

Identifikasi Karakteristik Mata Air Panas Bumi di Sibanggor Tonga Kabupaten Mandailing Natal Menggunakan Diagram Segitiga Fluida

Murda Jasmita, Ardian Putra*

Laboratorium Fisika Bumi, Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163 Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 27 Juli 2020
Direvisi: 26 Agustus 2020
Diterima: 2 September 2020

Kata kunci:

diagram segitiga fluida
mata air panas
Sibanggor Tonga

Keywords:

fluid diagram
hot spring
Sibanggor Tonga

Penulis Korespondensi:

Ardian Putra
Email: ardianputra@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang identifikasi karakteristik fluida mata air panas tipe fluida, kesetimbangan, asal usul sumber fluida dan pengenceran mata air panas bumi di Sibanggor Tonga Kabupaten Mandailing Natal. Sampel penelitian diambil dari lima sumber mata air dengan volume sampel di setiap lokasi sebanyak 500 ml. Nilai pH dari 5 titik mata air panas berkisar dari 0,6 sampai 6,3 dan pengukuran temperatur permukaan diperoleh mulai dari 37,6°C hingga 95,3°C. Konsentrasi unsur Na, K, Mg, K, B dan Li diukur menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy* (ICP-AES). Pengukuran konsentrasi unsur Cl diperoleh dari persamaan konduktivitas yang didapatkan dari alat *conductivity* meter dan pengukuran konsentrasi SO_4 dengan metode *visible spectroscopy*. Pengukuran konsentrasi HCO_3 diukur dengan metode titrasi asam basa. Diagram Cl- HCO_3 - SO_4 menunjukkan semua fluida bertipe sulfat-klorida dan diagram Na-K-Mg menunjukkan semua fluida berada pada *immature water* yang mengindikasikan fluida telah mengalami reaksi dengan unsur lain saat menuju permukaan. Asal sumber fluida berada jauh dari reservoir atau aliran fluida bergerak secara lateral saat menuju permukaan, yang terlihat dari diagram Cl-B-Li.

Research has been carried out on the identification of the characteristics of the hot spring fluid type, equilibrium, the origin of the fluid source and the dilution of the geothermal springs in Sibanggor Tonga, Mandailing Natal Regency. The research sample was taken from five springs with a sample volume of 500 ml at each location. The pH values of the 5 hot springs ranged from 0.6 to 6.3 and surface temperature measurements were obtained from 37.6°C to 95.3°C. The concentrations of Na, K, Mg, K, B and Li were measured using Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). Measurement of the element concentration of Cl is obtained from the conductivity equation obtained from a conductivity meter and measurement of SO_4 concentrations using the visible spectroscopy method. HCO_3 concentration measurements were measured by the acid-base titration method. The Cl- HCO_3 - SO_4 diagram shows all sulfate-chloride type fluids and the Na-K-Mg diagram shows all fluids are in immature water which indicates that the fluid has undergone a reaction with other elements when it reaches the surface. as long as the fluid source is far from the reservoir or the fluid flow moves laterally towards the surface, as seen from the Cl-B-Li diagram.

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Secara geografis menurut Direktorat Panas Bumi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia (2017), Indonesia terletak di daerah yang dilewati oleh *ring of fire* atau cincin api pasifik yang berarti daerah yang rawan terhadap bencana alam seperti letusan gunung berapi, gempa bumi dan bencana tektonik lainnya. Hal positif dari posisi tersebut adalah Indonesia memiliki potensi panas bumi yang melimpah dengan 342 titik lokasi potensi yang tersebar dari Sabang sampai Merauke dan merupakan potensi panas bumi terbesar di dunia dengan sumber daya sebesar 11.073 MW dan cadangan sebesar 17.506 MW, dimana kapasitas terpasang di Indonesia baru mencapai 11% atau setara dengan 1.808,5 MW (KESDM, 2017). Pengembangan energi terbarukan di tanah air menjadi suatu keharusan sebagaimana tertuang di dalam peraturan pemerintah No.79 Tahun 2014, yang berbunyi penggunaan energi terbarukan baru mencapai 7,7% dari total energi nasional yang ditargetkan pada tahun 2025 mencapai 23% atau setara 45 GW, yang mana pengembangan panas bumi ditargetkan sebesar 7.242 MW dan tahun 2050 mencapai 31% atau setara 169 GW dengan pengembangan panas bumi sebesar 17.546 MW. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2017), Sumatera Utara memiliki potensi energi panas bumi sebesar 2.750 MW dan menduduki posisi nomor dua terbesar di Indonesia setelah Jawa Barat. Potensi panas bumi di Sumatera Utara ada di enam kabupaten yakni Karo, Simalungun, Tapanuli Utara, Tapanuli Selatan, Padang Lawas dan Mandailing Natal (Madina).

Penyelidikan panas bumi dilakukan di Kabupaten Mandailing Natal tepatnya di Sibanggor Tonga. Daerah ini menunjukkan manifestasi panas bumi berupa Gunung Sorik Merapi yang merupakan daerah yang berada pada jalur vulkanik, panas bumi akibat lingkungan vulkanik memiliki suhu reservoir panas bumi yang tinggi, hal ini yang menjadi pendukung adanya potensi panas bumi di Sibanggor Tonga. Sibanggor Tonga menurut penelitian Sagala dkk. (2016) memiliki potensi panas bumi yang diprediksi sebesar 240 MW. Manifestasi panas bumi di Sibanggor Tonga dapat berupa fumarol, solfatara, kolam air panas, tanah panas, sinter silika, mata air panas. Hal ini yang mendukung untuk dilakukan identifikasi karakteristik mata air panas bumi di Sibanggor Tonga sebagai tahap pengembangan potensi panas bumi.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Iim dkk. (2018) dan Prasetyo dkk. (2017) menunjukkan bahwa mengidentifikasi karakteristik fluida panas bumi dapat dilakukan dengan menggunakan diagram segitiga fluida. Iim dkk. (2018) telah melakukan penyelidikan karakteristik mata air panas di daerah Sampuraga Kabupaten Mandailing Natal Sumatera Utara pada 4 titik uji dengan memanfaatkan data geokimia menggunakan diagram segitiga fluida. Karakteristik mata air panas berdasarkan hasil plotting diagram Cl-HCO₃-SO₄ menunjukkan mata air panas di Sampuraga bervariasi ada yang bertipe sulfat, klorida dan bikarbonat. Berdasarkan hasil plotting diagram Na-K-Mg menunjukkan posisi mata air panas terletak pada *partial equilibrium* dan *immature water* dan berdasarkan diagram Cl-Li-B menunjukkan kandungan Cl yang tinggi sehingga mata air panas dapat mengindikasikan berasal langsung dari sumber panas/magma, kandungan Cl yang tinggi mengindikasikan daerah Sampuraga memiliki potensi panas bumi dan perlu dilakukan penelitian tingkat lanjut.

Prasetyo dkk. (2017) telah melakukan penyelidikan geokimia mata air panas bumi di sekitar Danau Toba Provinsi Sumatera Utara menggunakan diagram segitiga fluida antara lain yaitu diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ dan diagram Cl-Li-B. Pengambilan sampel mata air panas dilakukan pada 4 titik uji. Hasil penelitian berdasarkan plot diagram Cl-SO₄-HCO₃ menunjukkan daerah Danau Toba bertipe air sulfat yang mengindikasikan fluida jenis ini terbentuk akibat pemanasan air tanah oleh uap panas bumi dan diagram Cl-B-Li mengindikasikan komposisi fluida panas bumi Danau Toba bukan hanya terjadi akibat pelarutan batuan saja tetapi juga adanya penyerapan uap panas bumi dengan rasio B/Cl yang rendah ke dalam sistem air tanah dangkal.

Mulyani dkk. (2019) telah melakukan kalibrasi model konseptual panas bumi di sekitar Puncak Sorik Merapi, Sumatera Utara menggunakan konseptual 3D yang meliputi struktur, litologi dan resistivitas batuan. Hasil penelitian zona litologi menunjukkan distribusi panas secara vertikal terdiri dari Sibanggor, Roburan, dan Sorik vulkanik. Zona konvektif terdiri dari formasi vulkanik Sibanggor yang merupakan zona pendistribusian panas suhu yang lebih tinggi karena jarak yang lebih pendek dari sumber panas. Nilai resistivitas Sibanggor Tonga yang rendah dan memiliki mineral sekunder membuktikan bahwa panas bumi di Sibanggor berhubungan dengan aktivitas vulkanik panas bumi di Gunung Sorik Marapi. Sibanggor Tonga memiliki sistem panas bumi bertemperatur tinggi

sehingga cocok untuk dilakukan penelitian lebih lanjut guna menambah informasi tentang karakteristik fluida di daerah tersebut dengan tujuan untuk pembangunan model kontruksi pembangunan pembangkit tenaga listik panas bumi di Sibanggor Tonga.

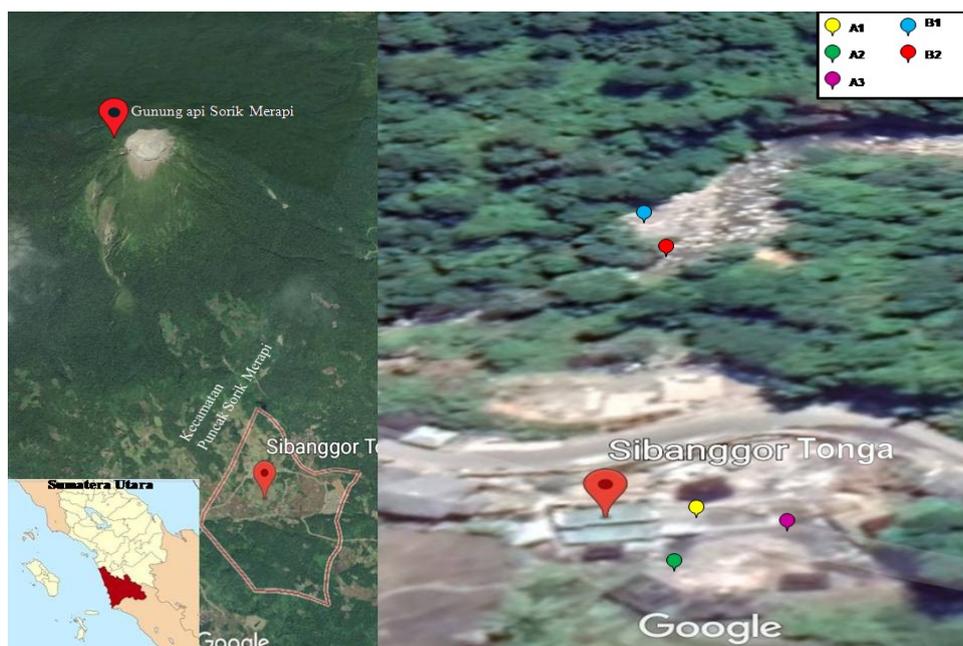
Sagala dkk. (2016) telah melakukan permodelan mata air panas bumi di sekitar Gunung Sorik Merapi Kabupaten Mandailing Natal menggunakan diagram segitiga fluida. Hasil plotting dari diagram Cl-SO₄-HCO₃ menunjukkan mata air panas yang bertipe air asam sulfat-klorida berada pada 3 titik yaitu daerah Sibanggor Tonga, Roburan Dolok dan Sampuraga. Menurut Nicholson (1993) tipe air asam sulfat-klorida biasanya menandakan potensi panas bumi bertemperatur tinggi yang berarti layak untuk dilakukan pengembangan tingkat lanjut guna pembangunan listrik bertenaga panas bumi. Pada penelitian Sagala dkk. (2016), pengujian sampel di Sibanggor Tonga hanya dilakukan 2 titik uji sumber mata air panas dan juga tidak melibatkan unsur Li, B, Na, K dan Mg yang dapat menambah informasi tentang karakteristik fluida di Sibanggor Tonga. Unsur Li, B, Na, K dan Mg ini dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi proses asal-usul fluida, pengenceran dan keseimbangan fluida yang berguna untuk penyesuaiaan pembangunan model kontruksi pembangkit tenaga listik panas bumi di Sibanggor Tonga yang sesuai dengan karakteristiknya.

Berdasarkan tinjauan pustaka sebelumnya, penelitian ini dilakukan di daerah Sibanggor Tonga Kabupaten Mandailing Natal dengan menambah data uji menjadi 5 titik sumber mata air panas untuk menentukan karakteristik fluida panas bumi berupa kesetimbangan, asal-usul fluida, pengenceran, dan tipe fluida dengan menggunakan diagram segitiga fluida yang terdiri dari diagram Cl-Li-B, Na-K-Mg dan Cl-SO₄-HCO₃ yang berguna untuk identifikasi karakteristik mata air panas bumi sebagai indikator untuk penyelidikan tingkat lanjut atau eksplorasi/pemboran dan berguna untuk penyesuaiaan karakteristik mata air panas bumi dengan pembangunan model kontruksi pembangkit tenaga listik panas bumi di Sibanggor Tonga.

II. METODE

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dari bulan September 2019 sampai Juni 2020. Lokasi pengambilan sampel dilakukan pada 5 titik sumber mata air panas yang berada di Sibanggor Tonga, Kabupaten Mandailing Natal, Sumatera Utara (Gambar 1). Pengukuran sampel dilakukan di Laboratorium Air, Jurusan Teknik Lingkungan dan di Laboratorium Kimia Dasar, Universitas Andalas. Pengolahan data dilakukan di Laboratorium Fisika Bumi, Jurusan Fisika, Universitas Andalas.



Gambar 1 Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian terdiri dari *Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy* (ICP-AES) 9800 Shimadzu, *Visible Spectroscopy* 2600 Shimadzu, termometer digital, pH meter, *conductivity* meter tipe CD-4303 dan seperangkat alat titrasi asam basa alkalinitas yang terdiri dari buret, statif, gelas ukur dan labu ukur. Bahan yang digunakan yaitu sampel mata air panas yang diambil sebanyak 500 ml per botol dari 5 sumber mata air panas di Sibanggor Tonga, Kabupaten Mandailing Natal, Sumatera Utara.

2.3 Tahapan Penelitian

2.3.1 Pengambilan dan Pengukuran Sampel

Pengambilan sampel sumber mata air panas dilakukan pada 5 titik di daerah Sibanggor Tonga Kabupaten Mandailing Natal seperti pada Tabel 1. Temperatur permukaan mata air panas diukur menggunakan termometer digital dan pengukuran pH air menggunakan pH meter yang dilakukan pada setiap sampel mata air panas. Pengukuran nilai konsentrasi dilakukan pada 5 sumber mata air panas. Konsentrasi Na, K, B, Li dan Mg diukur menggunakan ICP-AES, konsentrasi SO₄ diukur dengan *Visible Spectroscopy* dan konsentrasi HCO₃ diukur dengan metode titrasi asam basa alkalinitas serta pengukuran Cl dilakukan menggunakan *conductivity* meter.

Tabel 1 Koordinat pengambilan sampel

Kode Sampel	Kecamatan	Koordinat X	Koordinat Y
A.01	Sibanggor Tonga	99,5876914	0,7083576
A.02			
A.03			
B.01		99,5866914	0,7083576
B.02			

2.3.2 Pengolahan Data

Data konsentrasi unsur Na, K dan Mg dari 5 sampel mata air panas di Sibanggor Tonga yang telah diperoleh kemudian disubstitusi ke Persamaan (1) sampai (4) untuk diketahui persentase unsur yang kemudian diplot pada diagram segitiga Na-K-Mg untuk mengetahui kesetimbangan dan asal-usul fluida.

$$S = [\text{Na}] + 10[\text{K}] + 1000[\text{Mg}]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\% \text{Na} = \left(\frac{[\text{Na}]}{S} \right) 100 \quad (2)$$

$$\% \text{K} = \left(\frac{10[\text{K}]}{S} \right) 100 \quad (3)$$

$$\% \text{Mg} = \left(\frac{1000 \left[\text{Mg}^{\frac{1}{2}} \right]}{S} \right) 100 \quad (4)$$

Data konsentrasi unsur Cl, Li dan B dari 5 sampel kemudian disubstitusikan ke Persamaan (5) sampai (8) untuk diketahui persentase unsur yang kemudian diplot pada diagram segitiga Cl-B-Li untuk mengetahui proses pengenceran yang terjadi pada fluida.

$$S = \frac{[\text{Cl}]}{100} + [\text{Li}] + \frac{[\text{B}]}{4} \quad (5)$$

$$\% \text{B} = \left(\left(\frac{[\text{B}]}{4} \right) S \right) 100 \quad (6)$$

$$\%Li = \left(\frac{[Li]}{S} \right) 100 \quad (7)$$

$$\%Cl = \left(\frac{[Cl]}{S} \right) \quad (8)$$

Data konsentrasi Cl, HCO₃ dan SO₄ dari 5 sampel mata air panas yang telah diperoleh kemudian disubstitusikan ke Persamaan (9) sampai (12) untuk diketahui persentasenya lalu data diplot pada diagram segitiga Cl-HCO₃-SO₄ untuk mengetahui tipe fluida panas bumi.

$$S = [Cl] + [SO_4] + [HCO_3] \quad (9)$$

$$\%Cl = \frac{(100[Cl])}{S} \quad (10)$$

$$\%SO_4 = \frac{(100[SO_4])}{S} \quad (11)$$

$$\%HCO_3 = \frac{(100[HCO_3])}{S} \quad (12)$$

Ketiga diagram tersebut digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik fluida panas bumi yang kemudian data dianalisis berdasarkan konsentrasi dan sifat-sifat dasar dari unsur yang diperoleh dari ke 5 sampel serta dikaitkan dengan nilai temperatur permukaan dan pH mata air panas bumi yang diperoleh di Sibanggor Tonga, Kabupaten Mandailing Natal. Untuk keterangan simbol, S adalah jumlah total konsentrasi unsur atau senyawa, [Cl] adalah konsentrasi klorida, [SO₄] adalah konsentrasi sulfat, [HCO₃] adalah konsentrasi bikarbonat, [B] adalah konsentrasi boron, [Li] adalah konsentrasi litium, [Na] adalah konsentrasi natrium, [K] adalah konsentrasi kalium, [Mg] adalah konsentrasi magnesium dan % adalah persentase unsur atau senyawa.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Temperatur dan pH Mata Air Panas

Data pengukuran pH mata air panas dari lima sampel berkisar 0,6 sampai 6,4 dan temperatur permukaan 37,6°C-95,3°C (Tabel 2). Nilai temperatur permukaan mata air panas Sibanggor Tonga menunjukkan sistem panas bumi bertemperatur tinggi karena memiliki suhu permukaan yang tinggi. pH yang diperoleh rata-rata relatif asam dan hanya A.01 dan A.03 yang bersifat hampir netral karena mengalami banyak pencampuran dengan air meteorik di sekitarnya sehingga dapat disimpulkan bahwa mata air panas di daerah tersebut relatif bersifat asam dan didominasi uap.

Tabel 2 Data pH dan temperatur permukaan

Kode Sampel	Temperatur Permukaan (°C)	pH
A.01	37,6	6,3
A.02	84,2	2,3
A.03	95,3	6,4
B.01	93,3	0,6
B.02	81,5	1,2

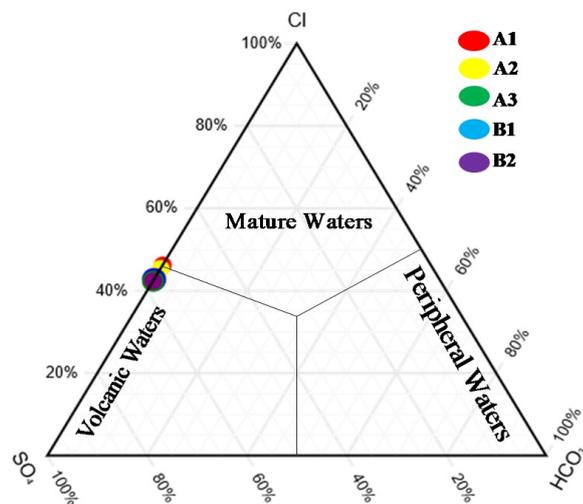
3.2 Diagram Cl-SO₄-HCO₃

Persentase Cl, SO₄ dan HCO₃ yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil plot persentase unsur dan senyawa dapat dilihat pada Gambar 2. Dari diagram Cl-SO₄-HCO₃ menunjukkan bahwa semua sampel mata air panas berada antara *volcanic waters* dan *mature waters*. Hal ini menunjukkan fluida panas bumi di daerah tersebut didominasi oleh air asam sulfat-klorida. Air asam sulfat-klorida menandakan bahwa telah terjadi pencampuran antara air sulfat dengan air klorida. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai pH yang diperoleh relatif asam, ini dapat ditunjukkan dengan air yang berwarna keruh atau keabu-abuan karena telah mengalami oksidasi hidrogen (H₂) dan memiliki kandungan klorida yang tinggi.

Berdasarkan Saptadji (2009) tipe air asam sulfat-klorida mengindikasikan fluida didominasi oleh uap dengan temperatur reservoir yang tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh bahwa daerah Sibanggor Tonga memiliki banyak fumarol dan bertemperatur rata-rata > 90°C kecuali daerah A.01 yang bertemperatur 37°C karena telah banyak mengalami pencampuran dengan air permukaan lainnya.

Tabel 3 Persentase Cl-HCO₃-SO₄

Kode Sampel	Konsentrasi (ppm)			Persentase (%)		
	Cl	SO ₄	HCO ₃	Cl	SO ₄	HCO ₃
A.01	20,53	23,9	0,0005	46,226	53,772	0,00123
A.02	20,74	24,9	0,0016	45,382	54,614	0,00361
A.03	20,84	27,9	0,0007	42,724	57,273	0,00149
B.01	20,93	28,5	0,0156	42,320	57,647	0,00315
B.02	20,94	28,5	0,0078	42,339	57,644	0,01576



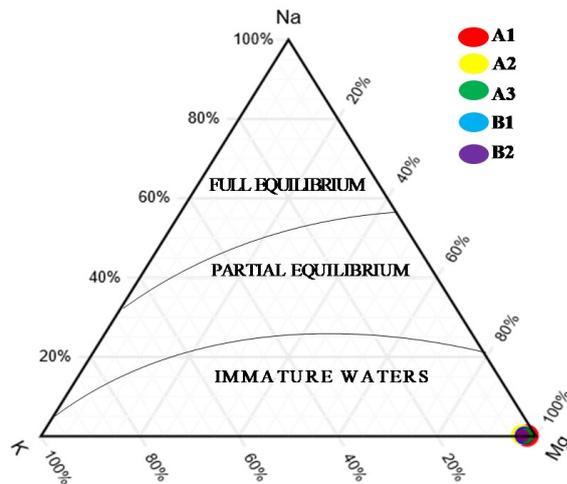
Gambar 2 Hasil plot diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃

3.3 Diagram Na-K-Mg

Persentase Na, K dan Mg dapat dilihat pada Tabel 4 yang di plot pada diagram Na-K-Mg seperti Gambar 3. Dari diagram Na-K-Mg yang diperoleh, semua sampel masuk kategori *immature water* dan memiliki kadar Mg yang lebih tinggi daripada K dan Na. Sampel yang berada pada *immature water* menandakan mata air panas di daerah tersebut tidak mencapai kesetimbangan atau telah mengalami reaksi dengan unsur lain saat fluida berusaha menuju permukaan. Menurut Nicholson (1993) kadar Mg yang tinggi dibandingkan dengan kadar Na dan K menandakan bahwa air panas bumi telah mengalami pencampuran dengan air meteorik atau air tanah yang memiliki konsentrasi Mg yang lebih tinggi.

Tabel 4 Persentase Na-K-Mg

Kode Sampel	Konsentrasi (ppm)			Persentase (%)		
	Na	K	Mg	Na	K	Mg
A.01	1,23	1,35	0,55	0,162	1,781	98,05
A.02	1,78	1,28	0,22	0,367	2,640	96,99
A.03	1,16	1,43	0,39	0,180	2,228	97,59
B.01	1,67	1,87	0,83	0,178	2,001	97,81
B.02	1,19	1,55	0,31	0,205	2,673	97,12



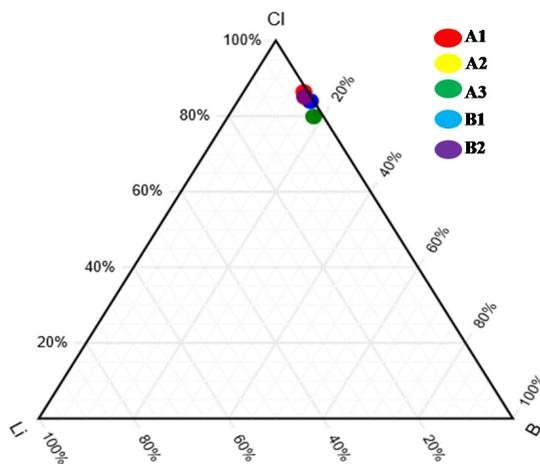
Gambar 3 Hasil plot diagram segitiga Na-K-Mg

3.4 Diagram Cl-Li-B

Persentase Cl, Li dan B yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5. Hasil plot persentase unsur tersebut dapat dilihat pada Gambar 4. Cl, Li dan B merupakan zat yang mudah larut dalam mineral sekunder sehingga dapat diprediksi semakin jauh jarak migrasi fluida ke permukaan maka konsentrasinya akan semakin berkurang. Dari diagram Cl-Li-B, kelima sampel mata air panas berada pada daerah dominan Cl. Konsentrasi Cl yang tinggi mengindikasikan bahwa air panas yang naik ke permukaan merupakan fluida yang berasal dari sumber panas dengan pendinginan yang sangat sedikit oleh batuan sekitar aliran fluida (Nicholson, 1993). Hal tersebut disebabkan karena di dalam sistem panas bumi, unsur Cl termasuk susah bereaksi, mudah berpindah di dalam larutan dan bersifat tetap sehingga dapat dilacak asal-usulnya. Kelima sampel berada jauh dari unsur Li pada diagram Cl-Li-B. Hal tersebut mengindikasikan bahwa mata air panas berasal jauh dari sumber panas sistem panas bumi.

Tabel 5 Persentase Cl-Li-B

Kode Sampel	Konsentrasi (ppm)			Persentase (%)		
	Cl	Li	B	Cl	Li	B
A.01	20,53	0,0021	0,12	86,39	0,883	12,724
A.02	20,74	0,0034	0,13	84,54	1,386	14,064
A.03	20,84	0,0018	0,15	83,97	0,724	15,034
B.01	20,93	0,0054	0,18	79,90	2,061	18,036
B.02	20,94	0,0034	0,13	85,10	1,381	13,512



Gambar 4 Hasil plot diagram segitiga Cl-Li-B

Unsur Li mudah terserap oleh mineral sekunder seperti klorit, kuarsa dan lempung sehingga semakin jauh jarak migrasi fluida kepermukaan maka konsentrasinya akan semakin berkurang. Kelima sampel berada jauh dari unsur B yang menandakan bahwa selama perjalanan sampel dari sumber panas ke permukaan telah terjadi sedikit pengenceran oleh batuan yang dilewati. Unsur B dalam larutan merupakan unsur yang sukar bereaksi. Konsentrasi unsur B yang sedikit menandakan bahwa terjadi sedikit asosiasi panas bumi dengan batuan sedimen yang kaya zat organik (Nicholson, 1993).

IV. KESIMPULAN

Hasil analisis dari diagram segitiga Na-K-Mg, Cl-Li-B dan Cl-SO₄-HCO₃ menunjukkan mata air panas bumi di Sibanggor Tonga didominasi oleh air asam sulfat-klorida yang mana terjadi pencampuran antara air sulfat dan air klorida. Semua sampel masuk dalam kategori *immature water* yang mengindikasikan mata air panas di daerah tersebut tidak mencapai kesetimbangan atau telah mengalami reaksi dengan unsur lain saat menuju permukaan. Mata air panas bumi pada penelitian ini juga mengindikasikan aliran fluida bergerak lateral atau ke samping sebelum mencapai permukaan. Hal ini memperlihatkan bahwa di daerah Sibanggor Tonga dapat digunakan untuk pengembangan pembangkit tenaga listrik panas bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Direktorat Panas Bumi, 2017, *Potensi Panas Bumi Indonesia*, Jilid 1, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Iim, D., Kusnadi, D., Dahlan, 2017, Penyelidikan Geologi dan Geokimia Terpadu Daerah Panas Bumi Sampuraga Kabupaten Mandailing Natal Sumatera Utara, *Jurnal Teknik*, Vol. 33, No.1, hal 32-36.
- Mulyani, S., Sarmiento, Z., Chandra, V., Hendry R., Nasution, S., dan Hidayat, R., 2019, Calibrated Natural State Model in Sorik Marapi Geothermal Field, *Sorik Marapi Geothermal Power*, International Petroleum Technology Conference, Beijing, China.
- Nicholson, K., 1993, *Geothermal Fluids*, Springer Verlag Inc., Berlin.
- Prasetio, R., Laksmiingpuri, N., dan Pratikno, B., 2017, Karakterisasi Isotop dan Geokimia Area Panas Bumi Danau Toba Sumatera Utara, *Jurnal ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, Vol. 13, No.2, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jakarta.
- Sagala, D.Bireun., Chandra, R Vicky., dan Purba, Dorman., 2016, Conceptual Model of Sorik Merapi Geothermal System Based On 3-G Data Interpretation, *Sorik Merapi Geothermal Power*, Geoscience Departement, Indonesia.
- Saptadji, N.M., 2009, *Teknik Panas Bumi*, Departemen Teknik Perminyakan Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- KESDM, 2017, Handbook of Energy and Economic Statistic of Indonesia, <https://www.esdm.go.id>, diakses November 2019.