

STUDI GEOKIMIA AIR PANAS AREA PROSPEK PANASBUMI
GUNUNG KENDALISODO KABUPATEN SEMARANG, PROVINSI JAWA TENGAH

Yoga Aribowo*, Heri Nurohman**)

Abstract

Fluid geochemistry is a useful method to analyse lateral and vertical processes and trends in a geothermal system, just like a blood and urine analysis to determine the functions of internal organs in human body. Fluids geochemistry study in Kendalisodo Geothermal Prospect has conducted to get information about type and characteristics of fluids, to predict reservoir temperature, and sub surface hidrogeochemical cycle model.

From fluids geochemistry analysis, the most significant constituent is HCO_3 , and thus all fluids classified into bicarbonate water. Based on gethermometry analysis, the average reservoir temperature calculated is about 175°C and classified into medium enthalpy system.

Key words: geothermometry, reservoir temperature, medium enthalpy

Pendahuluan

Gunung Ungaran merupakan daerah prospek panas-bumi yang ditunjukkan oleh manifestasi panasbumi yang muncul di permukaan berupa fumarol, kolam air panas dan batuan alterasi. Salah satu manifestasi panasbumi pada Gunung Ungaran terdapat di Gunung Kendalisada dan sekitarnya yang berupa mataair panas.

Analisis geokimia fluida sangat berperan dalam interpretasi karakteritik panasbumi bawah permukaan. Berdasarkan hasil analisis geokimia fluida, dapat diperkirakan tipe air, kedudukan manifestasi dalam sistem panasbumi, serta suhu reservoir.

Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kimia fluida yang terdapat pada manifestasi kolam air panas. Sedangkan tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui tipe fluida manifestasi
2. Memprediksi suhu reservoir
3. Mendapatkan gambaran seting geologi dan hidrogeokimiawi dari sistem panasbumi setempat

Tipe Fluida Panasbumi dan Karakteristiknya

Air Klorida (*Chloride Water*)

Jenis air ini merupakan tipe fluida panasbumi yang ditemukan pada kebanyakan area dengan sistem temperatur tinggi. Area yang memiliki mataair panas yang mengalir dalam skala besar dengan konsentrasi Cl yang tinggi berasal dari reservoir dalam, dan merupakan indikasi dari zona permeabel pada area tersebut. Namun demikian, area ini dapat saja tidak terletak di atas zona *upflow* utama, karena ada beberapa kemungkinan lain seperti pengaruh topografi yang juga dapat memberikan dampak besar dalam mengontrol hidrologi. Mataair klorida juga dapat mengidentifikasi daerah permeabel zona tinggi (contoh: patahan, erupsi breksi atau conduit).

Pada air klorida, anion yang dominan adalah Cl dan biasanya memiliki konsentrasi ribuan sampai 10.000 mg/kg, dan pada air asin kandungan atau konsentrasi

Cl dapat mencapai 100.000 mg/k (contoh: Laut Salton, USA). Pada beberapa daerah juga memiliki konsentrasi Cl yang besar dikarenakan air klorida pada daerah tersebut sudah bercampur dengan air laut.

Beberapa unsur utama lain dalam air klorida ini adalah sodium dan potassium dengan rasio perbandingan 10:1. Sebagai kationnya adalah unsur silika (dimana konsentrasinya bertambah seiring meningkatnya kedalaman) dan boron. Sulfat dan kandungan klorida sangat bervariasi. Karbondioksida dan beberapa macam gas hidrogen tingkat rendah adalah kandungan gas utamanya. Pada area dengan kandungan gas yang tinggi, fluida klorida memiliki kandungan bikarbonat dalam jumlah besar dan pendidihan pada kedalaman yang lebih. Walaupun memiliki kandungan bikarbonat yang tinggi, namun keberadaan ion klorida tetap mencegah atau dapat menjadi indikator dalam membedakan air klorida dan air bikarbonat, atau air klorida-bikarbonat.

Air Sulfat (*Sulphate Water*)

Jenis air panasbumi ini dikenal juga dengan Air Asam Sulfat (*Acid-Sulphate Water*), merupakan fluida yang terbentuk pada kedalaman dangkal dan terbentuk sebagai akibat dari proses kondensasi gas panasbumi yang menuju dekat permukaan. Gas panasbumi, dengan kandungan gas dan volatilitasnya, pada dasarnya larut dalam kandungan fluida yang terletak pada zona yang dalam tetapi terpisah dari air klorida.

Air sulfat biasanya ditemukan pada batas daerah dan berjarak tidak jauh dari area *upflow* utama. Jika dilihat dari topografi, maka lokasi pastinya terletak jauh di atas *water table* dan di sekeliling *boiling zone*, walaupun kebanyakan juga sering ditemukan di dekat permukaan (pada kedalaman <100 m). Air sulfat dapat mengalir melewati patahan (*fault*) menuju sistem panasbumi. Pada lokasi inilah, air sulfat dipanaskan, kemudian ambil bagian dalam alterasi batuan dan bercampur dengan air klorida.

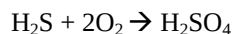
*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Geologi FT Undip

**) Alumni Mahasiswa Teknik Geologi FT Undip

Fluida jenis ini dapat terbentuk oleh dua proses, yaitu:

a. *Steam Heated Acid Sulphate Water*

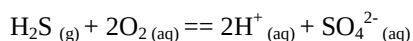
Fluida ini terbentuk ketika uap berkondensasi pada air permukaan. Sulfat terbentuk akibat oksidasi H_2S pada zona vados (zona bawah permukaan di atas muka airtanah). Persamaan reaksi dari proses pembentukan air asam sulfat yang berasal dari uap adalah sebagai berikut:



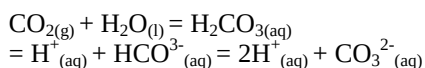
Terbentuknya *steam heated acid sulphate water* berkaitan dengan proses pendidihan/*boiling chloride water* di reservoir pada temperatur $< 300^\circ C$. Karena tidak bersifat volatil pada temperatur $< 300^\circ C$, maka *steam heated acid sulphate water* hanya mengandung sangat sedikit Cl^- . Fluida ini terbentuk pada tempat yang paling dangkal dari sistem panasbumi sehingga tidak dapat digunakan sebagai indikator keadaan reservoir.

b. *Magmatic Acid Sulphate Water*

Fluida ini berasal dari air magmatik yang mengandung gas volatil yang mudah menguap, sehingga H_2O , CO_2 , SO_2 dan HCl berkondensasi menjadi fasa cair pada suhu $> 800^\circ C$ dan terbentuk di sekitar magma (kurang lebih kedalaman 1 hingga 1,5 km). Pada air sulfat ini, SO_4 berperan sebagai anion utama dan terbentuk akibat proses oksidasi dari kondensasi hidrogen sulfida. Adapun persamaan reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Reaksi berikut dan kondensasi dari karbondioksida,



Menghasilkan proton dan membentuk air yang sifatnya asam. Peristiwa oksidasi sulfida menjadi ion sulfat menghasilkan pH minimum yaitu 2,8. Apabila air sulfat memiliki kandungan pH lebih rendah dari 2,8 ($pH < 2,0$), maka gas magmatik berperan besar dalam proses tersebut. Pada sisa-sisa proses oksidasi biasanya dijumpai klorida. Bikarbonat biasanya tidak ada sama sekali dan walaupun ada akan dijumpai dalam konsentrasi yang sangat kecil sekali, karena pada air yang sangat asam, kandungan karbonat biasanya akan hilang dalam larutan dan berubah menjadi karbondioksida. Pada reaksi yang berlangsung dekat dengan permukaan antara air asam dan batuan-batuan di sekelilingnya, dapat melepaskan silika dan kation logam (Na, K, Mg, Ca, Al, Fe) yang dapat memberikan konsentrasi yang tinggi di dalam air.

c. *Air Bikarbonat (Bicarbonate Water)*

Air tipe ini banyak mengandung CO_2 . Jenis tipe fluida ini disebut juga dengan *netral bicarbonate-sulphate waters*, merupakan produk dari proses kondensasi gas dan uap menjadi mataair bawah tanah yang miskin oksigen. Air bikarbonat banyak ditemukan pada area *non-volcanogenic* dengan temperatur yang tinggi.

Dengan pH yang mendekati netral sebagai akibat reaksi dengan batuan lokal (baik pada reservoir dangkal atau selama proses mengalir ke permukaan). Selama reaksi tersebut, proton banyak yang hilang dan menghasilkan air dengan pH mendekati netral dengan bikarbonat dan sodium sebagai parameter utama. Sulfat kebanyakan hadir dengan bermacam-macam jumlah dan kandungan. Klorida memiliki konsentrasi rendah atau tidak ada sama sekali (Mahon, 1980 dalam Nicholson, 1993). Air tipe ini cenderung mudah bereaksi dan sangat korosif (Hedenquist dan Stewart, 1985 dalam Nicholson, 1993).

Hasil Analisis Kimia Fluida

Fluida dari ketiga sumber air panas dianalisis untuk mengetahui unsur kimia yang terkandung didalamnya selanjutnya dapat digunakan untuk perhitungan geotermometer. Hasil dari analisis kimia lima air panas tersebut ditunjukkan oleh tabel 1 (KJ = Karangjaha, KT = Klotok, PR = Pancarusa)

Tabel 1. Hasil analisis kimia unsur

Unsur	KJ1	KJ-2	KT-1	KT-2	PR
SiO ₂	137,82	161,64	135,7	130,5	138,24
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00
Ca	377,00	409,20	109,8	92,70	197,30
Mg	80,00	84,10	35,20	33,80	146,80
Na	653,50	701,50	154,6	142,2	164,50
K	63,31	65,43	27,38	25,85	68,43
Li	2,98	3,18	0,42	0,36	0,13
NH ₃	25,38	26,92	9,62	8,65	7,69
Cl	1001,1	1059,6	266,5	162,5	112,68
SO ₄	1,20	1,53	1,09	1,63	0
HCO ₃	1417,2	1569,7	550,9	643,9	1649,1
H ₂ S	5,38	0,00	2,15	0,00	7,53
B	53,97	68,79	7,74	14,43	20,25
PH lab.	6,8	6,8	7,8	6,36	5,9
DHL, umhos /cm	4100	4350	1330	1325	2100

Keterangan: Kecuali pH dan DHL, semua unsur/senyawa dalam satuan mg/L

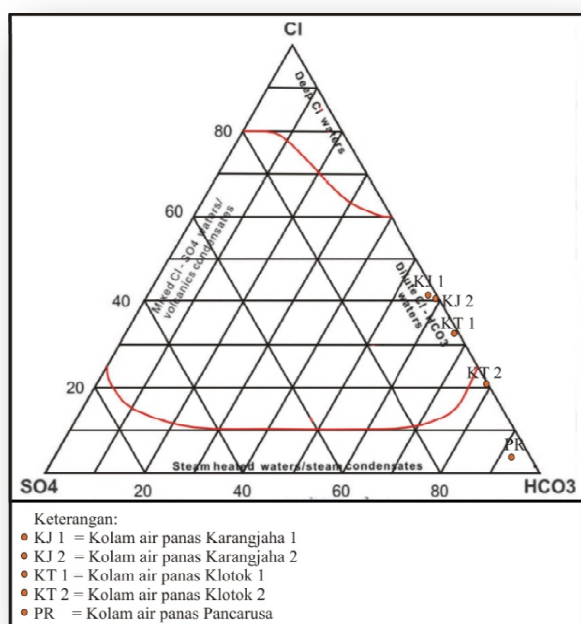
Tipe air panas

Data kimia yang diperlukan dalam penentuan tipe fluida reservoir adalah kandungan relatif dari klorida (Cl), bikarbonat (HCO_3) dan sulfat (SO_4). Pengolahan data dilakukan dengan menghitung persentase unsur

Cl, HCO₃ dan SO₄ (Tabel 2). Kemudian data tersebut diplot dalam diagram segitiga Giggenbach (Gbr 1).

Tabel 2 Persentase anion utama dari 5 mataair

Lokasi	%Cl	%SO ₄	%HCO ₃
Karangjaha 1	41.38	0.05	58.57
Karangjaha 2	40.28	0.06	59.67
Klotok 1	32.56	0.13	67.31
Klotok 2	20.34	0.20	79.46
Pancarusa	6.40	0.00	93.60



Gambar 1

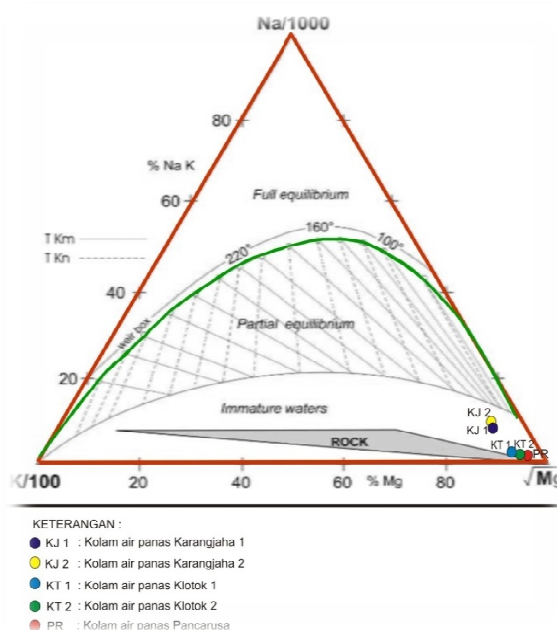
Diagram ternary kandungan unsur Cl-SO₄-HCO₃ dalam air panas di Kendalisada dan sekitarnya

Dari hasil analisis kimia fluida air panas yang terdapat pada daerah penelitian diketahui bahwa jenis fluida panasbumi yang ada pada daerah Kendalisada dan sekitarnya merupakan fluida air bikarbonat dan *dilute chloride water*, karena dari hasil analisis kimia diketahui unsur HCO₃ (bikarbonat) merupakan unsur yang paling dominan untuk PR dan KT 2, sedang untuk mataair KT 1, KJ1, dan KJ 2 anion utamanya adalah Cl dan HCO₃

Air bikarbonat dari dua mataair panas termasuk dalam *zona steam heated water/steam condensates*. Proses yang terjadi pada zona ini adalah pemanasan air meteorik oleh sumber panas yang berada di bawahnya, air tersebut menguap dan mengalami kondensasi kemudian muncul ke permukaan dengan kandungan unsur HCO₃ yang dominan.

Diagram segitiga dari Na/1000-K/100-Mg^{1/2} yang ditunjukkan oleh Giggenbach (1988) merupakan sebuah metode yang digunakan untuk pendugaan tem-

peratur reservoir dan untuk mengetahui air yang mencapai keseimbangan dalam litologi. Dari data dan perhitungan persentase kandungan ketiga unsur tersebut, dilakukan pengeplotan pada diagram segitiga Na/1000-K/100-Mg^{1/2} (gambar 2) untuk setiap sampel mataair panas.



Gambar 2

Diagram ternary kandungan unsur Na, K, Mg dalam air panas di Nglimit dan sekitarnya

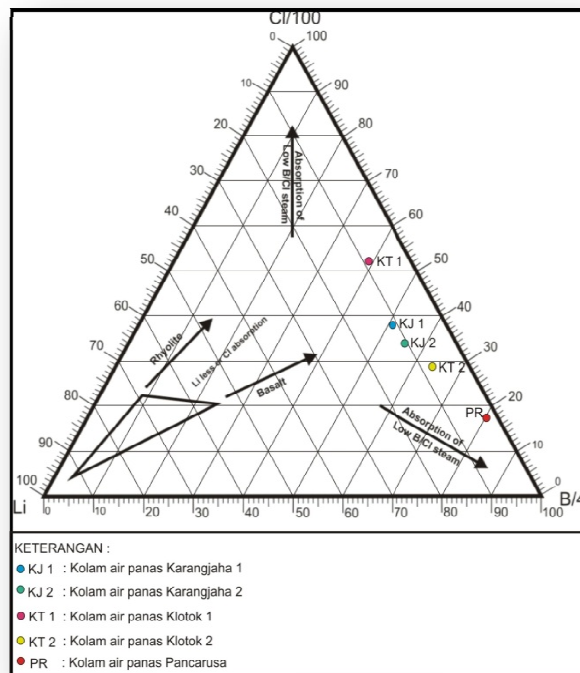
Berdasarkan hasil perhitungan kandungan relatif Na/1000-K/100-Mg^{1/2} serta setelah dilakukan pengeplotan hasil nilai pada segitiga Na-K-Mg, seluruh mataair panas terletak pada sudut *immature water*, memperlihatkan bahwa temperatur manifestasi yang muncul ke permukaan cenderung rendah serta dipengaruhi interaksi antara fluida hidrotermal dengan unsur-unsur dalam batuan yang dilewati seperti silika. Kondisi *immature water* juga menunjukkan bahwa batuan reservoir terletak pada kondisi temperatur dan tekanan yang tinggi dimana sebelum mencapai permukaan juga telah mengalami pengenceran oleh air permukaan (*meteoric water*).

Diagram segitiga Cl-Li-B

Diagram segitiga Cl-Li-B digunakan untuk mengevaluasi proses pendidihan dan pengenceran berdasarkan perbandingan konsentrasi Cl/100, Li, dan B/4 yang telah diubah dalam satuan persen. Dari data dan perhitungan persentase kandungan ketiga unsur tersebut (Tabel 3) dilakukan pengeplotan pada diagram segitiga Cl/100 – Li – B/4 (gambar 3) untuk setiap sampel mataair panas.

Posisi ketiga kolam air berada pada bagian kanan segitiga yang berdekatan dengan sisi *Absorption of low B/Cl steam*. Hasil pemplotan data pada Medini-1 dan medini-2 terlihat dominan menuju ke arah sudut B/4 yang menunjukkan proses penyerapan gas magmatik dengan rasio B/Cl tinggi. Hasil pengeplotan data pada Gonoharjo-1 menunjukkan titiknya yang

berada pada tengah tengah sudut Cl dan sudut B/4 yang menunjukkan proses penyerapan gas magmatik dengan rasio B/Cl seimbang.



Gambar 3

Diagram ternary kandungan unsur Cl-Li-B dalam air panas di Kendalisada dan sekitarnya

Dari hasil pengeplotan ini dapat diketahui bahwa proses yang terdapat pada daerah penelitian umumnya terjadi pada zona tepi (*outflow*). Hal ini disebabkan konsentrasi Cl kurang dominan sehingga mengindikasikan lokasi penelitian berada cukup jauh dari aliran utama dari sistem panasbumi. Kandungan B/4 pada mataair Pancarusa lebih dominan dibandingkan Klotok dan Karangjaha menunjukkan pada lokasi tersebut aktivitas pengenceran lebih dominan yang menyebabkan unsur non volatil Cl menjadi berkurang serta lokasi Pancarusa terletak lebih jauh dari aliran utama sistem panasbumi dibandingkan lokasi Karangjaha dan Klotok.

Perhitungan Geotermometer Na-K-Ca

Selanjutnya dari analisis kimia tersebut dapat diketahui suhu (T) reservoir. Suhu (T) diketahui berdasarkan perhitungan geotermometer Na-K-Ca. Rumus dari perhitungan geotermometer Na-K-Ca adalah:

$$T^{\circ}\text{C Na-K-Ca} = \frac{1647}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} + \beta \left[\log \left(\frac{\text{Ca}^{1/2}}{\text{Na}} \right) + 2,06 \right] + 2,47} - 273$$

Hasil dari perhitungan geotermometer Na-K-Ca ditunjukkan oleh tabel 3

Untuk mengetahui suhu reservoir, digunakan perhitungan geotermometer Na-K-Ca. Digunakannya perhitungan geotermometer Na-K-Ca karena dari hasil analisis unsur diketahui unsur kation Na-K-Ca banyak terkandung dan mendominasi dibandingkan

unsur kation yang lain serta dijumpainya endapan travertine.

Penentuan temperatur reservoir dapat dilakukan dengan menggunakan perhitungan geotermometer Na-K-Ca. Hal ini dilakukan karena komposisi Ca dalam fluida panasbumi relatif besar. Dalam kondisi ini, Na-K-Ca menggantikan mineral silikat ketika terjadi reaksi pertukaran ion. Menurut Fournier dan Truesdell (dalam Nicholson, 1993) rumus geotermometer Na-K-Ca dapat digunakan dengan asumsi sebagai berikut:

- Adanya kelebihan silika dalam fluida panasbumi yang akan digunakan untuk perhitungan geotermometer.
- Aluminium (Al) dalam kondisi solid (konsentrasi dalam fluida sangat sedikit).

Perhitungan dilakukan berdasarkan rumus:

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} + \beta \left[\log \left(\frac{\text{Ca}^{1/2}}{\text{Na}} \right) + 2,06 \right] + 2,47} - 273,15$$

Hasil perhitungan geotermometer Na-K-Ca tercantum pada tabel 3

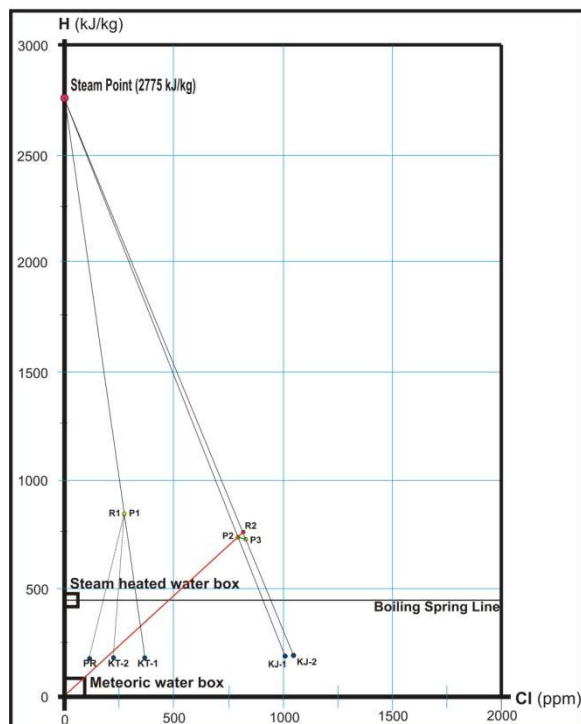
Tabel 3 Hasil Geotermometer Na-K-Ca

Lokasi	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	T
KJ-1	653.50	63.31	377.00	176.68 °C
KJ-2	701.50	65.43	409.20	175.19 °C

Berdasarkan hasil perhitungan geotermometer, reservoir panasbumi memiliki temperatur yang relatif sedang, yaitu 175,19°C. Endapan travertin (CaCO_3) ditemukan di permukaan. Hal ini menyebabkan konsentrasi CaCO_3 pada fluida panasbumi di permukaan menjadi berkurang atau lebih kecil dari pada konsentrasi CaCO_3 pada fluida panasbumi di bawah permukaan. Konsentrasi CaCO_3 berbanding terbalik dengan temperatur pembentukannya. Semakin tinggi konsentrasi CaCO_3 , semakin rendah temperatur pembentukannya. Sebaliknya, semakin rendah konsentrasi CaCO_3 , semakin tinggi temperatur pembentukannya. Konsentrasi CaCO_3 di bawah permukaan relatif lebih rendah dari pada konsentrasi CaCO_3 di permukaan. Hal ini mengakibatkan temperatur reservoir di bawah permukaan menjadi lebih rendah, yaitu kurang dari 175,19°C. Berdasarkan nilai temperatur reservoir tersebut dapat diketahui bahwa sistem panasbumi Kendalisodo termasuk sistem panasbumi temperatur sedang (Hochstein, 1990).

Berdasarkan hasil pengeplotan pada diagram Entalpi-Cl (gambar 4), dapat diketahui bahwa terdapat dua pola pencampuran fluida di area prospek panasbumi Kendalisodo, yaitu pola 1 pada konsentrasi Cl rendah (< 500 ppm) dan pola 2 pada konsentrasi Cl tinggi (> 100 ppm). Pola 1 memiliki *parent fluid* pada P1 yang juga diasumsikan sebagai kondisi reservoir (R1) dari pola tersebut. Fluida pada P1 mengalami prose pendidihan dan muncul ke permukaan sebagai mataair panas KT-2. Proses selanjutnya yang terjadi adalah pengenceran oleh air meteorik yang menyebabkan

penurunan konsentrasi Cl. Fluida panasbumi kemudian muncul ke permukaan sebagai mataair panas KT-1. Proses pengenceran masih berlanjut dan fluida panasbumi kembali muncul ke permukaan sebagai mataair panas PR dengan konsentrasi Cl yang semakin menurun. Selain proses pengenceran, penurunan konsentrasi Cl pada fluida panasbumi juga disebabkan oleh interaksi fluida tersebut dengan batuan sampling sebelum fluida muncul ke permukaan. Unsur-unsur yang berbeda dalam batuan larut ke dalam fluida dan menurunkan konsentrasi unsur kimia yang terdapat dalam fluida, salah satunya konsentrasi Cl.



Gambar 4

Diagram Entalpi-Cl mataair panas di sekitar Gunung Kendalisodo

Pola selanjutnya adalah Pola 2 yang memiliki *parent fluid* P2 dan P3 dengan kondisi reservoir R2. Fluida pada reservoir mengalami proses pengenceran sehingga menyebabkan penurunan entalpi dan penurunan konsentrasi Cl. Kondisi reservoir berubah dari R2 menjadi P2. Fluida dari P2 tersebut kemudian muncul ke permukaan sebagai mataair panas KJ-1. Fluida panasbumi pada P2 kemudian mengalami proses pendidihan yang menyebabkan penurunan nilai entalpi dan peningkatan konsentrasi Cl. Kondisi P2 berubah menjadi P3. Fluida panasbumi pada P3 kemudian muncul ke permukaan sebagai mataair panas KJ-2.

Kesimpulan

1. Air panas pada manifestasi tersebut umumnya memiliki pH 7 (netral) dengan temperatur antara 36° C – 40° C, dan debit antara 0,0001 m³/s sampai 0,014 m³/detik.

2. Air panas pada mataair Klotok-1, Klotok-2, dan Pancarusa termasuk tipe air bikarbonat. Air panas pada mataair panas Karangjaha-1 dan Karangjaha-2 termasuk tipe air klorida bikarbonat.
3. Sistem panasbumi Kendalisodo memiliki temperatur reservoir sebesar 175,19°C.
4. Sistem panasbumi Kendalisodo merupakan sistem yang terpisah dengan sistem panasbumi Ungaran berdasarkan analisis kimia fluida panasbumi.

Daftar Pustaka

1. Fournier, Robert O. 1989. *Water Geothermometers Applied to Geothermal Energy*. USA: US Geological Survey.
2. Giggenbach, WF. 1988. *Chemical Techniques in Geothermal Exploration*. New Zealand: Chemistry Division, DSIR, Private Bag.
3. Hochstein, Manfred P and Patrick R.L. Browne. 2000. *Surface Manifestations of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources* in Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press.
4. Mahon K, and Ellis, AJ. 1977. *Chemistry and Geothermal System*. Orlando: Academic Press Inc.
5. Marini, Luigi. Tanpa Tahun. *Geochemical Techniques for the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy*. Genova – Italy: Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova.
6. Nicholson, Keith. 1993. *Geothermal Fluids, Chemistry & Exploration Techniques*. Berlin: Springer Verlag, Inc.