

# KARAKTERISASI ENDAPAN TRAVERTIN PENCIRI MANIFESTASI GEOTHERMAL ZONA OUTFLOW UNGARAN

Raras Prabowo\*<sup>1</sup>, Hill Gendoet Hartono<sup>2</sup>, Paramitha Tedja Trisnaning<sup>3</sup>

Jl. Babarsari, Depok, Sleman, Yogyakarta 55281, Telp.(0274)487249

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

e-mail : <sup>1</sup>[raraskolibri@gmail.com](mailto:raraskolibri@gmail.com), <sup>2</sup>[hilghartono@itny.ac.id](mailto:hilghartono@itny.ac.id), <sup>3</sup>[Tedja.trisnaning@gmail.com](mailto:Tedja.trisnaning@gmail.com)

## Abstrak

Daerah penelitian terletak di sebelah timur Gunung Ungaran, sekitar 31 km sebelah selatan Kota Semarang. Secara fisiografi daerah penelitian termasuk dalam Zona Kendeng bagian barat dan berbatasan dengan Zona Vulkanik Kuartar. Zona Vulkanik Kuartar tersebut pada daerah penelitian di tempati oleh Gunung Ungaran. Pada daerah penelitian, stratigrafinya tersusun oleh batuan yang berumur Miosen Akhir hingga Plistosen, terbagi atas batuan sedimen dan batuan gunung api. Fenomena munculnya manifestasi panas bumi berupa mata air panas dan endapan travertin yang mencirikan zona outflow pada suatu sistem panas bumi, memperlihatkan daerah penelitian berkaitan erat dengan aktivitas vulkanisme. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik endapan travertin yang merupakan penciri dari zona outflow sistem manifestasi panas bumi Gunung Ungaran. Metode penelitian menggunakan analisis petrografi, dan geokimia air. Dari hasil analisis petrografi pada endapan travertin, secara umum proses pembentukan endapan travertin pada daerah penelitian dipengaruhi oleh proses hidrothermal dan proses biologi oleh bakteri heterotrof. Lingkungan pengendapan travertin tersebut, termasuk ke dalam Fissure ridge. Berdasarkan analisis geokimia air, sampel air pada manifestasi tersebut termasuk ke dalam tipe air Klorida Bikarbonat. Berdasarkan plotting pada diagram Ternary Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> termasuk ke dalam Deep Cl waters. Berdasarkan pengeplotan menggunakan diagram ternary Na-K-Mg, air pada lokasi penelitian termasuk kedalam "Partial equilibrium or mix waters" dengan suhu determinasi reservoir 100-140°C.

**Kata kunci:** Travertin, Karakterisasi, Geothermal, Outflow, Ungaran.

## Abstract

The research area is located east of Mount Ungaran, about 31 km south of Semarang City. Physiographically, the study area is included in the western Kendeng Zone and borders the Quaternary Volcanic Zone. The Quaternary Volcanic Zone in the study area is occupied by Mount Ungaran. In the research area, the stratigraphy is composed of Late Miocene to Pliocene rocks, divided into sedimentary rocks and volcanic rocks. The phenomenon of the emergence of geothermal manifestations in the form of hot springs and travertine deposits which characterize the outflow zone in a geothermal system, shows that the research area is closely related to volcanic activity. The purpose of this study was to determine the characteristics of travertine deposits which are characteristic of the outflow zone of the Mount Ungaran geothermal manifestation system. The research method used petrographic analysis and water geochemistry. From the results of petrographic analysis of travertine deposits, in general the formation process of travertine deposits in the study area is influenced by hydrothermal processes and biological processes by heterotrophic bacteria. The travertine environment includes the fissure ridge. Based on the geochemical analysis of water, the water samples in this manifestation belong to the chloride bicarbonate water type. Based on the plotting in the Ternary diagram Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> is included in the Deep Cl waters. Based on

*plotting using the Na-K- Mg ternary diagram, the water at the research location is included in the "Partial equilibrium or mix waters" with a reservoir temperature of 100-140°C.*

*Keywords: Travertin, Characterization, Geothermal, Outflow, Ungaran.*

## 1. PENDAHULUAN

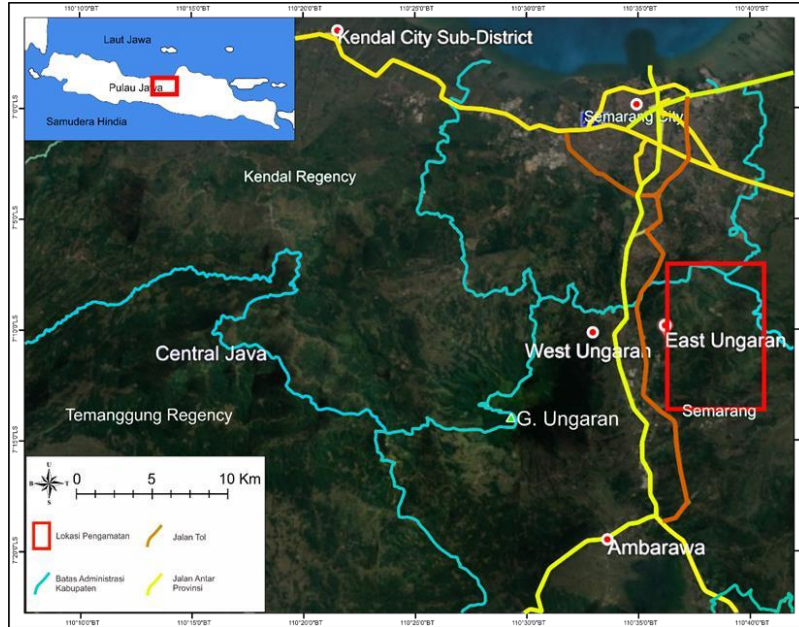
Indonesia terletak pada tataan geologi yang khas, yaitu pada pertemuan tiga lempeng utama; Indo- Australia, Eurasia, dan Pasifik. Interaksi ketiga lempeng tersebut menghasilkan jalur busur vulkanik yang menyimpan potensi sumber daya energi dan mineral. Dari segi sumber daya panas bumi, Pulau Jawa merupakan pusatnya pengembangan panas bumi di Indonesia. Indonesia memiliki sekitar 15% dari gunung berapi aktif dunia, sehingga memiliki potensi panas bumi tertinggi di dunia. Gunung Ungaran diperkirakan aktif antara Pliosen Akhir sampai Plietosen Akhir. Gunung Kuartar ini, ditopang oleh basement strata sedimen berumur Tersier [4]. Gunung Ungaran merupakan tipe *Backarc-Side Volcano* [11].

Prospek panas bumi Gunung Ungaran masih belum berkembang hingga saat ini. Keterdapatan manifestasi panas bumi di sekitar Gunung Ungaran, seperti di daerah penelitian yang terletak di Kaliulo (Gambar 1), dengan manifestasi berupa air hangat dan endapan travertin yang tersebar disekitar kemunculan air tersebut, menunjukkan bahwa aktivitas geothermal Gunung Ungaran masih aktif. Keterdapatan endapan travertin tersebut sangat menarik untuk dipelajari lebih lanjut, karena tidak semua manifestasi panas bumi di Indonesia dapat menghasilkan endapan travertin, contohnya seperti di dataran tinggi Dieng, yang hanya memiliki manifestasi berupa mata air panas, solfatara, dan fumarole [1]. Oleh karena itu, penelitian terkait manifestasi air hangat dan endapan travertin yang ada dapat memberikan petunjuk dan pencari manifestasi panas bumi pada Gunung Ungaran.

Pada sistem geothermal dikenal empat zona fisik dan kimia yang berbeda [2]. Dalam sebuah konseptual model yang dikembangkan pada sistem aktif hydrothermal, yaitu zona konduktif, zona konvektif, zona dua fasa, dan zona freatik.

Travertin merupakan endapan karbonat yang terendapkan secara kimiawi terbentuk di sekitar rembesan, mata air, dan sepanjang sungai kecil, serta kadang di danau terdiri dari kalsit atau aragonit, memiliki porositas antar kristal sedang dan kadang porositas mouldic, terbentuk pada lingkungan zona vados atau freatik yang pada umumnya dangkal. Presipitasi air hujan mentransfer karbon dioksida ke sumber air tanah hingga terjadi supersaturasi kalsium karbonat, dengan nukleasi atau pertumbuhan kristal terjadi selama di bawah air.

Telah diketahui bahwa keluarnya fluida hidrothermal dipengaruhi oleh sistem patahan aktif dan endapan travertin umumnya berasosiasi dengan zona aktif tektonik. Patahan memainkan peran kunci dalam pengangkutan dan *upwelling* cairan hidrothermal [3]. Oleh karena itu, endapan travertin dapat digunakan sebagai indikator perkiraan lokasi jejak patahan aktif, hal tersebut juga meningkatkan pemahaman bahwa keterdapatan beberapa titik manifestasi mata air panas dan travertin yang berdekatan serta sejajar berasosiasi dengan sistem patahan [3].



**Gambar 1.** Peta lokasi daerah penelitian (sumber: Google Earth, 2020).

Endapan travertin secara istimewa terletak di sepanjang jejak patahan, baik di sekitar celah ekstensional atau di *hanging wall* dari sesar normal [3]. Sesar dan kekar meningkatkan permeabilitas dan mendukung sirkulasi hidrothermal. Cairan hidrothermal yang membentuk travertin umumnya merupakan larutan kaya garam dengan kapasitas penutupan yang sangat tinggi, sehingga untuk membuka kembali patahan atau rekahan pada sirkulasi fluida baru, diperlukan gempa bumi. Jadi, aliran fluida dan patahan umumnya terjadi pada saat yang sama dan deposisi travertin menjadi indikasi usia aktivitas tektonik [3].

## 2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik endapan travertin penciri manifestasi geothermal zona outflow Gunung Ungaran, yaitu melalui analisis petrologi makroskopis, petrografi dan analisis geokimia air, dengan berbagai klasifikasi untuk menentukan jenis batuan, tipe fluida dan geothermometer pada daerah penelitian, dengan memakai konsep fluida pembawa mineral (*fluids bearing minerals*).

Analisis geokimia air dilakukan di Laboratorium BTKLPP Yogyakarta. Analisis petrologi dilakukan untuk memperoleh nama batuan menggunakan klasifikasi sederhana berdasarkan kandungan mineral utama penyusun batuan. Selain itu analisis petrologi berguna untuk mengetahui tekstur dan struktur terkait diagenesis batuan, baik menggunakan pengamatan megaskopis pada sampel setangan (*handspeciment*) dan mikroskopis pada sampel sayatan tipis menggunakan mikroskop polarisator Olympus CX 31P di Laboratorium Hardrock Teknik Geologi ITNY.

Metode pengambilan sampel batuan dilakukan pada batuan yang masih segar. Untuk metode pengambilan sampel air dilakukan pada pusat manifestasi, sehingga kontaminasi dari air permukaan dapat terminimalisir dan pengambilan tidak bisa dilakukan pada saat hujan, untuk menghindari dari kontaminasi air hujan yang dapat mempengaruhi komposisi kimia air. Pada setiap titik manifestasi di lapangan juga dilakukan pengukuran langsung terhadap sifat kimianya, seperti Ph, TDS, dan DHL, menggunakan Ph meter dan TDS, serta EC meter.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Identifikasi Lapangan

Pengambilan data lapangan dilakukan pada lokasi manifestasi mata air dan endapan travertin, tepatnya di daerah Kaliulo. Pengambilan data lapangan berupa sampel batuan untuk dilakukan analisis petrografi dan sampel air untuk analisis kimia air. Pengukuran kondisi air juga dilakukan di lapangan seperti pH, TDS (*total dissolved solids*), EC (*electrical conductivity*) dan suhu dilakukan menggunakan alat pH meter digital dan TDS-EC meter (Gambar 2).



**Gambar 2.** Pengukuran kondisi air pada lokasi titik 1A (A). Pengukuran kondisi air pada lokasi titik 1B.

Pengukuran kondisi air tersebut dilakukan untuk membantu interpretasi awal dari manifestasi yang ada dan pada titik mana saja yang mungkin prospek untuk dilakukan analisis kimia air lebih lanjut di laboratorium. Dari hasil pengukuran awal tersebut diperoleh data pH pada beberapa titik manifestasi menunjukkan pH asam lemah mendekati netral, dengan kisaran 6,4-7. Suhu berkisar antara 31,8-48°C, dengan nilai TDS, berkisar 207-9359 ppm dan untuk parameter EC tidak diketahui karena alat pengukuran tidak dapat membaca nilai dari setiap titik lokasi pengukuran manifestasi, hal tersebut diinterpretasikan bahwa nilai EC pada setiap titik pengukuran kemungkinan melebihi dari batas ambang nilai pengukuran yang dapat diukur alat tersebut. Pengambilan sampel air untuk analisis laboratorium dilakukan pada manifestasi dengan suhu paling tinggi, yang diasumsikan bahwa air tersebut berasal langsung dari reservoir. Selanjutnya sampel air tersebut dilakukan analisis komponen kation dan anion, seperti  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , B, dan  $\text{SiO}_2$ . Pengambilan sampel batuan sebanyak lima sampel pada lokasi sekitar manifestasi, sampel tersebut diharapkan dapat mewakili kondisi endapan travertin yang ada.

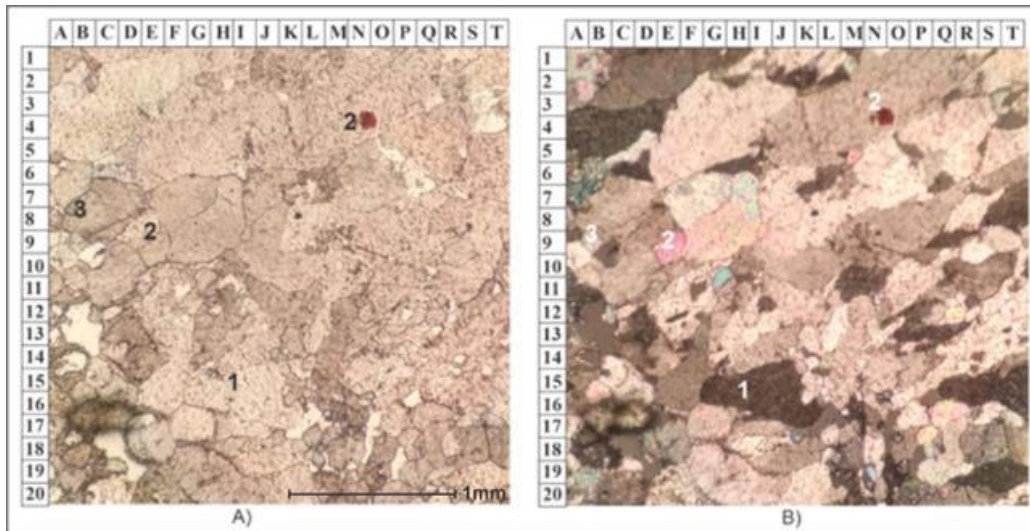
#### 3.2 Analisis Data Petrografi

Analisis petrografi dilakukan dengan jumlah lima sampel pada endapan travertin tersebut, yang dijelaskan lebih rinci sebagai berikut:

##### **Sampel TRAI**

Berdasarkan analisis petrografi sampel tersebut memiliki tekstur dengan bentuk kristal subhedral- euhedral, ukuran mineral 0,1-0,9mm, yang terdiri atas kalsit 98%, aragonite 1,5%, dan kuarsa 0,5%. Mineral kalsit tersebut memperlihatkan warna putih pada pengamatan ppl, dan berwarna coklat pada pengamatan xpl, dengan relief sedang-tinggi. Mineral aragonite pada pengamatan ppl memperlihatkan warna putih kecoklatan dan pada pengamatan xpl memperlihatkan warna hitam kemerahan, dengan relief tinggi. Aragonit merupakan polimorf dari kalsit. Keterdapatannya kuarsa pada sampel tersebut sangat sedikit dengan kenampakan pada

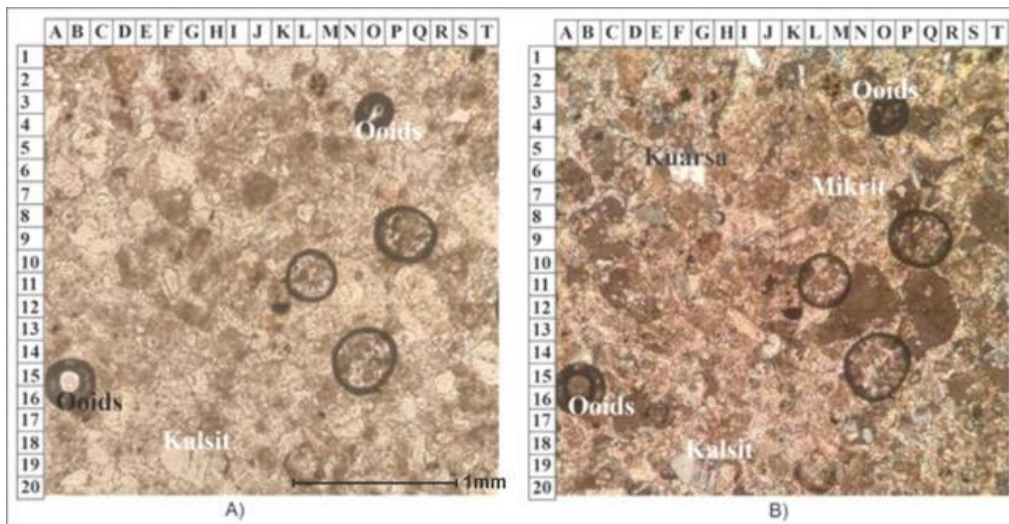
pengamatan ppl memperlihatkan relief rendah dengan warna putih. Berdasarkan klasifikasi tekstur travertine fasies kerak [5], dinamakan *Calcite rafts* yang termasuk dalam *abiotic crystalline crust*.



**Gambar 3.** Foto sayatan tipis sampel TRA1, dengan kenampakan ppl (A) dan kenampakan xpl (B).Keterangan: 1). Kalsit, 2). Aragonite dan 3). Kuarsa.

**Sampel TRA2**

Berdasarkan analisis petrografi memperlihatkan tekstur dengan ukuran fragmen berupa Ooids 0,2- 4mm, diantara mikrit dengan ukuran <1mm, struktur massif, dengan komposisi terdiri dari Ooids 20%, mikrit 45%, kalsit 30%, aragonite 3% dan kuarsa 2%. Berdasarkan klasifikasi tekstur travertin dengan tipe fasies granular [5], dinamakan Floatstone dengan komponen granular (*autochthonous/intrabasinal*) berupa Ooids. Keterdapatn Ooid memperlihatkan lapisan konsentris yang tersusun atas kristal aragonite. Lapisan ooid yang berwarna lebih gelap menunjukkan kandungan bahan organik lebih banyak dibanding yang terang (Gambar 4).



**Gambar 4.** Foto sayatan tipis sampel TRA2, dengan kenampakan ppl (A) dan kenampakan xpl (B)

**Sampel TRA3**

Berdasarkan analisis petrografi memperlihatkan tekstur dengan ukuran fragmen berupa Bioklas 0,2- 9mm, diantara mikrit dengan ukuran <1mm, struktur massif, dengan komposisi

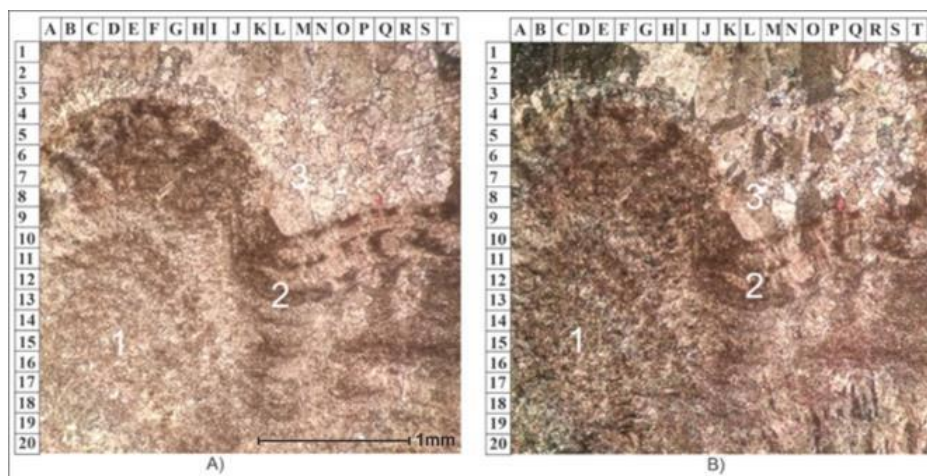
terdiri dari Bioklas 78%, mikrit 15%, kalsit 4%, rongga dan aragonite 3%. Berdasarkan klasifikasi tekstur travertin dengan tipe fasies granular [5], dinamakan Grainstone dengan komponen granular (*allochthonous/extrabasinal*) berupa bioclast (Gambar 5).

Keterdapatan foraminifera bentonik tersebut, memperlihatkan berbentuk seperti koin, berbentuk microgranular, dengan dinding karbonat, spiroculine (bentuk kamar melingkar) dan keterdapatan foraminifera bentonik dengan jenis lain, memperlihatkan dinding berkapur, dengan pola melingkar miliolid.

Keterdapatan ganggang hijau dengan jenis *Mizzia sp*, dengan ciri memiliki rongga pada bagian tubuhnya, segmen bulat berlubang, dan simetri radial, keterdapatannya berhubungan dengan pengendapan sedimen, spesies ini sangat berpengaruh terhadap kelimpahan produk pasir karbonatan di dekat *back-reef* [10].

#### **Sampel TRA4**

Berdasarkan analisis petrografi memperlihatkan tekstur dengan ukuran fragmen berupa Bioklas 2- 15mm, diantara mikrit dengan ukuran <1mm, struktur massif, dengan komposisi terdiri dari Bioklas 52%, mikrit 35%, kalsit 3,5%, dan aragonite 9,5%. Berdasarkan klasifikasi tekstur travertine fasies kerak [5], dinamakan Microbial laminates yang termasuk dalam kelompok *Microbialites* (Gambar 6).

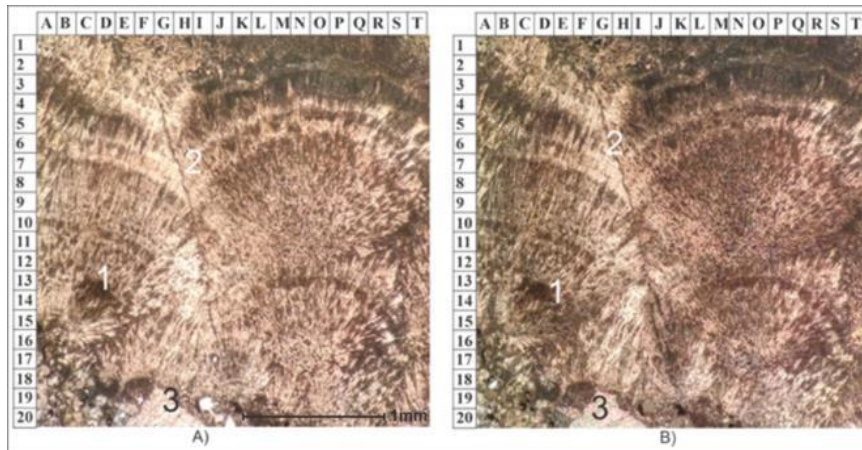


**Gambar 6.** Foto sayatan tipis sampel TRA4, dengan kenampakan ppl (A) dan kenampakan xpl (B).  
Keterangan: 1). Bioklas 2) Bioklas & 3) kalsit.

Kenampakan struktur stromatolitik memperlihatkan ciri laminasi lentikular, terbentuk akibat pertumbuhan kristal yang ada terganggu oleh proses evaporasi atau penguapan. Struktur tersebut terbentuk akibat proses penguapan dan adanya infiltrasi air pada lapisan dekat permukaan [10].

#### **Sampel TRA5**

Berdasarkan analisis petrografi memperlihatkan tekstur dengan ukuran fragmen berupa Bioklas 2- 15mm, diantara mikrit dengan ukuran <1mm, struktur massif, dengan komposisi terdiri dari Aragonit 85%, mikrit 11,5%, dan kalsit 3,5% (Gambar 7)



**Gambar 7.** Foto sayatan tipis sampel TRA5, dengan kenampakan ppl (A) dan kenampakan xpl (B). Keterangan: 1). Aragonite 2). microfracture 3). Kalsit.

Berdasarkan klasifikasi tekstur travertine fasies kerak [5], dinamakan *Fan/ray crystals* yang termasuk dalam kelompok *Abiotic crystalline crust*. Pada sayatan ini, diperlihatkan tampilan berupa struktur laminar melintang dengan pertumbuhan kristal aragonik, membentuk baji, berserat prismatic dan saling berhadapan, memperlihatkan terang dan gelap, hal tersebut mencerminkan orientasi sumbu kristal yang berbeda.

**Analisis Data Kimia Air**

Karakteristik kimia fluida sebagai hasil manifestasi permukaan diwakili oleh sampel WTR01, yang diambil pada manifestasi dengan suhu paling tinggi pada daerah penelitian, yang diasumsikan fluida tersebut dapat mewakili kondisi fluida yang berasal langsung dari reservoir.

Kandungan kimia air tersebut dapat dilihat pada (Table 1), dari hasil analisis sampel air tersebut kadar konsentrasi unsur dari tertinggi sampai terendah sebagai berikut: unsur Natrium ( $Na^+$ ) dengan nilai mencapai 7045 mg/L, unsur Klorida ( $Cl^-$ ) dengan nilai mencapai 6848,9 mg/L, senyawa Asam Karbonat ( $HCO_3^-$ ) dengan nilai mencapai 4036,8 mg/L, unsur Kalium ( $K^+$ ) dengan nilai mencapai 148 mg/L, unsur Boron (B) dengan nilai mencapai 147,05 mg/L, senyawa Sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) dengan nilai mencapai 39 mg/L, unsur Kalsium ( $Ca^+$ ) dengan nilai mencapai 36,8 mg/L, unsur Magnesium ( $Mg^{2+}$ ) dengan nilai mencapai 32,56 mg/L dan senyawa Silikat ( $SiO_2$ ) dengan nilai mencapai 13,29 mg/L.

Tabel 1. Kandungan komponen kimia anion dan kation pada sampel air daerah penelitian.

No.	Unsur/senyawa	Satuan	Hasil Uji	Metode Uji
1.	Kalsium ( $Ca^+$ )	mg/L	36,8	SNI 06-6989. 12-2004
2.	Natrium ( $Na^+$ )	mg/L	7045	APHA 2017, Section 3500-Na
3.	Kalium ( $K^+$ )	mg/L	148	APHA 2017, Section 3500-K
4.	Magnesium ( $Mg^{2+}$ )	mg/L	32,56	SNI 06-6989. 12-2004
5.	Klorida ( $Cl^-$ )	mg/L	6848,9	SNI 6989. 19-2009
6.	Sulfat ( $SO_4^{2-}$ )	mg/L	39	SNI 6989. 20-2009
7.	Asam karbonat ( $HCO_3^-$ )	mg/L	4036,8	APHA 2017, Section 2310 & 2320 B
8.	Boron (B)	mg/L	147,05	APHA 2017, Section 3120 B
9.	Silikat ( $SiO_2$ )	mg/L	13,29	APHA 2017, Section 4500 C

Komposisi kimia dari sampel air diplot pada diagram Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [6]. Pengeplotan kimia air untuk mendapatkan jenis air juga menggunakan klasifikasi air geotermal berdasarkan konsentrasi relatif Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [7].

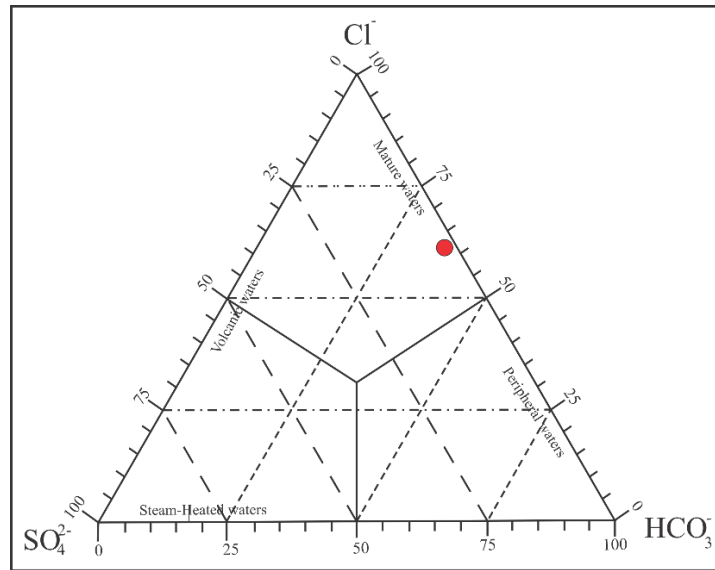
Berdasarkan pengeplotan konsentrasi Cl, SO<sub>4</sub>, dan HCO<sub>3</sub> pada diagram ternary Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [6], didapatkan hasil bahwa air tersebut termasuk ke dalam *mature waters* dan *volcanic waters* (Gambar 9). Hal tersebut dapat diinterpretasikan bahwa evolusi air tersebut dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik yang ada dan ketersediaan batuan sedimen karbonat berumur Tersier pada daerah penelitian.



Gambar 8. Keterdapatn manifestasi air hangat dan uap dengan salinitas tinggi, yang muncul pada bidang diskontinuitas berupa kekar dan batas lapisan batuan (A). Kemunculan manifestasi air hangat secara umum memperlihatkan arah timurlaut-baratdaya, searah dengan segmentasi Sungai Kaliulo (B).

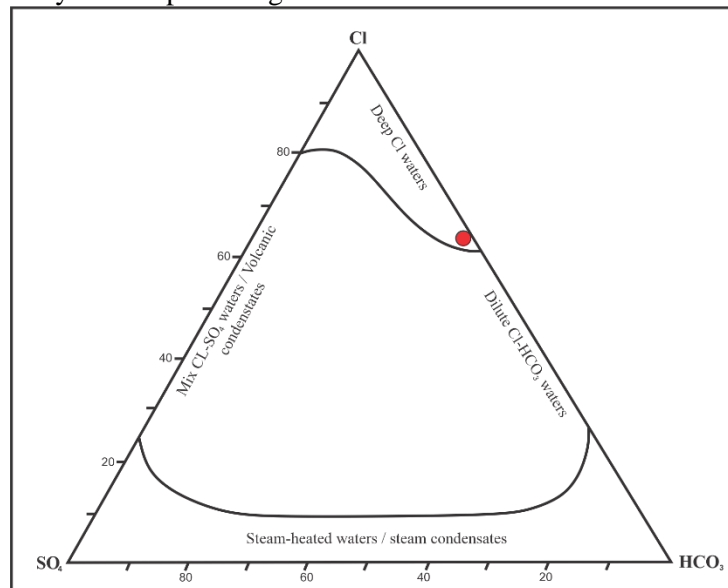
Berdasarkan pengeplotan konsentrasi Cl, SO<sub>4</sub>, dan HCO<sub>3</sub> pada diagram ternary Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [6], didapatkan hasil bahwa air tersebut termasuk ke dalam *mature waters* dan *volcanic waters* (Gambar 9). Hal tersebut dapat diinterpretasikan bahwa evolusi air tersebut dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik yang ada dan ketersediaan batuan sedimen karbonat berumur Tersier pada daerah penelitian.





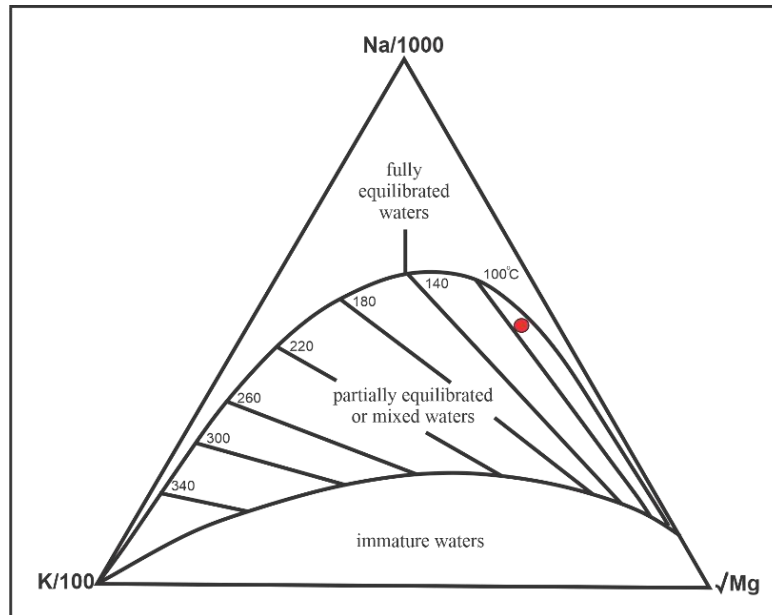
Gambar 9. Pengeplotan kimia air pada Diagram Ternary Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [6].

Berdasarkan pengeplotan konsentrasi Cl, SO<sub>4</sub>, dan HCO<sub>3</sub> pada diagram ternary Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [7], didapatkan hasil bahwa air tersebut termasuk ke dalam “Deep Cl waters” (Gambar 10). Konsentrasi Cl pada sampel air tersebut memang sangat tinggi mencapai 6848,9 mg/L, dibandingkan dengan konsentrasi SO<sub>4</sub> yang hanya mencapai 39 mg/L dan konsentrasi HCO<sub>3</sub> mencapai 4036,8 mg/L. Fluida geothermal yang berasal dari reservoir dalam biasanya memiliki konsentrasi sulfat rendah (<50 mg/kg) [7]. Hal tersebut terbukti bahwa konsentrasi sulfat pada sampel air tersebut hanya mencapai 39 mg/L.



Gambar 10. Pengeplotan kimia air pada Diagram Ternary Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [7].

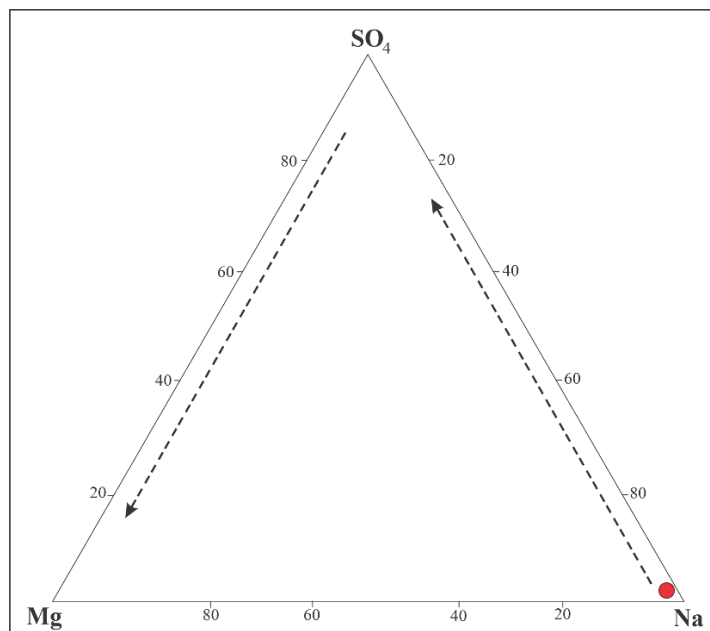
Dari hasil analisis diagram ternary Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [6] (Gambar 9) dan Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [7] (Gambar 10), dapat disimpulkan bahwa manifestasi air panas bumi pada daerah penelitian termasuk ke dalam “Mature chloride waters” (Gambar 11).



Gambar 11. Pengeplotan kimia air pada Diagram Ternary Na-K-Mg [6].

Berdasarkan hasil pengeplotan menggunakan komposisi air pada diagram ternary Na-K-Mg [6], air pada lokasi penelitian termasuk kedalam “*Partial equilibrium or mix waters*” dengan suhu determinasi pada reservoir antara 100-140°C.

Dari hasil tersebut maka dapat diinterpretasikan bahwa manifestasi air panas bumi pada daerah Kaliulo, telah terjadi pengenceran atau pencampuran kesetimbangan secara parsial pada saat fluida dari dalam menuju permukaan, dan telah mengalami reaksi hidrokimia antara fluida dengan batuan sampling, yang dalam hal ini diinterpretasikan berinteraksi dengan batuan penyusun Formasi Kerek. Reaksi pencampuran tersebut terjadi antara air meteorik dengan air formasi (*connate water*) yang diinterpretasikan berasal dari batuan sedimen tersier (Formasi Kerek). Jika pencampuran itu terjadi, maka fluida hidrothermal akan mengalami peningkatan salinitas, sehingga presipitasi karbonat meningkat.



Gambar 12. Pengeplotan komposisi kimia pada Diagram Ternary Na-SO<sub>4</sub>-Mg [9].

Dari pengeplotan tersebut dapat dilihat bahwa, proses pelarutan H<sub>2</sub>S pada manifestasi tersebut masih dalam tahap rendah. Rendahnya kadar tersebut dapat diinterpretasikan bahwa

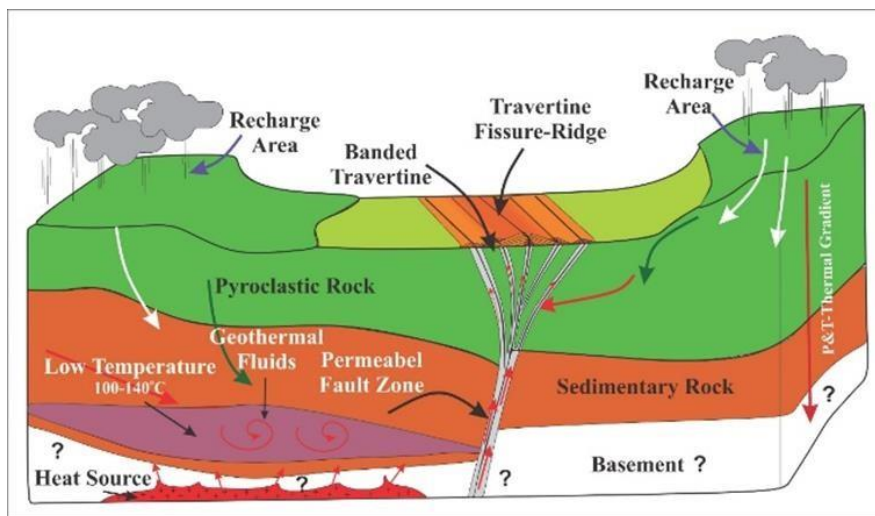
pada kondisi tersebut, Proses oksidasi di dekat permukaan yang digerakkan oleh reaksi antara O<sub>2</sub> dengan H<sub>2</sub>S, yang dalam hal ini akan memproduksi asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) masih sangat minim, sehingga kadar konsentrasi SO<sub>4</sub> yang dihasilkan masih rendah.

Pembagian lingkungan pengendapan travertin yang didasarkan atas bentuk morfologi [8], menunjukkan bahwa lingkungan pengendapan travertin tersebut, termasuk ke dalam *Fissure ridge*, hal tersebut dibuktikan dengan adanya penumpukan endapan travertin di sekitar zona rekahan berupa kekar dan batas perlapisan batuan, serta memiliki jarak berkisar 1 meter hingga 13 meter.

Keterdapatannya vein karbonat pada singkapan batupasir karbonatan, yang termasuk Satuan Batulempung Karbonatan Kerek, mengindikasikan bahwa air formasi atau *connate water* yang ada pada batuan sedimen berumur Tersier memang benar adanya. Diinterpretasikan vein karbonat tersebut terbentuk akibat meningkatnya tekanan hidrostatik di bawah permukaan bumi akibat *overburden* oleh batuan di atasnya dan adanya jalur rekahan, sehingga fluida tersebut dapat naik menuju permukaan bumi melalui rekahan yang ada, yang disebabkan oleh struktur geologi, lalu fluida yang membeku sebelum mencapai permukaan membentuk vein.

Rasio HCO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub> dapat digunakan sebagai indikator arah aliran. Arah aliran fluida yang menjauhi zona upflow, mendapatkan kesempatan untuk bereaksi dengan batuan dan air, oleh karena itu dapat meningkatkan komponen HCO<sub>3</sub>. Kombinasi dan hilangnya H<sub>2</sub>S oleh reaksi antara air dengan batu, seiring dengan peningkatan aliran lateral, mengarah pada peningkatan rasio HCO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub> dari zona upflow [7]. Berdasarkan hal tersebut, dapat diinterpretasikan bahwa rasio HCO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub> pada sampel air daerah penelitian memiliki perbandingan dengan konsentrasi HCO<sub>3</sub> mencapai 4036,8 mg/L dan konsentrasi SO<sub>4</sub> mencapai 39 mg/L adalah HCO<sub>3</sub>:SO<sub>4</sub> = 1:103. Oleh karena itu, daerah penelitian diinterpretasikan sebagai zona outflow dari sistem panas bumi Gunung Ungaran.

Terkonsentrasinya titik manifestasi mata air hangat sepanjang Zona Sesar Mendatar Mengkakan Wonorejo, menunjukkan bahwa kehadiran struktur geologi tersebut berperan penting terhadap sirkulasi fluida hidrotermal, dengan arah penyebaran manifestasi timurlaut-baratdaya. Struktur sesar tersebut membuat permeabilitas batuan yang dipotongnya menjadi besar, sehingga dapat meningkatkan sirkulasi fluida hidrotermal dan menyebabkan infiltrasi air meteorik hingga kedalaman tertentu mencapai sebuah reservoir yang dalam dan bercampur dengan fluida asal yang lebih dalam (*Deep Cl waters*). Kandungan komponen bikarbonat yang relatif tinggi mengindikasikan adanya interaksi fluida dengan batuan sedimen karbonat yang dilaluinya (Gambar 13).



**Gambar 13.** Ilustrasi model endapan travertin pada daerah penelitian.

Kesetimbangan silika dan kalsit sangat penting dalam sistem panas bumi, karena keduanya mempengaruhi jumlah  $\text{SiO}_2$  dan Ca dalam larutan, serta merupakan penyebab utama *scaling* pada sumur pemboran [7]. Hal tersebut menjadi alasan, deposisi kalsit lebih intens di sekitar zona pendidihan dalam sistem geothermal. Masalah *scaling* menjadi topik serius jika terjadi pendidihan pada sumur eksplorasi sumber daya geothermal. Secara ringkas, kelarutan kalsit meningkat, seiring penurunan suhu, meningkatnya tekanan parsial dan meningkatnya salinitas. Dari hasil analisis kimia air panas bumi daerah penelitian, konsentrasi  $\text{SiO}_2$  tergolong rendah dengan kadar 13,290 mg/L dan konsentrasi Ca juga tergolong rendah dengan kadar 36,8 mg/L, sehingga jika pada daerah penelitian dilakukan pemboran, maka masalah *scaling* pada pipa pemboran tidak terlalu berbahaya.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis petrografi pada endapan travertin, secara umum proses pembentukan endapan travertin pada daerah penelitian dipengaruhi oleh proses hidrothermal dan proses biologi oleh bakteri heterotrof. Lingkungan pengendapan travertin tersebut, termasuk ke dalam *Fissure ridge*.

Berdasarkan analisis geokimia air, sampel air pada manifestasi tersebut berdasarkan [7] termasuk ke dalam tipe air Klorida Bikarbonat. Berdasarkan plotting pada diagram Ternary  $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$  [7] termasuk kedalam *Deep Cl waters*. Berdasarkan pengeplotan menggunakan diagram ternary Na-K-Mg [6], air pada lokasi penelitian termasuk kedalam "*Partial equilibrium or mix waters*" dengan suhu determinasi reservoir 100-140°C.

Manifestasi mata air hangat dan endapan travertine terlokalisir pada area tertentu yang diinterpretasikan dipengaruhi oleh Sesar Mendatar Mengkanan Wonorejo, Kehadiran struktur geologi tersebut berperan penting terhadap sirkulasi fluida hidrothermal, dengan arah penyebaran manifestasi timurlaut-baratdaya. Struktur sesar tersebut membuat permeabilitas batuan yang dipotongnya menjadi besar, sehingga dapat meningkatkan sirkulasi fluida hidrothermal dan menyebabkan infiltrasi air meteorik hingga kedalaman tertentu mencapai sebuah reservoir yang dalam dan bercampur dengan fluida asal yang lebih dalam (*Deep Cl waters*). Kandungan komponen bikarbonat yang relatif tinggi mengindikasikan adanya interaksi fluida dengan batuan sedimen karbonat yang dilaluinya.

#### 5. SARAN

Adapun saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini adalah perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut terutama studi geofisika untuk mengetahui kondisi bawah permukaan, untuk membuktikan lebih lanjut sintesa aspek-aspek geologi pada daerah penelitian.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ketua Program Studi Teknik Geologi dan pimpinan redaksi jurnal Geoda ITNY, serta pihak lain atas dukungan dan bantuan selama studi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim, 2017. Potensi Panas Bumi Indonesia. Jakarta. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- [2] Corbett, J.G., & Leach, M.T., 1996, South west Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration and Mineralization, Australia.
- [3] Croci, A., 2016. Lithofacies Characteristic and Spatial Distribution of Travertine Deposition Systems in Central Italy: Case Studies from the Messinian Albegna and Pliocene Acque Albule Basins. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra. Cirlo XXVIII.
- [4] Claproth R., 1988. Petrography And Geochemistry Of Volcanic Rocks From Ungaran, Central Java, Indonesia. Wollongong. University of Wollongong Thesis Online.
- [5] Gandin A. & Capezzouli E., 2014. Travertine: Distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring systems. The journal of the International Association of Sedimentologists. 264-290.
- [6] Giggenbach, F.W., 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. Geochemical Cosmochemical Acta. Vol. 55 pp. U.S.A. Pergamon Press.

- 
- [7] Nicholson, K., 1993. Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Technique. School of applied science. The Robert Gordon University Aberdeen ABI IHG, Scotland: United Kingdom.
- [8] Pentecost, A., 2005. Travertine. Berlin Heidelberg. Springer Verlag.
- [9] Phuong, K.N., Harijoko, A., Itoi, R., & Unoki, Y., 2012. Water Geochemistry and Soil Gas Survey at Ungaran Geothermal Field, Central Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 229-230.
- [10] Scholle, A.P., & Ulmer-Scholle, S.D., 2003. A Colour Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis. Tulsa, Oklahoma, USA. The American Association of Petroleum Geologist.
- [11] Setijadji, L.D. 2010. Segmented Volcanic Arc and its Association with Geothermal Fields in Java Island, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali*, 12 p.

