
DELINEASI ZONA PROSPEK SISTEM PANASBUMI DAERAH 'P' MENGUNAKAN PEMODELAN MULTI DIMENSI DATA MAGNETOTELURIK TERINTEGRASI DATA GEOLOGI DAN GEOKIMIA

PUJI SUHARMANTO

Teknik Industri, FTIK, Universitas Indraprasta PGRI

YUNUS DAUD

Program Magister Eksplorasi Geothermal, FMIPA, Universitas Indonesia

AHMAD ZARKASYI

KP Panas Bumi, Pusat Sumber Daya Geologi, Kementerian ESDM

Email: harmansuharmanto@gmail.com

Abstrak. Telah dilakukan penelitian guna mendelineasi zona prospek sistem panasbumi Daerah 'P' menggunakan pemodelan multi dimensi data magnetotelurik terintegrasi data geologi dan geokimia. Daerah panasbumi 'P' secara fisiografi termasuk pada Busur Banda Dalam tak bergunungapi disusun oleh kompleks batuan malihan sekis berumur Perm-Trias. Gejala adanya sistem panasbumi pada daerah penelitian ditandai dengan kemunculan manifestasi permukaan berupa enam mata air panas bersuhu (37-67°C), pH (6-7) dan bertipe klorida-bikarbonat. Pembentukan sistem panasbumi diduga berkaitan dengan aktivitas tektonik kuat akibat tumbukan lempeng Pulau Seram dengan Lempeng Benua Australia (Plate Collision) yang memicu pembentukan batuan intrusi di kedalaman sebagai sumber panas. Guna mengetahui informasi subsurface daerah penelitian, dilakukan survei magnetotelurik. Selanjutnya hasil dari data MT akan diintegrasikan data geologi dan geokimia. Pengolahan data MT dimulai dari time-series data hingga mendapatkan kurva resistivitas-frekuensi dan fase, lalu dilakukan filtering noise, rotasi arah strike dan koreksi static shift untuk mendapatkan kualitas kurva MT baik. Selanjutnya dilakukan pemodelan inversi 1D, 2D dan 3D. Temperatur reservoir diduga sekitar 160-180°C termasuk temperatur sedang. Hasil penelitian ini memperlihatkan lapisan konduktif (<15 Ωm) dengan ketebalan ± 500-1000 m diindikasikan sebagai Clay Cap dari sistem panasbumi. Zona resistivitas tinggi (>300 Ωm) dan berbentuk updome, berada di bawah area kemunculan manifestasi (MAP1, MAP2, MAP3, MAP4, dan MAP5) mengindikasikan heat source berada di utara kemudian menerus ke arah tenggara membentuk updome. Model konseptual terpadu sistem panasbumi dibentuk dari integrasi data geologi, geokimia, dan geofisika. Sistem panasbumi daerah penelitian merupakan hidrotermal heat sweep plate collision dengan temperatur sedang, luas area prospek dan rekomendasi titik pemboran diperkirakan ± 3 km² di sekitar zona Upflow

Kata Kunci: Zona Prospek. Sistem Panasbumi, Metode Magnetotelurik, Potensi, Pemodelan Multi Dimensi

Abstract. A study for delineating geothermal system of prospect area "P" has been done by using multi-dimensional modeling of magnetotelluric data. Physiographically, geothermal prospect of "P" area is located at non-volcanic Banda inner arc hosted by Malihan Sekis rock complex with Perm-Trias age. The existence of geothermal system in this area is indicated by the presence of thermal manifestations in form of 6 chloride-bicarbonate hot springs with temperature in the range of 37-67°C, and pH of 6-7. The development of geothermal system is most probably associated with strong tectonic activity caused by the collision between Seram island plate and Australian plate that ignite the occurrence of intrusive body as heat source. In order to know the subsurface information of prospect area, magnetotelluric (MT) survey has been done. The processing of MT data was started from time-series data, continued by noise filtering, rotation of

strike orientation and static shift correction to obtain better MT curve. The data were then being inversed by means of 1-Dimensional, 2-Dimensional and 3-Dimensional inversion methods. Reservoir temperature is estimated to be around 160-180 °C and classified as moderate temperature. The result of MT data inversions shows the presence of conductive layer (<15 Ωm) with 500-1000 m thickness that is interpreted as clay cap of geothermal system. High resistivity zone (>300 Ωm) with up dome shape appears underneath the manifestations occurrence (MAP1, MAP2, MAP4, and MAP5), indicating that the heat source is located in northern part and elongate to southeast direction. The conceptual model of geothermal system was built based on integrated interpretation of geological, geochemical and geophysical data. The prospect area and recommendation of drilling location is estimated to be ± 3 km² around upflow zone.

Keywords: Prospect zone, geothermal system, magnetotelluric method, multi-dimension modeling

PENDAHULUAN

Pengembangan energi panas bumi di Indonesia dan dunia saat ini masih mengalami beberapa kendala vital. Salah satunya yaitu rendahnya DSR (Drilling Success Ratio) sumur panas bumi sehingga mengakibatkan tingginya resiko kerugian investasi pada pengembangan panas bumi. Hal inilah yang menyebabkan pengembangan panas bumi khususnya di Indonesia berjalan lambat meskipun potensi panas bumi Indonesia sangat besar yaitu sekitar 40 % potensi panas bumi dunia, lebih kurang 29 GWe.

Biaya pemboran sumur panas bumi berkisar antara 2-5 kali lebih tinggi (sekitar \$ 5-8 juta) daripada sumur migas dengan kedalaman yang sama. Berdasarkan hal tersebut, keberhasilan pada tahapan eksplorasi panas bumi sangatlah penting guna memprediksi dan merekomendasi titik pemboran dengan tepat dan akurat sehingga dapat mengurangi tingkat kegagalan pemboran dan resiko kerugian. Kriteria target pemboran adalah area yang memiliki temperatur dan permeabilitas yang tinggi, untuk itu diperlukan eksplorasi panas bumi terpadu terdiri dari survei 3G (Geologi, Geokimia, dan Geofisika) dalam menghasilkan konseptual model terpadu akurat dalam menentukan target titik pemboran. Terdapat beberapa metode geofisika yang biasa digunakan dalam eksplorasi panas bumi, salah satunya adalah metode magnetotelurik.

Metode magnetotelurik merupakan metode yang paling sering digunakan dalam eksplorasi panas bumi. Metode magnetotelurik (MT) adalah salah satu metode geofisika elektromagnetik pasif dengan memanfaatkan variasi medan magnet bumi sebagai sumbernya. Variasi medan magnet bumi ini disebabkan karena beberapa faktor seperti solar wind dan lightning. Variasi medan magnet bumi ini dapat menghasilkan gelombang elektromagnetik dengan rentang frekuensi yang sangat lebar yaitu antara 10-5-104 Hz (Grandis, 2010).

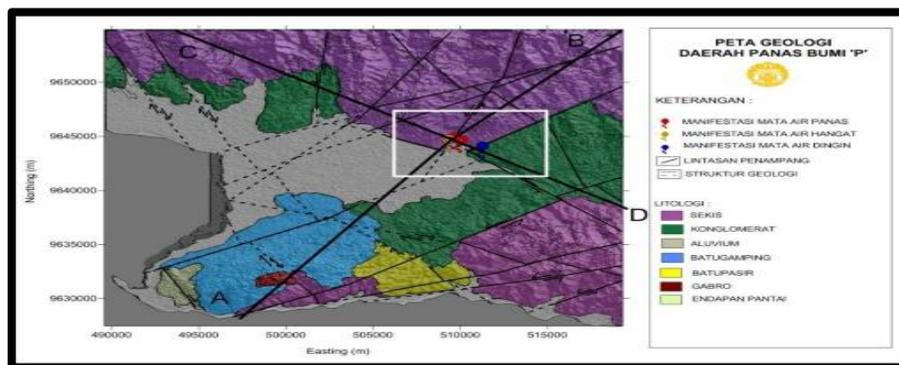
Delineasi sistem panas bumi berdasarkan nilai resistivitas batuan bawah permukaan diperoleh dari melakukan pengolahan data magnetotelurik kemudian diproses dengan membuat pemodelan inversi Mutli dimensi 1D, 2D dan 3D data magnetotelurik seperti yang dijelaskan pada kasus Glass Mountain (Cumming and Mackie, 2010). Untuk penyelidikan panas bumi di daerah tersebut dilakukan pemodelan 1D, 2D, dan 3D serta analisis clay dari pemodelan 1D dan 3D. Dalam paper tersebut dijelaskan bahwa pemodelan inversi 1D dapat memberikan gambaran kasar mengenai penyebaran resistivitas bawah permukaan namun dengan batasan tepi yang masih belum akurat dan sempurna. Dalam paper tersebut dijelaskan pula bahwa pemodelan inversi 3D akan dapat membantu interpretasi sistem panas bumi menjadi lebih baik dalam hal menampilkan penyebaran resistivitas batuan bawah permukaan. Hal ini dikarenakan dengan inversi 3D kita akan memperoleh informasi mengenai ketebalan Clay Cap pada daerah tersebut. Dari seluruh penjelasan di atas terlihat bahwa pengintegrasian hasil inversi 1D, 2D, dan 3D merupakan langkah yang dapat dilakukan guna memperoleh informasi yang lebih akurat mengenai penyebaran resistivitas bawah permukaan. Pemodelan tersebut dimaksudkan guna mengekstraksi informasi yang terkandung dalam data untuk memperkirakan distribusi resistivitas bawah permukaan

(Grandis, 2010). Kemampuan dari inversi 3D dalam menggambarkan struktur resistivitas dengan resolusi yang tinggi menjadi modal penting dalam perkembangan metode MT ke depannya karena keterbatasan dari inversi 2D yang seringkali tidak dapat menjelaskan bagian penting yang ada dalam data lapangan dengan kondisi geologi yang kompleks (Siripunvaraporn et al., 2003). Oleh karena itu, dalam upaya meningkatkan Drilling Success Ratio (DSR), meningkatkan pemahaman mengenai inversi multi dimensi dalam metode MT dan untuk mendelineasi zona prospek sistem panasbumi di daerah penelitian maka penulis melakukan penelitian mengenai pemodelan inversi multi dimensi sistem panasbumi. Model sistem panasbumi terpadu yang diperoleh akan digunakan sebagai pertimbangan utama dalam menentukan rekomendasi area target pemboran. Tujuan dari penelitian ini 1) Memahami alur pengolahan data metode magnetotelurik dengan menggunakan Software Synch Time series Viewer untuk inspeksi good Time series data, SSMT 2000 untuk Robust Proceasing dan Transformasi Fourier, MT Editor untuk seleksi Cross Power, Static Shifter-X untuk koreksi efek static shift, WinGlink untuk inversi 1D dan 2D serta MT3Dinv-X untuk membuat simulasi model inversi 3D MT. 2) Interpretasi model konseptual terpadu sistem panasbumi pada daerah penelitian untuk memperoleh informasi karakteristik sistem panasbumi dan kemudian digunakan sebagai bahan untuk merekomendasi titik pemboran.

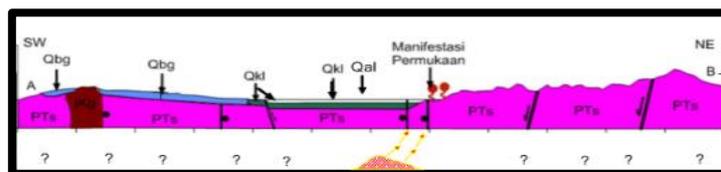
Litologi, Stratigrafi, dan Struktur Geologi

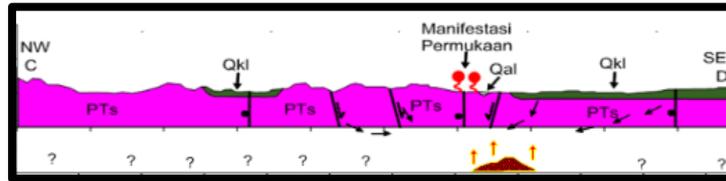
Litologi batuan yang menyusun daerah ini terdiri dari batuan malihan, batuan beku, batuan sedimen, dan endapan permukaan. Urutan satuan batuan atau stratigrafi dari tua ke muda (Gambar 1) adalah satuan sekis (PTs), gabro (Jkg), batupasir (TQp), batugamping (Qbg), konglomerat (Qkl), endapan pantai (Qep), dan aluvium (Qal).

Dari Gambar 2 dapat dilihat peta geologi daerah panasbumi 'P'. Satuan batuan sekis (PTs) dapat di jumpai di bagian utara, selatan, dan bagian timur daerah penyelidikan. Dimana satuan batuan sekis yang ada di daerah penyelidikan terdiri dari jenis sekis biotit, sekis mika, dan sekis kuarsa. Satuan batuan sekis ini merupakan batuan malihan yang berasal dari perselingan antara batupasir dengan batu lempung, dan dilihat dari peta geologi regional lembar Ambon dan Masohi, batuan ini merupakan batuan malihan bagian dari Formasi 'P' yang berumur Perm-Trias.



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian (PSDG, 2013 dimodifikasi oleh penulis)

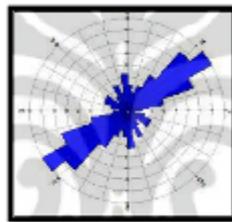




Gambar 2. Penampang Geologi Lintasan A-B & C-D Daerah Penelitian (PSDG, 2013 dimodifikasi oleh penulis)

Berikut struktur-struktur berupa sesar yang berkembang di daerah penyelidikan:

- Struktur sesar berarah baratlaut-tenggara, yang dominan berjenis sesar mendatar menganan (*dextral*). Struktur sesar mendatar menganan ini diperkirakan merupakan struktur sesar paling tua yang terbentuk yang mengakibatkan pergeseran pada litologi yang telah terbentuk sebelumnya.
- Sesar berarah baratdaya-timurlaut yang memiliki pergerakan mengiri (sesar mendatar sinistral) yang ikut mempengaruhi kemunculan mata air panas 'P'. Diperkirakan terbentuknya sesar ini memiliki periode berbeda dengan sesar-sesar berarah baratlaut-tenggara lainnya.
- Struktur sesar berarah baratdaya-timurlaut, yang terdiri dari sesar mendatar dan sesar obliq. Sesar mendatar ini pada umumnya mempunyai pergerakan mengiri (sesar mendatar sinistral). Sedangkan sesar obliq yang terbentuk berjenis sesar normal mendatar yang memiliki pergerakan mengiri.



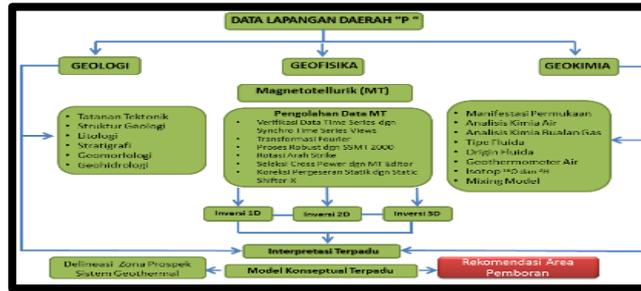
Gambar 3. Diagram Rosset Analisis Struktur Geologi Dominan (PSDG, 2011)

Manifestasi Permukaan

Tabel 1. Karakteristik Manifestasi Permukaan Daerah Penelitian (PSDG, 2013 dimodifikasi oleh penulis)

No.	MAP	T MAP (C)	T Udara (C)	pH	DHL (uS/cm)	debit lt/s
1	AP. P-1	66,8-67	27,8	7,01	8740	0,4
2	AP. P-2	65,4-65,8	29	6,86	8110	2
3	AP. P-3	61,8-65,2	27,8	6,95	7550	0,8
4	AP. P-4	43,8-48,2	27,8	6,73	7020	0,2
5	AP. P-5	60,8-63,4	27,8	6,72	8060	1,2
6	AP. P-6	37,3	25,2	6,39	3550	1

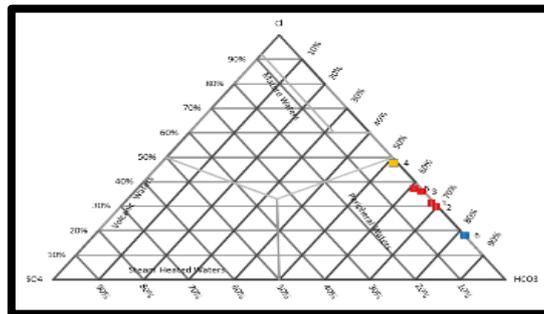
METODE



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

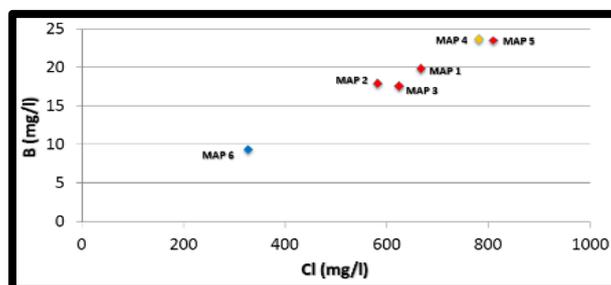
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Tipe Fluida Mata Air Panas



Gambar 5. Analisis Tipe Fluida MAP (PSDG, 2013 dimodifikasi oleh penulis)

Hasil analisis geokimia memperlihatkan mata air panas daerah ‘P’ umumnya termasuk ke dalam tipe air klorida-bikarbonat. Seluruh mata air panas berada pada zona *Peripheral Water* menunjukkan kaya akan kandungan HCO_3 , hanya **MAP4** dan kemudian disusul oleh **MAP5** yang berada pada zona perbatasan menuju antara *Mature Water* dengan *Peripheral Water*. Indikasi di lapangan juga menunjukkan bahwa pada mata air panas tersebut dijumpai adanya sinter karbonat. Diduga penyebab sebagian besar fluida mata air panas bertipe *bicarbonate water* adalah karena fluida mata air panas berinteraksi dengan formasi batugamping dalam perjalanan menuju ke permukaan sehingga terjadi pencampuran dan pengkayaan kandungan HCO_3 . **MAP4** dan **5** diperkirakan bersumber langsung dari reservoir serta hanya sedikit terpengaruh interaksi dengan formasi batugamping, hal ini diperkuat dengan hasil plot grafik kandungan Boron-Klorida. (Gambar 6: Segitiga Ternary $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$)



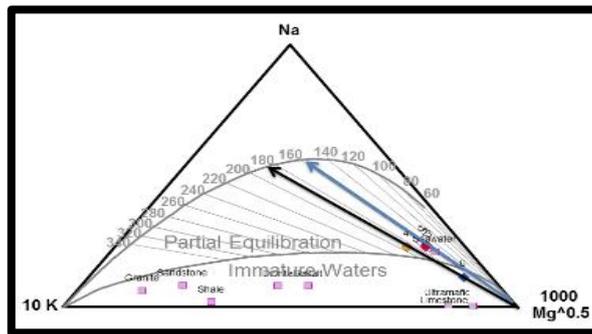
Gambar 6. Grafik Boron Vs Klorin MAP Daerah Penelitian

Dari Grafik di atas, terlihat bahwa titik **MAP5** memiliki kandungan Klorida dan Boron paling tinggi dibandingkan dengan kandungan yang terdapat pada mata air panas lain. Tingginya kandungan Boron dan Klorida tersebut mengindikasikan diduga bahwa **MAP5** bersumber dari reservoir.

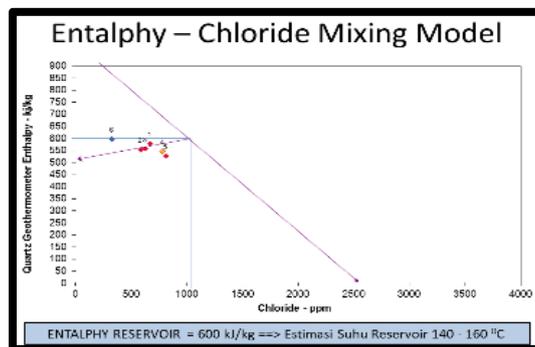
Pendugaan Suhu Bawah Permukaan

Perkiraan temperatur bawah permukaan daerah panasbumi 'P' dengan menggunakan geothermometer SiO_2 (*conductive-cooling*) rata-rata berkisar antara 138–142°C dan (*adiabatic-cooling*) rata-rata berkisar antara 133–136°C keduanya termasuk ke dalam entalpi sedang, hal ini juga dikuatkan oleh hasil analisis menggunakan geothermometer Na/K (Giggenbach) rata-rata berkisar antara 160–180°C yang menunjukkan temperatur sedang. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa dengan menggunakan geothermometer SiO_2 maupun Na/K menunjukkan kesesuaian namun tetap perlu mempertimbangkan dengan data pendukung lainnya.

Estimasi temperatur reservoir menggunakan Geothermometer Na/K dilakukan dengan analisis diagram segitiga *Ternary Na/1000-K/100-√Mg* (Gambar 8) menunjukkan mata air panas 'P' umumnya berada pada zona garis perbatasan *partial equilibrium* dan satu mata air panas berada pada zona *immature water*. Hal menggambarkan kondisi air panas kemungkinan berasal langsung dari kedalaman dengan temperatur cukup tinggi serta menunjukkan bahwa kondisi mata air panas 'P' relatif sedikit sekali dipengaruhi air permukaan atau pengenceran air meteorik sehingga hasil analisis pendugaan ini dapat digunakan untuk menentukan perkiraan suhu reservoir dan mencirikan zona *Upflow* pada sistem panasbumi non vulkanik. Satu mata air panas yang berada pada zona *immature water* menggambarkan bahwa fluida pada manifestasi tersebut telah bercampur dengan air meteorik di permukaan sehingga tidak dapat digunakan untuk pendugaan temperatur reservoir namun satu manifestasi ini mengindikasikan merupakan zona minor *Outflow* pada sistem panasbumi non vulkanik.



Gambar 7. Analisis Geothermometer Kimia MAP Daerah Penelitian (PSDG, 2013 dimodifikasi oleh penulis)

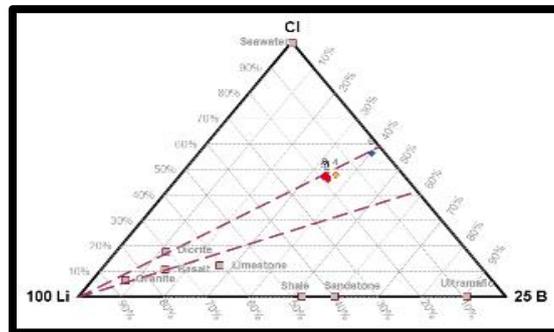


Gambar 8. Analisis *Mixing Model* MAP Daerah Penelitian

Analisis Lingkungan Kemunculan MAP

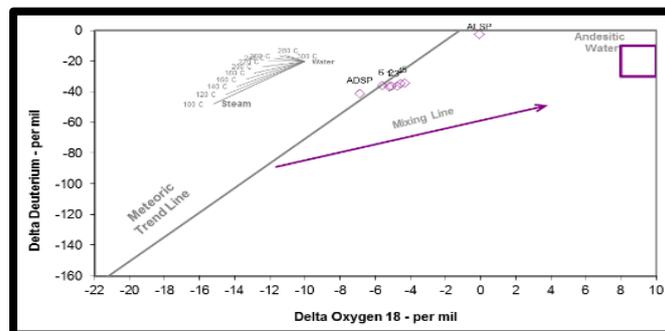
Hasil pengeplotan dalam diagram segitiga *Ternary Cl-Li-B* (Gambar 10) kelompok mata air panas 'P' cenderung ke arah Cl-B yang diduga menunjukkan lingkungan pemunculan mata air panas berada di antara batuan sedimen dan vulkanik namun dari diagram segitiga *Ternary Cl-Li-B* menunjukkan ada kemungkinan pengaruh bekas aktivitas magmatik pada pemunculan air panas

daerah 'P'. Hal ini terlihat dari semua hasil *plotting* air panas daerah 'P' berada di tengah-tengah diagram, yaitu berada di antara batuan sedimen dan vulkanik.



Gambar 9. Analisis Lingkungan Kemunculan MAP Daerah Penelitian (PSDG, 2013 dimodifikasi oleh penulis)

Analisis Isotop ^{18}O dan ^2H MAP

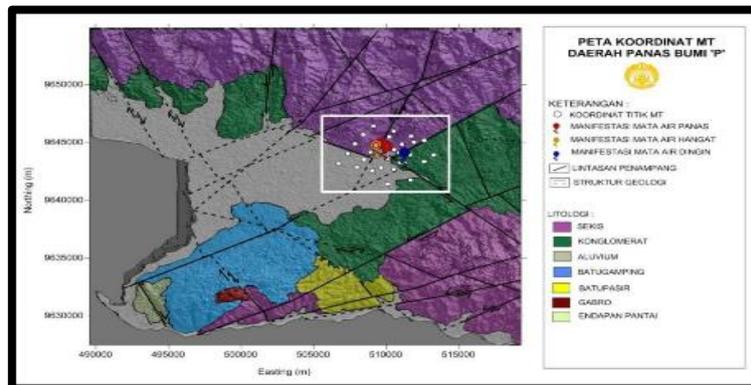


Gambar 10. Analisis Isotop ^{18}O dan ^2H MAP Daerah Penelitian (PSDG, 2011 dimodifikasi oleh penulis)

Berdasarkan data hasil isotop ^{18}O dan Deuterium yang diperoleh dari sampel mata air panas daerah 'P' setelah diplot ke dalam diagram hubungan antara Oksigen-18 dan Deuterium. Didapatkan hasil pada umumnya cenderung menjauhi garis air meteorik (*Meteoric water Line*) seperti terlihat pada Gambar 11. Hal ini berarti mengindikasikan telah terjadinya pengkayaan ^{18}O karena adanya interaksi fluida panas dengan batuan di kedalaman. Hal ini mencerminkan bahwa kemungkinan **MAP5**, **MAP4**, **MAP3**, **MAP2**, dan **MAP1** berasal langsung dari kedalaman dan kemungkinan pengenceran oleh air meteorik adalah sangat kecil sehingga dapat diduga sebagai zona *Upflow*. Namun **MAP6** berada di garis air meteorik, menunjukkan bahwa **MAP6** sudah terjadi pengenceran oleh air meteorik di permukaan dan mengindikasikan zona minor *Outflow*, hal ini sangat jelas sebab **MAP6** terletak pada pinggir sungai Udang. Grafik isotop ^{18}O terhadap ^2H (Deuterium) menunjukkan penyebarannya ke arah kanan garis meteorik. Hal ini memberikan gambaran kemungkinan telah terjadi reaksi antara batuan dengan fluida di kedalaman pada kondisi temperatur yang cukup tinggi.

Sebagai perbandingan dilakukan pula pengukuran isotop untuk air dingin (ADSP) di daerah 'P' yang diambil dari sungai untuk keperluan sehari-hari dan air laut (ALSP) di daerah 'P'. Terlihat bahwa hasil *plotting* air dingin berada mendekati garis air meteorik dimana mencerminkan air permukaan tidak mengalami reaksi antara batuan dengan air permukaan atau meteorik pada kondisi temperatur yang relatif rendah sedangkan *plotting* dari air laut berada jauh di atas garis meteorik.

Distribusi Titik Pengukuran MT (Magnetotellurik)



Gambar 11. Distribusi Titik Pengukuran MT Daerah Penelitian (PSDG, 2013 dimodifikasi oleh penulis)

Pengukuran MT daerah panasbumi 'P' dilakukan sebanyak 30 titik stasiun MT dengan jarak antar titik stasiun ukur berkisar 500–1500 meter. Sebaran titik stasiun ukur melingkupi area pemunculan manifestasi panasbumi dan juga area yang diduga sebagai area prospek sistem panasbumi 'P' berdasarkan analisis survei terdahulu (Survei Terpadu, PSDG 2011) serta di sekitar daerah yang diindikasikan zona *Upflow* dan zona minor *Outflow* berdasarkan hipotesis. Secara umum kualitas data MT yang diperoleh umumnya memiliki kualitas data baik sampai dengan sangat baik. Penilaian ini didasari pada analisis kurva hasil pengukuran, dimana data-data pada frekuensi tinggi hingga rendah tidak menunjukkan adanya undulasi-undulasi (*bumb*) yang signifikan. Selama akuisisi data pengukuran, terdapat dua titik yang harus diulangi proses pengukuran karena kualitas yang kurang baik yang bisa disebabkan lingkungan sekitar maupun *human error* saat pengukuran.

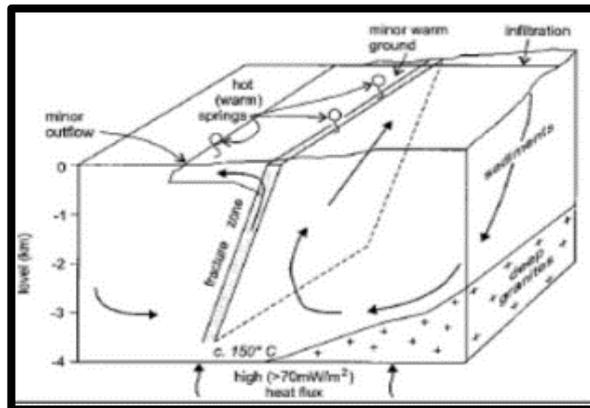
Interpretasi Terpadu dan Konseptual Model

Untuk memperoleh sebuah kesimpulan mengenai gambaran dari sistem panasbumi di daerah 'P' maka dilakukan interpretasi terpadu terhadap hasil penyelidikan geologi, geokimia dan geofisika pada daerah tersebut. Berdasarkan penyelidikan geokimia, keberadaan manifestasi kelompok mata air panas P di permukaan menunjukkan adanya sistem panasbumi di daerah tersebut.

Penampang model panasbumi menggambarkan bentuk dan posisi akumulasi panas di sepanjang struktur rekahan, dengan memotong struktur sesar yang berarah baratdaya-timurlaut. Air meteorik yang masuk, sebagian dapat meresap ke bawah permukaan melalui struktur, rekahan, maupun pori-pori batuan menjadi airtanah dan sebagian lagi teralirkan langsung ke sungai. Kemudian panas dari sisa panas aktivitas plutonik di batuan intrusi dengan airtanah membentuk sistem air panas yang terperangkap pada struktur dan menjadi awal dari suatu reservoir

Dari data magnetotellurik dapat diketahui sumber panas berupa batuan intrusi beraktivitas plutonik berada di bawah **MAP1**, **MAP2**, **MAP4**, dan **MAP5** dengan arah membuka dari utara ke tenggara. Mengacu pada hasil inversi 3-D yang diintegrasikan dengan data geologi dan geokimia di daerah panasbumi 'P' dan gabungan dari data pendukung, diperoleh suatu model konseptual seperti pada Gambar 19, 20, dan 21. Dari konseptual tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut. Terdapat keberadaan reservoir yang melingkupi berbentuk *dome* saling berhubungan berhubungan, dengan adanya kemenerusan dari *Clay Cap* maupun dari *heat source*. Reservoir berada di bawah kompleks **MAP1**, **MAP2**, **MAP4**, dan **MAP5** yang memiliki nilai resistivitas 20-100 Ωm pada kedalaman \pm 500-1500 m, dengan batas atas merupakan *BOC Clay Cap* dan batas bawah merupakan *heat source*. Lalu terdapat struktur yang diduga sebagai jalur

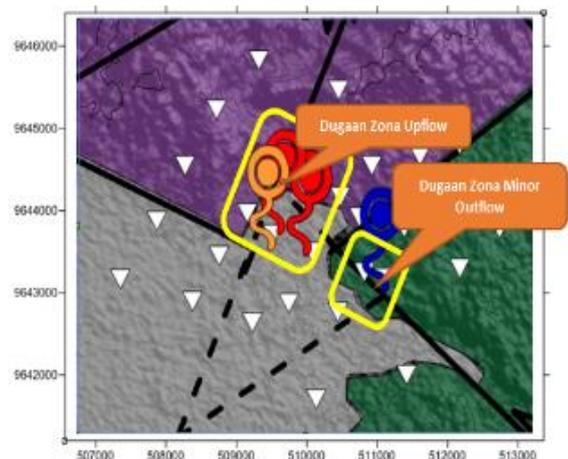
aliran panas ke permukaan yang ditandai dengan munculnya mata air panas di permukaan. Dugaan temperatur reservoir dari data geokimia adalah 160-180°C sehingga zona reservoir sistem panasbumi daerah 'P' ini secara klasifikasi sistem panasbumi berdasarkan temperatur dikategorikan ke dalam *Moderate Temperature Geothermal System* dan berdasarkan sejarah geologi dan hasil pemodelan inversi multi dimensi data magnetotelurik dapat dikategorikan daerah panasbumi 'P' termasuk dalam sistem panasbumi jenis tektonik zona kolisi lempeng lempeng (*Heat Sweep Plate Collision*), non-vulkanik.



Gambar 12. Model Konseptual Sistem *Heat Sweep* (Hochstein dan Browne, 2000)

Dalam menentukan zona *Upflow* sistem panasbumi non vulkanik dapat menggunakan Diagram 10K/Na vs 10Mg/Ca dimana evolusi dari mata air di zona *Upflow* ke zona *Outflow* dicirikan oleh penurunan temperatur. (Tari, 2013) (Tabel 4) Hal ini sesuai dengan karakteristik yang terdapat pada daerah 'P' sedangkan pada diagram K-Na-Mg, zona ini dicirikan oleh plot mata air yang berada pada *full equilibrium-partial equilibrium* sehingga dapat disimpulkan diduga zona *Upflow* pada sistem panasbumi daerah 'P' ini berada di antara **MAP1**, **MAP2**, **MAP4**, dan **MAP5**.

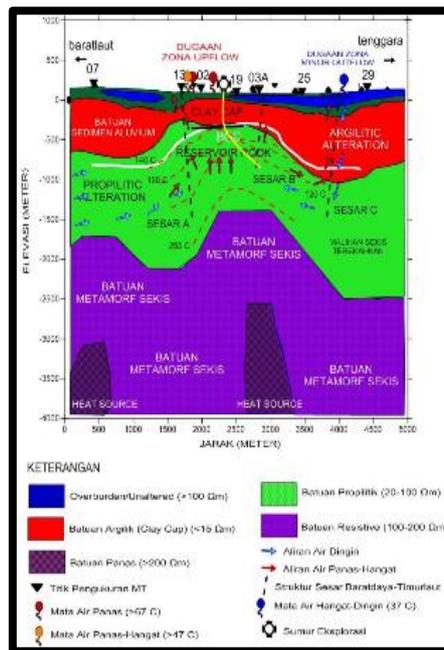
Zona *Outflow* fluida akan memiliki tipe air klorida-bikarbonat atau bikarbonat dengan kondisi *immature equilibrium*, temperatur serta debit yang rendah. Semakin menjauh dari zona *Upflow* maka tipe air berubah menjadi klorida-bikarbonat atau bikarbonat dengan kondisi fluida *partial equilibrium* menuju *immature equilibrium*. Temperatur dan debit bervariasi namun umumnya lebih rendah dari temperatur dan debit pada zona *Upflow* dan terkadang masih dijumpai endapan sinter sehingga dapat disimpulkan diduga zona *Outflow* pada sistem panasbumi daerah 'P' ini berada pada **MAP6** dekat dengan titik MTP-24



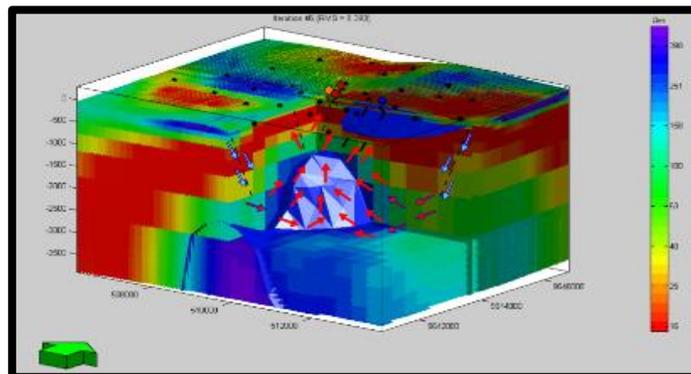
Gambar 13. Dugaan Zona *Upflow* dan *Minor Outflow* Daerah Penelitian

Struktur geologi yang berkembang di kompleks daerah panasbumi 'P' memiliki kesesuaian dengan hasil penyelidikan geokimia di daerah tersebut. Kelurusan manifestasi di permukaan sesuai dengan sesar-sesar yang berkembang, diduga sebagai jalur bagi fluida dari reservoir naik dan muncul ke permukaan dalam bentuk manifestasi air panas. Sesar baratdaya-timurlaut dan baratlaut-tenggara diduga mengontrol munculnya manifestasi air panas.

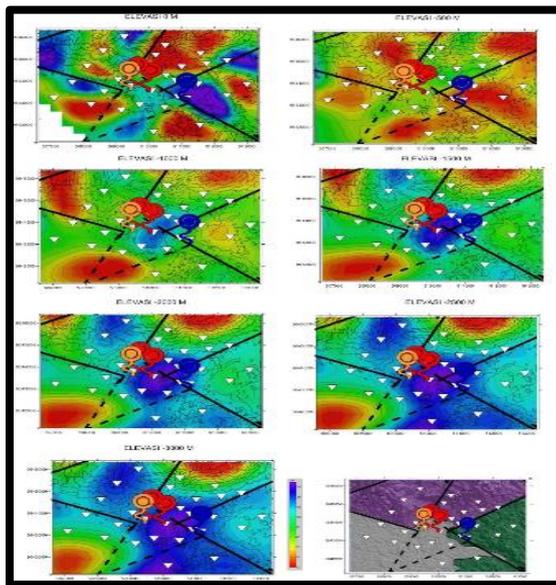
Dari gambaran struktur resistivitas tersebut juga teridentifikasi struktur *updome* di bawah antara MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5. Keberadaan struktur *updome* tersebut terlihat jelas pada hasil inversi lintasan 4 (gambar 19) arah baratdaya-tenggara. Hasil inversi lintasan tersebut menunjukkan adanya struktur berbentuk *updome* yang membuka ke arah manifestasi permukaan mata air panas kemudian menerus ke arah utara dan melidah ke arah tenggara. Hal ini sesuai dengan hasil penyelidikan geokimia yang mengindikasikan bahwa zona *Upflow* berada di antara MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5.



Gambar 14. Konseptual Model Daerah Penelitian Berdasar Hasil Inversi 3D Lintasan 3



Gambar 15. Konseptual Model Daerah Penelitian Berdasar Hasil Inversi 3D Bentuk Kubik



Gambar 16. Visualisasi Arah Lateral Zona Resistivitas Tinggi (Biru-Ungu >300 Ω m) Diduga Sebagai Batuan Sumber Panas Sistem Panasbumi Daerah 'P' Berdasar Hasil Inversi 3D

Delineasi Zona Prospek Daerah Penelitian

Metode utama guna mendelineasi zona prospek daerah penelitian ini adalah dengan metode magnetotelurik. Hasil sebaran resistivitas dan penampang resistivitas dari inversi multi dimensi mengindikasikan sistem dan prospek panasbumi di daerah panasbumi 'P' terkonsentrasi di sekitar mata air panas (zona *Upflow* pada sistem panasbumi daerah 'P' ini berada di antara **MAP1**, **MAP2**, **MAP4**, dan **MAP5**).

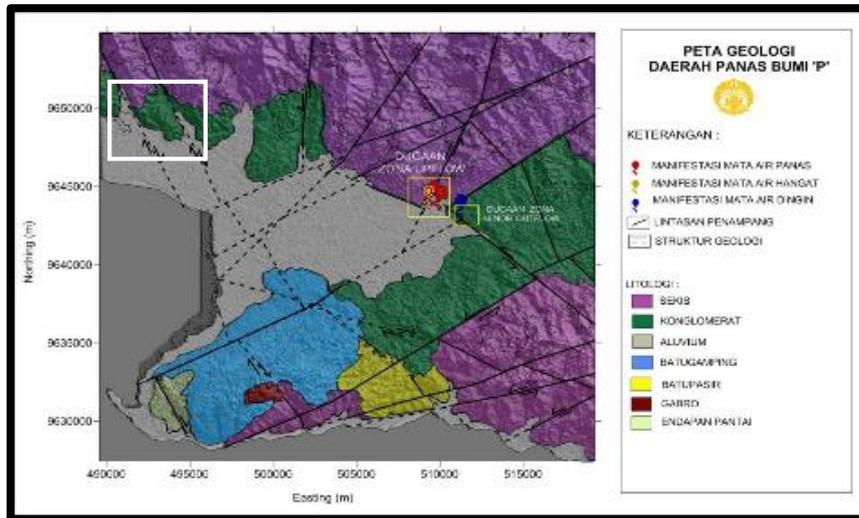
Zona prospek daerah panasbumi 'P' diperoleh dari kompilasi geosains hasil survei MT, geologi dan geokimia (Survei Terpadu, PSDG 2011). Kriteria dalam penentuan daerah prospek dapat dijelaskan sebagai berikut. (Fahmi, 2013)

Daerah prospek berada di zona *Upflow* yang merupakan pusat reservoir geotermal. Sehingga probabilitas mendapatkan fluida panas dengan tekanan dan temperatur yang tinggi semakin besar karena dekat dengan sumber panas.

Lokasi daerah prospek mengikuti sebaran resistive basement yang berperan sebagai *heat source*, sehingga daerah tersebut memiliki temperatur yang relatif lebih tinggi dibandingkan daerah sekitarnya. Hasil MT menunjukkan daerah prospek berada di sekitar pemunculan air panas daerah panasbumi 'P', **MAP1**, **MAP2**, **MAP4**, dan **MAP5**. Area ini diindikasikan dengan nilai resistivitas rendah dan analisis liniasi kontur sebagai indikasi lapisan batuan yang mengalami alterasi dan sesar yang berkembang. Struktur sesar geologi juga berperan dalam menzonasi prospek panasbumi di Banda Baru. Sesar berarah baratdaya-timurlaut diperkirakan menjadi batas zona prospek bagian barat dan timur. Kemudian sesar berarah baratlaut-tenggara pembatas zona prospek selatan. Berdasarkan kompilasi data-data di atas, maka perkiraan daerah prospek panasbumi 'P' memiliki luas area sekitar 3 km². Berdasarkan hasil intepretasi terpadu data geologi, geokimia, dan gambaran struktur bawah permukaan yang didapatkan dari inversi data MT maka dapat ditentukan lokasi daerah prospek di daerah penyelidikan berada di sekitar pemunculan manifestasi permukaan mata air panas (**MAP1**, **MAP2**, **MAP4**, dan **MAP5**) dengan luas sekitar 3 km². Kriteria dalam penentuan rekomendasi aera pemboran dapat dijelaskan sebagai berikut.

Target lokasi pemboran diarahkan pada daerah yang mempunyai permeabilitas tinggi dan temperatur tinggi yang berkorelasi dengan keberadaan struktur di daerah prospek. (Fahmi, 2013). Maka rekomendasi lokasi pemboran untuk sumur eksplorasi di daerah penelitian berada di sekitar jalur sesar baratdaya-timurlaut dan sesar baratlaut-tenggara yang mengontrol manifestasi

permukaan mata air panas MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5 dan di struktur-struktur lain yang teridentifikasi di zona prospek.



Gambar 17. Delineasi Zona Prospek Daerah Penelitian

PENUTUP

Simpulan

Setelah melakukan pengolahan data dan pemodelan inversi multi dimensi sistem panasbumi pada daerah penelitian dengan metode magnetotelurik dan diintegrasikan oleh data geologi dan geokimia, dapat disimpulkan:

- Sistem panasbumi daerah 'P' terbentuk dengan adanya panas dari sisa panas dapur magma yang berasosiasi dengan aktivitas plutonik muda. Aktivitas ini mengakibatkan terjadinya terobosan batuan beku berupa batuan intrusi pada rekahan-rekahan (zona lemah). Batuan ini tidak tersingkap ke permukaan namun diduga terbentuk akibat dari terjadinya benturan antara kerak Pulau Seram dengan kerak Benua Australia (*plate collision*) yang menyebabkan naiknya magma pada zona lemah. Sisa panas dari aktivitas plutonik ini menopang aktivitas sistem panasbumi sehingga terbentuknya zona reservoir. Berdasarkan sejarah geologi, data geokimia, dan hasil pemodelan inversi multi dimensi data magnetotelurik dapat dikategorikan daerah panasbumi 'P' termasuk dalam sistem panasbumi jenis tektonik zona kolisi lempeng (*Heat Sweep Plate Collision*) yang berasosiasi dengan pembentukan batuan intrusi, non-vulkanik, dan memiliki temperatur sedang.
- Hasil inversi 3D Data MT memperlihatkan:
 - Lapisan konduktif ($<15 \Omega\text{m}$) dengan ketebalan ± 1000 m di sebelah barat laut-tenggara dan barat daya-timurlaut kemudian mengalami penipisan hingga ketebalannya menjadi ± 500 m di bawah area kemunculan mata air panas, diindikasikan sebagai *Clay Cap* dari sistem panasbumi.
 - Lapisan yang berada di bawah *Clay Cap* dengan nilai resistivitas sedikit lebih tinggi ($>30 \Omega\text{m}$), diindikasikan sebagai zona reservoir, dengan ketebalan $\pm 1000-2000$ m di sebelah barat laut-tenggara dan barat daya-timurlaut kemudian mengalami penipisan hingga ketebalannya menjadi $\pm 500-1500$ m di bawah area kemunculan mata air panas. Keberadaan pusat zona reservoir terdapat di bawah area kemunculan manifestasi air panas.
 - Lapisan dengan nilai resistivitas tinggi ($>300 \Omega\text{m}$) dan berbentuk updome, berada di bawah area kemunculan mata air panas (MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5) mengindikasikan *heat source*. Keberadaan *heat source* sistem panasbumi daerah

penelitian diketahui berada di utara kemudian melidih membesar ke arah tenggara membentuk *updome*.

- Zona *Upflow* berada di bawah area kemunculan mata air panas (MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5).
- Zona minor *Outflow* dari sistem mengarah ke barat dan tenggara dari MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5 yaitu MAP6 dekat titik MTP-24.
- Hasil Geokimia *plotting* air panas daerah 'P' berada di tengah-tengah diagram, yaitu berada di antara batuan sedimen dan vulkanik.
- Hasil Geokimia Isotop *plotting* air dingin berada mendekati garis air meteorik dimana mencerminkan air permukaan tidak mengalami reaksi antara batuan dengan air permukaan atau meteorik pada kondisi temperatur yang relatif rendah sedangkan *plotting* dari air laut berada jauh di atas garis meteorik.
- Temperatur bawah permukaan diperkirakan sekitar 160-180°C yang berhubungan dengan reservoir panasbumi pada sistem panasbumi daerah 'P' yang termasuk *Moderate Temperature Geothermal System*.
- Lokasi area prospek di daerah penyelidikan berada di sekitar pemunculan manifestasi permukaan mata air panas (MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5) dengan luas sekitar 3 km²
- Lokasi titik pemboran eksplorasi direkomendasikan berada di dekat antara titik MTP-18, MTP-19, dan MTP-03A yaitu di sebelah barat-tenggara MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5, dengan kedalaman ± 1,5 km.

DAFTAR PUSTAKA

- Fahmi, F. (2013). *Pemodelan Sistem Geothermal Arjuno-Welirang Dengan Menggunakan Data Magnetotelurik*. Skripsi. Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia.
- Grandis, Hendra. (2010). *Metode Magnetotelurik (MT)*. http://hendragrandis.files.wordpress.com/2010/01/mt_teks1.pdf, Selasa 12 Mei 2015, pukul 22.46 WIB.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G. L., Yongmiwon, dan Uyeshima, M. (2003). *Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion: Data Space Method*. *Physics of The Earth and Planetary Interiors* 150 (2005) 3-14.
- Siripunvaraporn, Weerachai. (2012). *Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion: An Introductory Guide for Developers and Users*. *Surv Geophys* (2012) 33:5-27.
- Supriyanto. (2007). *Analisis Data Geofisika : Memahami Teori Inversi*. Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia.
- Tari, Prameswarie, N. (2013). *Karakteristik Geokimia Mata Air Termal pada Sistem Panas Bumi Non Vulkanik Di Sulawesi dan Implikasinya pada Konsep Eksplorasi*. Skripsi. Departemen Teknik Geologi, FITK, Institut Teknologi Bandung.
- Tim Survei Terpadu. (2014). *Pusat Sumber Daya Geologi: Penyelidikan Terpadu Magnetotelurik Daerah Panasbumi "P"*. Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku