

PENENTUAN KESAMAAN RESERVOAR SISTEM PANAS BUMI KADIDIA DAN KADIDIA SELATAN KABUPATEN SIGI, PROVINSI SULAWESI TENGAH BERDASARKAN METODA GEOKIMIA

DETERMINATION OF RESERVOIR SIMILARITY OF KADIDIA AND KADIDIA SELATAN GEOTHERMAL SYSTEMS BASED ON GEOCHEMICAL METHOD IN SIGI REGENCY, CENTRAL SULAWESI PROVINCE

**Andri Eko Ari Wibowo, Mochamad Nurhadi, Yuanno Rezky,
Dudi Hermawan, Dede Iim Setiawan**
Pusat Sumber Daya Geologi
Jalan Soekarno Hatta No.444, Bandung
Email: andri.bdg@gmail.com

SARI

Pembentukan sistem panas bumi di daerah Kadidia dan Kadidia Selatan diperkirakan berhubungan dengan aktivitas tektonik yang masih aktif yaitu pada segmen sesar Palu Koro. Hal ini memungkinkan sistem panas buminya mempunyai manifestasi dan reservoir yang bertemperatur tinggi. Litologi daerah ini didominasi oleh batuan plutonik dengan jenis granit dengan bagian depresinya diisi oleh endapan permukaan.

Ditemukannya manifestasi air panas dan tanah panas bertemperatur mendidih di Kadidia Selatan mengindikasikan sistem ini mempunyai temperatur reservoir yang tinggi. Panas yang tinggi ini dipicu oleh aktivitas tektonik yang masih aktif yang memanaskan kembali batuan granit. Temperatur reservoir daerah Kadidia Selatan diperkirakan 240°C dengan pembentukan fluida panas bumi yang berasal dari pencampuran dengan fluida magmatis. Sedangkan daerah Kadidia yang memiliki temperatur yang lebih rendah, sistem panas bumi ini diperkirakan berhubungan dengan sirkulasi dalam dimana air meteorik terpanaskan oleh batuan panas yang kemudian muncul di permukaan sebagai air panas, dengan temperatur reservoir daerah Kadidia diperkirakan 130°C s.d 140°C.

Sistem panas bumi Kadidia dan Kadidia Selatan diperkirakan mempunyai reservoir yang berbeda. Hal ini terlihat dari karakteristik geokimia fluida yang berbeda seperti komposisi unsur-unsur utama, unsur-unsur konservatif, daya hantar listrik, dan isotop. Litologi batuan yang berbeda serta adanya sesar yang membatasi kedua sistem ini juga menegaskan bahwa kedua daerah ini mempunyai reservoir yang berbeda. Namun untuk mengetahui apakah kedua daerah ini mempunyai sistem yang sama atau tidak, belum dapat diketahui karena membutuhkan kajian lebih lanjut.

Kata kunci : panas bumi, non-vulkanik, sesar aktif Palu Koro

ABSTRACT

Kadidia and Kadidia Selatan geothermal system are thought to be related to Palu Koro fault activity. This enables the geothermal system to have a high temperature of manifestations and reservoir. Lithology of this area is dominated by granitic type of plutonic rock, with the depression area filled by surficial deposit.

Boiling springs and high temperature hot ground that are found in Kadidia Selatan indicate this system has high temperature of reservoir. This high heat was triggered by tectonic activity that reheating the possible heat source. The reservoir temperature of this system is

about 240°C with the source of geothermal fluid came from mixing with magmatic fluid. Kadidia geothermal system, that has lower temperature, is estimated to be related to deep circulation system where meteoric water was heated by heated rock in the depth and reach to the surface as hot spring. The reservoir temperature of this system is about 130-140°C.

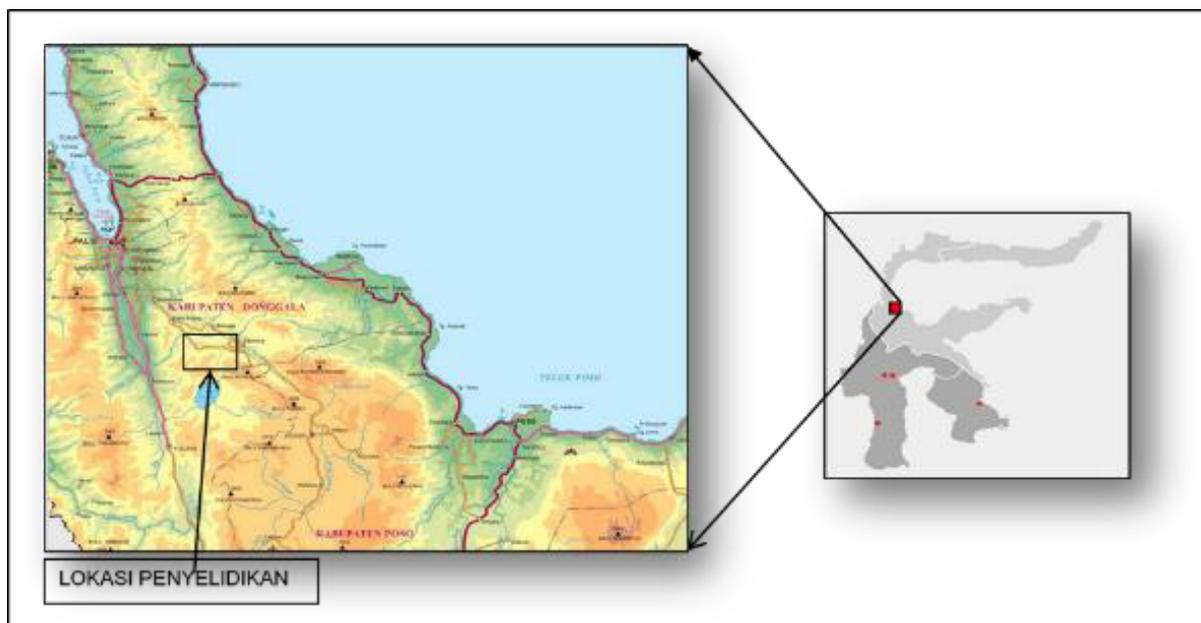
Kadidia and Kadidia Selatan is estimated to have different reservoir. It is known from the differences of fluid characteristic such as chemical composition of major element, conservative element, conductivity, and isotopic ratio. The differences of rock lithology and the presence of fault system which separate the geothermal system are also confirming that these two areas have different reservoirs. However, further studies are necessary to find out whether these areas have the same geothermal system.

Keyword : geothermal, non-volcanic, Palu Koro active fault

PENDAHULUAN

Sistem panas bumi di Indonesia dibagi menjadi sistem panas bumi vulkanik dan non-vulkanik. Di Indonesia sistem panas bumi non-vulkanik belum dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik, salah satunya karena kurangnya pemahaman

mengenai geosains sistem tersebut. Sistem panas bumi di Sulawesi, selain di Sulawesi bagian Utara, sebagian besar lokasi panas bumi berasosiasi dengan sistem non-vulkanik, diantaranya Kadidia. Secara administratif, daerah Kadidia berada wilayah Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah (**Gambar 1**).



Gambar 1. Lokasi Daerah Penyelidikan

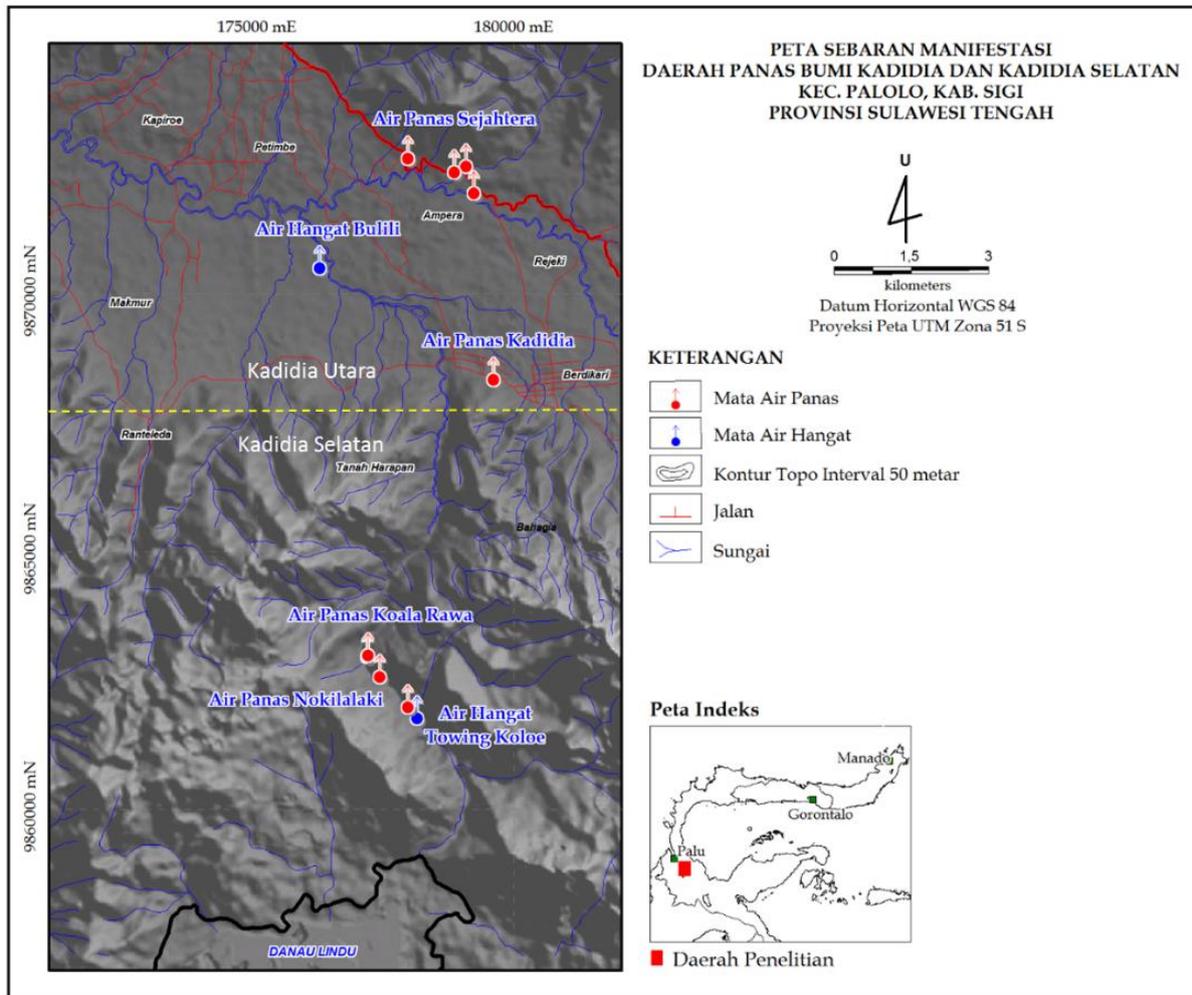
Daerah panas bumi Kadidia terletak pada tataan geologi Sulawesi bagian Tengah. Secara geologi, batuan di daerah Kadidia didominasi oleh batuan plutonik dengan jenis granit dan batuan metamorf. Pembentukan sistem panas bumi di daerah tersebut erat kaitannya dengan

aktivitas tektonik yang masih aktif hingga saat ini yaitu segmen sesar aktif Palu Koro.

Pemunculan manifestasi panas bumi tersebar dari daerah tinggian Tongoa yang memanjang ke arah utara hingga ke

daerah depresi Kadidia sepanjang sekitar 11 km. Manifestasi panas bumi dipermukaan yang muncul di daerah depresi disebut sebagai kelompok

Kadidia, sedangkan yang di daerah tinggian Tongoa disebut kelompok Kadidia Selatan (Gambar 2).



Gambar 2. Peta sebaran manifestasi daerah panas bumi Kadidia dan Kadidia Selatan

Manifestasi panas bumi di permukaan yang muncul di Kadidia berupa mata air panas (51°C s.d 81°C) dan batuan alterasi. Air panas Kadidia mempunyai derajat keasaman pH netral sampai cenderung basa dan mempunyai daya hantar listrik (DHL) 500 - 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sedangkan manifestasi di daerah Kadidia Selatan berupa mata air panas, tanah panas, dan batuan alterasi. Temperatur air panas berkisar 80,5°C s.d 98,8°C, pH netral kearah basa, dan daya hantar listrik (DHL) 1.400 - 1.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dan tanah panas beruap dengan temperatur 100°C.

Sumber fluida manifestasi yang muncul di daerah Kadidia dan Kadidia Selatan ini masih diperdebatkan apakah berasal dari sumber reservoir yang sama atau tidak. Melalui pemodelan berdasarkan data geologi dan geokimia diharapkan dapat menjawab perdebatan tersebut.

GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

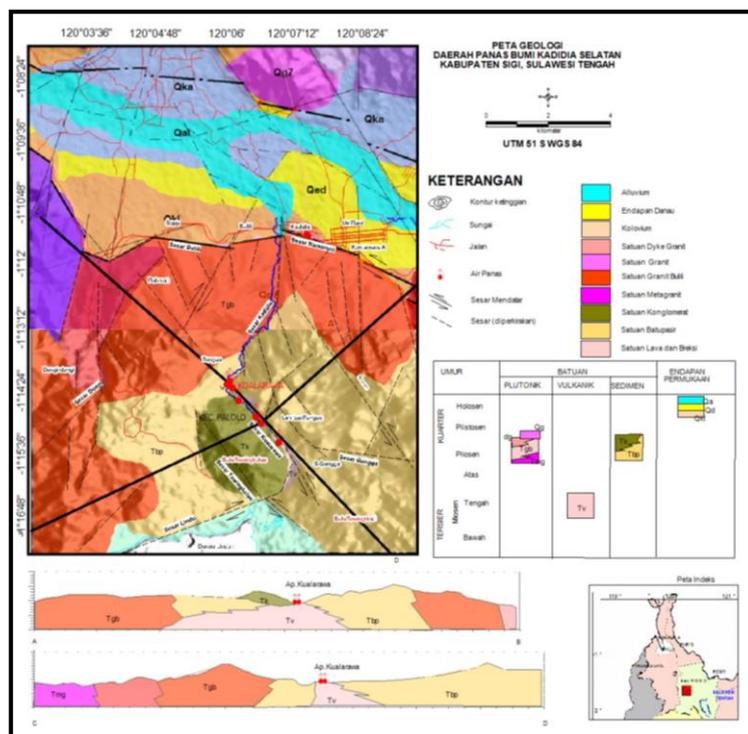
Batuan tertua yang tersingkap di daerah penyelidikan berupa batuan malihan derajat rendah dari jenis granit yang secara regional termasuk ke dalam Granit

Kambuno berumur Pliosen. Kegiatan magmatisme terus berlangsung hingga terbentuknya batuan plutonik terakhir berkomporsi granitik-dasitik yang juga dijumpai di daerah penyelidikan. termuda di daerah penyelidikan (**Gambar 3**). Satuan plutonik yang paling muda berkomporsi granitik-dasitik ini diperkirakan berumur Plio-plistosen, menembus satuan batuan yang lebih tua, dan diperkirakan sebagai satuan yang berasosiasi dengan batuan di bawah permukaan yang masih menyimpan panas.

Kegiatan tektonik berlangsung seiring dengan kegiatan magmatisme muda baik berupa pengangkatan maupun regangan. Proses pengangkatan ditandai dengan tersingkapnya batuan-batuan plutonik ke permukaan, sedangkan proses regangan ditandai dengan terbentuknya *pull-apart basin* di bagian tengah daerah penyelidikan. Cekungan yang terbentuk akibat depresi ini diisi oleh material-material sedimen hasil rombakan batuan yang lebih tua, diantaranya adalah endapan danau, koluvium, kipas aluvium, dan endapan aluvial.

Setidaknya diamati delapan litologi batuan plutonik yang berlangsung dari terbentuknya metagranit, ditandai dengan granit 7 (Qg7) dan granit 8 (Qg8) yang diperkirakan merupakan batuan plutonik merupakan satuan batuan termuda di daerah penyelidikan, proses pembentukannya masih terus berlangsung hingga sekarang.

Tektonisme yang masih aktif hingga saat ini adalah pergerakan sesar aktif Palu Koro yang salah satu segmennya mengarah ke daerah penelitian dengan arah barat baratlaut - timur tenggara (NWW-SEE). Aktifitas tektonik ini yang diperkirakan mengontrol pembentukan sistem panas bumi di daerah Kadidia dan Kadidia Selatan. Morfologi pedataran di Kadidia terbentuk oleh suatu perkembangan depresi yang dikontrol oleh mekanisme *pull-apart* dari sesar mendatar berarah barat baratlaut - timur tenggara (NWW-SEE) dan sesar-sesar normal yang terbentuk di dalamnya. Depresi ini membentuk suatu cekungan dimana di dalamnya terakumulasi endapan permukaan.



Gambar 3. Peta geologi daerah panas bumi Kadidia dan Kadidia Selatan

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini berupa pengamatan di lapangan, pengambilan conto, analisis laboratorium dan interpretasi data. Pengamatan yang dilakukan di lapangan meliputi pengamatan sebaran batuan ubahan dan karakteristik fisik manifestasi panas bumi seperti temperatur, pH, debit air dan daya hantar listrik. Pengamatan geologi meliputi pengamatan litologi dan indikasi struktur-struktur geologi yang muncul. Pengambilan conto geokimia berupa pengambilan conto air dan batuan ubahan, untuk selanjutnya dilakukan analisis mineral ubahan dan geokimia air seperti anion, kation dan isotop di laboratorium. Pengambilan conto gas juga dilakukan pada hembusan-hembusan uap panas yang terdapat pada sekitar tanah panas di area manifestasi Koala Rawa.

Metode analisis yang digunakan terhadap 15 unsur-unsur terlarut meliputi anion utama Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , kation seperti Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Li^+ dan beberapa senyawa dan unsur netral seperti SiO_2 , NH_3 , F, B, menggunakan ion kromatografi, *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dan spektrometri. Untuk mengetahui kandungan isotop stabil Deuterium dan Oksigen-18 digunakan *Mass Spectrometer* (MS). Mineralogi penyusun batuan ubahan dideskripsi dengan menggunakan analisis petrografi yang didukung dengan analisis Spektra Mineral dengan menggunakan alat *Portable Infrared Mineral Analyzer* (PIMA). Metode analisis gas menggunakan kromatografi gas (GC) untuk mengetahui komposisi He , H_2 , O_2 , Ar , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 , H_2S , HCl , dan NH_3 . Data hasil

analisis laboratorium kemudian diinterpretasi sehingga karakteristik fluida yang terdapat di daerah penelitian dapat diketahui yang selanjutnya digunakan untuk pembuatan model geokimia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Manifestasi Panas Bumi Di Permukaan

Kenampakan gejala panas bumi di daerah penelitian berupa mata air panas, tanah panas, dan batuan alterasi yang muncul di beberapa lokasi (lihat **Gambar 2**). Karakteristik fisik dari manifestasi air panas dan air hangat ditampilkan pada **tabel 1**. Pada tabel 1 terlihat bahwa temperatur manifestasi dan nilai DHL di Kadidia Selatan lebih tinggi dibandingkan di Kadidia. Di Kadidia Selatan juga ditemukan tanah panas Koala Rawa yang berada di dalam kompleks manifestasi Koala Rawa dengan suhu tanah panas berkisar antara $50 - 100^\circ\text{C}$ dan luas sekitar $100 \times 100 \text{ m}$.

Batuan ubahan intensif ditemukan di Kadidia Selatan yang terbentuk di sepanjang sungai Koala Rawa dengan warna fisik kehijauan dan putih hingga kekuningan. Di sekitar Koala Rawa ubahan mencapai 1 km^2 dengan komposisi mineral seperti montmorilonit, paragonit, epidot, alunit, ilit, kaolinit, halosit. Mineral epidot, ilit dan kaolinit menunjukkan mineral yang terbentuk pada temperatur tinggi, sedangkan montmorilonit pada temperatur rendah dengan pH netral. Terdapat pula sinter karbonat dan sinter silika di sekitar manifestasi Kadidia Selatan.

Tabel 1. Manifestasi panas bumi daerah Kadidia dan Kadidia Selatan

NO	MANIFESTASI	LOKASI	TEMPERATUR (°C)	pH	DHL (µS/cm)	DEBIT (lt/dtk)
1	Kelompok air panas Nokilalaki	Kadidia Selatan	80,5 - 96,4	7,9 - 8,3	1.450 - 1.701	0,1 - 0,5
2	Kelompok air panas Koala Rawa		96,6 - 98,8	7,9 - 9,4	1.803 - 1.844	4 - 10
3	Air hangat Towing Koloe		40,2	7,1	144	0,4
4	Tanah Panas Koala Rawa		50 – 100	-	-	-
5	Air panas Kadidia	Kadidia	81,6	8,3	529	2
6	Kelompok air panas Sejahtera		51 - 62,8	6,9 - 8,4	500 - 700	0,6
7	Air hangat Bulili		40,4	6,82	300	0,1

Hasil Analisis Laboratorium

Enam conto air panas diperoleh di daerah Kadidia yang meliputi air panas Sejahtera 1, 2, 3, dan 4, air panas Bulili, serta air panas Kadidia, sedangkan lima conto air panas yang lain diperoleh dari daerah

Kadidia selatan yaitu di lokasi air panas Koala Rawa 1 dan 2, air panas Nokilalaki 1 dan 2, serta air panas Towing Koloe. Hasil analisis kimia air yang terdapat di daerah penelitian ditampilkan dalam **tabel 2.**

Tabel 2. Hasil analisis kimia air panas daerah Kadidia dan Kadidia Selatan

PARAMETER	KADIDIA						KADIDIA SELATAN				
	AP Sejahtera 1	AP Sejahtera 2	AP Sejahtera 3	AP Sejahtera 4	AP Bulili	AP Kadidia	AP Nokilalaki 1	AP Nokilalaki 2	AP Koala Rawa 1	AP Koala Rawa 2	AP Towing Koloe
	APS-1	APS-2	APS-3	APS-4	APB	APK	APNKL-1	APNKL-2	APKRW-1	APKRW-2	APTWK
pH	6,97	8,41	7,83	7,75	6,82	8,32	8,32	7,90	9,41	7,91	7,10
DHL (µS/cm)	700	595	687	499	300	974	1727	1449	1815	1847	141
SiO ₂ (mg/L)	54,94	58,34	57,85	42,39	42,81	65,37	296,40	195,84	270,83	275,51	47,82
B (mg/L)	0,32	0,25	0,32	0,18	0,22	0,47	4,04	3,29	3,72	3,85	0,02
Al ³⁺ (mg/L)	0,01	0,08	0,01	1,05	0,00	0,08	0,03	0,01	0,02	0,06	0,01
Fe ³⁺ (mg/L)	0,07	0,05	0,06	0,93	0,07	0,14	0,01	0,01	0,01	0,06	0,01
Ca ²⁺ (mg/L)	7,86	0,31	5,83	1,83	9,49	2,19	12,30	20,30	8,60	15,00	10,05
Mg ²⁺ (mg/L)	1,78	0,12	0,59	0,77	1,91	0,1	0,01	6,01	0,90	1,50	4,24
Na ⁺ (mg/L)	95,12	87,13	112,80	64,24	54,52	128,3	343,50	294,80	379,60	372,40	15,96
K ⁺ (mg/L)	2,57	2,12	2,30	2,78	2,59	2,8	37,00	44,90	30,77	33,21	2,30
Li ⁺ (mg/L)	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,10	1,18	0,86	1,19	1,21	0,00
As ³⁺ (mg/L)	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,01	1,00	1,00	0,01
NH ₄ ⁺ (mg/L)	1,86	0,25	1,47	0,84	0,21	0,32	0,87	0,81	0,52	0,42	0,10
F ⁻ (mg/L)	2,36	4,20	3,50	0,86	0,99	2,69	3,81	2,09	3,78	3,88	0,05
Cl ⁻ (mg/L)	82,45	59,53	99,53	6,00	14,00	102,45	347,13	302,89	410,59	391,32	0,36
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	6,00	27,04	18,11	12,00	6,00	40,44	41,37	26,61	23,72	37,62	11,44
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	150,00	82,68	118,65	160,85	149,43	112,86	315,64	382,87	360,75	372,31	77,34
CO ₃ ⁼ (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
meq cat	4,87	3,90	5,39	3,23	3,09	5,82	16,77	15,65	18,05	18,17	1,61
meq an.	5,03	3,82	5,31	3,10	3,02	5,72	16,03	15,48	18,19	18,13	1,52
% IB	-1,63	1,05	0,74	2,12	1,10	0,83	2,25	0,54	-0,39	0,11	2,95

Sedangkan contoh gas hanya didapatkan pada manifestasi Kadidia Selatan yang ditampilkan dalam **tabel 3**.

Tabel 3. Hasil analisis kimia gas daerah panas bumi Kadidia Selatan

KODE CONTO		PB -5 2014	PB -7 2014
		<i>Dry base</i>	<i>Dry base</i>
He	% mol	tt	Tt
H ₂	% mol	tt	Tt
O ₂	% mol	20.0396	0.2516
Ar	% mol	1.0353	0.8955
N ₂	% mol	75.7462	95.1403
CH ₄	% mol	tt	Tt
CO	% mol	tt	Tt
CO ₂	% mol	2.6528	3.4979
H ₂ S	% mol	0.0000	0.0000
HCl	% mol	0.5239	0.2147
NH ₃	% mol	0.0022	Tt

Ket : tt = tidak terdeteksi

Karakteristik Fluida Panas Bumi

Hasil analisis kimia pada **Tabel 2** menunjukkan bahwa air panas dan air dingin di daerah penelitian mempunyai kesetimbangan ion (*ion balance*) kurang dari 5%. Untuk mengetahui karakteristik dan tipe air panas berdasarkan data yang diperoleh pada **Tabel 1**, dilakukan *plotting* komposisi kimia dari mata air panas pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃, Na-K-Mg dan Cl-Li-B yang mengacu pada Giggenbach (1988).

Berdasarkan diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (**gambar 4**), fluida panas bumi di sistem Kadidia dan Kadidia Selatan didominasi oleh air klorida dan air bikarbonat. Air klorida umumnya merupakan air panas bertemperatur tinggi seperti air panas Koala Rawa, Nokilalaki, Kadidia, dan Sejahtera 2 dan Sejahtera 3. Air panas Koala Rawa dan Nokilalaki di daerah Kadidia Selatan yang bertemperatur mendidih, berada pada

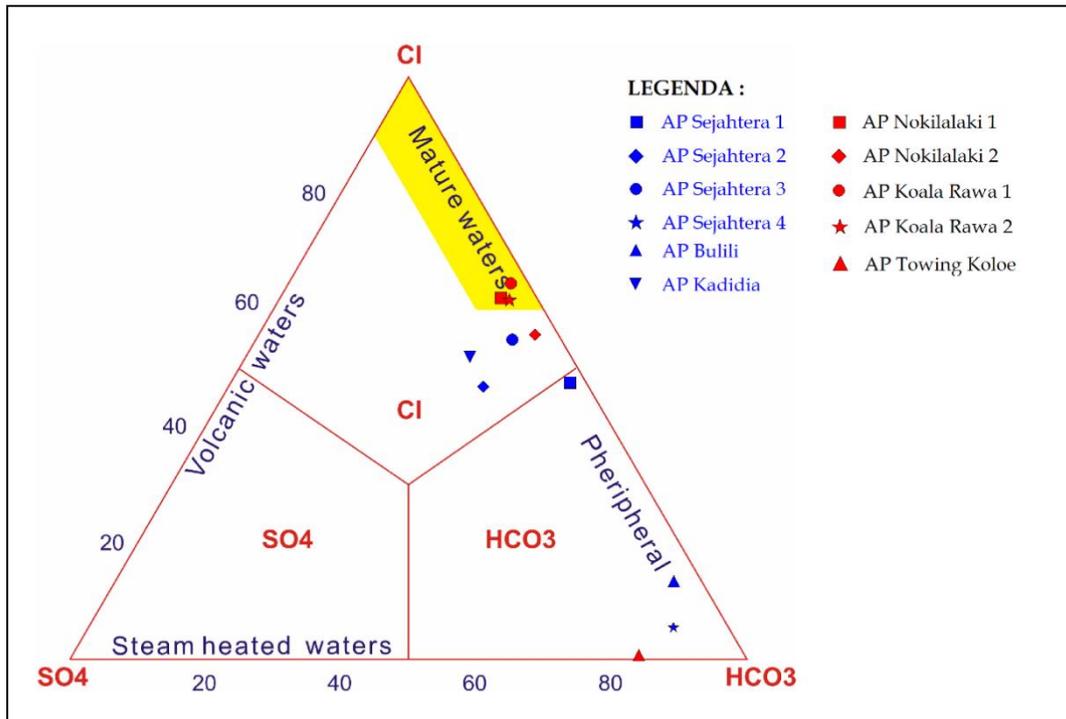
zona *mature water*, yang mengindikasikan bahwa air panas tersebut berasal langsung dari reservoir. Hal ini juga ditunjukkan pada diagram segitiga Na-K-Mg (**gambar 5**) yang berada pada zona *partial equilibrium*, yang mencerminkan fluida reservoir dengan perkiraan temperatur fluida 200°C s.d 250°C.

Demikian juga air panas Kadidia, Sejahtera 2 dan Sejahtera 3 berada di *partial equilibrium* namun diperkirakan berasal dari reservoir dengan temperatur lebih rendah yaitu 100°C s.d 140°C. Air panas lainnya berada di zona *immature water* yang menunjukkan adanya pencampuran air permukaan dengan fluida reservoir.

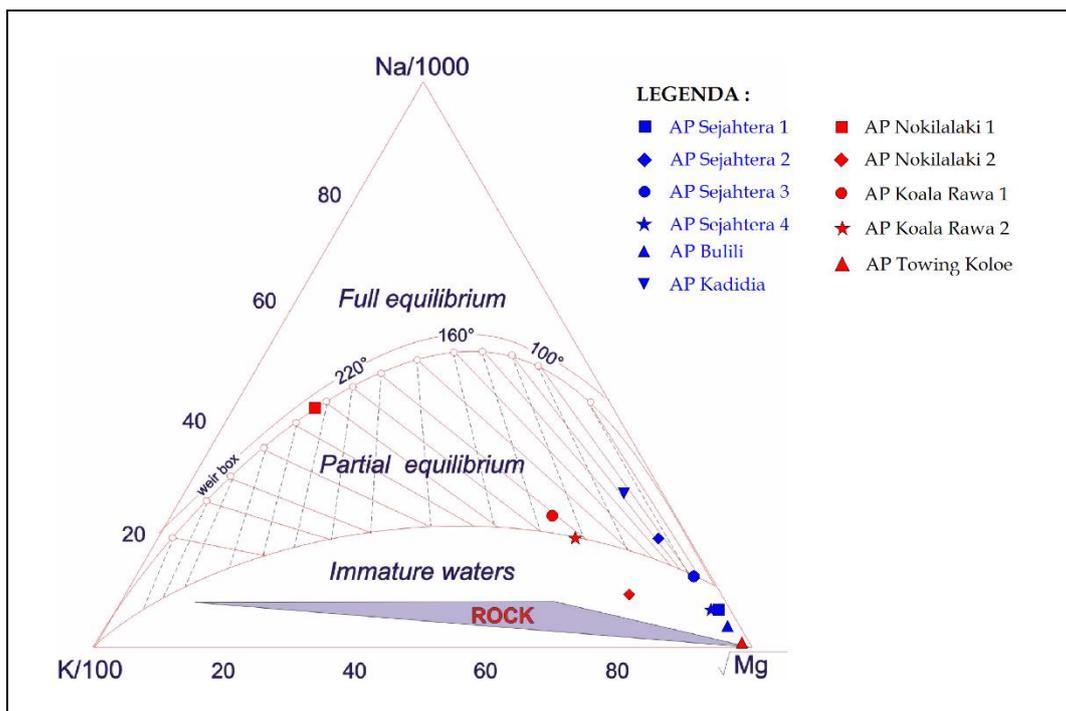
Untuk mengetahui kesamaan reservoir (*common source reservoir*) berdasarkan fluida air panas dari daerah Kadidia dan Kadidia Selatan, dapat diketahui dengan menggunakan diagram segitiga CL-Li-B (Nicholson, 1993) (**gambar 6**).

Berdasarkan diagram segitiga tersebut, terlihat bahwa terdapat dua kelompok (*cluster*) air panas dengan karakteristik yang berbeda yang menunjukkan air panas Kadidia dan Kadidia Selatan berasal dari reservoir yang berbeda.

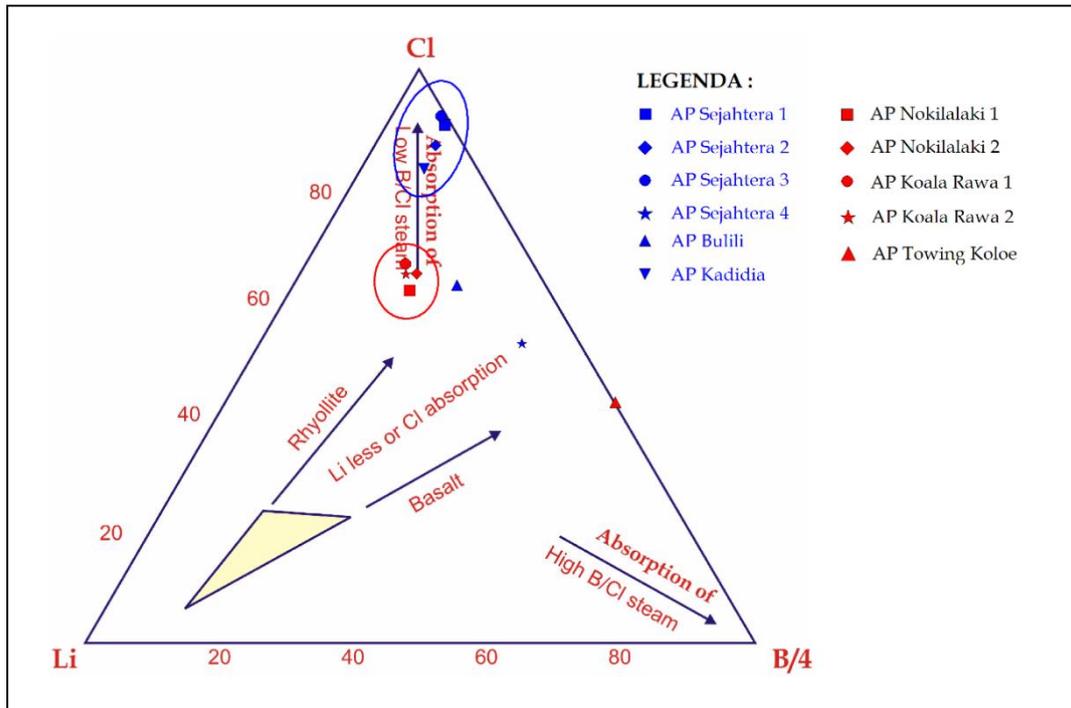
Namun untuk mengetahui apakah kedua daerah tersebut mempunyai sistem panas bumi yang sama atau tidak, belum dapat diketahui karena memerlukan penelitian lebih lanjut.



Gambar 4. Diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃



Gambar 5. Diagram segitiga Na-K-Mg

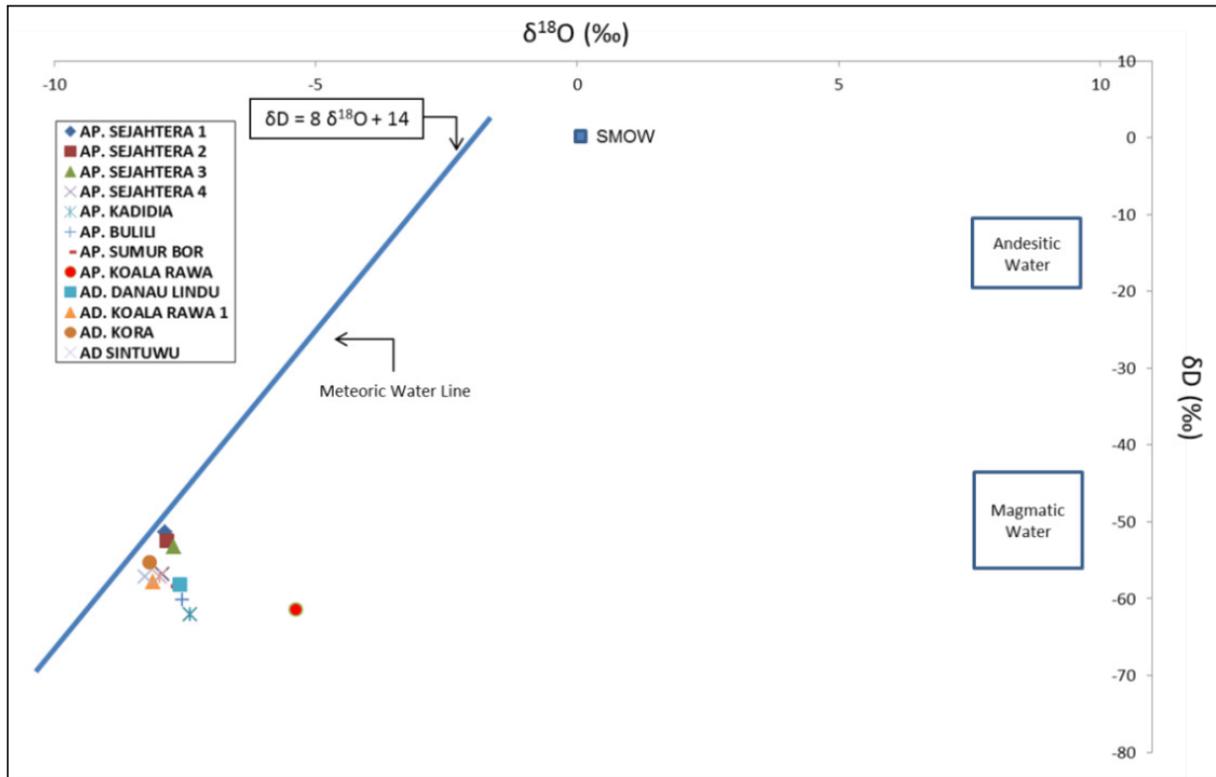


Gambar 6. Diagram segitiga Cl-Li-B

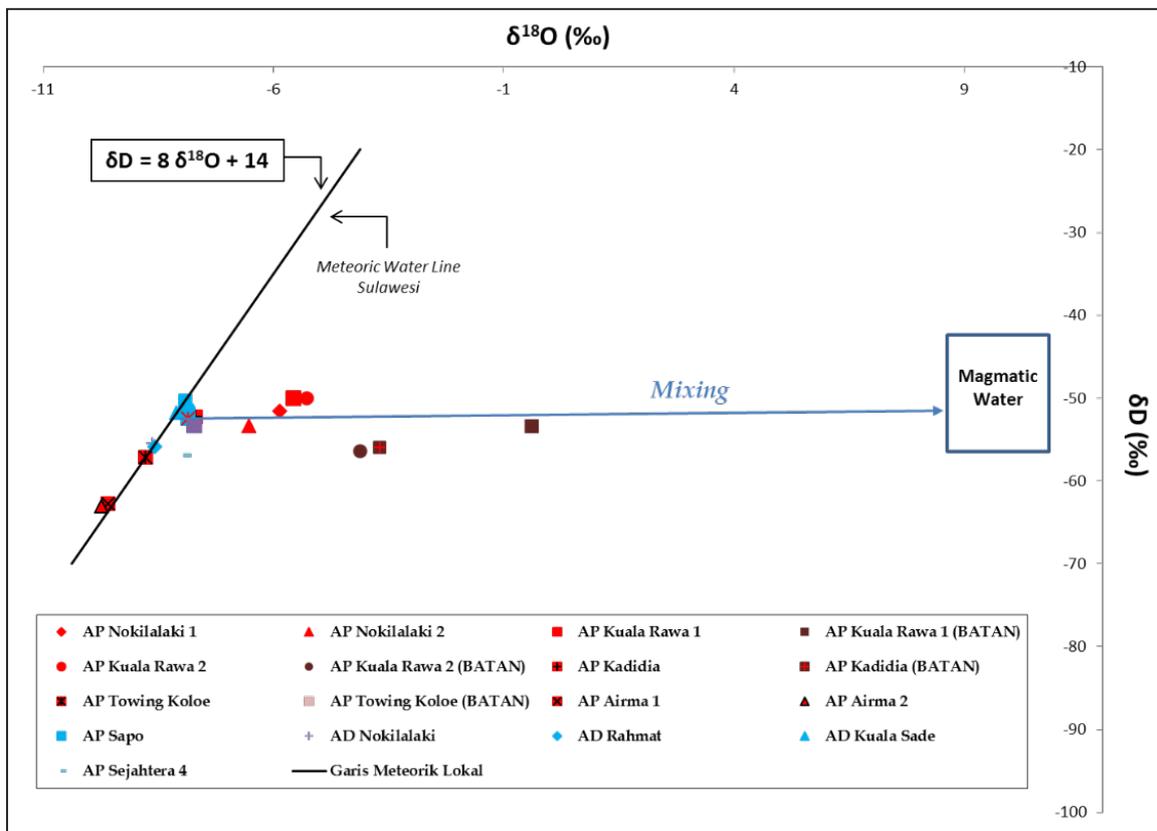
Berdasarkan data hasil analisis isotop ^{18}O dan Deuterium pada sampel air panas daerah Kadidia Selatan, yaitu Koala Rawa dan Nokilalaki yang mempunyai temperatur permukaan tinggi, cenderung menjauhi garis air meteorik (*Meteoric Water Line*) (**gambar 7**). Hal ini mengindikasikan telah terjadinya pengkayaan ^{18}O akibat adanya interaksi fluida panas dengan batuan di kedalaman atau kemungkinan pengenceran oleh air meteorik sangat kecil. Pada **gambar 8** terlihat asal-usul pembentukan fluida panas bumi daerah Kadidia Selatan, yaitu terjadi

mixing/pencampuran dengan fluida magmatik dengan perkiraan persentase komposisi fluida magmatik sebesar $\pm 10-20\%$.

Untuk air panas lainnya di daerah Kadidia, hasil *plotting* terletak mendekati garis air meteorik. Hal ini mengindikasikan bahwa air panas tersebut dipengaruhi oleh air permukaan. Sebagai perbandingan dilakukan pula pengukuran isotop untuk air dingin di daerah Kadidia Selatan yang diambil dari mata air pegunungan dimana hasil *plotting* air dingin berada mendekati garis air meteorik.



Gambar 7. Grafik isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan δD daerah panas bumi Kadidia

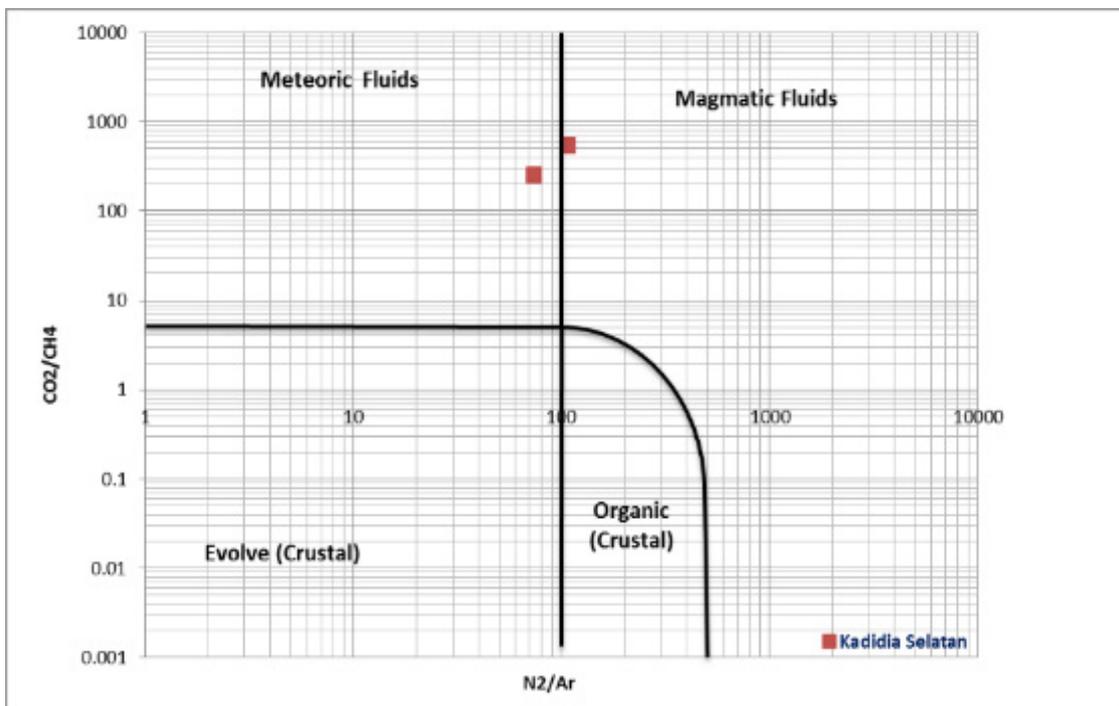


Gambar 8. Grafik isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan δD daerah panas bumi Kadidia Selatan

Komposisi gas di daerah manifestasi Koala Rawa (**Tabel 2**) sangat didominasi oleh kandungan gas N₂, O₂, dan CO₂ dibandingkan gas-gas lainnya yang relatif sangat kecil. Kandungan N₂ dan O₂ yang cukup tinggi menandakan bahwa ada pengaruh udara luar pada sampel gas yang diambil. Kandungan CO₂ yang tinggi menandakan bahwa reaksi yang berlangsung di bawah permukaan akan menghasilkan kandungan HCO₃⁻ yang tinggi dalam larutan air panas. Indikasi gas-gas tersebut dicerminkan oleh komposisi kimiawi mata air panas di daerah Kadidia Selatan yang mengandung ion bikarbonat yang cukup tinggi. Hal ini memperlihatkan oleh adanya uap yang naik dari kedalaman sebagai air bawah permukaan yang bertemperatur tinggi dan mengalami tingkat proses pendinginan dikarenakan

penurunan temperatur dengan gas CO₂ yang tersisa di dalam uap yang naik melalui batuan membentuk ion bikarbonat.

Dari data analisis gas yang diperoleh, dilakukan *plotting* pada grafik Norman dan Moore (1999) untuk mengetahui asal-usul gas tersebut (**gambar 9**). Dari grafik tersebut terlihat bahwa gas-gas tersebut berasal dari fluida meteorik yaitu pengaruh udara luar cukup dominan, namun ada sedikit pengaruh dari fluida magmatik. Oleh karena itu, hasil analisis gas ini tidak bisa digunakan untuk memperkirakan temperatur reservoir dengan menggunakan geotermometer gas. Adanya pengaruh fluida magmatik juga sejalan dengan hasil analisis isotop, dimana pembentukan fluida panas bumi di daerah Kadidia Selatan ada pengaruh pencampuran dengan fluida magmatik.



Gambar 9. Grafik asal-usul gas daerah Kadidia Selatan (Norman dan Moore, 1999)

Perkiraan temperatur bawah permukaan daerah Kadidia Selatan dengan menggunakan geotermometer SiO₂ (*conductive-cooling*) rata-rata berkisar

antara 190°C s.d 210°C dan termasuk ke dalam entalpi sedang. Perkiraan temperatur berdasarkan geotermometer Na-K didapatkan 200°C s.d 260°C (entalpi

tinggi), sedangkan dari geotermometer Na-K-Ca didapatkan temperatur sekitar 200°C (Tabel 4).

Dengan melihat karakteristik kimia air panas, terutama dari Koala Rawa dan Nokilalaki, seperti pH netral, suhu permukaan yang tinggi, terdapat sinter silika, bertipe klorida, dan berada di zona *partial equilibrium*, maka geotermometer Na/K paling tepat digunakan.

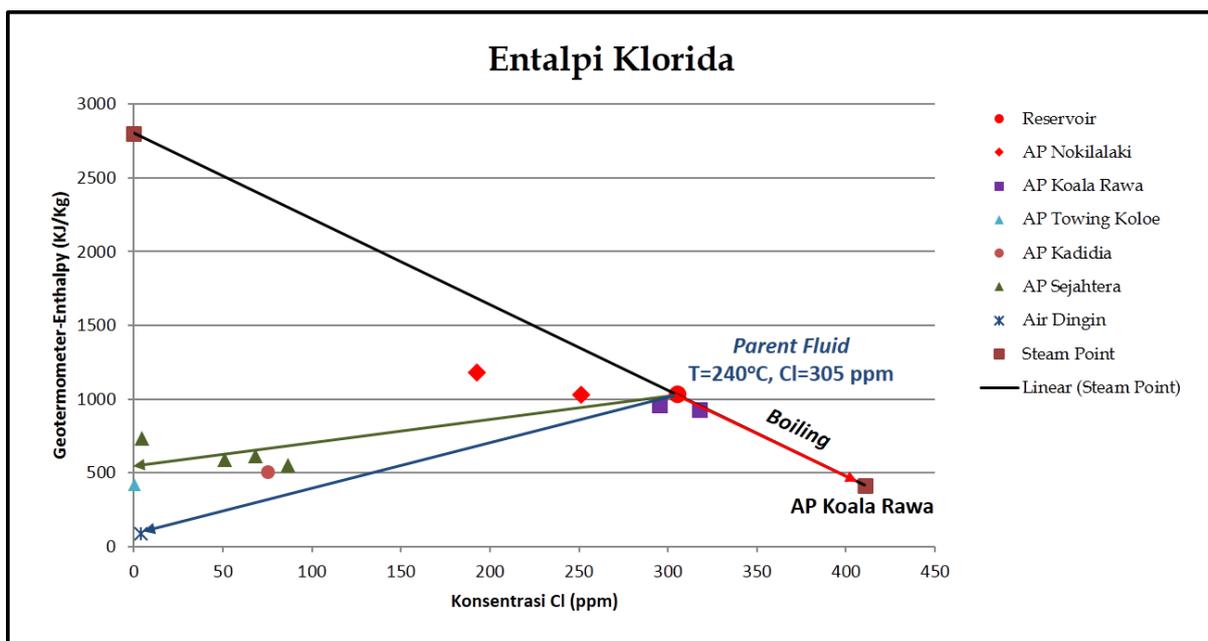
Berdasarkan hasil *plotting* entalpi klorida menunjukkan temperatur *parent fluid*

sebesar 240°C dengan konsentrasi klorida sebesar 305 ppm (Gambar 10), sehingga diperkirakan temperatur reservoir panas bumi Kadidia Selatan sebesar 240°C.

Pada daerah panas bumi Kadidia yang diperkirakan memiliki reservoir yang berbeda, memiliki temperatur reservoir yang lebih kecil dari daerah panas bumi Kadidia Selatan. Berdasarkan geotermometer Na-K, temperatur reservoir daerah Kadidia sebesar 130°C s.d 140°C.

Tabel 4. Hasil perhitungan geotermometer daerah Kadidia dan Kadidia Selatan

Parameter	KADIDIA						KADIDIA SELATAN				
	AP Sejahtera 1	AP Sejahtera 2	AP Sejahtera 3	AP Sejahtera 4	AP Bulili	AP Kadidia	AP Nokilalaki 1	AP Nokilalaki 2	AP Koala Rawa 1	AP Koala Rawa 2	AP Towing Koloe
Temp	51	62,8	57,8	57,4	40,4	81,6	80,5	90,4	96,6	98,8	40,2
pH	6,97	8,41	7,83	7,75	6,82	8,32	8,32	7,9	9,41	7,91	7,1
SiO ₂	54,94	58,34	57,85	42,39	42,81	65,37	296,4	195,84	270,83	275,51	47,82
Na	95,12	87,13	112,8	64,24	54,52	128,3	343,5	294,8	379,6	372,4	15,96
K	2,57	2,12	2,30	2,78	2,59	2,80	37	44,9	30,77	33,21	2,3
Ca	7,86	0,31	5,83	1,83	9,49	2,19	12,3	20,3	8,6	15	10,05
TSiO ₂ (cc)	106	109	109	94	95	115	209	179	202	203	100
TSiO ₂ (ac)	107	109	109	96	97	114	191	167	186	187	101
TNaK (G)	146	140	131	173	179	134	238	268	216	223	263
TNaK (F)	126	120	110	155	161	114	224	256	200	208	251
TNa-K-Ca	74	135	79	143	65	122	203	216	192	192	49



Gambar 10. Entalpi klorida daerah Kadidia dan Kadidia Selatan

Diskusi

Berdasarkan data geokimia fluida dan rekonstruksi struktur geologi, diperkirakan daerah panas bumi Kadidia dan Kadidia Selatan memiliki reservoir yang berbeda. Fluida dari masing-masing daerah

isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan δD menunjukkan bahwa isotop kedua daerah tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Daerah Kadidia Selatan memiliki komposisi isotop yang lebih berat dibandingkan komposisi isotop daerah Kadidia. Oleh karena itu, diperkirakan fluida reservoir dari kedua daerah tersebut berasal dari reservoir yang berbeda.

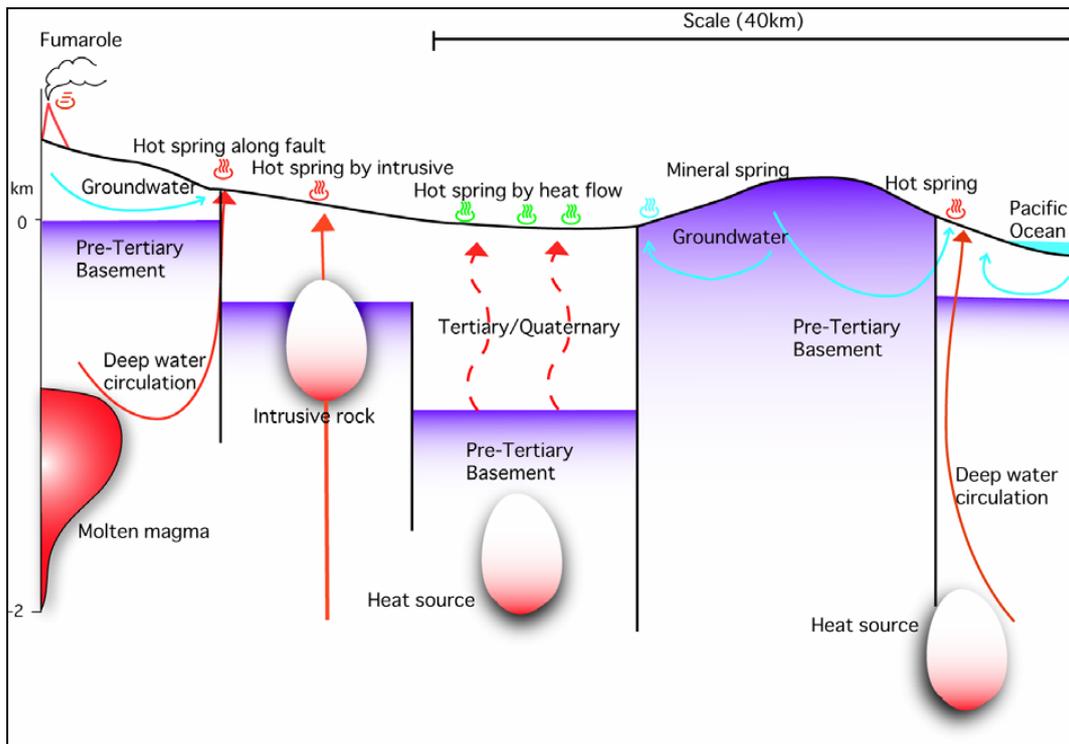
Data geologi menunjukkan sebaran litologi yang berbeda antara Kadidia dan Kadidia Selatan, sehingga dua daerah ini kemungkinan memiliki batuan reservoir yang berbeda. Selain itu konstruksi struktur geologi menguatkan bahwa daerah Kadidia dan Kadidia Selatan memiliki zona struktur yang berbeda pula meskipun berasal dari tegasan yang sama.

Komposisi gas juga menunjukkan adanya sedikit pengaruh fluida magmatik pada gas yang keluar pada tanah panas Koala Rawa. Hasil ini sejalan dengan data geologi yang memperkirakan adanya tubuh intrusi granit di kedalaman.

tersebut menunjukkan karakteristik kimia yang berbeda, seperti silika, klorida, bikarbonat, sulfat, dan daya hantar listrik. Unsur-unsur konservatif seperti Cl, B, dan Li memiliki rasio berbeda, begitu pula dengan hasil

Fluida panas daerah Kadidia diperkirakan terbentuk akibat sirkulasi dalam/*deep water circulation* dengan batuan panas di kedalaman, sedangkan fluida panas daerah Kadidia Selatan diperkirakan selain terbentuk akibat sirkulasi dalam juga terdapat pengaruh aktivitas tektonik aktif. Sebagai gambaran pada tahun 2012 terjadi aktifitas kegempaan di Danau Lindu yang merupakan daerah terdekat dengan posisi manifestasi di Kadidia Selatan, sehingga energi yang terlepas lebih mudah tertangkap pada batuan intrusif (jenis granitik) pada sistem panas bumi Kadidia Selatan.

Temperatur reservoir daerah Kadidia Selatan diperkirakan sebesar 240°C , sedangkan daerah Kadidia sebesar 140°C . Perkiraan kedalaman reservoir belum dapat ditentukan karena belum ada data geofisika, namun menurut Tamanyu dan Sakaguchi (2003) (**Gambar 11**), diperkirakan reservoir Kadidia Selatan yang berhubungan dengan batuan intrusi dan aktivitas tektonik terletak lebih dangkal dibandingkan reservoir Kadidia.



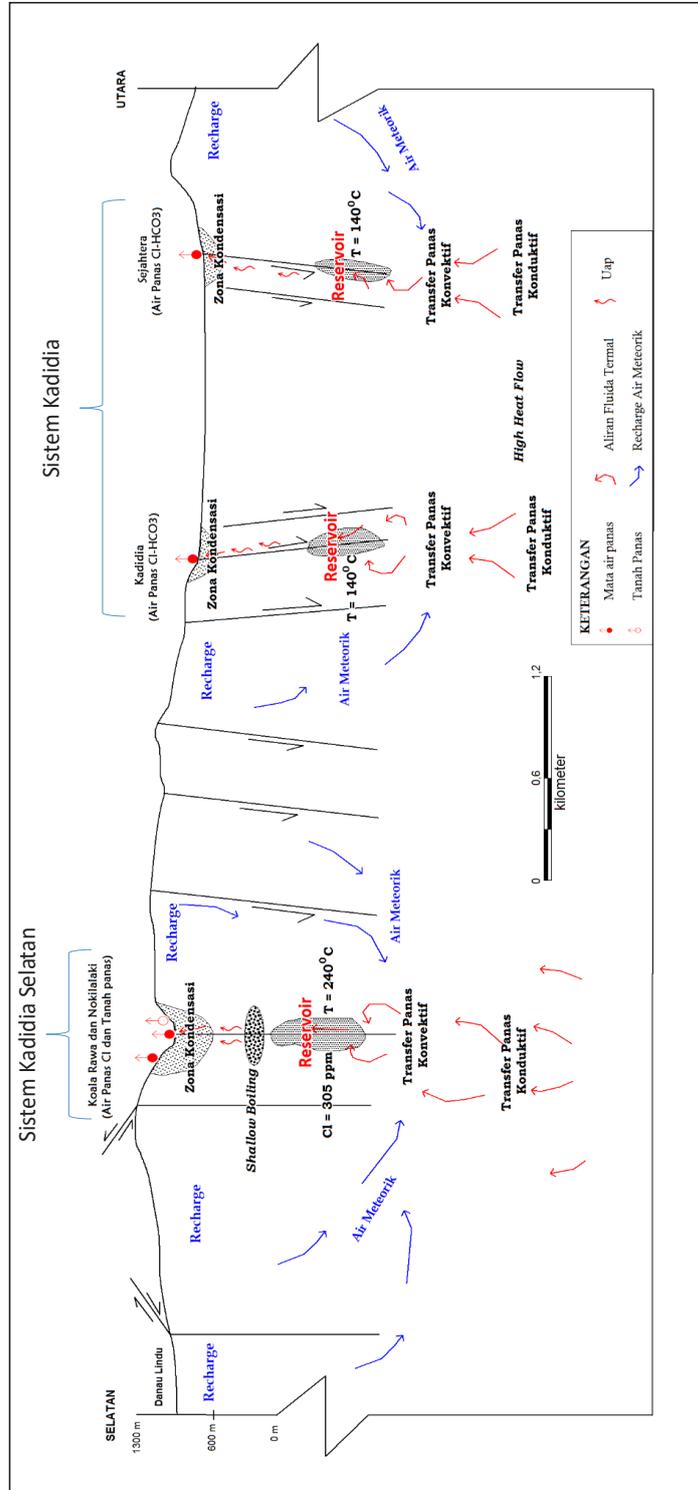
Gambar 11. Model konseptual sistem panas bumi nun-vulkanik
(Tamanyu dan Sakaguchi, 2003)

Pola aliran fluida ditunjukkan pada model geokimia daerah Kadidia dan Kadidia Selatan. Fluida panasbumi bertipe klorida (Cl) yang berasal dari reservoir akan mengalir ke atas sebagai *upflow* di daerah Kadidia Selatan. Di bagian lain di daerah penelitian, air Cl bercampur dengan air HCO₃, yang terbentuk di dekat permukaan karena proses *steam heating*, yaitu kondensasi uap air panas dengan air tanah. Sedangkan sisa uap air dapat muncul di permukaan sebagai tanah beruap (**Gambar 12**).

Karakteristik alterasi batuan di sekitar air panas Kadidia Selatan menunjukkan terdapat mineral-mineral yang terbentuk pada temperatur tinggi seperti epidot, illit, dan kaolinit. Sinter silika terbentuk di sekitar manifestasi Koala Rawa yang bertemperatur mendidih, sedangkan sinter travertin terbentuk semakin ke selatan kearah manifestasi air hangat. Sinter silika

dan travertin juga hadir bersamaan pada air panas Nokilalaki yang bertemperatur 80,5°C yang berlokasi di antara pemunculan sinter silika dan travertin. Pemunculan epidot, sinter silika dan travertin pada manifestasi Kadidia Selatan menunjukkan bahwa telah terjadi evolusi fluida pada sistem panas bumi tersebut. Evolusi fluida yang terjadi berupa pendinginan (*cooling*) atau pemanasan (*heating*) belum dapat ditentukan karena memerlukan studi lebih lanjut, seperti inklusi fluida.

Reservoir daerah panas bumi ini diperkirakan hanya berupa spot-spot kecil di sekitar area manifestasi yang merupakan zona lemah yang memiliki permeabilitas tinggi yang dapat menyebabkan pemunculan manifestasi di permukaan, sehingga daerah prospek panas bumi untuk daerah-daerah ini tidak terlalu besar.



Gambar 12. Pola aliran fluida sistem panas bumi daerah Kadidia dan Kadidia Selatan

KESIMPULAN

Studi geokimia air panas bumi dan geologi menunjukkan, bahwa air panas yang muncul di daerah panas bumi Kadidia dan Kadidia Selatan diperkirakan memiliki reservoir yang berbeda, dengan temperatur reservoir daerah Kadidia Selatan lebih tinggi dibandingkan daerah Kadidia. Temperatur reservoir daerah Kadidia Selatan diperkirakan sebesar 240°C, sedangkan daerah kadidia sebesar 140°C dengan kedalaman reservoir daerah Kadidia terletak lebih dalam dibandingkan daerah Kadidia Selatan.

Fluida panas bumi di daerah Kadidia Selatan diperkirakan berasal dari pengaruh intrusi granit yang terpanaskan kembali oleh aktivitas tektonisme. Sedangkan fluida panas bumi daerah Kadidia diperkirakan akibat sirkulasi air dalam yang keluar ke permukaan sebagai air panas melalui *horst* dari sistem depresi Kadidia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada rekan-rekan Kelompok Penyelidikan Panas Bumi yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi, tim editor yang telah memberikan koreksi dan saran dalam penyusunan makalah ini serta dewan redaksi atas kesempatan yang telah diberikan sehingga makalah ini dapat diterbitkan.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim, 2012. Survey Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Panas Bumi Kadidia, Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah, Badan Geologi, Bandung (*Unpublished report*).

Anonim, 2014. Survey Terpadu Geologi

dan Geokimia Daerah Panas Bumi Kadidia Selatan, Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah, Badan Geologi, Bandung (*Unpublished report*).

Fournier, R.O., 1981. Application of Water Geochemistry Geothermal Exploration and Reservoir Engineering, Geothermal System: Principles and Case Histories. John Willey & Sons. New York.

Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal Solute Equilibria Deviation of Na-K-Mg – Ca Geo- Indicators. *Geochemica Acta* 52. pp. 2749 – 2765.

Hamilton W., 1979. Tectonic of Indonesia Region, Geol.Surv.Prof.Papers,U.S.Govt .Print Off.,Washington.

Herdianita, N.R., dan Julinawati, T., 2007. Hidrogeokimia Air Panas bumi Daerah Cidanau dan Sekitarnya, Anyer, Provinsi Banten Berdasarkan Manifestasi Permukaannya. *Jurnal Geoplika*, Vol 2, No 3, hal. 105 – 119.

Hutchinson, C.S., 1989. Geological Evolution of South-East Asia, Oxford Mono. Geol. Geoph., 13, Clarendon Press, Oxford

Mahon K. and Ellis, A.J., 1977. Chemistry and Geothermal System. Academic Press Inc. Orlando

Marini, L., 2001. Geochemical Techniques for the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy, Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università Degli Studi di Genova, Italy.

Nicholson, K., 1993. Geothermal Fluids; Chemistry and Exploration Techniques, Springer-Verlag, Berlin.

Norman, D.I., and Moore, J.N., 1999. Methane and Excess N₂ and Ar in Geothermal Fluid Inclusions. Twenty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford

University, pp. 196-202.

Tamanyu, S. and Sakaguchi, K., 2003. Conceptual Model For Non-Volcanic Geothermal Resources., European Geothermal Conference.

Diterima	: 11 Juni 2015
Direvisi	: 27 Juli 2015
Disetujui	: 6 Agustus 2015