

## KARAKTERISTIK FLUIDA DAN GAS PANAS BUMI SEBAGAI PENGARUH PENINGKATAN AKTIVITAS VULKANIK GUNUNGAPI SLAMET

### Characteristic Of Geothermal Fluid And Gas Induced By Increased Volcanic Activity Of Slamet Volcano

Mamay Surmayadi

Natural Hazard Studies

email korespondensi: mamayvsi@gmail.com

#### Abstrak

Sejak awal Maret 2014 status aktifitas Gunungapi Slamet di Jawa Tengah dinaikan dari Normal menjadi Waspada seiring dengan peningkatan jumlah gempa vulkanik. Seismisitas Gunungapi Slamet memperlihatkan gempa letusan 1106 kejadian dan gempa hembusan 6857 per hari. Sementara itu, gempa vulkanik dalam hanya terekam 2 kali selama periode Maret – Agustus 2014. Sumber gempa berada pada kedalaman antara 1 - 2 km di bawah kawah Gunungapi Slamet sebagai indikasi gempa permukaan. Peningkatan aktifitas vulkanik Slamet menghasilkan pelepasan gas  $CO_2$  yang berpengaruh terhadap fluida panas bumi yang ditunjukkan dengan terjadinya perubahan keasaman air dari normal menjadi alkalin, pembentukan bualan gas  $CO_2$  pada air panas Pancuran 3 di Baturraden, dan peningkatan saturasi kalsit. Bualan gas  $CO_2$  menjadi indikasi terjadinya proses pendidihan pada temperatur 273 C pada kedalaman 454 m di bawah permukaan laut. Kondisi ini menjadikan temperatur reservoir lebih tinggi sebagai indikasi sistem panas bumi Gunungapi Slamet merupakan sistem panas bumi aktif bertemperatur tinggi.

**Kata kunci :** gempa permukaan, fluida panas bumi, bualan gas, saturasi kalsit

#### Abstract

Since the beginning of March 2014 the status of activities Slamet volcano in Central Java has been declared from Normal becomes Alert due to significant increase in the number of volcanic earthquakes. Slamet volcano seismicity shows eruption earthquakes as many as 1106, and gas emission earthquakes as many as 6857 events per day. Meanwhile, the deep volcanic earthquake recorded only 2 times during the period March to August 2014. The hypocentre of these earthquake was at a depth of 1-2 km below Slamet volcano crater as an indication of the surface earthquakes. Increased magmatic activity resulted in the release of  $CO_2$  gas effect on the geothermal fluid which is indicated by changes in water acidity from normal to alkaline, formation of  $CO_2$  bubble gas on Pancuran 3 hot spring at Baturraden area, and calcite saturation enhancement. The presence of  $CO_2$  bubble gas is indication of boiling at temperatures 273 C at a depth of 454 m below sea level. This condition makes the reservoir temperature becomes higher as indication that the geothermal system of Slamet volcano is active geothermal systems with high temperature (high enthalpy).

**Keywords:** surface earthquake, geothermal fluid, bubble gas.

#### PENDAHULUAN

Gunungapi Slamet di Jawa Tengah merupakan gunungapi aktif tipe A yang pernah mengalami erupsi sejak tahun 1772 (PVMBG, 2011). Seperti umumnya pada beberapa gunungapi, Gunungapi Slamet memperlihatkan pemunculan mata air panas di lereng selatan di daerah Baturraden, dan di lereng utara – barat laut di daerah Guci – Sigedog sebagai manifestasi sistem panas bumi.

Sebagai sistem panas bumi hidrotermal yang berasosiasi dengan aktifitas magma, peningkatan aktivitas magma akan mempengaruhi fluida hidrotermal jika sistem magma tersebut berperan sebagai sumber panas (*heat source*) sistem panas bumi. Air Panas Pancuran 3 di Baturraden sejak awal Maret 2014 memperlihatkan gelembung atau bualan gas. Hal ini dipengaruhi proses pelepasan gas  $CO_2$  yang terperangkap di dalam air. Jika dibandingkan dengan observasi pada lokasi yang sama, air panas Pancuran 3 sebelum Maret 2014 tidak memperlihatkan adanya gelembung gas. Pembentukan gelembung gas awal Maret 2014 bersamaan dengan peningkatan aktifitas magmatik Gunungapi Slamet menjadi indikasi awal keterkaitan magmatisme dengan sistem hidrotermal.

#### METODE

Metoda penelitian ini dilakukan melalui : pengukuran pH dan temperatur air serta analisis kimia

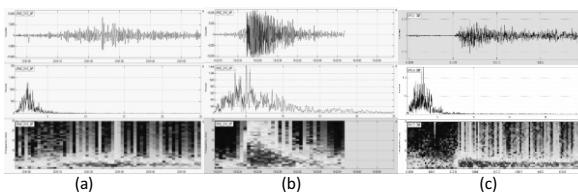
air bulan Maret 2014 dan perbandingannya dengan hasil observasi tahun 2008 dan 2012,

· perhitungan rasio gas – air pada bualan gas  $CO_2$ .

#### Peningkatan Aktifitas Vulkanik Gunungapi Slamet Bulan Maret 2014

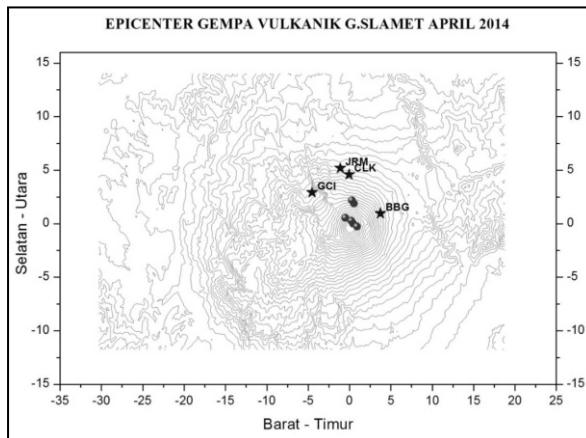
Sejak tanggal 10 Maret 2014 status aktifitas Gunungapi Slamet dinaikan dari Normal (level I) menjadi Waspada (level II) seiring dengan peningkatan jumlah gempa vulkanik. Aktifitas kegempaan ini terus meningkat hingga bulan Agustus 2014 yang ditandai dengan gempa letusan, gempa hembusan, dan gempa vulkanik dalam (VA) (gambar 1). Gempa letusan terekam sebanyak 1106 kejadian dengan rata-rata 73 kejadian per hari, gempa hembusan terekam sebanyak 6857 kejadian dengan rata-rata 457 kejadian per hari, sedangkan gempa VA hanya terekam sebanyak 2 kali (Patria, 2014).

Seismisitas Gunungapi Slamet yang dipantau melalui empat stasiun seismik di Bambangan (BBG), Bukit Cilik (CLK), Jurangmangu (JRM), dan Guci (GCI) memperlihatkan dua kelompok epicenter gempa vulkanik di kawasan puncak (gambar 2) dengan sumber gempa berada pada kedalaman antara 1 - 2 km (gambar 3) di bawah kawah Gunungapi Slamet. Dengan demikian tampak bahwa kegempaan didominasi oleh gempa permukaan (Patra 2014).

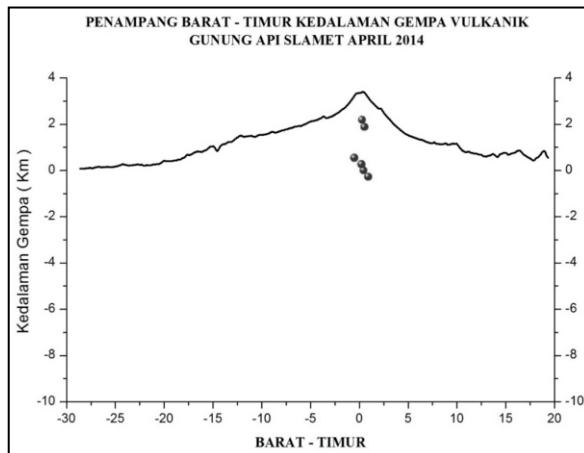


Gambar 1. Jenis gempa yang terkam di G. Slamet.

(a) Gempa letusan,(b) Gempa hembusan,  
dan Gempa vulkanik dalam (VA).



Gambar 2. Episenter gempa vulkanik Gunungapi Slamet bulan April 2014. \* = lokasi stasiun seismik (lihat teks),  
#= episenter gempa vulkanik.



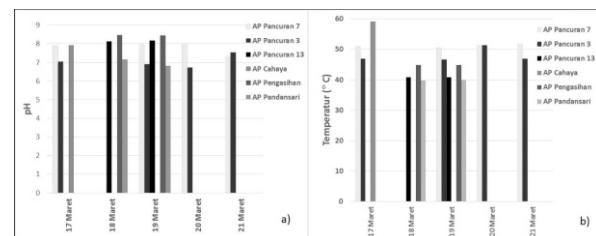
Gambar 3. Sumber gempa vulkanik Gunungapi Slamet bulan April 2014 # = hiposenter gempa vulkanik.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

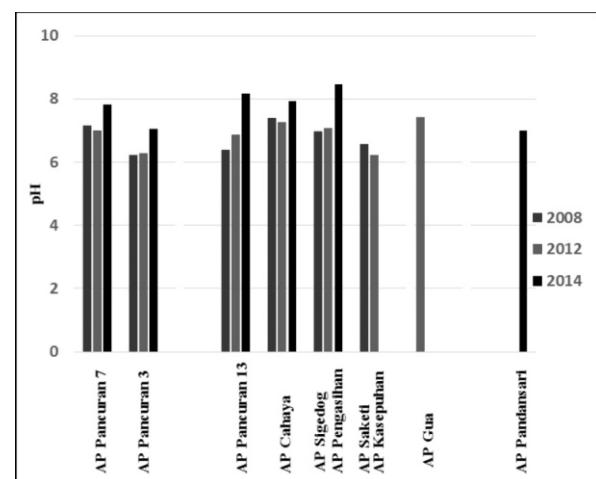
### Pengukuran pH dan Temperatur Air Panas

Pengukuran pH dan temperatur air serta analisis kimia air terkait dengan peningkatan aktifitas vulkanik Gunungapi Slamet dilakukan terhadap air panas Pancuran 7 dan Pancuran 3 di Baturren, air panas Pancuran 13, Cahaya, dan air bervariasi antara 39,70° – 59,1 °C (gambar 4b). Temperatur tertinggi berada pada air panas Cahaya di daerah Guci Pengasihan di Guci, dan air panas Pandansari di Sagedog tanggal 17 – 21 Maret 2014. pH air bervariasi antara 6,73 – 8,47 (gambar 4a), sedangkan temperatur air bervariasi antara 39,70° – 59,1°C (gambar 4b). Temperatur

tertinggi berada pada air panas Cahaya di daerah Guci tanggal 17 Maret 2014. Secara umum, meskipun fluktuatif perubahan temperatur tidak terlalu signifikan hingga bulan Maret 2014. Meskipun demikian, pengukuran pH air pada bulan Maret 2014 memperlihatkan adanya peningkatan sehingga cenderung menjadi lebih alkalin (gambar 5).



Gambar 4. Pengukuran pH dan temperatur air panas di Gunungapi Slamet Maret 2014.



Gambar 5. Perbandingan pengukuran pH air panas dan air dingin di Kompleks Gunungapi Slamet

### Rasio Gas – Air Dalam Bualan Gas

Air Panas Pancuran 3 di Baturraden sejak awal Maret 2014 memperlihatkan gelembung atau bualan gas. Pembentukan gelembung gas awal Maret 2014 bersamaan dengan peningkatan aktifitas magmatik Gunungapi Slamet menjadi indikasi awal keterkaitan magmatisme dengan sistem hidrotermal.

Analisis kimia mayor bualan gas yang terperangkap pada air dengan temperatur 46,6° – 51,4 °C memperlihatkan dominasi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam kisaran 80,88 mol – 96,5 % mol. Sementara itu, komponen minor lainnya adalah O<sub>2</sub> + Ar, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan NH<sub>3</sub>. Keberadaan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan metana (CH<sub>4</sub>) merupakan komponen penting sebagai indikator gas yang berasal dari sistem hidrotermal (Ellis dan Mahon, 1977; Nicholson, 1993; Marini, 2000). Gelembung atau bualan gas CO<sub>2</sub> di dalam air terbentuk karena sifat kelarutan CO<sub>2</sub> yang lebih rendah dibandingkan dengan H<sub>2</sub>O sehingga gas CO<sub>2</sub> terbentuk sebagai fase gas yang terperangkap di dalam air. Total kandungan gas yang terperangkap dalam air panas dapat didefinisikan sebagai (Taran, 2005):

$$X = X_g + X_w$$

dimana  $X_g$  adalah jumlah mol gas pada fase gas, dan  $X_w$  merupakan jumlah mol gas terlarut dalam konsentrasi mol gas/kg air.

Perhitungan total kandungan gas dalam air merupakan parameter penting dalam perhitungan termodinamika fluida hidrotermal sebagai gambaran rasio gas – air. Sebuah metode sederhana dalam perhitungan rasio gas – air dalam sistem hidrotermal dapat dilakukan berdasarkan analisis konsentrasi salah satu komponen atmosfir, seperti  $N_2$ , Ar, atau Ne dalam bualan gas pada mata air panas (Taran, 2005). Jumlah mol gas atmosfir,  $X_g$ , pada fase gas dalam kondisi bualan gas air panas sebagai representasi rasio gas – air dalam konsentrasi mol/kg adalah sesuai dengan formulasi (Taran, 2005):

$$(N_2): X_g = 0.056/CN_2 - 0.00055Pt$$

$$(Ar): X_g = 0.0015/CAr - 0.0011Pt$$

$$(Ne): X_g = 8 \times 10^{-7}/CNe - 0.00048Pt$$

dimana  $CN_2$ ,  $CAr$ , dan  $CNe$  adalah konsentrasi nitrogen, argon, dan neon hasil analisis kimia gas, dan Pt adalah tekanan atmosfir (atm).

Berdasarkan formulasi di atas, jumlah total gas dalam bualan gas ( $i$ ) pada air panas (bualan + gas terlarut, dalam mol/kg) dapat diketahui melalui formulasi (Taran, 2005):

$$Xi = xi (Xg + 55.51 * Pt/Khi)$$

dimana  $xi$  = fraksi mol gas dalam bualan gas,  $X_g$  = total jumlah gas dalam fase gas (mol/kg), Pt adalah tekanan atmosfir (atm), dan  $Khi$  = konstanta Henry untuk gas bualan pada kondisi temperatur pengukuran (atm/fraksi mol). Dalam penelitian ini, konstanta Henry atau koefisien Hukum Henry (tabel 1) merupakan gambaran tingkat kelarutan gas yang didasarkan atas termodinamika gas pada temperatur air panas (Plyasunov dan Shock, 2003; dalam Taran, 2005).

Mengacu uraian diatas, rasio gas – air pada bualan gas mata air panas Pancuran 3 Baturraden, konsentrasi fase gas bebas dalam bualan air panas berdasarkan gas nitrogen ( $N_2$ ) memberikan gambaran rasio gas – air dan fraksi mol gas  $CO_2$  yang terlarut dalam air (tabel 2).

Tabel 1. Konstanta Henry berdasarkan kelarutan gas dalam temperatur 51,4 °C (berdasarkan data termodinamika Plyasunov dan Shock, 2003; dalam Taran, 2005)

	A	B1	B2	B3	B4	Khi
He	5,126	1,850,E-03	-3,78110,E-05	9,55983,E-08	-8,826200,E-11	136006,832
Ne	5,01464	3,970,E-03	-4,72260,E-05	1,25824,E-07	-1,176960,E-10	128882,447
Ar	4,3935	1,002,E-02	-7,80977,E-05	1,97325,E-07	-1,823060,E-10	53422,057
$N_2$	4,75462	9,120,E-03	-7,92527,E-05	2,01587,E-07	-1,866230,E-10	109667,458
$H_2$	4,77563	4,110,E-03	-4,64673,E-05	1,19217,E-07	-1,105640,E-10	75776,894
CO	4,56991	9,400,E-03	-8,03688,E-05	2,03567,E-07	-1,883290,E-10	73632,247
$CH_4$	4,37103	1,096,E-02	-8,49689,E-05	2,09817,E-07	-1,926890,E-10	54580,445
$H_2S$	2,44417	1,351,E-02	-7,46001,E-05	1,74582,E-07	-1,580450,E-10	920,657
$CO_2$	2,89612	1,502,E-02	-8,80542,E-05	2,07454,E-07	-1,879660,E-10	2899,826
$O_2$	4,43872	1,012,E-02	-7,83460,E-05	1,93467,E-07	-1,177697,E-09	58877,983

Tabel 2. Konsentrasi fase gas  $N_2$  dalam bualan air panas ( $X_g$ ), fraksi mol gas  $CO_2$  yang terlarut dalam air ( $X_{CO_2}$ ), geotermometer  $CO_2$  ( $T_{CO_2}$ ), dan kedalaman titik didih berdasarkan data analisis kimia bualan gas pada air panas Pancuran 3 Baturraden bulan Maret 2014

Waktu Observasi	$X_g$ (mol/kg)	$X_{CO_2}$ (mol/kg)	$T_{CO_2}$ (°C)	$CO_2$ dalam air (% berat)	Kedalaman Titik Didih (m)	Elevasi Titik Didih dari APP3 (m)
17 Maret	0,006	0,020	255,673	0,890	700	45,8
19 Maret	0,011	0,026	263,229	1,140	900	-154,2
20 Maret	0,020	0,036	273,221	1,565	1200	-454,2
21 Maret	0,003	0,017	250,012	0,736	650	95,8

Jumlah total gas  $CO_2$  dalam air panas Pancuran 3 Baturraden berada pada kisaran 0,17 – 0,36 mol/kg atau sebanding dengan 0,736 – 1,565 % berat  $CO_2$  terlarut dalam air. Berdasarkan total gas  $CO_2$  sebagai salah satu komponen geotermometer gas (Arnorsson dan Gunnlaugsson, 1985; Taran, 1986; Giggenbach, 1981), pendugaan temperatur fluida dengan bualan gas di bawah permukaan dapat dilakukan dengan asumsi bahwa air panas Pancuran 3 Baturraden merupakan fase air tunggal (*single liquid phase*) dengan gas terlarut dalam kesetimbangan dengan mineral. Geotermometer gas  $CO_2$  yang dihitung berdasarkan formulasi (Taran, 1988; dalam Taran, 2005) :

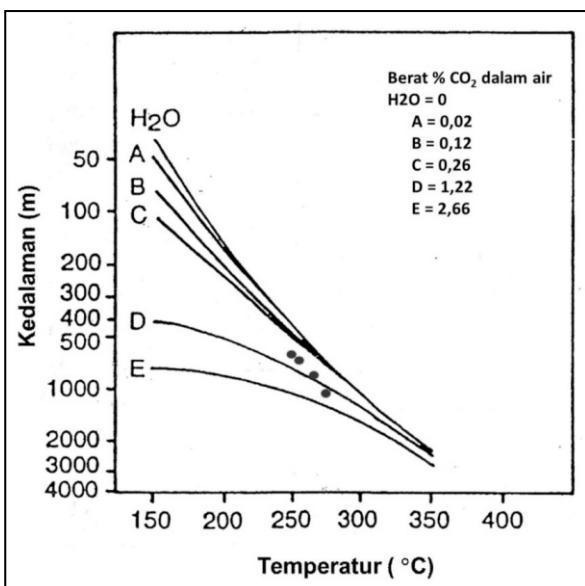
$$T_{CO_2} \text{ °C} = 4036 / (5,94 - \log X_{CO_2}) - 273$$

memperlihatkan fluida bertemperatur tinggi dalam kisaran 250° – 273° C. Kondisi ini kemungkinan sebagai gambaran fluida reservoir panas bumi Gunungapi Slamet. Tingginya konsentrasi  $CO_2$  dengan bualan gas dalam air merupakan indikasi kemungkinan terjadinya pendidihan (*boiling*) pada suatu kedalaman tertentu (Mahon, dkk. 1980; Nicholson, 1993).

Pendidihan pada fluida panas bumi dapat diakibatkan oleh dua proses, yaitu pengurangan tekanan atau penambahan panas. Proses pendidihan yang disebabkan reduksi tekanan ketika fluida panas bumi dalam *reservoir* naik ke permukaan yang menghasilkan pemisahan fase uap dari fase air adalah umum terjadi dalam sistem panas bumi. Sementara itu, pendidihan yang diakibatkan pengaruh penambahan panas dapat disebabkan oleh adanya intrusi magma ke dalam level permukaan yang lebih dangkal. Pengamatan secara periodik sejak Juli 2008 hingga Maret 2014 menunjukan bahwa bualan gas di mata air panas Pancuran 3 Baturraden mulai terlihat pada bulan Maret 2014 bersamaan dengan adanya peningkatan aktifitas vulkanik Gunungapi Slamet. Kondisi ini dapat dijadikan sebagai asumsi awal bahwa terbentuknya bualan gas di mata air panas Pancuran 3 Baturraden berasosiasi dengan intrusi magma ke dalam level permukaan yang lebih dangkal. Intrusi magma tersebut kemungkinan mempengaruhi fluida dalam *reservoir* panas bumi sehingga menyebabkan peningkatan temperatur air dalam *reservoir* panas bumi dan mengalami pendidihan pada suatu kedalaman seiring dengan peningkatan konsentrasi  $CO_2$ .

Diagram korelasi kedalaman terhadap temperatur (Mahon, dkk. 1980) sebagai fungsi konsentrasi fraksi mol gas  $CO_2$  yang terlarut dalam air dapat menggambarkan posisi titik didih pada kedalaman tertentu. Berdasarkan diagram tersebut, bualan gas  $CO_2$  pada air panas Pancuran 3 Baturraden diperkirakan berasal dari proses pendidihan air pada kedalaman antara 650 m – 1200 m (lihat tabel 2; gambar 6) atau pada elevasi + 45,8 m hingga -454,2 m dihitung dari posisi air panas Pancuran 3 pada elevasi 750,4 m diatas permukaan laut.

Pendidihan ini diinterpretasikan terjadi pada bagian atas reservoir panas bumi. Proses pendidihan ini pada tahap selanjutnya dapat mengalami pemisahan fase uap dari fase cair dan akhirnya mengalami kondensasi disekitar permukaan.



Gambar 6. Proyeksi kedalaman dan temperatur sebagai perkiraan kedalaman titik didih air panas Pancuran 3 tanggal 17, 19, 20, dan 21 Maret 2014 (Sumber grafik : Mahon, dkk.,1980). 1 = 17 Maret, 2 = 19 Maret, 3 = 20 Maret, 4 = 21 Maret

Proses pemisahan fase uap dari fase cair menghasilkan bualan atau gelembung gas CO<sub>2</sub> sebagai gas bebas yang terperangkap dalam air, sedangkan gas lainnya yang memiliki tingkat kelarutan tinggi akan melarut di dalam air. Tingginya konsentrasi atau dominasi gas CO<sub>2</sub> pada air panas sebagai indikasi proses kondensasi di sekitar permukaan (Arnórsson, dkk. 1983) sebagai fluida sekunder dalam sistem panas bumi hidrotermal.

Peningkatan CO<sub>2</sub> pada bulan Maret 2014 tidak disertai dengan peningkatan gas SO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Hal ini dimungkinkan karena kelarutan CO<sub>2</sub> lebih rendah di dalam magma, maka gas CO<sub>2</sub> merupakan fase gas yang terbentuk lebih dulu pada tekanan jenuh dan teremisikan pada saat awal terjadinya peningkatan seismisitas Gunungapi Slamet bulan Maret 2014. Dengan demikian, tidak terlihatnya peningkatan gas SO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S merupakan gambaran belum terbentuknya degassing magma secara optimal pada awal peningkatan aktifitas magmatik Slamet bulan Maret 2014. Selain itu, pelepasan gas CO<sub>2</sub> ke permukaan, terutama pada awal peningkatan seismisitas Gunungapi Slamet, diinterpretasikan menjadi penyebab terbentuknya gempa hembusan sebagai gempa permukaan. Sementara itu, pengaruh gas CO<sub>2</sub> terhadap proses pendidihan pada reservoir panas bumi tidak memperlihatkan peningkatan temperatur air panas di Pancuran 3 secara signifikan. Hal ini diinterpretasikan karena posisi air panas Pancuran 3 berada pada zona *outflow* sistem panas bumi Gunungapi Slamet yang telah mengalami proses percampuran dan pengenceran dengan air permukaan. Selain itu, kondisi bulan Maret 2014 dengan curah hujan yang cukup tinggi akan menghasilkan penyerapan air yang lebih tinggi.

## SIMPULAN

1. Pelepasan gas CO<sub>2</sub> memberikan pengaruh terhadap fluida panas bumi yang ditunjukkan

dengan terjadinya perubahan keasaman air dari normal menjadi alkalin, pembentukan bualan gas CO<sub>2</sub> pada air panas Pancuran 3 di Baturraden, dan peningkatan saturasi kalsit.

2. Bualan gas CO<sub>2</sub> pada air panas Pancuran 3 menjadi indikasi terjadinya proses pendidihan pada temperatur 273 °C pada elevasi kedalaman 454 m dibawah permukaan laut. Kondisi ini menjadikan temperatur reservoir menjadi lebih tinggi sebagai indikasi bahwa sistem panas bumi Gunungapi Slamet merupakan sistem panas bumi aktif (*active geothermal system*) bertemperatur tinggi (*high enthalpy*).

## DAFTAR PUSTAKA

- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., and Svararsson, H., 1983. *The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions*. Geochimica et Cosmochimica Acta Vol 47 pp 547–566
- Arnórsson, S. dan Gunnlaugsson, E. 1985. *New gas geothermometers for geothermal exploration—Calibration and application*. Geochim. Cosmochim. Acta, 49: 1307–1325.
- Ellis A.J. and Mahon W. A. J. 1977. *Chemistry and Geothermal Systems*. New York, Academic Press INC.
- Giggenbach, W. F. 1981. *Geothermal mineral equilibria*, Geochim. Cosmochim. Acta, 45: 393–410.
- Mahon, W.A.J., Klyen, L.E., Rhode, M., 1980. *Natural sodium-bicarbonate-sulphate hot waters in geothermal systems*. J. Jpn. Geotherm. Energy Assoc. 17, 11-24.
- Marini, L. 2000. *Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy*. Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse. Università degli Studi di Genova, Corso Europa. Genova. Italia
- Nicholson K 1993. *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin, Springer-Verlag.
- Pang, Z. H., and Reed, M., 1998. *Theoretical chemical thermometry on geothermal waters: Problems and methods*. Geochimica et Cosmochimica Acta. V. 62. 6. 1083–1091.
- Pang Z. H., 1988. *Multiple Fluid-Mineral Equilibrium Calculations and Their Applications to Geothermometry and Hydrochemical Processes in Geothermal Systems*. Rep. of UNU Geothermal Training Programme, National Energy Authority of Iceland, Reykjavik, 88, 5
- Pang Z. H. and Armmansson H., 1989. *Modelling chemical equilibrium in hydrothermal systems: with examples from Iceland and China*. In Water-Rock Interaction (ed. L. Miles ed.), pp. 541–545. Balkema.
- Patria, C. 2014. *Laporan Tanggap Darurat Gunungapi Slamet 2014. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi*. Badan Geologi
- PVMBG, 2011. *Data Dasar Gunungapi Indonesia*. Badan Geologi. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
- Reed, M. H., Spycher, N. F., and Palandri, J., 2012. *SOLVEQ-XPT : A Computer Program for Computing Aqueous – Mineral - Gas Equilibria*. Department of Geological Sciences
- Reed, M.H., and Spycher, N.F., (1984), *Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal water with application to geothermometry and studies of boiling and dilution*. Geochim. Cosmochim. Acta, 48, 1479-1490.
- Taran, Y. A. 1986. *Gas Geothermometers for Hydrothermal systems*. Geochem. 111–126.
- Taran, Y. A. 2005. *A method for determination of the gas-water ratio in bubbling springs*. Geophysical Research Letter. 32. L23403.