

STUDI GEOLOGI DAN GEOKIMIA FLUIDA PADA MANIFESTASI TERMAL: PERSPEKTIF BARU MODEL KONSEPTUAL LAPANGAN PANAS BUMI MARANA, SULAWESI TENGAH

^{1*}Alyssa Saumi Juta, ²Asep Saepul Fahmi, ³Muhammad Reza Farel Pahlevi

^{1,2,3}Teknik Geologi, Institut Teknologi Bandung

*Email: alyssa.juta@gmail.com

ABSTRAK

Sejak tahun 2015, rasio elektrifikasi Sulawesi Tengah berada di bawah rata-rata nasional. Hal ini kian mendorong pemerintah untuk mewujudkan “Sulteng Mandiri Energi” dengan menggali potensi energi baru terbarukan. Marana merupakan salah satu daerah di Sulawesi Tengah yang memiliki potensi panas bumi. Model konseptual Lapangan Panas Bumi Marana telah diajukan oleh PSDMBP. Namun, terdapat beberapa keberatan pada model tersebut. Oleh karena itu, studi ini dilakukan untuk mengetahui pola hidrogeokimia dan mengembangkan model konseptual Lapangan Panas Bumi Marana dengan harapan dapat bermanfaat terhadap rencana eksplorasi panas bumi guna meningkatkan rasio elektrifikasi di Sulawesi Tengah. Dalam menunjang tujuan tersebut, digunakan data geokimia fluida dari laporan PSDMBP 2022. Kemudian, data diolah menggunakan pendekatan geologi dan geokimia fluida. Hasil integrasi dari kedua pendekatan berupa karakteristik fluida, komponen sistem panas bumi, dan proses bawah permukaan. Secara umum, Lapangan Panas Bumi Marana memiliki dua sistem yang berbeda, yaitu Sistem Marana ($150 \pm 10^\circ\text{C}$) dan Sistem Yompo ($120 \pm 10^\circ\text{C}$) yang merupakan sistem panas bumi non-vulkanik. Sumber utama fluida hidrotermal pada kedua sistem berasal dari air meteorik yang meresap melalui zona permeabel. Pada Sistem Marana, air meteorik terpanaskan oleh batuan intrusi dan keluar sebagai mata air klorida di zona *upflow* dan *outflow*. Sementara itu, air meteorik pada Sistem Yompo terpanaskan oleh aliran panas dari dalam bumi dan keluar sebagai mata air sulfat-bikarbonat di zona *outflow*. Pola aliran ini digunakan untuk memperbarui model konseptual Lapangan Panas Bumi Marana yang telah ada sebelumnya. Sebagai tambahan, analisis struktur dan pola hidrogeologi yang lebih detail serta survei gaya berat dengan cakupan yang lebih luas diperlukan untuk membantu mengembangkan dan memvalidasi hasil dari studi ini.

Kata Kunci: *geokimia, geologi, Marana, model konseptual, panas bumi.*

1. PENDAHULUAN

Sejak tahun 2015 hingga kini, rasio elektrifikasi Sulawesi Tengah masih berada di bawah rata-rata nasional (ESDM, 2021). Guna meningkatkan infrastruktur kelistrikan, pemerintah Sulawesi menargetkan “Sulteng Mandiri Energi” dengan menggali potensi energi baru terbarukan (EBT). Hal ini pun sejalan dengan komitmen Indonesia pada Presidensi G20 dalam mempercepat transisi energi. Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021 – 2030, Indonesia mematok target bauran energi dari EBT sebesar 23% pada 2025.

Panas bumi merupakan sumber energi terbarukan yang tak terbatas dan dapat

menyediakan listrik secara konstan dengan sedikit emisi karbon dioksida atau polutan lainnya (Nasruddin, et al., 2016). Salah satu lapangan panas bumi di Sulawesi Tengah yang diduga memiliki potensi adalah Lapangan Marana. Namun, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal. Bahkan, penduduk desa di daerah Marana mengeluhkan tentang kurangnya pasokan listrik yang menyebabkan mereka sering mengalami pemadaman tanpa jadwal yang jelas (PSDMPB, 2022). Elemen terpenting dari suatu analisis untuk eksplorasi panas bumi adalah model konseptual yang dapat dibuat berdasarkan informasi geologi dan geokimia fluida (Cumming, 2009). PSDMBP (2022) telah mengajukan model konseptual Lapangan

Panas Bumi Marana. Namun, ada beberapa keberatan pada model tersebut. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengetahui pola hidrogeokimia dan mengembangkan model konseptual Lapangan Panas Bumi Marana yang telah ada sebelumnya dengan harapan dapat bermanfaat terhadap rencana eksplorasi dan pengoperasian berkelanjutan sehingga lapangan ini bisa memasok listrik untuk wilayah Marana.

Menurut Hochstein dan Browne (2000), suatu sistem panas bumi terdiri atas sumber panas, reservoir, daerah resapan, dan daerah luhan. Adanya potensi panas bumi di Marana dibuktikan oleh kehadiran daerah luhan berupa kemunculan mata air termal di permukaan. Secara administratif, Lapangan Panas Bumi Marana terletak di desa Masaingi, Kecamatan Sindue, Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah yang berjarak sekitar 39 km di sebelah utara Kota Palu (Gambar 1). Aktivitas tektonik regional yang terjadi berulang kali di daratan Palu telah merombak seluruh batuan dan memunculkan kerucut-kerucut intrusi granit serta struktur-struktur sesar yang sebagian berasosiasi dengan kemunculan manifestasi panas bumi (PSDMBP, 2022).

2. GEOLOGI REGIONAL

Pulau Sulawesi terbentuk dari hasil tumbukan tiga lempeng (*triple junction*) antara Lempeng Hindia-Australia yang bergerak ke arah utara, Lempeng Pasifik ke arah barat, dan Lempeng Eurasia yang relatif diam. Sulawesi dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian barat dan timur. Bagian barat Pulau Sulawesi didominasi oleh batuan vulkanik dan sedimen, sedangkan di bagian timur didominasi oleh batuan yang berasal dari benua dan samudra, serta batuan karbonat (Surono & Hartono, 2015).

Penelitian dilakukan pada Lapangan Panas Bumi Marana, Donggala, Sulawesi Tengah yang didominasi oleh intrusi Tersier dan batuan vulkanik (Gambar 2). Secara stratigrafi, daerah panas bumi Marana dibagi menjadi enam

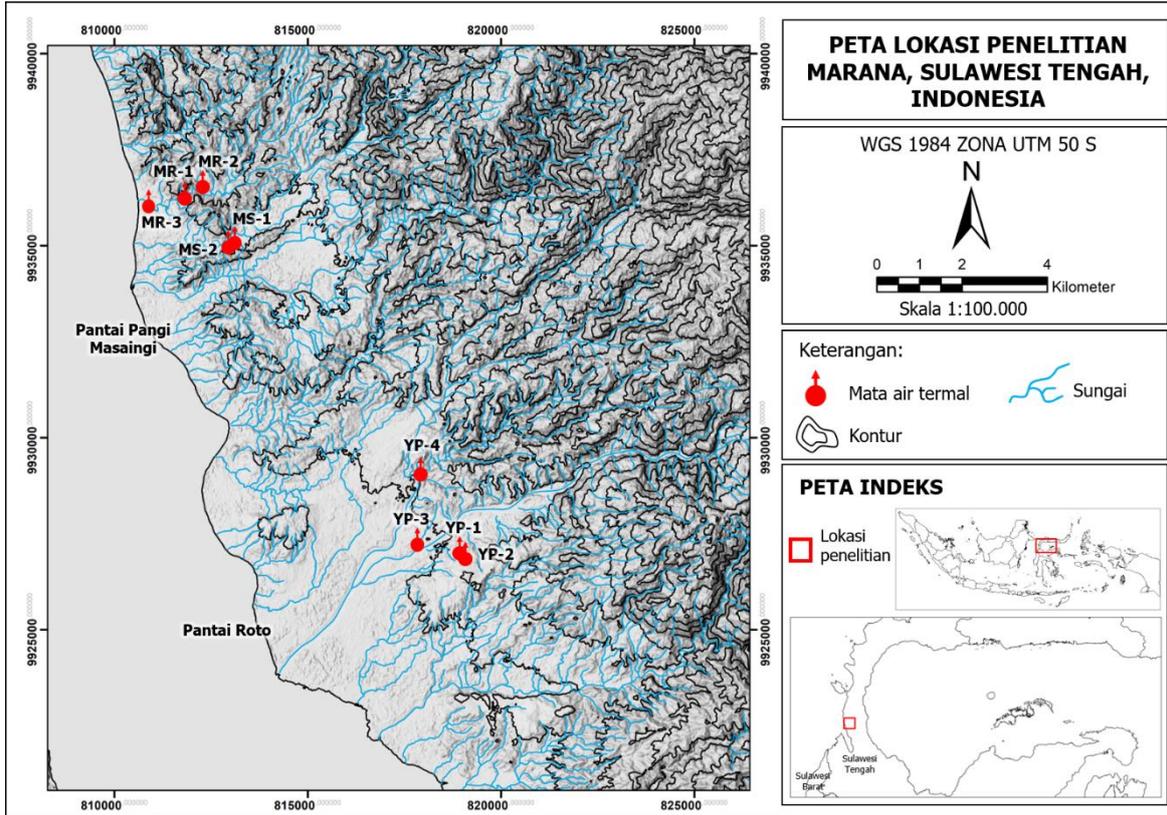
satuan yang diurutkan dari tua ke muda, yaitu Satuan Metamorf, Satuan Granit, Satuan Andesit, Satuan Batupasir, Satuan Konglomerat, dan Aluvial (Gambar 3).

Satuan Metamorf merupakan satuan batuan berumur Kapur serta menjadi batuan dasar yang menyusun 20% dari daerah penelitian. Satuan Granit merupakan bagian dari tubuh intrusi dengan geometri batolit yang tersebar di bagian utara dan timur daerah penelitian. Pada Satuan Granit, juga terdapat intrusi andesit yang berumur Tersier Akhir. Setelah batuan intrusi terbentuk, diendapkan Satuan Batupasir dan Konglomerat pada umur Kuartar.

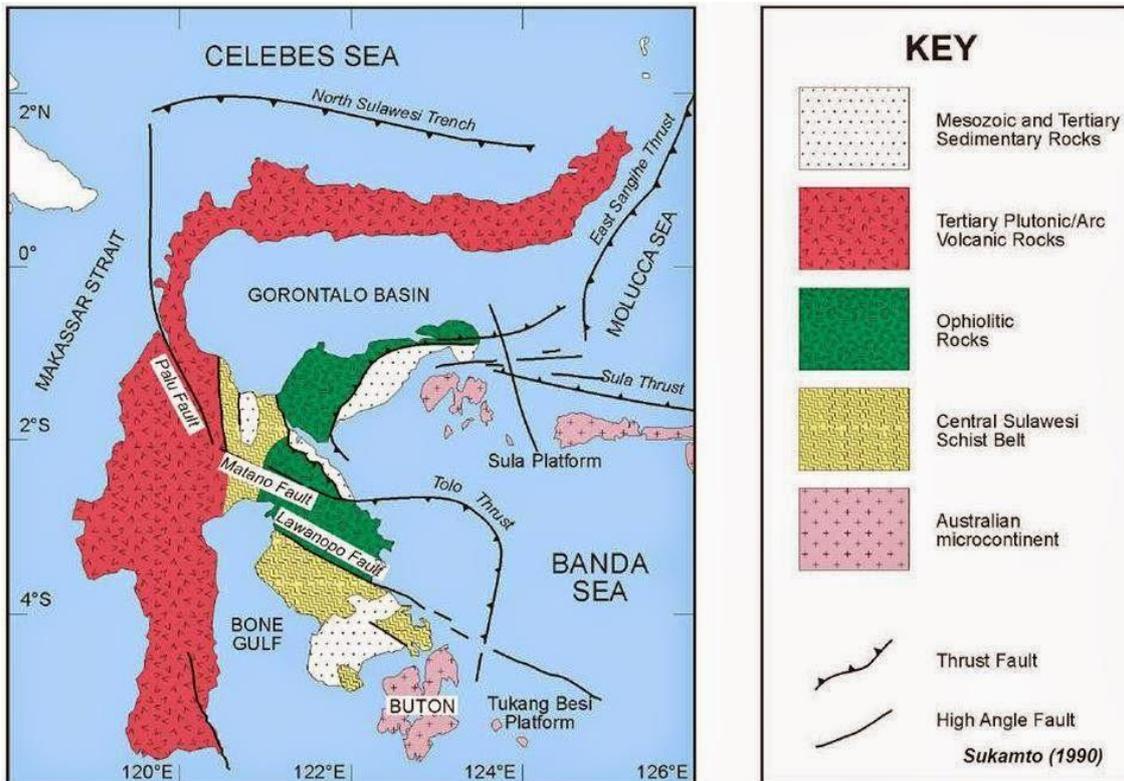
Secara regional, Sulawesi Tengah dikontrol oleh Sistem Sesar Palu-Koro-Matano (Darman & Sidi, 2000). Sementara itu, struktur geologi yang ditemukan di daerah penelitian berupa sesar dengan arah barat-timur dan barat laut-tenggara. Struktur-struktur tersebut mengontrol kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan berupa mata air termal yang mencerminkan adanya indikasi sumber panas (PSDMBP, 2022).

3. METODE PENELITIAN

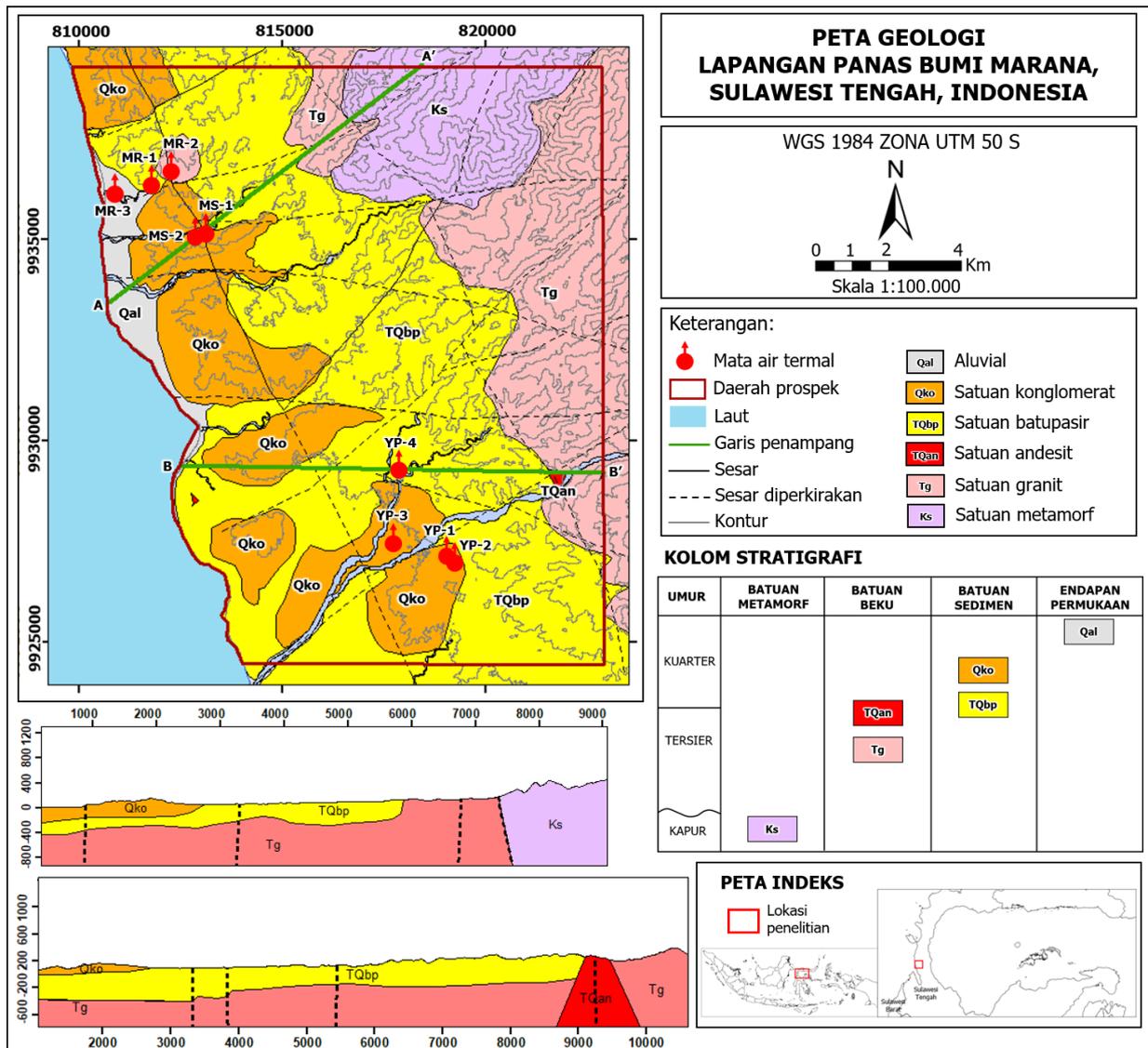
Data penelitian yang digunakan, yaitu sembilan data sekunder geokimia fluida manifestasi di Lapangan Panas Bumi Marana yang meliputi hasil pengukuran temperatur, pH, debit, *Total Dissolved Solid* (TDS), daya hantar listrik (DHL), kandungan kation dan anion, serta isotop stabil (Tabel 1). Selain itu, digunakan pula beberapa data pendukung berupa informasi geologi daerah penelitian, hasil survei magnetotelurik (MT) dan gaya berat, serta data temperatur dari survei landaian suhu di Marana (Nanlohi, et al., 2006). Data geologi, geokimia, dan geofisika diperoleh dari Laporan Penyelidikan Geologi, Geokimia, Gaya Berat, dan Magnetotelurik Daerah Panas Bumi Marana, Sulawesi Tengah oleh Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi (PSDMBP) yang melakukan pengambilan sampel pada 2022.



Gambar 1. Lokasi penelitian terletak di Lapangan Panas Bumi Marana, Sulawesi Tengah. Terdapat sembilan mata air termal yang tersebar di daerah Marana.



Gambar 2. Pulau Sulawesi didominasi oleh intrusi Tersier dan batuan vulkanik (Hall, 2011).



Gambar 3. Peta geologi Lapangan Panas Bumi Marana. Mata air termal muncul pada endapan aluvial, satuan konglomerat, batupasir, dan granit.

Tabel 1. Data karakteristik fisika dan kimia, serta isotop stabil pada manifestasi termal di Lapangan Panas Bumi Marana, Sulawesi Tengah (PSDMPB, 2022).

No.	Sampel	Kode	T (°C)	pH	Debit (L/det)	ppm											del ¹⁸ O	del D	TDS (ppm)	DHL (µs/cm)	
						Li	Na	K	Ca	Mg	SiO ₂	B	Cl	F	SO ₄	HCO ₃					NH ₄
1	Masaingi-1	MS-1	90	8.19	5	1.36	407.23	13.91	130	0.9	62.33	5.83	731.29	6.79	95.58	26.14	0.44	-4.25	-45	290	2090
2	Masaingi-2	MS-2	58	7.62	2	1.11	383.02	13.68	118.44	1.2	52.69	5.55	771.71	6.51	80.75	29.44	0.48			1990	1968
3	Marana-1	MR-1	50	7.26	1.5	0.9	314.84	10.35	48.28	0.9	51.31	4.44	555.44	10.29	70	19.28	1.06	-6	-35	910	1459
4	Marana-2	MR-2	54	7.71	0.5	0.94	388.26	8.5	62.16	2.33	47.54	4.44	678.58	4.49	60	75.37	1.8	-8	-50	1030	1576
5	Marana-3	MR-3	80	7.67	5	0.91	302.61	9.17	74.71	2.36	36.76	4.44	575.19	4.6	50	78.67	1.98			1990	1470
6	Yompo-1	YP-1	55.6	9.51	2	0.14	115.28	1.39	6.05	0.19	52.33	0.22	20	13.26	119.48	56.85	0.35			290	435
7	Yompo-2	YP-2	50.1	9.26	2	0.14	102.33	1.67	8.91	1.96	40.8	0.44	19.76	15.61	115.36	61.93	0.57			300	452
8	Yompo-3	YP-3	60.8	9.48	2	0.19	123.02	2.2	7.14	0.57	60.31	0.44	20	13.14	125.25	58.12	0.23			460	441
9	Yompo-4	YP-4	59.1	9.45	1	0.12	125.59	2.23	5.12	0.9	51.17	0.22	15	12.33	131.02	65.98	0.22			290	438

*Catatan

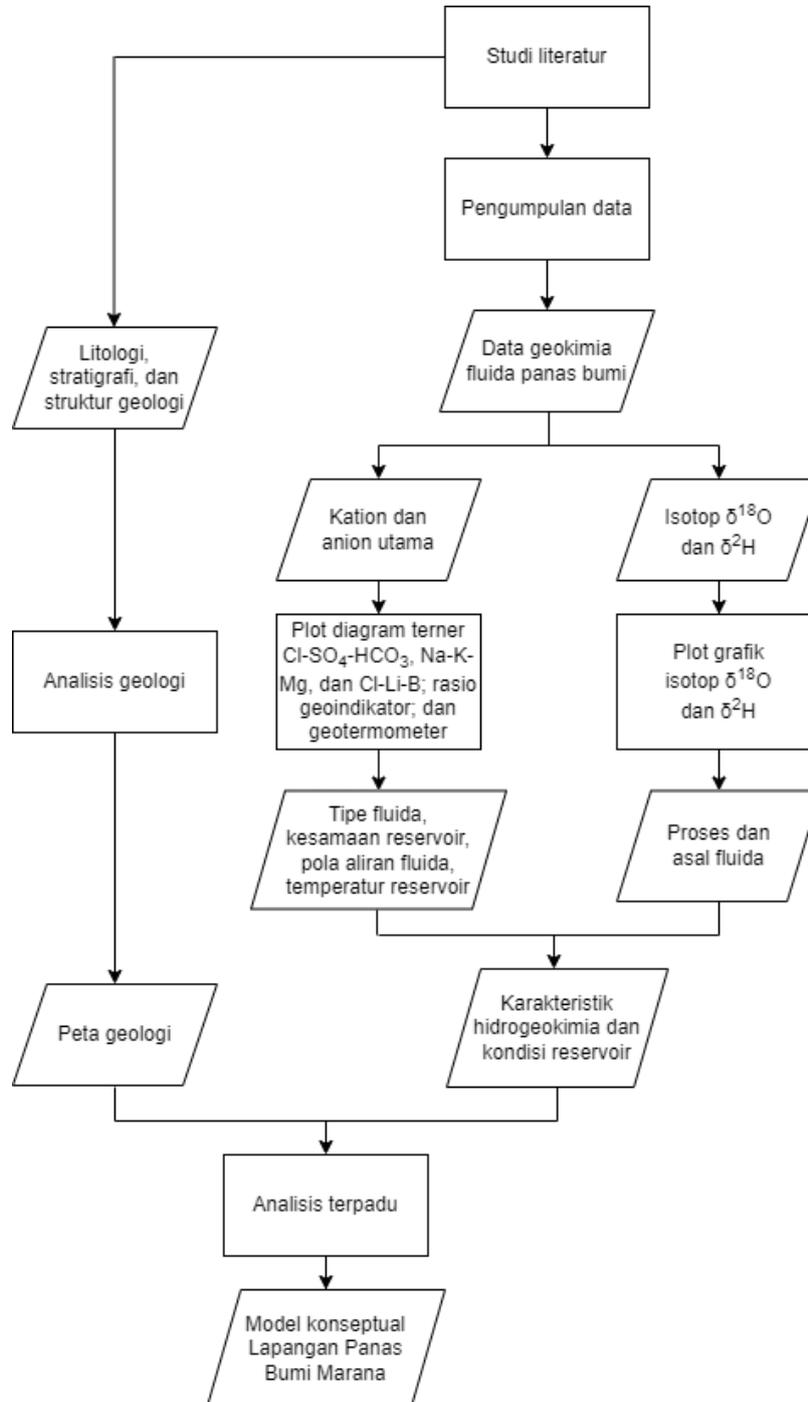
TDS: Total Dissolved Solid

DHL: Daya Hantar Listrik

Metode yang digunakan pada penelitian ini, yaitu analisis kesetimbangan ion, diagram terner Cl-SO₄-HCO₃, Na-K-Mg, Cl-Li-B, rasio geoindikator, grafik deuterium terhadap isotop oksigen 18, dan geotermometer (Gambar 4). Sebelum data digunakan untuk analisis lebih lanjut, dilakukan uji kelayakan hasil analisis

kimia terlebih dahulu menggunakan metode kesetimbangan ion. Untuk menghitung kesetimbangan ion digunakan rumus sebagai berikut.

$$\Delta IB(\%) = \left(\frac{\sum kation - \sum anion}{\sum kation + \sum anion} \right) \times 100$$



Gambar 4. Diagram alir penelitian. Secara umum, terdapat tiga tahap penelitian, yaitu analisis geologi, geokimia fluida, dan terpadu.

Selanjutnya, data yang tergolong layak diplot pada diagram terner Cl-SO₄-HCO₃ (Nicholson, 1993) dan Na-K-Mg (Giggenbach, 1988) untuk mengetahui karakteristik fluida yang meliputi tipe air dan tingkat kesetimbangannya. Selain itu, data juga diplot pada diagram terner Cl-Li-B untuk mengetahui kesamaan reservoir. Kemudian, dilakukan analisis geoindikator dengan perhitungan rasio Cl/Mg, Na/Li, dan Mg/Ca. Sementara itu, isotop stabil ¹⁸O dan ²H diplot pada grafik untuk mengetahui asal fluida. Selanjutnya, metode geotermometer diterapkan untuk memperkirakan temperatur reservoir dari sistem panas bumi. Dengan mengintegrasikan hasil analisis geologi dan geokimia fluida, yang ditunjang oleh informasi geofisika dan temperatur dari landaian suhu, dapat dibuat suatu model konseptual panas bumi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat-sifat fisika dan kimia dari sampel manifestasi di Lapangan Panas Bumi Marana menunjukkan hasil yang beragam (**Error! Reference source not found.**). Temperatur sampel berkisar antara 50°C (MR-1) dan 90°C (MS-1) yang didominasi dengan pH netral (7.26 – 8.19), kecuali sampel di daerah Yompo yang menunjukkan sifat alkali (pH 9.26 – 9.51). Nilai isotop ¹⁸O dan ²D dari sampel MS-1, MR-1, dan MR-2 memiliki rentang dari -8‰ hingga -50‰. Sementara itu, nilai debit berkisar antara 5 dan 0.5 liter/detik.

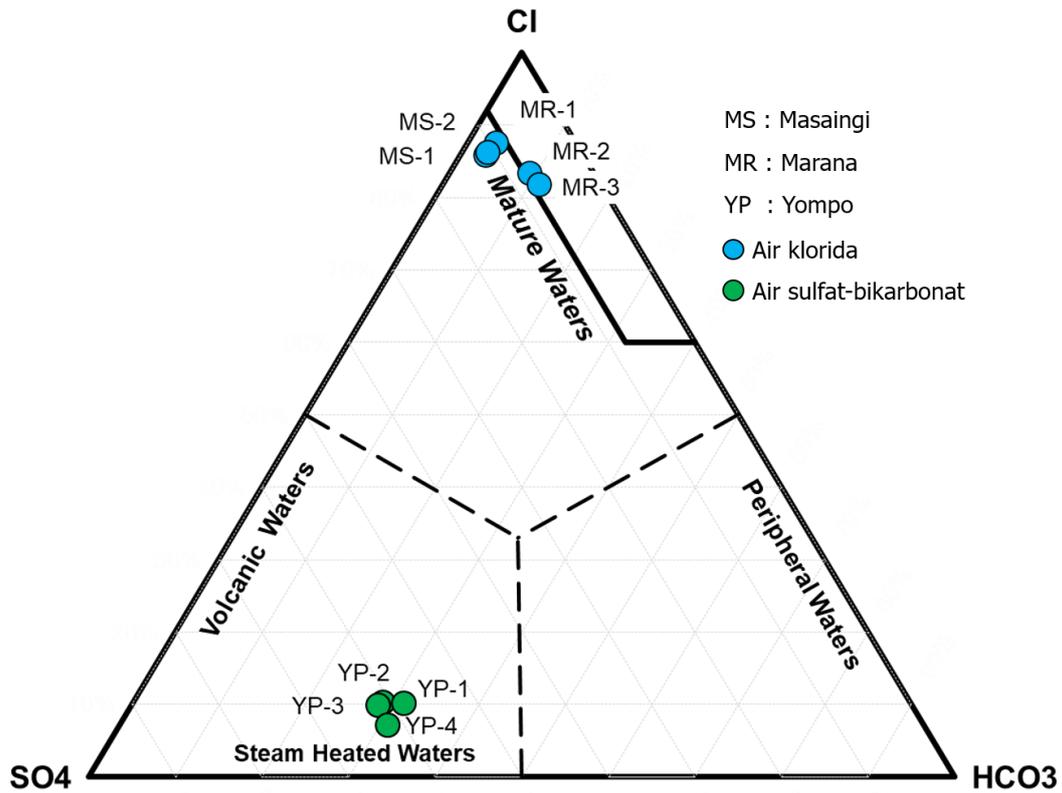
Data geokimia air dan isotop stabil tersebut dianalisis menggunakan metode geokimia untuk mengetahui karakteristik fluida, pola aliran fluida bawah permukaan, asal fluida, dan temperatur reservoir. Kemudian, hasil analisis diintegrasikan dengan kondisi geologi daerah penelitian untuk mengembangkan suatu model konseptual panas bumi.

Karakteristik Fluida dan Pola Aliran Bawah Permukaan

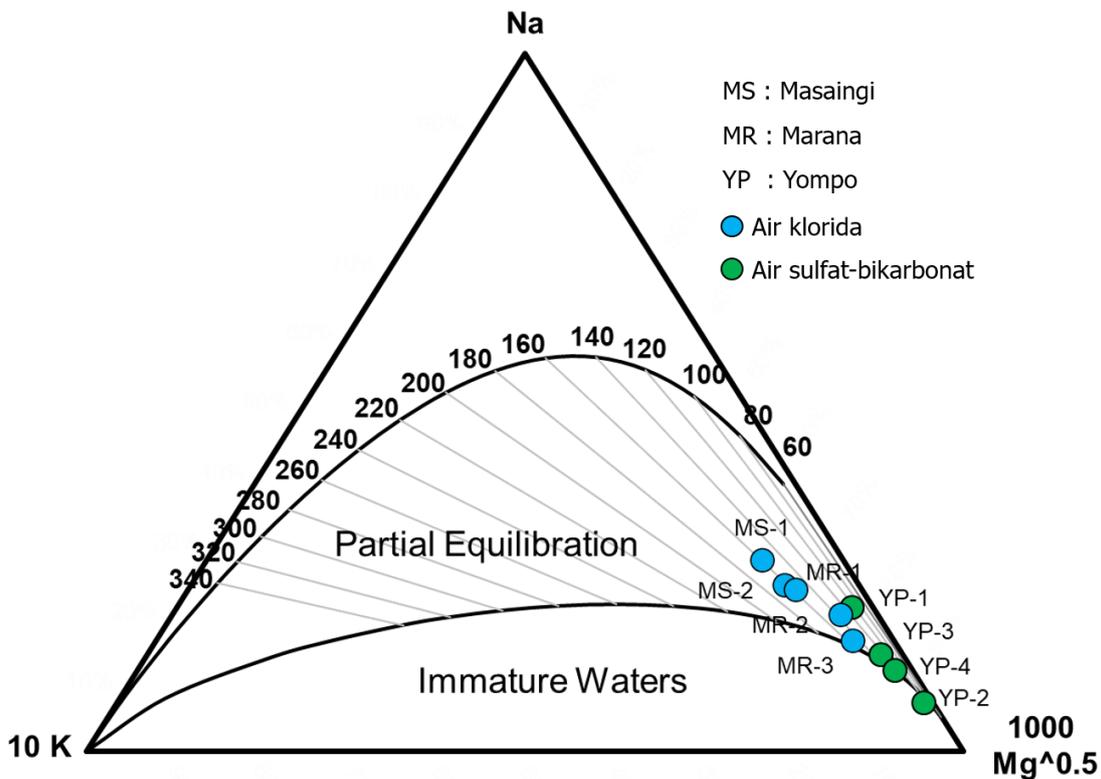
Hasil perhitungan kesetimbangan ion menunjukkan terdapat tujuh sampel yang tergolong layak dengan nilai kesetimbangan ion ≤ 5% (Tabel 2). Dua sampel lainnya, yaitu YP-1 dan YP-3 memiliki nilai kesetimbangan ion >5%. Berdasarkan plot data pada diagram Cl-SO₄-HCO₃ (Gambar 5) dan Na-K-Mg (Gambar 6), terdapat 2 tipe air pada Lapangan Panas Bumi Marana, yaitu air klorida (Cl) dan air sulfat-bikarbonat (SO₄-HCO₃). Tipe air klorida terdiri atas sampel MS-1, MS-2, MR-1, MR-2, dan MR-3 dengan konsentrasi klorida yang tinggi (555,44 – 861,46 ppm). Kelima sampel air klorida berada di zona *partial equilibrium*. Hal ini mengindikasikan kesetimbangan antara fluida dan batuan telah tercapai sebagian. Dengan demikian, kelima sampel tersebut diinterpretasikan sebagai air yang berasal langsung dari reservoir.

Tabel 2. Nilai kesetimbangan ion dari manifestasi di daerah Marana. Warna merah menunjukkan nilai kesetimbangan ion >5%.

No.	Sampel	Kode	Kesetimbangan Ion
1	Masaingi-1	MS-1	3%
2	Masaingi-2	MS-2	2%
3	Marana-1	MR-1	4%
4	Marana-2	MR-2	3%
5	Marana-3	MR-3	3%
6	Yompo-1	YP-1	8%
7	Yompo-2	YP-2	5%
8	Yompo-3	YP-3	7%
9	Yompo-4	YP-4	4%



Gambar 5. Plot trilinear Cl-SO₄-HCO₃ menunjukkan ada dua tipe air di daerah Marana, yaitu air klorida (biru) dan air sulfat bikarbonat (hijau).



Gambar 6. Plot trilinear Na-K-Mg menunjukkan bahwa seluruh sampel berada pada zona setimbang sebagian.

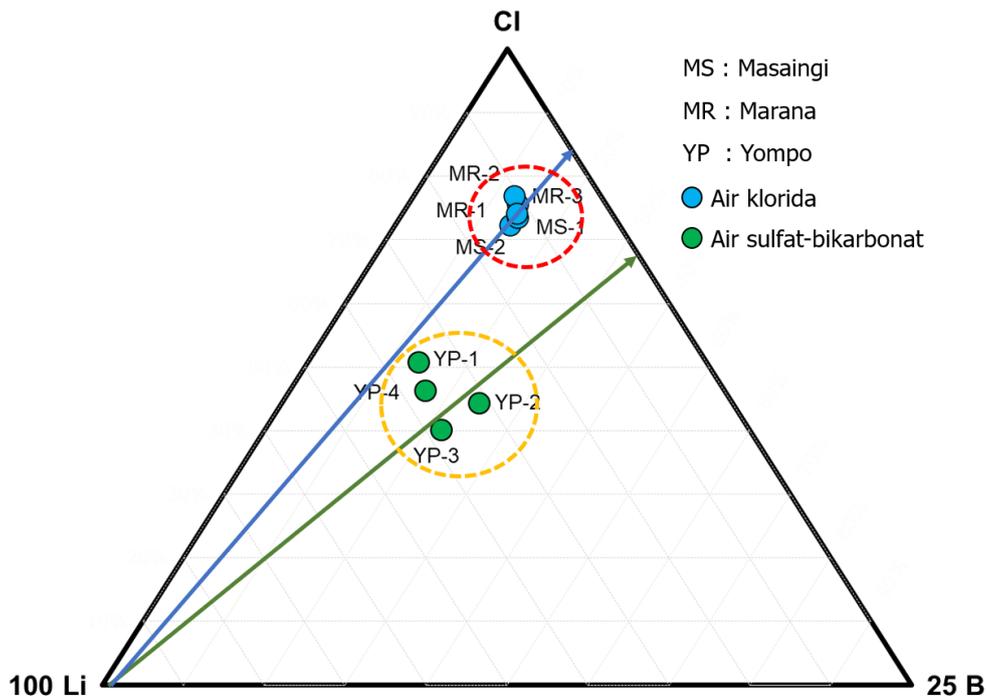
Tipe air sulfat-bikarbonat ditandai dengan konsentrasi Cl yang lebih rendah daripada SO_4 dan HCO_3 , serta konsentrasi Na yang relatif tinggi. Tipe air ini terdiri atas sampel YP-1, YP-2, YP-3, dan YP-4 yang berada di zona *partial equilibrium*. Keempat sampel tersebut diinterpretasikan sebagai air yang mengalami pencampuran dan interaksi dengan batuan sekitar. Kandungan SO_4 yang tinggi disebabkan oleh pelarutan mineral pirit dan anhidrit. Sementara itu, kandungan HCO_3 yang tinggi disebabkan oleh adanya pengaruh dominan dari pencampuran dengan air permukaan dan pelarutan mineral karbonat (kalsit dan aragonit), serta sedikit pengaruh dari oksidasi material organik. Mineral sulfida dan karbonat tersebut terdistribusi di Lapangan Panas Bumi Marana (Nanlohi, et al., 2006).

Diagram Cl-Li-B (Gambar 7) menunjukkan bahwa fluida hidrotermal berasal dari dua reservoir yang berbeda. Reservoir pertama adalah Sektor Marana yang membentuk manifestasi MS-1, MS-2, MR-1, MR-2, dan MR-3 dengan rasio Cl/B berkisar dari 38 hingga 46. Reservoir kedua adalah Sektor Yompo yang membentuk manifestasi YP-1,

YP-2, YP-3, dan YP-4 dengan rasio Cl/B berkisar dari 14 hingga 27. Persebaran manifestasi antara Sektor Marana dan Sektor Yompo pun letaknya berjauhan dan memiliki kontrol hidrogeologi yang berbeda. Hal ini semakin memperkuat dugaan adanya perbedaan reservoir di Lapangan Panas Bumi Marana.

Zona *upflow* dan *outflow* pada kedua sektor ditentukan dengan mempertimbangkan temperatur, tipe air, dan rasio geoindikator (

Tabel 3). Dalam hal ini, penerapan geoindikator cenderung memberikan hasil yang lebih akurat apabila menggunakan sampel dengan temperatur tinggi. Pada dasarnya, zona *upflow* dicirikan dengan rasio Cl/Mg yang tinggi serta Na/Li dan Mg/Ca yang rendah (Nicholson, 1993). Dengan demikian, mata air MS-1 dan MS-2 merupakan zona *upflow* sedangkan MR-1, MR-2, dan MR-3 merupakan zona *outflow* pada Sektor Marana. Sementara itu, seluruh mata air pada Sektor Yompo merupakan zona *outflow* dari sumber panas yang berbeda dengan Sektor Marana.



Gambar 7. Plot trilinear Cl-Li-B menunjukkan terdapat dua kelompok rasio Cl/B. Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan reservoir antara Sektor Marana (lingkaran merah) dan Sektor Yompo (lingkaran jingga).

Tabel 3. Geoindikator unsur terlarut dari mata air di daerah penelitian. Zona upflow ditandai oleh adanya rasio Cl/Mg yang tinggi serta Na/Li dan Mg/Ca yang rendah (MS-1 dan MS-2).

No.	Nama Sampel	Kode Sampel	T (°C)	Rasio Geoindikator		
				Na/Li	Mg/Ca	Cl/Mg
1	Masaingi-1	MS-1	90	90.390	0.011	556.977
2	Masaingi-2	MS-2	58	104.164	0.017	440.822
3	Marana-1	MR-1	50	105.601	0.031	423.043
4	Marana-2	MR-2	54	124.685	0.062	199.634
5	Marana-3	MR-3	80	100.384	0.052	167.066
6	Yompo-1	YP-1	55.6	248.569	0.052	72.155
7	Yompo-2	YP-2	50.1	220.646	0.363	6.911
8	Yompo-3	YP-3	60.8	195.453	0.132	24.052
9	Yompo-4	YP-4	59.1	315.933	0.290	11.425

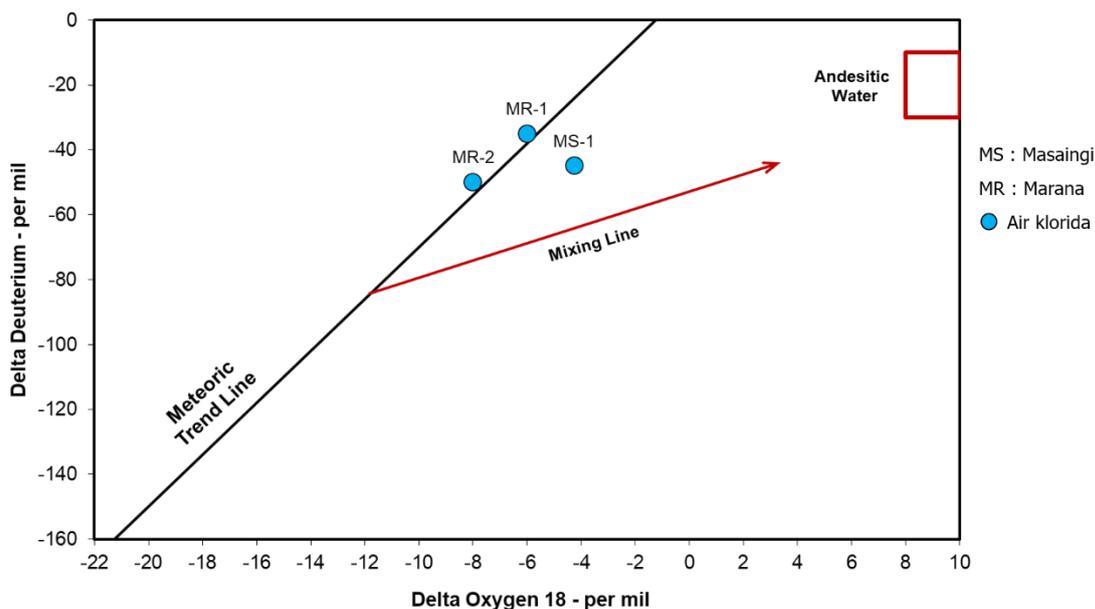
Asal Fluida Hidrotermal

Komposisi isotop stabil ^{18}O dan ^2H pada fluida hidrotermal merupakan indikator yang paling efektif untuk menginterpretasikan asal fluida dan proses-proses yang dialaminya (Zhao, et al., 2018). Data isotop stabil diplot dan digabungkan dengan garis meteorik global (GMWL: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961). Plot isotop ^{18}O dan ^2H dari MS-1, MR-1, dan MR-2 berada pada garis meteorik global (Gambar 8) yang menandakan bahwa fluida hidrotermal Lapangan Panas Bumi Marana berasal dari air meteorik. Sebagai tambahan, sampel MS-1 telah mengalami pergeseran ke arah isotop ^{18}O yang lebih tinggi. Hal tersebut menunjukkan telah terjadi interaksi antara fluida dan batuan

sehingga terjadi transfer oksigen dari batuan ke fluida.

Perkiraan Temperatur Reservoir

Geotermometer merupakan salah satu metode untuk memperkirakan temperatur reservoir berdasarkan keberadaan zat-zat terlarut pada fluida hidrotermal (Aribowo, 2011). Sampel yang paling baik untuk geotermometer adalah air klorida dengan temperatur dan debit yang tinggi ($>60^\circ\text{C}$ dan ≥ 2 L/detik; Nicholson, 1993). Berdasarkan geotermometer air (Tabel 4), temperatur reservoir Sektor Marana adalah $150 \pm 10^\circ\text{C}$. Sementara itu, Sektor Yompo memiliki temperatur reservoir sebesar $120 \pm 10^\circ\text{C}$.



Gambar 8. Hubungan isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ pada mata air Marana dan Masaingi. Plot isotop stabil berada di garis meteorik yang menunjukkan bahwa fluida hidrotermal di Sektor Marana berasal dari air meteorik.

Tabel 4. Hasil geotermometer pada Sistem Marana dan Yompo. Sistem Marana memiliki temperatur reservoir $150 \pm 10^\circ\text{C}$, sedangkan Sistem Yompo memiliki temperatur reservoir $120 \pm 10^\circ\text{C}$.

SISTEM MARANA							
Nama Sampel	Kode Sampel	T ($^\circ\text{C}$)	Geotermometer Air ($^\circ\text{C}$)				
			Kuarsa Konduktif (Mahon, 1966)	Kuarsa A diabatik (Mahon, 1966)	Na-K-Ca (Fournier dan Truesdell, 1973)	Na-K (Giggenbach, 1988)	K-Mg (Giggenbach, 1986)
Masaingi-1	MS-1	90	113	112	84	159	106
Masaingi-2	MS-2	58	105	105	85	162	102
Marana-1	MR-1	50	103	104	94	157	98
Marana-2	MR-2	54	100	101	83	135	81
Marana-3	MR-3	80	89	91	79	152	83

SISTEM YOMPO							
Nama Sampel	Kode Sampel	T ($^\circ\text{C}$)	Geotermometer Air ($^\circ\text{C}$)				
			Kuarsa Konduktif (Mahon, 1966)	Kuarsa A diabatik (Mahon, 1966)	Na-K-Ca (Fournier dan Truesdell, 1973)	Na-K (Giggenbach, 1988)	K-Mg (Giggenbach, 1986)
Yompo-1	YP-1	55,6	104	104	62	106	68
Yompo-2	YP-2	50,1	93	95	59	120	46
Yompo-3	YP-3	60,8	111	110	74	124	66
Yompo-4	YP-4	59,1	103	103	82	124	61

Model Konseptual

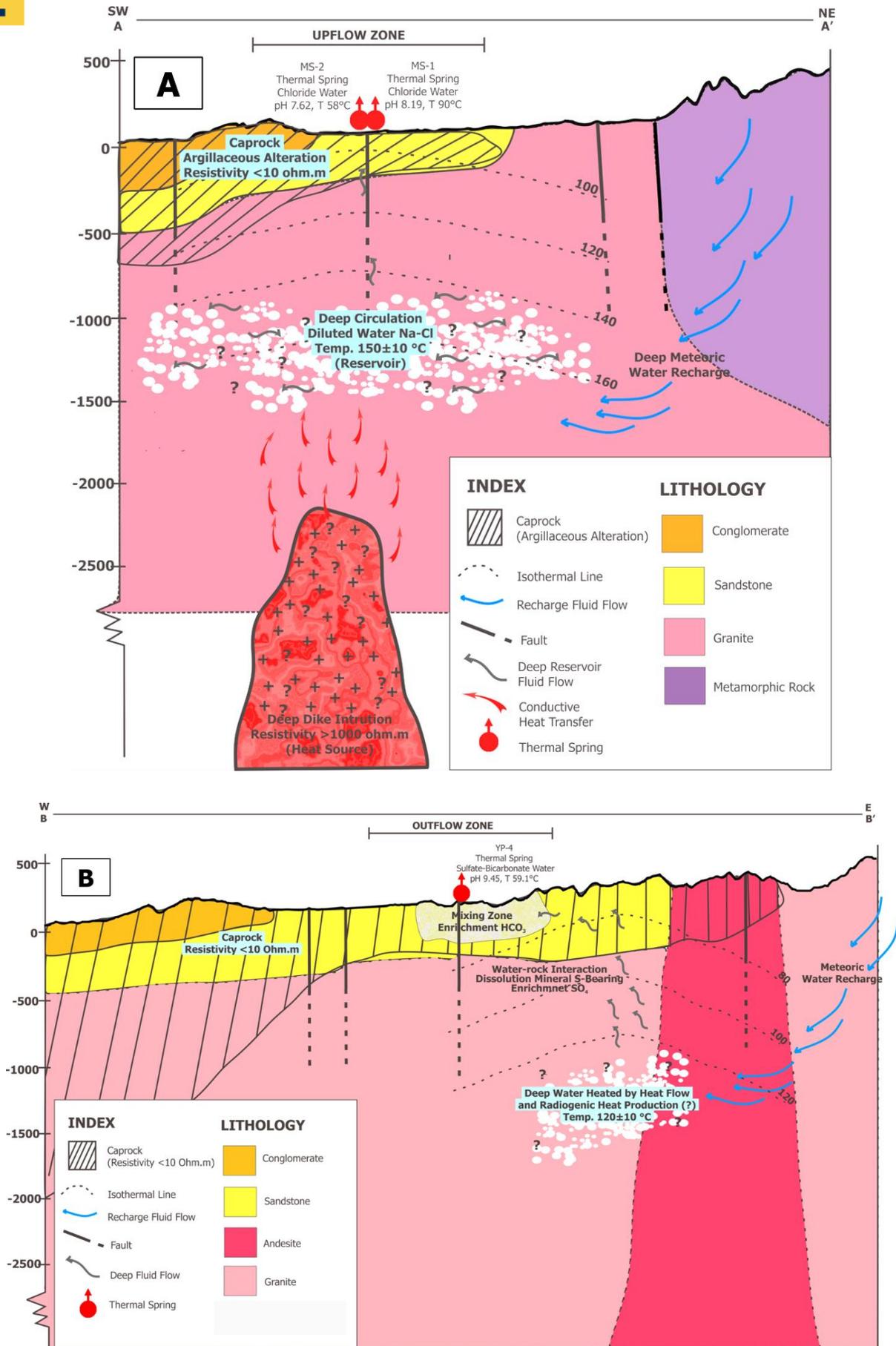
Hasil integrasi dari analisis geokimia fluida dan geologi daerah penelitian menghasilkan model konseptual Lapangan Panas Bumi Marana. Lapangan ini memiliki dua sistem panas bumi, yaitu Sistem Marana (Gambar 9) dan Sistem Yompo (Gambar 9). Secara umum, fluida reservoir pada kedua sistem berasal dari air meteorik yang meresap ke bawah permukaan pada elevasi yang lebih tinggi melalui zona permeabel, seperti sesar dan rekahan. Pada Sistem Marana, air meteorik terpanaskan oleh batuan intrusi sehingga menghasilkan fluida hidrotermal dengan densitas yang lebih rendah. Akibatnya, fluida tersebut mengalir secara vertikal melalui zona permeabel berupa sesar dan keluar sebagai mata air klorida MS-1 dan MS-2 pada zona *upflow*. Disamping itu, fluida juga mengalir secara lateral dan keluar sebagai mata air klorida MR-1, MR-2, dan MR-3 pada zona *outflow*.

Pada Sistem Yompo, air meteorik yang meresap ke bawah permukaan terpanaskan oleh aliran panas dari dalam bumi. Kemudian, air mengalir secara lateral menjauhi sumber panas. Selama air mengalir, terjadi pencampuran

antara air reservoir dan air tanah, serta pelarutan batuan sekitar. Hal ini mengakibatkan unsur-unsur kimia yang terlarut pada fluida mengalami peningkatan yang signifikan, terutama anion HCO_3 dan SO_4 . Akhirnya, air keluar sebagai mata air sulfat-bikarbonat YP-1, YP-2, YP-3, dan YP-4 pada zona *outflow*.

5. PENUTUP

Studi ini bertujuan untuk mengetahui pola hidrogeokimia dan mengembangkan model konseptual Lapangan Panas Bumi Marana. Hasil utama yang diperoleh, yaitu adanya dua sistem yang berbeda pada lapangan ini. Kedua sistem tersebut terdiri atas Sistem Marana ($150 \pm 10^\circ\text{C}$) dan Sistem Yompo ($120 \pm 10^\circ\text{C}$) yang termasuk sistem panas bumi non-vulkanik dengan reservoir dominasi air. Fluida hidrotermal pada Sistem Marana berasal dari resapan air meteorik yang terpanaskan oleh batuan intrusi dan muncul sebagai mata air klorida di zona *upflow* dan *lateral outflow*. Sementara itu, fluida hidrotermal Sistem Yompo dipanaskan oleh aliran panas dan keluar sebagai mata air sulfat-bikarbonat pada zona *outflow*.



Gambar 9. (A) Model konseptual Sistem Marana. (B) Model konseptual Sistem Yompo.

DAFTAR PUSTAKA

- Aribowo, Y. (2011). Prediksi temperatur reservoir panas bumi dengan menggunakan metode geotermometer fluida. *Teknik*, 32, 234 – 238.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702 – 1703.
- Cumming, W. (2009). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. *Proceedings 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University.
- Darman, H. & Sidi, F. H. (2000). *An outline of the geology of Indonesia*. Jakarta: Indonesian Association of Geologist (IAGI).
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochemistry et Cosmochimica Acta*, 52, 2749 – 2765.
- Hall, R. (2011). Australia-SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow. The SE Asian gateway: history and tectonics. *Geological Society London Special Publications*, 355, 75 – 109.
- Hochstein, M. P. & Browne, P. R. L. (2000). Surface manifestation of geothermal systems with volcanic heat sources. *Encyclopedia of Volcanoes*. San Diego: Academic Press.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Triwulan III 2021: Rasio elektrifikasi 99,40%, Kapasitas Pembangkit EBT 386 MW*. Diakses pada 25 September 2022 dari <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/>.
- Nanlohi, F., Boegis, Z., Dikdik, R. (2006). *Pemboran Landaian Suhu MM-1, Lapangan Panas Bumi Marana, Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah*. Bandung.
- Nasruddin, Idrus, A., Daud, Y., Surachman, A., Sugiyono, A., Aditya, H. B., & Mahlia, T. M. I. (2016). Potential of geothermal energy for electricity generation in Indonesia: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 733 – 740.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi. (2022). *Laporan penyelidikan geologi, geokimia, gaya berat, dan magnetotelurik daerah panas bumi Marana, Sulawesi Tengah*. Bandung: Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral.
- Satyana, A. H., Faulin, T., Mulyati, S. N. (2011). Tectonic evolution of Sulawesi area: Implications for proven and prospective petroleum plays. *Proceedings 36th HAGI and 40th IAGI Annual Convention and Exhibition*. Makassar.
- Surono & Hartono, U. (Eds). (2015). *Geologi Sulawesi*. Jakarta: LIPI Press.
- Zhao, R., Shan, X., Yi, J., Du, X., Liang Y., Zhang, Y. (2018). Geochemistry of HCO₃-Na thermal water from the Gudian slope: insights into fluid origin, formation mechanism and circulation in the Yitong Basin, Northeast China. *Applied Geochemistry*, 91, 185 – 196.