

**STUDI PENDAHULUAN DAERAH PROSPEK PANASBUMI
BERDASARKAN DATA MANIFESTASI PANASBUMI, GEOKIMIA DAN
ISOTOP FLUIDA PANASBUMI KOMPLEK GUNUNG TELOMOYO,
KABUPATEN SEMARANG, JAWA TENGAH**

Oleh :

Rizki Trisna Hutami, Yoga Aribowo*, Dian Agus Widiarso*
(corresponding email: rizkitrisna@windowslive.com)*

** Program Studi Teknik Geologi Universitas Diponegoro, Semarang*

ABSTRACT

Telomoyo Mountain (area) is one of geothermal prospect area in Indonesia which is shown by many geothermal manifestations around the mountain. Telomoyo Mountain (area) is located in two regencies, Semarang and Magelang, Central Java. The purpose of this study is to get vision about geothermal model system in Telomoyo Mountain based on geothermal manifestation data, geothermal fluid geochemistry, and geothermal fluid isotope.

Based on manifestation mapping there are two kinds of manifestation, warm spring and alteration. Warm springs are spread in Candi Dukuh and Candi Umbul with neutral pH characteristic and 36°C water temperature. Based on fluid geochemistry analysis the type of fluid is chloride-bicarbonate water, and based on Na-K-Mg comparison the fluid is immature water. Based on isotope ¹⁸O and ²H analysis, warm spring has mixed with meteoric water. Altered rocks are found in Desa Dangkel, Desa keningar, Desa Sepakung, and Desa Kendal Duwur with the type of alteration is argillic – advanced argillic. Based on petrography analysis, lithology in this area are andesitic lava, tuff breccia, and pyroclastic breccia. Based on XRD analysis, altered minerals in rock which is argillic type are smectite, halloysite, kaolinite, and jarosite. In rock which has advanced argillic type, there are dickite, phyroPhillite, alunite, diaspora, cristobalite, and pyrite. Dickite and alunite mineral are typical mineral for physicochemical environment with acid in pH and 230 – 260 °C in temperature. Candi Umbul and Candi Dukuh warm spring shows the lateral outflow zone of the geothermal system, while advanced argillic alteration shows the upflow zone of geothermal system.

Keywords: *Geothermal system, manifestation, fluid geochemistry, altered rocks, fluid isotope.*

I. PENDAHULUAN

Komplek Gunung Telomoyo merupakan salah daerah prospek panasbumi ditunjukkan dengan kemunculan manifestasi panasbumi ke

permukaan berupa mataair hangat dan alterasi batuan.

Adanya suatu sistem panasbumi di bawah permukaan sering kali ditunjukkan oleh adanya

manifestasi panasbumi di permukaan (*geothermal surface manifestation*). Studi mengenai sistem panasbumi dapat dilakukan dengan analisis kimia fluida panasbumi, isotop fluida, dan mineral alterasi pada batuan. Analisis kimia fluida dilakukan untuk mengetahui tipe fluida dan kedudukan manifestasi dalam sistem panasbumi, analisis isotop fluida dilakukan untuk mengetahui asal usul fluida, sedang analisis mineral alterasi pada batuan untuk mengetahui interaksi fluida dengan batuan.

II. LOKASI PENELITIAN

Lokasi penelitian terletak pada Komplek Gunung Telomoyo pada Gambar 1. Gunung Telomoyo memiliki ketinggian 1894 mdpl. terletak diantara Gunung Ungaran dan Gunung Merbabu dengan wilayah administrasi termasuk Kabupaten Semarang dan Kabupaten Magelang. Lokasi penelitian terletak dengan posisi koordinat UTM yaitu X = 422000 – 437000 mT dan Y = 9185000 – 9193000 mU.

III. GEOLOGI REGIONAL

Secara fisiografi Komplek Gunung Telomoyo termasuk dalam Zona Solo. Barisan Gunungapi Merapi – Telomoyo menempati ujung barat dari Zona Solo (Bemmelen, 1949). Zona ini terbentuk pada suatu kompleks gunungapi yang memanjang berarah baratlaut-tenggara yaitu rangkaian Gunung Ungaran – Gunung Telomoyo - Gunung Merbabu - Gunung Merapi yang berada pada lingkungan geologi vulkanik Kuartar.

Gunung Telomoyo terbentuk di atas runtuh lereng Gunung Soropati (1300 meter). Gunung Soropati adalah

gunungapi di deretan Ungaran-Soropati-Merbabu-Merapi. Menurut Bemmelen (1941) aktif pada jaman Plistosen Tengah-Atas yang kemudian runtuh karena letusan dan *collapse* di lereng bagian timur dan meninggalkan depresi berbentuk U. Gunung Soropati saat ini hanyalah sebagai dinding kaldera, lalu menjelang Holosen, gunung Telomoyo (1894 mdpl) terbentuk di dinding runtuh Soropati.

Menurut Bemmelen, 1949 asal magma dari Gunung Soropati yaitu *olivine basaltic*, sedangkan pada Telomoyo telah mengalami diferensiasi menjadi lebih asam (*augite-hypersthene-hornblende andesites*).

IV. TINJAUAN PUSTAKA

4.1 Sistem Panasbumi

Menurut Nicholson (1993) sistem panasbumi meliputi sumber panas dan fluida yang memindahkan panas mengarah ke permukaan. Adanya konsentrasi energi panas pada sistem panasbumi umumnya dicirikan oleh adanya anomali panas yang dapat terekam di permukaan, yang ditandai dengan gradien temperatur yang tinggi.

Sistem panasbumi memiliki empat komponen utama, yaitu:

1. *Heat source* (sumber panas) umumnya berupa sumber panas magmatik (pluton, intrusi)
2. Batuan reservoir merupakan suatu volume batuan yang mengandung fluida (air panas, uap, gas) dan darinya panas dapat diekstraksi.
3. Fluida, merupakan, media di mana panas dapat diekstraksi. Fluida bergerak dari recharge area

- (daerah tangkapan air) menuju reservoir karena gradien hidrolik
4. Batuan penutup (*cap rock*) merupakan tubuh batuan *impermeable*, yang menutup reservoir sehingga panas fluida dalam reservoir dapat dicegah untuk keluar secara langsung ke permukaan.

4.2 Fluida Panasbumi

Banyak sistem panasbumi mengekspresikan dirinya melalui fluida pada manifestasi permukaan. Fluida tertentu dapat berasal dari bagian dalam atau bagian luar reservoir, sehingga fluida yang berasal dari bagian dalam reservoir dapat digunakan untuk interpretasi keadaan reservoir. Fluida hidrothermal dapat didefinisikan sebagai larutan *aqueous* panas (~50 sampai >500°C), yang memiliki komposisi zat terlarut yang umumnya mengalami presipitasi (Pirajno, 2009).

Berdasarkan jumlah anion yang dominan fluida panasbumi dapat dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu:

a. 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 konduit). 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/kg (contoh: Laut Salton, USA).

b. 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*.

c. Air Bikarbonat (*Bicarbonate Water*)

Air tipe ini banyak mengandung CO₂. 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).

4.3 Alterasi Batuan

Pirajno (1992) menyebutkan bahwa alterasi hidrotermal adalah suatu proses perubahan secara mineralogi, kimia dan tekstur yang terjadi akibat interaksi antara larutan hidrotermal dengan batuan sampling yang dilaluinya pada kondisi kimia-fisika tertentu. Reyes (1990) mengemukakan adanya mineral-mineral hidrotermal petunjuk temperatur dimana mineral tersebut merupakan mineral dasar yang terbentuk dari hasil ubahan batuan pada kondisi asam – netral.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi perubahan yang terjadi pada batuan akibat naiknya fluida hidrotermal, antara lain:

1. Temperatur dan tekanan pada saat reaksi berlangsung
2. Sifat kimia larutan hidrotermal (EH, pH)
3. Konsentrasi larutan hidrotermal
4. Komposisi batuan sampling
5. Durasi aktivitas hidrotermal
6. Permeabilitas

4.4 Isotop ^{18}O dan ^2H

Komposisi isotop ^{18}O dan ^2H (*deuterium*) dalam air, dapat

digunakan untuk mengetahui karakteristik air hujan di suatu wilayah. Air hujan yang jatuh di suatu wilayah mempunyai hubungan linier antara komposisi isotop ^{18}O dan *deuterium*-nya. Hubungan ini dinyatakan dengan persamaan $\delta D = A \delta^{18}\text{O} + C$.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Badan Tenaga Atom Internasional atau IAEA (*International Atomic Energy Agency*) dan WMO (*World Meteorological Organization*), air hujan di seluruh dunia mempunyai hubungan linier antara komposisi isotop ^{18}O dan Deuterium sebagai berikut:

$$\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

δD = konsentrasi Deuterium dalam air hujan

V. METODOLOGI

Metode yang digunakan pada penelitian adalah pemetaan manifestasi, dan melakukan analisis dengan analisis kimia fluida, analisis petrografi, analisis XRD (*X-Ray diffraction*), analisis isotop ^{18}O dan ^2H . Analisis kimia fluida dan isotop dilakukan pada dua sampel air mataair hangat yaitu Candi Umbul dan Candi Dukuh, analisis petrografi dilakukan pada 12 sampel batuan di daerah penelitian dan analisis XRD dilakukan pada tiga sampel batuan alterasi.

Analisis kimia fluida dilakukan untuk mengetahui tipe fluida, analisis petrografi dan XRD dilakukan untuk mengetahui mineralogi pada batuan khususnya mineral alterasi, kemudian analisis isotop dilakukan untuk mengetahui asal-usul fluida dan pencampuran dengan air meteorik.

VI. PEMBAHASAN

5.1 Geologi Daerah Penelitian Geomorfologi

Berdasarkan hasil analisis data geomorfologi menurut klasifikasi Van Zuidam (1983), daerah penelitian dapat dibedakan menjadi lima satuan bentuklahan yaitu Satuan Bentuklahan Dataran Fluvial, Satuan Bentuklahan Bergelombang Landai Vulkanik, Satuan Bentuklahan Bergelombang Miring Vulkanik, Satuan Bentuklahan Berbukit Terjal Vulkanik, dan Satuan Bentuklahan Pegunungan Sangat Terjal Vulkanik.

Bentuklahan vulkanik yang terbentuk pada daerah penelitian karena adanya aktivitas vulkanisme gunungapi. Proses vulkanisme ini dicirikan dengan litologi penyusun daerah ini berupa batuan vulkanik yang terdiri dari lava andesit dan piroklastik yang merupakan produk dari proses vulkanisme.

Litologi

Litologi daerah penelitian dibagi menjadi empat satuan berdasarkan pengamatan lapangan yaitu satuan lava andesit, satuan breksi tuf, satuan breksi piroklastik dan satuan alluvial.

Satuan lava andesit menempati Gunung Telomoyo dan Pegunungan Kelir. Satuan ini membentuk morfologi perbukitan terjal pada Gunung Telomoyo. Satuan ini tersingkap di atas breksi tuf.

Satuan breksi tuf dijumpai di sekitar Candi Dukuh dan Desa Sepakung dengan kenampakan singkapan berwarna kuning kemerahan, memiliki fragmen berukuran lapilli (2 – 64 mm) hingga bom (>64 mm), dan massa dasar berupa debu (<2 mm) dengan

presentase 65% massa dasar dan 35% fragmen, derajat pemilahan buruk, derajat kebundaran menyudut - menyudut tanggung.

Satuan breksi piroklastik tersebar dibagian barat dan selatan daerah penelitian. Singkapan breksi piroklastik dapat dijumpai di sekitar mataair Candi Umbul di sepanjang Kali Elok, memiliki kenampakan berwarna abu kehitaman, derajat pemilahan buruk, derajat kebundaran menyudut, dengan komposisi berupa massa dasar berukuran debu (<2mm) dengan presentase <25% dan fragmen berupa batuan andesit berukuran bom atau bongkah (>64 mm).

5.2 Sebaran Manifestasi

Manifestasi panasbumi di daerah penelitian yaitu mataair hangat dan batuan alterasi pada Gambar 2. Mataair hangat terdapat di dua lokasi yaitu Candi Umbul dan Candi Dukuh sedangkan batuan alterasi ditemukan menyebar di empat lokasi yaitu Desa Keningar, Desa Dangkel, Desa Sepakung dan Desa Kendal Duwur.

Mataair hangat Candi Umbul dan Candi Dukuh memiliki suhu yang hampir sama yaitu 36°C. Mataair hangat Candi Dukuh berada di bagian utara daerah penelitian dimana terletak di bagian kaki lereng Pegunungan Kelir. Mataair hangat Candi Dukuh memiliki warna yang agak keruh dengan suhu berkisar 36°C dan pH netral 7,30. Dimensi dari kolam mataair ± 2 meter x 3 meter dengan kedalaman 68 cm, debit air yang keluar 0.1 L/s.

Mataair hangat Candi Umbul terletak di Desa Kartoharjo, Kecamatan Grabag, Kabupaten Magelang, di sisi barat daya Gunung

Telomoyo. Kenampakan dari mataair hangat berwarna hijau keruh dengan pH 7.45, dimensi kolam mataair 16 m x 8 m dan debit air 8.5 L/s.

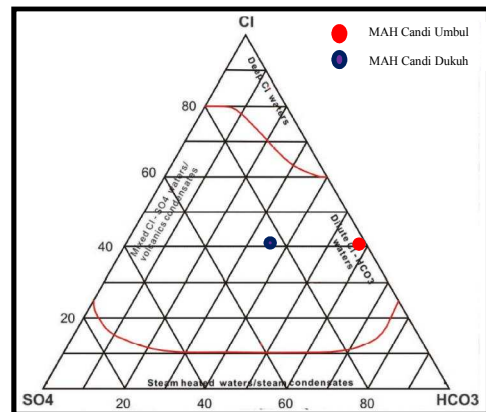
Analisis Kimia Fluida

Analisis kimia fluida dilakukan pada sampel air manifestasi mataair hangat Candi Umbul dan Candi Dukuh dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis Karakteristik Kimia Mataair Hangat

No	Parameter (mg/L)	MAH Candi Umbul (mg/L)	MAH Candi Dukuh (mg/L)
1	SiO ₂	0.020	0.130
2	Al	0.006	0.014
3	Fe	0.230	0.540
4	Ca	24.567	68.050
5	Mg	3.230	36.530
6	Na	20.305	27.676
7	K	3.450	7.450
8	Cl	17.430	40.130
9	SO ₄	26.755	43.198
10	HCO ₃	21.077	36.340
11	CO ₃	0.009	0.460

Tipe fluida panasbumi dapat diketahui dengan membandingkan konsentrasi anion Cl - SO₄ - HCO₃ dengan menggunakan diagram *ternary* Giggenbach, 1991 pada Gambar 3.

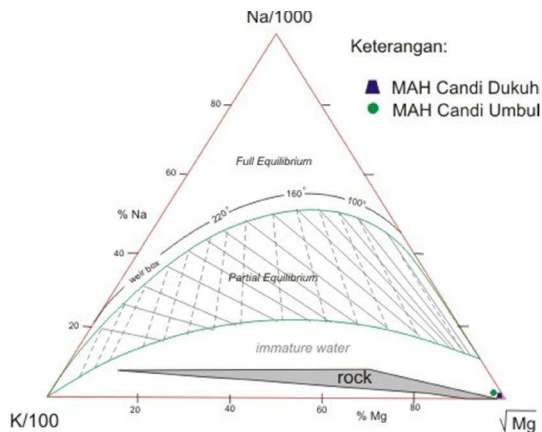


Gambar 3. Diagram *ternary* Cl - SO₄ - HCO₃ mataair hangat Candi Umbul - Candi Dukuh

Hasil dari diagram di atas menunjukkan mataair hangat Candi Umbul dan Candi Dukuh termasuk dalam tipe air Klorida - Bikarbonat, dimana air ini terbentuk karena adanya pengenceran dari unsur klorida oleh air meteorik selama mengalir ke permukaan.

Adanya unsur bikarbonat dalam air merupakan hasil kondensasi uap di bawah muka airtanah, dimana akan bergerak mengikuti gradien muka airtanah, semakin jauh maka pengaruh airtanah akan semakin besar.

Kedua mataair diindikasikan merupakan zona *outflow* dari sistem panasbumi Telomoyo berdasarkan tipe fluidanya yaitu klorida-bikarbonat dan merupakan *immature water* dimana fluida reservoir telah mengalami pencampuran dengan air yang lebih dangkal dengan konsentrasi silika yang rendah. Hal ini diketahui dengan pengeplotan unsur Na - K - Mg pada diagram *ternary* Giggenbach (1988) pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Na – K – Mg mataair hangat Candi Umbul – Candi Dukuh

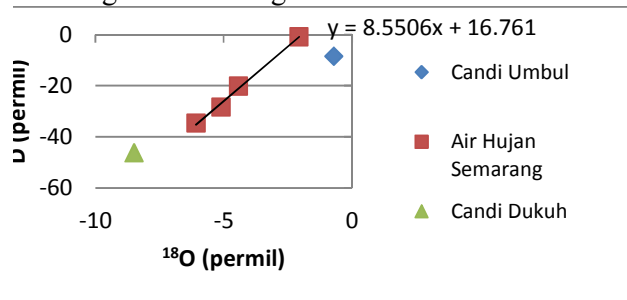
Pada Gambar 4. mataair hangat Candi dukuh dan Candi Umbul berada pada sudut Mg, namun mataair hangat Candi Dukuh berada di sudut Mg yang lebih dalam dibanding Candi Umbul. Dapat diindikasikan mataair hangat Candi Umbul dan Candi Dukuh terjadi reaksi pelarutan dari batuan yang dilaluinya di dekat permukaan ataupun pengenceran oleh airtanah yang memiliki konsentrasi Mg tinggi dengan tingkat pelarutan di Candi Dukuh lebih intensif dari Candi Umbul.

Analisis isotop stabil ^2H (D) dan ^{18}O dalam sistem panasbumi dimaksudkan untuk mengavaluasi asal-usul fluida panasbumi. Sampel isotop didapatkan dari mataair hangat Candi Umbul dan Candi Dukuh. Data hasil isotop daerah Telomoyo dapat dilihat di tabel 2.

Tabel 2. Nilai D dan ^{18}O manifestasi mataair hangat

KODE SAMPEL	δD (permil)	$\delta^{18}\text{O}$ (permil)
MAH Candi Umbul	-8.5	-0.71
MAH Candi Dukuh	-46.3	-8.04

Data hasil analisis isotop fluida pada tabel 5 selanjutnya dibuat grafik kemudian dibandingkan dengan isotop dari sampel air hujan Semarang yang diambil di 4 lokasi oleh BATAN, dengan hasil sebagai berikut.



Gambar 5. Grafik isotop ^{18}O terhadap Air mataair hangat Candi Umbul dan Candi Dukuh pada grafik Gambar 5. terletak di sekitar garis air meteorik lokal Semarang menandakan bahwa interaksi fluida hidrotermal dengan air meteorik sudah sangat dominan.

Alterasi Batuan

Alterasi batuan ditemukan menyebar di lereng Pegunungan Kelir pada dinding kaldera yaitu Desa Dangkel, Desa Keningar, Desa Sepakung dan Desa Kendal Duwur. Penyebaran dari keempat alterasi tersebut mengindikasikan adanya rekahan-rekahan pada batuan di sekitar lereng Pegunungan Kelir. Struktur kaldera yang terbentuk menjadi zona lemah batuan yang memungkinkan sebagai jalur larutan hidrotermal untuk keluar.

Pada Desa Dangkel ditemukan alterasi pada batuan andesit Mineral yang muncul dari hasil XRD yaitu smektit, kaolinite, hematite, halloysite, dan jarosite.

Alterasi kedua ditemukan di Desa Keningar, singkapan berupa andesit Mineral hasil pembacaan XRD pada batuan yaitu smektit, dickite, palygorskite, diaspora, cristobalite, halotricite, kieserite.

Alterasi ketiga yang ditemukan yaitu di Desa Kendal Duwur dengan litologi penyusunnya berupa andesit. Mineral hasil pembacaan XRD pada batuan yaitu smektit, dickite, alunite, pirit, Pyrophyllite, hematit.

Alterasi keempat ditemukan di Desa Sepakung dengan batuan penyusun berupa andesit. Batuan tersingkap di lereng bagian timur Pegunungan Kelir

Berdasarkan karakteristik dari mineral ubahan yang ditemukan di desa Dangkel, desa Keningar dan Kendal Duwur maka kumpulan mineral sekunder yang hadir pada daerah penelitian tersebut dikelompokkan menjadi zona argillik dan argillik lanjut berdasarkan klasifikasi Corbett dan Leach (1998) dengan penjelasan berikut ini:

1. Zona argillik terdapat di Desa Dangkel dicirikan dengan mineral yang muncul yaitu smektit, kaolinite, dan halloysite. Kisaran temperatur asosiasi mineral-mineral yang ditemukan berkisar $100-150^{\circ}\text{C}$ berdasarkan tabel kisaran temperature pembentukan mineral Reyes (1990).
2. Zona argillik lanjut terdapat di Desa Keningar dan Kendal Duwur dengan mineral penciri yang ditemui yaitu dickite, alunite, diaspora, dan phyrophyllite. Kisaran temperatur dari asosiasi mineral ini adalah $230^{\circ}\text{C} - 260^{\circ}\text{C}$ berdasarkan tabel kisaran

temperature pembentukan mineral Reyes (1990).

5.3 Model Sistem Panasbumi

Model sistem panasbumi Komplek Gunung Telomoyo pada Gambar 6. dibuat berdasarkan sebaran lokasi dan karakteristik manifestasi Keberadaan manifestasi alterasi batuan yang menunjukkan zona *upflow* mengindikasikan adanya proses *boiling* di reservoir yang menghasilkan *steam* kondensat asam. Hasil analisis geokimia fluida didapatkan tipe fluida yang muncul ke permukaan bertipe klorida-bikarbonat yang merupakan zona keluaran *lateral outflow* dari sistem.

Temperatur reservoir berdasarkan kehadiran alterasi bertipe argillik-argillik lanjut juga menunjukkan kisaran temperatur $230-260^{\circ}\text{C}$. Zona argillik-argillik lanjut mengindikasikan adanya uap air yang mengalir langsung ke permukaan mengalami kondensasi dengan air tanah dan air permukaan yang menyebabkan terjadinya proses oksidasi yang mengubah H_2S menjadi H_2SO_4 . Alterasi argillik-argillik lanjut berada pada zona *upflow* menandakan jauh di bawahnya terdapat zona reservoir yang mengalami *boiling* sehingga fluida menjadi dua fasa yaitu uap dan air, uap air naik ke permukaan. Terbentuknya mineral-mineral lempung akibat ubahan hidrotermal mengakibatkan permeabilitas batuan semakin rendah. Batuan yang teralterasi pada zona argillik-argillik lanjut ini dapat menjadi *clay cap* dan menjadi zona penudung reservoir.

Litologi penyusun berupa lava andesit yang tebal memiliki

permeabilitas yang buruk dan menjadi batuan penudung yang baik untuk sistem panasbumi Komplek Telomoyo. Batuan piroklastik yang terdapat dibawah lava andesit yang tebal dimungkinkan menjadi reservoir yang potensial dalam sistem panasbumi kompleks Telomoyo.

VII. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan dan analisis yang dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Manifestasi panasbumi Komplek Telomoyo yang ditemui yaitu mataair hangat dan alterasi batuan. Mataair hangat tersebar di Candi dukuh dan Candi Dukuh sedangkan alterasi batuan ditemukan di Desa Dangkel, Keningar, Sepakung dan Kendal Duwur.
2. Fluida mataair hangat Candi Dukuh dan Candi Umbul bertipe klorida-bikarbonat.
3. Berdasarkan isotop ^{18}O dan ^2H fluida mataair hangat Candi Dukuh dan Candi Umbul menunjukkan bahwa fluida telah mengalami pencampuran dengan air meteorik.
4. Alterasi batuan bertipe argillik-argillik lanjut. Mineral ubahan pada zona argillik adalah smektit, kaolinite, pirit, halloysite, jarosite dengan kisaran temperatur $<100-150^\circ\text{C}$. Mineral ubahan pada zona argillik lanjut adalah dickite, alunite, diaspora, phyrophyllite, pirit, smektit, jarosite, hematit dengan kisaran temperatur $230 - 260^\circ\text{C}$.
5. Manifestasi mataair hangat Candi Umbul dan Candi Dukuh merupakan zona keluaran tepi

(*lateral outflow*) dari sistem, sedangkan zona alterasi argillik-argillik lanjut merupakan zona keluaran langsung (*upflow*) yang berada di atas zona *boiling* dari suatu reservoir.

DAFTAR PUSTAKA

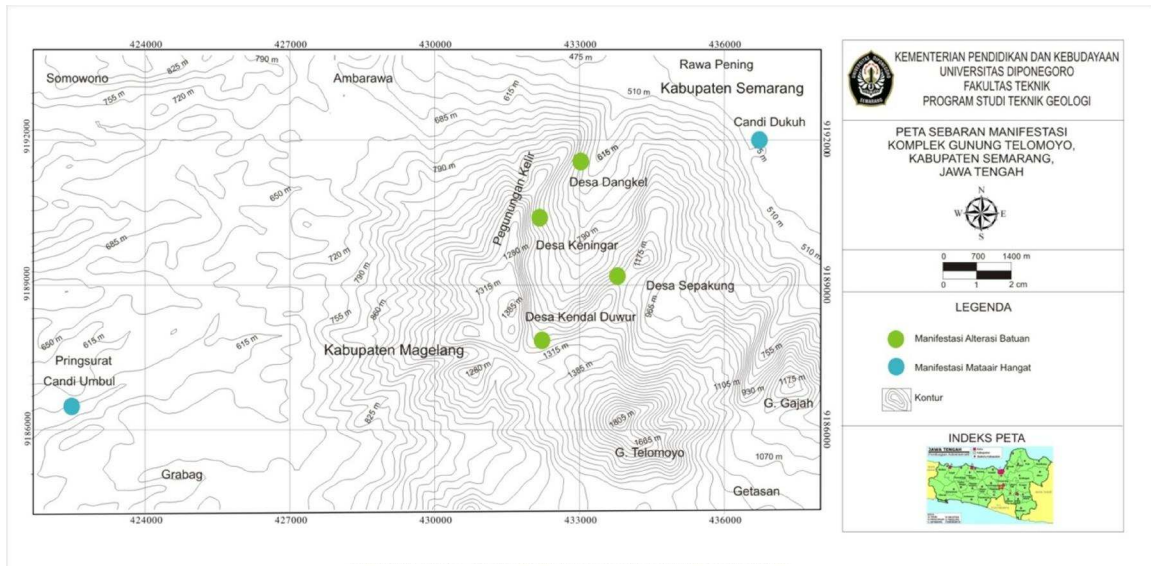
- Bemmelen R. W., 1959. *The Geology of Indonesia*, vol. I-A General Geology, Government Print. Office, The Hague Netherland.
- Chen. P. Y. 1997. *Table of Key Lines in X-ray Powder Diffraction Patterns of Minerals in Clays and Associated Rocks*. Department of Natural Resources Geological Survey Occasional Paper 21. Indiana.
- Claproth, R. 1989. *Petrography and Geochemistry of Volcanic Rocks from Ungaran, Central Java, Indonesia*. Department Geology University: Wollongong.
- Corbett, G., Leach T. M. 1998. *Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration, Mineralization*. Short Course Manual: New Zealand.
- Djuhariningrum, T., Hutabarat R., Muhtar, E. 2003. *Tinjauan Pustaka Isotop Alam dalam Sistem Hidrologi*. Pusat Pengembangan Geologi Nuklir-Batan.
- Fournier, R.O., 1981. *Application of Water Geochemistry Geothermal Exploration and Reservoir Engineering, "Geothermal System: Principles and Case Histories"*. John Willey & Sons. New York
- Giggenbach, W.F., and Goguel. 1988. *Methods for The Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Samples*. Petone New Zealand.

- Kuhn, M. 2004. *Reactive Flow Modeling of Hydrothermal Systems. Lecture Notes in Earth Sciences*. Perth: Australia
- Morrison, K., 1997, *Important Hydrothermal Minerals and Their significance*. Geothermal and Mineral Services Division Kingston Morrison Limited.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids Chemistry & Exploration Technique*. Springer Verlag, Inc.: Berlin
- Pirajno, F., 2009, *Hydrothermal Processes and Mineral System*. Springer Science Geological Survey of Western: Australia
- Reyes, A. G., 1990, *Petrology of Philippine geothermal system and the application of alteration mineralogy to their assessment*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 43, 279-304.
- Sanjaya, A. H., 2010, *Soropati-Telomoyo-Rawa Pening: Harmoni Gravity Tectonics*. <http://geologi.iagi.or.id/2010/12/23/soropati-telomoyo-rawa-pening-harmoni-gravity-tectonics/>.

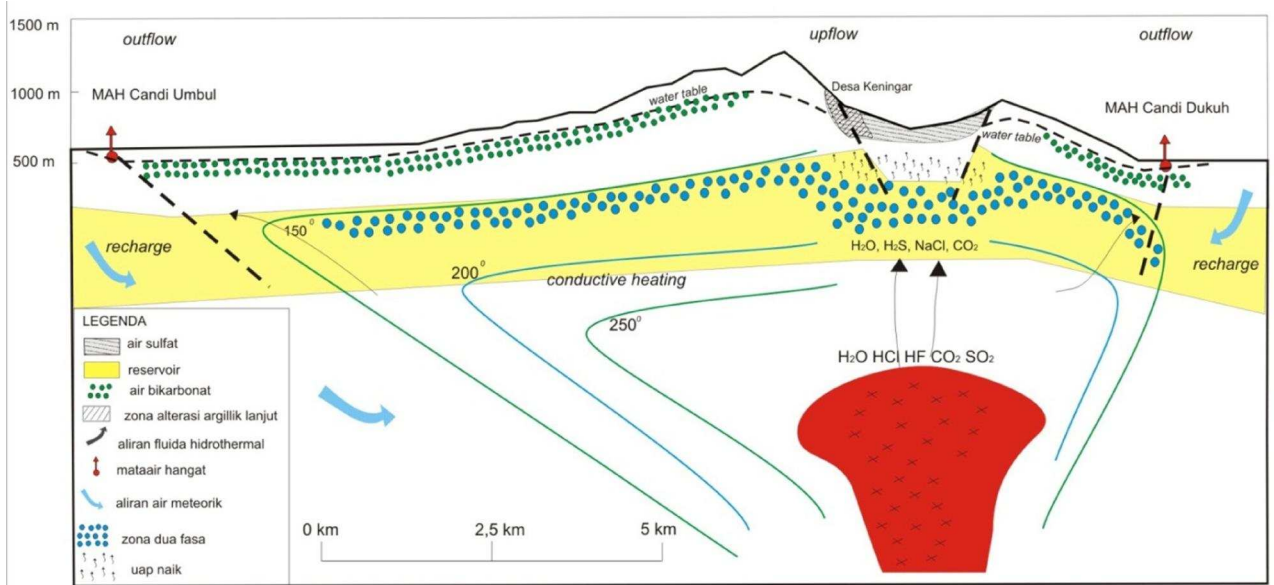
LAMPIRAN GAMBAR



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian pada kotak warna merah (<https://maps.google.com/>)



Gambar 2. Peta sebaran manifestasi pada daerah penelitian



Gambar 6. Model Sistem Panasbumi Komplek Gunung Telomoyo