Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi, Vol. 3 No. 3 Desember 2012: 181 - 195

Geokimia Air Danau Gunung Kelimutu Flores, Nusa Tenggara Timur

Geochemistry of Kelimutu Lake Water Flores, East Nusa Tenggara

Prettina Sitinjak

Badan Geologi

Jln. Diponegoro 57 Bandung

SARI

Gunung Kelimutu yang terletak di Pulau Flores, Nusa Tenggara Timur memiliki tiga buah danau kawah, yaitu danau Tiwu Nua Muri Kooh Fai, danau Tiwu Ata Polo dan danau Tiwu Ata Mbupu. Danau kawah tersebut sering berubah warna karena kandungan unsur kimia yang berbeda yang dapat juga dipengaruhi oleh aktivitas gunung api. Segitiga Cl-SO_4-HCO_3 menunjukkan air di lereng Gunung Kelimutu seperti air sungai Muru Keba, air panas Kolorongo, air panas Liasembe, air sungai Mboeli bertipe bikarbonat, sementara air panas Toba, air panas Jopu, air dingin Toba, air panas Mutu Loo, air panas Watugana, air panas Ae Lawa, dan air sungai Ae Mutu bertipe sulfat. Berdasarkan hasil analisis kimia diketahui bahwa komposisi kimia air dingin Toba yang mengalir di desa Roga lereng Gunung Kelimutu, memiliki pH: 3,21, suhu air: 26,2^0 C, dengan konsentrasi Fe: 0,51 ppm, air panas Toba memiliki pH: 2,30, suhu air 48,7°C, dengan konsentrasi Fe: 10,43 ppm, Cl: 311,61 ppm, SO_4: 1.046,26 ppm, dan Fluorida: 12,89 ppm. Air sungai Ae Mutu di dusun Waturaka memiliki pH: 2,33, suhu air 19,2°C, konsentrasi Fe: 76,26 ppm, Cl: 1848,97 ppm, SO_4: 3765,18 ppm, Fluorida: 15,43 ppm, dan Boron: 3,94 ppm. pH yang asam dengan tingginya konsentrasi Cl, SO_4, Fe, Fluorida, Boron, dan gas CO_2 berkisar 80.907,02 ppm menunjukkan kemungkinan aliran air sungai tersebut berasal dari celah-celah batuan dinding danau kawah atau kebocoran danau. Di lereng Barat Gunung Kelimutu di desa Waturaka muncul aktivitas vulkanik yang baru berupa pemunculan titik solfatara dan air panas. Suhu solfatara 96,4^o C, suhu air panas 87,1^o C, pH 6,80. Bila dibandingkan pengukuran suhu air tahun 2007 sebesar 90,4 ^{o}C dengan tahun 2011 sebesar 87,1^o C menunjukkan adanya penurunan suhu air.

Kata kunci: Kelimutu, danau kawah, mata air panas, solfatara, kebocoran, air sungai, mata air dingin

ABSTRACT

Mt. Kelimutu is located on Flores Island, East Nusa Tenggara has three crater lakes, namely Lake Tiwu Nua Muri Kooh Fai, Lake Tiwu Ata Polo, and Lake Tiwu Ata Mbupu. The colors of these crater lakes are changed oftenly because they have different chemical composition, moreover, it is also influenced by volcanic activity. The Cl-SO_4-HCO_3 triangle shows that the water found at Mount Kelimutu slope such as the Keba Muru river water, Kolorongo spring, Liasembe hotspring, Mboeli river water are of bicarbonate types, whereas Toba hotspring, Jopu hotspring, Toba spring, Loo hotspring, Watugana hotspring, Ae Lawa hotspring, and Ae Mutu river water are of sulfate types. Based on chemical analysis results it is known that the composition of Toba spring found at Roga village-Kelimutu flank has a pH of 3.21, the temperature is 26.2° C, with Fe concentration of 0.51 ppm, the Toba hotspring has a pH of 2.30, water temperature is

Naskah diterima 8 Agustus 2012, selesai direvisi 7 Oktober 2012
Korespondensi, email: pretina@vsi.esdm.go.id

48.7 ^{0} C, concentration of Fe: 10 , 43 ppm, Cl: 311.61 ppm, SO_4: 1046.26 ppm, and Fluoride: 12.89 ppm. Ae Mutu river water at Waturaka village has a pH of: 2.33, temperature of 19.2^0 C, concentration of Fe: 76.26 ppm, Cl: 1848.97 ppm, SO_4: 3765.18 ppm, Fluoride: 15.43 ppm , and Boron: 3.94 ppm. The acid pH with its high concentrations of Cl, SO_4, Fe, Fluoride, Boron, and CO_2 gas which is about 80907.02 ppm, indicates that possibly the river water is originating from the cracks of the crater wall rock or leakage of the crater lake. At Waturaka village, in the west slope of Mt. Kelimutu there was a new volcanic activity appeared, in the form of solfatar and hot springs. The temperature of the solfatar is 96.4 ° C, the hot spring temperature is 87.1^0 C, and the pH is 6.80. When it is compared, the water temperature measurement in 2007 which was 90.4^0 C with the year 2011 which was 87.1^0 C showed that there was a decrease in water temperature.

Keywords: *Kelimutu, crater lake, hot springs, solfatar, leakage, river water, spring water*

PENDAHULUAN

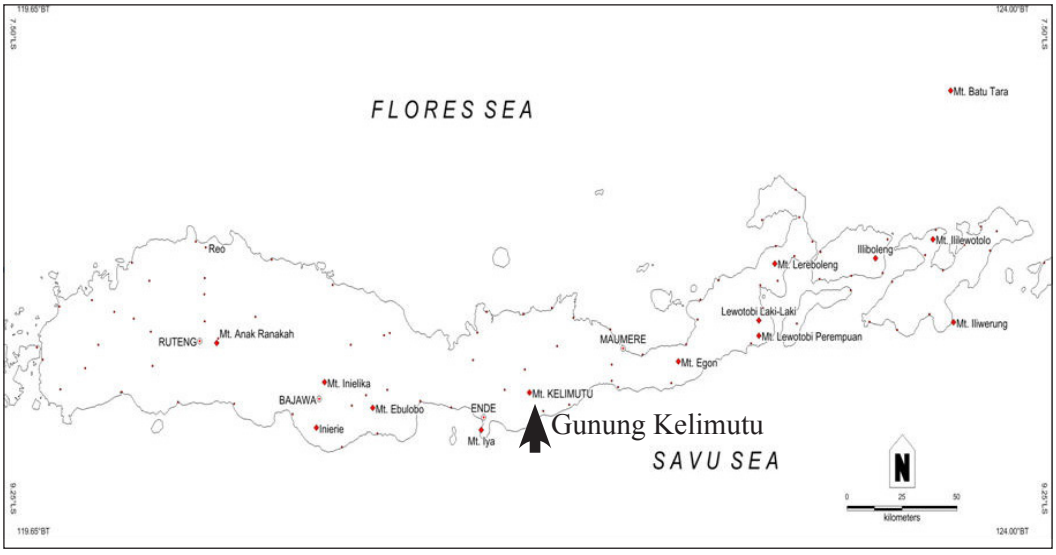
Gunung Kelimutu (1.640 m) disebut juga Gunung Geli Mutu merupakan gunung api strato tipe A, terletak di pulau Flores, Nusa Tenggara Timur. Di puncaknya terdapat tiga buah danau kawah yang sangat indah dengan warna air yang berbeda-beda, yaitu danau Tiwu Nua Muri Kooh Fai, berwarna hijau muda berukuran 600 x 380 m^2, danau Tiwu Ata Polo berwarna merah kecoklatan berukuran 600 x 380 m^2, dan danau Kawah Tiwu Ata Mbupu berwarna kehitaman berukuran 850 x 700 m^2. Air dari ketiga danau kawah tersebut sering berubah warna yang disebabkan oleh komposisi kimia yang berbeda dan gas yang diemisikan oleh Gunung Kelimutu, bila aktivitasnya meningkat.

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan adanya kondisi atau perubahan yang terjadi pada air danau Gunung Kelimutu tersebut. Pasternack dan Varekamp (1994) menyebutkan bahwa komposisi kimia air pada ketiga danau kawah tersebut mengandung air klorida dan asam sulfat yang memiliki TDS (*Total Dissolved Solids*), Zn, dan Pb yang relatif tinggi. Adanya gelembung-gelembung pada dua danau berasal dari aktivitas fumarola Gunung Kelimutu. Pasternack dan Varekamp (1994) menyatakan bahwa danau Tiwu Ata Polo jenuh dengan oksidasi besi, sedangkan dua danau lainnya diperkirakan jenuh oleh mineral Cu dan As. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya interaksi antara air asam danau--danau tersebut dengan runtuhan batuan dari dinding danau.

Penelitian geokimia air di Gunung Kelimutu dilakukan dengan cara mengambil contoh air di danau yang terdapat di puncak dan mata air serta air sungai di lereng Gunung Kelimutu. Sampel tersebut kemudian dianalisis di laboratorium guna memperoleh data kimia air. Tujuannya adalah untuk mempelajari karakteristik kimia air danau yang terdapat di puncak maupun mata air serta sungai yang terdapat di lereng Gunung Kelimutu terhadap aktivitas vulkanik dari gunung api tersebut.

METODA PENELITIAN

Metoda penelitian yang dilakukan adalah metoda sampling di lapangan dan metoda analisis sampel di laboratorium berdasarkan



Gambar 1. Peta lokasi Gunung Kelimutu.

Standar Nasional Indonesia (SNI) tahun 2005 tentang Pemeriksaan Air Gunung api (BSN, 2005). Pemeriksaan dan pengambilan contoh air panas dan air dingin dilakukan pada 14 lokasi. Tiga buah contoh air danau, yaitu Danau Tiwu Nua Muri Kooh Fai, Danau Tiwu Ata Polo, dan Danau Tiwu Ata Mbupu. Delapan contoh air panas dan air dingin berasal dari air panas Toba, air panas Mutu loo, air panas Watugana, air panas Liasembe, air panas Kolorongo, air panas Ae Lawa, air panas Jopu, dan air dingin Toba, tiga buah air sungai dari sungai Ae Mutu, air sungai Muru Keba, dan air sungai Mboeli.

Metode Sampling di Lapangan

Pemeriksaan contoh air di lapangan meliputi pengukuran temperatur air, pemeriksaan warna, bau, rasa, pengukuran debit air dan pengukuran derajat keasaman atau pH air. Kemudian dilanjutkan dengan pengambilan contoh air yang diawali dengan penentuan titik lokasi. Pengambilan contoh di lapangan dilakukan sebagai berikut:

- Titik lokasi pengambilan contoh mata air panas yang dipilih adalah titik keluarnya fumarola atau air panas yang memiliki temperatur tinggi dan terhindar dari kontaminasi polutan dan air di sekitarnya.
- Titik lokasi pengambilan contoh mata air dingin yang dipilih adalah titik keluarnya air dingin dan terhindar dari kontaminasi polutan dan air di sekitarnya.
- Titik lokasi pengambilan contoh air danau kawah yang dipilih adalah yang representatif, terhindar dari kontaminasi polutan di sekitarnya.

Contoh air terlebih dahulu disaring melalui saringan *milipore* dengan ukuran 0,45 mikron beserta *holder* nya atau bisa melalui kertas saring (ukuran pori sedang) beserta corong gelas. Contoh hasil saringan (*filtrat*) dibagi menjadi dua bagian, bagian pertama sebagai contoh asli sebanyak 500 ml, dan bagian kedua diawetkan dengan larutan HNO_3

(1:1) sebanyak 10 tetes atau sampai pH ~ 2 sebanyak 300 ml.

Contoh air dimasukkan ke dalam botol plastik yang sebelumnya telah dicuci terlebih dahulu dengan contoh air hasil penyaringan. Pada botol contoh tersebut dicantumkan keterangan mengenai lokasi dan waktu pengambilan, jenis pengawet yang ditambahkan, pH air, dan temperatur air. Botol contoh ditutup rapat kemudian dimasukkan ke dalam kotak penyimpanan untuk mencegah kerusakan selama pengangkutan ke laboratorium.

Metoda Analisis Sampel di Laboratorium

Analisis air di laboratorium meliputi unsur-unsur mayor, seperti Na, K, Li, Ca, Mg, Fe, NH_4, As, HCO_3, Cl, SO_4, B, F, dan SiO_2. Metode analisisnya menggunakan metode konvensional (gravimetri-volumetri) dan metode instrumen yang terdiri dari elektroanalisis (pH metri) dan spektroanalisis (spektrofotometri uv-visible, dan fotometri nyala).

HASIL PENELITIAN

Pengamatan Visual dan Pemeriksaan Danau Kawah

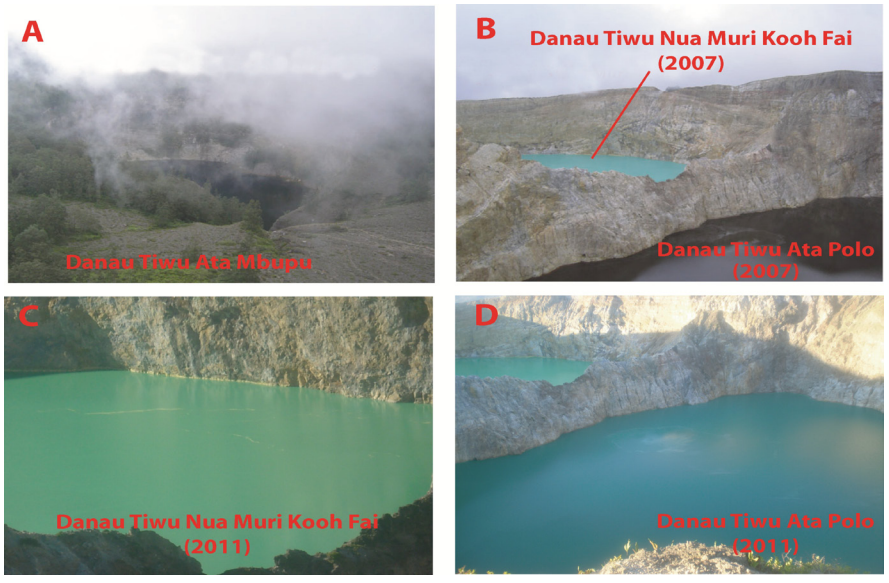
Pengamatan visual aktivitas Gunung Kelimutu dilakukan dari pos Pengamatan Gunung Api (PGA) yang terletak di Desa Koanara, Kecamatan Wolowaru. Dari pengamatan visual di puncak Gunung Kelimutu tampak air danau Tiwu Ata Polo berubah warna dari warna coklat kemerahan (2007) menjadi hijau tua (2011), air danau Tiwu Nua Muri Kooh Fai dari warna biru keputihan (2007) berubah menjadi warna hijau muda (2011) serta pada permukaan kedua danau tersebut tampak gelembung gas muncul dari dasar danau dengan belerang merica berwarna kuning mengambang di permukaannya. Danau Tiwu Ata Mbupu secara visual tampak airnya berwarna hijau kehitaman dan setelah airnya diambil tampak airnya jernih dan memiliki pH relatif netral. Kemungkinan warna air dipengaruhi adanya lumut yang tumbuh pada batuan – batuan di dasar kawah.

Pengambilan contoh air kawah dengan kedalaman 250 m dari atas danau dapat diambil dengan peralatan khusus dan melibatkan 7 orang porter yang membantu di lapangan. Hasil pengamatan langsung ketiga danau kawah di puncak seperti yang terlihat pada Gambar 2.

Pemeriksaan Air di Lapangan

Pemeriksaan dan pengambilan contoh air panas dan air dingin yang berada di puncak dan di lereng Gunung Kelimutu dilakukan pada 14 lokasi. Lokasi pengambilan sampel dan hasil pemeriksaan air di lapangan disajikan pada Gambar 3 dan Tabel 1 .

Solfatara baru telah muncul di Mutu loo, lereng bagian timur Gunung Kelimutu pada ketinggian 956,5 m, posisi geografis $08^0$44’56,9” LS, $121^0$49’48,9” BT. Aktivitas Solfatara ini terjadi pada bulan Mei 2006 dan hingga saat ini (2011) sudah meluas ke arah tenggara dengan suhu 96,4^0 C, suhu udara 24,3^0 C. Solfatara tersebut mengeluarkan asap putih tipis dengan tekanan sedang sampai kuat setinggi 5 m dengan suara *blazer* berintensitas sedang. Bila dibandingkan dengan pengukuran suhu



Gambar 2. Tiga danau kawah di puncak Gunung Kelimutu, A) Danau Tiwu Ata Mbupu, B) Danau Tiwu Nua Muri Kooh Fai warna biru keputihan (2007), C) Danau Tiwu Nua Muri Kooh Fai warna hijau muda (2011), D) Danau Tiwu Ata Polo warna coklat kemerahan (2007) berubah hijau tua (2011), (Foto: Prettina, Juli 2011).

Gambar 3. Pengukuran temperatur dan pH mata air panas Toba, di desa Roga, Foto: Sri Hidayati, PVMBG, 1 Juni 2007.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Air di Lapangan dari Tahun 2007 dan Juli 2011

No	Lokasi	Temperatur Air (^{0}C)		pH		Bau	Warna air
		2007	2011	2007	2011		
1	Air dingin Toba	29,5	26,2	2,12	3,21	Bau besi	Jernih
2	Air panas Toba	43,0	48,7	3,04	2,5	Bau H_2S	Jernih
3	Air sungai Ae Mutu	20,9	19,2	1,61	2.33	Tidak berbau	Jernih
4	Air panas Mutu loo	90,4	87,1	6,81	6,80	Bau H_2S	Jernih
5	Air panas Watugana	34,8	34,0	6,44	6,48	Tidak berbau	Jernih
6	Air panas Liasembe	41,5	40,6	8,9	7,08	Tidak berbau	Jernih
7	Air panas Kolorongo	36,7	36,3	5,73	6,71	Tidak berbau	Jernih
8	Air panas Ae Lawa	35,4	36.0	4,53	5,62	Tidak berbau	Jernih
9	Air sungai Muru Keba	20,9	43,2	4,22	7,10	Tidak berbau	Jernih
10	Air sungai Mboeli	20,3	18,8	5,76	7,02	Tidak berbau	Jernih
11	Air panas Jopu	35,4	36,5	2,42	2,6	Berbau H_2S	Jernih
12	Tiwu Ata Polo		22,0		1,95	Berbau H_2S	Hijau muda
13	Tiwu Nua Muri Kooh Fai		20,0		0,97	Berbau H_2S	Biru keputihan
14	Tiwu Ata Mbupu		19,0		2,92	Tidak berbau	Jernih

solfatara sebelumnya menunjukkan tidak ada nya perubahan, namun solfatara baru ini muncul berpindah - pindah tempat.

Aktivitas solfatara lama yang berada di Mutu Loo lereng bawah tampaknya masih aktif mengeluarkan asap putih tipis dengan suhu solfatara berkisar 96,7^0 C. Pengukuran gas di udara dengan alat *Drager* di sekitar solfatara menunjukkan bahwa gas - gas berbahaya di sekitarnya tidak terdeteksi. Perpindahan aktivitas solfatara tahun 2007 di sekitar lokasi ini mengakibatkan pohon - pohon dan tanaman penduduk menjadi mati dan kering.

Di lereng sebelah barat di Desa Waturaka, Kecamatan Kelimutu muncul aktivitas vulkanik berupa pemunculan mata air panas. Air panas ini keluar dari celah - celah batuan dengan suhu 87,1^0 C, pH 6,80, tercium bau belerang lemah serta tampak adanya asap putih tipis pada permukaan air. Bila dibandingkan pengukuran suhu air panas tahun 2007 sebesar 90,4^0 C. Hal ini menunjukkan adanya penurunan suhu air. Penurunan suhu air ini kemungkinan dipengaruhi oleh penurunan aktivitas gunung apinya.

Analisis Laboratorium

Analisis ini di lakukan dengan tujuan untuk mengetahui komposisi kimia dari contoh air dari Gunung Kelimutu. Tabel di bawah ini menyajikan hasil analisis dari peneliti terdahulu dari tahun 1992, 1997, 2006, 2007, dan tahun 2011 yang disajikan pada Tabel 2 dan 3.

Grafik perbandingan konsentrasi Fe, Cl, SO_4, dan CO_2 dari air danau Gunung Kelimutu pada Tahun 1992, 1997, 2006, dan 2011di gambarkan pada Gambar 4. Grafik pH dan konsentrasi Fe, Cl, SO_4, air danau Gunung Kelimutu

Tabel 2. Data Kimia Air Danau Kawah Gunung Kelimutu (satuan ppm)

Unsur	Tahun 1992			Tahun 1997		
	Tiwu Ata Polo	Tiwu Ata Mbupu	Tiwu Nua Muri Kooh Fai	Tiwu Ata Polo	Tiwu Ata Mbupu	Tiwu Nua Muri Kooh Fai
Warna	merah	hitam	hijau	merah	kehitaman	hijau
T. Air (°C)	20,40	20,45	28,20	26,50	26,50	27,00
pH	1,80	3,20	0,40	2,50	3,85	0,50
DHL	td	td	td	16200,00	2920,00	174,700,00
Na	229,00	53,00	939,00	23420,00	2920,00	138848,00
K	53,00	5,00	542,00	103,94	13249,98	0,00
Li	0,30	<1	1,40	76,10	1,55	485,00
Ca	599,00	437,00	869,00	1202,40	561,12	1987,97
Mg	242,00	34,00	1280,00	588,30	384,09	ta
Fe	1190,00	21,00	2620,00	90,00	4,40	8400,00
As	0,60	ta	5,30	ta	ta	ta
NH_3	ta	ta	ta	5,40	0,04	4,60
Cl	2670,00	88,00	25100,00	13604,29	47857,00	46443,54
SO_4	9780,00	1585,00	48900,00	47770,00	6705,50	28150,00
B	21,10	0,90	230,00	ta	ta	ta
F	238,00	16,00	2840,00	ta	ta	ta
SiO_2	91,00	50,00	66,00	ta	ta	ta
	Tahun 2006			Tahun 2011		
Warna	merah	kehitaman	hijau	Hijau tua	kehitaman	Hijau muda
T. Air (°C)	24,00	22,00	27,20	20,40	20,45	28,20
pH	1,92	3,02	0,37	1,95	2,92	0,97
DHL	14500,00	2500,00	>19000	11900	2100	69500
Na	363,90	90,98	2274,38	285,00	49,96	1726,00
K	40,00	6,00	570,00	37,03	4,65	605,30
Li	4,00	0,60	67,00	ta	ta	ta
Ca	1290,25	206,44	2477,28	408,00	249,20	890,25
Mg	340,63	61,93	928,98	128,20	18,66	860,00
Fe	1792,86	51,57	8500,00	858,60	9,88	3260,00
As	0,76	0,02	11,41	ta	ta	ta
NH_3	3,11	0,02	9,94	276,92	2,30	215,38
Cl	21433,33	489,90	434786,25	2689,09	79,19	27388,62
SO_4	10526,32	1473,68	56842,11	10572,68	1189,27	48329,96
B	26,88	0,00	322,58	11,64	0,66	173,84
F	135,08	2,98	1451,60	ta	ta	ta
SiO_2	95,42	40,69	965,52	158,69	87,44	126,33
CO_2				10439,61	304,49	80907,02

Tahun 1992 Sumber : Pasternack dan Varekamp, 1994.

Tahun 1997 Sumber : Laboratorium Kimia-Fisika Mineral, Pertambangan dan Energi, NTT.

Tahun 2006 sumber : Yulianto drr.

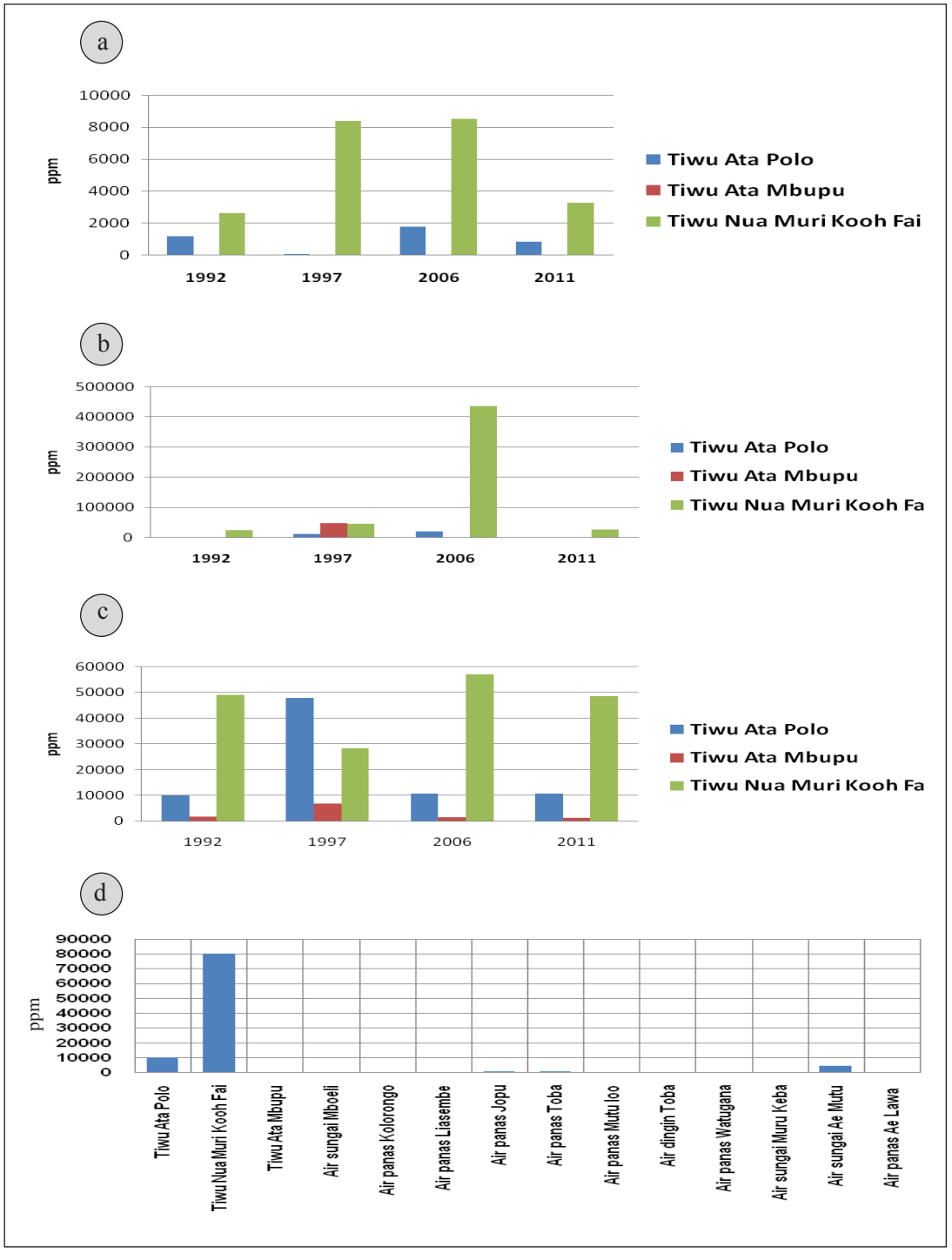
Tahun 2007, dan tahun 2011 Sumber : Laboratorium Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), 2007.

Tabel 3. Data Kimia Air Panas di sekitar Gunung Kelimutu, Tahun 2007 dan 2011 (satuan ppm)

Tahun	2007	2011	2007	2011	2007	2011	2007	2011
Lokasi	Na	Na	K	K	Ca	Ca	Mg	Mg
Ad. Toba	32,83	22,14	5,29	4,81	65,40	47,64	8,48	9,04
Ap. Toba	66,58	65,70	13,91	15,42	219,98	121,90	27,27	20,92
As. Ae Mutu	85,75	151,3	5,58	18,37	265,14	252,50	79,54	77,20
Ap. Mutu Loo	102,14	133,30	7,45	16,84	187,81	79,10	33,14	13,96
As.Muru keba	23,71	14,89	11,27	3,79	24,30	23,88	15,91	4,60
Ap.Kolorongo	31,92	22,01	7,93	7,47	25,45	29,45	13,79	6,32
Ap.Watugana	66,58	62,40	12,54	10,38	185,44	120,30	42,00	26,50
Ap. Ae Lawa	58,37	37,40	9,89	7,12	176,35	86,45	45,60	23,30
Ap. Liasembe	31,01	20,05	6,17	6,44	28,28	23,74	13,79	4,61
As. Mboeli	13,68	9,80	2,06	1,82	15,47	12,52	6,36	3,47
Ap. Jopu	62,02	64,00	11,95	8,87	128,15	105,90	49,85	33,00

Tahun	2007	2011	2007	2011	2007	2011	2007	2011
Lokasi	Fe	Fe	SiO_2	SiO_2	NH_3	NH_3	HCO_3	HCO_3
Ad. Toba	3,16	0,51	30,76	94,24	0,01	7,50	0,00	0,00
Ap. Toba	5,80	10,43	76,82	133,02	0,06	5,54	0,00	0,00
As. Ae Mutu	13,42	76,26	81,82	131,51	0,02	13,08	0,00	0,00
Ap. Mutu Loo	0,39	0,11	70,76	135,85	0,08	8,08	108,89	83,73
As.Muru keba	0,26	0,07	48,03	84,53	0,00	7,85	203,25	91,95
Ap.Kolorongo	0,30	0,08	52,88	97,32	0,01	5,77	174,22	165,80
Ap.Watugana	0,61	0,00	47,88	103,98	0,04	1,15	159,70	114,88
Ap. Ae Lawa	0,22	0,30	41,67	102,37	0,05	5,54	203,25	156,56
Ap. Liasembe	0,43	0,00	52,58	95,29	0,02	8,07	188,73	165,57
As. Mboeli	0,35	0,19	0,01	64,38	0,02	4,62	72,59	76,70
Ap. Jopu	14,24	13,08	93,48	115,85	0,03	5,08	0,00	0,00

Tahun	2007	2011	2007	2011	2007	2011	2007	2011
Lokasi	Cl	Cl	SO_4	SO_4	B	B	F	CO_2
Ad. Toba	231,74	80,91	379,74	257,16	0,35	0,49	0,91	86,99
Ap. Toba	463,49	311,61	424,21	1046,26	1,74	1,10	12,89	706,85
As. Ae Mutu	1274,59	1848,97	2011,58	3765,18	8,70	3,94	15,43	4741,32
Ap. Mutu Loo	220,16	156,66	342,11	387,56	1,57	1,15	1,45	0,00
As,Muru keba	17,38	37,39	8,21	41,83	0,00	0,12	0,31	0,00
Ap.Kolorongo	22,15	31,65	7,53	28,36	0,00	0,37	0,27	0,00
Ap.Watugana	182,50	106,59	369,47	374,92	0,87	0,29	1,31	0,00
Ap. Ae Lawa	185,40	133,16	253,16	184,00	0,17	2,16	1,14	0,00
Ap. Liasembe	23,17	41,32	1,93	6,39	0,00	0,14	0,18	0,00
As. Mboeli	26,07	21,98	4,11	7,21	0,17	0,23	0,11	0,00
Ap. Jopu	463,49	382,19	355,79	714,75	0,17	1,85	4,72	608,98



Gambar 4. a) Konsentrasi besi (Fe) Danau Kelimutu tahun 1992 - 2011, b) Konsentrasi Klorida (Cl) Danau Kelimutu tahun 1992 - 2011, c) Konsentrasi Sulfat (SO_4) Danau Kelimutu tahun 1992 - 2011, dan d) Konsentrasi CO_2 Danau Kelimutu dan air sekitarnya tahun 2011.

dan sekitarnya pada tahun 2011 digambarkan pada Gambar 5. Gambar 6 menunjukkan konsentrasi Na, K, Cl, SO_4, Fe, dan SiO_2, yang relatif tinggi. Air danau Tiwu Nuamuri Kooh Fai mengalir dari celah-celah batuan akibat kebocoran danau yang merembes ke aliran sungai Ae Mutu di dusun Waturaka.

Gambar 7 memperlihatkan bahwa mata air panas, air dingin, dan air sungai di sekitar Gunung Kelimutu berada pada daerah *immature water* berdekatan dengan daerah *Volcanic Rock,* dan dari diagram segitiga Cl-SO_4-HCO_3 menunjukkan bahwa air sungai Muru Keba, air panas Kolorongo, air panas Liasembe, air sungai Mbuli bertipe bikarbonat di daerah *Pheripheral Waters* muncul karena sudah berinteraksi dengan air meteorik dan air tanah dangkal yang sudah jauh dari sumber. Air permukaan yang terpanasi oleh gas CO_2 yang naik dari bawah permukaan membentuk HCO_3 sehingga pH menjadi lebih netral.

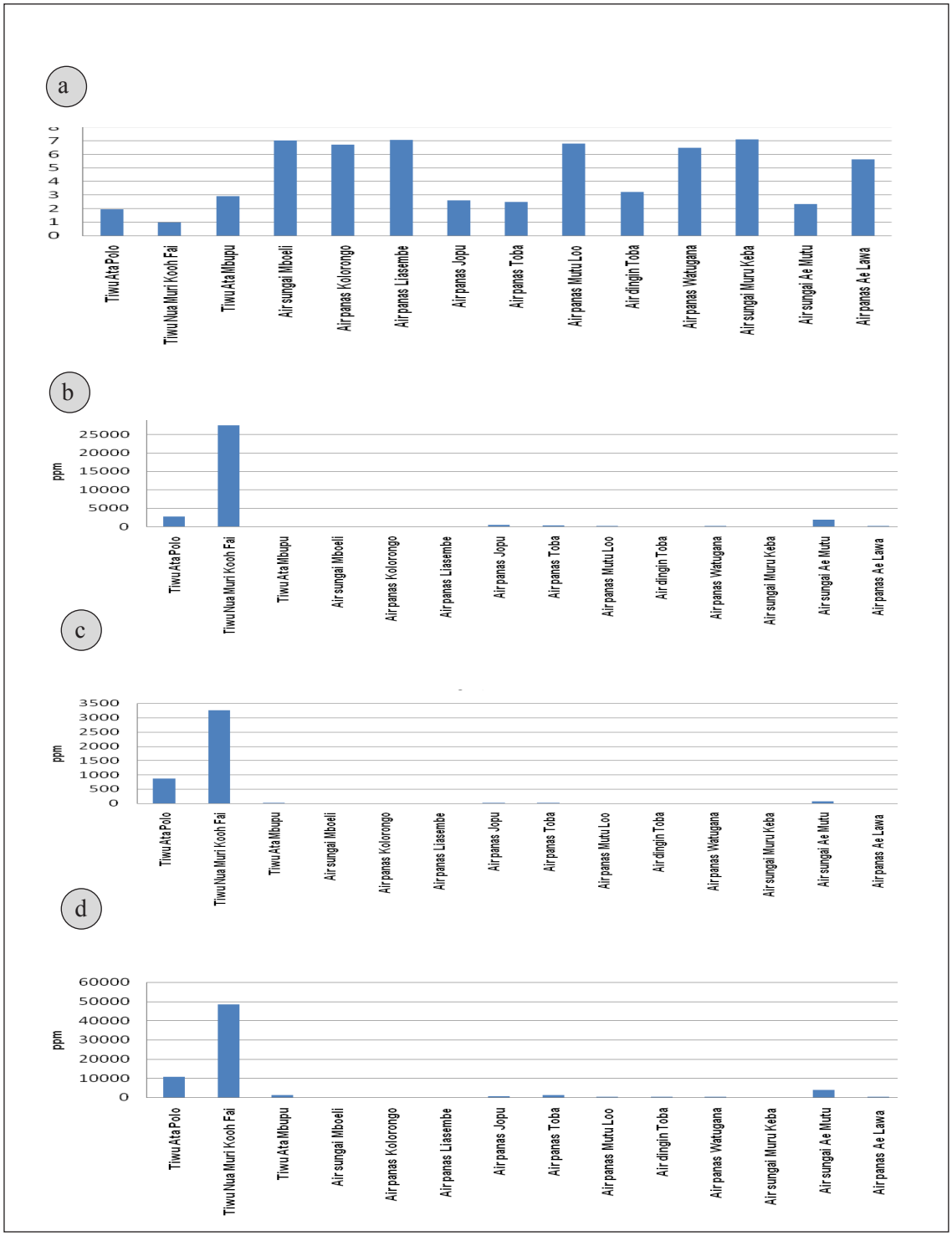
PEMBAHASAN

Berdasarkan komposisi kimia air pada tiga danau kawah yang berada di puncak Gunung Kelimutu memiliki TDS (*Total Dissolved Solids*), Zn, Pb yang relatif tinggi. Danau Tiwu Ata Polo dan danau Tiwu Nuamuri Kooh Fai nampak munculnya gelembung-gelembung dari dasar danau. Hal ini kemungkinan berasal dari aktivitas fumarola di dasar danau, yang juga didukung oleh data kimia yang menunjukkan tingginya pelarutan gas CO_2 dalam air berkisar 10.439,61 - 80.907,02 ppm, kandungan klorida 2.689,09 - 27.388,62 ppm, kandungan sulfat 10.572,68 - 48.329,96 ppm, kandungan alumunium 1.123,60 - 8.696,00 ppm, kandungan besi 858,60 - 3260,00 ppm, serta memiliki pH air yang asam dari 0,97 - 1,95. Air danau mengandung gas-gas asam seperti CO_2 dan H_2S yang menghasilkan H_2SO_4 menyebabkan air bersifat asam. Indikasi air danau tersebut jenuh sulfur ditunjukkan dengan keberadaan belerang merica yang mengambang di permukaan air danau.

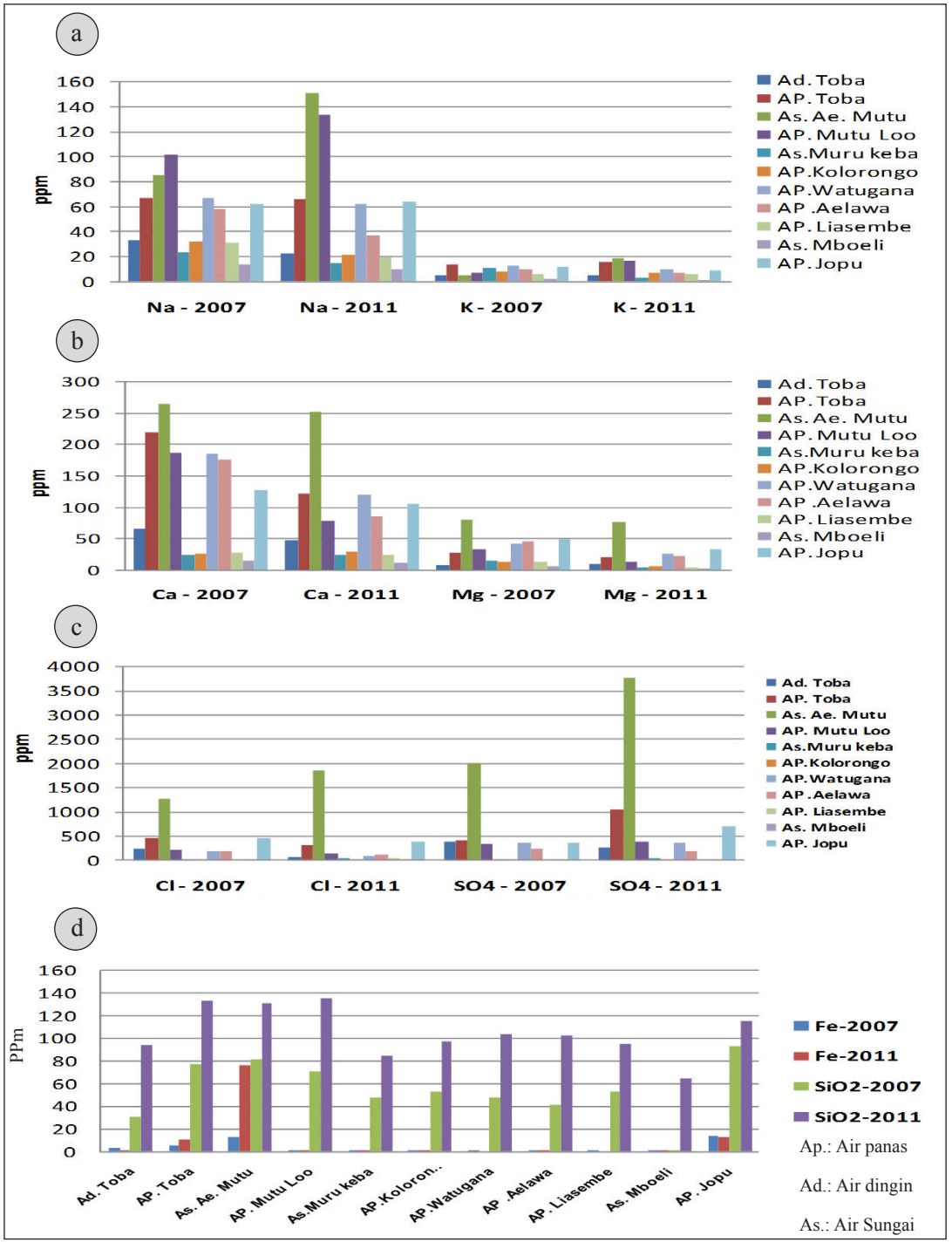
Danau Tiwu Ata Polo berwarna merah kemungkinan jenuh oksidasi besi yang membentuk senyawa ferihidroksida $Fe(OH)_3$ berupa koloid di dalam air danau dan residu di dasar danau. Sementara Danau Tiwu Nuamuri Kooh Fai berwarna hijau muda dimana ion besi bereaksi dengan sulfat membentuk endapan ferosulfat ($FeSO_4$) juga diperkirakan menjadi jenuh dengan kandungan mineral Cu dan As (Pasternack dan Varekamp,1994). Danau Tiwu Ata Mbupu berwarna kehitaman diduga refleksi warna dari tumbuhan-tumbuhan lumut yang tumbuh di dasar danau dan juga pohon pinus yang berada di sekitarnya.

Perbandingan komposisi kimia air danau Gunung Kelimutu tahun 2011 dengan tahun 2007 menunjukkan bahwa konsentrasi Fe, Cl, SO_4, Na, K, Ca, Mg, dan B mengalami penurunan, pH air cenderung naik, dan konsentrasi SiO_2 cenderung mengalami peningkatan dari 95,42 - 158,69 ppm. Adanya peningkatan konsentrasi SiO_2 ini kemungkinan disebabkan oleh adanya proses interaksi antara batuan gunung api dengan air danau yang bersifat sangat asam sehingga terjadi pelarutan (*leaching*) dari unsur kimia dari batuan gunung api tersebut.

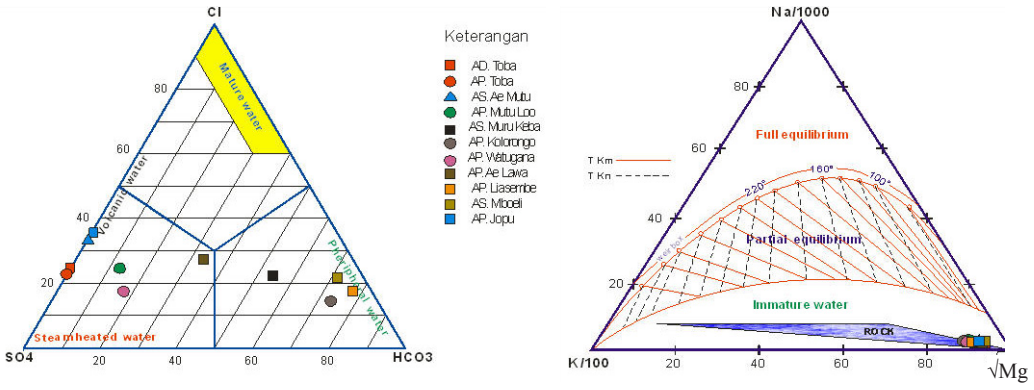
Hasil penelitian geokimia air menunjukkan bahwa air dingin Toba, air panas Toba,



Gambar 5. a). pH air Danau Kelimutu dan sekitarnya tahun 2011, b) Konsentrasi Klorida (Cl) air Danau Kelimutu dan sekitarnya tahun 2011, c) Konsentrasi besi (Fe) air Danau Kelimutu dan sekitarnya tahun 2011, dan d) Konsentrasi sulfat (SO_4) air Danau Kelimutu dan sekitarnya tahun 2011.



Gambar 6. a) Perbandingan Kimia Air Gunung Kelimutu Unsur Na dan K tahun 2007-2011, b) Perbandingan Kimia Air Gunung Kelimutu Unsur Ca dan Mg tahun 2007-2011, c) Perbandingan Kimia Air Gunung Kelimutu Unsur Cl dan SO_4 tahun 2007-2011, dan d) Perbandingan Kimia Air Gunung Kelimutu Unsur Fe dan dan Si O_2 tahun 2007-2011.



Gambar 7. Diagram segitiga Cl-SO_4-CO_3 digunakan untuk mengelompokkan tipe air panas dan diagram segitiga Na-K-√Mg digunakan untuk menentukan asal air panas (Giggenbach dan Goguel, 1989).

air sungai Ae Mutu, air panas Mutu Loo, air panas Watugana, air panas Ae Lawa, air panas Jopu bertipe sulfat. Sedangkan air sungai Muru Keba, air sungai Mboeli, air panas Kolorongo, dan air panas Liasembe bertipe bikarbonat.

Air dingin Toba di desa Roga memiliki pH = 2,12 (2007), suhu air 29,5^0 C, konsentrasi ion Fe 3,16, Cl = 231,74 ppm, SO_4 = 379,74 ppm, serta SiO_2 = 30,78 ppm memiliki kesamaan dengan air danau Tiwu Ata Polo. Air panas Toba memiliki pH = 3,04 (2007), suhu air 43,0° C, konsentrasi Fe: 5,80, Cl: 463,49 ppm, SO_4: 424,21 ppm, Flour: 12,89 ppm, konsentrasi kimia air ini memiliki kesamaan dengan air danau Tiwu Ata Mbupu yang berwarna jernih.

Air sungai Ae Mutu di dusun Waturaka memiliki pH 1,61, suhu air 20,9^0 C, dengan konsentrasi kimia yang relatif tinggi Fe: 13,42, Cl: 1.274,59 ppm, SO_4: 2011,58 ppm, F: 15,43, dan Boron: 8,70 ppm, dengan konsentrasi Na, K, Ca, SiO_2 yang relatif rendah memiliki kesamaan dengan air danau Tiwu Nuamuri Kooh Fai. pH yang asam, konsentrasi Cl, SO_4, Fe, dan tingginya pelarutan gas CO_2 berkisar 10.439,61 - 80.907,02 ppm kemungkinan aliran air sungai berasal dari kebocoran danau yang melewati celah-celah batuan dinding danau kawah tersebut.

Pada saat ini (2011) pH air dingin di lereng Gunung Kelimutu cenderung netral bila dibandingkan dengan hasil analisis air tahun 2007, sedangkan air dingin Toba, air panas Toba, air sungai Ae Mutu, dan air panas Jopu memiliki pH asam. Perubahan warna air danau Tiwu Ata Polo dari warna merah menjadi hijau tua kemungkinan karena aktivitas Gunung Kelimutu pada saat ini (2011) menurun. Hal ini didukung dengan terdapatnya konsentrasi Fe, Cl, SO_4, Na, K, Ca, Mg, dan B yang mengalami penurunan.

Air danau Tiwu Ata Mbupu yang berwarna jernih dan pHnya netral memiliki konsentrasi kimia relatif rendah, dan bila dibandingkan dengan hasil analisis kimia air tahun 2007 tidak menunjukkan adanya peningkatan. Warna air danau Tiwu Ata Mbupu berwarna jernih

tetapi bila dilihat dari puncak terlihat berwarna hitam hal ini karena adanya refleksi warna dari tumbuhan lumut yang tumbuh di dasar danau dan pohon-pohon pinus yang tumbuh di sekitarnya.

Kelompok air dingin Toba, air panas Toba, air sungai Ae Mutu, air panas Jopu, air panas Mutu Loo, air panas Watugana, air panas Ae Lawa bertipe sulfat. Hal ini menunjukkan bahwa air panas tersebut mengandung gas-gas asam seperti CO_2 dan H_2S yang bereaksi dengan air menghasilkan H_2SO_4 menyebabkan air bersifat asam dan berdasarkan "ploting" diagram segitiga berada di daerah *volcanic water* yang berarti bahwa air tersebut dipengaruhi oleh aktivitas gunung api.

Perubahan warna air danau Gunung Kelimutu sebagai gunung api yang masih aktif merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam menentukan status gunung api.

KESIMPULAN

Di puncak Gunung Kelimutu terdapat tiga buah danau kawah yang sangat indah yang berwarna berbeda. Danau Tiwu Nua Muri Kooh Fai berwarna hijau memiliki pH = 0,97, danau Tiwu Ata polo berwarna hijau tua memiliki pH = 1,95 dan danau Tiwu Ata Mbupu berwarna kehitaman memiliki pH = 2,92. Perbedaan pH dan warna dari ketiga danau disebabkan oleh komposisi kimia yang berbeda.

Danau Tiwu Nuamuri Kooh Fai yang airnya mengalir ke Sungai Ae Mutu di dusun Waturaka menunjukkan konsentrasi Na, K, Cl, SO_4, Fe, dan SiO_2 pada tahun 2011 mengalami peningkatan bila dibandingkan dengan tahun 2007, namun konsentrasi kimia air danau Tiwu Ata Polo, danau Tiwu Ata Mbupu, dan air di sekitarnya mengalami penurunan. Meningkatnya konsentrasi kimia dalam air danau kawah Tiwu Nuamuri Kooh Fai kemungkinan akibat adanya proses interaksi antara batuan gunung api dengan air danau kawah bersifat asam yang menyebabkan terjadinya pelarutan (*leaching*) dari unsur kimia dalam batuan gunung api.

Ploting dalam diagram segitiga Cl-SO_4-HCO_3 (Giggenbach dan Goguel, 1988) menunjukkan bahwa air sungai Muru Keba, air panas Kolorongo, air panas Liasembe, air sungai Mbuli bertipe bikarbonat, dan kelompok air dingin Toba, air panas Toba, air panas Jopu, air panas Mutu Loo, air panas Watugana, air panas Ae Lawa, air sungai Ae Mutu bertipe sulfat.

Pemantauan dengan metoda geokimia yang dilakukan secara berkala terhadap air danau ketiga danau kawah tersebut dan aliran sungai yang berhulu pada daerah puncak dapat membantu tingkat aktivitas Gunung Kelimutu.

Ucapan Terima Kasih

Saya mengucapkan terima kasih kepada Dr. Surono (Kepala Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi), Ir. M. Hendrasto, M.Sc (Kepala Bidang Pengamatan dan Penyelidikan Gunung api Bapak), Ir. Kristianto, M.Si, (Kasubbid Pengamatan dan Penyelidikan Gunung api Wilayah Timur), Dr. Ir. Sri Hidayati, (Subbid Pengamatan Gempa Bumi) atas izin dan kesempatan yang diberikan dalam penelitian ini. Ucapan yang sama saya sampaikan kepada Bani Philipson, Lilih, Agus Dasilpa, dan Gabriel, yang memberikan dukungan dan bantuan selama di lapangan.

ACUAN

BSN, 2005, RSNI Pemeriksaan Air Gunungapi,

BSN, 2005, RSNI Pemeriksaan Gas Gunungapi

Giggenbach, W,F, dan Goguel, R,L,, 1988, Methods for Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Samples, 2nd ed,, New Zealand,

Giggenbach, W,F, dan Goguel, R,L,, 1989, Giggenbach, W. F. and Goguel, R. L., 1989. Collection and analysis of geothermal and vol- canic water and gas discharges. D.S.I.R. New Zealand Rept.

Laboratoriun PVMBG, 2007, Data Hasil Analisa Air G. Kelimutu, 2006, Bandung,

Pasternack, G.,B. dan Varekamp, J,C,, 1994, The geochemistry of the Kelimutu crater lakes, Flores, Indonesia, Geochemical Journal, v.28, pp. 243-262,

Yulianto, E., Bakti, H., Wibowo, S., Suherman, D., Sutawadjaja, I. S., 2006, Geokimia air danau Kelimutu, LIPI.