Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi, Vol. 1 No. 3 Desember 2010: 151 - 164

Studi terpadu seismik dan deformasi di Gunung Lokon, Sulawesi Utara

Nia Haerani[1], Hendra Gunawan[2], Kristianto[2], Kushendratno[2], dan S.R. Wittiri[2]

[1]Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi - Badan Geologi
Jln. Diponegoro No. 57 Bandung 40122

[2]Sekretariat Badan Geologi
Jln. Diponegoro No. 57 Bandung 40122

SARI

Pengukuran deformasi dengan metoda GPS serta penyelidikan kegempaan dilakukan untuk mengetahui tingkat kegiatan vulkanik di Gunung Lokon sehubungan dengan munculnya sinar api pada dinding Kawah Tompaluan yang terjadi sejak awal 2009. Hasil pengukuran GPS menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi tidak murni berasal dari aktivitas vulkanik, tetapi dipengaruhi juga oleh aktivitas tektonik di sekitarnya. Hasil pengukuran lokasi pusat tekanan menunjukkan kedalaman yang relatif dangkal (< 2 km). Kedalaman ini berasosiasi dengan zona aseismik yang diperoleh dengan metoda seismik.Kegempaan selama Januari-Maret 2010 didominasi oleh gempa hembusan. Dominasi gempa ini merupakan implikasi dari proses pelepasan gas akibat pemanasan batuan di dasar Kawah Tompaluan.

Kata kunci: Gunung Lokon, deformasi, GPS, pusat tekanan, proses pelepasan gas

ABSTRACT

Seismic and deformation methods using GPS was carried out to determine volcanic activity of Gunung Lokon due to glare appearance at the bottom of the Tompaluan Crater that has been occurring since early 2009. GPS measurement result showed that the deformation of Gunung Lokon is not only come from its volcanic activity but also influenced by tectonic force around the volcano. Location of pressure source has relatively shallow depth (< 2 km). This depth is associated with aseismic zone that determined by seismic method.Seismic activity during January-March 2010 was dominated by emission earthquake. This kind of earthquake possible as degassing implication due to rock heating at the bottom of Kawah Tompaluan.

Keywords*: Gunung Lokon, deformation, GPS, pressure source, degassing*

Naskah diterima 8 Nopember 2010, selesai direvisi 3 Desember 2010
Korespondensi, email: haerani@vsi.esdm.go.id

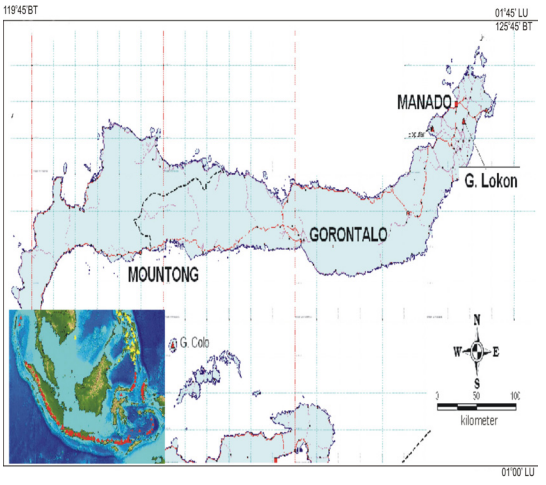
PENDAHULUAN

Latar Belakang

Gunung Lokon berlokasi di Tomohon, Sulawesi Utara (Gambar 1) dan merupakan salah satu gunung api yang sering meletus. Berdasarkan bentuk morfologinya, puncak Lokon berdampingan dengan puncak Empung dengan jarak antar keduanya 2,2 km sehingga merupakan gunung kembar, oleh karena itu sering disebut Kompleks Lokon – Empung (Gambar 2). Secara geografis puncak Lokon terletak pada 1°21,5' Lintang Utara dan 124°47' Bujur Timur dengan ketinggian 1579,5 m dpl., sedangkan Puncak Empung pada 1°22' Lintang Utara dan 124°47' Bujur Timur mencapai ketinggian 1340 m dpl.

Berdasarkan sejarah kegiatannya, letusan semula berpusat di puncak Empung yang berlangsung dalam tahun 1350 dan 1400, Sejak tahun 1829 titik kegiatannya pindah ke pelana antara dua puncak yang dikenal dengan Kawah Tompaluan (van Padang, 1951), dan menjadi kawah aktif hingga saat ini. Secara geografi Kawah Tompaluan berada pada posisi 1°21'52,68" LU dan 124°47'57,58" BT (Kusumadinata, 1979).

Letusan besar terakhir terjadi dalam bulan Oktober 1991, letusan tersebut disertai awan panas dan berakhir dengan terbentuknya sumbat lava yang diberi nama Sumbat Lava 1991 di dasar kawah. Dalam kurun waktu antara tahun 2000 sampai dengan 2003 letusan berlangsung secara beruntun hampir setiap tahun dan secara bertahap Sumbat Lava 1991 terkikis dan menghasilkan lubang baru di dasar kawah (Wittiri, 1991).



Gambar 1. Peta lokasi Gunung Lokon, Sulawesi Utara.

Gambar 2. Kompleks Gunung Lokon – Empung. Pelana antar kedua puncaknya adalah lokasi kawah aktif, Kawah Tompaluan (Foto: Farid Bina 2009).

Maksud dan Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kegiatan vulkanik Gunung Lokon sehubungan dengan meningkatnya volume asap kawah yang ditunjang dengan banyaknya jumlah gempa hembusan. Kondisi tersebut sudah berlangsung sejak tahun 2009.

Metoda Penelitian

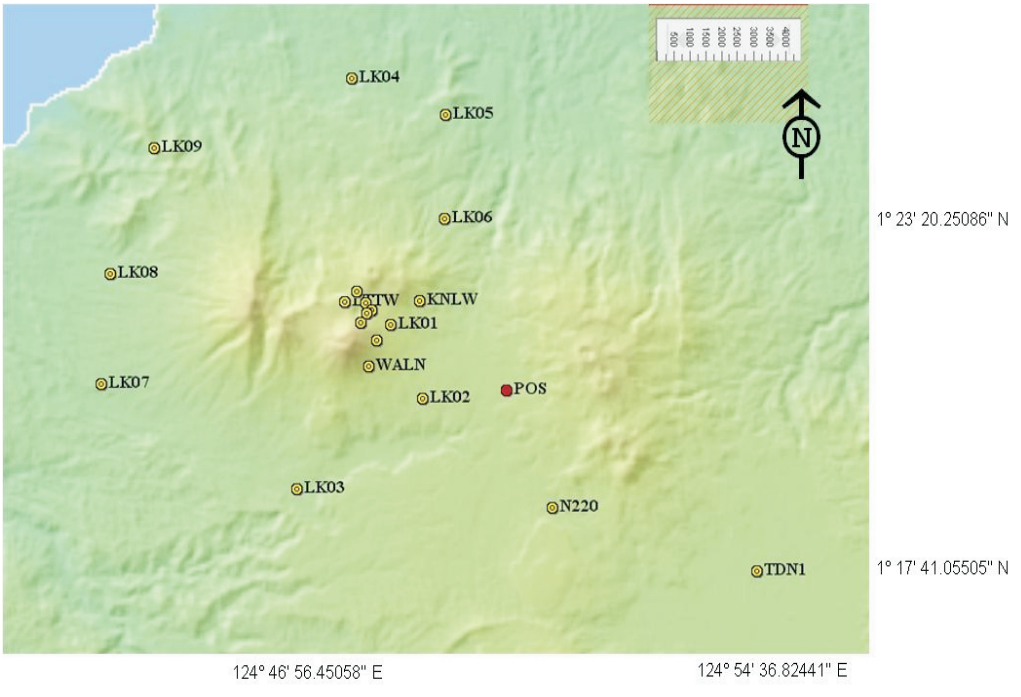
Metoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengukuran deformasi dengan Global Positioning System (GPS) menggunakan koordinat beberapa titik pengamatan kemudian membandingkan data pengukuran yang telah dilakukan sebelumnya sehingga diketahui perkembangan deformasinya. Melengkapi penelitian tersebut, dilakukan juga analisis data seismik dari multi stasiun yang memonitor kegempaan Gunung Lokon.

HASIL PENELITIAN

Pengukuran deformasi

Pengukuran deformasi dilakukan pada Maret 2010 dan merupakan pengukuran yang ketiga dari rangkaian penelitian deformasi yang dilakukan di Gunung Lokon sejak tahun 2009. Dua pengukuran sebelumnya dilakukan pada Juni 2009 dan Desember 2009 (Gunawan, 2009) dengan titik pengukuran yang sama.

Titik ukur deformasi berjumlah 24 titik dengan rincian; 1 titik merupakan stasiun referensi (POST) di depan Pos Pengamatan Gunung Lokon dan Mahawu (Pos PGA Lokon-Mahawu), Desa Kakaskasen, dan 23 titik bergerak (rover) diantaranya 8 titik di sekitar puncak Lokon dan Kawah Tompaluan, 6 titik di bagian lereng, dan 9 titik bagian kaki Gunung Lokon-Empung (Gambar3 dan Tabel 1).



Gambar 3. Sebaran titik ukur deformasi (GPS) Gunung Lokon, Maret 2010. Bulatan merah adalah titik referensi dan bulatan kuning adalah titik bergerak..

Tabel 1. Lokasi Titik Ukur GPS Gunung Lokon, Juni, Desember 2009, dan Maret 2010

No	Nama Titik	Lokasi	Koordinat Pendekatan
1	POST	Pos PGA Lokon-Mahawu, Desa Kakaskasen III	1°20’35,311” U, 124°50’25,55” T 891,0435 m ellipsoid
2	EDM1	Pos PGA Lokon-Mahawu, Desa Kakaskasen III	1°20’36,300” U, 124°50’25,83” T 893,3135 m ellipsoid
3	LCD1	Bibir Kawah Tompaluan	1°21’40,664” U, 124°48’10,95” T 1207,1755 m ellipsoid
4	LCAM	Tempat Camping Gunung Lokon	1°21’43,049” U, 124°48’19,90” T 1122,7739 m ellipsoid
5	LCA2	Bibir Kawah Tompaluan	1°21’52,029” U, 124°48’10,61” T 1180,6525 m ellipsoid
6	LCA3	Bibir Kawah Tompaluan	1°21’40,224” U, 124°48’00,37” T 1314,0294 m ellipsoid
7	LKWH	Bibir Kawah Tompaluan	1°21’48,885” U, 124°48’06,12” T 1195,7168 m ellipsoid
8	EMPG	G. Empung	1°21’58,880” U, 124°48’05,34” T 1224,1733 m ellipsoid
9	LTTW	G. Tatawiran	1°22’00,154” U, 124°47’43,73” T 1243,2475 m ellipsoid
10	LSEA	Stasiun Seismik SEA	1°22’10,289” U, 124°47’55,98” T 1239,7920 m ellipsoid
11	LKO1	Jengkol, seberang penambangan batu	1°21’22.535” U, 124°48’56,18” T 939,8357 m ellipsoid
12	LKO2	Wailan, Kebun Opa	1°20’26,779” U, 124°49’01,77” T 872,0478 m ellipsoid
13	LKO3	Tara-tara, halaman SMAN 2 Tomohon	1°19’00,430” U, 124°46’56,43” T 645,3703 m ellipsoid
14	LKO4	Lapangan sepak bola Kampung Sea	1°25’35,571” U, 124°47’51,01” T 281,7162 m ellipsoid
15	LKO5	Warembungan, halaman SMPN 1 Pineleng	1°24’59,948” U, 124°49’24,92” T 408,5276 m ellipsoid
16	LKO6	Tinoor, lapangan sepak bola (tribun)	1°23’20,355” U, 124°49’23,93” T 658,8615 m ellipsoid
17	LKO7	Lolah, halaman SMPN 2 Tombariri	1°20’41,305” U, 124°43’40,43” T 408,5038 m ellipsoid
18	LKO8	Lemoh, pinggir jalan (hutan)	1°22’27,038” U, 124°43’48,68” T 396,8202 m ellipsoid
19	LKO9	Agotey, tikungan jalan 345°	1°24’28,460” U, 124°44’32,86” T 577,8995 m ellipsoid
20	KNLW	Stasiun Seismik Kinilow	1°22’00,617” U, 124°48’59,44” T 1002,0878 m ellipsoid
21	TDN1	Perempatan Jalan Pasar Ikan, sebelah patok BPN	1°17’41,024” U, 124°54’36,77” T 755,1634 m ellipsoid
22	LLRG	Sungai Pasahapen	1°21’22,557” U, 124°48’56,19” T 938,2248 m ellipsoid
23	N220	Kaaten, halaman kantor Dinas Perhutanan dan Perkebunan	1°18’42,180” U, 124°51’11,87” T 852,3560 m ellipsoid
24	WALN	Stasiun seismik Wailan	1°20’58,513” U124°48’07,64” T 1135,8572 m ellipsoid

Pengukuran deformasi menggunakan receiver GPS Geodetik Leica System 1200 GNSS dengan tipe antena AX1202G. Setiap titik ukur rata-rata diukur selama 24 jam. Data GPS kemudian diolah dengan software Leica Geo Office (LGO) versi 2,

Koordinat titik-titik yang diperoleh dari hasil pengolahan LGO kemudian ditransformasikan menjadi sistem koordinat UTM, dalam hal ini Gunung Lokon termasuk ke dalam Zona UTM 51 Utara. Koordinat yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran Desember 2009 untuk mengetahui nilai pergeseran komponen utara, timur serta arah vektor. Perubahan posisi yang dihasilkan dari proses perbandingan tersebut dinyatakan dalam vektor pergeseran, diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, dan hasil perhitungan nilai pergeseran ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Deformasi Gunung Lokon, Maret 2010, Dalam Sistem Koordinat UTM Zona 51 Utara

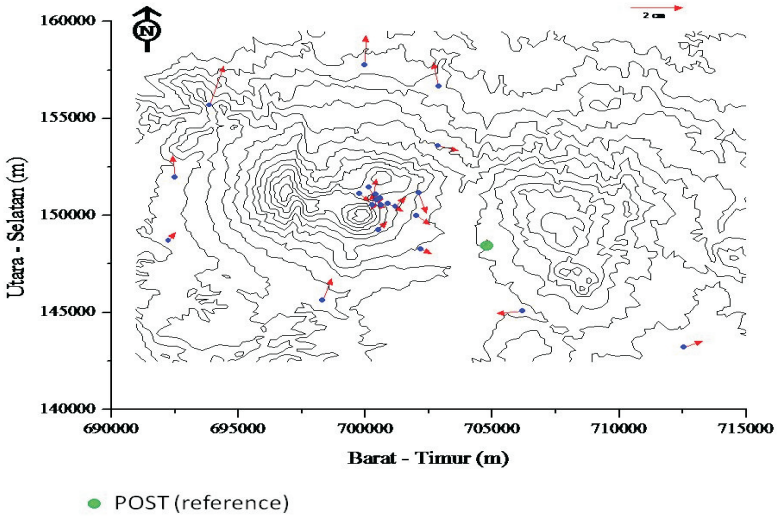
Titik	X (m)	Y (m)	Tinggi Ellipsoid (m)	sdX (m)	sdY (m)	sdT (m)
BM01	704773,4418	148534,9409	891,0435	0,0000	0,0000	0,0000
EDMI	704782,1068	148563,7831	892,5330	0,0001	0,0001	0,0002
LCDI	700611,3895	150536,3033	1206,0879	0,0001	0,0001	0,0003
LCAM	700890,1214	150611,8117	1130,6213	0,0010	0,0011	0,0195
LCA2	700600,6956	150887,7639	1180,5319	0,0001	0,0001	0,0002
LCA3	700284,1203	150520,8748	1307,7536	0,0001	0,0001	0,0002
LKWH	700462,5664	150790,9848	1196,2903	0,0001	0,0001	0,0002
EMPG	700437,0954	151095,5262	1219,6198	0,0001	0,0001	0,0003
LTTW	699768,4538	151133,3425	1240,5021	0,0001	0,0001	0,0003
LSEA	700146,3525	151444,9927	1231,8911	0,0001	0,0001	0,0003
LK01	701184,4762	150452,9355	1084,5010	0,0005	0,0011	0,0021
LKO2	702184,6182	148270,6849	865,8501	0,0001	0,0001	0,0003
LK03	698310,7882	145612,9072	647,5969	0,0001	0,0001	0,0003
LK04	699987,6701	157751,3192	283,3488	0,0002	0,0001	0,0004
LKO5	702891,3399	156659,1914	403,0334	0,0001	0,0001	0,0003
LK06	702863,2992	153600,2153	654,8877	0,0002	0,0001	0,0004
LK07	692247,9876	148706,3770	411,3585	0,0002	0,0002	0,0004
LK08	692501,8561	151953,9813	396,3754	0,0002	0,0002	0,0007
LK09	693864,3842	155684,5346	576,1931	0,0002	0,0002	0,0005
KNLW	702109,1035	151151,7983	1000,7368	0,0001	0,0001	0,0003
TDN1	712546,3674	143187,7263	757,3381	0,0002	0,0001	0,0004
LLRG	702009,5535	149984,1917	938,4667	0,0001	0,0001	0,0003
N220	706209,5183	145059,7393	847,6421	0,0002	0,0001	0,0004
WALN	700509,3917	149243,3425	1132,6681	0,0001	0,0001	0,0003

Pola arah pergeseran vektor untuk titik-titik *distal* menunjukkan pola searah, relatif utara-selatan, sedangkan titik-titik ukur di sekitar pelana/kawah menunjukkan kecenderungan penyusutan ke arah Kawah Tompaluan, dan pada bagian lereng tenggara menunjukkan pola pergerakan ke arah luar. Pergerakan dengan pola searah di bagian *distal* dan lereng ditafsirkan sebagai akibat gaya tektonik (struktur geologi) dan berpengaruh terhadap aktifitas vulkanik, sedangkan pergeseran di sekitar kawah ditafsirkan sebagai akibat aktifitas vulkanik.

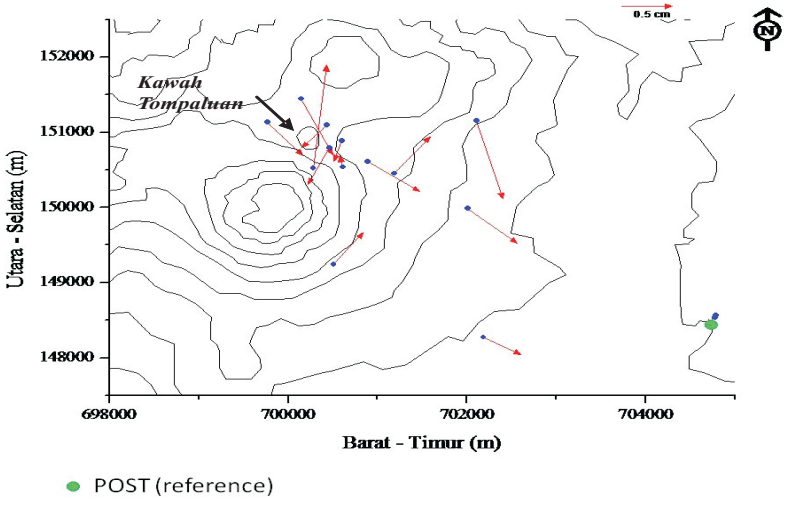
Pola arah pergeseran Maret 2010-Desember 2009 ini relatif sama dengan hasil pengukuran periode Desember 2009-Juni 2009, kecuali pada bagian lereng tenggara, arahnya bertolak belakang (180°). Panjang vektor pergeseran bervariasi. Di bagian *distal* mempunyai panjang vektor 0,48 2,11 cm, titik-titik di bagian lereng panjangnya antara 0,53 - 1,08 cm, dan pergeseran vektor di sekitar kawah memiliki panjang vektor antara 0,41-1,38 cm.

Tabel 3. Perubahan Koordinat Hasil Pengukuran Deformasi Maret 2010 Dibandingkan dengan Desember 2009, Gunung Lokon

Nama Titik	dx (cm)	dy (cm)	dz (cm)	Panjang Vektor (cm)	Arah Vektor (°)
POST	0	0	0	0	0
EDM1	-0,10	-0,13	53,51	0,16	217,57
LCD 1	-0,03	0,15	23,17	0,15	348,69
LCAM	0,58	-0,40	19,39	0,70	124,59
LCA1	-0,09	-0,27	16,38	0,28	198,43
LCA2	0,15	1,37	24,68	1,38	6,25
LKWH	-0,24	-0,48	22,87	0,54	206,57
EMPG	-0,28	-0,30	15,72	0,41	223,03
LTTW	0,39	-0,44	23,06	0,59	138,45
LSEA	0,35	-0,75	23,03	0,83	154,98
LK01	0,40	0,49	24,36	0,63	39,23
LK02	0,42	-0,23	24,14	0,48	118,71
LK03	0,37	1,13	23,26	1,19	18,13
LK04	0,02	1,52	18,41	1,52	0,75
LK05	-0,21	1,23	25,88	1,25	350,31
LK06	0,79	-0,27	121,79	0,83	108,87
LK07	0,25	0,41	14,13	0,48	31,37
LK08	-0,10	1,13	23,14	1,13	354,94
LK09	0,57	2,03	24,19	2,11	15,68
KNLW	0,29	-1,04	15,82	1,08	164,42
TDN1	0,73	0,34	19,57	0,81	65,03
LLRG	0,55	-0,46	24,19	0,72	129,91
N220	-1,03	-0,12	26,77	1,04	263,35
WALN	0,33	0,42	23,91	0,53	38,16



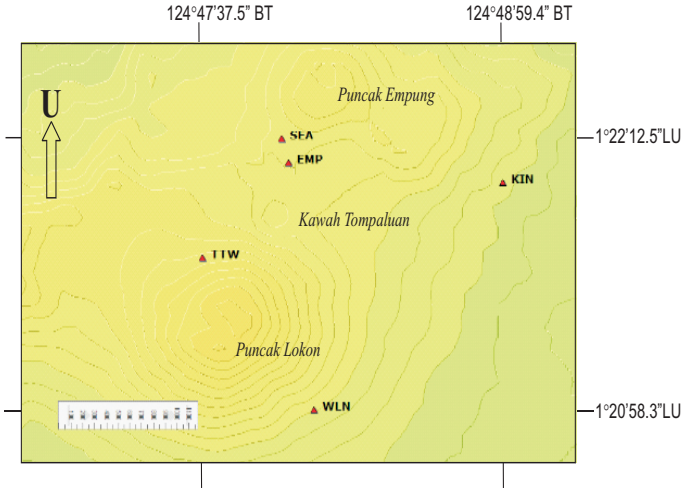
Gambar 4. Pola arah vektor pergeseran, hasil pengukuran Maret 2010 dibandingkan terhadap Desember 2009, Gunung Lokon dan sekitarnya.



Gambar 5. Pola arah vektor pergeseran, pengukuran Maret 2010 dibandingkan terhadap Desember 2009 untuk titik-titik ukur di sekitar Kawah Tompaluan.

Pengamatan Seismik

Jumlah gempa harian Gunung Lokon selama kurun waktu Januari-Maret 2010 didominasi oleh gempa hembusan (Gambar 7). Beberapa kejadian gempa vulkanik yang terekam tidak dapat diidentifikasi dengan baik karena amplituda dari back ground noise sangat besar, sehingga menyulitkan dalam menentukan gerakan awal (t_0).



Gambar 6. Peta lokasi seismometer yang memonitor kegempaan di Gunung Lokon.

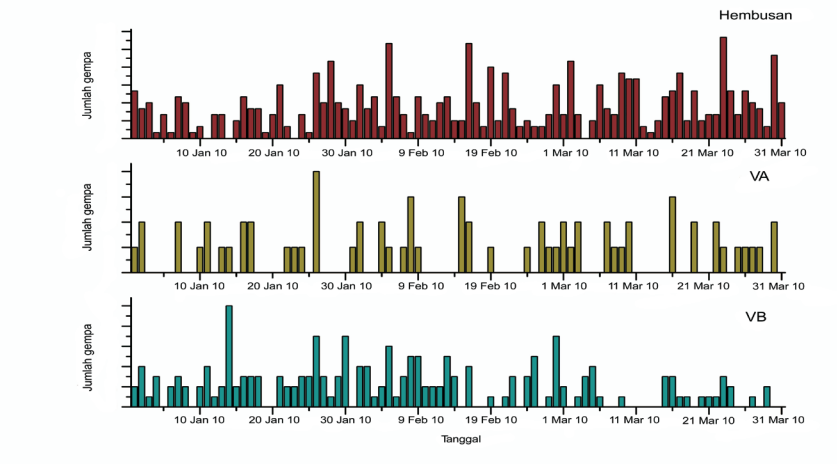
Tabel 4. Posisi Geografi Setiap Lokasi Seismometer yang Memonitor Kegempaan di Gunung Lokon

No	Nama Stasiun	Koordinat		Ketinggian (m)
		Lintang Utara	Bujur Timur	
1	EMP	1° 22' 5,28"	124° 48' 0,90"	1172
2	TTW	1° 21' 39,9"	124° 47' 37,5"	1336
3	SEA	1° 22' 12,5"	124° 47' 59,2"	1190
4	WLN	1° 20' 58,3"	124° 48' 07,5"	1072
5	KIN	1° 22' 0,6"	124° 48' 59,4"	914

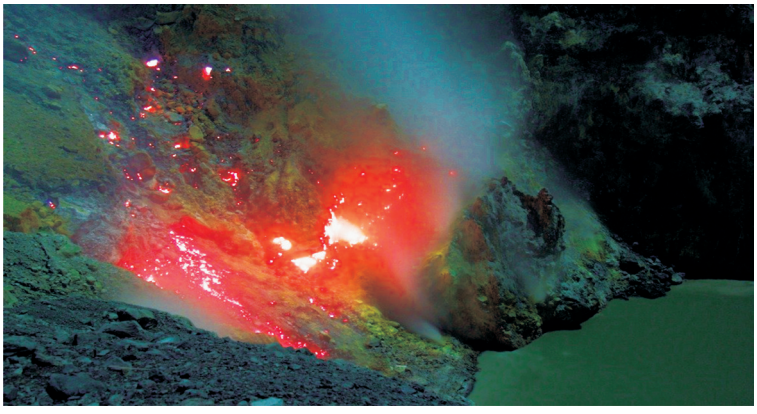
Jumlah kejadian gempa vulkanik tipe A (*deep volcanic quake*) rata-rata 3 kejadian per hari, sedangkan gempa vulkanik tipe B (*shallow volcanic quake*) 5 kejadian perhari. Jumlah ini merupakan nilai normal yang terekam di Gunung Lokon.

Yang menarik untuk dikaji adalah keberadaan gempa hembusan. Dari hasil analisa kandungan frekuensi ditemukan adanya gempa dengan gelombang frekuensi rendah (*low frequency*). Gempa ini erat kaitannya dengan aktivitas di permukaan atau pada kedalaman yang sangat dangkal di bawah kawah aktif.

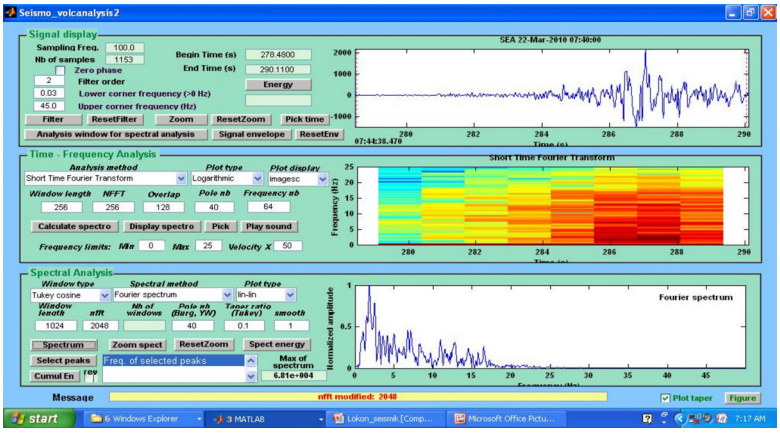
Pada lazimnya gempa yang mempunyai frekuensi rendah merupakan kejadian yang berkaitan dengan aliran fluida yang disebabkan oleh tingginya tekanan gas yang membentuk gelembung (*bubble*) dan terjadi pada kedalaman yang sangat dangkal (McNutt, 2002). Dalam hal ini gempa frekuensi rendah yang terjadi di Gunung Lokon disebabkan karena terjadinya *degassing*/lepasnya uap air (*steam*) akibat tekanan yang tinggi di sekitar kawah. Sebab lain dari meningkatnya gempa hembusan karena adanya pemanasan di sekitar kawah (blok no 3, Gambar 12). Hal tersebut didukung oleh munculnya sinar api pada rekahan atau lubang solfatara di lantai kawah (Gambar 8).



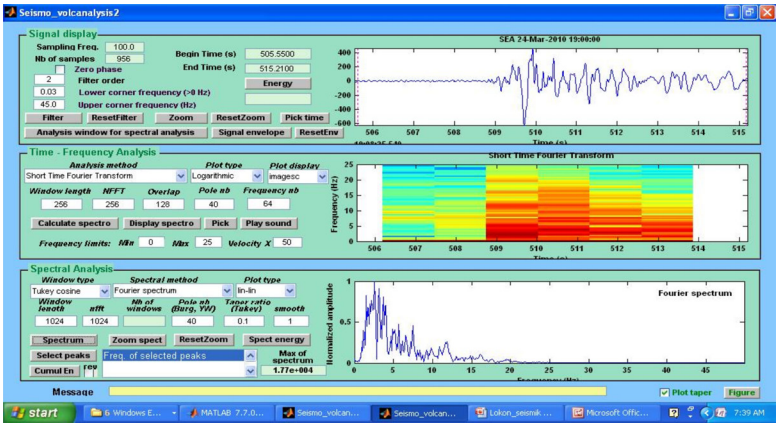
Gambar 7. Grafik harian gempa Gunung Lokon, Januari - Maret 2010.



Gambar 8. Sinar api pada rekahan/ lubang solfatara di dasar Kawah Tompaluan (Foto: Farid R. Bina).



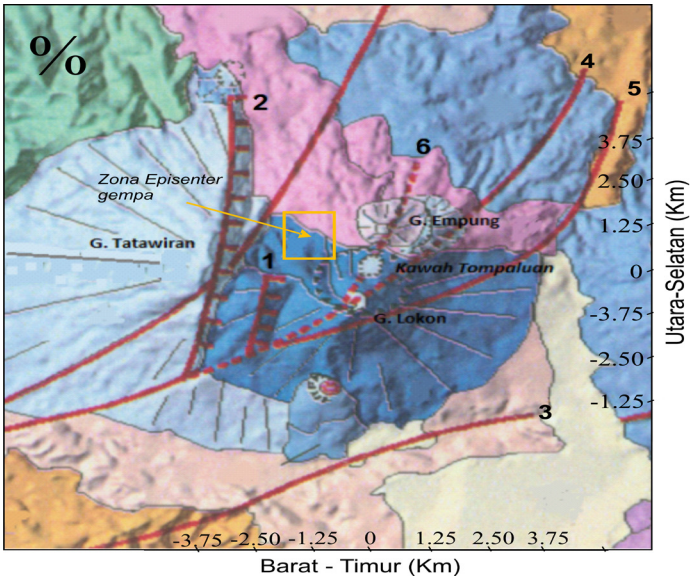
Gambar 9. Rekaman gempa hembusan frekuensi rendah (1 – 3 Hz), 22 Maret 2010, pukul 07:44 Wita.



Gambar 10. Rekaman gempa vulkanik frekuensi rendah pada 24 Maret 2010, pukul 19:08, *frequency content* = 1-4 Hz.

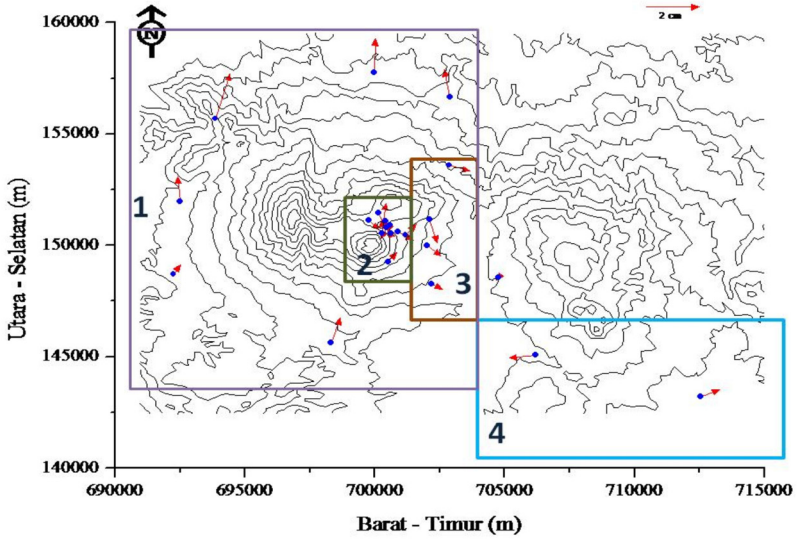
DISKUSI

Lecuyer, drr., (1995 dan 1997) telah melakukan penelitian mengenai tektonik di sekitar Kaldera Tondano, termasuk di dalamnya Kompleks Lokon – Empung. Dari hasil interpretasi struktur geologi yang berkembang, khususnya di sekitar Lokon – Empung menunjukkan bahwa terdapat beberapa struktur sesar (Gambar 11). Dengan demikian diduga bahwa deformasi yang terjadi tidak saja karena aktivitas vulkanik, tetapi juga dipengaruhi oleh aktivitas tektonik.



Gambar 11. Struktur geologi di Kawah Tompaluan dan sekitarnya (modifikasi dari Lecuyer drr., 1995).

Dari gambar 11 ditafsirkan bahwa gempa-gempa vulkanik yang terekam selama Maret 2010 berasosiasi dengan aktivitas sesar normal, nomor 1 dan sesar yang memotong Kawah Tompaluan, nomor 6. Arah pergeseran vektor di bagian lereng dipengaruhi oleh pergerakan sesar nomor 4 dan nomor 5, sedangkan di daerah distal, pergeseran vektor yang berlawanan arah (Gambar 4) kemungkinan besar diakibatkan oleh pergerakan sesar mendatar, nomor 3 di sekitar Danau Tondano.



Gambar 12. Pembagian blok di Gunung Lokon dan sekitarnya berdasarkan pola pergeseran vektor.

Secara garis besar pola vektor pergeseran di Gunung Lokon dan sekitarnya dapat dibagi atas 4 (empat) blok berdasarkan gaya yang bekerja pada masing-masing blok.

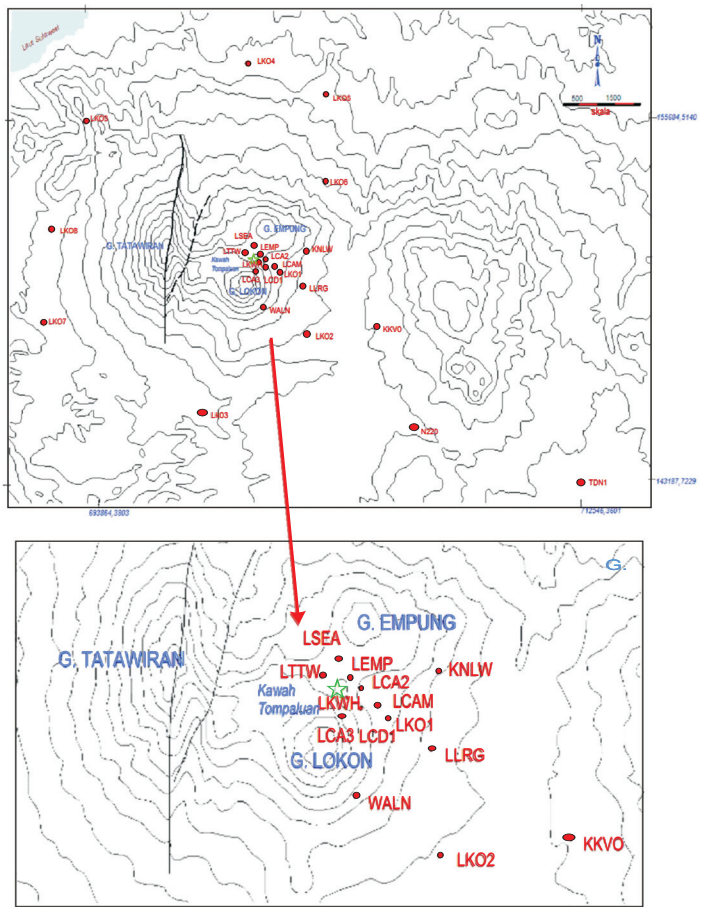
Blok 1 dan blok 4 ditafsirkan pergeseran terjadi karena gaya tektonik. Blok 2 diakibatkan karena gaya vulkanik, dan blok 3 karena gaya vulkanik yang dipengaruhi oleh gaya tektonik.

Perhitungan lokasi pusat tekanan dilakukan dengan menggunakan Model Mogi (1958). Kisaran harga kedalaman diambil dari hasil perhitungan hiposenter oleh Gunawan, drr., (2009), yaitu antara 1,5-5,5 km dari dasar Kawah Tompaluan. Hasil perhitungan pusat tekanan dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 13.

Pergerakan dengan pola searah di bagian distal dan lereng ditafsirkan sebagai akibat gaya tektonik (struktur geologi) dan berpengaruh terhadap aktifitas vulkanik, sedangkan pergeseran di sekitar kawah ditafsirkan sebagai akibat aktifitas vulkanik.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Lokasi Pusat Tekanan Gunung Lokon, Maret 2010

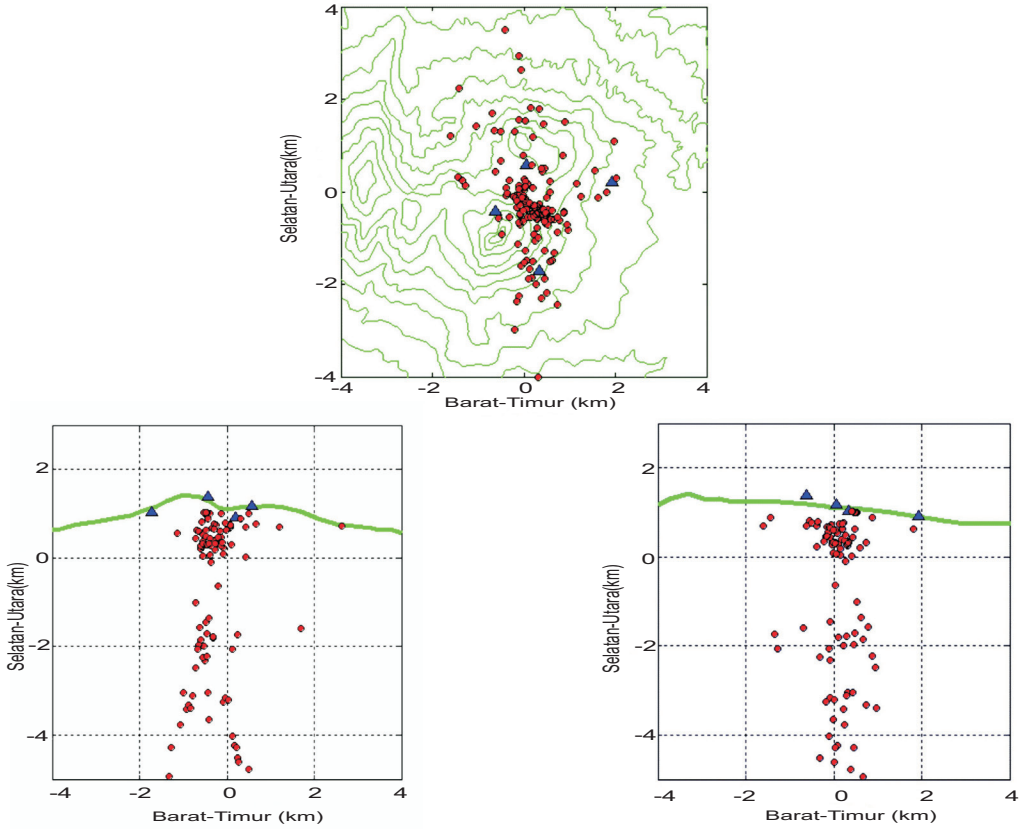
Parameter	Model Mogi	Satuan
X (Barat-Timur) dari POST	-4,5	km
Y (Utara-Selatan) dari POST	2,5	km
Kedalaman (d) dari dasar Kawah Tompaluan	1,835	km
Tekanan	92,630	bar
Rigiditas batuan (μ)	3,920	N/M
Radius kantong magma	0,334	km
Residual horisontal	3,205	cm
Residual vertikal	4,059	cm



Gambar 13. Lokasi pusat tekanan Gunung Lokon (tanda bintang) berdasarkan data GPS, Maret 2010.

Lokasi pusat tekanan masih berada di sekitar Kawah Tompaluan, lebih kurang 100 m ke arah barat laut dari titik LKWH. Kedalaman relatif dangkal (< 2 km) dengan nilai tekanan cukup rendah (< 100 bar). Kedalaman ini berasosiasi dengan zona aseismic.

Hasil pengukuran deformasi sesuai dengan hasil penelitian seismik yang dilakukan pada tahun 2007 di Gunung Lokon. Distribusi lokasi hiposenter gempa-gempa vulkanik Gunung Lokon hingga Desember 2007 berada di sekitar Kawah Tompaluan dan membentuk pola kelurusan berarah tenggara-baratlaut, dengan kedalaman antara 0,5 km sampai dengan 5 km di bawah Kawah Tompaluan. Hal ini bersesuaian dengan pola kelurusan berdasarkan Kontras Nilai Magnetik pada Peta Anomali Magnetik Residual yang berarah relatif timur-barat (Hidayat, Y., dalam Kristianto dan A. Solihin, 2008). Suplai fluida tersebut diduga telah mengaktivasi zona lemah yang berarah relatif baratlaut-tenggara. Zona aseismic berada pada kedalaman 2000-3000 m di bawah lantai Kawah Tompaluan, zona ini diasosiasikan sebagai kantong fluida (Kristianto dan A. Solihin, 2008) (Gambar 14).



Gambar 14. Distribusi gempa vulkanik Gunung Lokon November – Desember 2007. (Kristianto dan A. Solihin, 2008).

KESIMPULAN

1. Aktivitas seismik dan deformasi di Kawah Tompaluan tidak murni implikasi dari aktivitas vulkanik, tetapi dipengaruhi juga oleh aktivitas tektonik.

2. Deformasi di sekitar Kawah Tompaluan pada Maret 2010 menunjukkan trend penyusutan ke arah kawah.

3. Berdasarkan pengukuran deformasi diketahui bahwa kedalaman pusat tekanan di Gunung Lokon berada antara 1,5-5,5 km di bawah Kawah Tompaluan. Hasil ini sesuai dengan perhitungan kegempaan yang menunjukkan distribusi gempa vulkanik berada antara 1-5 km di bawah Kawah Tompaluan.

4. Keberadaan gempa hembusan yang dominan jumlahnya pada umumnya mempunyai frekuensi dominan antara 1-3 Hz. Hal tersebut menunjukkan adanya proses pelepasan gas (*degassing*) dari dalam kawah. Secara visual ditunjukkan dengan tebalnya asap kawah.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada para pengamat Gunung Lokon-Mahawu dan Sucahyo Adi , S.T., yang telah membantu selama proses pengambilan data. Wendy Mc Causland dan Jeff Marso atas diskusi singkat di lapangan.

ACUAN

Gunawan, H., Triatuti, H., Rosadi, U., Omang, A., 2009, Studi Geofisika Gunung Lokon Berdasarkan Pengolahan Data Deformasi dan Seismik, Laporan Penelitian, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi.

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

Kusumadinata, K., 1979, Data Dasar Gunung Api Indonesia, Direktorat Vulkanologi.

Lecuyer, F., Gourgoud, A., dan Vincent, P., 1995, Volcanic Hazards Related to Tondano Caldera, North Sulawesi - Indonesia, Per. Mineral, 64, 201 - 203.

Lecuyer, F., Bellier, O., Gourgoud, A., dan Vincent, P.,1997, Active Tectonic of North East Sulawesi (Indonesia) and Structural Control of the Tondano Caldera, 1997, Earth and Planetary Sciences, Serie II, 325, No. 8, Elsevier Publ.

Mc Nutt, Stephen., 2002, Volcano Seismology and Monitoring for Eruption dalam Earthquake and Engineering Seismology, Academic Press for International Association of Seismology and Physics of the earth's Interior, h. 383-419.

Mogi, K., 1958, Relations Between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surface around them, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 36 (1958), pp.99-134.

Van Padang, N.M., 1951, Catalogue of Active Volcanoes of The World Including Solfatara Fields, port I : Indonesia IVA, Nopoli-Italia,

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