

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Geokimia

5.1.1. Hasil Penelitian Sampel Air dan Gas

Berdasarkan hasil pengambilan sampel air dan gas yang telah dilakukan oleh Tim Survey Geokimia Pusat Sumber Daya Geologi pada lokasi Gunung Arjuno-Welirang, maka didapatkan hasil analisis seperti pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hasil analisis contoh air
(Tim Survey Geokimia PSDG, 2010)

Lokasi	Tinggi	pH	t°C	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	B	SiO ₂	Li
APP I	893	6.3	55	259.53	61.8	149.5	82.36	282.3	203.2	1029.29	5.51	189.75	0.19
APP II	901	5.87	50	256.27	56.7	159.6	100.13	282.3	182.71	1135.81	5.1	173.28	0.17
AP. Coban	1348	6.44	39	188.28	39.5	114.2	77.86	211.7	160.49	815.58	2.89	141.4	0.12
AP. Cangar I	1611	5.93	41	108.87	29.5	75.6	67.66	63.5	77.36	719.18	2.52	115.3	0.1
AP. Cangar II	1604	6	48	77.57	19.86	55.7	32.35	25	62.55	454.82	2.04	116.59	0.1
AP. Pundak	1589	7.66	54	2.36	1.59	7.21	1.81	5	2	28.39	1.2	34.8	0

Tabel 4. Hasil analisis kimia gas manifestasi fumarol
(Tim Survey Geokimia PSDG, 2010)

Lokasi	CO ₂	H ₂ S	SO ₂	O ₂	Ar	N ₂
WF 02	107.8622	10.4629	0	0.2055	0.0614	0.7652
WF 05	100.394	12.7626	0	0.0264	0.015	0.8928
WF 03	3.4458	0.2442	0.0645	0	0	0.152
WF 06	2.869	0.24	0.18	0	0	0.116

5.1.2. Hasil dan Analisis Geoindikator

a. Geoindikator Cl-SO₄-HCO₃

Geoindikator Cl-SO₄-HCO₃ digunakan untuk menentukan karakteristik suatu reservoir. Data kimia yang diperlukan dalam penentuan tipe fluida reservoir adalah kandungan relatif dari klorida (Cl), bikarbonat (HCO₃) dan sulfat (SO₄). Pengolahan data dilakukan dengan menghitung persentase unsur Cl, HCO₃ dan SO₄ dengan menggunakan rumus perhitungan sebagai berikut:

$$S = C_{Cl} + C_{SO_4} + C_{HCO_3}$$

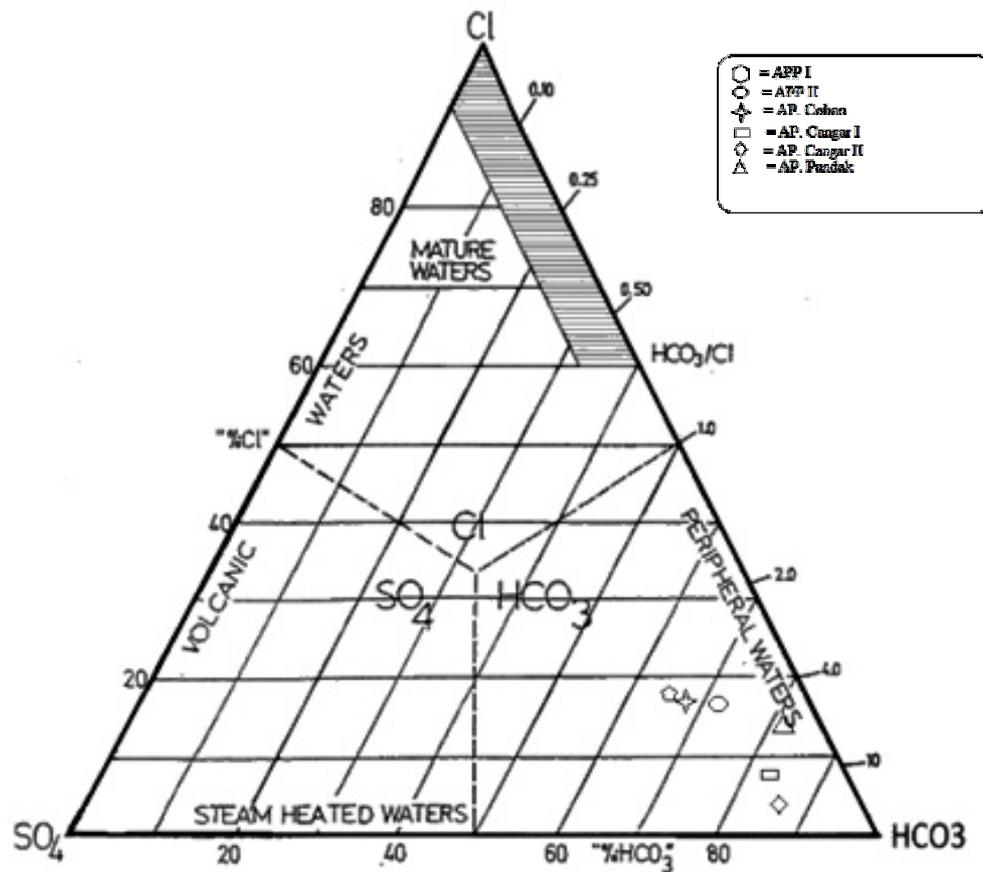
$$\% Cl = \frac{100 C_{Cl}}{S}$$

$$\% HCO_3 = \frac{100 C_{HCO_3}}{S} \dots\dots\dots(1)$$

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan 1 maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 5 kemudian dilakukan proses pengeplotan berdasarkan Tabel 5 pada diagram ternary geoindikator Cl-SO₄-HCO₃ seperti yang diperlihatkan pada Gambar 13.

Tabel 5. Presentase kandungan Cl dan HCO₃

No	Lokasi	Cl (%)	HCO ₃ (%)	HCO ₃ /Cl
1	APP I	18,63	67,94	3,64
2	APP II	17,63	70,95	4,02
3	AP. Coban	17,82	68,66	3,85
4	AP. Cangar I	7,38	83,61	11,32
5	AP. Cangar II	4,60	83,85	18,19
6	AP. Pundak	14,12	80,22	5,67



Gambar 13. Diagram ternary geoindikator Cl-SO₄-HCO₃

Berdasarkan diagram ternary Cl-SO₄-HCO₃ pada Gambar 13 untuk tipe fluida air panas yang terdapat pada daerah penelitian yaitu tipe fluida air panas bikarbonat. Hal ini dikarenakan dari hasil analisis kimia diketahui bahwa unsur HCO₃ (bikarbonat) merupakan unsur yang paling dominan (anion utama) dan mengandung gas CO₂. Pada sistem yang didominasi oleh batuan vulkanik, air HCO₃ umumnya terbentuk di daerah marginal dan dekat permukaan, dimana gas CO₂ bersama dengan uap air terkondensasi ke dalam air tanah, kondensasi uap tersebut dapat memanaskan air tanah atau terpanaskan oleh uap (*steam heated*) sehingga membentuk larutan HCO₃. Air HCO₃ terbentuk di bawah muka air tanah dan umumnya bersifat asam lemah, tetapi dengan hilangnya CO₂ terlarut, derajat

keasaman air ini dapat meningkat menjadi netral atau sedikit basa. Alterasi yang ditemukan umumnya argilic (kaoline, montmorilonit) dan mordinite.

b. Geoindikator Cl-Li-B

Diagram segitiga Cl-B digunakan untuk mengevaluasi proses pendidihan dan pengenceran berdasarkan perbandingan konsentrasi Cl/100 dan B/4 yang telah diubah dalam satuan persen. Geoindikator ini juga digunakan untuk memperkirakan batuan pada reservoir. Pengolahan data dilakukan dengan menghitung persentase unsur Cl, Li dan B dengan menggunakan rumus perhitungan sebagai berikut:

$$S = \frac{C_{Cl}}{100} + \frac{C_B}{4} + C_{Li}$$

$$\% Cl = \frac{100 \frac{C_{Cl}}{100}}{S}$$

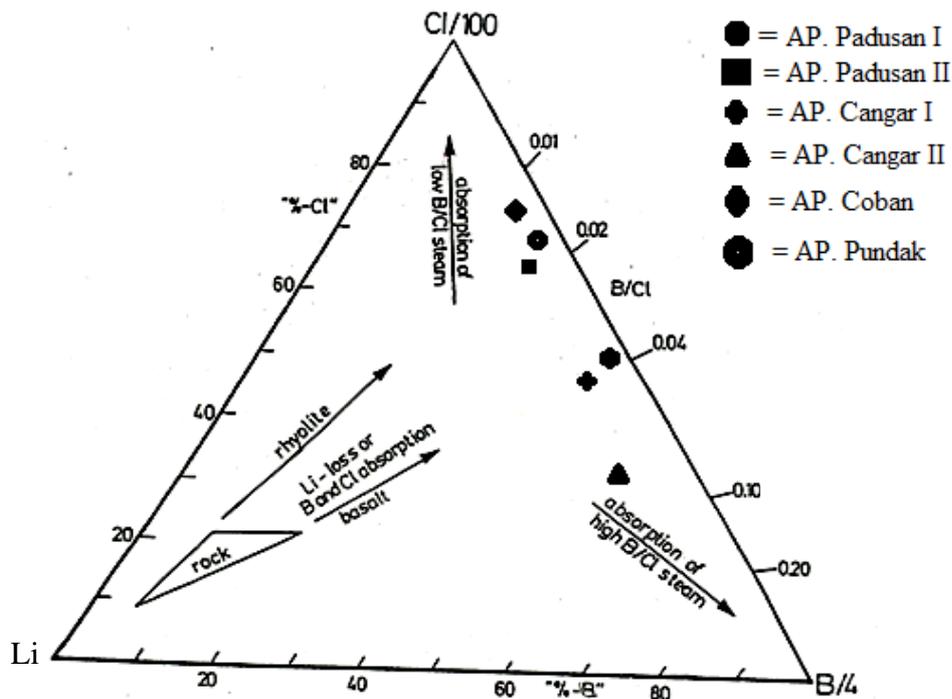
$$\% B = \frac{100 \frac{C_B}{4}}{S}$$

$$\% Li = \frac{100 C_{Li}}{S} \dots\dots\dots(2)$$

Tabel 6. Presentase kandungan Cl, Li dan B

No	Lokasi	Cl (%)	Li(%)	B(%)	C _{B/Cl}
1	APP I	64,2	0,06	31,37	0,0195
2	APP II	66,1	0,05	29,8	0,0180
3	AP. Coban	71,5	0,05	24,4	0,0136
4	AP. Cangar I	46,5	0,15	46,1	0,0396
5	AP. Cangar II	29	0,36	59,3	0,0816
6	AP. Pundak	50	0	50	0,24

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan 2 maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 6 kemudian dilakukan proses pengeplotan berdasarkan Tabel 6 pada diagram ternary geoindikator Cl/100-B/4 seperti yang diperlihatkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram ternary geoindikator Cl/100–Li-B/4

Berdasarkan kandungan unsure Cl, Li dan B pada Tabel 4 menunjukkan bahwa manifestasi mata air panas di daerah penelitian mengandung Cl yang relatif sangat tinggi dibandingkan dengan unsur Li dan B, hal ini menunjukkan bahwa air panas berasal dari vulkano-magmatik (Ninie dan Tri, 2007). Namun, berdasarkan hasil dari pengeplotan pada diagram ternary Cl/100–B/4 pada Gambar 14 dapat dilihat bahwa semua posisi mata air panas cenderung ke arah Cl–B, ada indikasi air panas berinteraksi dengan batuan sedimen yang kaya zat organik, hal ini disebabkan karena kandungan B/Cl sangat tinggi untuk Air Panas Cangar II. Untuk hasil titik pengeplotan pada diagram dapat dijelaskan sebagai

berikut pada Air Panas Coban, Air Panas Padusan I, Air Panas Padusan II berada pada bagian atas kanan yang berdekatan dengan titik pengeplotan menuju kearah sudut Cl/100, hal ini menunjukkan proses penyerapan gas magmatik dengan rasio B/Cl rendah. Hasil pengeplotan pada titik manifestasi Air Panas Cangar dan Air Panas Pundak berada pada bagian tengah sudut Cl dan sudut B/4, hal ini menunjukkan bahwa terjadinya proses penyerapan gas magmatic dengan rasio B/Cl seimbang dengan komponen batuan basalt. Pada titik manifestasi Air Panas Cangar berada pada bagian bawah kanan segitiga yang berdekatan dengan sisi *absorption of high B/Cl*, hal ini menunjukkan bahwa terjadinya proses penyerapan gas magmatik dengan rasio B/Cl tinggi dengan komponen batuan basalt.

Untuk pola aliran air panas dan proses bawah permukaan berdasarkan hasil pengeplotan pada Gambar 14 menunjukkan bahwa air panas pada lokasi penelitian dan sekitarnya mempunyai nilai perbandingan B/Cl, Li/Cl dan Li/B yang sangat rendah. Hal ini menandakan bahwa air panas di daerah penelitian umumnya merupakan aliran ke samping atau *outflow* (Ninie dan Tri, 2007) .

c. Geoindikator Na-K-Mg

Diagram segitiga dari Na/1000 - K/100 ditunjukan oleh Giggenbach (1988) merupakan sebuah metode yang digunakan untuk pendugaan temperatur reservoir dan untuk mengetahui air yang mencapai keseimbangan dalam litologi.

$$S = \frac{C_{Na}}{1000} + \frac{C_K}{100} + C_{\sqrt{Mg}}$$

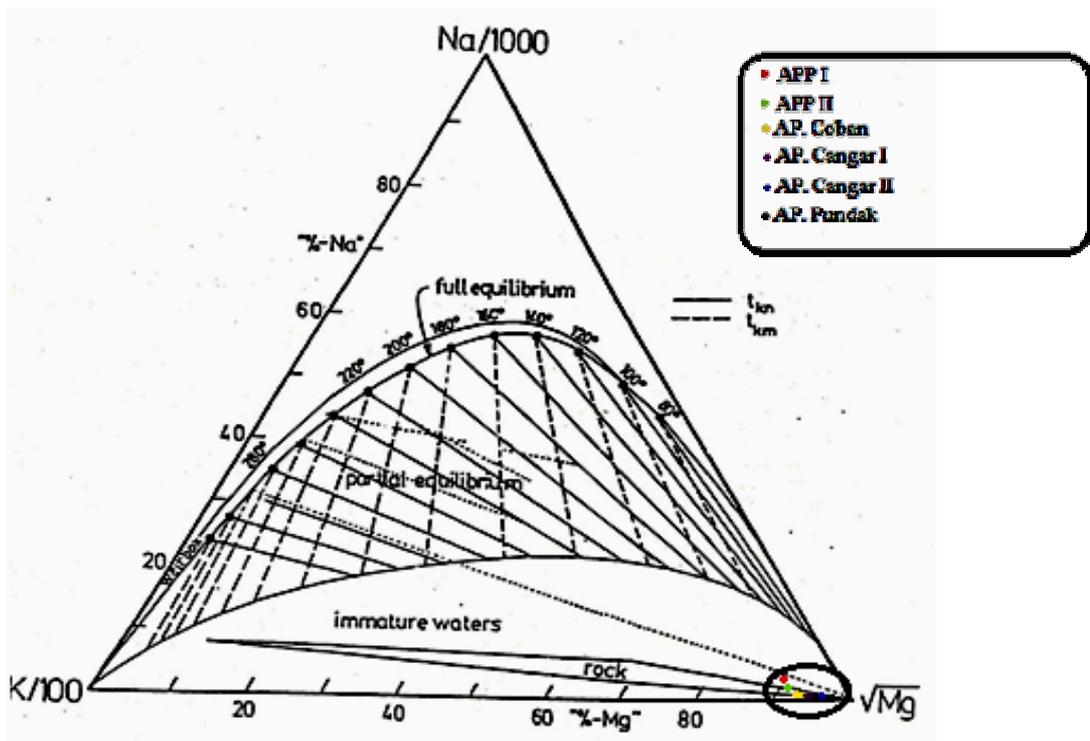
$$\% Na = \frac{100 \frac{C_{Na}}{1000}}{S}$$

$$\% \text{ Mg} = \frac{100 C \sqrt{\text{Mg}}}{S} \dots\dots\dots(3)$$

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3 maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 7 kemudian dilakukan proses pengeplotan berdasarkan Tabel 7 pada diagram ternary geoindikator Na-K-Mg seperti yang diperlihatkan pada Gambar 15.

Tabel 7. Presentase kandungan Na dan Mg

No	Lokasi	Na (%)	Mg(%)
1	APP I	2,6	91,17
2	APP II	2,36	92,3
3	AP. Coban	2	93,5
4	AP. Cangar I	1,26	95,31
5	AP. Cangar II	1,3	95,3
6	AP. Pundak	0,17	98,6



Gambar 15. Diagram ternary geoindikator Na-K-Mg

Relatif tingginya kandungan Mg dibanding kandungan K dan Na seperti terlihat pada Gambar 15 menunjukkan bahwa air panas di daerah penelitian dipengaruhi oleh pelarutan dengan air tanah (Nicholson, 1993). Hal ini didukung dengan nilai Cl dan rasio Na/K yang rendah. Pengaruh air tanah dan permukaan sebenarnya terlihat dari tipe air panas yang kebanyakan berupa air HCO₃.

Berdasarkan hasil perhitungan kandungan relatif $\text{Na}/1000 - \text{K}/100 - \sqrt{\text{Mg}}$ pada Tabel 7 serta setelah dilakukan pengeplotan pada diagram ternary geoindikator Na–K–Mg pada Gambar 15 maka semua mata air panas terletak pada *immature water*. Kondisi *immature water* ini menunjukkan bahwa adanya pengaruh air permukaan (*metoric water*) yang tercampur dengan fluida panas pada pembentukan mata air panas. Selain itu air panas dipengaruhi interaksi antara fluida dengan batuan dalam keadaan panas.

d. Geoindikator N₂–CO₂–Ar

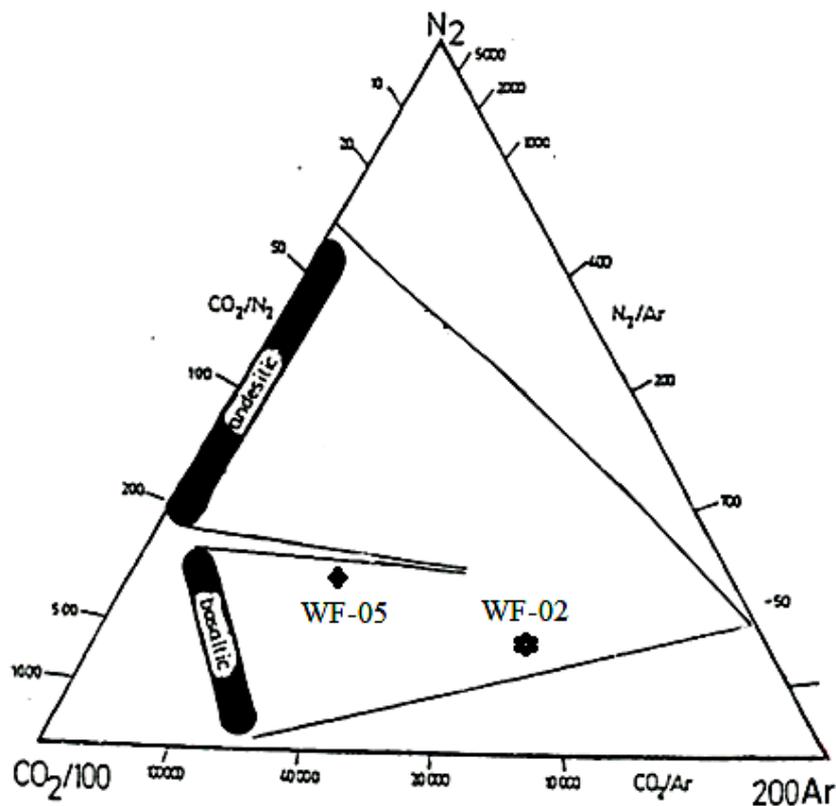
Diagram segitiga dari N₂–CO₂–Ar tunjukan oleh Giggenbach (1988) merupakan sebuah metode yang digunakan untuk pendugaan tipe batuan pada reservoir. Perhitungan menggunakan rumus dibawah ini:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 / \text{Ar} &= {}^c\text{CO}_2 / {}^c\text{Ar} \\ \text{N}_2 / \text{Ar} &= {}^c\text{N}_2 / {}^c\text{Ar} \\ \text{CO}_2 / \text{N}_2 &= {}^c\text{CO}_2 / {}^c\text{N}_2 \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan 4 maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 8 kemudian dilakukan proses pengeplotan pada diagram ternary geoindikator CO₂/N₂, N₂/Ar dan CO₂/Ar seperti yang diperlihatkan pada Gambar 16.

Tabel 8. Nilai CO_2/N_2 , N_2/Ar dan CO_2/Ar

No	Lokasi	CO_2/N_2	N_2/Ar	CO_2/Ar
1	WF-02	140,95	12,46	17567,1
2	WF-05	112,44	59,63	66929,3
3	WF-03	22,66	0	0
4	WF-06	24,73	0	0

Gambar 16. Diagram ternary geoindikator CO_2/N_2 , N_2/Ar dan CO_2/Ar

Berdasarkan diagram ternary pada Gambar 16 dapat dilihat bahwa manifestasi WF-02 dan WF-08 termasuk kedalam zona basalt, hal ini dikarenakan konsentrasi unsur CO_2 relatif lebih tinggi. Tipe batuan reservoir berdasarkan hasil plotting pada diagram ternary adalah batuan basalt.

Dari hasil analisis menggunakan geoindikator maka untuk lokasi penelitian di daerah ini dapat disimpulkan bahwa mata air panas bersifat air bikarbonat dengan konsentrasi HCO_3 yang signifikan dan pH mendekati netral (Gambar 13). Fluida bikarbonat biasanya terbentuk di daerah marginal reservoir geotermal dan pada kedalaman yang dangkal dimana gas CO_2 bersama dengan uap air terkondensasi ke dalam air tanah, kondensasi uap tersebut dapat memanaskan air tanah atau terpanaskan oleh uap (*steam heated*). Dari kandungan unsur Cl, Li dan B pada Tabel 4 menunjukkan bahwa air panas di daerah penelitian mengandung Cl yang relatif sangat tinggi dibandingkan dengan unsur Li dan B, hal ini menunjukkan bahwa air panas berasal dari vulkano-magmatik. Sebelum fluida sampai ke permukaan sebagai mata air panas, kemungkinan fluida berinteraksi dengan batuan sedimen dimana dari hasil geoindikator Cl-Li-B nilai kandungan B/Cl sangat tinggi untuk Air Panas Cangar II. Untuk pola aliran air panas dan proses bawah permukaan menunjukkan bahwa air panas pada lokasi penelitian dan sekitarnya mempunyai nilai perbandingan B/Cl, Li/Cl dan Li/B yang sangat rendah. Hal ini menandakan bahwa air panas di daerah penelitian umumnya merupakan aliran ke samping (*lateral flow* atau *outflow*). Untuk pendugaan suhu reservoir dengan menggunakan geoindikator Na-K-Mg tidak dapat digunakan, hal ini dikarenakan relatif tingginya kandungan Mg dibanding kandungan K dan Na seperti terlihat pada Gambar 15 menunjukkan bahwa air panas di daerah penelitian dipengaruhi oleh pelarutan dengan air tanah (Nicholson, 1993). Hal ini didukung dengan nilai Cl dan rasio Na/K yang rendah. Pengaruh air tanah dan permukaan sebenarnya terlihat dari tipe air panas yang kebanyakan berupa air

HCO₃. Untuk pendugaan batuan penyusun reservoir berdasarkan geoindikator maka daerah *outflow* ini diduga batuan penyusun reservoir adalah batuan basalt.

5.1.3 Hasil dan Analisis Geotermometer Air

Perkiraan temperatur reservoir panasbumi dapat dilakukan dengan menganalisis data geokimia dari analisis kimia air pada semua manifestasi mata air panas di daerah penelitian.

a. Pendugaan temperatur menggunakan data SiO₂

$$\begin{array}{l} \text{Quartz-no steam loss} \quad t^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5,19-\log \text{SiO}_2} - 273 \quad t = 50 - 250^{\circ}\text{C} \\ \\ \text{Quartz-max steam loss} \quad t^{\circ}\text{C} = \frac{1522}{5,75-\log \text{SiO}_2} - 273 \quad t = 100 - 250^{\circ}\text{C} \\ \\ \text{Chalcedony} \quad t^{\circ}\text{C} = \frac{1032}{4,69-\log \text{SiO}_2} - 273 \quad t = 50 - 250^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots(5) \end{array}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan Persamaan 5 yang terdapat pada Tabel 9 dengan menggunakan data SiO₂ yang meliputi perhitungan *max-steam loss*, *no-steam loss* serta *chalcedony* didapatkan hasil yaitu untuk *no-steam loss* memiliki temperatur yaitu sekitar 87°C s.d 175° dimana untuk hasil dari persamaan *no-steam loss* ini mewakili kondisi kelarutan silica yang di kontrol semata-mata oleh pendinginan konduktif yang dialami fluida yang naik kepermukaan dan baik digunakan untuk mata air panas pada kondisi *sub-boiling*. Untuk hasil persamaan *max-steam loss* memiliki temperatur yaitu sekitar 89°C s.d 164°C dimana hasil ini diterapkan untuk fluida yang mengalami kehilangan uap karena boiling yang

meyebabkan meningkatnya kandungan silica pada fluida sisadan baik digunakan untuk discharge sumur dan boiling spring yang berasosiasi dengan endapan silica sinter . Untuk *chalcedony* memiliki temperatur yaitu sekitar 55°C s.d 153°C dimana hasil ini digunakan untuk memperkirakan temperature suatu sumber air (reservoir) di bawah permukaan bila air permukaan jenuh (Yoga, 2011).

Dalam hal ini, hasil yang didapat dari perhitungan menggunakan Persamaan 5 didapatkan nilai suhu >150°C. dimana pendugaan dengan geotermometer SiO₂ ini baik digunakan untuk suhu reservoir >150°C dan untuk suhu <150°C kandungan silica dikontrol oleh kalsedon (Simmons, 1998).

Tabel 9. Temperatur SiO₂

No	Lokasi	No Steam Loss	Max Steam Loss	Chalcedony
1.	APP I	175°C	164°C	153°C
2.	APP II	169°C	159°C	147°C
3.	AP. Coban	158°C	150°C	133°C
4.	AP. Cangar I	145°C	139°C	119°C
5.	AP. Cangar II	145°C	139°C	119°C
6.	AD. Pundak	87°C	89°C	55°C

b. Pendugaan temperatur menggunakan data Na–K–Ca

Kisaran temperatur yang bagus untuk digunakan geotermometer Na–K–Ca adalah 120°C s.d 200°C, selebihnya tidak terlalu bagus. Geotermometer ini bagus apabila diterapkan untuk air yang memiliki konsentrasi Ca tinggi. Untuk mendapatkan

nilai temperatur Na–K–Ca maka dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$T^{\circ}\text{C} = [1647 / (\log (Na/K) + \beta (\log (\sqrt{Ca/Na}) + 2,06) + 2,47)] - 273,15 \dots(6)$$

Berdasarkan Persamaan 6 maka didapatkan nilai temperatur Na–K–Ca sebagai berikut:

Tabel 10. Temperatur Na–K–Ca ($\beta=4/3$)

No	Lokasi	T ^o C
1.	APP I	140 ^o C
2.	APP II	138 ^o C
3.	AP. Coban	117 ^o C
4.	AP. Cangar I	115 ^o C
5.	AP. Cangar II	99,6 ^o C
6.	AD. Pundak	29,2 ^o C

Berdasarkan perhitungan temperatur Na–K–Ca dengan menggunakan $\beta=4/3$ maka didapatkan nilai temperatur untuk keempat mata air panas >100^oC sedangkan dua mata air panas nilai temperatur <100^oC maka hasilnya tidak dapat diterima. Untuk itu dilakukan perhitungan ulang dengan menggunakan $\beta=1/3$ dan didapatkan hasil sebagai pada Tabel 11

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 11 maka didapatkan temperatur semua mata air panas yaitu berkisar antara 209^oC s.d 224^oC. dari hasil tersebut maka pendugaan dengan menggunakan geotermometer Na–K–Ca tidak terlalu bagus karena untuk geotermometer ini baik digunakan pada kisaran temperatur yaitu

120°C s.d 200°C dan selebihnya tidak terlalu bagus meskipun nilai dari analisis contoh air dg konsentrasi Ca yang tinggi. Berdasarkan hasil yang di dapat maka geotermometer ini tidak terlalu bagus untuk penentuan suhu reservoir karena hasil suhu yang didapat yaitu >200°C meskipun nilai konsentrasi Ca pada penelitian tinggi.

Tabel 11. Temperatur Na–K–Ca ($\beta=1/3$)

No	Lokasi	T°C
1.	APP I	224°C
2.	APP II	220°C
3.	AP. Coban	209°C
4.	AP. Cangar I	221°C
5.	AP. Cangar II	211°C
6.	AD. Pundak	220°C

c. Pendugaan temperatur menggunakan data Na–K

Geotermometer Na-K dapat diterapkan untuk reservoir air klorida dengan $T > 180^\circ\text{C}$. Namun, geotermometer ini kurang bagus apabila diaplikasikan untuk $T < 100^\circ\text{C}$ (Simmons, 1998). Untuk menentukan temperatur bawah permukaan menggunakan geotermometer dengan kandungan Na-K dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Na-K (Fourier)} \quad t^\circ\text{C} = \frac{1217}{(\log \text{Na/K}) + 1,483} - 273 \quad t > 180^\circ\text{C}$$

$$\text{Na-K (Giggenbach)} \quad t^\circ\text{C} = \frac{1390}{(\log \text{Na/K}) + 1,75} - 273 \quad t > 120^\circ\text{C} \dots \dots \dots (7)$$

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan 7 maka didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 12. Temperatur Na–K (Fourier)

No	Lokasi	T°C
1.	APP I	313°C
2.	APP II	306°C
3.	AP. Coban	301°C
4.	AP. Cangar I	329°C
5.	AP. Cangar II	321°C
6.	AD. Pundak	450°C

Tabel 13. Temperatur Na–K(Giggenbach)

No	Lokasi	T°C
1.	APP I	306°C
2.	APP II	298°C
3.	AP. Coban	292°C
4.	AP. Cangar I	323°C
5.	AP. Cangar II	314°C
6.	AD. Pundak	463°C

Berdasarkan perhitungan temperatur dengan menggunakan dua persamaan maka didapatkan hasil temperatur yang tinggi yaitu 300°C s.d 450°C untuk Persamaan Fournier dan 292°C s.d 463°C untuk Persamaan Giggenbach. Geotermometer ini tidak sesuai apabila air mengandung Ca yang tinggi. Dari hasil analisis contoh air kandungan Ca tinggi maka geotermometer ini tidak dapat digunakan untuk pendugaan suhu reservoir.

d. Geotermometer K-Mg

Geotermometer ini diterapkan pada situasi di mana Na terlarut dan Ca belum disetimbangkan antara cairan dan batuan. Untuk menentukan temperatur bawah permukaan menggunakan geotermometer dengan kandungan Na-K dapat menggunakan persamaan berikut:

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{14.0 + \text{Log}(K^2/\text{Mg})} - 273 \dots\dots\dots(8)$$

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan 8 maka didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 14. Temperatur K–Mg

No	Lokasi	T°C
1.	APP I	85°C
2.	APP II	80°C
3.	AP. Coban	74°C
4.	AP. Cangar I	69°C
5.	AP. Cangar II	68°C
6.	AD. Pundak	45°C

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 14 maka didapatkan temperatur dengan menggunakan pendugaan temperatur K-Mg (Giggenbach, 1988) maka semua mata air panas yaitu berkisar antara 45°C s.d 85°C. Untuk geotermometer ini baik digunakan bila *re-equilibrium* berlangsung cepat pada temperatur rendah. Geotermometer K-Mg umumnya digunakan bersamaan dengan geotermometer Na-K yaitu dengan menggunakan diagram segitiga Na-K-Mg seperti terlihat pada Gambar 7. Meskipun demikian, aplikasi geotermometer Na-K dan K-Mg secara bersamaan terkadang menghasilkan temperatur kesetimbangan yang berbeda. Hal ini dapat terjadi karena perbedaan kecepatan *re-equilibrium* kedua reaksi terhadap lingkungan saat air muncul ke permukaan, sehingga dapat digunakan untuk mengetahui sejarah termal fluida. Respon reaksi K-Mg jauh lebih cepat, sehingga menunjukkan temperatur yang lebih rendah. Dari hasil yang terdapat pada Tabel 14 temperatur lebih rendah dibandingkan dengan geotermometer Na-K, hal ini

dikarenakan respon reaksi K-Mg jauh lebih cepat dibandingkan dengan reaksi Na-K.

5.1.4 Hasil dan Analisis Geotermometer Gas

Pada Fumarol Gunung Arjuno-Welirang tercium bau gas H₂S sangat menyengat, dan suara desis yang kuat. Gas-gas yang terdeteksi adalah CO₂, H₂S, SO₂, O₂, Ar, dan N₂ yang dinyatakan dalam konsentrasi % mol. Dengan konsentrasi didominasi oleh kandungan gas CO₂, H₂S, SO₂ dibandingkan gas-gas lainnya yang relatif sangat kecil. Adanya gas H₂S dan SO₂ ,mengindikasikan daerah tersebut berada pada lingkungan vulkanik. Sementara gas N₂ dimungkinkan dari degradasi materi organik pada kerak bumi yang berinteraksi dengan magma (Tim Survey Geologi dan Geokimia, 2010).

Berdasarkan perhitungan geotermometri gas CO₂ dan H₂S mengacu kepada Giggenbach (1980) melalui persamaan $\text{Log CO}_2 = 37,43 + 73192/T - 11829 \times 10^3/T^2 + 0,18923T - 86,187 \text{ Log } T$ diperoleh temperature sebesar 260°C s.d 263°C.

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan beberapa geotermometer air dan geotermometer gas, maka dapat disimpulkan bahwa untuk pendugaan suhu reservoir di daerah *outflow* ini kemungkinan dapat menggunakan pendugaan geotermometer air yaitu geotermometer SiO₂ Quartz *No-Steam Loss*, dengan asumsi bahwa kandungan silica mengalami pendinginan secara konduktif (*conductive cooling*) yang dialami fluida yang naik ke permukaan. Untuk suhu reservoir di daerah *outflow* ini kemungkinan berkisar antara 145°C s.d 175°C.

5.1.5 Hasil dan Pembahasan Keseimbangan Ion (*Ion Balance*)

Tabel 15. Hasil keseimbangan ion

Lokasi	Anion	Kation	D (%)
APP I	29.06	27.11	3.48
APP II	30.38	28.80	2.67
AP. Coban	22.68	21.30	3.13
AP. Cangar I	15.19	14.83	1.20
AP. Cangar II	9.46	9.32	0.74
AD. Pundak	0.65	0.65	-0.31

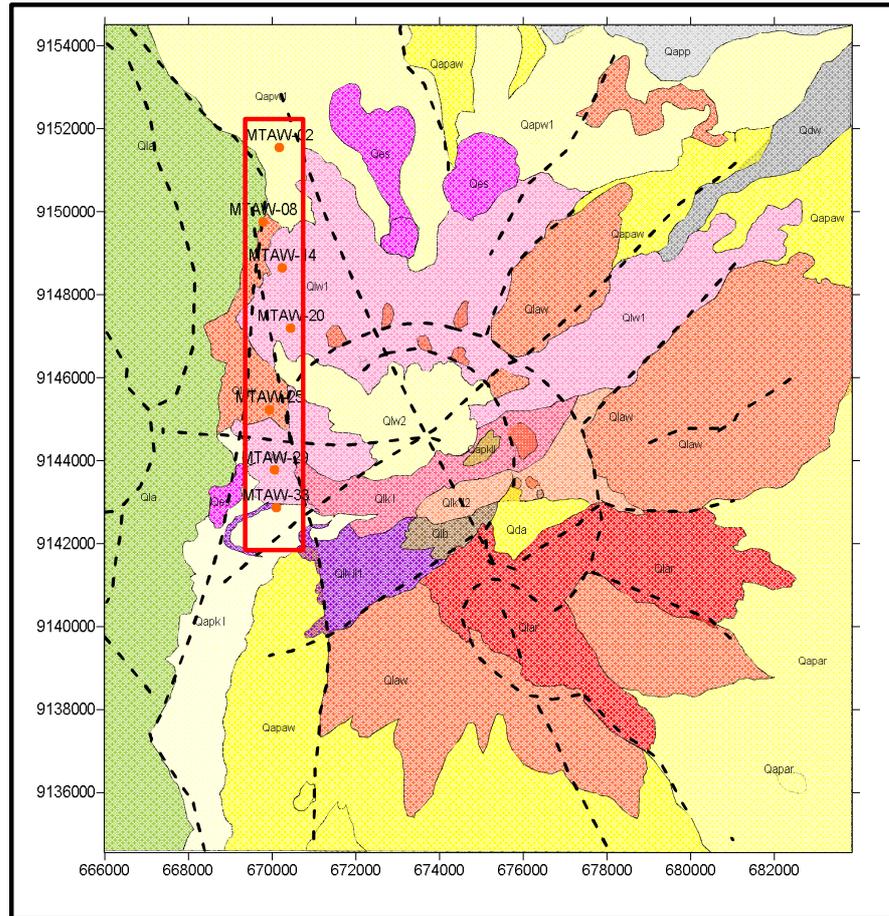
Berdasarkan hasil analisis keseimbangan ion yang terdapat pada Tabel 15 mengindikasikan bahwa kualitas reservoir pada manifestasi air panas termasuk kedalam kualitas yang baik, hal ini didasarkan dari hasil *ion balance* < 5%.

5.2 MAGNETOTELLURIK

5.2.1 Geologi Daerah Penelitian

Secara administratif Gunung Arjuno-Welirang termasuk kedalam wilayah Kabupaten Malang, Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Pasuruan, Provinsi Jawa Timur. Penelitian ini terdiri dari 7 titik pengukuran yaitu titik MTAW-02, MTAW-08, MTAW-14, MTAW-20, MTAW-25, MTAW-29 dan MTAW-33.

Berdasarkan hasil plot titik pengukuran dengan peta geologi (Gambar 17) maka daerah penelitian ini terletak pada litologi batuan sebagai berikut:



Gambar 17. Peta geologi dan titik pengukuran MT

a. Aliran Piroklastik Welirang I (Qapw I)

Aliran piroklastik ini berwarna abu-abu tua kecoklatan, keras, menyudut dengan komponen lava andesit – basaltis berukuran bongkah – lapili yang tertanam pada matrik tuf berukuran sedang berwarna kecoklatan.

b. Lava Tua Arjuno-Welirang (Qltaw)

Karakteristik batuan berupa lava andesit basaltis dengan tekstur porfiritik, keras dan tebalnya >1000 m. Mineral penyusun didominasi oleh mineral mafik (piroksen) dan plagioklas

c. Lava Welirang I (Qlw I)

Karakteristik batuan berupa lava basalt berwarna abu-abu kehitaman, porfiritik,

masif, terdiri dari mineral plagioklas, piroksen, olivin dan mineral sekunder berupa mineral lempung dan oksida besi.

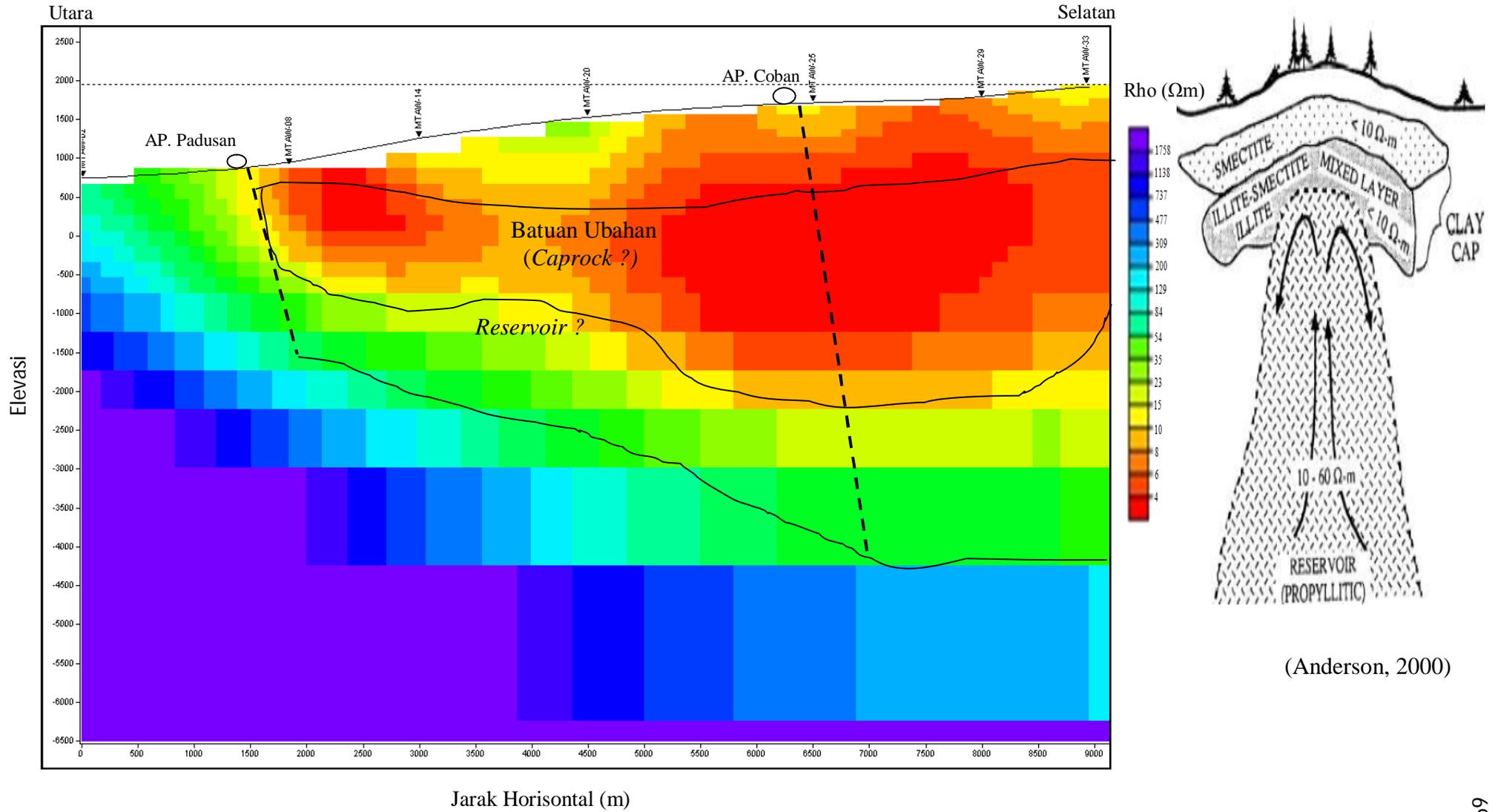
d. Aliran Piroklastik Kembar I (Qapk I)

Aliran piroklastik berwarna coklat dengan komponen lava berukuran lapili – bom, matrik berupa abu vulkanik berwarna kehitaman. Air panas Cangar muncul melalui rongga dan rekahan dari satuan ini.

e. Lava Arjuno (Qla)

Batuan berkomposisi lava basalt, berwarna abu-abu kehitaman, afanitik – porfiritik.

5.2.2 Hasil Penelitian dan Pembahasan



Gambar 18. Penampang resistivitas bawah permukaan

Penelitian ini dilakukan di Daerah gunung Arjuno-Welirang dengan tujuh titik pengukuran. Pengukuran metode magnetotellurik secara umum berupa hasil sounding yang memperlihatkan hubungan antara sinyal frekuensi dengan resistivitas semu. Dalam pengolahan data pada tahap MT-Editor terlihat adanya penampang dengan kurva resistivitas (ρ_{xy} dan ρ_{yx}). Dua kurva tersebut berasal dari nilai impedansi (Z_{xy} dan Z_{yx}). Dalam pemodelan respon Magnetotellurik, medan elektromagnetik gelombang bidang yang digunakan adalah medan polarisasi medan listrik (Transfer Elektrik/TE) dan medan polarisasi medan magnet (Transfer Magnetik/TM). Sehingga kurva yang digunakan adalah nilai resistivitas dari Transfer Elektrik (TE) dan Transfer Magnetik (TM) yaitu (ρ_{xy} dan ρ_{yx}). Adapun nilai kedua resistivitas tersebut terkadang berbeda pada setiap frekuensi, hal ini disebabkan oleh perbedaan fase gelombang. Resistivitas yang digunakan untuk mendapatkan penampang struktur bawah permukaan adalah nilai resistivitas hasil invarian. Invarian diartikan sebagai peralatan komponen utama tensor impedansi. Dengan kata lain nilai resistivitas dalam penampang struktur bawah permukaan seperti pada Gambar 18 adalah nilai rata-rata dari kurva resistivitas (ρ_{xy} dan ρ_{yx}) dalam tahap pengolahan MT editor.

Dari sudut pandang geologi, sumber energi panasbumi berasal dari magma yang berada di dalam bumi. Magma tersebut menghantarkan panas secara konduktif pada batuan disekitarnya. Panas tersebut juga mengakibatkan aliran konveksi fluida hydrothermal di dalam pori-pori batuan, kemudian fluida hydrothermal ini akan bergerak keatas namun tidak sampai kepermukaan karena tertahan oleh lapisan batuan yang *impermeable*. Lokasi tempat terakumulasinya fluida

hydrothermal disebut reservoir. Berdasarkan ini semua maka secara umum sistem panasbumi terdiri atas batuan penutup (*caprock*), reservoir, fluida dan sumber panas (*heat source*).

Pada sistem panasbumi di daerah vulkanik, batuan yang terubahkan (*caprock*) umumnya memberikan respon nilai tahanan jenis rendah, sedangkan batuan yang berfungsi sebagai reservoir memberikan respon nilai tahanan jenis lebih tinggi dibandingkan batuan penudung (Johnston, J.M., et.al., 1992). Pada lokasi penelitian terdapat zona alterasi hydrothermal atau ubahan. Alterasi hydrothermal ini terjadi karena adanya perbedaan antara mineral primer dengan keadaan lingkungan yang baru. Selain perubahan mineralogi penyusun batuan, alterasi hidrotermal juga akan merubah sifat kimia dan fisik batuan (misal: densitas, sifat magnetik, dan resisitivitas batuan).

Berdasarkan hasil pemodelan 2D pada Gambar 18 dengan dan kondisi geologi daerah panasbumi Gunung Arjuno-Welirang, maka nilai tahanan jenis batuan (Anderson et al. 2000) hasil pemodelan 2D MT dapat ditafsirkan sebagai berikut: lapisan batuan dengan nilai resistivitas (sekitar $\leq \pm 10$ Ohm.m) mempunyai pola melengkung dimana sisinya lebih tebal dibandingkan bagian tengahnya (warna orange-merah) yang berasosiasi dengan lapisan batuan berupa lava basal yang terdiri dari mineral lempung sekunder hasil ubahan (*alteration*) akibat interaksi fluida dengan batuan yang dilewati. Mineral lempung sekunder yang membentuk lapisan penudung pada lokasi penelitian ini adalah mineral *montmorilonit* yang diakibatkan oleh pengaruh fluida panas pada daerah ubahan sekitar Gunung Pundak, sehingga diduga lapisan ini merupakan *caprock* (batuan penutup) yang

impermeable. Daerah *impermeable* ini juga dipengaruhi oleh sesar berarah baratlaut – tenggara yaitu Sesar Kemiri dan mengontrol munculnya manifestasi mata Air Panas Padusan.

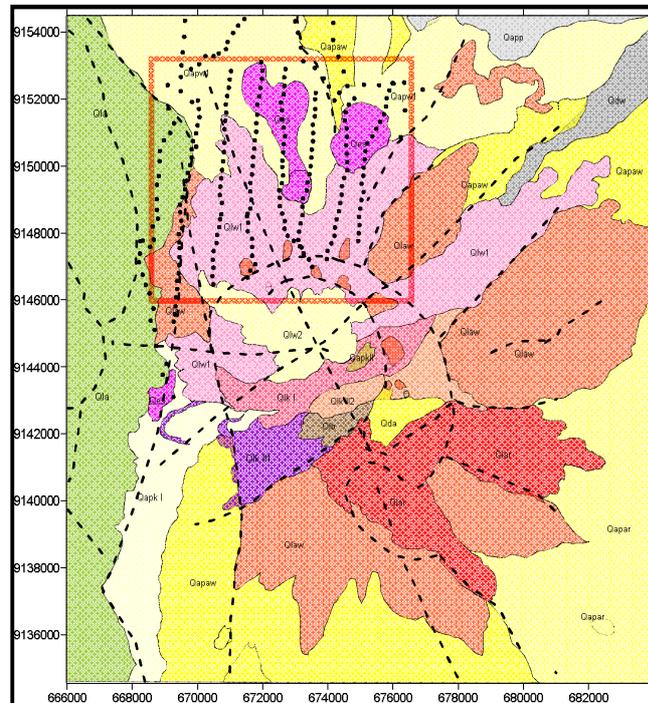
Penutup sistem panasbumi ini memiliki resistivitas yang rendah karena diakibatkan kehadiran beberapa mineral hasil alterasi hidrotermal terutama mineral lempung sekunder. Batuan penutup mempunyai arti yang sangat penting dalam sistem panasbumi karena batuan penutup ini akan mencegah akumulasi air panas atau uap panas yang terbentuk merembes kepermukaan dengan cepat sehingga batuan penutup harus batuan yang kedap air. Batuan penutup ini merupakan suatu zona konduktif.

Lapisan batuan dengan nilai resistivitas antara ± 10 s.d 60 Ohm.m (warna kuning sampai hijau) kemungkinan berasosiasi dengan batuan lava andesit-basaltis pada bagian selatan, dimana untuk litologi ini merupakan produk dari tubuh lava tua kompleks Gunung Arjuno-Welirang yang tersebar di bagian barat s.d selatan yang berumur kuartar awal. Untuk pembentukan reservoir pada daerah ini dipengaruhi oleh manifestasi Air Panas Padusan, dimana kandungan konsentrasi Cl tinggi pada hasil analisis kimia air sehingga diindikasikan adanya hubungan langsung dengan reservoir dan zona *permeable*.

Dari hasil pemodelan terlihat adanya dua sesar yang terjadi pada daerah ini yaitu Sesar Kemiri dan Sesar Puncung. Sesar Puncung ini pola kemenerusan manifestasi Air Panas Coban . Untuk mata Air Panas Coban muncul akibat produk dari kompleks Gunung Arjuno-Welirang tua yaitu lava andesit pada bagian barat s.d selatan.

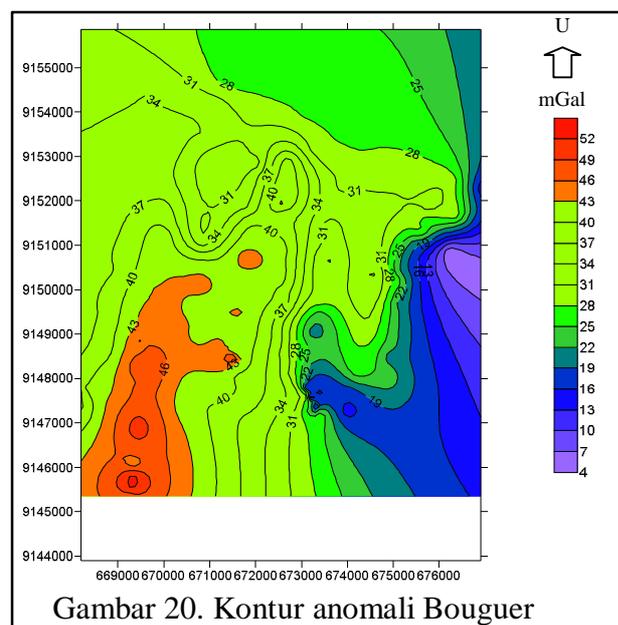
5.3. Gravity

Titik pengukuran gravity yang digunakan dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19. Titik pengukuran gravity

5.3.1 Hasil dan Analisis Anomali Bouguer Lengkap



Gambar 20. Kontur anomali Bouguer

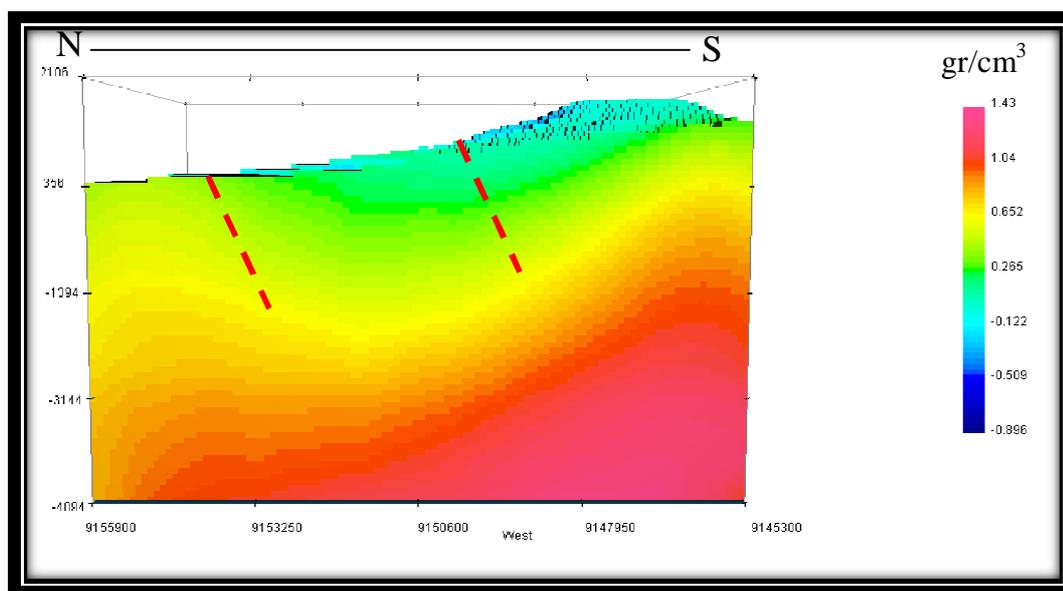
Anomali Bouguer Lengkap untuk densitas $2,67 \text{ gr/cm}^3$ daerah panasbumi Gunung Arjuno-Welirang diperlihatkan seperti pada Gambar 20.

Variasi nilai Anomali Bouguer ditandai dengan variasi warna, dimana setiap warna mempunyai nilai anomali tertentu. Variasi nilai Anomali Bouguer bervariasi dari 4 s.d 52 mGal dengan skala warna ungu hingga merah. Nilai anomali Bouguer dominan di bagian tengah ke arah barat dengan nilai anomali yang cukup lebar sekitar 28 s.d 40 mGal, sedangkan pada sisi utara anomali relatif lebih rendah dan sama dengan rentang nilai 25 s.d 28 mGal. Di bagian timur, anomali cenderung menurun sampai dengan $<25 \text{ mGal}$ dan terjadi perubahan nilai yang cukup kontras. Anomali tertinggi terjadi di bagian selatan ($>43 \text{ mGal}$).

Sebaran anomali Bouguer ini relatif merefleksikan struktur geologi batuan permukaan yang didominasi oleh lava andesit produk kompleks Gunungapi Arjuno-Welirang. Anomali relatif rendah di utara (25 s.d 28 mGal) diduga berkaitan dengan aliran piroklastik yang berasal dari kompleks Gunung Arjuno-Welirang (Q_{apw} dan Q_{apaw}). Dibagian selatan dengan anomaly tinggi yaitu $>43 \text{ mGal}$ mungkin disebabkan produk Gunung Anjasmoro yang berada di sisi barat yang berkomposisi lava andesit-basaltis dan lava tua Arjuno-Welirang yang tersebar dibagian barat hingga selatan dengan komposisi lava andesit-basaltis. Pada anomali tinggi ini terdapat mata Air Panas Coban. Untuk anomaly tinggi ini jg sedikit dipengaruhi oleh Lava Welirang dengan komposisi mineral lempung Untuk anomali 28 s.d 40 mGal diduga berkaitan dengan Lava Welirang I yang tersebar di bagian tengah ke arah utara dengan komposisi lava basal.

5.3.2. Hasil dan Analisis Pemodelan Inversi 3D

Interpretasi kuantitatif dalam penelitian ini dilakukan dengan pemodelan inversi 3D anomali Bouguer lengkap. Pemodelan 3D pada peta topografi merupakan proses pembuatan model distribusi densitas bawah permukaan dengan menampilkan *surface* topografinya, sehingga model lebih mendekati keadaan sebenarnya. Hasil inversi 3D berupa model distribusi densitas bawah permukaan dengan menampilkan harga densitas pada model 3D berdasarkan anomali Bouguer lengkap yang ditunjukkan dengan kontras warna dari rendah ke tinggi ditunjukkan dengan *spectrum* warna merah sampai biru (seperti diperlihatkan pada Gambar 21).



Gambar 21. Hasil model inversi 3D gravity

Dari model distribusi densitas bawah permukaan dapat dilihat bahwa struktur geologi bawah permukaan terdapat adanya pola lapisan (Gambar 21) yang ditandai dengan perubahan warna antara merah, hijau dan biru yang mengindikasikan peralihan batuan. Lapisan pertama (berwarna merah) yang memiliki densitas

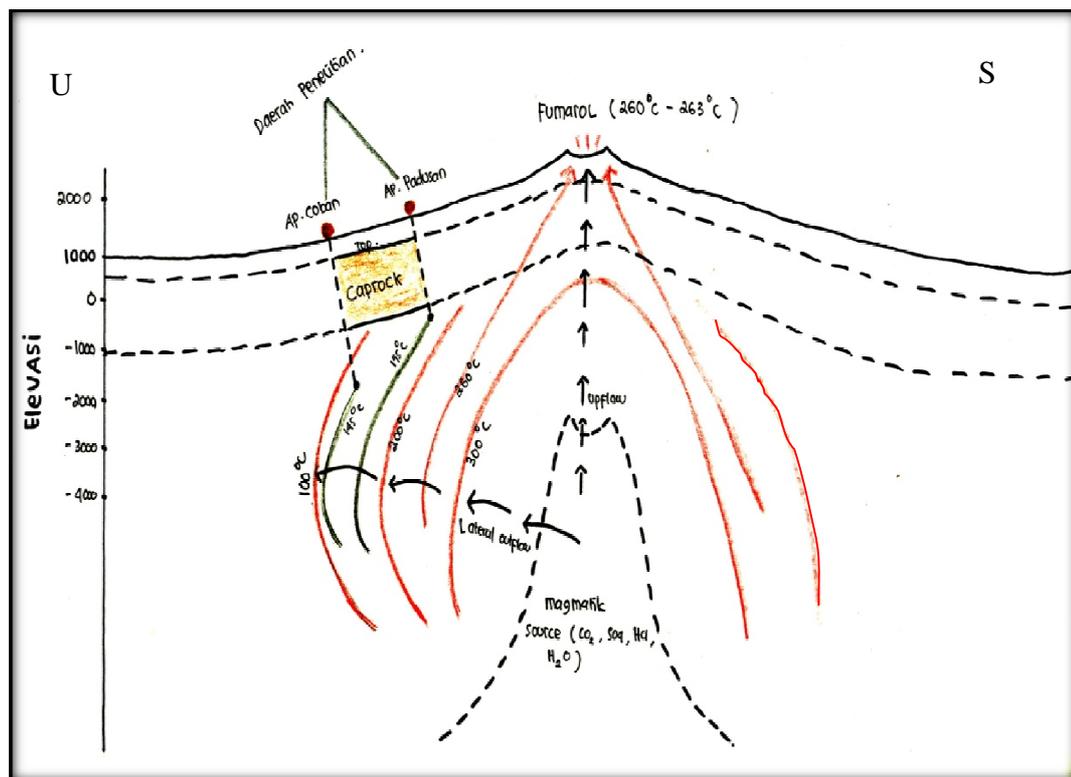
tinggi, lapisan kedua (berwarna hijau) memiliki densitas sedang dan lapisan ketiga (berwarna biru) memiliki densitas kecil dengan lapisan yang tipis.

Berdasarkan Gambar 21 dan mengacu pada nilai resistivitas dari hasil pemodelan 2D magnetotellurik maka nilai densitas *caprock* yaitu $1,49 \text{ gr/cm}^3$ s.d $2,4 \text{ gr/cm}^3$ berada pada kedalaman 900 m sampai dengan 2100 m DBMTS dengan tipe material yaitu lempung (*clay*) dan *reservoir* berada pada densitas $2,4 \text{ gr/cm}^3$ s.d $3,0 \text{ gr/cm}^3$ berada pada kedalaman sekitar $\geq 1,5 \text{ km}$ DBMTS dengan tipe batuan material yaitu lava basaltis.

Dari hasil analisis sifat fisis berdasarkan nilai resistivitas dan nilai densitas serta hasil pendugaan suhu reservoir dan jenis fluida maka dapat dibuat model konsep sistem panasbumi daerah topografi tinggi seperti diperlihatkan pada Gambar 22.

Berdasarkan Gambar 22 Model reservoir panasbumi daerah *outflow* Gunung Arjuno-Welirang maka arah aliran fluida hidrotermal yaitu air bikarbonat mengalir ke arah samping (arah Utara) dimana pada sistem ini masih dipengaruhi oleh air permukaan yang terkondensasi dan terbentuk di daerah marginal atau dekat permukaan. Untuk suhu reservoir pada daerah *outflow* ini yaitu berkisar antara 145°C s.d 175°C dengan batuan penyusun yaitu lava andesit-basaltis produk dari tubuh lava tua kompleks Gunung Arjuno-Welirang yang tersebar di bagian Barat – Selatan yang berumur kuarter awal dan nilai resistivitas berkisar ± 10 s.d 60 Ohm.m serta nilai densitas $2,4 \text{ gr/cm}^3$ s.d $3,0 \text{ gr/cm}^3$. Diatas lapisan reservoir terdapat lapisan penudung (*caprock*) yang *impermeabel* dengan nilai resistivitas sekitar $\leq \pm 10 \text{ Ohm.m}$ serta nilai densitas sekitar $1,49 \text{ gr/cm}^3$ s.d $2,4 \text{ gr/cm}^3$ dengan litologi lempung. Untuk daerah *outflow* ini dikontrol oleh 2 sesar

yaitu Sesar Puncung (Utara – Selatan) dan Sesar Klaket (Baratlaut – Tenggara). Untuk Sesar Puncung mengontrol munculnya Air Panas Padusan serta berpengaruh pada pembentukan zona *impermeable* sedangkan Sesar Klaket merupakan pola kelurusan dari Air Panas Coban dan Cangar. Untuk mata Air Panas Coban muncul akibat produk dari kompleks Gunung Arjuno-Welirang tua yaitu lava andesit pada bagian Barat sampai ke Selatan. Untuk daerah alterasi berada pada lapisan bawah dari manifestasi fumarol yang berada di Gunung Welirang dan zona *permeable* (reservoir) berada pada litologi Lava Tua Arjuno-Welirang. Untuk sumber panas (*heat source*) pada lokasi Gunung Arjuno-Welirang ini kemungkinan berada pada arah barat menuju arah timur.



Gambar 22 Model sistem panasbumi daerah *outflow* Gunung Arjuno-Welirang