

## FAKTOR PERBEDAAN WARNA AIR KAWAH KELIMUTU, PULAU FLORES - NUSA TENGGARA TIMUR

Dadan Suherman\* & Hendra Bakti\*

### ABSTRAK

Gunung Kelimutu di Pulau Flores memiliki tiga kawah yang dikenal dengan nama kawah Tiwu Ata Polo, Tiwu Nua Muri Koooh Fai, dan Tiwu Ata Mbupu. Ketiga kawah tersebut menjadi perhatian wisatawan domestik maupun mancanegara, karena warna air ketiga kawah yang berbeda satu sama lain. Air kawah Tiwu Ata Polo berwarna coklat kemerahan, air kawah Tiwu Nua Muri Koooh Fai berwarna hijau muda, dan air kawah Tiwu Ata Mbupu berwarna hijau tua kehitaman. Hasil analisis kimia dan fisika conto air ketiga kawah tersebut memberikan gambaran penyebab warna air kawah yang berbeda satu sama lain. Air kawah Tiwu Nua Muri Koo Fai menunjukkan sifat fisik air yang memiliki nilai viskositas di atas normal (agak kental) dan berwarna hijau muda, mengandung Fe dan sulfat yang tinggi yakni 3,836 mg/L dan 4,100 mg/L. Kandungan Fe dan sulfat yang tinggi menyebabkan terjadi reaksi kimia membentuk senyawa  $FeSO_4$  yang berbentuk padatan berwarna hijau muda. Air kawah Tiwu Ata Polo memperlihatkan sifat fisik air yang normal, namun mengandung Fe yang relatif tinggi 920 mg/L. Pada kondisi tertentu Fe akan teroksidasi menjadi  $Fe^{3+}$  yang memungkinkan terjadi hidrolisis membentuk senyawa  $Fe(OH)_3$  yang mengendap berwarna coklat kemerahan. Sementara air kawah Tiwu Ata Mbupu berwarna hijau tua kehitaman diduga karena refleksi warna tumbuh-tumbuhan/cemara gunung yang tumbuh di sekitar tebing kawah.

**Kata kunci :** Warna air, danau kawah, Gunung Kelimutu, sifat kimia dan fisika.

### ABSTRACT

**WATER COLOUR VARIATION FACTORS OF KELIMUTU CRATERS IN FLORES ISLAND, EAST NUSA TENGGARA.** *Mt. Kelimutu in Flores has three craters, which are Tiwu Ata Polo, Tiwu Nua Muri Koooh Fai and Tiwu Ata Mbupu. The craters become the major interest of domestic and international tourists. The colour of the water in crater Tiwu Ata Polo is reddish brown, while the water in Tiwu Nua Muri Koooh Fai is light green and in Tiwu Ata Mbupu is blackish dark green. The results of physical and chemical water samples analysis of the crater lakes describes the colour water variation among the lakes. Physical analysis of Tiwu Nua Muri Koo Fai water showed the colour of the water is light green with viscosity level above normal, with high Fe and sulphate concentrations of 3,836 mg/L and 4,100 mg/L. The high Fe and sulphate concentrations induce chemical reaction forming solid, light green  $FeSO_4$ . The Tiwu Ata Polo crater water showed normal physical properties with relatively high Fe concentration of 920 mg/L. At certain condition Fe will be oxidized to  $Fe^{3+}$  and following hydrolysis reaction will form precipitated reddish brown  $Fe(OH)_3$ . The blackish dark green Tiwu Ata Mbupu crater water is considered due to reflection of plants/mountain conifers grow alongside the crater.*

**Key words :** Water colour, crater lakes, Mount Kelimutu, tourist, physico-chemical properties.

---

\* Staf Peneliti Puslit Geoteknologi-LIPI

## PENDAHULUAN

Gunung Kelimutu (1640 m) di Pulau Flores merupakan salah satu tempat tujuan berwisata. Gunung ini memiliki tiga danau kawah vulkanik, yaitu Kawah Tiwu Ata Polo (TAP) dengan luas permukaan 81.700 m<sup>2</sup>, Tiwu Nua Muri Kooih Fai (TNM) sekitar 91.700 m<sup>2</sup>, dan Tiwu Ata Mbupu (TAM) sekitar 60.400 m<sup>2</sup> (Kemmerling, dalam Pasternack & Vakerkamp, 1994). Danau kawah TAP dan TNM saling berdekatan, hanya dipisahkan oleh dinding kawah yang sangat sempit (lebar ± 5 m) dan terjal. Sedangkan danau kawah TAM jaraknya relatif jauh dari kedua kawah tersebut.

Warna air ketiga danau kawah berbeda satu sama lain. Danau kawah TAP berwarna coklat kemerahan, danau kawah TNM berwarna hijau muda dan danau kawah TAM berwarna hijau tua kehitaman. Perbedaan warna air danau kawah merupakan salah satu indikasi peningkatan aktivitas Gunung Kelimutu. Sejak tahun 1980 – 1996 seringkali terjadi perbedaan warna air danau kawah TAP dibandingkan dengan kawah TNM dan TAM (Sulaeman & Iyas, 1996). Warna air kawah ini erat kaitannya dengan sifat fisika dan komposisi kimiawi yang terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, tulisan ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisika dan komposisi kimia yang paling dominan di dalam air kawah tersebut.

Lokasi Gunung Kelimutu berada di wilayah Kecamatan Moni, Kabupaten Ende, Provinsi Nusa Tenggara Timur, pada posisi geografi 8° 45' 30" Lintang Selatan dan 121° 50'. Jarak dari ibu kota kabupaten (Kota Ende) kurang lebih 50 km ke arah timur laut dan dapat ditempuh selama dua jam. Perjalanan bisa menggunakan bus jurusan Ende – Maumere ataupun memakai mobil sewaan. Kondisi jalan yang dilewati relatif baik namun sempit dan berkelok, kadangkala melewati tebing terjal yang rentan longsor dan jurang yang dalam sehingga harus hati-hati selama perjalanan.

## BAHAN DAN METODE

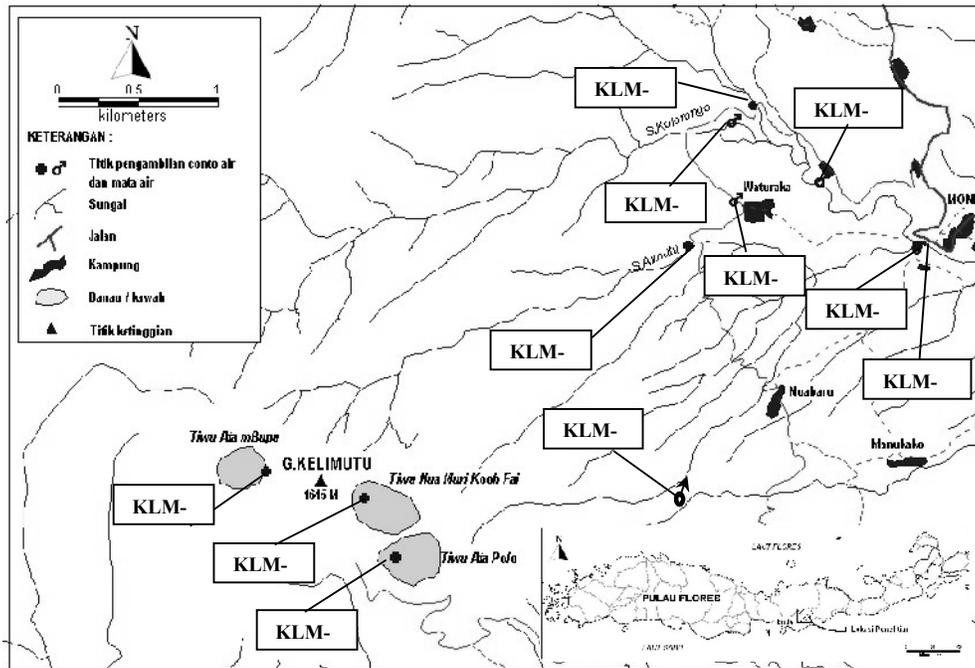
Pengambilan conto air dilakukan pada tiga kawah vulkanik Kelimutu yaitu TAP (KLM-1), TMN (KLM-2) dan TAM (KLM-3) (Gambar 1). Pengambilan conto air di TAP dan TMN dilakukan dengan memakai alat *vertical water sampler* berupa tabung fiberglass sepanjang 40 cm volume 600 ml. Sisi bagian bawah tabung terdapat katup penutup yang akan membuka ketika mendapat tekanan dari air dan menutup tatkala air sudah penuh. Water sampler diikat pada tali dan digantungkan pada simpul dari tiga tali yang dibentangkan di atas kawah. Ujung dari tiga tali ini ditarik oleh tiga orang pada tiga tempat berbeda di tepi kawah, sedemikian rupa sehingga water sampler berada di tengah kawah. Tebing kedua kawah sangat terjal sehingga pengambilan conto air hanya bisa dilakukan seperti cara ini. Sedangkan untuk Kawah TAM, conto air dapat langsung diambil dari permukaan air kawah.

Pengambilan conto air juga dilakukan pada mata air dan sungai yang berasal dari arah kawah Kelimutu. Hal ini perlu dilakukan karena berdasarkan morfologi dan batuan yang membentuknya, kualitas air sungai dan mata air diduga dipengaruhi oleh kualitas air kawah Kelimutu. Lokasi-lokasi yang diambil yaitu sungai dan mata air panas Kolorongo (KLM-4 dan KLM-5), mata air Waturaka (KLM-6), Sungai Aimutu (KLM-7), mata air Pos Kehutanan (KLM-8), air terjun Moni (KLM-9), pertemuan Sungai Kolorongo dan Aimutu (KLM-10), dan mata air panas Liasambe (KLM-11) (Gambar 1). Alat yang digunakan dalam pengambilan conto air sungai adalah *horizontal water sampler*, dan untuk pengambilan conto mata air adalah alat yang terbuat dari plastik berbentuk gayung.

Pengamatan dan pengukuran parameter fisika dan kimia air kawah, mata air dan sungai di lapangan meliputi warna dengan menggunakan *Munsell Soil Color*

Chart, suhu dengan termometer air raksa magnetik, daya hantar listrik (DHL) dengan TDSscan3&4, dan derajat keasaman (pH) dengan pHscan3, keduanya bermerk Eutech. Oleh karena topografi tebing kawah sangat terjal dan muka air jauh di bawah maka pengamatan warna air kawah TAP dan TNM hanya bisa dilakukan dari tebing kawah yang berjarak sekitar 100 m. Sedangkan untuk kawah TAM pengamatan warna bisa dilakukan dari dekat pada muka air kawah. Pengamatan warna dilakukan secara visual dibandingkan dengan warna standar *Munsell Soil Color Chart*, walau dalam kasus tertentu tidak semua warna-warna gelap tersedia (Davies-Colley, *et al.*, 1997). Pengukuran suhu dilakukan secara langsung di permukaan air kawah dengan termometer yang diikatkan pada *water sampler*. Selain itu juga dilakukan analisis kimia di lapangan terhadap ion yang mudah berubah seperti  $H^+$  dan  $HCO_3^-$  dengan metode alkalimetri.

dilakukan terhadap seluruh titik lokasi pengamatan mata air, seperti mata air panas Moni hanya pengukuran di lapangan karena menunjukkan nilai debit yang kecil 0,2 L/detik. Sedangkan mata air panas Liasambe hanya satu yang dianalisis karena menunjukkan nilai DHL yang relatif sama, begitu juga terhadap conto air sungai. Analisis logam berat dilakukan dengan alat spektrofotometer serapan atom (AAS). Conto air diawetkan dengan asam nitrat hingga pH 2, sementara conto air untuk analisis parameter kimia lainnya kecuali untuk sulfida, diawetkan dengan menurunkan suhu conto air dengan disimpan dalam boks pendingin berisi es. Pengawetan conto untuk analisis sulfida melalui pengendapan dengan larutan kadmium asetat, selanjutnya endapan yang terbentuk dilarutkan kembali dan dianalisis dengan metode spektrofotometri sinar tampak. Sedangkan untuk analisis zat organik



Gambar 1. Peta Lokasi dan Pengambilan Conto Air

Analisis logam berat Fe, Ag, Cd, Cu, Pb, dan Cr, serta parameter kimia lainnya termasuk ion utama dilakukan di Laboratorium Kimia Air Puslit Geoteknologi LIPI Bandung. Analisis laboratorium tidak

(*permanganate value*), conto air diasamkan dengan asam sulfat pekat hingga pH 2, kemudian dianalisis dengan metode oksidimetri permanganometri. Untuk meyakinkan kandungan logam berat yang

dominan, di laboratorium juga dilakukan analisis kualitatif. Selain itu, juga dilakukan pengukuran berat jenis conto air kawah dengan piknometer. Nilai berat jenis erat hubungannya dengan jumlah zat padat yang terlarut di dalamnya. Menurut hasil penelitian Direktorat Vulkanologi, komposisi kimia batuan di sekitar kawah Kelimutu antara lain mengandung  $Fe_2O_3$  5,38 - 6,32%;  $FeO$  2,03 - 3,66 %; S 0,05 - 1,49%; dan  $SO_3^{=}$  0,06 - 0,46 % (<http://www.vsi.isdm.go.id/gunungapiindonesia/kelimutu.html>).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Sifat Fisika-kimia Air Kawah

Air di ketiga permukaan kawah mempunyai suhu yang sama dengan suhu

udara permukaan. Sedangkan derajat keasaman sangat tinggi, ditunjukkan dengan pH kurang dari 3 (Tabel 1). Berdasarkan konsentrasi ion klorida air kawah TAP bersifat payau-asin (*brackish – salt*) dan rasa sedikit asam serta encer; air kawah TNM bersifat sangat asin (*hyperhaline*) berasa asam, lengket dan kental; sedangkan air kawah TAM bersifat tawar (*fresh*) dan encer. Kriteria air berdasarkan kandungan klorida sebagai berikut : air disebut air tawar apabila konsentrasi  $Cl^- < 150$  mg/L, disebut payau-asin apabila konsentrasi  $Cl^-$  antara  $10^3 - 10^4$  mg/L, dan masuk kriteria sangat asin apabila konsentrasi  $Cl^- > 10^4$  mg/L ( Stuyfzand, 1991).

Tabel 1. Karakteristik Fisika dan Kimia Air Kawah G. Kelimutu

Parameter	Satuan	Lokasi dan Kode Conto		
		Kawah TAP	Kawah TNM	Kawah TAM
		KLM-1	KLM-2	KLM-3
<b>Sifat Fisika</b>				
DHL	$\mu S/cm$	15.400	221.000	2.500
Suhu	$^{\circ}C$	22,4	26,0	22,0
Zat padat terlarut (TDS)	mg/L	16.412	137.860	2.268
Zat padatan tersuspensi (TSS)	mg/L	22,00	30,00	6,00
Kekeruhan	NTU	9,58	5,26	0,73
Berat Jenis	$gr/cm^3$	1,011	1,067	0,980
<b>Sifat Kimia</b>				
Keasaman (pH)		1,92	0,37	3,02
Natrium (Na)	mg/L	504,71	3.339,88	128,69
Kalium (K)	mg/L	19,99	579,22	3,65
Kalsium (Ca)	mg/L	625	625	266,3
Magnesium (Mg)	mg/L	2.215,3	33.327,6	70,9
Bikarbonat ( $HCO_3$ )	mg/L	-	-	-
$H^+$	mg/L	706,38	6.507,96	71,11
Sulfat ( $SO_4^{2-}$ )	mg/L	3.600	41.000	1.425
Klorida ( $Cl^-$ )	mg/L	4.236,86	37.284,83	98,86
Zat Organik (PV)	mg/L	352,66	334,64	31,96
Besi (Fe)	mg/L	920,25	3.836,84	15,41
Kesadahan ( $CaCO_3$ )	mg/L	10.798,81	107.187,73	961,38
Perak (Ag)	mg/L	0,21	0,06	0,11
Timbal (Pb)	mg/L	0,16	0,51	0,12
Tembaga (Cu)	mg/L	0,43	0,1	0,17
Krom (Cr)	mg/L	0,029	0,071	0,023
Kadmium (Cd)	mg/L	0,134	0,182	0,107
Sulfida ( $S^{2-}$ )	mg/L	8,21	11,62	3,17

Keterangan : - = Tidak ada data karena suasana asam

Warna air kawah terutama kawah TNM telah dipakai sebagai parameter penting dalam penentuan status aktivitas gunung api. Perbedaan warna ini tergantung kegiatan magmatik. Ketika pengamatan ini berlangsung warna air di ketiga kawah berbeda-beda (Gambar 2). Diskripsi warna ketiga kawah seperti dibawah ini :

a. Kawah TAP

Berdasar pengamatan dari atas tebing kawah (jarak 100 m), air kawah TAP berwarna coklat tua kemerahan (*Munsell Soil Color Chart* : 5YR, 2,5/2), sedangkan dalam jumlah sedikit (di dalam botol conto) air tersebut tidak berwarna (jernih/clear). Hal ini bisa disimpulkan bahwa warna air TAP ini pengaruh dari lingkungannya, yakni dinding kawah pada batuan setempat memperlihatkan bercak-bercak warna coklat kemerahan yang memantulkan cahaya ke dalam air kawah.

b. Kawah TNM

Air kawah yang teramati dari kejauhan mempunyai warna hijau muda dan dalam botol conto juga warnanya tetap berwarna hijau muda (*Munsell Soil Color Chart* : 5Y, 7/8). Air yang menempel di luar botol conto, cepat mengering/mengkristal menjadi bulir-bulir yang berwarna hijau. Disamping itu dijumpai dalam jumlah sedikit gelembung-gelembung belerang (belerang jagung) yang mengapung di permukaan air kawah yang berwarna kuning.

c. Kawah TAM

Pengamatan visual dari jarak kurang lebih 500 m (titik tinggi G. Kelimutu), air kawah danau ini berwarna hijau tua kehitaman (*Munsell Soil Color Chart* : 5Y, 3/2) namun setelah diamati dari jarak dekat (turun ke kawah) ternyata air sangat jernih. Terdapat banyak vegetasi cemara gunung di tebing kawah yang rimbun dan hijau. Daun-daun cemara yang kering berwarna coklat kemerahan, jatuh dan mengapung di permukaan kawah. Oleh karena itu pada tempat tertentu, air kawah seolah-olah berwarna coklat kemerahan.

Komposisi kimia masing-masing kawah disampaikan pada Tabel 1. Konsentrasi berbagai parameter kimia air di ketiga kawah berbeda antara satu dengan lainnya. Sejumlah parameter kimia dan fisika menunjukkan bahwa kawah TNM memiliki komposisi kimia (kecuali zat organik) dan fisika yang paling tinggi, diikuti oleh Kawah TAP dan kawah TAM.

**Air Kawah**

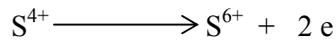
Data yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan, air kawah menunjukkan derajat keasaman yang tinggi yakni nilai pH berkisar antara 0,37 hingga 3,02. Hal ini disebabkan karena kawah mengeluarkan bermacam-macam gas, salah satu diantaranya adalah gas SO<sub>2</sub>. Gas ini pada temperatur tinggi mudah teroksidasi oleh oksigen membentuk gas SO<sub>3</sub> yang mudah bereaksi dengan air menjadi senyawa



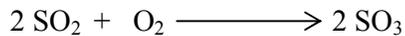
Gambar 2. a) Kawah Tiwu Ata Polo, b). Kawah Tiwu Nua Muri Koh Fai c). Kawah Tiwu Ata Mbupu

asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Mekanisme reaksi kimia yang terjadi sebagai berikut :

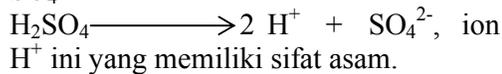
1. Di dalam senyawa SO<sub>2</sub> bilangan oksidasi sulfur (S) adalah empat plus (4+), setelah dioksidasi oleh oksigen (O<sub>2</sub>) berubah menjadi enam plus (6+) yang diikuti dengan pelepasan dua elektron :



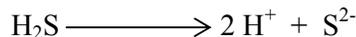
2. Ion S<sup>6+</sup> ini bersenyawa dengan oksigen membentuk gas SO<sub>3</sub> yang mudah bereaksi dengan air membentuk asam sulfat.



3. Asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) berbentuk larutan dan terionisasi menjadi ion H<sup>+</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>



Pernyataan ini juga didukung oleh hasil analisis kimia conto air kawah tersebut yang menunjukkan kandungan ion sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) dan H<sup>+</sup> yang tinggi, yakni berturut-turut 1.425 - 41.000 mg/L dan 71,11 - 6.507,96 mg/L. Kandungan ion H<sup>+</sup> di dalam air kawah, juga dimungkinkan berasal dari asam sulfida (H<sub>2</sub>S), karena kandungan sulfida ketiga kawah TNM, TAP, dan TAM yang tinggi berturut-turut 11,62 mg/L, 8,21 mg/L, dan 3,17 mg/L. Di dalam air, H<sub>2</sub>S juga terionisasi sebagai berikut :



Hal lain yang menarik pada kawah ini adalah warna air yang berbeda antara kawah satu dengan yang lainnya. Warna air merupakan hasil refleksi kembali dari berbagai panjang gelombang cahaya sejumlah elemen yang ada dalam air. Elemen dalam air dapat berupa zat padat tersuspensi (TSS) dan jumlah zat padat terlarut (TDS) (<http://www.umaine.edu/>

*WaterResearch/ FieldGuide/ color.htm#blue*). Partikel dan larutan (*solutes*) yang terdapat di dalam air dapat menyerap cahaya, namun warna yang terlihat oleh mata juga akan dipengaruhi oleh sudut pandang ketika melihat, kedalaman, dan kuantitas air. Warna air terlihat jernih bila dalam jumlah sedikit (<http://webexhibits.org/causesofcolor/5B.html>).

Nilai TDS memberi gambaran terhadap komposisi kimia air yang terlarut yakni ion-ion yang lolos dalam saringan ukuran halus (0,45 μm), sementara TSS kebalikannya yaitu yang tertahan di atas saringan sehingga TSS erat hubungannya dengan nilai kekeruhan. Sedangkan nilai TDS erat hubungannya dengan nilai DHL, karena nilai DHL didapat dari pengukuran ion-ion penghantar arus listrik yang terkandung di dalam suatu larutan (Hem, 1989). Oleh karena itu, konsentrasi unsur/senyawa kimia air kawah yang tinggi juga menunjukkan nilai DHL dan TDS yang tinggi. Selain itu, nilai TDS juga berkorelasi dengan berat jenis. Data yang diperoleh pada suhu 25° C menunjukkan nilai berat jenis air kawah TNM, kawah TAP, dan kawah TAM secara berurutan adalah 1,067 gram/cm<sup>3</sup>, 1,011 gram/cm<sup>3</sup>, dan 0,980 gram/cm<sup>3</sup> dengan nilai TDS 137.860 mg/L, 16.412 mg/L, dan 2.268 mg/L. Berdasarkan komposisi kimia yang diperoleh, air Kawah TAP dan TAM identik dengan komposisi kimia air laut. Hal ini ditunjukkan oleh kandungan ion magnesium jauh lebih besar daripada ion kalsium (Anthoni, 2000; 2006) yakni 2215,3 mg/L dan 33.327,6 mg/L, sementara kandungan ion kalsium adalah 19,99 mg/L dan 579,22 mg/L.

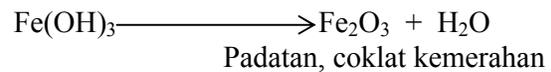
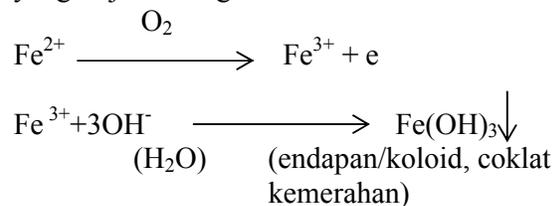
Perbedaan warna air kawah diduga antara lain pengaruh komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. Air di kawah TNM yang berwarna hijau muda, adalah pengaruh dari kandungan Fe<sup>2+</sup> yang bersenyawa dengan senyawa sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) membentuk senyawa Ferrosulfat (FeSO<sub>4</sub>) yang berwarna hijau muda. Kandungan Fe yang tinggi berasal dari batuan vulkanik yang mendasari pembentukan kawah. Di dalam batuan vulkanik Fe terdapat dalam

bentuk senyawa oksida seperti FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, bahkan campuran FeO dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dikenal sebagai senyawa Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Senyawa oksida besi ini terlarutkan oleh asam sulfat yang terdapat di dalam kawah. Sesuai dengan deret Nernst bahwa Fe termasuk logam berat yang mudah larut di dalam asam (H<sup>+</sup>) membentuk ion Fe<sup>2+</sup> (Lindsay, 1979).

Larutan FeSO<sub>4</sub> konsentrasi tinggi pada temperatur kamar akan mengalami proses penghabluran membentuk padatan yang berwarna hijau muda. Dugaan ini didukung dengan data analisis kimia yang memperlihatkan kandungan Fe di dalam air kawah TNM tinggi yaitu 3.836,84 mg/L dan kandungan sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) sebesar 41.000 mg/L. Hal ini juga didukung oleh hasil pengamatan lapangan bahwa air kawah tersebut sedikit kental (viskositas di atas normal), serta menempel di botol conto yang setelah mengering membentuk hablur yang berwarna hijau muda. Zat padat berbentuk hablur ini memiliki warna dan bentuk kristal sama seperti senyawa ferrosulfat yang ada di laboratorium. Pengamatan ini juga sejalan dengan data geokimia hasil penelitian Direktorat Vulkanologi yang menunjukkan komposisi kimia pada batuan di sekitar kawah TNM mengandung FeO yang tinggi yaitu 3,25% serta S 0,28%, dan SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 0,15%. Komposisi kimia ini sangat mendukung terbentuknya senyawa FeSO<sub>4</sub> di dalam air kawah TNM, karena FeO dalam suasana asam mudah larut membentuk ion Fe<sup>2+</sup>, juga S dan SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> dengan oksigen yang ada di dalam larutan akan teroksidasi membentuk ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Dengan demikian, warna hijau air kawah TNM adalah pengaruh dari warna FeSO<sub>4</sub> yang terkandung di dalamnya.

Air kawah TAP, terlihat dari tebing kawah dengan jarak ±100 m berwarna coklat tua kemerahan (*Munsell Soil Color Chart* : 5YR, 2,5/2). Warna ini bukan warna air, karena dalam jumlah sedikit (dalam botol conto) air tersebut tidak berwarna (bening). Dengan demikian, diduga warna yang timbul adalah hasil biasan dari batuan pada dinding kawah yang memiliki bercak-

bercak berwarna coklat kemerahan, juga disebabkan pengaruh dari dasar kawah yang berwarna coklat kemerahan. Sifat fisika air kawah ini berbeda dengan air kawah TNM yaitu lebih encer seperti lazimnya air alam. Juga air kawah TAP menunjukkan kandungan Fe yang relatif rendah yakni 920,25 mg/L. Kondisi ini memungkinkan kandungan Fe<sup>2+</sup> berubah menjadi Fe<sup>3+</sup> melalui oksidasi oleh oksigen (O<sub>2</sub>) yang terkandung di dalam air, juga oksigen dalam udara. Secara alami pada kondisi tertentu Fe<sup>3+</sup> ini terhidrolisis membentuk senyawa Fe(OH)<sub>3</sub> berupa endapan yang berwarna coklat kemerahan. Reaksi kimia yang terjadi sebagai berikut :



Di laboratorium, Fe(OH)<sub>3</sub> pada suhu tinggi (500 - 550° C) dalam waktu yang sangat singkat akan mengurai menjadi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang berbentuk padatan dan H<sub>2</sub>O yang berbentuk uap (Vogel, 1972). Pada reaksi ini terjadi peristiwa dehidrasi. Di alam, juga memungkinkan terjadi peristiwa serupa namun memerlukan waktu yang sangat panjang. Menurut Lindsay (1979) di alam perubahan dari Fe(OH)<sub>3</sub> menjadi gama-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (maghemite) terjadi pada kondisi pH 4,5.

Reaksi kimia di atas menjelaskan bahwa warna air kawah coklat kemerahan adalah pengaruh dari Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang menempel di dasar kawah. Bukti yang sama dikemukakan dari hasil penelitian Direktorat Vulkanologi yang menyebutkan bahwa warna merah kecoklatan disebabkan kandungan Fe<sup>3+</sup> yang membentuk oksida Fe<sup>3+</sup> di dalam air kawah, serta terdapat Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang tinggi di dalam batuan dinding kawah.

Warna air kawah TAM dari jarak jauh berwarna hijau tua kehitaman diduga merupakan refleksi warna tumbuh-tumbuhan/cemara gunung yang banyak ditemukan di sekitar tebing kawah. Selain itu, warna yang terjadi juga diduga pengaruh lumut yang tumbuh di dasar kawah. Disaat tertentu warna akan berubah menjadi coklat kemerahan, sebagaimana warna daun kering cemara gunung yang mengapung di permukaan kawah.

### Sifat Fisika-kimia Air Mata Air dan Sungai

Mata air adalah air tanah yang muncul di permukaan tanah. Mata air dijumpai di sekitar lereng bawah Gunung Kelimutu yang keluar dari celah atau rekahan batuan vulkanik. Dijumpai enam mata air dengan debit yang bervariasi berkisar antara 1 L /detik hingga 10 L /detik. Empat diantaranya merupakan mata air panas ( $T > 34^{\circ}\text{C}$ ). Dua buah mata air panas yang dikenal dengan nama mata air Liasambe, lokasinya berdekatan dalam satu kompleks. Sementara yang lainnya yakni mata air panas Kolorongo dan Moni serta dua mata air dengan suhu air normal berlokasi di tempat yang berjauhan (Gambar 1).

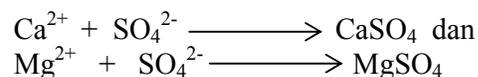
Pengamatan visual, menunjukkan seluruh mata air tidak berwarna dan jernih dengan tingkat kekeruhan kurang dari satu NTU, serta tidak berasa, bersifat tawar dengan konsentrasi klorida (Cl) kurang dari 45 mg/L dan nilai daya hantar listrik (DHL) kurang dari 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Tiga mata air bersifat basa ( $\text{pH} > 7$ ), dua diantaranya adalah mata air panas Liasambe. Sedangkan tiga mata air lainnya mempunyai derajat keasaman mendekati netral.

Saat studi lapangan, mata air panas tersebut telah dimanfaatkan oleh penduduk sekitarnya untuk keperluan air bersih (minum, mencuci, ataupun mandi), tetapi belum diturap secara permanen dan belum dimanfaatkan untuk tujuan komersial/ wisatawan.

Penilaian kualitas mata air mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan RI, No.416/MENKES/PER/IX/1990 tentang persyaratan kualitas air bersih. Air bersih didefinisikan sebagai air yang digunakan untuk keperluan sehari-hari yang kualitasnya memenuhi syarat kesehatan dan dapat diminum apabila telah dimasak.

Berdasarkan parameter fisik dan kimia yang dianalisis (Tabel 2), semua conto air dari mata air tidak memenuhi syarat sebagai air bersih, karena unsur kadmium (Cd) , suhu (air panas), serta kesadahan (mata air Waturaka) melebihi batas ambang yang dipersyaratkan Peraturan Menteri Kesehatan RI, No.416/MENKES/PER/IX/1990.

Pertemuan aliran antara Sungai Kolorongo dengan Sungai Aimutu menghasilkan campuran air yang berbusa dan meninggalkan endapan putih yang menempel pada batuan di tepi sungai. Endapan putih ini diduga senyawa  $\text{CaSO}_4$  dan  $\text{MgSO}_4$  hasil reaksi antara ion kalsium, magnesium, dengan ion sulfat. Hal ini terjadi karena ada perubahan keasaman air yakni dari sangat asam ( $\text{pH} 2,79$ ) menjadi 4,78. Kondisi ini memungkinkan terjadi reaksi kimia sebagai berikut :



Kenyataan ini didukung oleh data analisis kimia conto air Sungai Aimutu setelah bercampur dengan Sungai Kolorongo, memperlihatkan penurunan kandungan ion kalsium semula 312,5 mg/L turun menjadi 75,0 mg/L, magnesium dari 551,5 mg/L menjadi 24,1 mg/L, dan sulfat 1.400,0 mg/L menjadi 190,0 mg/L. Penurunan yang sangat tajam ini akibat ion kalsium dan magnesium bereaksi dengan ion sulfat membentuk senyawa  $\text{CaSO}_4$  dan  $\text{MgSO}_4$  yang menempel pada batuan di tepi sungai.

Tabel 2 . Hasil Pengukuran dan Analisis Kimia Mata Air dan Air Sungai

Parameter	Satuan	Standar Air Bersih No.416/ MENKES PER / IX /1990	Lokasi dan Kode Conto							
			Sungai Kolorongo	Mataair panas Kolorongo	Mataair Waturaka	Sungai Aimutu	Mataair Pos Kehutanan	Airterjun Moni	Pertemuan S. Kolorongo dan S. Aimutu	Mataair panas Liasambe
			KLM - 4	KLM - 5	KLM - 6	KLM - 7	KLM - 8	KLM - 9	KLM - 10	KLM - 11
<b>Sifat Fisika</b>										
DHL	μS/cm		160	410	170	4800	240	540	820	340
Suhu	°C	suhu udara	24,3	37,3	34,3	22,1	23,9	28,3	27,5	41,6
Total Dissolve Solid (TDS)	mg/L	1.500	568	482	992	5192	552	586	832	312
Total Suspended Solid (TSS)	mg/L		22	14	12	62	46	4	86	64
Kekeruhan	NTU	25	0,23	0,54	0,46	0,61	0,60	7,64	58,8	0,59
Debit di titik pengamatan	L/dt			8	4		3			10
<b>Sifat Kimia</b>										
Keasaman (pH)		6,5 - 9	8,07	6,79	6,81	2,79	8,41	8,14	4,78	8,11
Natrium (Na)	mg/L		21,73	59,16	112,31	272,42	74,86	55,97	76,03	48,44
Kalium (K)	mg/L		2,25	7,85	6,92	5,52	2,71	5,98	6,45	5,98
Kalsium (Ca)	mg/L		17,5	27,5	117,5	312,5	30	55	75	12,5
Magnesium (Mg)	mg/L		7,2	12,9	60,6	551,5	8,5	15,5	24,1	17,6
Bikarbonat (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L		164,69	152,25	139,54	-	58,19	75,42	14,63	157,35
H <sup>+</sup>	mg/L		-	-	-	204,49	-	-	-	-
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	400	7,1	12	175	1400	62,5	55	190	6,5
Klorida (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	600	7,12	13,89	143,04	1737,11	9,83	47,79	125,41	7,79
Zat Organik (PV)	mg/L		36,16	32,86	34,36	48,17	33,16	34,96	34,96	32,86
Besi (Fe)	mg/L	1	0,41	0,08	0,11	9,04	0,55	0,38	0,21	0,23
Kesadahan (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	500	73,77	122,54	546,42	3080,65	110,44	202,13	287,99	104,63
Perak (Ag)	mg/L		ttd	ttd	ttd	0,94	ttd	0,003	ttd	ttd
Timbal (Pb)	mg/L	0,05	0,02	0,08	0,04	0,11	0,03	0,046	1,078	0,05
Tembaga (Cu)	mg/L		0,0008	0,0008	0,0008	0,0558	0,02	0,02	0,015	0,0047
Krom (Cr)	mg/L	0,05	ttd	ttd	ttd	0,029	ttd	0,002	ttd	ttd
Kadmium (Cd)	mg/L	0,005	0,026	0,053	0,066	0,188	0,601	0,046	1,076	0,026
Sulfida (S)	mg/L		ttd	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd

Keterangan : Ttd = tidak terdeteksi (pembacaan sama dengan blanko), - = Tidak ada data karena suasana tidak sangat asam

## KESIMPULAN

Seluruh air kawah menunjukkan nilai DHL dan berat jenis yang relatif tinggi, sementara pH sangat rendah berkisar antara 0,37 hingga 3,02, DHL antara 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hingga 221.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dan berat jenis air antara 0,980  $\text{gram}/\text{cm}^3$  hingga 1,067  $\text{gram}/\text{cm}^3$ . Sedangkan temperatur memperlihatkan nilai yang normal kisarannya adalah 22,0° C hingga 26,0° C.

Air Kawah Tiwu Nua Muri Koo Fai (TNM) yang berwarna hijau muda dipengaruhi oleh kandungan ion  $\text{Fe}^{2+}$  yang bereaksi dengan sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) membentuk senyawa ferrosulfat ( $\text{FeSO}_4$ ) yang tersuspensi. Air Kawah Tiwu Ata Polo (TAP) yang berwarna coklat kemerahan berasal dari  $\text{Fe}^{3+}$  yang terhidrolisis membentuk senyawa ferrihidroksida ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) yang kemudian terurai menjadi  $\text{H}_2\text{O}$  dan padatan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang berbentuk residu di dasar kawah. Sedangkan Kawah Tiwu Ata Mbupu (TAM), pada jarak yang dekat, air tidak berwarna dan jernih, sementara pada jarak jauh air berwarna hijau tua kehitaman, akibat refleksi warna tumbuh-tumbuhan/cemara gunung yang banyak ditemukan di sekitar tebing kawah. Di saat tertentu warna akan berubah menjadi coklat kemerahan, sebagaimana warna daun kering cemara gunung yang mengapung di permukaan kawah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, *A field guide to aquatic phenomena*, <http://www.umaine.edu/WaterResearch/FieldGuide/color.htm#blue>.
- Anonim, *Causes of Color*, <http://webexhibits.org/causesofcolor/5B.html>
- Anonim, 1990, *Peraturan Menteri Kesehatan tentang Syarat-syarat Pengawasan Kualitas Air No. 416/MENKES/PER/IX/1990*.
- Anonim, *Geokimia, Kimia Air, Gunung Kelimutu*, <http://www.vsi.isdm.go.id/gunungapiindonesia/kelimutu.html>
- Anthoni, J.F., 2000, 2006, *The chemical composition of seawater*, <http://www.seafriends.org.nz/oceano/seawater.htm>.
- Sulaeman, C. & M.E. Ilyas, 1996, *Kegiatan Gunung Kelimutu Juni 1996*, Proyek Penyelidikan dan Pengamatan Gunungapi, Direktorat Vulkanologi, Dep. Pertambangan dan Energi.
- Davies-Colley R.J et.all, 1997, *Matching Natural Water Colors to Munsell Standards*, Journal of the American Water Resources Association, <http://www.awra.org/jawra/papers/J96127.html>.
- Hem, J.D., 1989, *Study and Interpretation of the Chemical Characteristic of Natural Water*, 3<sup>rd</sup> ed, US. Geological Survey, Water Supply Paper 2254, page 66-68.
- Lindsay, W.L., 1979, *Chemical Equilibria In Soils*, Colorado State University, Fort Collins, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto p.129 – 136.
- Stuyfzand. F.J., 1991, *A New Hydrochemical Classification of Water Types : Principles and Application to The Coastal-Dunes Aquifer System of the Netherlands*, in *Hydrogeology of salt water intrusion*, de breuck W. International Association of Hydrogeologists. vol.11, Germany.
- Pasternack B.G & Vakerkamp C.J., 1994, *The geochemistry of the Kelimutu Crater Lakes, Flores, Indonesia*, p.243 to. 262, *Geochemical Journal*, Vol.28 Number 3, The Geochemical Society of Japan
- Vogel.A.I., 1972, *A Text-book of Quantitative Inorganic Analysis Including Elementary Instrumental analysis*, Third. Edition, Longman Co. London, page 468 – 471.