

SEBARAN UNSUR TANAH JARANG DI SEBELAH BARAT LAUT LAPANGAN PANAS BUMI GUNUNG LAWU, KARANGANYAR, JAWA TENGAH

Dian Rahma Yoni^{1*}, Intan Paramita Haty¹, Septyo Uji Pratomo¹, Setia Pambudi¹, Afrilita¹, Idarwati²

¹Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

²Teknik Geologi, Universitas Sriwijaya

Jl. SWK 104 (Lingkar Utara) Condong Catur, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283

Email: dian.rahma@upnyk.ac.id

Sari - Lokasi panas bumi Gunung Lawu terletak di perbatasan Jawa Tengah dan Jawa Timur, Indonesia. Secara spesifik, sumber panas bumi Gunung Lawu pada penelitian ini terletak di sekitar lereng gunung sebelah barat. Hal ini ditandai dengan keberadaan manifestasi berupa air panas pada wilayah Bayanan, Balong dan Ngunut. Manifestasi air panas yang terdapat di permukaan merupakan hasil dari proses interaksi fluida air dengan batuan di bawah permukaan bumi yang kaya akan mineral dan unsur tanah jarang. Sehingga mata air panas yang terbentuk melalui proses ini dapat mengandung unsur tanah jarang dalam jumlah yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sebaran unsur tanah jarang yang ada di lapangan panas bumi Gunung Lawu khususnya di bagian Barat Laut serta proses interaksi yang terjadi bawah permukaan. Metode yang digunakan untuk mengetahui kandungan unsur tanah jarang dengan menggunakan analisis *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)*. Proses interaksi fluida dengan batuan ditunjukkan oleh beberapa unsur tanah jarang. Belum ada penelitian sebelumnya mengenai interaksi antara batuan dan fluida yang berkaitan dengan unsur tanah jarang di wilayah ini. Oleh karena itu, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan data dan informasi yang bermanfaat bagi peneliti di masa depan.

Kata Kunci: Panas Bumi, Gunung Lawu, Unsur tanah jarang, ICP-MS

Abstract - Lawu's geothermal field is located between Central Java and East Java, Indonesia. Specifically, Mount Lawu's geothermal resources in this study are located around the mountain's western slopes. This is marked by the existence of manifestations in the form of hot water in the Bayanan, Balong, and Ngunut areas. The manifestation of hot water found on the surface results from a process of interaction of water fluids with rocks beneath the earth's surface rich in minerals and rare earth elements. So hot springs formed through this process can contain significant amounts of rare earth elements. This study aims to determine the distribution of rare earth elements in the Mount Lawu geothermal field, especially in the Northwest part and the interaction processes that occur below the surface. The method used to determine the content of rare earth elements is by using *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)* analysis. Some rare earth elements show the process of fluid interaction with rocks. There has been no previous research on the interaction between rocks and fluids related to rare earth elements in this region. Therefore, it is hoped that the results of this study can provide valuable data and information for future researchers.

Keyword: Geothermal, Mount Lawu, Rare earth elements, ICP-MS

1. PENDAHULUAN

Manifestasi mata air panas pada suatu lapangan panas bumi merupakan satu diantara petunjuk keberadaan suatu sistem panas bumi yang terbentuk di bawah permukaan bumi yang diakibatkan oleh adanya aktivitas geologi seperti vulkanisme dan tektonisme (Hochstein dan Browne, 2000; Nicholson, 2012). Sistem panas bumi di bawah permukaan dapat diketahui karakteristiknya melalui analisis geokimia fluida dari manifestasi mata air panas tersebut, salah satunya adalah indikasi keberadaan unsur tanah jarang.

Beberapa mata air panas di dunia terbentuk melalui proses interaksi air dengan batuan di bawah permukaan bumi yang kaya mineral dan unsur tanah jarang. Air yang meresap ke dalam batuan dapat terkontaminasi oleh mineral dan unsur tanah jarang yang terlarut dalam batuan tersebut. Ketika air yang terkontaminasi oleh mineral dan unsur tanah jarang tersebut mencapai zona pembentukan mata air panas, maka air tersebut dapat

terpanaskan dan membentuk mata air panas. Mata air panas yang terbentuk melalui proses ini dapat mengandung unsur tanah jarang dalam jumlah yang signifikan (Chiaradia dan Mörz, 2010). Di samping itu, dalam beberapa kasus, mata air panas juga dapat mengandung unsur tanah jarang yang tinggi karena adanya aliran fluida panas bumi yang membawa unsur tersebut dari kedalaman bumi ke permukaan (Möller, 2000). Oleh karena itu, mata air panas dapat menjadi sumber yang penting untuk mengidentifikasi dan mengeksplorasi keberadaan unsur tanah jarang di suatu wilayah.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sebaran unsur tanah jarang yang ada di Lapangan Panas Bumi Gunung Lawu dan sekitarnya serta proses interaksi yang terjadi bawah permukaan. Belum ada penelitian sebelumnya mengenai interaksi antara batuan dan fluida yang berkaitan dengan unsur tanah jarang di wilayah ini. Oleh karena itu, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan data dan informasi yang bermanfaat bagi peneliti di masa depan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

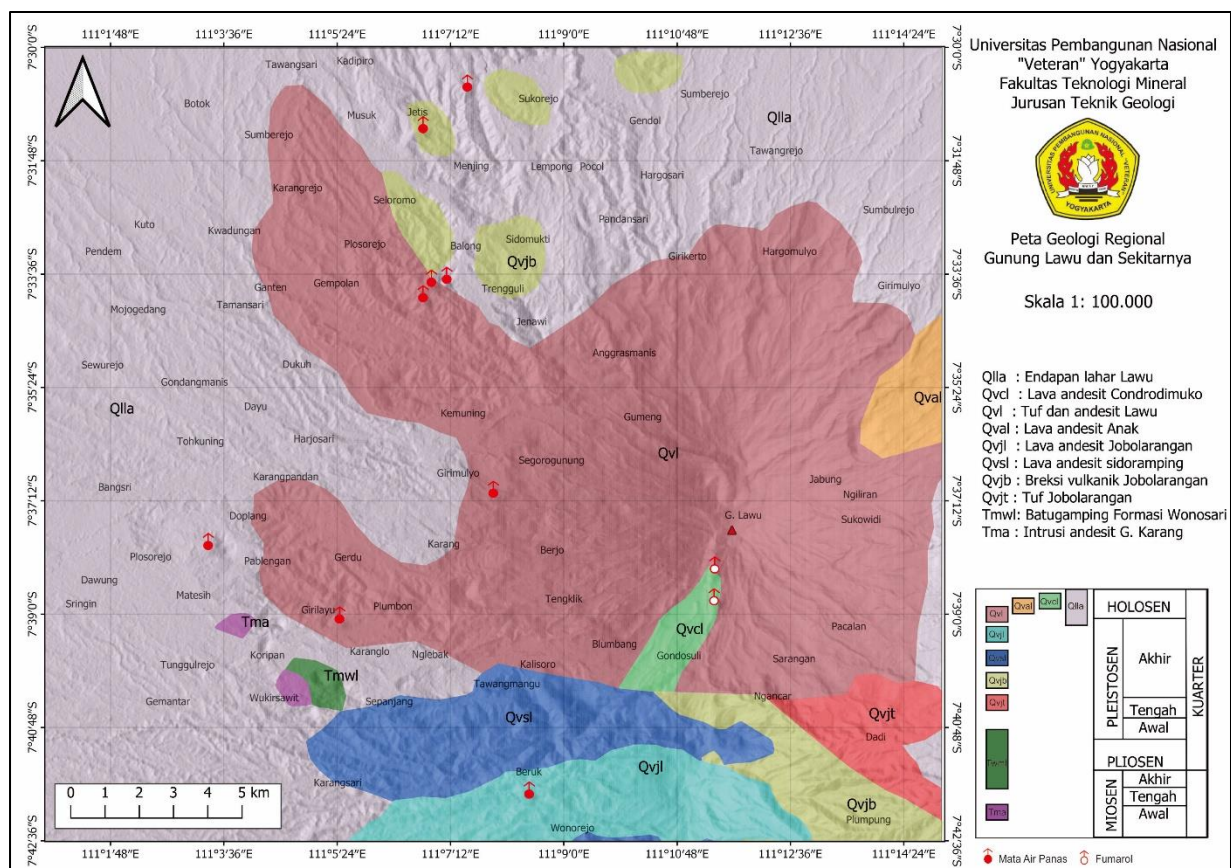
Geologi Regional Gunung Lawu

Van Bemmelen (1949) menjelaskan keberadaan Gunung Lawu secara fisiografi di Zona Solo *sensu stricto*, bersama gunung api lain yang berjajar dari bagian timur Pulau Jawa hingga Gunung Ijen yang terletak paling barat di Banyuwangi. Gunung Lawu dapat diklasifikasikan menjadi empat satuan geomorfologi, yaitu satuan kubah intrusi, satuan vulkanik Gunung Jobolarangan, satuan vulkanik Gunung Lawu, dan satuan dataran aluvial. Gunung Lawu dalam kerangka tektonik berada pada zona transisi antara Jawa bagian barat dan timur. Kerak bumi pada bagian Paparan Sunda di bawah Jawa bagian barat dan Sumatera cenderung lebih tebal dibandingkan dengan bagian kerak di bawah Jawa bagian timur yang tersusun oleh produk magmatisme dan vulkanisme Paleogen-Neogen (van Bemmelen, 1949).

Vulkanisme Lawu Tua dan Lawu Muda menghasilkan produk vulkanik berkomposisi andesitik. Produk Lawu Tua tersebar secara dominan di sebelah selatan dan setempat di sebelah utara dari Gunung Lawu. Produk Lawu Muda dominan tersebar di sebelah utara dari Gunung Lawu. Sampurno dan Samodra (1997) dalam Peta Geologi Lembar Ponorogo menjelaskan urutan batuan di area sekitar Gunung Lawu dari tua ke muda (Gambar 1), antara lain:

- **Tma**, Satuan batuan andesit produk intrusi yang menunjukkan tekstur porfiritik, hubungan antar kristal subhedral, dan ukuran kristal 0,5 – 1 m. Komposisi mineral penyusun batuan ini antara lain plagioklas (andesine), ortoklas, kuarsa, mineral bijih di dalam massa dasar mikrolit plagioklas dan gelas gunung api. Sebagian feldspar pada batuan ini berubah menjadi klorit dan lempung.
- **TmwI**, Formasi Wonosari terdiri dari litologi berupa batugamping terumbu dan kalkarenit, dengan sisipan batugamping konglomeratan dan napal. Analisis foraminifera planktonik dari formasi ini menunjukkan umur pengendapan di akhir Miosen Tengah – Pliosen. Analisis foraminifera kecil bentonik menunjukkan lingkungan pengendapan laut dangkal, yaitu zona neritik dalam hingga neritik luar atau pada kedalaman 100 – 200 m. Tebal formasi ini sekitar 75 m.
- **Qvjt**, Tuf Jobolarangan, tersusun oleh litologi berupa tuf lapilli dan breksi pumis, dengan tebal rata-rata masing-masing 4 – 5 m. Satuan ini melampar di lereng bagian selatan dan tenggara Gunung Jobolarangan. Batuan gunung api ini merupakan produk Gunung Jobolarangan atau Lawu Tua.
- **Qvjb**, Breksi Jobolarangan, terdiri dari breksi andesit, setempat bersisipan dengan lava andesit. Sebaran satuan batuan ini terdapat di bagian puncak kompleks Lawu Tua. Tebal satuan ini mencapai puluhan meter.
- **Qvsl**, Lava Sidoramping, terdiri dari lava andesit berwarna abu-abu tua dan bertekstur porfiritik. Produk batuan ini berasal dari aktivitas vulkanik kompleks Gunung Sidoramping, Gunung Puncakdalang, Gunung Kukusan dan Gunung Ngampiyungan. Aliran lava ini umumnya mengarah ke barat dari area Gunung Lawu.
- **QvjI**, Lava Jobolarangan, tersusun oleh batuan lava andesit dengan komposisi plagioklas (andesine) kuarsa, feldspar dan sejumlah kecil kandungan hornblenda. Produk lava ini melampar ke arah baratdaya yang berasal dari Gunung Jobolarangan yang merupakan puncak tertinggi di kompleks Lawu Tua.

- **Qvl**, Batuan Gunung api Lawu, terdiri dari litologi tuf dan breksi gunung api, dengan sisipan lava andesit. Tebal lapisan sekitar 1 – 5 m.
- **Qval**, Lava Anak, merupakan lava andesit yang mengalir dari pusat erupsi Gunung Anak dan mengarah ke timur laut membentuk pematang rendah hingga kerucut parasit Gunung Mijil. Tebal satuan ini sekitar 10 m.
- **Qvcl**, Lava Condromimuko, merupakan batuan lava andesit produk erupsi kawah Condromimuko dan melampar ke arah barat. Pelamparan satuan batuan ini ke arah Barat Laut dibatasi oleh sesar normal yang memotong puncak Gunung Lawu dan dibatasi ke arah selatan oleh Sesar Cemorosewu.
- **Qlla**, Lahar Lawu, tersusun oleh litologi berupa andesit, basalt dan sedikit kandungan pumis, serta endapan pasir gunungapi. Sebaran produk lahar Gunung Lawu ini umumnya mengisi area dataran di kaki gunungapi dan menjadi penyusun batuan di beberapa perbukitan rendah. Pada satuan ini dijumpai banyak manifestasi mata air.



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Regional Gunung Lawu (modifikasi Sampurno dan Samudra, 1997).

3. METODE

Penelitian ini meliputi penentuan titik/lokasi pengambilan sampel air dan pengambilan sampel air secara langsung di lapangan. Lokasi pengambilan sampel air ditentukan berdasarkan tujuan pemeriksaan, untuk tujuan menghitung suhu bawah permukaan, apabila dijumpai beberapa mata air panas pengambilan contoh air, terutama dilakukan pada air panas dengan suhu dan debit tertinggi. Metode analisis data yang dipergunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan analisis geokimia untuk menjelaskan komposisi kimia batuan, air panas, serta proses interaksi fluida-batuan pada proses hidrotermal. Komposisi unsur tanah jarang dapat menjelaskan tentang proses geokimia hidrotermal yang terkait dengan aktivitas subduksi. Analisa unsur tanah jarang (REE) dari sampel air menggunakan metode ICP-MS/ *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*.

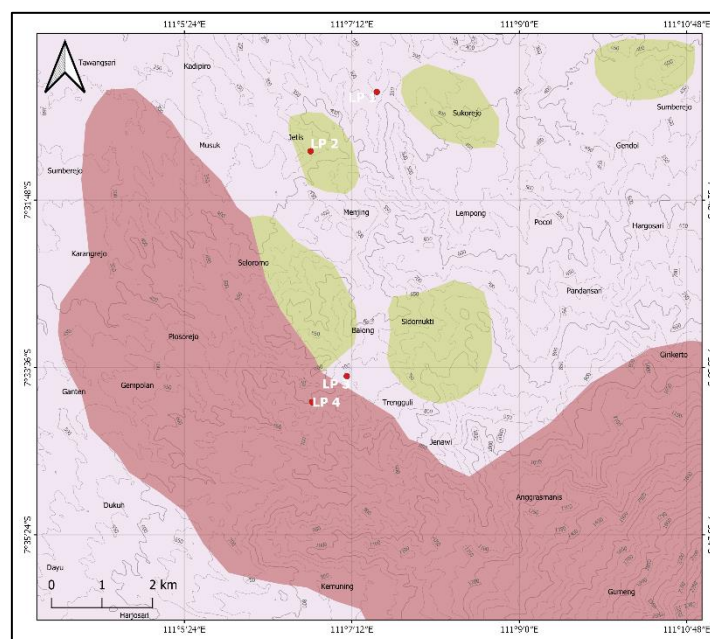
ICP-MS adalah teknik analisis kimia yang digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur-unsur dalam sampel, terutama dalam larutan. Metode ini menggunakan plasma argon yang dihasilkan dari sebuah generator radio frekuensi dan spektrometer masa untuk menganalisis unsur-unsur tersebut dengan cara mengionisasi unsur-unsur tersebut dan mengukur massa ion-ion yang dihasilkan. ICP-MS merupakan metode yang sangat sensitif dan memiliki kemampuan untuk menganalisis banyak unsur dalam satu waktu. Metode ini dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur-unsur esensial dan non-esensial dalam sampel, unsur tanah jarang dan logam berat (Montaser dan Golightly, 1992; Skoog, dkk., 2013).

Dari data yang dihasilkan oleh metode ICP-MS menghasilkan unsur unsur tanah jarang yang ada di manifestasi panas bumi Gunung Lawu. Selanjutnya data tersebut akan dianalisis untuk melihat pengaruh kandungan unsur tanah jarang terhadap proses hidrotermal yang berlangsung dibawah permukaan. Pengamatan korelasi korelasi antar unsur juga dilakukan sehingga dapat membantu dalam menginterpretasikan proses interaksi fluida panas bumi dengan batuan yang dilaluinya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Manifestasi Mata Air Panas

Manifestasi yang berada di sebelah Barat Laut Gunung Lawu terdiri dari 4 mata air panas dengan masing masing karakteristik (Gambar 2). Pengambilan sampel mata air panas LP 1 dilakukan di Desa Ngunut yang terletak di sebelah Barat Laut Gunung Lawu. Mata air panas LP 1 memiliki suhu 41°C yang dicirikan dengan warna yang jernih, tidak ada rasa, dan memiliki bau seperti besi serta memiliki pH 7. Pengambilan sampel mata air panas LP 2 dilakukan di Desa Bayanan yang terletak di sebelah Barat Laut Gunung Lawu. Mata air panas LP 2 memiliki suhu 40°C yang dicirikan dengan warna yang jernih, tidak ada rasa, dan tidak memiliki bau serta memiliki pH sekitar 6-7. Pengambilan sampel mata air panas LP 3 dilakukan tempat pemandian air panas di Desa Balong yang terletak di sebelah Barat Laut Gunung Lawu. Mata air panas LP 3 memiliki suhu 35°C yang dicirikan dengan warna yang keruh, memiliki rasa asin, dan tidak berbau bau serta memiliki pH 7 - 8. Pengambilan sampel mata air panas LP 4 dilakukan di Desa Balong, tidak jauh dari lokasi LP 3 yang terletak di sebelah Barat Laut Gunung Lawu. Mata air panas LP 4 memiliki suhu 34°C yang dicirikan dengan warna yang keruh, memiliki rasa asin, dan tidak berbau bau serta memiliki pH 6 - 7.

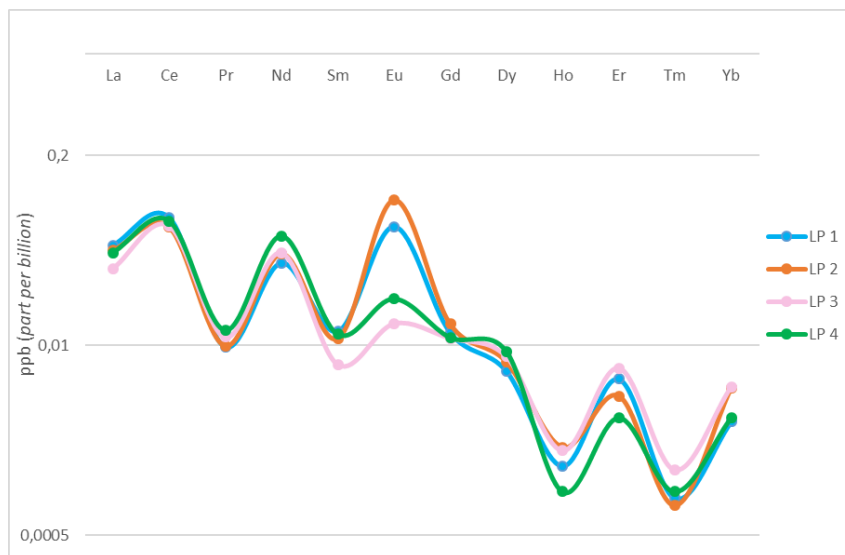


Gambar 2. Lokasi manifestasi mata air panas di Barat Laut lapangan panas bumi Gunung Lawu.

Sebaran Unsur Tanah Jarang

Berdasarkan diagram persebaran unsur tanah jarang di manifestasi panasbuni Gunung Lawu, secara umum unsur tanah jarang dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu kandungan unsur tanah jarang tinggi dan kandungan unsur tanah jarang yang rendah. Untuk unsur La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, dan Gd memiliki kandungan yang tinggi unsur setiap mata air panas panas, sedangkan unsur Dy, Ho, Er, Tm, dan Yb memiliki kandungan yang rendah (Gambar 3). Keberadaan unsur La dan Ce yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa fluida tersebut merupakan fluida hidrotermal karena unsur-unsur ini lebih melarut dalam air dan mudah terdistribusi dalam fluida panas bumi (Ahmad dkk., 2018). Secara umum pola yang dihasilkan pada diagram unsur tanah jarang tersebut hampir sama hal ini mengindikasikan bahwa semua sampel mata air panas merupakan fluida hidrotermal.

Unsur unsur La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu dan Gd umumnya mudah larut dalam fluida sehingga kandungannya cukup tinggi dibanding unsur unsur yang selain. Selain itu suhu dan kondisi kimia di dalam reservoir panas bumi juga dapat mempengaruhi kelarutan dan ketersediaan unsur-unsur tersebut di dalam fluida. Sedangkan unsur unsur lainnya merupakan unsur yang tidak mudah larut dalam air sehingga keterdapatannya dalam fluida panas bumi tergolong rendah. Selain itu La, Ce, Pr, Nd, Sm, dan Eu merupakan golongan LREE (*Light Rare Earth Elements*) yakni unsur-unsur tanah jarang yang memiliki nomor atom kecil dan memiliki kelimpahan dalam kerak bumi (Bau dan Dulski, 2011).

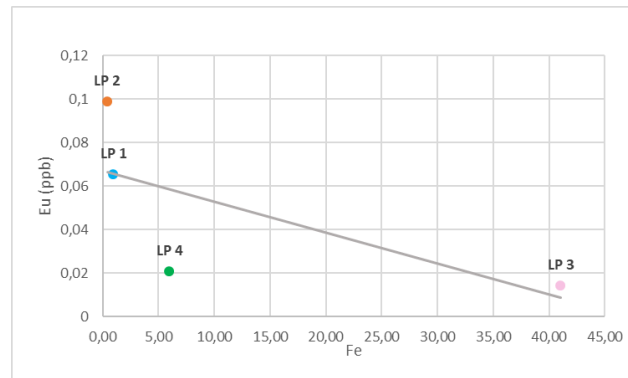


Gambar 3. Diagram Persebaran Unsur Tanah Jarang di Manifestasi Panas Bumi Gunung Lawu

Unsur Europium (Eu) dengan kandungan unsur Besi (Fe) pada fluida panas bumi memiliki korelasi (Gambar 4). Kandungan Eu dan Fe pada fluida panas bumi memiliki hubungan yang erat (Karpov, 2018). Kandungan Eu pada fluida panas bumi dapat berasal dari mineralisasi sulfida dengan adanya asam sulfida pada lingkungan yang tinggi suhunya. Sementara itu, kandungan Fe pada fluida panas bumi dapat berasal dari mineralisasi sulfida atau mineral magnetit. Selain itu, kandungan Eu dan Fe pada fluida panas bumi dapat terkait dengan proses hidrotermal. Proses hidrotermal tersebut dapat menghasilkan mineralisasi sulfida dan oksida yang dapat mengandung kandungan Eu dan Fe (Shoedarto, 2020; Akhmanova dan Ariskin, 2019). Korelasi antara Eu dan Fe memiliki hubungan korelasi negatif dimana berdasarkan diagram menunjukkan bahwa semakin rendah kandungan Eu maka nilai Fe akan semakin tinggi. Namun korelasi tersebut masih harus diteliti lebih lanjut. Hal ini disebabkan karena Eu dan Fe memiliki sifat kimia yang berbeda, dan korelasinya dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sumber mineral, kondisi geokimia, dan proses geologi yang terlibat (Lu, dkk. 2017)

Tinggi rendahnya kandungan Eu dapat disebabkan oleh pelarutan pada kondisi tidak setimbang dengan *leaching* kation dari batuan dinding dan dekomposisi mineral plagioklas dari material akuifer oleh lingkungan pH rendah

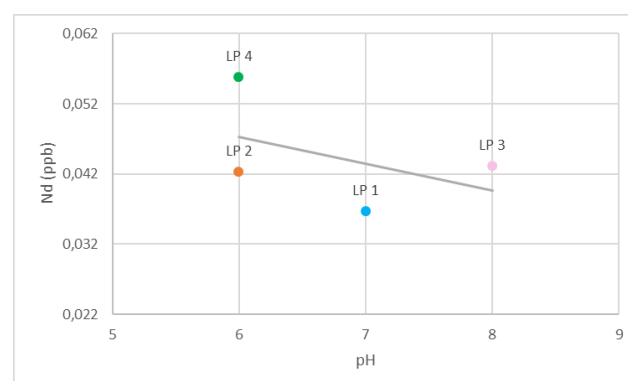
dan suhu yang lebih tinggi. Kandungan Fe yang tinggi terdapat pada LP 3 yang mengindikasikan proses hidrotermal yang intensif. Kandungan Fe yang tinggi pada fluida panas bumi dapat menunjukkan adanya proses hidrotermal yang intensif, di mana fluida panas bumi tersebut mengalami interaksi dengan batuan induk yang kaya akan mineralisasi sulfida atau oksida yang mengandung unsur besi (Sudarman dkk., 2019).



Gambar 4. Korelasi kandungan Eu dan Fe pada manifestasi panas bumi Gunung Lawu

Beberapa penelitian dalam menjelaskan korelasi terdapat korelasi antara unsur Nd terhadap pH fluida. Terdapat korelasi negatif antara konsentrasi Nd dan pH pada mata air panas tersebut. Hal ini dianggap sebagai indikasi adanya pengaruh larutan asam (yang memiliki pH lebih rendah) dari batuan di sekitar mata air panas yang memperkaya Nd dan menyebabkan penurunan pH. Unsur Nd merupakan salah satu unsur tanah jarang yang mudah terlarut dalam air dan cenderung terikat dengan mineral-mineral tertentu di dalam batuan (Kusdian, 2014). Oleh karena itu, kandungan unsur Nd pada fluida panas bumi dapat mencerminkan interaksi antara fluida panas bumi dengan mineral-mineral tersebut di dalam batuan. pH fluida panas bumi, di sisi lain, mencerminkan tingkat asam-basa dari fluida tersebut, yang dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk konsentrasi gas CO_2 dalam fluida, mineralogi batuan di sekitarnya, dan suhu fluida panas bumi.

Berdasarkan diagram korelasi kandungan Nd terhadap pH pada manifestasi panas bumi Gunung Lawu, memperlihatkan adanya korelasi negatif yang ditandai dengan tren yang menurun (Gambar 5). Hal ini disebabkan oleh reaksi kimia antara unsur Nd dengan ion-ion yang berada dalam larutan air. Ion-ion tersebut dapat membentuk senyawa-senyawa yang bersifat asam atau basa, tergantung pada kondisi kimia yang ada di dalam larutan. Jika unsur Nd bereaksi dengan ion-ion yang bersifat asam, maka hal tersebut dapat menyebabkan pH air menjadi lebih rendah asam. Namun, jika unsur Nd bereaksi dengan ion-ion yang bersifat basa, maka pH air dapat menjadi lebih tinggi basa.



Gambar 5. Korelasi kandungan Nd terhadap pH pada manifestasi panas bumi Gunung Lawu

5. KESIMPULAN

Studi ini dilakukan dengan tujuan untuk menjelaskan komposisi kimia batuan, air panas, serta proses interaksi fluida-batuan pada proses hidrotermal. Metode analisis data yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan analisis geokimia untuk menjelaskan komposisi kimia batuan, air panas, serta proses interaksi fluida-batuan pada proses hidrotermal. Selain itu, metode ICP-MS digunakan untuk menganalisis unsur-unsur dalam sampel air, baik unsur tanah jarang, unsur esensial, maupun non-esensial. Dari data yang dihasilkan oleh metode ICP-MS dapat diketahui bahwa keberadaan unsur tanah jarang pada manifestasi panas bumi Gunung Lawu tergolong tinggi, khususnya unsur La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, dan Gd yang mudah larut dalam fluida sehingga memiliki kandungan yang tinggi pada air panas.

Secara umum, pola yang dihasilkan pada diagram unsur tanah jarang menunjukkan bahwa semua sampel mata air panas merupakan fluida hidrotermal. Keberadaan unsur La dan Ce yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa fluida tersebut merupakan fluida hidrotermal karena unsur-unsur ini lebih mudah larut dalam air dan mudah terdistribusi dalam fluida panas bumi. Kandungan unsur Eu dan Fe pada fluida panas bumi juga memiliki korelasi yang erat dan dapat berasal dari mineralisasi sulfida atau mineral magnetit, serta terkait dengan proses hidrotermal yang dapat menghasilkan mineralisasi sulfida dan oksida yang mengandung kandungan Eu dan Fe. Studi ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang komposisi kimia air panas dan interaksi fluida-batuan pada proses hidrotermal, yang dapat digunakan sebagai informasi penting dalam memahami sifat geologi daerah manifestasi panas bumi Gunung Lawu. Jika di teliti lebih lanjut kandungan unsur tanah jarang pada fluida geotermal dapat diolah menjadi senyawa-senyawa yang bermanfaat dalam dunia industri.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, R., Wahyudi, S., Setijadji, L. D., & Widowati, S. 2018, The Rare Earth Elements Concentration in Geothermal Fluid from Different Geothermal Fields in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 190(1), 012033.
- Akhmanova, M. V., & Ariskin, A. A. (2019). Distribution of REE in thermal waters and gas discharges of Kamchatka Peninsula (Russia). *Geofluids*, 2019.
- Bau, M., & Dulski, P. (2011). Distribution and fractionation of rare earth elements in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge. *Chemical Geology*, 287(3-4), 163-180.
- Chiaradia, R dan Mörz. 2000, Rare Earth Elements in Geothermal Systems: Controls, Transport and Coprecipitation Mechanisms". *Geofluid*. 1: 58-78 p.
- Hochstein, M. P., dan Browne, P. R. 2000, Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources. *Encyclopedia of Volcanoes*, 1, 835–855 p.
- Karpov, G. A., Schroeder, P. A., & Nikolaeva, A. G. (2018). Geochemistry of rare-earth elements in thermal waters of Uzon–Geyzernaya hydrothermal system (Kamchatka). *Russian Geology and Geophysics*, 59(8), 925-934.
- Kusdian, R. 2014, Geochemistry of fluids from the Lahendong geothermal field, North Sulawesi, Indonesia: Constraints from gas and water analyses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276, 117-127.
- Lu, H., Chen, C., Zhang, Z., & Li, Q. 2017, Geochemistry of geothermal water in Xiong'an New Area, Hebei Province, China: Implications for the geothermal system and ore-forming potential. *Geothermics*, 70, 199-209.
- Montaser, A., & Golightly, D. W. 1992, Inductively coupled plasma mass spectrometry. Wiley-Interscience.
- Möller, P. 2000, Rare earth elements and yttrium as geochemical indicators of the source of mineral and thermal waters. In I. Stober and K. Bucher (eds): *Hydrology of crystalline rocks*. Kluwer Acad. Press, 227-246 p.
- Nicholson, K. 2012. Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques. *Springer Science & Business Media*.
- Sampurno and Samodra H. 1997, *Geological map of Ponorogo sheet Java* second edition Center for Geological and Development, Bandung.

- Shoedarto, R. M., Tada, Y., Kashiwaya, K., Koike, K., Malik, D., & Iskandar, I. 2020, Application of Rare-Earth Elements in Spring Waters to Indicate Surficial Water-Rock Interaction Process in the Wayang Windu Geothermal Field, Indonesia.
- Skoog, D. A., West, D. M., & Holler, F. J. 2013, Fundamentals of analytical chemistry. Cengage Learning.
- Sudarman, S., Santoso, M., & Irawan, D. E. 2019, Analisis Kandungan Unsur Besi (Fe) pada Fluida Panas Bumi Sebagai Indikator Kondisi Lingkungan dan Mineralisasi di Daerah Pekon Kebun Teak, Tanggamus, Lampung. *Jurnal Geologi Kelautan*, 17(2), 99-108.
- Van Bemmelen, R. W. 1949, General Geology of Indonesia and adjacent archipelagoes. *The geology of Indonesia*.