

## POLA ALIRAN PANAS BERDASARKAN ANALISIS FLUIDA DAN MINERAL UBAHAN DI DAERAH PANAS BUMI SORIK MARAPI, KABUPATEN MANDAILING NATAL, PROVINSI SUMATRA UTARA

### *HEAT FLOW PATTERN BASED ON ANALYSIS OF GEOTHERMAL FLUID AND ALTERATION MINERAL IN SORIK MARAPI REGION, MANDAILING NATAL DISTRICT, NORTH SUMATRA PROVINCE*

Hisyam Azhar Azizi<sup>1</sup>, Agus Didit Haryanto<sup>1</sup>, Johannes Hutabarat<sup>1</sup>, Dicky Muslim<sup>1</sup>, Dewi Gentana<sup>1</sup>, dan Ryan Hidayat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

<sup>2</sup>KS Orka Renewables Pte Ltd.

hisyam16001@mail.unpad.ac.id

#### ABSTRAK

Daerah panas bumi Sorik Marapi di Kabupaten Mandailing Natal, Provinsi Sumatra Utara merupakan sistem panas bumi bertemperatur tinggi yang diduga dari karakteristik kimia air panas yang muncul di permukaan. Kehadiran mineral ubahan seperti epidot pada serbuk bor sumur eksplorasi memperkuat pendugaan temperatur reservoir yang mencapai 235°C. Karakteristik air panas bersifat lebih asam di sekitar fumarol dan mineral ubahan yang didapatkan dari sumur bor mencerminkan zona *upflow* sedangkan kelompok mata air panas berupa air klorida ber pH netral di sebelah utara dengan elevasi yang lebih rendah mencerminkan zona *outflow* sistem panas bumi di sini. Hal ini merupakan ciri khas aliran fluida panas yang terjadi di daerah panas bumi sistem vulkanik dengan morfologi terjal (*steep terrain volcanic system*) seperti halnya daerah Sorik Marapi.

**Kata kunci:** Sorik Marapi, geokimia, panas bumi, zona alterasi, *upflow*, *outflow*

#### ABSTRACT

*Sorik Marapi geothermal area in Mandailing Natal Regency, North Sumatra Province has a high-temperature geothermal system that is interpreted from the chemical characteristics of hot springs. The presence of alteration minerals such as epidot in exploration well cutting samples strengthens the estimated reservoir temperature reaches 235°C. The presence of hot water are more acidic hot spring around fumaroles and the minerals obtained from the drill well reflect the upflow zone while the hot spring group of neutral chloride water in the north with lower elevation reflects the outflow zone of the geothermal system here. This is a characteristic of hot fluid flow that occurs in geothermal areas of volcanic systems with steep terrain as well as Sorik Marapi area.*

**Keywords:** Sorik Marapi, geochemical, geothermal, alteration zones, *upflow*, *outflow*

#### PENDAHULUAN

Panas bumi sebagai energi terbarukan merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan sangat cocok dikembangkan di masa depan untuk memenuhi kebutuhan energi. Indonesia terletak di pertemuan tiga lempeng aktif yang memungkinkan panas bumi dari kedalaman bumi ditransfer ke permukaan

melalui sistem rekahan. Posisi strategis Indonesia menjadikan negara ini sebagai negara paling kaya dengan energi panas bumi dan sistem hidrotermal yang tersebar di sepanjang busur vulkanik. Potensi sumber energi panas bumi lebih besar dibandingkan dengan akumulasi sumber energi dari batubara, minyak dan gas bumi, serta uranium (Zulkifli, 2017).

Pulau Sumatra merupakan bagian dari rangkaian busur vulkanik yang membentang dari Pulau Sumatra di bagian barat hingga ke Pulau Banda di bagian timur, yang dikenal dengan nama Busur Vulkanik Sunda – Banda. Di daerah Sumatra Utara, busur vulkanik ini memiliki potensi panas bumi kedua terbesar di Indonesia setelah Jawa Barat, termasuk di dalamnya adalah daerah Sorik Marapi.

Daerah penelitian secara administratif berada di Kabupaten Mandailing Natal, Provinsi Sumatra Utara. Daerah penelitian merupakan lapangan panas bumi PT. Sorik Marapi Geothermal Power, serbuk bor yang dijadikan sampel pada penelitian ini berasal dari sumur X-06, X-08 dan XE-01.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui keberadaan zona aliran panas berdasarkan karakteristik fluida dan mineral alterasi di daerah penelitian.

## GEOLOGI

Pulau Sumatra merupakan pulau ke 6 (enam) terbesar di dunia. Secara ekspresi fisiografi, pulau ini memiliki orientasi berarah barat-laut-tenggara. Luas pulau ini  $\pm 435.000 \text{ km}^2$ , dengan panjang 1.650 km dari Banda Aceh di bagian utara hingga Tanjungkarang di bagian selatan. Lebar berkisar antara 100-200 km di bagian utara dan sekitar 350 km di bagian selatan (Juliarka & Iqbal, 2019). Pegunungan Barisan yang berada sepanjang bagian barat membagi pantai barat dan timur Pulau Sumatra. Lereng yang mengarah ke Samudera Hindia pada umumnya curam sehingga menyebabkan sabuk bagian barat biasanya berupa pegunungan. Sabuk bagian timur pada pulau ini ditutupi oleh formasi Tersier dan dataran rendah aluvial (Darman dan Sidi, 2000).

Pulau Sumatra merupakan bagian *Sundaland* yang terletak di bagian baratdaya. Oleh karena itu, teori tentang pembentukan Sumatra tidak terlepas dengan sejarah pembentukan *Sundaland* itu sendiri (Darman dan Sidi, 2000).

Secara regional geologi daerah penelitian berdasarkan pada Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping, Sumatra Utara skala 1:250.000 (Aldiss, 1983). Daerah penelitian berada di dalam terban (*graben*) Penyabungan yang merupakan bagian dari sesar Sumatra. Gunung Sorik Marapi berjarak sekitar 15 km ke arah barat-laut dari sesar Sumatra dan berdekatan dengan busur magmatik yang terbentuk di Pulau Sumatra yaitu Pegunungan Bukit Barisan.

Secara umum geologi daerah Sorik Marapi tersusun oleh batuan vulkanik Tersier dan batuan Kuartar. Batuan Tersier pada umumnya berkomposisi andesitik, sedangkan batuan Kuartar pada umumnya tersusun oleh batuan vulkanik yang berkomposisi dasitik dan batuan sedimen.

Daerah penelitian terdiri dari tujuh satuan batuan, yang terdiri dari dua satuan batuan gamping, dua satuan batuan vulkanik, satu satuan batuan terobosan, satu satuan batuan metamorf dan satu satuan endapan permukaan (aluvium). Sebagian dari batuan vulkanik tersebut diperkirakan berasal dari titik erupsi yang berbeda, yaitu Gunung Sirakara yang berumur Tersier, dan Gunung Sorik Marapi yang berumur Kuartar. Batuan gamping di daerah penelitian berumur Paleozoikum dan/atau Mesozoikum tak terbedakan (dipetakan secara tersendiri), sedangkan endapan permukaan terdiri dari material lepas yang termasuk dalam satuan aluvium. Stratigrafi satuan batuan secara berurutan dari tua ke muda adalah Satuan Metamorf (Pku), Satuan Batugamping (Mpu), Batuan terobosan (Mpip), Anggota Batugamping (Ppsl), Satuan Tuff (Tmv), Lahar Andesitik dan Breksi Gunungapi (Qvsm), dan Lava Andesit (Qhvsm) (Gambar 1).

## METODE

### Analisis Geokimia Panas Bumi

Analisis geokimia bertujuan untuk mengelompokkan fluida panas bumi berdasarkan perbandingan (rasio) unsur dan klasifikasinya, serta untuk memperoleh data kimia fluida dan gas, serta unsur-unsur lain yang terkandung dalam

manifestasi panas bumi sehingga dapat mengetahui jenis fluida, zona *upflow* dan zona *outflow* pada sistem panas bumi serta menentukan aliran air panasnya.

Dalam penelitian ini data kimia yang digunakan adalah data kimia air dari manifestasi panas bumi yang diolah dengan menggunakan geindikator dari masing-masing rasio unsur kimia air, selain itu juga dilakukan analisis isotop stabil. Hal ini akan menginformasikan kondisi reservoir, aliran dan lingkungan pembentukan fluida, zona *upflow* dan *outflow* dari suatu sistem panas bumi di kedalaman (Nicholson, 1993).

**Geindikator**

Giggenbach (1988) membagi zat-zat terlarut dalam dua katagori yaitu *tracer* dan geindikator. *Tracer* secara geokimia bersifat *inert* (misalnya Li, Rb, Cl dan B) yang apabila ditambahkan ke dalam fluida akan bersifat tetap dan dapat diidentifikasi asal usul fluidanya. Geindikator adalah zat terlarut yang bersifat reaktif dan

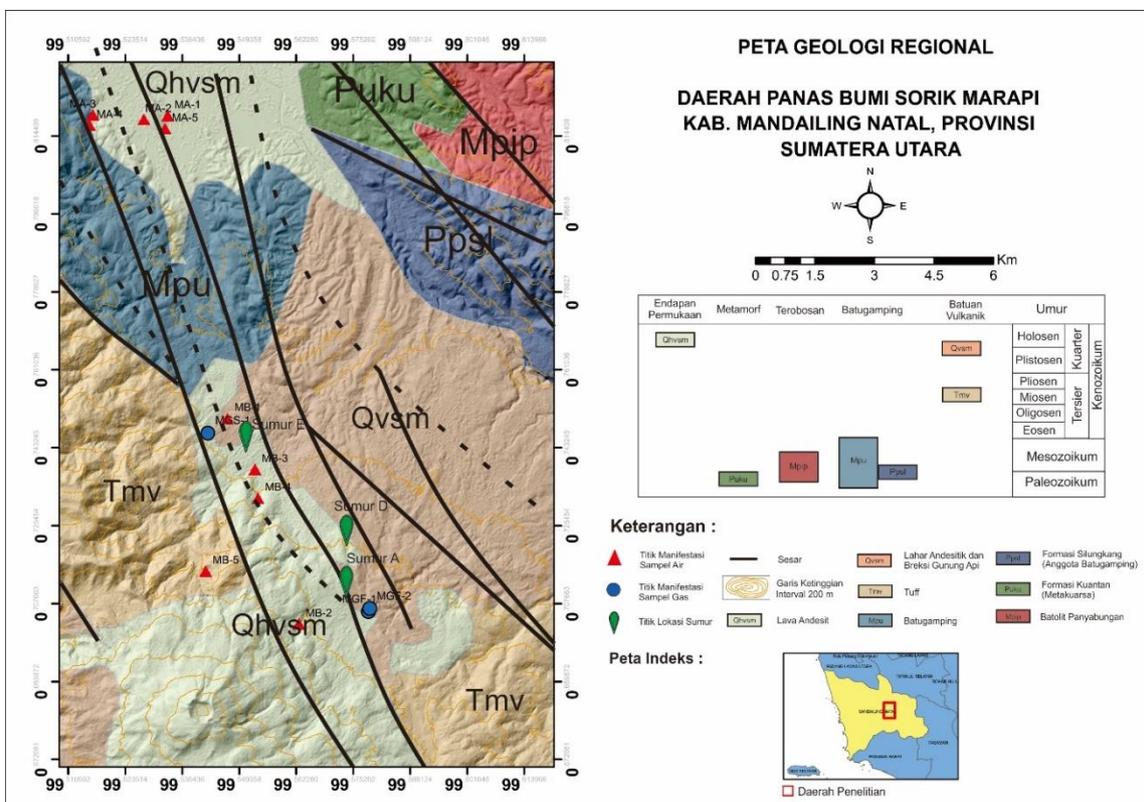
mencerminkan lingkungan *equilibrium* (kesetimbangan), misalnya Na dan K. Beberapa tipe geindikator kimia panas bumi menurut Giggenbach and Goguel (1989) yaitu:

- Geindikator Cl-SO4-HCO3
- Geindikator Cl-Li-B.
- Geindikator Na-K-Mg.

**Geotermometer**

Geotermometer merupakan parameter untuk menghitung atau mengukur temperatur air yang ada dalam wilayah sumber air panas dengan menggunakan termometer, dan yang menjadi objek pengukurannya adalah kandungan unsur kimia yang ada di dalam air tersebut. Adapun cara yang lain digunakan adalah dengan menggunakan persamaan yang telah ditetapkan tergantung unsur-unsur yang terkandung di dalam air (Prihadi, 2006) yaitu:

- Geotermometer Silika.
- Geotermometer Na-K.



**Gambar 1.** Peta Geologi Daerah Penelitian (diadaptasi dari Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping oleh D.T. Aldiss, 1983)

## Analisis Petrografi

Melakukan deskripsi sayatan tipis batuan dan sampel serbuk (*cutting*) yang hasilnya berupa jenis litologi dan komposisi mineral, kehadiran mineral alterasi dan intensitas alterasi dengan bantuan mikroskop dan klorida (HCl). Analisis petrografi batuan dilakukan untuk penamaan jenis batuan dengan pendekatan kuantitatif, yang di amati dari sayatan tipis juga sampel *cutting* dan kemudian mengestimasi persentase material penyusun batuan tersebut.

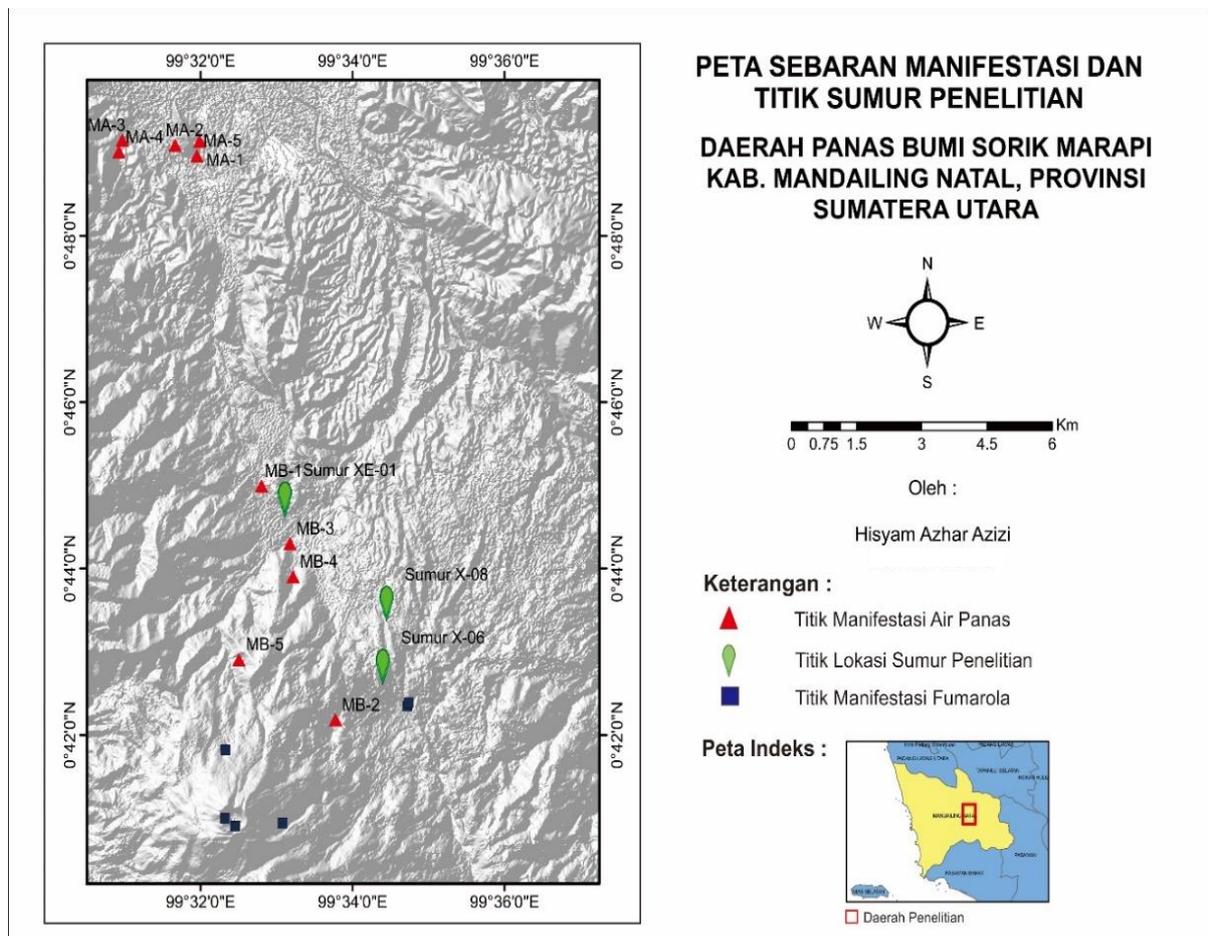
Deskripsi mineral primer dan sekunder dilakukan berdasarkan sifat optik dari mineral transparan dibawah mikroskop baik pada nikol sejajar (PPL) dan nikol bersilang (XPL). Deskripsi sifat optik dan genesa mineral mengacu pada buku *Atlas of Alteration: A field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals* (1997) oleh Thompson serta *Important*

*Hydrothermal Minerals and their Significance* oleh Kingston Morrison beserta referensi lainnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penyebaran Manifestasi dan Titik Sumur di Daerah Penelitian

Karakteristik fluida panas bumi dapat diketahui dari manifestasi yang muncul di permukaan. Manifestasi panas bumi yang ditemukan di daerah Sorik Marapi berupa manifestasi air panas di 10 (sepuluh) lokasi dan terdapat 3 (tiga) sumur yang menjadi objek penelitian (Gambar 2). Dari analisis geokimia yang dilakukan terhadap beberapa sampel air di daerah penelitian, memberikan gambaran mengenai tipe fluida, kondisi *reservoir* dan sumber fluidanya sedangkan dari analisis petrografi sumur penelitian dapat diketahui zona alterasinya.



**Gambar 2.** Peta sebaran manifestasi panas bumi dan titik sumur permukaan yang menjadi objek penelitian.

### Litologi Sumur Penelitian

Pengamatan litologi dilakukan pada 3 (tiga) sumur yaitu X-06, X-08 dan XE-01 yang didominasi oleh produk vulkanik seperti lava andesit, *dacite tuff* dan *rhyolite tuff* serta produk metamorf seperti *phyllite* dengan tingkat alterasi dari lemah hingga sangat kuat. Litologi dari 3 (tiga) sumur tersebut terdiri dari tiga satuan stratigrafi dari tua ke muda berupa satuan Metagunung api berupa *phyllite*, Satuan Tuff berupa *dacite tuff* dan *rhyolite tuff* yang sudah teralterasi, dan satuan lava andesit.

Hasil pengamatan mikroskopis dan megaskopis, sumur X-06 memiliki litologi *dacite tuff*. Pada sumur ini terlihat intensitas alterasi dari sedang (40%) hingga sangat kuat (85%) menurut klasifikasi intensitas alterasi oleh Browne (1991). Intensitas alterasi meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Mineral primer berupa plagioklas, kuarsa, piroksen dan k-felspar, dan mineral sekunder berupa kalsit, lempung, klorit, epidot, serisit, magnetit, pirit, kuarsa sekunder, hematit dan anhidrit. Mineral sekunder epidot, serisit, dan anhidrit muncul pada kedalaman 910 mKU, sedangkan mineral sekunder seperti hematit, lempung dan klorit berkurang seiring bertambahnya kedalaman.

Hasil pengamatan mikroskopis dan megaskopis, sumur X-08 memiliki litologi lava andesit, *rhyolite tuff* dan *phyllite*. Pada sumur ini terlihat intensitas alterasi dari rendah (10%) hingga sangat kuat (85%) menurut klasifikasi intensitas alterasi oleh Browne (1991). Intensitas alterasi meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Mineral primer berupa plagioklas, kuarsa, piroksen dan k-felspar dan mineral sekunder berupa kalsit, lempung, klorit, epidot, magnetit, pirit, kuarsa sekunder dan hematit. Mineral sekunder *epidot* dan *klorit* muncul pada kedalaman 1.790 mKU, sedangkan mineral sekunder seperti hematit dan lempung berkurang seiring bertambahnya kedalaman.

Hasil pengamatan dan megaskopis, sumur XE-01 memiliki litologi filit. Pada sumur ini terlihat intensitas alterasi dari sedang (40%) hingga sangat kuat (90%) menurut klasifikasi intensitas alterasi oleh Browne (1991). Intensitas alterasi meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Mineral primer berupa plagioklas, kuarsa, piroksen dan k-felspar, dan mineral sekunder berupa kalsit, lempung, klorit, epidot, magnetit, pirit, kuarsa sekunder dan hematit. Mineral sekunder kalsit, pirit, klorit, epidot, serisit dan anhidrit muncul pada kedalaman 1.533 mKU, sedangkan mineral sekunder seperti kalsit, klorit, serisit, anhidrit dan lempung berkurang seiring bertambahnya kedalaman.

### ZONA ALTERASI SUMUR PENELITIAN

#### Zona Alterasi Sumur X-06

Berdasarkan kelimpahan asosiasi mineral ubahan, sumur ini terbagi menjadi 3 zona alterasi yaitu : Zona Hematit, Zona Kalsit-Klorit, dan Zona Kalsit-Kuarsa Sekunder. (Tabel 6)

- **Zona Hematit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit ditemukan pula mineral kalsit, kuarsa sekunder, pirit dan klorit. Zona ini terdapat pada kedalaman 499 s.d. 502 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 120°C s.d. 170°C.

- **Zona Kalsit-Klorit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, klorit, kuarsa sekunder dan pirit ditemukan pula mineral hematit, lempung, epidot, serisit, magnetit dan anhidrit. Zona ini terdapat pada kedalaman 910 s.d. 913 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 170°C s.d. 230°C.

- **Zona Kalsit – Kuarsa Sekunder**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, kuarsa sekunder, epidot dan pirit ditemukan pula mineral lempung, klorit dan

magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 1.861 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 230°C s.d. 280°C.

## Zona Alterasi Sumur X-08

Berdasarkan kelimpahan asosiasi mineral ubahan, sumur ini terbagi menjadi 3 zona alterasi yaitu : Zona Hematit, Zona Hematit-Kalsit, dan Zona Kalsit-Epidot (Tabel 6).

### • Zona Hematit

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit ditemukan pula mineral kalsit. Zona ini terdapat pada kedalaman 253 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 50°C s.d. 150°C.

### • Zona Hematit-Kalsit

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit dan kalsit ditemukan pula mineral lempung, pirit, magnetit dan kuarsa sekunder. Zona ini terdapat pada kedalaman 860 s.d. 1.230 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 150°C s.d. 230°C.

### • Zona Kalsit - Epidot

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, kuarsa sekunder dan epidot ditemukan pula mineral pirit, klorit, hematit dan magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 1.790 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 230°C s.d. 280°C.

## Zona Alterasi Sumur XE-01

Berdasarkan kelimpahan asosiasi mineral ubahan, sumur ini terbagi menjadi 3 zona alterasi yaitu : Zona Hematit, Zona Kalsit - Klorit, dan Zona Kuarsa Sekunder - Pirit. (Tabel 6)

### • Zona Hematit

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit ditemukan pula mineral kuarsa

sekunder, lempung dan magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 813 s.d. 816 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 120°C s.d. 170°C.

### • Zona Kalsit - Klorit

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, klorit, kuarsa sekunder dan pirit ditemukan pula mineral hematit, lempung, epidot, serisit, magnetit dan anhidrit. Zona ini terdapat pada kedalaman 1.533 s.d. 1.536 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 170°C s.d. 230°C.

### • Zona Kuarsa Sekunder - Pirit

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kuarsa sekunder dan pirit ditemukan pula mineral klorit, hematit, lempung, epidot, kalsit dan magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 2.391 s.d. 2.394 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 230°C s.d. 280°C.

## Analisis Geokimia

Pengolahan data geokimia didapatkan dari data manifestasi (Tabel 1) dengan hasil uji sampel laboratorium air (Tabel 2) yang diaplikasikan atau di *plot* pada diagram segitiga: Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>, Cl-Li-B, dan Na-K-Mg.

### • Hasil dan Analisis Geokimia Air

#### Geoindikator Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>

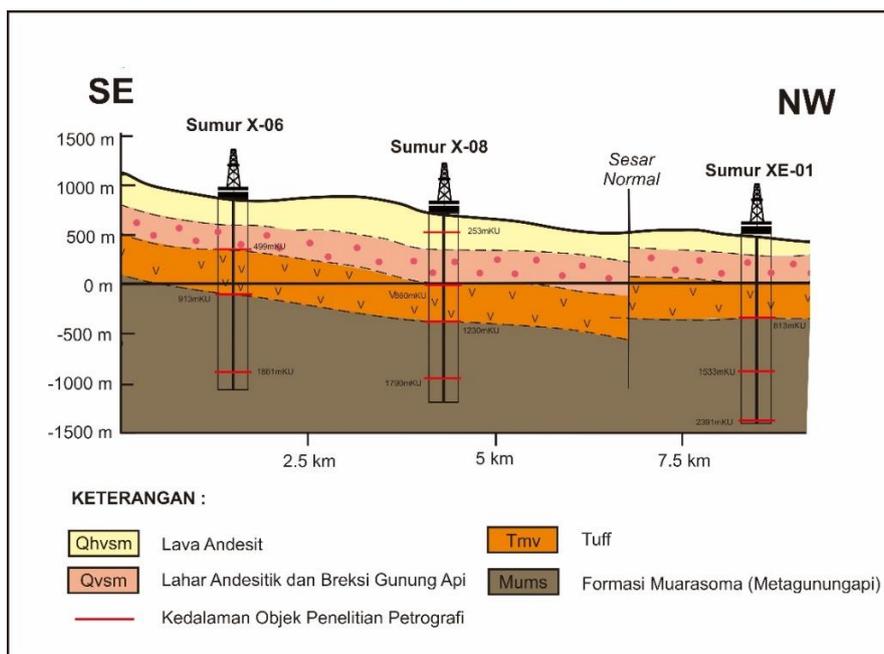
Hasil *ploting* ion kimia (geoindikator) pada diagram rasio Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> akan menggambarkan tipe fluida dan karaktersistik reservoirnya, melalui pengolahan data dengan menghitung persentase masing-masing unsur Cl, HCO<sub>3</sub> dan SO<sub>4</sub>. Dari hasil *plot* geoindikator, jenis air panas bumi daerah Sorik Marapi terdiri atas tiga jenis air (Gambar 3). Berikut adalah uraian dari setiap jenis air panas bumi di daerah Sorik Marapi:

Tabel 1. Data Manifestasi

No. sample	X	Y	Elevation (masl)	Temp (°C)	pH	Flow (L/s)	Type	Water Sampling	Gas/Steam Sampling	Stable Isotope Sampling
MA-1	559314	90485	224	94.5	7	~5	Hot spring	V	-	V
MA-2	558720	90394	231	98.9	7	~10	Hot spring	V	-	V
MA-3	557433	90505	237	42.2	6	~5	Flowing artesian bore	V	-	V
MA-4	557348	90240	252	42.6	6	~5	Warm spring	V	-	V
MA-5	559247	90157	245	101	7	~0.5	Hot spring	V	-	V
MB-1	560826	82849	506	76.4	6.5	~0.5	Hot spring	V	-	V
MB-2	562629	77662	1018	58.8	5-6	~1	Warm spring	V	-	V
MB-3	561518	81566	564	51.3	7	<1	Warm spring	V	-	V
MB-4	561599	80839	627	22.9	6	50	Cold stream	V	-	V
MB-5	560277	78995	1087	19.9	5	~20	Cold stream	V	-	V
-	564388	78011	863	97.1	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	564423	78092	859	97.4	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	559942	77041	1489	94.4	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	560183	75356	2001	98.2	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	559941	75526	2025	91.5	-	-	Fumaroles	-	-	V
-	561356	75423	1601	93.7	-	-	Fumaroles	-	V	V

Tabel 2. Hasil analisis sample air.

Sampel	HCO3 (mg/l)	B (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	Fe (mg/l)	Li (mg/l)	Mg (mg/l)	K (mg/l)	SiO2 (mg/l)	Na (mg/l)	SO4 (mg/l)
MA-1	190	27	54	573	0.11	2.6	0.59	45	201	436	92
MA-2	207	26	59	559	0.33	2.6	0.86	44	177	421	88
MA-3	154	0.3	12.4	0.86	0.08	0.03	1.9	5	80	43	10.8
MA-4	150	0.3	18.2	0.78	0.08	0.02	3.4	4	72	34	10.9
MA-5	143	27	36	621	0.08	2.9	1	45	194	436	95
MB-1	200	0.3	37	1.4	0.28	0.01	9.3	10	109	37	30
MB-2	172	2.9	218	326	0.08	0.12	70	37	224	117	349
MB-3	124	0.3	18.3	4.2	0.08	0.01	4.1	11	112	25	14.3
MB-4	89	0.3	16.3	1	0.08	0.01	6.4	3.1	83	8.3	3.7
MB-5	41	0.3	9.2	0.72	0.08	0.01	2.9	2.3	49	4.7	4.7



Gambar 3. Litologi sumur penelitian

## Air Klorida

Jenis air klorida memiliki komposisi Cl yang dominan dibandingkan dengan komposisi  $\text{SO}_4$  dan  $\text{HCO}_3$ , terbentuk pada kondisi *mature water*, terdapat pada manifestasi mata air panas MA-1, MA-2 dan MA-5. Kehadiran klorida yang mendominasi, menunjukkan bahwa mata air panas tersebut berasal dari air panas bumi yang muncul ke permukaan pada zona lemah, bergerak jauh secara lateral sebagai *outflow*. Pada sistem panas bumi dataran tinggi jenis air klorida dapat mengidentifikasi daerah permeabel zona tinggi, fluida keluar melewati jalur sesar atau pada daerah yang mengalami tektonik aktif, pengangkatan (*uplift*) sedang hingga tinggi dan terdeformasi. Hal tersebut diperoleh melalui perhitungan indeks geomorfik kuantitatif antara lain; *stream length gradient index* (SI), *valley height width ratio* (Vf) dan *basin shape index* (Bs), sebagai parameter morfotektonik (Gentana, D., 2018).

## Air Sulfat – Klorida

Jenis air sulfat-klorida memiliki komposisi  $\text{SO}_4$  dan Cl yang sama-sama dominan dibandingkan dengan komposisi  $\text{HCO}_3$  yang minim, terdapat pada manifestasi mata air panas MB-2. Air panas MB-2 ini diinterpretasikan terbentuk dari fluida panas bumi yang saat bergerak ke permukaan mengalami pencampuran (*mixing*) dengan air klorida yang juga bercampur dengan batuan yang dilewatinya mengandung sulfur dan ion sulfat ( $\text{H}_2\text{S}$ ) diperlihatkan oleh komposisi  $\text{SO}_4$  yang signifikan. Air panas MB-2 muncul ke permukaan sebagai *upflow*, pada kondisi *steam heated water* dan *volcanic water*. Hal tersebut menunjukkan telah terbentuk sistem kesetimbangan fluida panas bumi di kedalaman yang dipengaruhi oleh adanya proses pencampuran (*mixing*) dan pelarutan (*diluted*) serta interaksi antara fluida dengan batuan yang dilaluinya (*water rock interaction*) selama perjalanan fluida dari reservoir menuju ke permukaan.

## Air Bikarbonat

Jenis air bikarbonat memiliki senyawa  $\text{HCO}_3$  yang dominan terdapat pada manifestasi mata air panas MA-3, MA-4, MB-1, MB-3, MB-4, dan MB-5. Kehadiran unsur  $\text{HCO}_3$  dominan yang dapat berasal dari kondensasi gas  $\text{CO}_2$  dengan air tanah atau air permukaan (*meteoric water*) dan jenis air ini termasuk ke dalam daerah *peripheral water* yang muncul ke permukaan sebagai *outflow*.

## Geoindikator Cl-Li-B

Geoindikator Cl-Li-B diaplikasikan pada penelitian untuk mengetahui kesamaan asal air panas bumi dan memperkirakan batuan pada *reservoir* oleh adanya proses pengenceran berdasarkan perbandingan presentase konsentrasi Cl/100, Li dan B/4.

Hasil *ploting* berdasarkan data air di atas, pada diagram segitiga Cl/100, Li dan -B/4 (Gambar 4), memperlihatkan sampel air panas MA-3, MA-4, MB-1, MB-3, MB-4, dan MB-5 berada pada posisi mendekati ke unsur Boron (B), hal ini menandakan bahwa selama perjalanannya air panas tersebut dari sumber panas ke permukaan mengalami banyak pengenceran oleh batuan yang dilewatinya. Proses pencucian (*Leaching Rock*) oleh batuan samping berupa batuan beku yang bersifat basalt menyebabkan tingginya kandungan unsur B, namun dikarenakan terdapat batuan sedimen di daerah penelitian, tidak menutup kemungkinan batuan sedimen mengalami proses pencucian dari fluida ini. Fluida berada pada kondisi *absorption of high B/Cl steam*.

Hasil *ploting* mata air panas MA-1, MA-2 dan MA-5 berada pada posisi dengan konsentrasi Cl dan B relatif seimbang dan masih menunjukkan bahwa sedikit lebih ke posisi B, dapat diinterpretasikan ketiga mata air panas tersebut masih dipengaruhi oleh reaksi dengan batuan samping (basalt atau sedimen) pada kondisi *Li less or Cl absorption* dan mengalami proses penyerapan gas magmatik dengan rasio

B/Cl relatif seimbang dibandingkan dengan mata air panas lainnya. Mata air panas MB-2 adalah satu-satunya manifestasi air panas pada posisi mendekat ke arah puncak Cl dibandingkan dengan seluruh mata air panas lainnya. Terdapatnya nilai konsentrasi Cl yang lebih besar pada mata air panas MB-2 ini dimungkinkan bahwa mata air panas yang naik ke permukaan adalah fluida yang berasal dari sumber panas dan mengalami pendinginan yang relatif cepat oleh batuan sekitar yang dilewatinya, namun dikarenakan unsur Cl mempunyai sifat yang susah bereaksi, mudah berpindah dan bersifat stabil, sehingga masih mendominasi pada saat air panas sampai di permukaan sebagai *outflow* pada kondisi *absorption of low B/Cl steam*

**Tabel 3.** Rasio unsur Cl/B untuk identifikasi reservoir panas bumi

Sample	Cl (mg/l)	B (mg/l)	Cl/B	Reservoir
MA-1	573	27	21.2	B
MA-2	559	26	21.5	B
MA-3	0.86	0.3	2.9	B
MA-4	0.78	0.3	2.6	B
MA-5	621	27	23.0	B
MB-1	1.4	0.3	4.7	B
MB-2	326	2.9	112.4	A?
MB-3	4.2	0.3	14.0	B
MB-4	1	0.3	3.3	B
MB-5	0.72	0.3	2.4	B

Hasil dari *Cross Plot* Rasio Cl/B dan Tabel rasio Cl/B (Gambar 5 dan Tabel 3) dengan ion klorida (Cl) dan boron (B) yang merupakan salah satu ion yang bersifat *mobile* dan dapat digunakan sebagai *tracer* atau jejak untuk menentukan *origin* fluida panas bumi (Giggenbach, 1991), mata air panas MA-1, MA-2, MA-5 dan MB-3 (rasio Cl/B: 14-23 mg/l) berada pada garis *trend* yang sama dengan kelompok mata air panas MA-3, MA-4 MB-1, MB-4, dan MB-5 (rasio Cl/B : 2.4- 4.6 mg/l).

Meskipun ada perbedaan rasio dari dua kumpulan tersebut, hal ini dapat diinterpretasikan bahwa seluruh mata air panas di daerah penelitian merupakan bagian dari sistem panas bumi yang sama, namun memiliki perbedaan "usia". Sistem

panas bumi yang dianggap "lebih tua" umumnya memiliki rasio Cl/B yang lebih rendah (Giggenbach, 1991). Sedangkan pada mata air panas MB-2 tidak menunjukkan *trend* yang sama dan memiliki rasio Cl/B yang sangat tinggi sehingga diinterpretasikan merupakan sistem panas bumi tersendiri, maka diindikasikan terdapat 2 (dua) sistem panas bumi di daerah penelitian.

**Geoindikator Na-K-Mg**

Dari data hasil analisis kimia air dilakukan perhitungan nilai Na/1000, K/100, dan  $\sqrt{Mg}$  menghasilkan persentase (kesetimbangan fluida) dari ketiga unsur tersebut yang di plot pada diagram segitiga Na-K-Mg.

Hasil *ploting* ion kimia Na-K-Mg, dari 10 (sepuluh) sampel mata air panas di daerah penelitian (Gambar 6), memperlihatkan dari 7 (tujuh) lokasi mata air panas (MA-3, MA-4, MB-1, MB-2, MB-3, MB-4, dan MB-5) memiliki nilai Mg relatif jauh lebih tinggi dan berada pada puncak nilai Mg bila dibandingkan dengan kandungan K dan Na dan kondisi fluida "*Immature Waters*", hal tersebut dapat diinterpretasikan bahwa fluida di titik lokasi tersebut telah mengalami proses pencampuran dengan air permukaan (air tanah). Hasil *ploting* dari 3 (tiga) lokasi lainnya (MA-1, MA-2 dan MA-5) memperlihatkan adanya peningkatan kandungan Na dan K pada kondisi fluida mencapai kesetimbangan, masuk ke dalam "*Partial Equilibrium*" pada temperatur *reservoir* :  $\pm 237^{\circ}C$  (MA-1),  $\pm 239^{\circ}C$  (MA-2) dan  $\pm 238^{\circ}C$  (MA-5).

Tabel 4 menunjukkan, bahwa air panas di daerah penelitian mempunyai nilai kandungan isotop deuterium berkisar -55,9 s.d. -63,4 (‰) dan nilai oksigen 18 antara -7,86 s.d. -9,39 (‰). Nilai rasio dari conto air tersebut diplot pada grafik isotop stabil deuterium dan Oksigen 18 (Craig, 1961 dalam Nicholson, 1993) seperti pada Gambar 7 yang memperlihatkan adanya pengkayaan  $^{18}O$  lebih jelas pada kelompok air panas MA-1, MA-2, dan MA-5, yang mengindikasikan telah terjadinya proses *water-rock interaction* pada pembentukan air panas tersebut. Sedangkan air panas

MB-2 (paling representatif dari kelompok air panas MB) yang muncul pada bagian selatan daerah penyelidikan, pada elevasi lebih tinggi, bertemperatur di permukaan rendah (58,8°C), pH cenderung asam (5-6), bertipe air sulfat dengan konsentrasi klorida cukup signifikan, tidak ada pengkayaan isotop <sup>18</sup>O (air panas terletak menempel pada garis MWL), sehingga diinterpretasikan bahwa ada indikasi pembentukan air panas MB-2 yang berasosiasi dengan proses *leaching country-rock*, dan merupakan zona *upflow*.

### Geotermometer

Perhitungan geotermometer dilakukan dari sampel-sampel air yang telah diambil.

Berdasarkan perhitungan geotermometer metode Silika dan Na/K yang diajukan oleh Fournier (1979) dan Giggenbach (1998), temperatur reservoir di manifestasi bagian utara (kelompok MA) ialah sekitar 118°-246°C dan bagian selatan (kelompok MB) sekitar 101°-405°C (Tabel 5).

Namun dikarenakan hanya fluida manifestasi yang berasal dari MA-1, MA-2, MA-5 dan MB-2 yang memiliki rasio HCO<sub>3</sub>-Cl-SO<sub>4</sub>, maka hasil perhitungan geotermometer dari 4 mata air panas tersebut lebih dapat dipercaya. Hasil perhitungan metode Na-K-Mg menurut Giggenbach (1998) juga menunjukkan temperatur yang hampir sama (Gambar 8).

**Tabel 4.** Data Isotop d<sup>18</sup>O dan dD di daerah penelitian

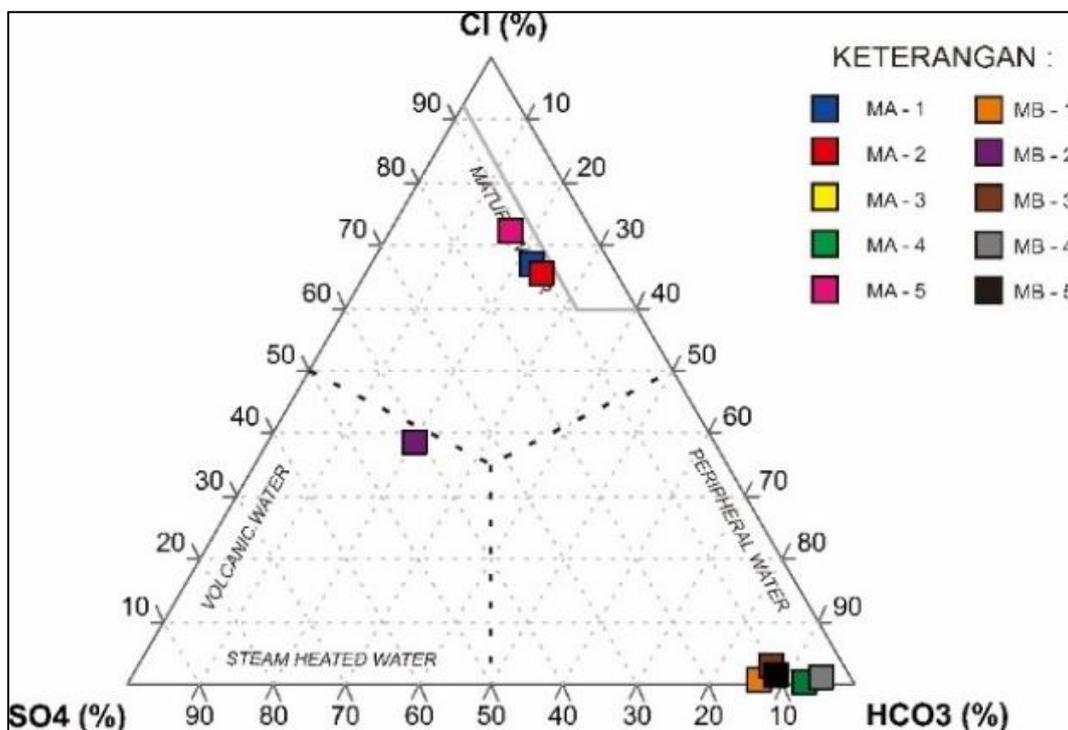
Sampel	Temp (°C)	Cl (ppm)	d <sup>18</sup> O (‰)	dD (‰)
MA-1	95	573	-7.86	-55.9
MA-2	96	559	-8.27	-59
MA-3	42	0.9	-8.76	-58
MA-4	43	0.8	-8.72	-56.1
MA-5	101	621	-7.92	-57.4
MB-1	76	1.4	-8.5	-57.1
MB-2	59	326	-9.14	-63
MB-3	51	4.2	-9.39	-63.4
MB-4	23	1	-8.87	-56.6
MB-5	20	0.7	-8.9	-58.2

**Tabel 5.** Data Hasil Perhitungan Geotermometer

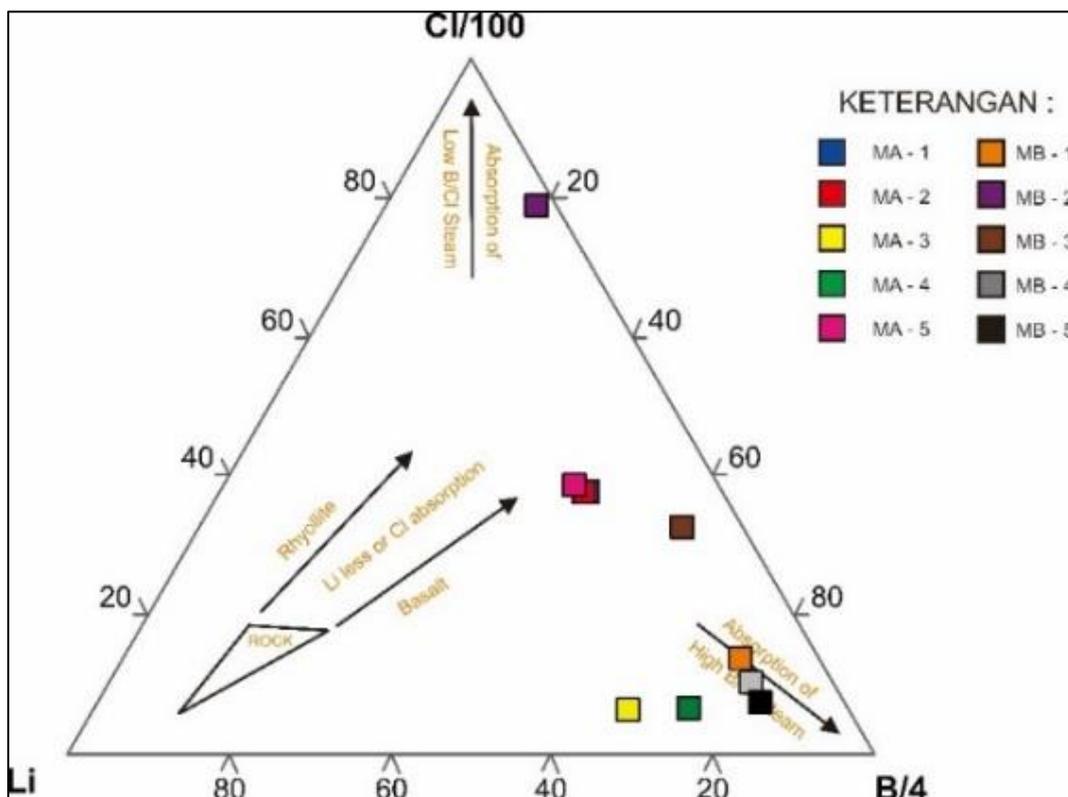
Sampel		MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5	MB-1	MB-2	MB-3	MB-4	MB-5
Metode Silika (T°C)	Quartz No Steam Loss	180	172	125	120	178	142	188	144	127	101
	Quartz Max Steam Loss	168	161	122	118	166	137	175	138	124	102
Sampel		MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5	MB-1	MB-2	MB-3	MB-4	MB-5
Metode Na/K (T°C)	(Fournier,1979)	220	221	230	231	220	320	341	388	364	405
	(Giggenbach,1988)	235	236	245	246	235	326	345	387	365	401

Tabel 6. Log Mineral Alterasi Sumur X-06,X-08, dan XE-1

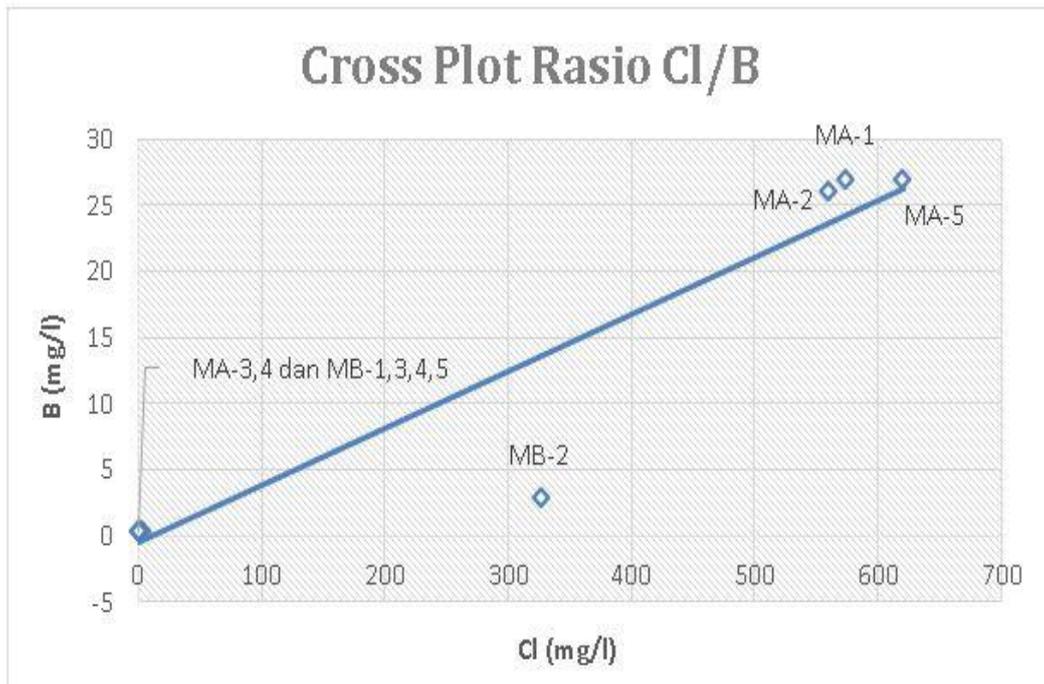
SUMUR	Kedalaman (m/VD)	HYDROTHERMAL ALTERATION											Intensitas Alterasi (Browne, 1991)	Zona Alterasi Mineral	Indikasi Porositas	
		Kelimpahan Mineral Alterasi: 1 - Jarang 2 - Beberapa 3 - Cukup 4 - Melimpah														
		Hm/Lim	Cal	sec Qtz	Pyr	Cly	Chl	Epi	Srst	Mt	Anh					
X-06	499-502	4	1	1	1		1							45	Zona Hematite/Limonite	Rongga dan Rekahan
	910-913	1	3	2	2	1	3	1	1	1	1			50	Zona Calcite-Chlorite	Rekahan dan Urat
	1861		4	3	2	1	1	2		1				75	Zona Calcite-Sec Quartz	Rekahan dan Urat
X-08	253	2	1											30	Zona Hematite/Limonite	Rongga
	860	2	2	1	1	1				1				45	Zona Hematite-Calcite	Rongga dan Rekahan
	1230	2	1	1	1	1				1				45	Zona Hematite/Limonite	Rongga dan Rekahan
	1790	1	4	2	1		1	2		1				75	Zona Calcite-Sec Quartz-Epidote	Rekahan dan Urat
XE-01	813-816	1		1		1				1				35	Zona Hematite/Limonite	Rekahan dan Urat
	1533-1536	1	3	2	2	1	3	1	1	1	1			70	Zona Calcite-Chlorite	Rekahan dan Urat
	2391-2394	1	1	3	2	1	1	1		1				75	Zona Sec Quartz-Pyrite	Rekahan dan Urat



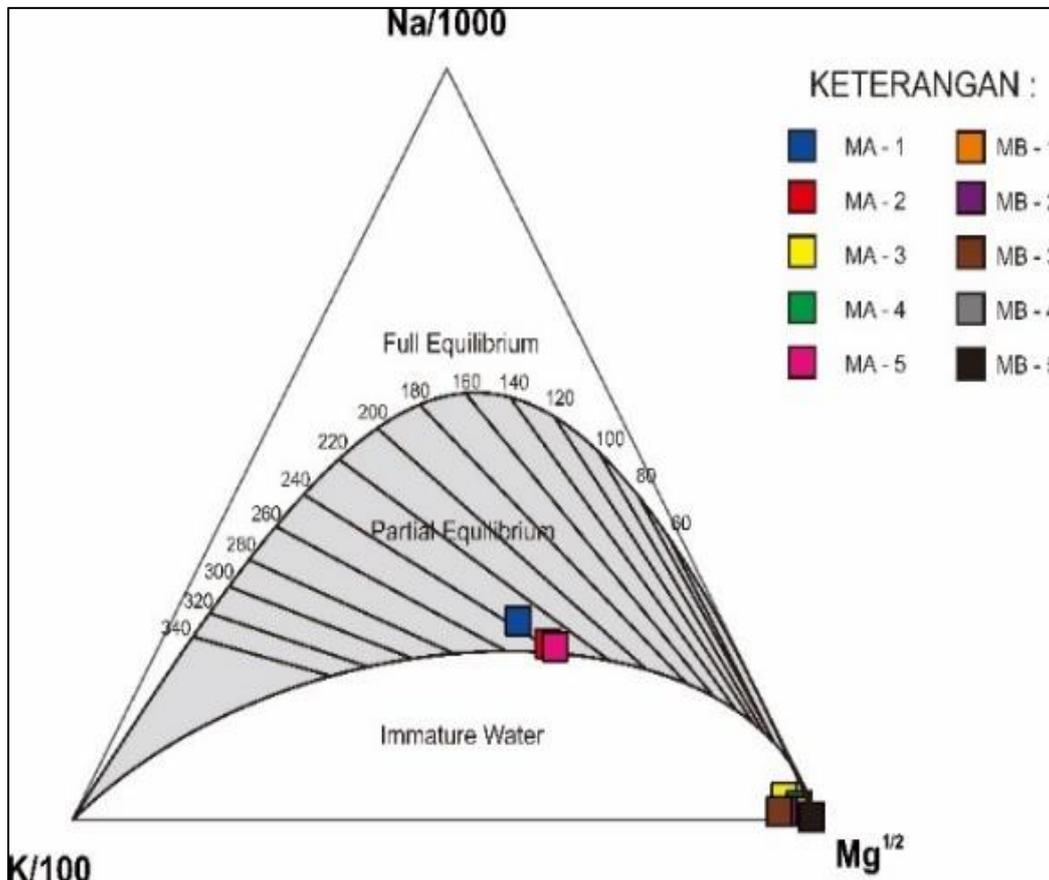
Gambar 4. Geoindikator Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>



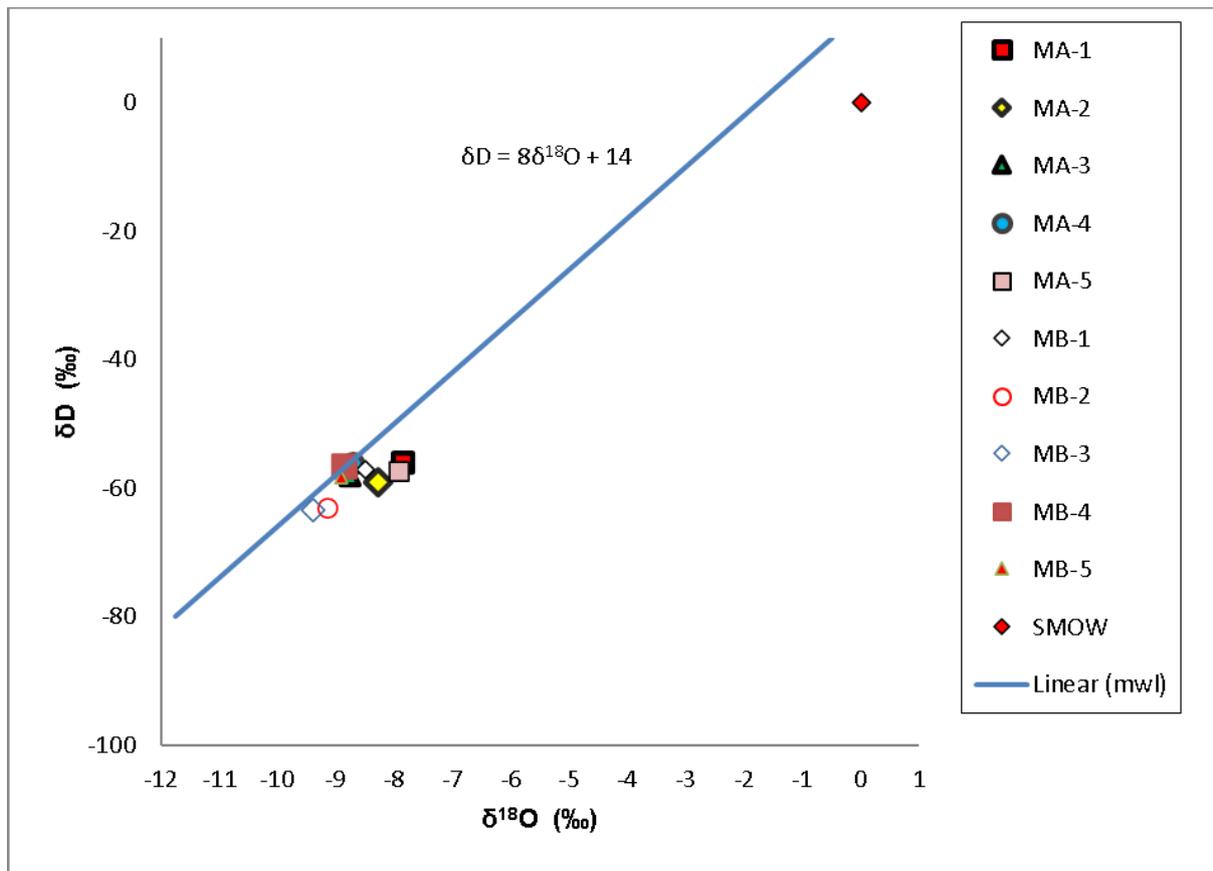
Gambar 5. Geoindikator Cl-Li-B



Gambar 6. Cross plot rasio Cl/B, menunjukan semua manifestasi memiliki kesamaan asal fluida kecuali MB-2



Gambar 7. Geoindikator Na-K-Mg



Gambar 8. Grafik Isotop <sup>18</sup>O dan D, air panas daerah panas bumi Sorik Marapi

**Model Aliran Fluida**

Pemodelan aliran fluida panas bumi daerah Sorik Marapi ini didasarkan pada data geologi, geoindikator fluida dan litologi sumur. Dari hasil analisis, manifestasi panas bumi kelompok MA (MA-1, MA-2, dan MA-5), bertemperatur paling tinggi (101°C), pH netral (7), muncul pada bagian utara daerah penyelidikan, pada elevasi lebih rendah, daripada kelompok MB, bertipe air klorida, dan dari perhitungan geotermometer Silika diperoleh 180°C, serta NaK 235°C. Merupakan indikasi yang paling representatif sebagai zona *Outflow*, dan kelompok MB sebagai *Upflow*, seperti yang digambarkan pada model aliran fluida (Gambar 9).

Mata air panas yang terdapat di daerah Sorik Marapi dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu kelompok MB dan kelompok MA. Kelompok MB menempati elevasi lebih tinggi di sekitar keberadaan manifestasi fumarol. Kelompok mata air panas MA

yang mempunyai elevasi lebih rendah yaitu di daerah sebelah utara dengan jarak sekitar 6 km dari kelompok mata air panas MB dan suhu air panas mencapai 100°C (*boiling spring*). Air panas kelompok MA mempunyai pH netral dan sebagian mempunyai kandungan kimia yang mencerminkan air yang berasal dari reservoir panas bumi (*deep water*) yang dapat disajikan dalam Tabel 2.

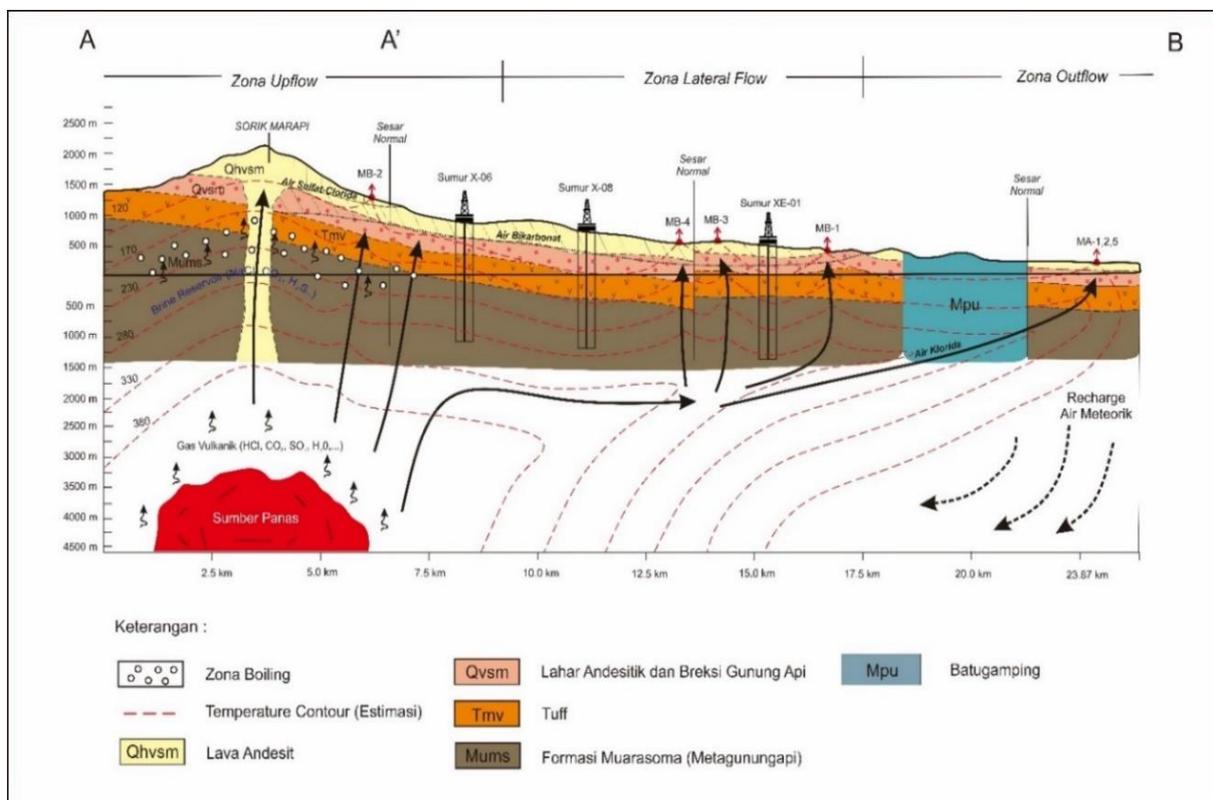
Dari hasil pengeplotan diagram segitiga Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> (Gambar 4) terlihat beberapa mata air panas kelompok MA (MA-1,MA-2 dan MA-5) merupakan air klorida. Satu mata air panas dari kelompok MB yaitu MB-2 merupakan air klorida-sulfat dengan pH relatif lebih asam dari kelompok air panas MA. Selebihnya air panas yang lain lebih merupakan air yang didominasi air permukaan. Karakteristik air panas dari ke tiga sumber ini (MA-1,MA-2 dan MA-5) dianggap yang paling representatif untuk dipakai dalam pendugaan temperatur reservoir. Klorida adalah unsur yang pada

suhu rendah di bawah 300°C akan berada pada fasa cair. Air dari reservoir bersuhu tinggi akan naik ke permukaan kemudian mengalir secara lateral mengikuti lereng dan muncul ke permukaan melalui zona lemah (struktur geologi) di daerah elevasi lebih rendah menjauhi zona *upflow*. Hal ini umum terjadi pada daerah panas bumi dengan morfologi lereng terjal seperti daerah Sorik Marapi, sehingga air ini muncul di daerah *outflow*. Sedangkan air panas dari MB-2 mempunyai kandungan Mg yang cukup tinggi sehingga tidak representatif untuk penghitungan geotermometer Na-K. Dari air panas MA-1, MA-2 dan MA-5 didapatkan perkiraan temperatur reservoir sebesar 220°C-235°C (Tabel 5). Perkiraan temperatur ini dianggap lebih mungkin karena tidak terpengaruh oleh adanya pengenceran air oleh air meteorik.

Dari pengeplotan ke diagram **Na/1000, K/100, dan  $\sqrt{Mg}$  (Gambar 6) juga menunjukkan bahwa air panas MA-1, MA-2 dan MA-5 berada pada zona *partial***

*equilibrium* yang mencerminkan adanya air reservoir yang naik ke permukaan dan terdapat pencampuran dari air meteorik. Dari diagram ini juga mendukung penghitungan geotermometer Na-K yang didapatkan perkiraan suhu reservoir berkisar 220°C-235°C. Dari grafik isotop oksigen dan hidrogen ( $^{18}O$  vs  $^2H$ ) pada Gambar 7 terlihat adanya *shifting* lebih jelas pada kelompok air panas MA-1, MA-2, dan MA-5 yang mengindikasikan telah terjadinya proses *water-rock interaction* dari air reservoir dan batuan yang dilaluinya sehingga adanya pengkayaan  $^{18}O$  dalam air panas.

Dari pengamatan petrografis terhadap mineral ubahan yang terdapat dalam serbuk bor sumur X-06, X-08 dan XE-01 didapatkan kehadiran mineral indikator temperatur tinggi antara lain kehadiran mineral epidot. Kelimpahan mineral ubahan lain juga mengindikasikan adanya zona temperatur tinggi di kedalaman yang mengindikasikan adanya reservoir temperatur tinggi di Daerah Sorik Marapi.



Gambar 9. Model Aliran Fluida Daerah Penelitian.

## KESIMPULAN

Berdasarkan geotermometer air panas dari kelompok mata air panas MA di dapatkan temperatur reservoir Sorik Marapi mencapai 220°C - 235°C yang termasuk dalam kategori sistem panas bumi bertemperatur tinggi. Kelompok mata air panas MA merupakan air panas klorida dengan pH neutral muncul di zona *outflow* sistem panas bumi Sorik Marapi. Sedangkan air panas kelompok MB yang direpresentasikan oleh MB-2 dengan tipe sulfat-klorida dengan PH relatif lebih asam merupakan air panas yang muncul di zona *upflow* yang dikonfirmasi dengan keterdapatan jenis mineral ubahan indikator temperatur tinggi yang diperoleh dari serbuk bor sumur X-06, X-08, dan XE-01. Fluida panas dalam sistem panas bumi Sorik Marapi dari reservoir temperatur tinggi di bawah mata air panas MB-2 mengalir ke atas dan secara lateral mengalir ke arah utara berinteraksi dengan batuan yang dilalui dan muncul sebagai kelompok manifestasi MA di zona *outflow*.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Sorik Marapi yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian di lapangan Sorik Marapi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Barnes, L. H., 1997, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, reprinted 3<sup>rd</sup> Edition, USA
- Bateman, A.M, and Jensen, M.L., 1981. *Economic Mineral Deposits*. John Wiley and Sons, Australia.
- Browne P.R.L dan Brown.K., 1996, *Geothermal Technology: Earth Science Notes, Material for Teaching the Teachers Course III*, Geothermal Institute, Institute Univ. of Auckland.
- Corbett, G.J., dan Leach, T.M., 1996, *Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration, and Mineralization*, Manual Kursus Singkat Eksplorasi di Baguio, Philippines.
- Darman, H. dan Sidi, F.H. 2000. *An Outline of The Geology of Indonesia*. Ikatan Ahli Geologi Indonesia.
- D.T. Aldiss. 1983. *Peta Geologi Regional Lembar Lubuk Sikaping, Sumatra Utara*. Departemen Pertambangan dan Energi, Direktorat Jendral Geologi dan Sumberdaya Mineral, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Dickson, M.H. and Fanelli, M. .2004. *What Is Geothermal Energy?* International Geothermal Association, Bochum.
- Giggenbach, W.F., 1988. *Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators*. *Geochim Cosmochim. Acta*, 52: pp. 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., 1989: *The chemical and isotopic position of Ohaaki field within the Taupo Volcanic Zone*. Proc. Eleventh N.Z. Geothermal Workshop, Aukland: pp. 81-88.
- Giggenbach, W. F., 1991, *Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Application of Geochemistry In Geothermal Reservoir Development*.
- Guilbert, J. M., Park, C. F., 1986, *The Geology of Ore Deposits*, WH.Freeman and Company, New York.
- Henley RW, Truesdell AH, Barton Jr. PB, Whitney JA. 1984. *Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems*.
- Hochstein, M.P. dan Browne, P.R.L. 2000. *Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources*, In Encyclopedia of Volcanoes, H. Sigurdsson, B.F., Houghton, S.R., McNutt, H., Rymer dan J. Stix (eds.), Academic Press.
- Juliarka R. B.& Iqbal M, 2020. *Model Gaya Berat 2D untuk mengungkap Struktur Geologi Bawah Permukaan Pada Daerah Panas Bumi Natar*. Buletin Sumber Daya Geologi, Vol. 15 No.1 pp 39-49.
- Morrison, K. 1997. *Important Hydrothermal Minerals and their Significance*. Geothermal and mineral Services Division Kingston Morrison Limited, Seventh Edition, New Zealand.

- Oppenheimer, C. (1995). K. N. Nicholson, 1993. *Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. xv 263 pp. Berlin, Geological Magazine, 132(1), 125-126.
- Powell, T. 2000. *A Review of Exploration Gas Geothermometry*. Proceedings, TwentyFifth Workshop on Geothermal Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Powell, T. and Cumming, W. 2010. *Spreadsheets For Geothermal Water and Gas Geochemistry*. Proceedings, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Rahadinata, T. Takodama I, Zarkasyi A, 2019. *Penerapan Koreksi Topografi Pada Data Magnetotelurik dan Analisis Data Gaya Berat Dalam Interpretasi Daerah Panas Bumi Pantar, Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur*. Buletin Sumber Daya Geologi Vol. 14 No.3, pp 156-168.
- Reyes, G.A. 2000. *Petrology and Mineral Alteration in Hydrothermal System: From Diagenesis to Volcanic Catastrophes*. Geothermal Training Programme, United Nations University, Reykjavik, Iceland.
- Simmon, S.F. 1995. *Geothermal Technology: Geochemistry*. Pertamina Course, Cirebon.
- Sumintadireja, P., 2005, *Vulkanologi dan Geothermal*, Penerbit ITB, 153hal.
- Thompson, A.J.B, Thompson J.F.H 1996. *Atlas of Alteration: A field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals*. Geological Association of Canada Mineral Deposit Division, Canada.

Diterima	: 15 September 2020
Direvisi	: 21 September 2020
Disetujui	: 30 November 2020