

## **Gejala awal letusan Gunung Lokon Februari 2011 - Maret 2012**

### *Precursor of the eruption of Mount Lokon February 2011 - March 2012*

Kristianto, Hendra Gunawan, Nia Haerani, Iyan Mulyana, Ahmad Basuki,  
Sofyan Primulyana, dan Farid Uskanda Bina

Badan Geologi

Jln. Diponegoro 57 Bandung

#### **ABSTRAK**

Gunung Lokon memiliki karakter erupsi yang diawali oleh letusan freatik yang berlangsung beberapa bulan dan biasanya berakhir dengan letusan magmatik yang berlangsung singkat. Aktivitas tahun 2011 diawali oleh letusan freatik pada 22 Februari 2011 dan berulang pada 26 Juni 2011. Pada Juli 2011 kejadian letusan semakin intensif. Sampai dengan Maret 2012 letusan terjadi setiap bulan. Gejala awal setiap periode letusan diamati secara visual serta instrumental dengan menggunakan metoda kegempaan, geokimia, dan deformasi. Pengamatan kegempaan menunjukkan bahwa setiap kejadian letusan selalu diawali oleh peningkatan jumlah gempa vulkanik dangkal dan gempa hembusan serta membesarnya amplituda tremor. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan fluida sebelum letusan. Peningkatan tekanan fluida terjadi akibat proses pelepasan gas yang diikuti proses pembentukan sumbat lava yang menyebabkan kelebihan tekanan dalam conduit, ditandai dengan peningkatan gempa vulkanik dangkal. Erupsi eksplosif terjadi jika tekanan menurun secara tiba-tiba akibat rekahan pada sumbat lava. Hasil pengamatan kegempaan berkorelasi dengan hasil pengukuran deformasi yang menunjukkan adanya pemendekan dan hasil pengukuran nilai flux SO<sub>2</sub> yang turun menjelang letusan.

**Kata kunci:** letusan, freatik, gempa vulkanik dangkal, gempa hembusan

#### **ABSTRACT**

*The characteristics of Lokon eruption is preceded by phreatic eruptions that lasted within several months and usually ends with a short magmatic eruption. The activity in 2011 was preceded by phreatic eruption on 22 February and repeated on 26 June. In July 2011, the eruptions occurred more intensively. As of March 2012 the eruption occurred every month. The precursor of each eruption period was observed visually and instrumentally using seismicity, geochemistry and deformation methods. Seismicity observation showed that every eruption event was preceded by the increase in number of shallow volcanic and gas emission earthquakes and enlargement of tremor amplitude. These phenomena indicated that an increase in fluid pressure occurred prior to eruptions. The increase in fluid pressure occurred due to gas release process followed by lava plug formation that causes over pressure of the magma in the conduit, which was characterized by the increase in shallow volcanic earthquakes. Explosive eruption occurs when the pressure decreases suddenly due to lava plug cracking. The results of seismicity observation correlate*

with the results of deformation measurements that showed an inflation and the decrease in  $SO_2$  flux prior to eruption.

**Keywords:** explosion, phreatic, shallow volcanic earthquake, emission earthquake

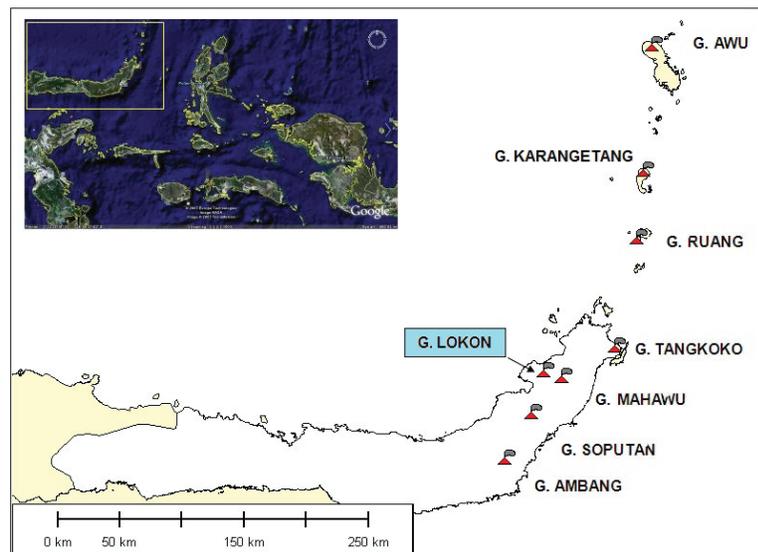
## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Gunung Lokon yang berlokasi di Tomohon, Provinsi 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 kembar, oleh karena itu sering disebut Kompleks Lokon-Empung. Secara geografis puncak Gunung Lokon terletak pada  $1^{\circ}21,5'$  LU dan  $124^{\circ}47'$  BT dengan ketinggian 1.579,5 m dpl. (Gambar 1), sedangkan puncak Gunung Empung pada  $1^{\circ}22'$  LU dan  $124^{\circ}47'$  BT mencapai ketinggian 1.340 m dpl. (Kusumadinata, 1979). Berdasarkan sejarah kegiatannya, letusan se-

mula berpusat di Puncak Empung yang berlangsung dalam tahun 1350 dan 1400. Sejak tahun 1829 titik kegiatannya berpindah ke pelana antara dua puncak yang dikenal dengan Kawah Tompaluan ( $1^{\circ}21'52,68''$  LU dan  $124^{\circ}47'57,58''$  BT), dan menjadi kawah aktif atau pusat letusan hingga saat ini.

Letusan Gunung Lokon terakhir dalam skala besar terjadi pada Oktober 1991. Letusan tersebut disertai awan panas yang meluncur sejauh 1,5 km di Lembah Pasahapen dan berakhir dengan terbentuknya sumbat lava yang diberi nama Sumbat Lava 1991 (Wittiri, 1991). Dalam kurun waktu antara tahun 2000 sampai dengan 2003, letusan berlangsung secara beruntun hampir setiap tahun. Setelah istirahat selama 4 tahun, aktivitas Gunung



Gambar 1. Peta lokasi Gunung Lokon di Sulawesi Utara.

Lokon meningkat kembali pada Desember 2007. Peningkatan aktivitas vulkanik tersebut ditandai oleh peningkatan jumlah gempa vulkanik dan gempa hembusan. Sampai dengan awal 2011 jumlah gempa vulkanik berfluktuasi antara 100 - 800 kejadian setiap bulan.

Pada 22 Februari 2011, terjadi letusan freatik. Asap letusan berwarna kelabu dihembuskan setinggi 400 m di atas bibir kawah. Asap letusan tertiuip angin ke arah tenggara dan menyebabkan hujan abu tipis di beberapa wilayah sekitarnya. Empat bulan kemudian, pada 26 Juni 2011 terjadi letusan serupa. Asap letusan mencapai tinggi 400 m di atas kawah dan condong ke arah Utara. Berdasarkan kejadian tersebut, pada 26 Juni 2011 status kegiatan Gunung Lokon dinaikkan dari Waspada (Level II) menjadi Siaga (Level III). Memasuki bulan Juli 2011 intensitas letusan Gunung Lokon semakin tinggi. Pada 9 Juli 2011 terjadi 20 kali letusan. Kolom asap berwarna putih - kelabu tebal dan mencapai ketinggian antara 200 – 500 m di atas Kawah Tompaluan.

Tulisan ini dibuat berdasarkan hasil pemantauan kegempaan, deformasi, dan geokimia di Gunung Lokon dalam rentang waktu antara

tahun 2011 hingga Maret 2012.

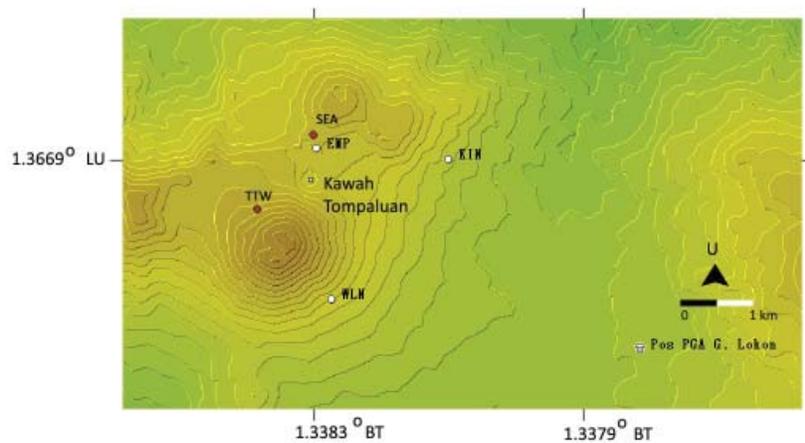
### Metode Penelitian

Metoda yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pemantauan visual dan instrumental. Pemantauan secara visual dilakukan dari Pos Pengamatan Gunung Api (PGA) di Kakaskasen, sedangkan pemantauan secara instrumental terdiri atas kegempaan (seismograf) dan deformasi (EDM dan GPS). Pengukuran geokimia dilakukan secara periodik pada saat krisis Juni – Juli 2011. Pemantauan kegempaan Gunung Lokon menggunakan 5 stasiun seismik (Tabel 1 dan Gambar 2), yang terdiri dari stasiun Empung (EMP), Sea (SEA), Kinilow (KIN), Tatawiran (TTW), dan Wailan (WLN). Data gempa analog ditransmisikan dengan gelombang radio dari setiap stasiun seismik di lapangan menuju Pos PGA Lokon. Data diakuisisi dan menjadi data digital dengan sistem *earthworm* dan *argalite* serta disimpan dalam format *seisan* dan *win*.

Pengamatan deformasi menggunakan data GPS kontinyu serta pengukuran jarak miring dengan metode EDM. Stasiun GPS kontinyu terdiri dari 3 lokasi seperti yang terlihat pada

Tabel 1. Kordinat Stasiun Seismik Gunung Lokon

Nama Stasiun	Lintang Utara	Bujur Timur	Ketinggian (m dpl)
Empung (EMP)	1°22'5.28"	124°48'0.9"	1.143
Kinilow (KIN)	1°22'0.6"	124°48'59.4"	914
Wailan (WLN)	1°20' 58.3"	124° 48' 8"	1.024
Tatawiran (TTW)	1°21' 39.9"	124° 47' 37.5"	1.365
Sea (SEA)	1°22' 12.5"	124° 47' 59.2"	1.162



Gambar 2. Peta lokasi stasiun seismik Gunung Lokon

Tabel 2, sedangkan lokasi titik pengukuran EDM dapat dilihat pada Tabel 3. Gambar jaringan titik GPS kontinyu dan EDM Gunung Lokon dapat dilihat pada Gambar 3.

### Aktivitas Gunung Lokon

Pada abad ke-14 pusat letusan Kompleks Gunung Lokon - Empung berada di puncak Gunung Empung. Sejak 1829 titik letusan

bergeser ke arah selatan, yaitu di pelana antara puncak Gunung Lokon dan puncak Gunung Empung yang dikenal dengan Kawah Tompaluan. Interval letusan yang pendek antara 1 - 8 tahun, sedangkan interval letusan yang panjang sekitar 64 tahun (Gambar 4). Karakter letusan umumnya berupa letusan freatik - freatomagmatik, terkadang diakhiri dengan letusan magmatik. Pada tahun 1991 terjadi letusan magmatik disertai dengan awan panas

Tabel 2. Peralatan GPS Kontinyu Gunung Lokon

No.	Titik GPS	Lokasi	Tipe receiver	Antena
1	KKVO	Pos PGA Lokon, Kakaskasen	Trimble NetRS	Zephyr TRM41249
2	KINL	Stasiun seismik Kinilow	Trimble NetRS	Zephyr TRM41249
3	WALN	Stasiun seismik Wailan	Trimble NetRS	Zephyr TRM41249

Tabel 3. Peralatan EDM Gunung Lokon

No.	Titik EDM	Lokasi	Type alat
1	KKVO	Pos PGA Lokon, Kakaskasen	Leica Total Station 1203+
2	KBN	Lereng tenggara	Sokisha Triple Prism
3	LAVA	Sungai Pasahapen	Sokisha Triple Prism





Gambar 5. Kawah Tompaluan, Desember 2009. Sinar api teramati pada dinding kawah bagian utara (lingkaran). Diduga titik letusan 22 Februari 2011 terjadi pada area ini. Foto: Farid R. Bina.



Gambar 6. Kondisi Kawah Tompaluan, 22 Februari 2011. Sinar api masih teramati pada dinding kawah bagian utara meskipun tertutup longsoran. Foto: Farid R. Bina.

dai dengan meningkatnya gempa hembusan dari rata-rata 3 - 4 kejadian per hari menjadi 11 kejadian pada 18 Februari 2011. Gempa vulkanik dangkal (tipe B) juga meningkat pada tanggal 22 Februari 2011 dari rata-rata 2 kejadian per hari menjadi 18 kejadian. Meningkatnya perekahan yang ditandai dengan peningkatan jumlah gempa vulkanik tipe B merangsang migrasi fluida dan menyebabkan vibrasi yang lebih kuat. Hal ini menyebabkan pembesaran amplituda tremor. Amplituda

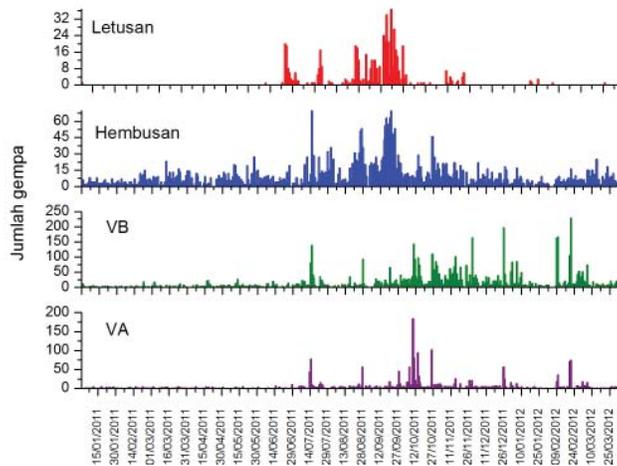
maksimum tremor teramati naik dari rata-rata 2 mm menjadi 5 mm pada tanggal 19 Februari dan menjadi 7 mm pada tanggal 20 Februari.

Dari pemeriksaan kawah yang dilakukan setelah letusan pertama pada 26 Februari 2011 diketahui bahwa intensitas hembusan asap sangat kuat. Sinar api masih teramati samar-samar pada dinding kawah bagian utara, karena tertutup material longsoran dari dinding kawah bagian atas. Air danau kawah berwarna abu-abu kehijauan dan suhu yang tinggi (air danau kawah seperti mendidih). Suara hembusan/*blazer* terdengar sedang, tercium bau belerang sedang sampai pekat. Sebagian asap kawah berwarna kebiruan, terutama yang dekat dengan lubang tembusan gas.

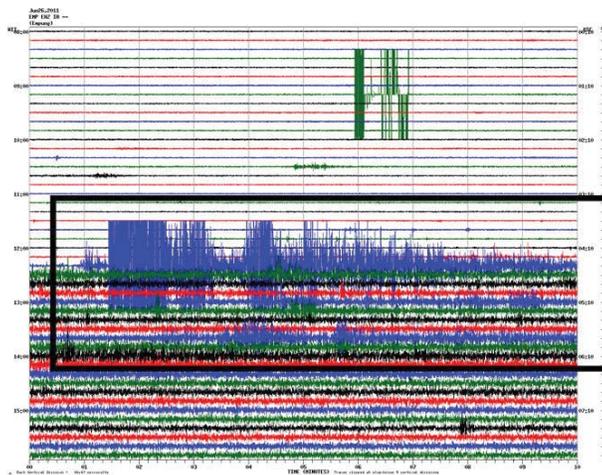
Letusan yang berlangsung pada 26 Juni 2011 diawali dengan meningkatnya jumlah gempa hembusan yang berupa gempa frekuensi rendah dengan durasi pendek dan gerakan awal yang tidak jelas. Pada 12 Juni 2011 terjadi peningkatan gempa vulkanik dangkal yang mencapai 20 kejadian. Setelah letusan 26 Juni 2011 mereda, amplituda tremor vulkanik meningkat secara signifikan, mencapai maksimum 38 mm (*peak to peak*) yang berlangsung selama 9 jam.

### Aktivitas Periode Juli 2011

Memasuki bulan Juli 2011 aktivitas Gunung Lokon semakin meningkat, diawali dengan letusan abu pada 4 Juli 2011, pukul 9.00 WITA. Asap letusan berwarna kelabu tebal mencapai ketinggian sekitar 250 m di atas kawah. Intensitas letusan kemudian berlanjut dengan kondisi kolom letusan semakin tinggi dengan interval antar letusan semakin pendek. Pada



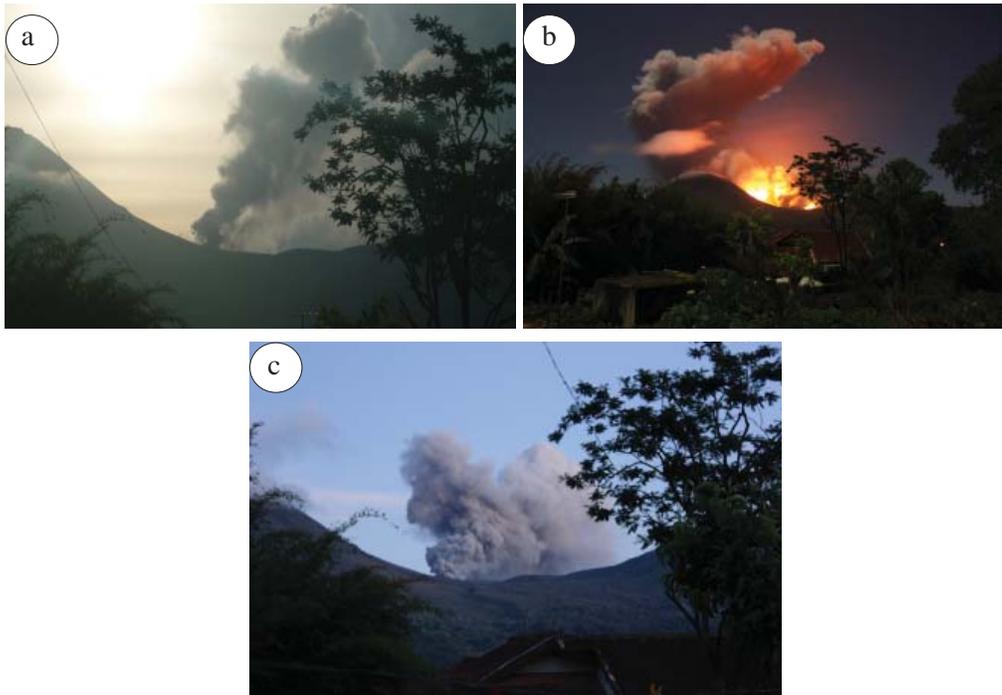
Gambar 7. Kegempaan Gunung Lokon, Januari 2011 – Maret 2012.



Gambar 8. Rekaman letusan tanggal 26 Juni 2011.

9 Juli 2011 teramati 20 kali letusan dengan asap letusan berwarna putih hingga kelabu tebal dengan tinggi antara 200 - 500 m di atas kawah dan bergerak ke arah utara. Pada awalnya interval letusan berlangsung singkat setiap 3 menit, kemudian memanjang setiap 5 jam. Pada 11 Juli 2011, jumlah letusan mulai berkurang menjadi 6 kejadian dalam satu hari, namun tinggi asap letusan mencapai 700 m di atas kawah. Hal ini mengindikasikan me-

ningkatnya tekanan. Pada 14 Juli 2011 pukul 23.31 WITA terjadi letusan magmatik tipe vulkanian dengan ketinggian kolom letusan mencapai 1.500 m di atas kawah. Lontaran material pijar tampak membakar hutan hingga radius sekitar 500 m dari kawah. Letusan ini disusul dengan letusan kedua yang berselang kurang dari 1 menit, berupa letusan abu tebal dengan ketinggian mencapai 700 m dari atas kawah (Gambar 9).



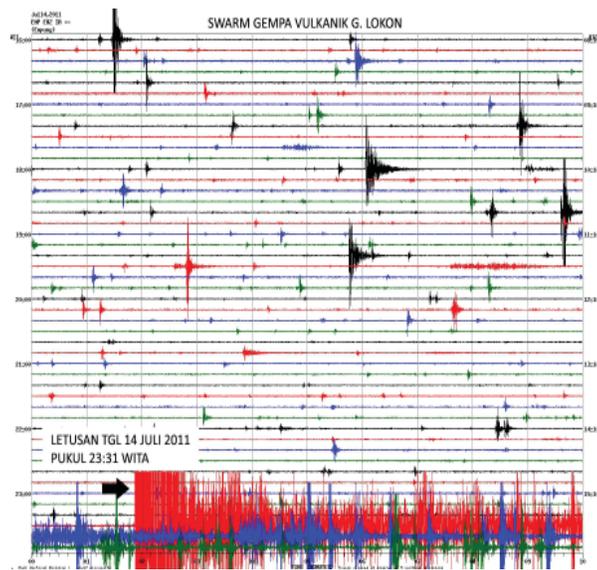
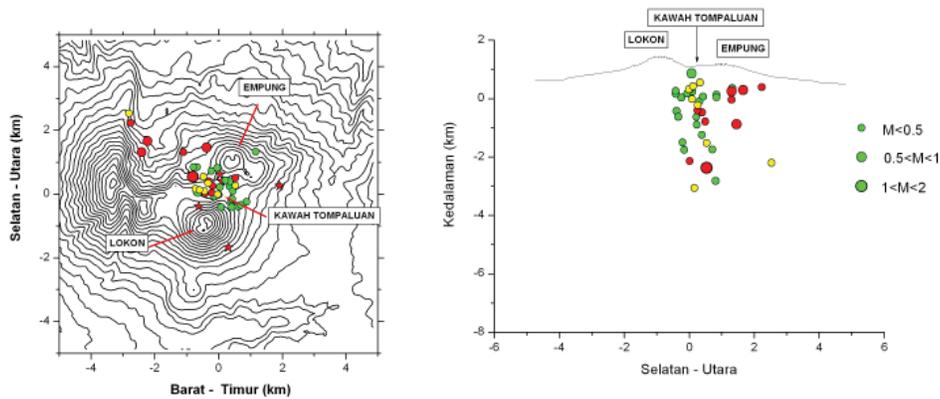
Gambar 9. Letusan Gunung Lokon yang terjadi pada 9 - 16 Juli 2011. a) 9 Juli 2011, pukul 07.12 WITA, b) 14 Juli 2011, pukul 23.31 WITA, dan c) 16 Juli 2011, pukul 05.22 WITA. Foto: Iyan Mulyana

Letusan Gunung Lokon mencapai puncaknya pada 17 Juli 2011, pukul 10.35 WITA. Terjadi letusan dengan skala yang lebih besar. Asap letusan mencapai ketinggian 3.000 - 5.000 km di atas kawah. Abu letusan tampak bergerak ke arah barat laut. Pada 17 Juli 2011, terjadi penurunan jumlah dan ketinggian kolom letusan. Pada 18 Juli 2011 hanya terjadi 2 kali letusan abu dengan tinggi sekitar 200 sampai 600 m, yang kemudian disusul dengan letusan pada 24 Juli 2011 berupa letusan abu dengan ketinggian 100 m dari atas kawah.

Setelah letusan 9 - 10 Juli 2011, kegempaan didominasi getaran tremor dengan amplitudo yang berfluktuasi antara 0,5 - 35 mm. getaran tremor berhenti pada tanggal 13 Juli 2011

pukul 07.00 WITA, kegempaan selanjutnya didominasi oleh gempa vulkanik dalam dan dangkal serta gempa hembusan. Pada 14 Juli 2012 terjadi *swarm* gempa vulkanik dan gempa hembusan. Gempa vulkanik dalam (VA) terekam sebanyak 44 kali, gempa vulkanik dangkal (VB) terekam sebanyak 81 kali, dan gempa hembusan terekam sebanyak 11 kali (Gambar 10).

Penentuan hiposenter Gunung Lokon menggunakan *software* GAD dengan model kecepatan dua *layer*. Dari hasil penentuan hiposenter ini diperoleh kedalaman gempa vulkanik umumnya berkisar 0,3 - 4 km di bawah kawah Tompaluan (Gambar 11). Episenter gempa umumnya berkumpul di sekitar kawah,

Gambar 10. *Swarm* vulkanik dan letusan tanggal 14 Juli 2011.

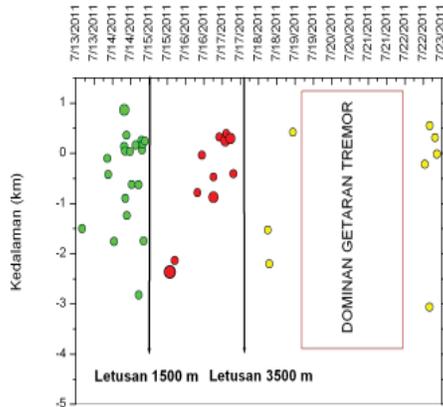
Gambar 11. Hiposenter gempa vulkanik Gunung Lokon Juli 2011

namun beberapa gempa teramati berasal dari sesar yang berada di sebelah barat laut kawah.

Secara umum episenter gempa terlihat membentuk arah tenggara – barat laut. Berdasarkan plot kedalaman gempa per jam diketahui terjadi proses pergerakan sumber gempa mendekati permukaan sebelum letusan 14 Juli dan 17 Juli 2011 (Gambar 12). Hal ini menunjukkan proses naiknya magma ke permukaan sebelum terjadinya kedua letusan terse-

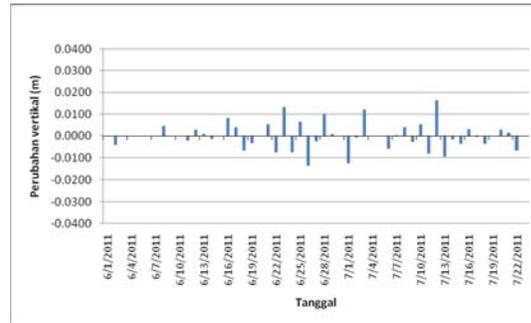
but. Dari data magnituda gempa juga terlihat bahwa gempa yang terjadi sebelum letusan 17 Juli 2011 memiliki energi yang lebih besar dibandingkan gempa vulkanik yang terjadi sebelum letusan 14 Juli 2011. Hal ini berkorelasi dengan ketinggian kolom kedua letusan tersebut. Setelah letusan 17 Juli 2011, hiposenter gempa tampak tidak mengalami progresivitas ke permukaan.

Data GPS diolah sejak 1 Juni 2011 sampai 16

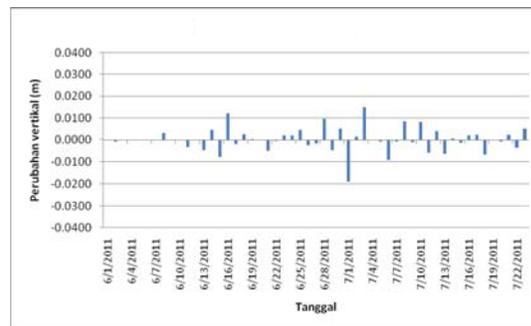


Gambar 12. Plot kedalaman gempa per waktu kejadian.

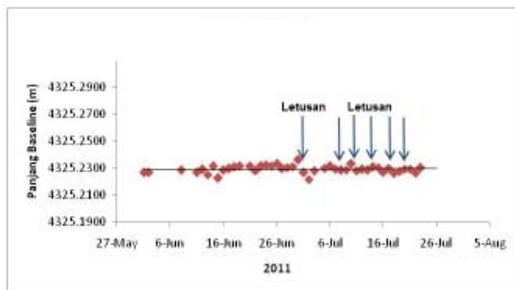
Juli 2011. Tampilan data berupa perubahan horisontal panjang *baseline* KKVO-KINL dan KKVO-WALN dalam kurun waktu harian (Gambar 13 dan 14), sedangkan perubahan vertikal pada Gambar 15 dan 16. Jarak masing-masing titik dari Kawah Tompaluan lebih kurang 1,8 km (KINL) dan 1,6 km



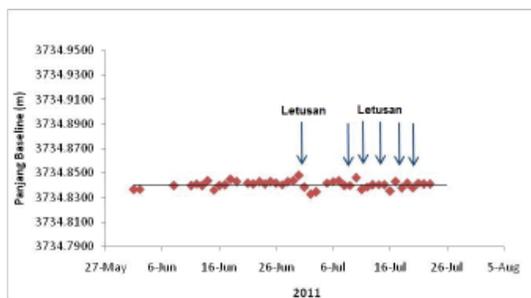
Gambar 15. Perubahan vertikal titik GPS WALN, 1 Juni – 23 Juli 2011



Gambar 16. Perubahan vertikal titik GPS KINL, 1 Juni – 23 Juli 2011



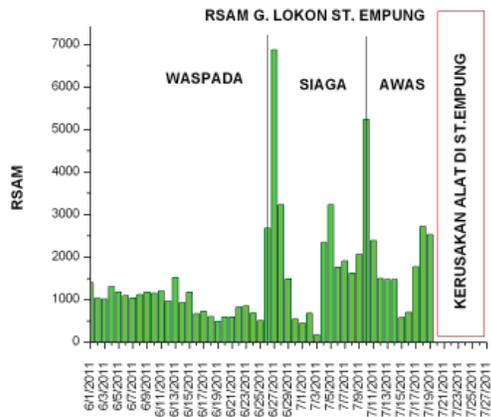
Gambar 13. Perubahan *baseline* KKVO – WALN, 1 Juni – 23 Juli 2011.



Gambar 14. Perubahan *baseline* KKVO – KINL, 1 Juni – 23 Juli 2011.

(WALN). Perubahan jarak *baseline* terlihat relatif signifikan sebelum letusan 26 Juni dan 14 Juli 2011. Hal ini sesuai pula dengan perhitungan RSAM (*Real Time Seismic Amplitude Measurement*) yang menunjukkan aktivitas kegempaan maksimum menjelang letusan 26 Juni dan 14 Juli 2011 (Gambar 17).

Pengukuran deformasi menggunakan EDM dilakukan dengan cara mengukur jarak reflektor yang berada di lokasi Lava dan Kebun dengan jarak masing-masing 3,8 dan 3,1 km dari titik acuan di Pos PGA Lokon. Hasil pengukuran jarak dengan EDM tersebut menunjukkan adanya inflasi yang terjadi pada 16 - 20 Juli 2011 dengan rata-rata pembungaan 2,3 mm/hari (Gambar 18 dan 20), sedangkan pengukuran pada 21-24 Juli 2011 me-



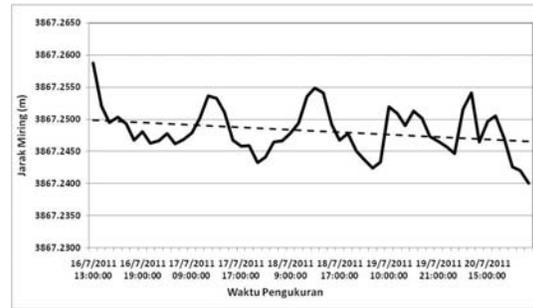
Gambar 17. Perhitungan RSAM Stasiun Empung Juni – Juli 2011.

nunjukkan nilai tetap dan cenderung deflasi (Gambar 19 dan 21).

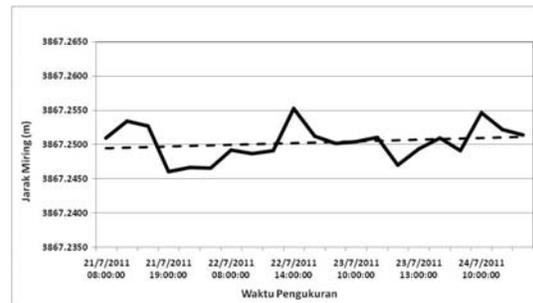
Pengamatan Geokimia dilakukan dengan melakukan pengukuran kandungan  $\text{SO}_2$  pada asap kawah dengan menggunakan alat miniDOAS. Data terakhir pengukuran jumlah fluks  $\text{SO}_2$ , yaitu pada bulan Maret 2008 sebesar 275 - 319 ton/hari. Lima hari setelah erupsi freatik 26 Juni 2011, yaitu pada 30 Juni 2011, jumlah fluks  $\text{SO}_2$  yang terukur adalah 208 ton/hari. Data hasil pengukuran fluks  $\text{SO}_2$  disajikan dalam Gambar 22 dan 23.

### Aktivitas Periode Agustus 2011 – Maret 2012

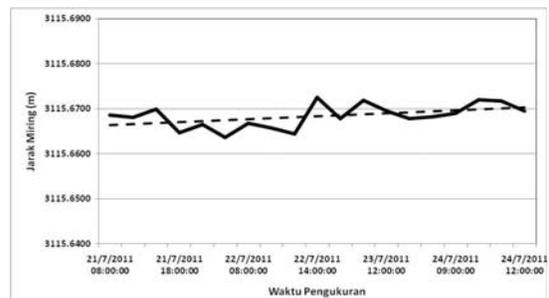
Erupsi Gunung Lokon terus berlanjut dengan karakter letusan masih berupa letusan abu yang disertai lontaran material pijar. Awan panas letusan masih tidak teramati. Selama periode Agustus 2011 - Februari 2012 jumlah gempa letusan yang tercatat cenderung menurun, tinggi kolom letusan masih berfluktuasi antara 250 - 2.000 m. secara kegempaan, ge-



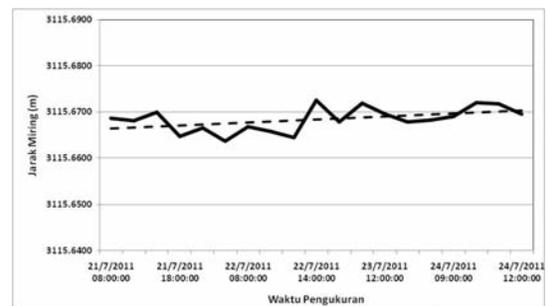
Gambar 18. Perubahan jarak miring Pos-Lava periode 16-20 Juli 2011.



Gambar 19. Perubahan jarak miring Pos-Lava periode 21-24 Juli 2011.



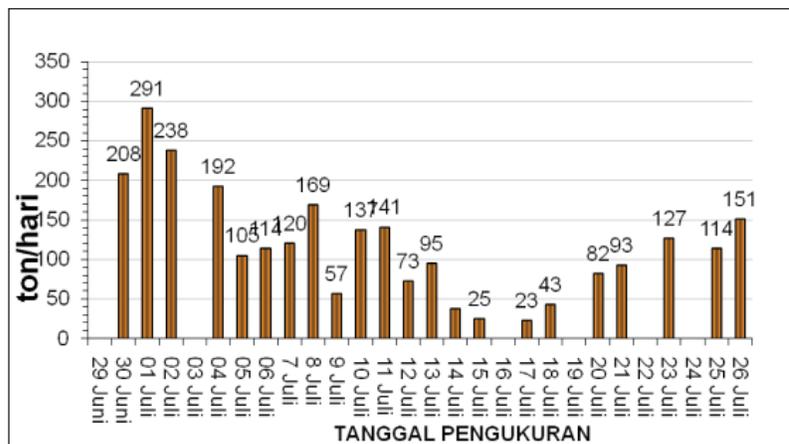
Gambar 20. Perubahan jarak miring Pos-Kebun periode 16-20 Juli 2011.



Gambar 21. Perubahan jarak miring Pos-Kebun periode 21-24 Juli 2011.



Gambar 22. Pengukuran fluks gas SO<sub>2</sub> Gunung Lokon dengan peralatan MiniDOAS.



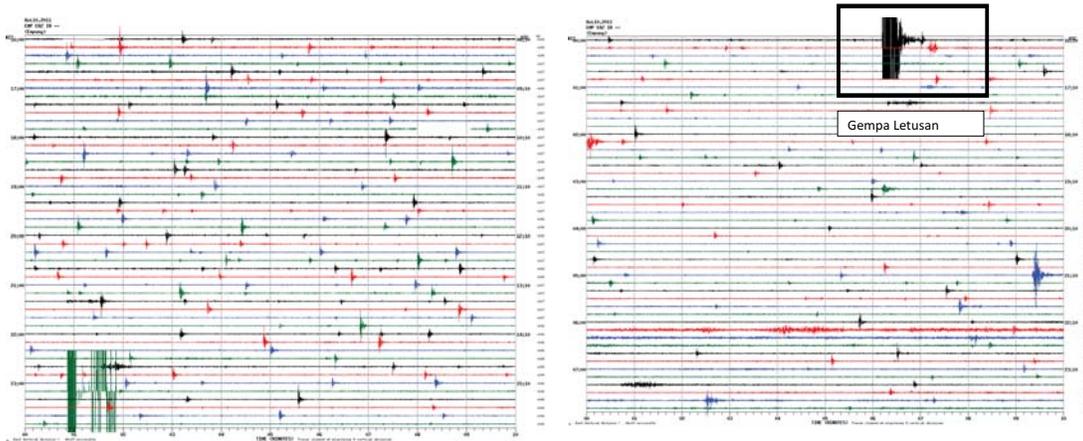
Gambar 23. Pengukuran SO<sub>2</sub> Gunung Lokon, Juni - Juli 2011.

jala awal letusan memiliki pola yang sama, yaitu terjadinya peningkatan gempa vulkanik dangkal dan hembusan 1-2 hari sebelum letusan (Gambar 24). Plot kedalaman gempa sebelum letusan masih menunjukkan kedalaman berkisar 0 - 4 km (Gambar 25).

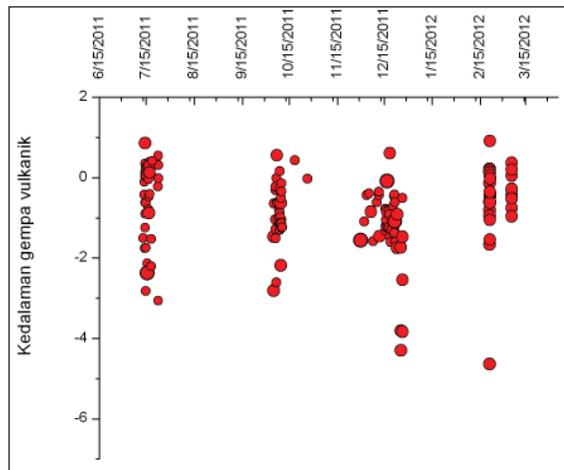
Erupsi pada tahun 2012 terjadi pada 6 Januari 2012, 10 Februari 2012, dan 21 Februari 2012. Letusan 6 Januari dan 21 Februari 2012 secara visual tidak dapat teramati karena tertutup kabut namun suara gemuruh terdengar hingga Pos PGA Gunung Lokon yang berjarak sekitar 5 km dari kawah. Letusan 10 Februari 2012 tampak kolom letusan dengan

ketinggian sekitar 2.000 m, dan mengarah ke tenggara.

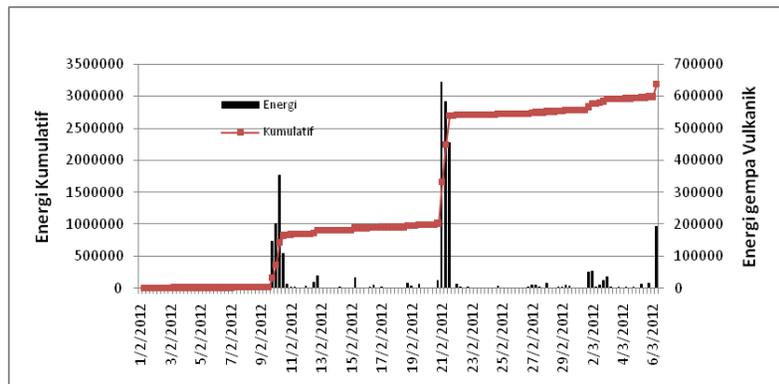
Hasil pengamatan kegempaan menunjukkan bahwa kegempaan pada umumnya didominasi oleh getaran tremor menerus dengan amplituda dominan sekitar 2 - 4 mm. Namun pada saat menjelang letusan terjadi peningkatan yang signifikan pada gempa vulkanik dangkal. Dari hasil perhitungan energi gempa vulkanik juga terlihat peningkatan yang tajam pada saat menjelang letusan tanggal 10 Februari dan tanggal 21 Februari 2012 (Gambar 26).



Gambar 24. Helicoder menjelang letusan Tanggal 11 Oktober 2011 Pukul 00.06 WITA.



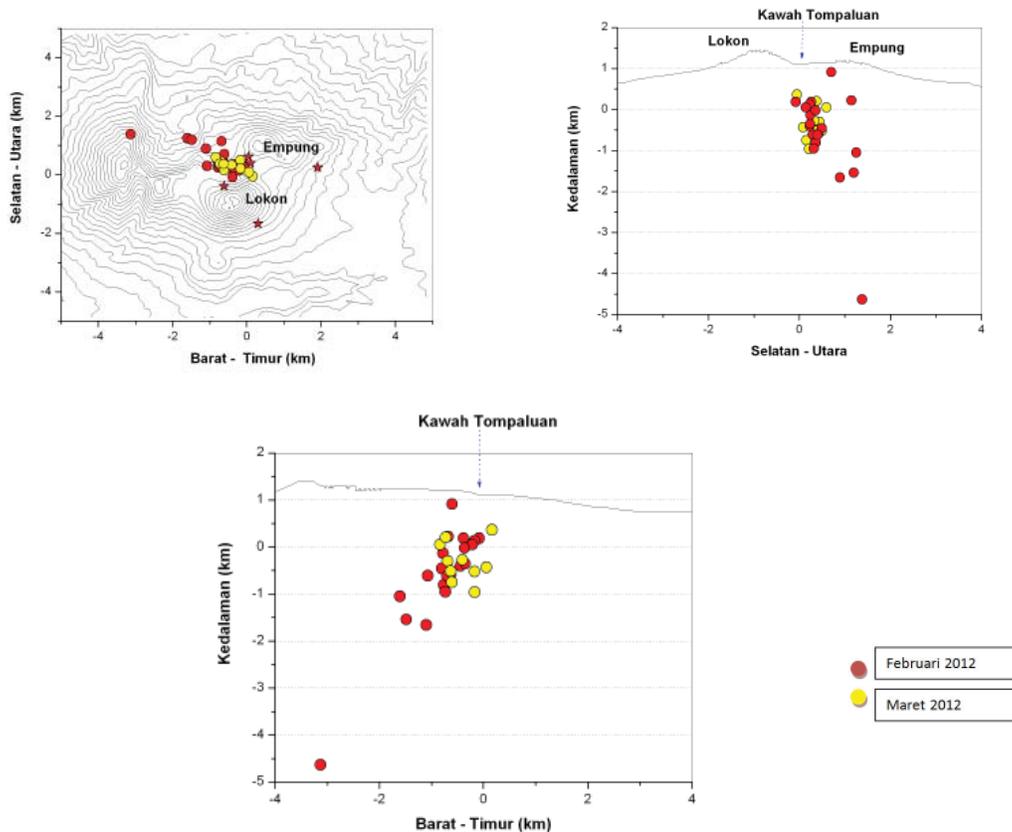
Gambar 25. Hiposenter gempa vulkanik menjelang letusan Gunung Lokon 2011 - Maret 2012



Gambar 26. Grafik energi vulkanik harian Gunung Lokon Februari - Maret 2012.

Dari hasil penentuan hiposenter ini diperoleh kedalaman gempa vulkanik umumnya berkisar 0,5 - 2 km di bawah kawah Tompaluan. Episenter gempa umumnya masih berkumpul di sekitar kawah, namun beberapa gempa teramati berasal dari sesar yang berada di sebelah barat laut kawah (Gambar 27).

hembusan pada satu hari sebelumnya. Letusan 4 - 8 Juli umumnya disertai dengan getaran tremor dibandingkan gempa vulkanik. Letusan 9 Juli 2011 diawali dengan peningkatan gempa vulkanik dalam (VA), gempa vulkanik dangkal (VB) dan gempa hembusan. Pada periode ini gempa hembusan dan gempa vul-



Gambar 27. Plot hiposenter Gunung Lokon Februari - Maret 2012

## PEMBAHASAN

Perioda erupsi Gunung Lokon hingga saat ini telah berjalan hampir 1,5 tahun sejak terjadinya letusan freatik 22 Februari 2011. Gejala awal letusan ditandai oleh rentetan gempa vulkanik yang cenderung berupa gempa vulkanik dangkal berfrekuensi rendah dan gempa

kanik lebih mendominasi dibanding getaran tremor.

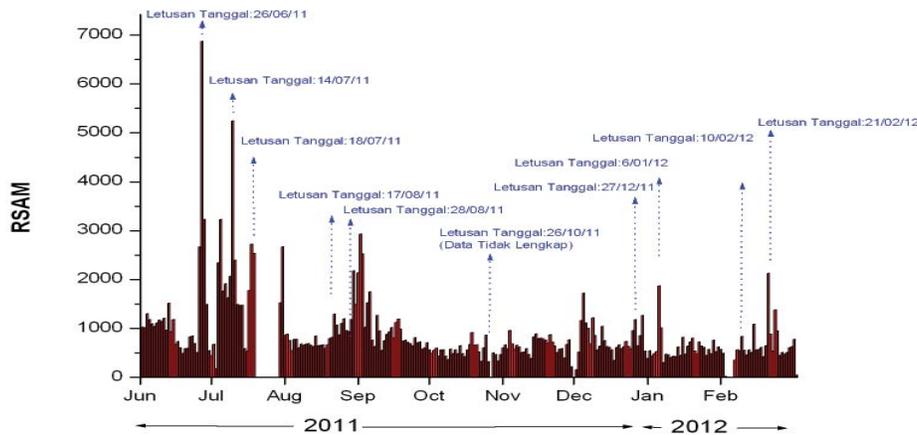
Secara umum sejak erupsi Juli 2011, kegempaan Gunung Lokon relatif menunjukkan pola yang sama, yaitu gempa tremor menerus dengan frekuensi 2,4 Hz menjadi *background* kegempaan setiap harinya, sedangkan *swarm*

gempa vulkanik dangkal dan gempa hembusan akan muncul 1 - 2 hari sebelum erupsi eksplosif terjadi. Hal ini terlihat dari meningkatnya RSAM menjelang letusan (Gambar 28). Namun *swarm* gempa vulkanik terkadang tidak selalu diakhiri dengan letusan.

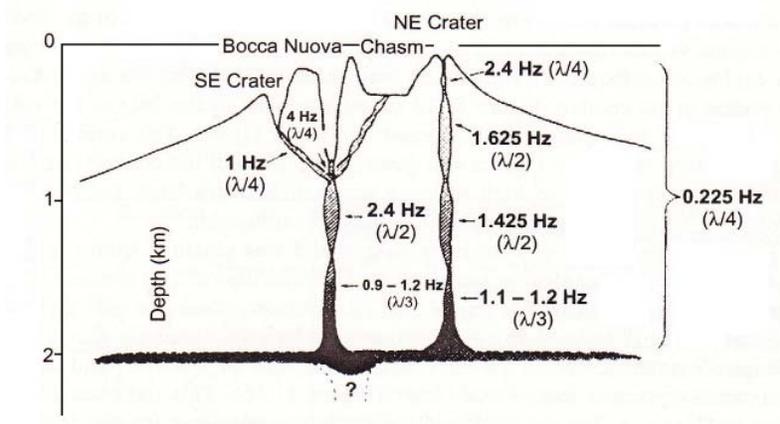
Berdasarkan model Vibrasi Konduit (Schick *et al.*, 1982) getaran tremor dengan frekuensi 2,4 Hz dihasilkan oleh getaran pipa konduit akibat adanya gerakan turbulen uap dan gas dalam magma (Gambar 29). Getaran turbulen

ini diperkirakan disebabkan oleh adanya beda tekanan pada konduit, sedangkan frekuensi getaran tremor menurut model ini ditentukan oleh geometri konduit.

Analisis lokasi sumber gempa sebelum letusan menunjukkan pula bahwa pada umumnya *swarm* gempa vulkanik terjadi pada kedalaman dangkal dominan sekitar 0 – 2 km di bawah kawah (Kristianto dan Iguchi, 1999; Kristianto dan Solihin, A., 2008; Kristianto, drr., 2011a, 2011b; Suparman *et al.*, 2009)



Gambar 28. RSAM Gunung Lokon Stasiun Empung per hari.



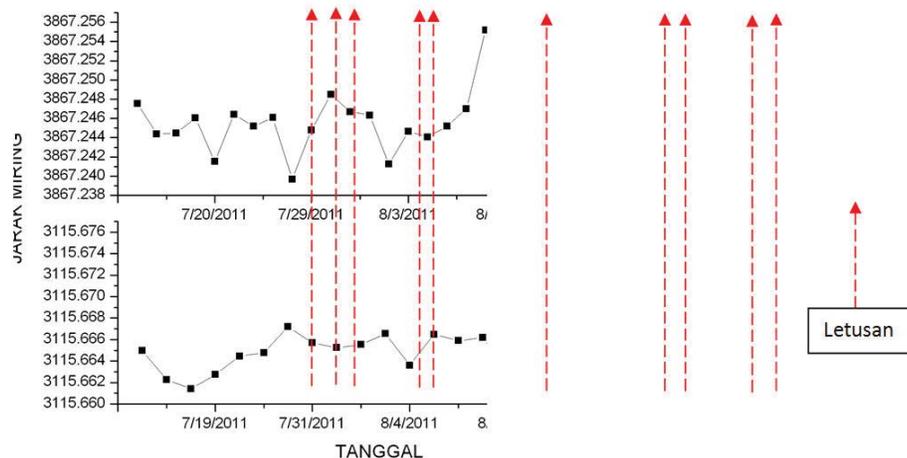
Gambar 29. Skema model dari konduit magma di Gunung Etna (Schick *et al.*, 1982).

dan menghasilkan letusan tipe vulkanian dengan tinggi kolom letusan berkisar antara 100 - 3.500 m di atas kawah. Tipe letusan vulkanian ini ditandai dengan adanya bom kerak roti yang ditemukan setelah letusan. Terjadinya *swarm* gempa vulkanik sebelum letusan disebabkan terjadinya *overpressure* akibat tekanan magma melebihi tekanan batuan di sekitarnya. Terjadinya *overpressure* ini didorong oleh proses *degassing* yang terjadi di dalam konduit (Diller *et al.*, 2006). 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 yang bersifat porositas rendah, dengan densitas yang lebih tinggi dibanding bagian lainnya, sehingga menciptakan penutup pada bagian atas konduit (*magma plug*). Dengan adanya proses *degassing* yang menerus dan mendorong adanya *magma plug*, maka akan terjadi *overpressure* yang ditandai dengan terjadinya *swarm* gempa vulkanik menjelang le-

tusan. Erupsi eksplosif terjadi karena adanya penurunan tekanan secara tiba-tiba.

Kondisi kelebihan tekanan dalam konduit ini didukung oleh hasil pengamatan deformasi dengan EDM dan GPS (Gambar 30). Walaupun pengukuran EDM di Gunung Lokon tidak dapat dilakukan secara kontinyu setiap hari pada satu titik reflektor karena kendala cuaca, tetapi berdasarkan hasil pengukuran Juli 2011 terlihat pola deflasi pada kedua titik reflektor. Hal ini menunjukkan terjadinya kecenderungan pengurangan tekanan secara keseluruhan, atau secara umum peningkatan tekanan terjadi maksimum pada bulan Juli 2011 dan setelah periode tersebut, aktivitas gunung Lokon berupa aktivitas pelepasan tekanan yang dimanifestasikan dalam bentuk erupsi eksplosif.

Hasil pengukuran GPS menunjukkan fluktuasi panjang *baseline*, tetapi menunjukkan pemendekan beberapa saat menjelang kejadian letusan. *Baseline* KKVO-WALN menjelang erupsi 26 Juni 2011 mengalami pemendekan



Gambar 30. Perubahan jarak miring Pos-Kebun dan Pos-Lava periode Juni 2011 - Maret 2012.

0,0004 m dua hari sebelum letusan tersebut (24 Juni 2011). Selama erupsi 4 - 11 Juli mengalami pemendekan 0,0003 - 0,0067 m, dan pada erupsi 14 - 15 Juli memendek 0,0017 m pada 13 Juli 2011.

*Baseline* KKVO-KINL menunjukkan pemendekan sebesar 0,0017 m pada tanggal 24 Juni 2011 (menjelang erupsi freatik 26 Juni 2011). Selama erupsi 4 - 11 Juli memendek 0,0039 - 0,0058 m, dan menjelang erupsi 14 - 15 Juli 2011 memendek 0,0098 m pada 11 Juli 2011.

Nilai perubahan yang relatif kecil (submilimeter) antara *baseline* KKVO-KINL dan KKVO-WALN diinterpretasikan sebagai akibat dari aktivitas vulkanik berada pada kedalaman yang relatif dangkal (permukaan). Aktivitas permukaan ini kurang dapat dideteksi dengan baik oleh kedua titik GPS KINL dan WALN yang berada di bagian lereng. Hasil pengukuran lokasi pusat tekanan dengan metoda GPS pada Maret 2010 (Haerani, dr., 2010) menunjukkan lokasi zona tekanan berada pada kedalaman 1,8 m di bawah Kawah Tompaluan.

Selain itu, tekanan yang bekerja pada aktivitas vulkanik periode Juni - Juli 2011 tidak terlalu besar, sehingga tidak berpengaruh signifikan terhadap deformasi tubuh Gunung Lokon. Tekanan yang bekerja hanya merupakan akumulasi tekanan yang terjadi pada kedalaman dangkal (0,3 - 4 km menurut hiposenter gempa pada periode yang sama). Tidak ada tekanan yang berasal dari proses kenaikan magma dari kedalaman yang lebih dalam. Hasil perhitungan perubahan tekanan pada Maret 2010 menunjukkan angka 92 bar (lebih kurang setara dengan 9,2 MPa), hasil

empiris dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa nilai tersebut berada pada kisaran angka untuk kelompok tekanan dangkal (< 10 MPa).

## KESIMPULAN

Hasil pemantauan selama masa peningkatan kegiatan vulkanik Gunung Lokon 2011 - 2012, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Gejala awal letusan Gunung Lokon 2011 - 2012 dari sisi kegempaan berupa peningkatan jumlah gempa vulkanik dangkal dan gempa hembusan, serta peningkatan amplituda gempa tremor 1 - 2 hari sebelum letusan.
2. Hasil pengukuran dengan GPS dan EDM menunjukkan *trend* perubahan jarak *baseline* menjelang letusan, namun nilainya kurang signifikan.
3. Aktivitas letusan Gunung Lokon umumnya disebabkan oleh proses *degassing* yang diikuti proses pembentukan *magma plug* yang menyebabkan kelebihan tekanan dalam konduit, ditandai dengan peningkatan gempa vulkanik dangkal. Penurunan tekanan secara tiba-tiba akibat rekahan pada *magma plug* menyebabkan terjadinya erupsi eksplosif.

## Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada para pengamat Gunung Api Lokon – Mahawu yang telah membantu selama penanganan peningkatan aktivitas vulkanik Gunung Lokon, penyediaan data serta diskusinya sangat membantu dalam penulisan makalah ini.

**ACUAN**

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.

Haerani, N., Gunawan, H., Kristianto, Kushendratno, dan Wittiri, S.R., 2010, Studi terpadu seismik dan deformasi di Gunung Lokon, Sulawesi Utara : *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Vol.1, No.3, h. 131-211.

Kristianto dan Solihin, A., 2008, Peningkatan Gempa Vulkanik Gunungapi Lokon, Desember 2007, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.

Kristianto dan Iguchi, M., 1999, Hypocenter and Focal Mechanism of Volcanic Earthquake at Lokon Volcanoes, JICA Report

Kristianto, Haerani, N., Basuki, A., Mulyana, I., dan Manthovanie, A., 2011a, Laporan Tanggap

Darurat Letusan G. Lokon Sulawesi Utara, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.

Kristianto, Gunawan, H., Solihin, A., Basuki, A., dan Suparman, Y., 2011b, Seismisitas Gunungapi Lokon, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.

Kusumadinata, K, 1979, Data Dasar Gunungapi Indonesia, Direktorat Vulkanologi

Schick, R., Cosentino, M., Lombardo, G., dan Patane, G., 1982, Volcanic tremor at Mount Etna. A brief description : *Mem Soc Geol. It.* 23, h.191 – 196.

Suparman, Y., Iguchi, M., Hendrasto, M., dan Kristianto, 2009, Comparison of Focal Mechanisms and Source Parameters of Volcano-Tectonic Earthquakes between Active and Normal Periods at Lokon Volcano, North Sulawesi, Indonesia. JICA Report

Wittiri S.R., 1991, Letusan G. Lokon 1991. Direktorat Vulkanologi.