sebaran yang lebar. Untuk Gunung Lokon, dari diagram segitiga (Gambar 17) tampak bahwa konsentrasi relatif SO₄ antara 42 – 81%, Cl antara 5 – 26%, dan F(x10) antara 14 – 40%. Ini adalah karakteristik ash leachate dari Gunung Lokon pada periode letusan 2011 hingga 2013. Dari diagram segitiga ash leachate tersebut juga menunjukkan bahwa magma Gunung Lokon lebih dominan berkomposisi andesit-basaltik. Pada awal letusan (Juli 2011, lingkaran merah), pernah lebih dekat kepada komposisi andesit.



Gambar 16. Perbandingan rasio Cl/SO₄ dan F/Cl dalam abu letusan Gunung Lokon, Juli 2011 – Februari 2011.



Gambar 17. Diagram segitiga dari konsentrasi relatif SO_4 , Cl, dan F(x10) dalam *ash leachate* Gunung Lokon (lingkaran merah adalah abu letusan 2011, lingkaran biru adalah abu letusan 2012, dan lingkaran hijau abu merupakan letusan 2013.

KESIMPULAN

Energi Gempa Letusan berkorelasi dengan besarnya akumulasi energi Gempa Vulkanik sebelum terjadinya letusan, juga Interval waktu yang pendek antara peningkatan energi Gempa Vulkanik dengan terjadinya letusan mengindikasikan bahwa kondisi Gunung Lokon masih belum stabil.

Data tiltmeter secara umum menunjukkan adanya penurunan *trend* pada sebelum terjadinya letusan dan mengalami peningkatan setelah terjadinya letusan yang mempunyai energi letusan yang besar, begitu juga dengan data pengukuran jarak menggunakan EDM yang memperlihatkan adanya pemendekan diindikasikan sebagai inflasi, pada saat sebelum terjadinya letusan. Analisa regresi pada data EDM dapat diterapkan dengan letusan sebagai interval/ pembatas data untuk regresi. Pada nilai fluks SO_2 Gunung Lokon pada Januari 2013 ini relatif sama dengan Juli 2011, mencerminkan tidak ada peningkatan gas SO_2 yang dilepaskan ke atmosfer, juga pada rasio Cl/SO₄ hasil analisis *ash leachate* pada Januari 2013 masih relatif stabil dibandingkan tahun 2011 dan 2012. Aktivitas vulkanik Gunung Lokon pada Januari 2013 tidak menunjukkan adanya penurunan dibandingkan tahun 2011 dan 2012.

ACUAN

Chouet, B., 2003, *Volcanic Seismology*, Pure Appl. Geophys. v160, pp 739-788

Haney, 2009, Polariz: a set of Matlab programs to perform polarization analysis on narrowband seismic data, *http://pal.boisestate.edu/index.php/Matt_Haney*

Kristianto, Gunawan, H., Haerani, N., dan Primulyana, S., 2012, Letusan Lokon 2011, Gunung Lokon – *Laporan dan Kajian Vulkanisme*, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung

Kusumadinata, K., 1979. *Data Dasar Gunung api*, Direktorat Vulkanologi, Bandung, hal. 661 – 665.

Lesage P., 2009. An interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals, Computer and Geosciences 35, 2137-2144

Mulyadi, D., Hendrasto, dan M., Suradji, I., 1990, Laporan Pemetaan Geologi Gunung Lokon - Empung, Sulawesi Utara, Direktorat Vulkanologi, Bandung

Seidl, D., Schick, R., Riuscetti, M., 1981. Volcanic tremors at Etna: a model for hydraulic origin. Bull, Volcanol. 44, 43–56.

Suparman, Y., Iguchi, M., Hendrasto, dan M., Kristianto, 2010, Comparison of Focal Mechanisms of Volcano-Tectonic Earthquakes Between Active and Normal Periods at Lokon Volcano, North Sulawesi, Indonesia, *Jurnal Gunung api dan Mitigasi Bencana Geologi, Vol. 2 No. 1, Januari 2010.*

Witham, C. S., Oppenheimer, C., dan Horwell, C. J., 2004, Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Zaennudin, A., 2012, *Laporan Tanggap Darurat Gunung Lokon – Mei 2012*, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.