

Gempa mikro sebagai indikasi amblesnya Kawah Tompaluan, Gunung Lokon, Sulawesi Utara

SR. Wittiri¹ dan Nia Haerani²

¹Sekretariat Badan Geologi
Jln. Diponegoro 57 Bandung 40122

²Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi
Jln. Diponegoro 57 Bandung 40122

SARI

Sumbat lava yang terbentuk di lantai kawah suatu gunung api selain menutup lobang diatrema kawah, juga berfungsi sebagai penopang lantai dan dinding kawah agar tetap stabil. Apabila penopang tersebut hilang, karena letusan atau akibat lainnya, maka seluruh beban yang ditopangnya menjadi tidak stabil. Sumbat lava yang terbentuk di lantai Kawah Tompaluan pada Oktober 1991 hancur karena letusan, kemudian terjadi ketidakstabilan struktur batuan yang mengakibatkan lantai dan dinding kawah bergerak turun. Peristiwa tersebut diindikasikan dengan terekamnya gempa mikro (*micro seismic*). Semula para Pengamat Gunung api yang memonitor kegiatan Gunung Lokon menduga bahwa gempa tersebut adalah akibat adanya suplai magma yang menyebabkan perekahan baru di bawah permukaan kawah pada kedalaman yang dangkal yang diidentifikasi sebagai gempa vulkanik-dangkal (Tipe B). Berdasarkan penelitian, diketahui bahwa gempa tersebut bukan gempa vulkanik, tetapi gempa permukaan sebagai akibat amblesnya lantai dan dinding Kawah Tompaluan karena kehilangan keseimbangan.

Kata kunci: Sumbat lava, gempa mikro, gempa vulkanik-dangkal (Tipe B)

ABSTRACT

Lava plug that formed on volcano crater's floor has a function to block off crater vent and to support crater's wall and floor stability. The disappearance of lava plug caused by an eruption or other processes can caused loading instability. Lava plug that formed in Tompaluan crater floor in October 1991 destructed by an eruption and caused instability of the rock structure. This instability lead to crater wall and floor subsidence. This phenomenon was recorded as shallow micro seismic. Formerly, the volcano observer assumed that this transcription was shallow volcanic (B-type) quake, due to magma supply that caused a new fracturing below the crater at shallow depth. Based on research, it is known that it was not a volcanic earthquake, but it is a superficial earthquake as the result of the movement of the crater's wall and floor of Tompaluan due to instability loss.

Keywords: *Lava plug, micro seismic, shallow volcanic (B-type) earthquake*

PENDAHULUAN

Semula tulisan dengan latar belakang peristiwa amblesnya lantai Kawah Tompaluan, Gunung Lokon pernah penulis publikasikan di *Bulletin Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi* (tidak terakreditasi) dengan judul Kawah Tompaluan dalam proses ambles dalam bentuk tulisan populer. Pada perkembangan selanjutnya, diperoleh beberapa data tambahan sehingga penulis berinisiatif menulis kembali kegiatan di Gunung Lokon tersebut dalam bentuk tulisan ilmiah.

Latar Belakang

Gunung Lokon berdiri di tepian Kota Tomohon, Sulawesi Utara pada posisi geografis $1^{\circ} 21,5'$ Lintang Utara dan $124^{\circ} 47,5'$ Bujur Timur (Gambar 1). Kawahnya berada di pelana (*saddle*) antara dua puncak, yaitu Puncak Lokon (1579,5 m dpl) dan Puncak Empung (1340 m dpl) yang dikenal dengan Kawah Tompaluan. Oleh karena itu adakalanya gunung api ini sering disebut Kompleks Lokon – Empung (Kusumadinata, 1979) (Gambar 2).

Gunung Lokon merupakan salah satu gunung api di Sulawesi Utara yang sering meletus. Salah satu letusannya yang tergolong besar berlangsung pada Oktober 1991. Letusan tersebut disertai awan panas dan berakhir dengan terbentuknya sumbat lava di lantai kawah yang dikenal dengan “Sumbat Lava 1991”.

Sebagaimana lazimnya gunung api yang sudah mengalami letusan besar, apalagi ber-

akhir dengan terbentuknya sumbat lava, akan mengalami masa istirahat (*dormant*) yang relatif panjang. Kegiatan vulkanik Lokon berada dalam fase normal selama sembilan tahun.

Dalam kurun waktu antara tahun 2000 dan 2003 letusan berlangsung secara beruntun hampir setiap tahun dan secara bertahap Sumbat Lava 91 terkikis. Letusan Februari 2003 adalah letusan terakhir dari seluruh rangkaian peletusan yang berlangsung antara tahun 2000 dan 2003 dan berhasil membongkar seluruh sumbat lava yang tersisa sehingga membentuk lobang baru di dasar Kawah Tompaluan.

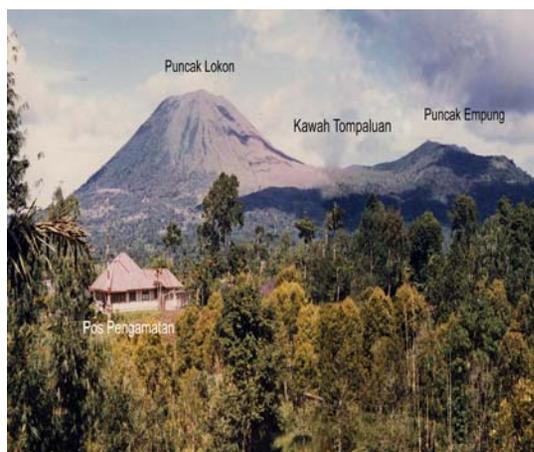
Sangat rasional apabila hilangnya sumbat yang selama itu keberadaannya berfungsi sebagai penopang lantai kawah berdampak turunnya permukaan dasar kawah. Turunnya lantai lebih disebabkan karena terbebani desakan lereng/dinding dan lantai itu sendiri



Gambar 1. Peta indeks lokasi Gunung Lokon, Sulawesi Utara.

karena ada ruang yang kosong serta upaya stabilisasi struktur batuan pasca letusan. Hasil pengamatan secara visual, dalam tahun 2005 Kawah Tompaluan lebih dalam dibanding dengan kondisi tahun 2003, diperkirakan

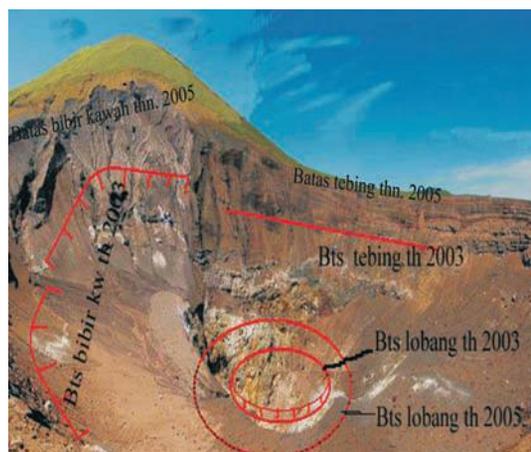
asap kawah berangsur menipis bertekanan sangat lemah. Bahkan hasil pengukuran deformasi dengan motoda EDM (*Electronic Distance Measurement*) di sekitar kawah menunjukkan tekanan cenderung berhenti dengan nilai deflasi (Dahlan, 2003).



Gambar 2. Kompleks Lokon - Empung dipotret dari Lengkeng Gunung Mahawu. Foto: I.N. Buana, 1985.

dasar kawah turun 5 - 10 m dari sebelumnya, menjadi lebih dalam 15 - 20 m dari bibir kawah terendah. Selain menjadi lebih dalam, bibir kawah melebar sehingga kawah menjadi lebih lebar (Gambar 3).

Purna Letusan Februari 2003 kegempaan tidak kunjung mereda, sedangkan secara visual keberadaan asap kawah berangsur menipis dan bertekanan sangat lemah. Kenyataan tersebut memberikan kontradiksi penafsiran. Pada satu sisi jumlah gempa konstan di atas normal, sedangkan secara visual keberadaan



Gambar 3. Situasi topografi sekitar Kawah Tompaluan, tahun 2005 yang memperlihatkan perubahan bibir kawah yang semakin meluas dibanding dengan kondisi tahun 2003. Foto: SR. Wittiri, 2005.

Metode Penelitian

Untuk menelusuri korelasi antara perubahan lebar bibir dan kedalaman kawah, serta dominasi gempa mikro dilakukan penelitian seismik menggunakan sistem tiga komponen (*tripartite system*). Metoda tersebut dilakukan untuk mengetahui waktu tiba (*first arrival time*) gelombang awal dari masing-masing gempa, selain itu untuk mengetahui kualitas gempa.

Sebagaimana diketahui bahwa waktu tiba awal (*t₀*) suatu gelombang gempa dari se-

tiap stasiun gempa, khususnya gempa mikro, selain itu seismometer menunjukkan arah datangnya sumber gempa tersebut (Kulhanek, 2002).

Rekaman gempa di daerah gunung api dapat disebabkan oleh migrasi magma, letusan gunung api atau yang lainnya. Dengan kata lain, tidak semua gempa yang terekam di daerah gunung api dapat dikategorikan berkaitan dengan kegiatan vulkanik, tetapi sangat mungkin akibat lain, misalnya banjir, longsor dan sebagainya.

Sistem tiga komponen akan memberikan informasi yang akurat mengenai waktu tiba gelombang awal dari setiap stasiun, dengan demikian akan diketahui arah datangnya gelombang atau area sumber gempa. Pada penelitian ini ketiga stasiun tersebut adalah Stasiun Empung (EMP), Camping (CAMP), dan Stasiun Tompaluan (TOMP). Posisi selengkapnya dimuat dalam Tabel 1 dan Gambar 4.

Sebelum penelitian, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi sudah menempatkan dua stasiun seismik yang dimaksudkan untuk memantau kegiatan gempa di Gunung Lokon. Seismometer yang digunakan adalah komponen vertikal, ditempatkan di lereng Empung (EMP) dan tidak jauh dari bibir

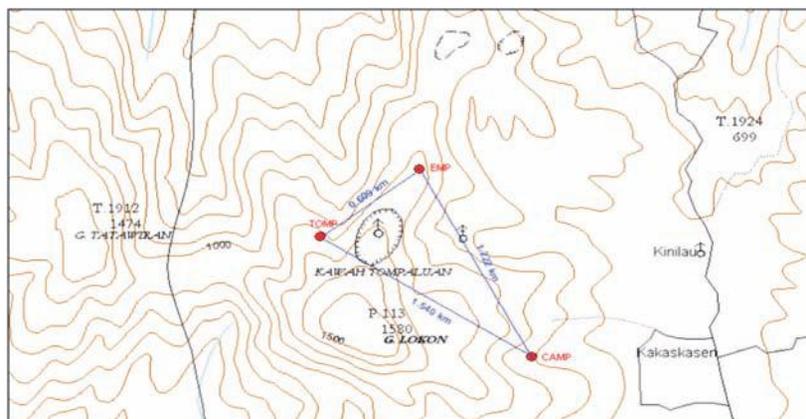
Kawah Tompaluan yang dikenal dengan Stasiun Tompaluan (TOMP). Sinyal gempa yang terekam dikirim secara telemetri mempergunakan radio pemancar dan direkam secara analog mempergunakan seismograf PS-2 di Pos Pengamatan Gunung Api (Pos PGA), Gunung Lokon dan Gunung Mahawu, Kakaskasen, Tomohon. Dengan demikian, penelitian ini hanya menambah 1 (satu) seismometer pada Camping (CAMP). Stasiun tambahan ini juga menggunakan radio pemancar untuk mengirim sinyal gempa ke Pos PGA Gunung Lokon dan Gunung Mahawu. Di Pos PGA ketiga sinyal yang masuk dikonversi menjadi sinyal numerik atau digital. Perekam digital menggunakan Datamark LS-700 dengan perangkat lunak SR900.

Berdasarkan hasil analisis seismogram diketahui, bahwa umumnya waktu tiba gelombang awal (*first arrival time*) gempa mikro diterima di stasiun TOMP disusul kemudian stasiun EMP dan terakhir CAMP.

Tetapi beberapa kejadian gempa berlaku sebaliknya, gelombang awal tiba di stasiun EMP disusul stasiun TOMP (Tabel 2). Kedua stasiun tersebut berada dekat dengan kawah. Ini menggambarkan bahwa ada lebih dari satu lokasi sumber gempa.

Tabel 1. Lokasi Stasiun Seismometer Tripartite Gunung Lokon, 2005

Stasiun	Lintang (Utara)	Bujur (Timur)	Ketinggian (m.dpl)
EMP	01°22'5.28"	124° 48'0.90"	1172
CAMP	01°21'37.9"	124° 48'29.6"	930
TOMP	01°21'56.4"	124° 47'43.3"	1130



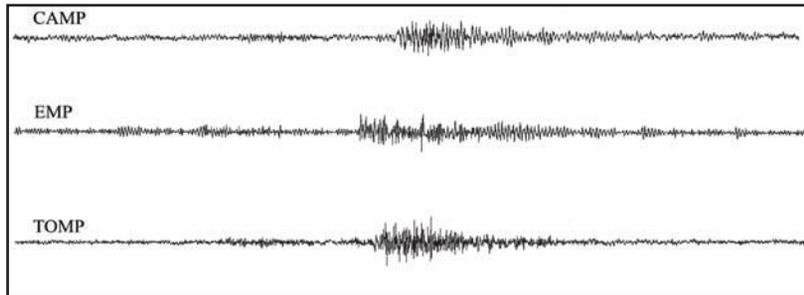
Gambar 4. Peta lokasi seismometer tiga komponen, Gunung Lokon, September 2005.

Tabel 2. Daftar Waktu Tiba (*to*) Gempa Mikro, Gunung Lokon, September 2005

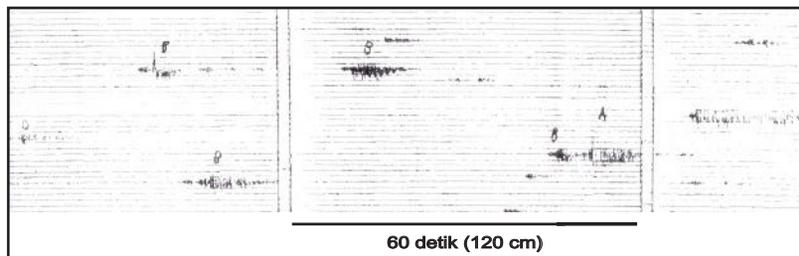
Waktu (Tgl/jam)	Waktu Tiba (<i>to</i>) di Stasiun		
	TOMP	CAMP	EMP
05.09/15.18	20.250	20.650	20.230
05.09/15.18	40.320	41.020	40.360
07.09/06.20	14.140	14.520	14.170
09.09/07.09	21.010	21.420	21.030
10.09/12.31	11.220	11.650	11.250
10.09.16.24	40.720	41.020	40.760
11.09/09.45	18.230	18.650	18.250
12.09/09.05	08.420	09.013	08.480
13.09/18.03	13.340	14.010	13.380
14.09/21.07	21.240	22.130	21.280
15.09/16.05	12.170	13.050	12.150
15.09/20.35	32.160	32.520	32.170
17.09/01.06	56.450	57.040	56.560
18.09/02.47	10.270	10.420	10.210
18.09/02.56	31.140	31.640	31.150

Dari kenampakan gelombang gempa (*seismic signature*) agaknya gempa mikro terjadi karena mekanisme yang sama, tetapi berbeda lokasinya. Pada umumnya gerakan awal gempa

seperti *noise* yang panjang dengan amplituda yang berubah membesar secara perlahan. Kondisi tersebut menyulitkan untuk menganalisa waktu tiba.



Gambar 5. Salah satu contoh seismogram gempa mikro yang terekam pada 15 September 2005, pukul 00.14. 49:15 wita, Gunung Lokon, direkam pada seismograf numerik (*digital*).



Gambar 6. Salah satu contoh seismogram gempa mikro yang terekam pada 15 September 2005, pukul 00.14 wita, Gunung Lokon, direkam pada seismograf analog PS-2, stasiun EMP.

Demikian banyak data yang terekam, tetapi hanya beberapa di antaranya yang dapat dianalisis dengan baik. Amplituda maksimum berlangsung beberapa gelombang dengan durasi yang relatif singkat. Hal tersebut dapat diartikan bahwa terjadi pergeseran (*movement*) secara perlahan dan tersendat-sendat. Ciri tersebut mirip dengan gempa guguran lava di Gunung Merapi dan gunung api lainnya, yang berbeda adalah durasi gempa guguran berlangsung lebih lama, tergantung volume lava yang gugur dan panjang lereng yang dilaluinya.

DISKUSI

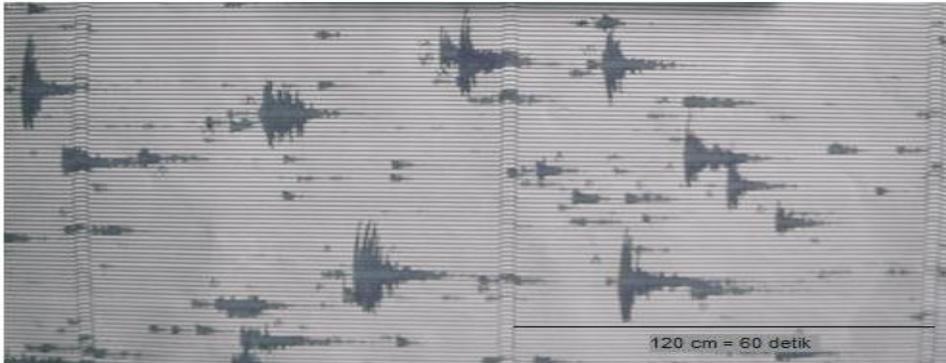
Pengamat gunung api yang bertugas memantau kegiatan Gunung Lokon mengategorikan gempa mikro yang dominan terekam selama kurun waktu antara 2003 dan 2005 tersebut adalah gempa vulkanik-dangkal (Tipe B). Alasan mereka karena gempa tersebut mempunyai amplituda yang relatif kecil dengan lama gempa (*duration*) yang pendek serta tidak ada gelombang sekunder (S). Alasan sederhana tersebut sepintas bisa diterima, tetapi apabila ditinjau dari aspek bentuk gelombang dan penyebab munculnya suatu gempa, alasan tersebut tidak sepenuhnya benar.

Hampir semua gempa mikro yang terekam tidak mempunyai gerakan awal yang terjadi tiba-tiba (*sudden*) tetapi didahului oleh gerakan awal yang memanjang dengan amplituda yang berubah perlahan, secara sepintas mirip dengan gempa guguran tetapi berlangsung sangat singkat. Hal tersebut dapat diartikan bahwa terjadi gerakan (*movement*) secara perlahan dan tersendat-sendat. Sangat khas dijumpai pada rekaman gempa vulkanik tipe B (Klasifikasi Minakami) gerakan awalnya tegas dan terjadi secara mendadak dengan amplituda berubah drastis (Gambar 7). Gambaran tersebut sesuai dengan mekanisme terjadinya retakan yang berlangsung secara tiba-tiba dengan pelepasan energi yang seketika. Kuat dugaan terjadinya gempa mikro bukan sebagai akibat peretakan yang dibangun dari tekanan fluida (magma dan atau gas), tetapi lebih disebabkan oleh karena Bergeraknya lereng atau dinding dan dasar kawah akibat gaya gravitasi karena mengalami kondisi yang tidak seimbang karena penopangnya hilang. Sebagaimana yang disampaikan oleh Khadianto,(2008), bahwa gerakan tanah adalah suatu konsekuensi dinamis alam untuk mencapai kondisi baru akibat gangguan keseimbangan lereng. Apabila keseimbangan sudah tercapai, maka gerakan akan berhenti.

Pada saat tebing atau dasar kawah bergerak terjadi gesekan antar lapisan kemudian diikuti oleh retakan pada lapisan batuan, hal tersebut dicatat oleh seismograf sebagai gempa.

Hasil pengukuran deformasi dengan metoda *Electronic Distance Measurement* (EDM) menunjukkan bahwa tidak ada inflasi (pembungkungan) yang terjadi di sekitar kawah, yang terjadi adalah sebaliknya, yaitu deflasi (penyusutan) di sekitar Kawah Tompaluan pasca Letusan Februari 2003, sehingga dugaan adanya suplai fluida yang menghasilkan tekanan kemudian mengakibatkan retakan yang memunculkan gempa vulkanik-dangkal akhirnya diabaikan. Minakami, (1960), membagi gempa vulkanik dalam dua tipe, masing-masing gempa vulkanik-dalam (Tipe A) dan vulkanik-dangkal (Tipe B). Tipe A mempunyai kedalaman antara 1 - 10 km di bawah kawah dan Tipe B < 1 - 1 km di bawah kawah. Pada umumnya apabila jumlah gempa Tipe B meningkat selalu didahului oleh meningkatnya gempa vulkanik Tipe A sebagai realisasi berlanjutnya perekahan dari dalam naik ke atas. Di luar kelaziman, dominasi gempa mikro tersebut tidak didahului oleh gempa vulkanik Tipe A.

Dari analisis seismogram diketahui, bahwa pada umumnya waktu tiba gelombang gempa lebih awal di stasiun TOMP kemudian EMP, meskipun beberapa kejadian EMP lebih dahulu menerima gelombang awal disusul TOMP. Tetapi yang pasti tidak ada waktu tiba lebih dahulu di stasiun CAMP. Stasiun ini jaraknya lebih jauh dari bibir kawah dibanding dengan kedua stasiun lainnya, TOMP dan EMP. Secara empiris hampir semua kejadian letusan gunung api didahului dengan meningkatnya gempa vulkanik-dalam diikuti dengan terekamnya gempa vulkanik-dangkal. Hal ini menggambarkan bahwa ada hal yang



Gambar 7. Contoh seismogram gempa vulkanik Tipe B yang terekam pada Februari 2003 di Gunung Lokon, direkam dengan seismograf analog PS-2.

tidak konsisten atau ada lebih dari satu sumber gempa dan berada dekat kawah. Dari kenampakan bentuk gempa (*seismic signature*) agaknya gempa-dangkal terjadi karena mekanisme yang relatif sama meskipun berbeda lokasi.

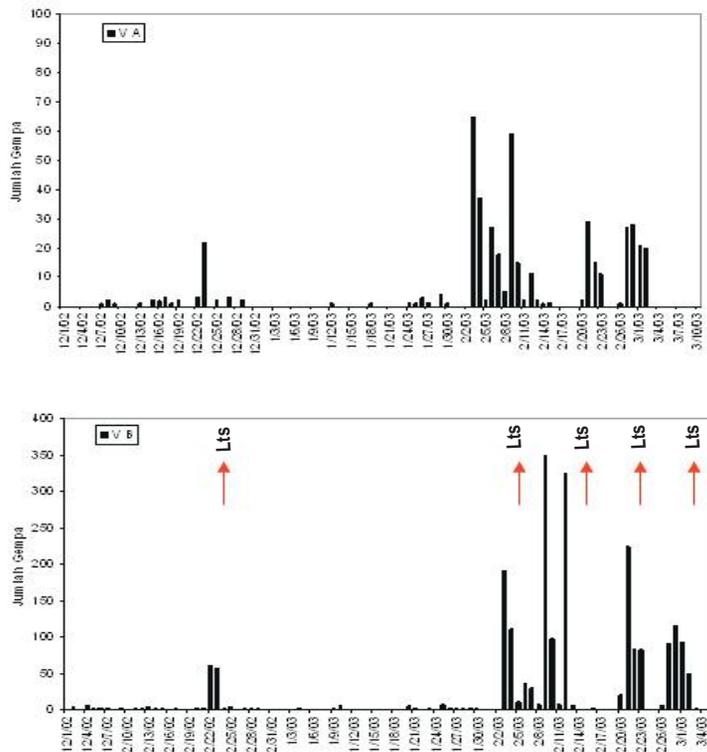
Secara empiris hampir semua kejadian letusan gunung api didahului oleh meningkatnya gempa vulkanik-dalam diikuti dengan terekamnya gempa vulkanik-dangkal. Fenomena tersebut menerangkan bahwa tekanan fluida magma berangkat dari suatu kedalaman (kantong magma bagian dalam) bergerak ke atas dan akhirnya menerobos batuan penutup dan mengakibatkan letusan (Gambar 8).

Dengan menganggap bahwa pengukuran curah hujan di Pos Pengamatan Gunung Api mewakili jumlah curah hujan di sekitar puncak, pada grafik korelasi antara jumlah gempa mikro dengan jumlah curah hujan (Gambar

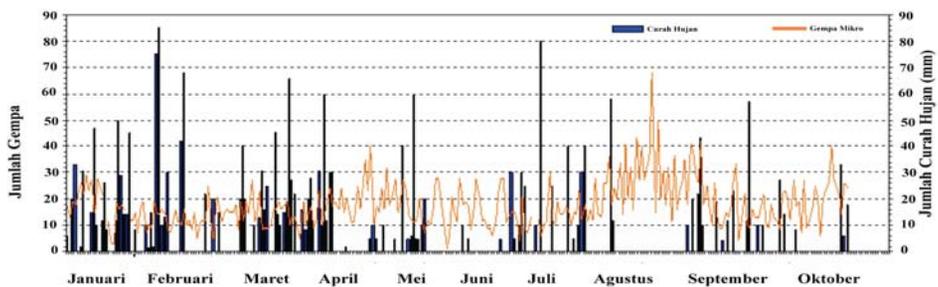
9) tergambar secara garis besar bahwa setiap kali jumlah curah hujan tinggi, selalu diikuti oleh meningkatnya jumlah gempa mikro. Fenomena tersebut menjadi salah satu alasan bahwa air hujan ikut memotori Bergeraknya lapisan batuan di sekitar kawah, hal ini sesuai dengan prinsip gerakan tanah.

KESIMPULAN

1. Dominasi gempa mikro yang terjadi pasca Letusan 2003, Gunung Lokon bukan disebabkan oleh tekanan fluida, tetapi karena adanya proses gerakan tanah (amblesan) pada dinding dan lantai Kawah Tompaluan karena stabilisasi struktur batuan.
2. Gempa mikro yang terekam pasca Letusan 2003 bukan gempa vulkanik-dangkal (Tipe B), tetapi termasuk jenis gempa permukaan (*surface wave*).



Gambar 8. Grafik jumlah gempa vulkanik Tipe A (atas) dan gempa vulkanik Tipe B (bawah) Gunung Lokon, Februari 2003 yang menggambarkan korelasi antara kedua jenis gempa tersebut menjelang setiap letusan.



Gambar 9. Grafik jumlah hujan dan jumlah gempa mikro yang terekam di Pos Pengamatan Gunung Api, Gunung Lokon dan Gunung Mahawu, tahun 2005.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ucapkan terima kasih kepada para Pengamat Gunung api di Pos Pengamatan Gunung Api Gunung Lokon dan Gunung Mahawu yang telah membantu selama penelitian berlangsung.

ACUAN

Khadiyanto, 2008, Gerakan Tanah (longsor), parfikh.blogspot.com/2008/12/gerakan-tanah-longSORan.html. Diakses tanggal 20 Desember 2009.

Kusumadinata, K., 1979, Data Dasar Gunung api Indonesia, h. 661-669, Direktorat Vulkanologi.

Kulhanek, O., 2002, The Structure and Interpretation of Seismograms, *Earthquake & Engineering Seismology*, h. 333-348.

Lay, T dan Wallace, T.C., 1995, *The Topics of Global Seismology, Modern Global Seismology*, h. 8-32.

Minakami, T. 1974, *Seismology of volcanoes in Japan*, dalam: "Developments in Solid Earth Geophysics" (L. Civette et. al., Eds), h. 1-27, *Physical Volcanology*, v. 6, Elsevier, Amsterdam.

Minakami, T., 1960, *Fundamental Research for Predicting Volcanic Eruption, Earthquake and Crustal Deformation from Volcanic Activities*. *Bulletin of The Earthquake, Earthquake Research Institute, Tokyo University*, 38, h. 498 -543.

Stephen R. McNutt, 2002, *Volcano Seismology and Monitoring for Eruption, Earthquake & Engineering Seismology*, h. 384-406.

Wittiri S.R., 2007, Kawah Tompaluan Dalam Proses Amblas, *Bulletin Vulkanologi dan Bencana Geologi*, v. 1, h. 1 - 4.