

**PEMODELAN INVERSI 2-D DAN 3-D MENGGUNAKAN DATA MAGNETOTELURIK  
DAERAH PANAS BUMI MASSEPE KABUPATEN SIDENRENG RAPPANG,  
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

**2-D AND 3-D INVERSION MODELLING USING MAGNETOTELLURIC DATA  
AT MASSEPE GEOTHERMAL AREA, SIDENRENG RAPPANG REGENCY,  
SOUTH SULAWESI PROVINCE**

Wiwid Joni dan Rina Wahyuningsih

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi  
joniwiwid@gmail.com

**ABSTRAK**

Pemodelan inversi 2-D dan 3-D data magnetotelurik (MT) dari daerah panas bumi Masepe memberikan hasil deliniasi area prospek yang lebih jelas yaitu di sekitar mata air panas Pajalele seluas  $\pm 8 \text{ km}^2$ . Zona *upflow* sistem panas bumi Masepe ini diperlihatkan oleh adanya anomali tahanan jenis rendah  $< 20 \text{ Ohm-m}$  di kedalaman 250 m yang semakin tinggi mulai kedalaman 700 m s.d. 800 m. Zona transisi nilai tahanan jenis ini diduga sebagai kedalaman puncak reservoir sistem panas bumi Masepe yaitu di kedalaman 800 m. Anomali tahanan jenis data magnetotelurik juga menunjukkan pola yang sesuai dengan keberadaan struktur geologi di daerah ini terutama struktur Sesar Masepe berarah relatif utara-selatan yang mengontrol kemunculan mata air panas di Pajalele dan Alakuang.

**Kata Kunci:** Masepe, magnetotelurik, Inversi 2-D dan 3-D, panas bumi

**ABSTRACT**

*2-D and 3-D inversion modeling using magnetoteluric data from Masepe geothermal area gives a clearer delineation of the prospect area  $\pm 8 \text{ km}^2$  located around Pajalele hot spring. The Masepe geothermal upflow zone is shown by the presence of a low resistivity anomaly of  $< 20 \text{ Ohm-m}$  at a depth of 250 m which is getting higher from a depth of 700 m - 800 m. The transition zone of the resistivity value at 800 m deep is thought to be the top of reservoir of Masepe geothermal system. Resistivity anomalies of these magnetoteluric data also indicate a pattern that is consistent with the presence of geological structures in this area, especially the relatively north-south direction of the Masepe Fault structure that controls the emergence of Pajalele and Alakuang hot springs.*

**Keywords:** Masepe, magnetotelluric, 2-D and 3-D inversion, geothermal

**PENDAHULUAN**

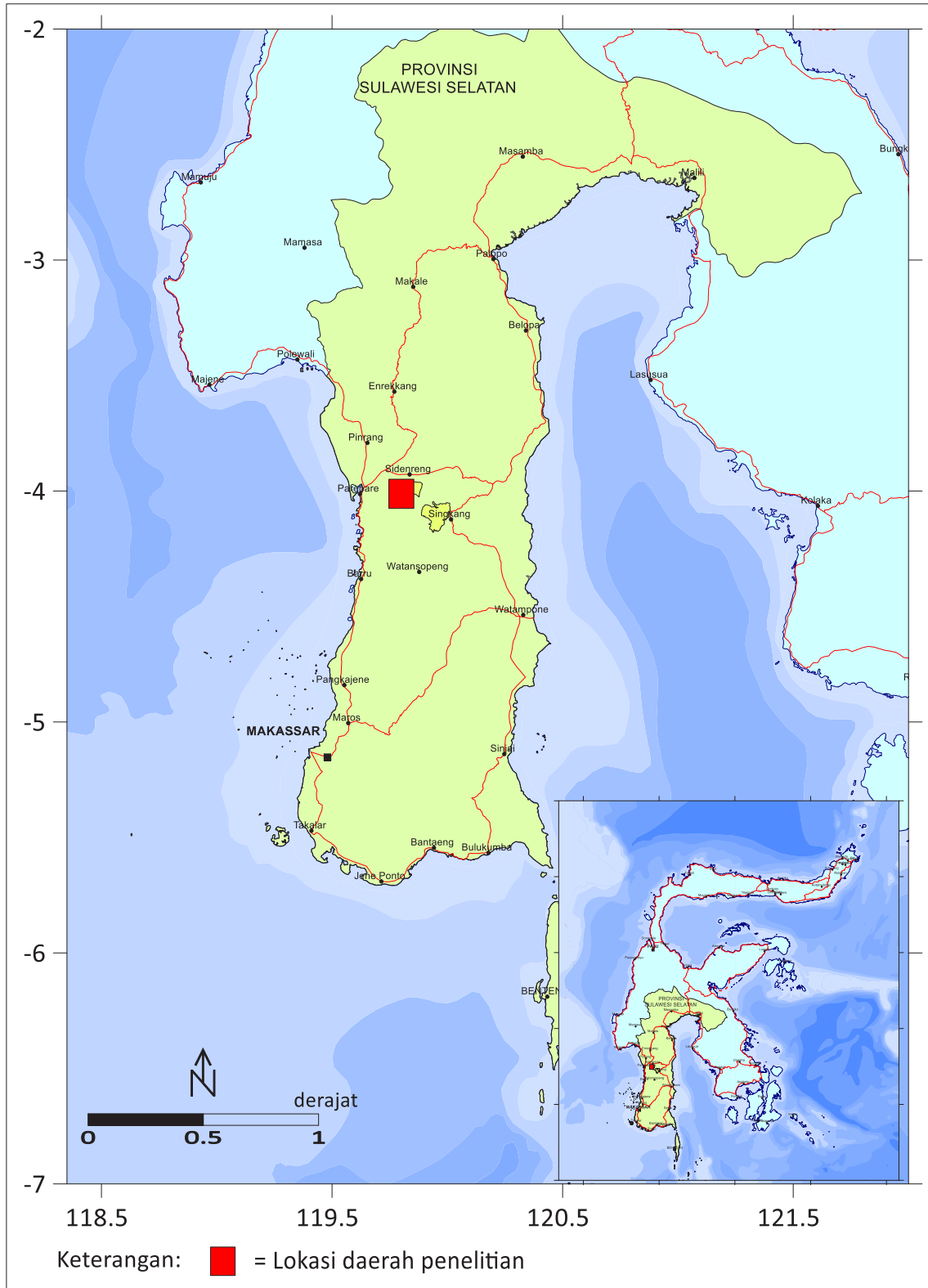
Tatanan geologi Indonesia yang membentuk busur vulkanik memanjang dari utara Pulau Sumatera, Pulau Jawa, Kepulauan Nusa Tenggara hingga Pulau Sulawesi bagian utara dan Kepulauan Maluku memberikan kontribusi terhadap besarnya potensi panas bumi di Indonesia. Namun demikian potensi panas bumi di Indonesia juga muncul di luar jalur vulkanik tersebut, yang umum disebut sebagai potensi panas bumi non-vulkanik. Sebagai

contoh, potensi panas bumi non-vulkanik ini terdapat di sebagian wilayah Pulau Sulawesi. Beberapa sumber panas dari sistem panas bumi non-vulkanik diperkirakan berasosiasi dengan munculnya tubuh-tubuh plutonik dan sisa panas dari aktifitas vulkanik berumur Tersier (Anonim, 2015).

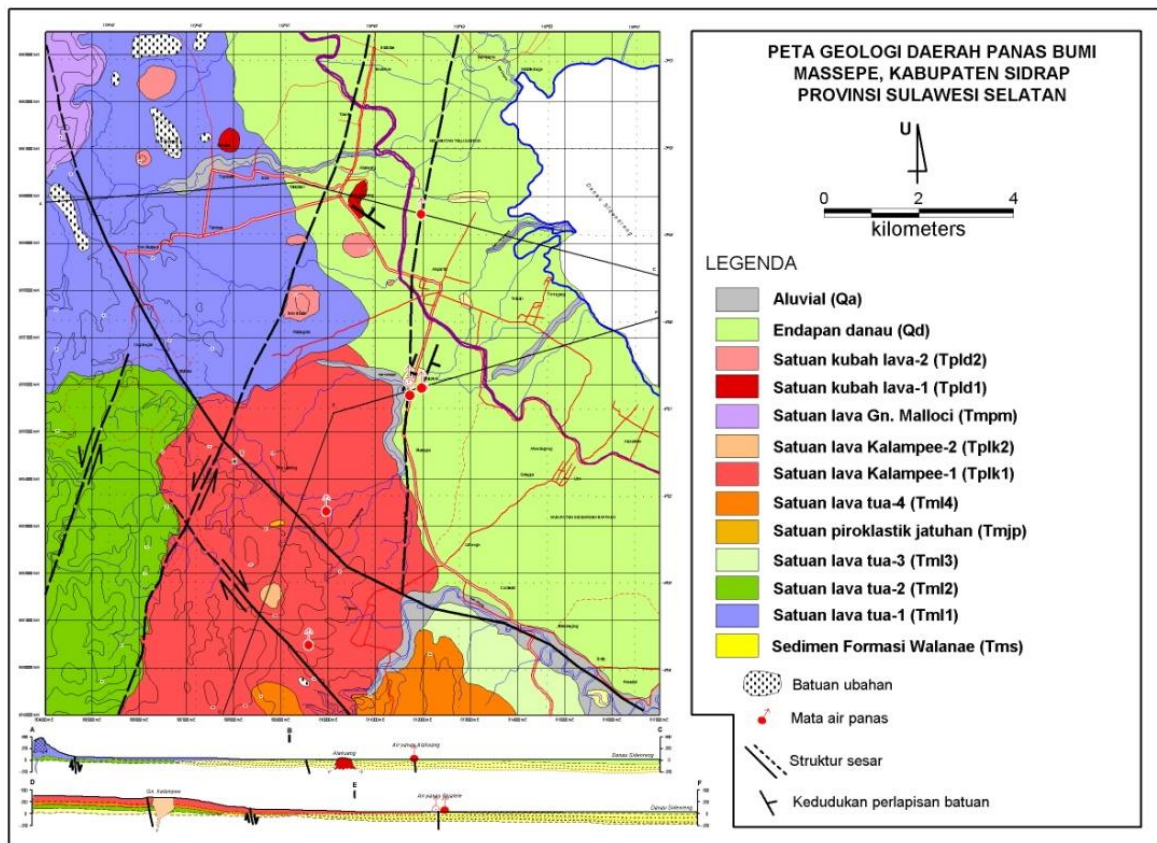
Salah satu potensi panas bumi tersebut muncul di daerah Masepe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan. Secara geografis, daerah panas

bumi ini berada pada koordinat 807000 mT  
– 816000 mT dan 955100 mU – 9562000  
mU pada proyeksi peta *Universal*

*Tranverse Mercator (UTM) Datum WGS  
1984 zona 50 S (Gambar 1).*



**Gambar 1.** Peta indeks lokasi penelitian daerah panas bumi Massepe



**Gambar 2.** Peta geologi daerah panas bumi Masepe (Anonim, 2008)

Gambar 2 memperlihatkan bahwa batuan tertua di daerah panas bumi Masepe berupa batuan sedimen laut Formasi Walanae berumur Miosen yang terdiri dari perselingan batupasir, batulempung dan batugamping. Batuan vulkanik yang terdapat di daerah ini berupa aliran lava dan piroklastik didominasi komposisi andesitik hingga dasitik berumur Tersier. Batuan vulkanik termuda berupa kubah lava yang dari hasil pentarikan (*dating*) berumur  $1,8 \pm 0,6$  juta tahun (Pliosen-Plistosen). Satuan Kubah Lava ini menerobos batuan sedimen dan batuan vulkanik yang lebih tua. Satuan Batuan Kubah Lava ini diperkirakan berasosiasi dengan tubuh intrusi yang diyakini sebagai sumber panas sistem panas bumi Masepe. Satuan batuan termuda merupakan endapan permukaan yang terdiri dari endapan danau dan aluvial (Anonim, 2008).

Sesar Normal Walanae merupakan sesar utama yang berkembang di daerah panas bumi Masepe dan membentuk depresi

Sidenreng berarah barat laut - tenggara. Sesar normal lainnya adalah Sesar Alukuang dan Sesar Masepe yang berperan mengontrol munculnya manifestasi di permukaan. Sesar-sesar ini juga diperkirakan mengontrol terbentuknya kubah-kubah lava di daerah ini (Anonim, 2008).

Keberadaan sistem panas bumi Masepe diindikasikan oleh munculnya manifestasi kelompok mata air panas Pajalele, Alukuang dan Warede dengan temperatur berkisar antara  $29^{\circ}\text{C}$  hingga  $68^{\circ}\text{C}$ . Air panas di daerah Masepe mempunyai tipe klorida hingga bikarbonat. Hasil pendugaan temperatur berdasarkan geotermometer air panas, reservoir sistem panas bumi Masepe diperkirakan mempunyai temperatur sebesar  $193^{\circ}\text{C}$  yang dikategorikan sebagai sistem panas bumi temperatur sedang (Anonim, 2008).

Pola kelurusan yang ditunjukkan dari hasil survei gaya berat maupun geomagnet menunjukkan tren arah yang sama yaitu

baratlaut - tenggara. Data tahanan jenis diperoleh dari survei geolistrik (konfigurasi Schlumberger). Namun dalam analisis data tahanan jenis untuk melokalisir area prospek ditemui kendala karena daerah ini juga didominasi oleh batuan sedimen yang terdiri dari batupasir, batulempung dan batugamping. Batuan sedimen seperti batulempung memberikan nilai tahanan jenis rendah seperti batuan ubahan hidrotermal. Selain itu hasil analisis data tahanan jenis ini belum bisa menentukan kedalaman puncak reservoir.

Dengan adanya keterbatasan data diatas, dan untuk memperoleh informasi struktur tahanan jenis yang lebih dalam maka dilakukan survei magnetotelurik. Dengan menggunakan data tahanan jenis hasil survei magnetotelurik dilakukan pemodelan inversi 2-D dan 3-D. Pemodelan inversi 2-D dan 3-D data magnetotelurik ini diharapkan dapat membantu dalam menggambarkan model sistem panas bumi Masepe yang lebih akurat.

## METODE

Metode Magnetotelurik (MT) adalah metode yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik (EM) sebagai sumber gelombang, sehingga dapat mencitrakan kondisi struktur tahanan jenis batuan di bawah permukaan bumi. Akuisisi kedua metoda ini dilakukan dengan mengukur secara simultan variasi medan listrik (E) dan medan magnet (H) di permukaan bumi sebagai fungsi perioda (Simpson dan Bahr, 2005).

Medan magnet bumi yang berfluktuasi akan menginduksi arus listrik di dalam bumi yang besarnya bergantung pada konduktivitas, dan dari hukum Ampere, pengukuran fluktuasi medan magnet di permukaan menentukan total arus listrik di

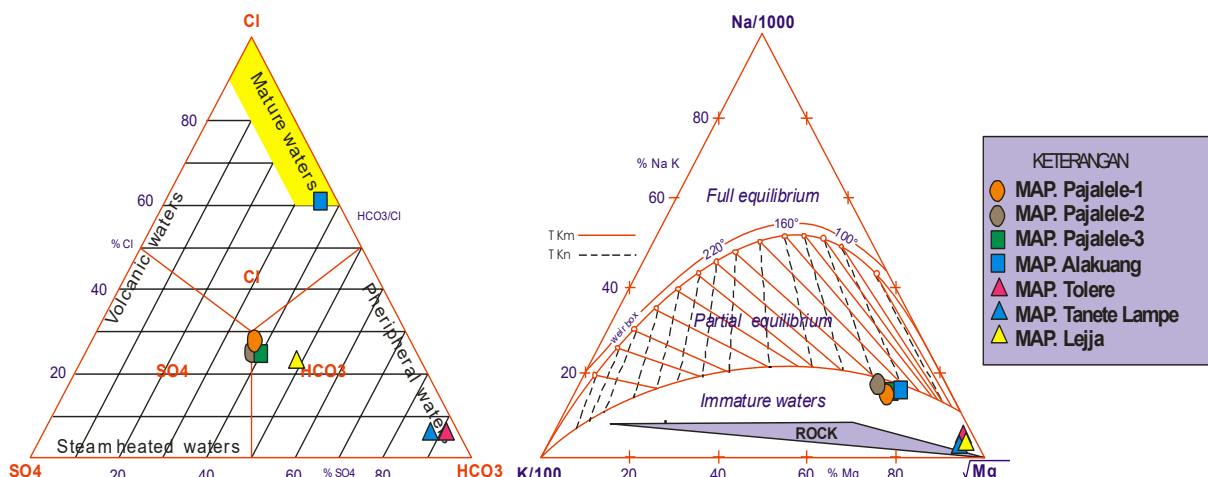
bawah permukaan. Pengukuran medan listrik pada permukaan bumi akan menghasilkan konduktivitas di titik pengukuran. Transformasi dari medan listrik dan medan magnet yang terukur kedalam domain frekuensi, sehingga dapat memetakan konduktivitas sebagai fungsi kedalaman dan posisi (Chave, A. dan Jones, A.G., 2012). Pemodelan 2-D menggunakan perangkat lunak WinGLink versi 2.21.03. Pemodelan ini menggunakan algoritma NLCG (*Nonlinear Conjugate Gradients*). Namun model tahanan jenis untuk bagian yang lebih dalam dari struktur reservoir seringkali ambigu. Untuk mengatasi hal tersebut teknik inversi 3-D telah dipelajari secara intensif dalam beberapa tahun terakhir (Sasaki, Y., 1999; Zhdanov M. S., Fang, S., and Hursin, G., 2000; Mackie, R., Rodi, W., Watts, M. D., 2001). Disamping itu, lingkungan geologi yang kompleks yang sering ditemui di daerah panas bumi terkadang salah dalam menginterpretasi pemodelan 2-D yang realistis (Uchida, T., dan Sasaki, Y., 2006).

Pemodelan inversi 3-D menggunakan perangkat lunak WSINV3-DMT. Perangkat lunak tersebut merupakan kelanjutan dan implementasi dari inversi Occam 2-D (Siripunvaraporn and Egbert, 2006).

Penyelesaian inversi adalah mencari parameter model  $\mathbf{m}$  sehingga cocok dengan data  $\mathbf{d}$  (Grandis, H., 2009). Maka suatu fungsi yang merupakan hasil selisih forward  $\mathbf{m}$  dengan data harus diminimumkan atau disebut sebagai *misfit function* atau fungsi objektif (Rodi, W. dan Mackie, R.L., 2001),

$$\psi(\mathbf{m}) = (\mathbf{d} - F(\mathbf{m}))^T V^{-1} (\mathbf{d} - F(\mathbf{m})) + \lambda \mathbf{m}^T L^T L \mathbf{m}$$

dimana nilai  $\lambda$  = parameter regularisasi,  $V$  = matrik ko-variansi, dan  $L$  = operator regularisasi.



Gambar 3. Tipe air panas daerah Masepe hasil plotting dalam diagram segitiga Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> dan Na-K-Mg (Anonim, 2008)

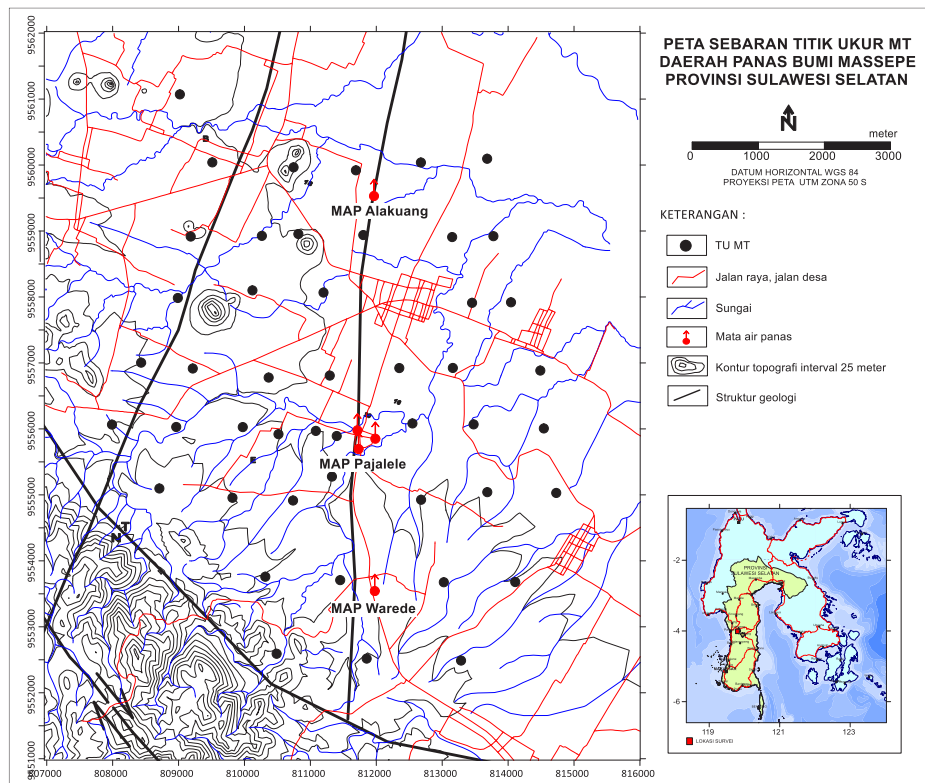
**MODEL AWAL 2-D DAN 3-D**

Data yang akan dipergunakan dalam pemodelan ini merupakan hasil survei magnetotelurik pada 47 titik pengukuran di daerah panas bumi Masepe yang meliputi daerah manifestasi Alakuang, Pajalele, dan Warede (Gambar 4). Pemodelan inversi 2-D menggunakan tahanan jenis invarian dengan alasan mode TE relatif tidak sensitif terhadap perubahan tahanan jenis yang berarti bahwa komponen ini kurang sensitif dalam mendeteksi variasi 3-Dimensi dengan tajam untuk sasaran sistem panas bumi. Sebaliknya, mode TM terlalu kuat dipengaruhi oleh perubahan tahanan jenis secara lateral (Anderson, E., Crosby, D., dan Ussher, G., 2000). Pemodelan ini menggunakan parameter  $\tau = 1$  yang dianggap dapat mewakili untuk proses inversi pada semua lintasan. Parameter lain yang digunakan yaitu parameter *data error* dan *error floor* untuk  $\rho$  sama dengan 5% dan *phase* sama dengan 10%. Parameter *data error* berfungsi untuk memberikan batasan *error* dari data kalkulasi terhadap data observasi pada kurva, sedangkan parameter *error*

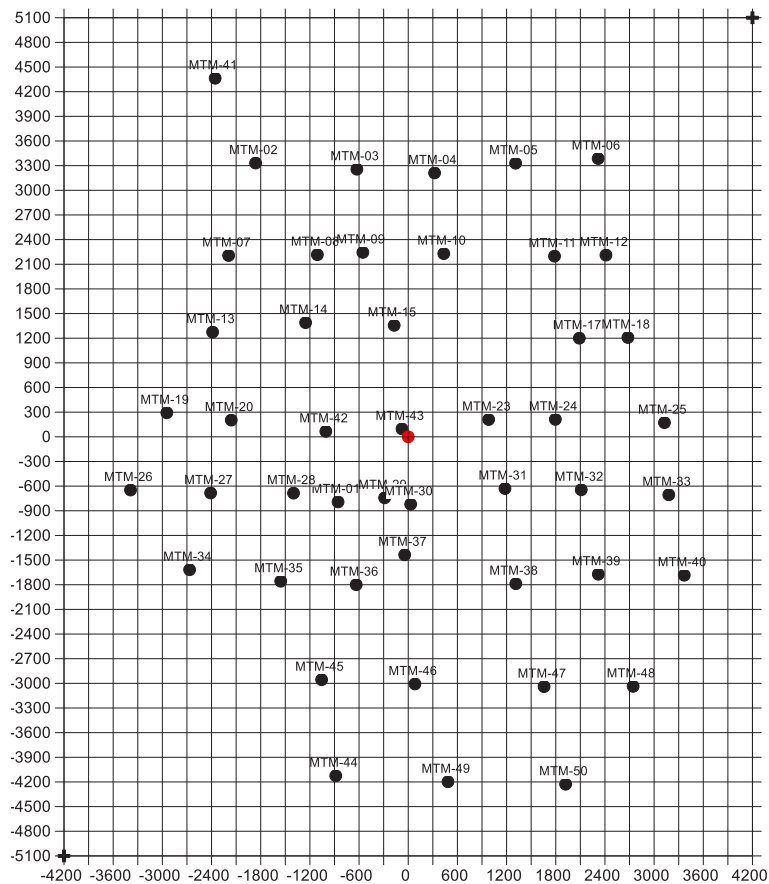
*floor* menyatakan pemberian batasan *error* pada data (Geosystem SRL, 2011).

Nilai model awal tahanan jenis sebesar 30 Ohm.m digunakan dalam proses inversi ini. Lintasan yang dibuat berarah barat - timur dengan alasan meminimalkan gangguan (*noise*) karena lokasi survei pengukuran berada di daerah padat penduduk dan juga terdapat jalur sutet hampir berarah utara - selatan di tengah daerah penelitian. Namun keberadaan struktur di daerah panas bumi ini, yaitu struktur utama berupa Sesar Normal Walanae berarah barat laut - tenggara, dan struktur yang berperan penting dengan kemunculan hampir semua manifestasi Masepe permukaan yaitu Sesar Masepe berarah hampir utara - selatan.

Pada model awal 3-D dari data magnetotelurik dibuat dengan spasi grid 300 meter, dengan jumlah grid 28 x 34 sel (Gambar 5). Pemodelan inversi ini hanya melibatkan impedansi tensor 2-D dan menggunakan 12 frekuensi (97 hingga 0.04 Hz).



Gambar 4. Peta sebaran titik ukur Magnetotelurik

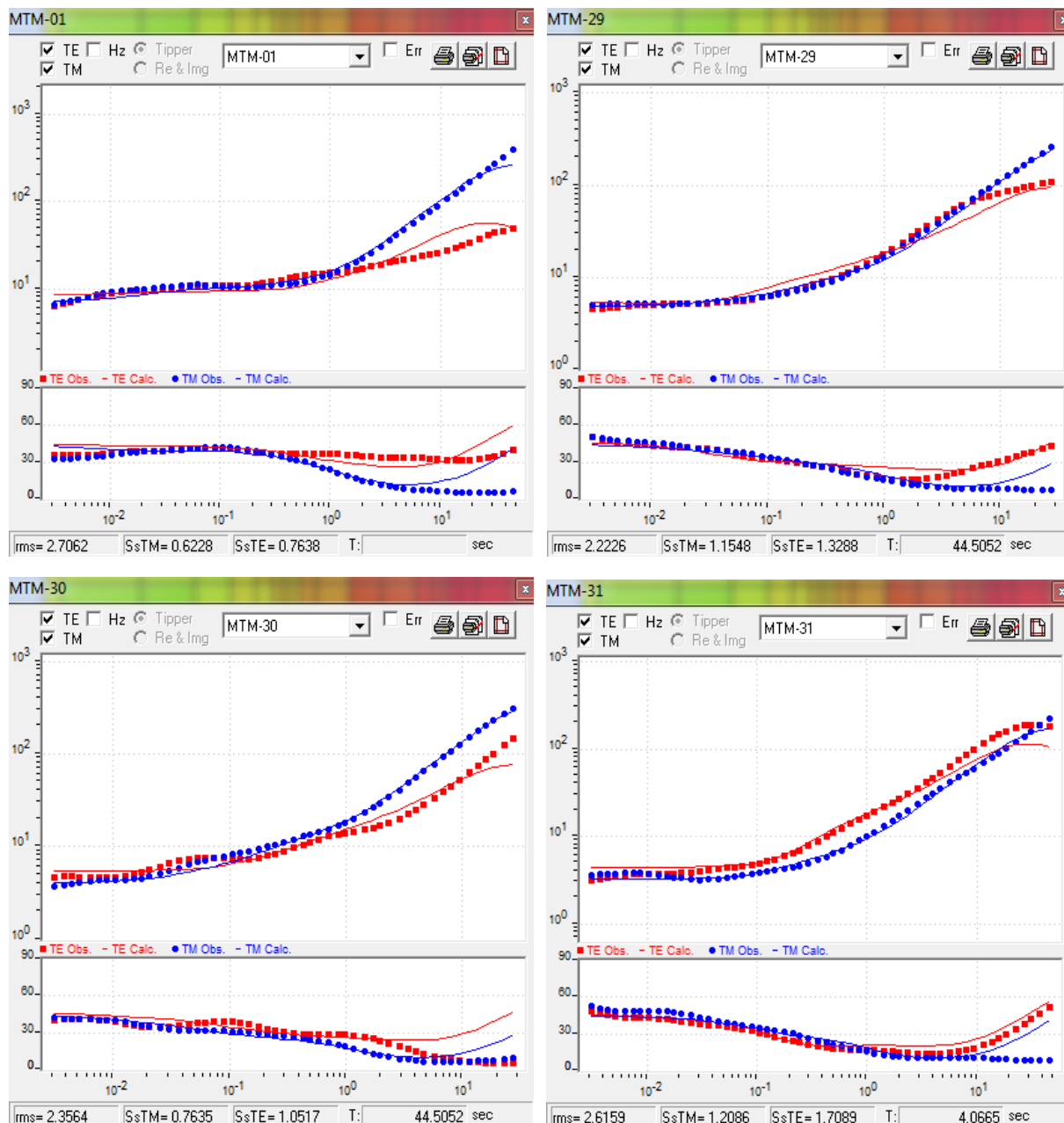


Gambar 5. Model awal untuk inversi 3-D, grid 300 meter, dengan jumlah grid 28 × 34 sel terhadap sebaran titik ukur magnetotelurik

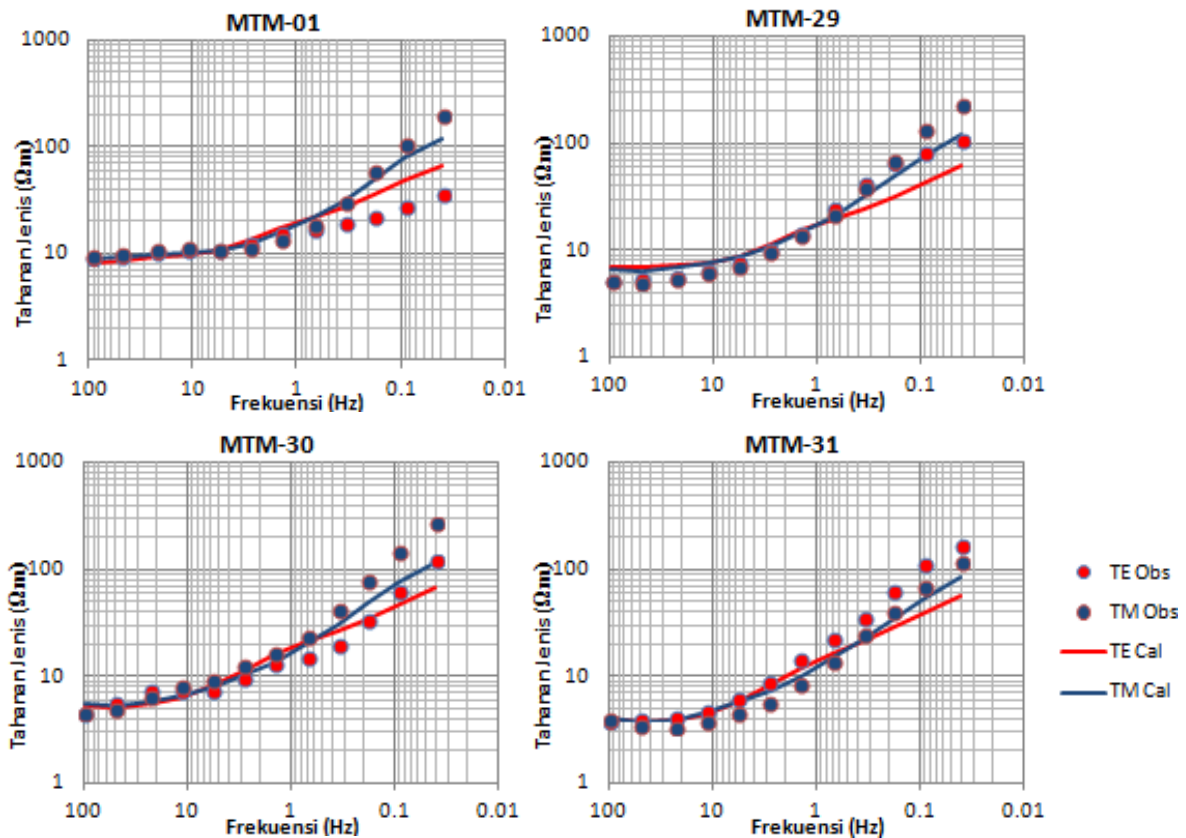
**HASIL PEMODELAN 2-D DAN 3-D DAN PEMBAHASAN**

Hasil pemodelan inversi 2-D (Gambar 10) pada lintasan 5 menghasilkan *rms error* sebesar 2,35%, lintasan 6 sebesar 2,99%, dan lintasan 9 sebesar 2,25%. Hasil Pemodelan inversi 3-D dipilih pada iterasi ke 7 dari 12 total iterasi yang dilakukan dengan *rms error* sebesar 2,24. Gambar 6

dan Gambar 7 menunjukkan kurva tahanan jenis TE dan TM untuk membandingkan data observasi (data pengukuran) terhadap data kalkulasi (*forward model*) untuk beberapa titik pengukuran yang mewakili. Beberapa hasil inversi menunjukkan hasil kedua kurva yang relatif berimpit, namun pada frekuensi rendah relatif berbeda (*misfit*).



**Gambar 6.** Perbandingan respon kurva hasil Inversi 2-D terhadap modulus TE (merah) dan TM (biru) pada beberapa titik ukur yang mewakili.



**Gambar 7.** Perbandingan respon kurva hasil Inversi 3-D terhadap data pengukuran pada beberapa titik ukur yang mewakili.

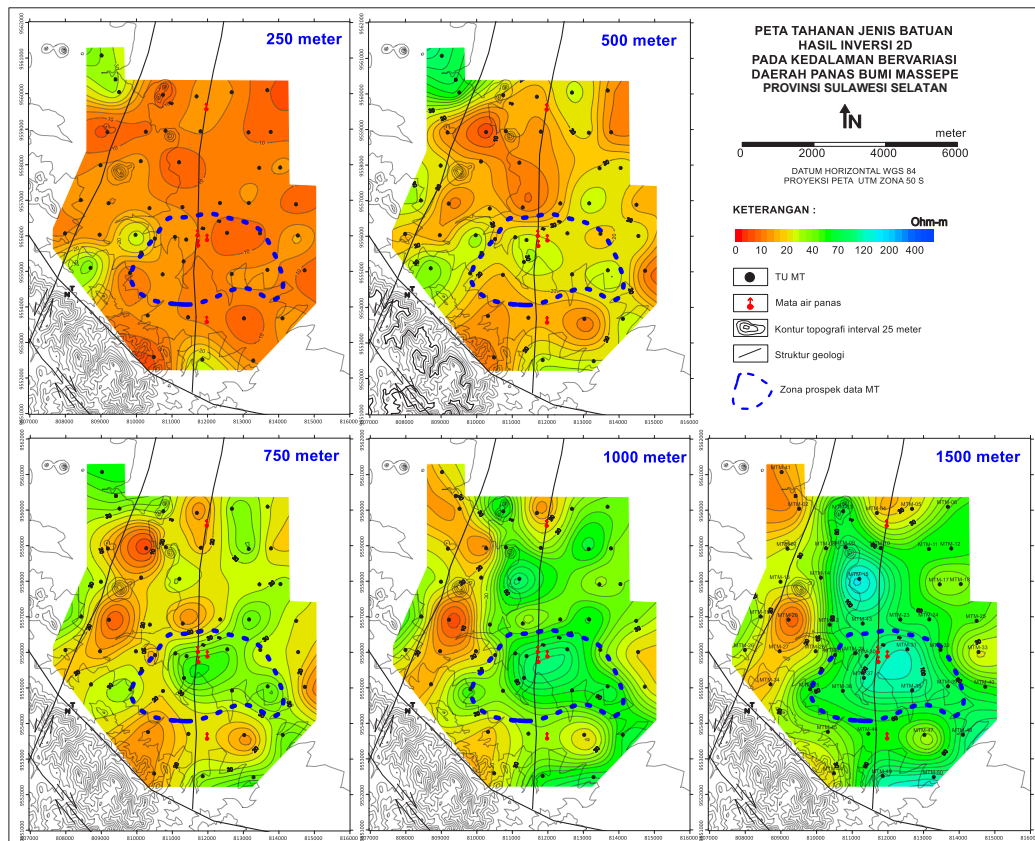
Hasil inversi 2-D dan 3-D dipetakan secara lateral pada kedalaman 250 meter, 500 meter, 750 meter, 1000 meter, dan 1500 meter (Gambar 8 dan Gambar 9). Sebaran tahanan jenis hasil inversi 2-D dan 3-D memperlihatkan pola relatif sama. Sebaran tahanan jenis rendah < 20 Ohm-m mendominasi daerah penelitian, kecuali di bagian barat yang dibatasi oleh keberadaan sesar normal Alakuang. Pada kedalaman 500 meter, sebaran tahanan jenis di sekitar mata air panas Pajalele relatif meninggi < 30 Ohm-m. Sebaran tahanan jenis di sekitar mata air panas Pajalele secara tegas menjadi tahanan jenis sedang berupa spot memanjang berarah barat - timur pada kedalaman 750 meter.

Selanjutnya pada kedalaman 1000 meter hingga 1500 meter, sebaran tahanan jenis tersebut semakin meninggi terutama di sekitar mata air panas Pajalele. Perubahan zona anomali tahanan jenis inilah yang diduga sebagai zona yang telah

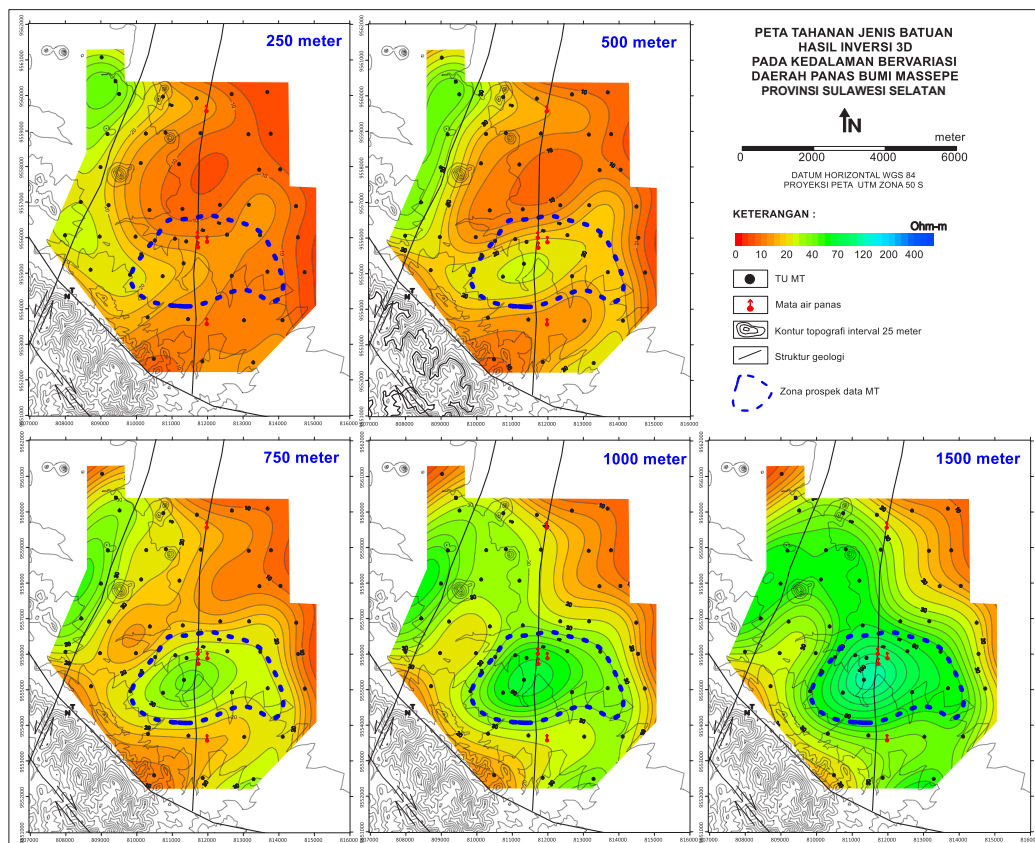
terubahkan sifat fisis batuan disekitarnya oleh fluida panas yang naik kepermukaan. Nilai tahanan jenis rendah di dalam zona tersebut diduga sebagai lapisan konduktif yang biasanya berupa batuan ubahan hidrotermal dan umumnya merupakan lapisan penudung (*clay cap*) pada suatu sistem panas bumi.

Pada kedalaman 500 meter hingga 700 meter terlihat nilai tahanan jenis yang semakin tinggi diduga sebagai zona transisi antara lapisan penudung dan reservoir. Dengan demikian keberadaan puncak reservoir dari sistem panas bumi diperkirakan pada kedalaman 700 meter hingga 800 meter. Keberadaan zona dalam lingkaran garis biru putus-putus diperkirakan sebagai zona menarik untuk sistem panas bumi berdasarkan penarikan dari hasil sebaran tahanan jenis perkedalaman hasil pemodelan 2-D dan 3-D (Gambar 8). Kemungkinan zona tersebut masih membuka ke arah utara daerah penelitian.

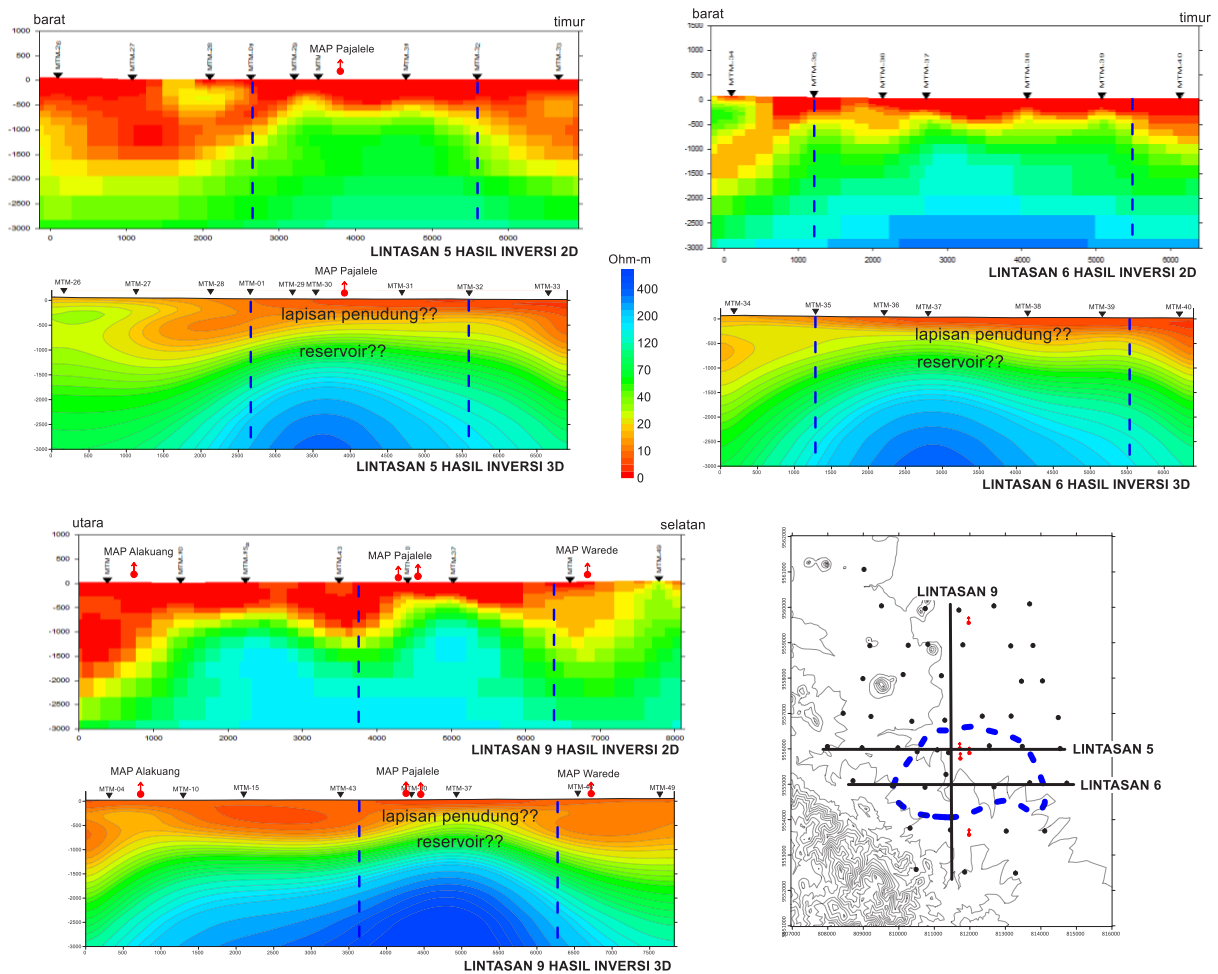




Gambar 8. Peta tahanan jenis hasil pemodelan 2-D dengan kedalaman bervariasi



Gambar 9. Peta tahanan jenis hasil pemodelan 3-D dengan kedalaman bervariasi



Gambar 10. Penampang tahanan jenis hasil pemodelan 2-D dan 3-D pada lintasan 5, lintasan 6, dan lintasan 9

Gambar 10 merupakan penampang hasil pemodelan data MT lintasan 5 dan 6 berarah barat - timur, dan lintasan 9 berarah utara - selatan. Model ketiga penampang tersebut yang memiliki nilai lapisan tahanan jenis rendah < 20 Ohm-m (yang dibatasi oleh garis biru putus-putus) diasumsikan sebagai batuan penudung sesuai dengan hasil analisis batuan ubahan oleh tim geologi bahwa batuan tersebut kaya akan mineral lempung (argilik) berupa *nontronite*, *halloysite*, dan *montmorilonite* (Anonim, 2008). Litologi pembentukan reservoir diduga berupa batuan sedimen Formasi Walanae yang kaya akan rekahan dan bersifat permeabel. Sifat *permeabel* ini diakibatkan oleh rekahan hasil aktifitas Sesar Massepe yang bertindak sebagai pengontrol munculnya mata air panas Pajalele dan Alakuang, atau akibat sifat fisis batuan itu sendiri yang

banyak mengandung pori (*porous*) terutama pada batuan sedimen klastik. Sebaran tahanan jenis secara lateral hasil pemodelan 3-D menghasilkan perubahan zona tahanan jenis rendah < 20 Ohm-m di sekitar mata air panas Pajalele yang dianggap sebagai zona alterasi yang lebih tegas dibandingkan hasil pemodelan 2-D (Gambar 8 dan Gambar 9). Demikian juga hasil penampang tahanan jenis hasil pemodelan 3-D juga menunjukkan pola sebaran tahanan jenis yang relatif lebih tinggi pada kedalaman yang dalam terutama lintasan 5 dan lintasan 9 (Gambar 10). Model 3-D menunjukkan batas yang lebih halus, sedangkan model 2-D menunjukkan anomali tahanan jenis sedang menerus kedalaman yang lebih dalam, sehingga tidak dapat menginterpretasi ketebalan reservoir dari sistem panas bumi tersebut. Dalam

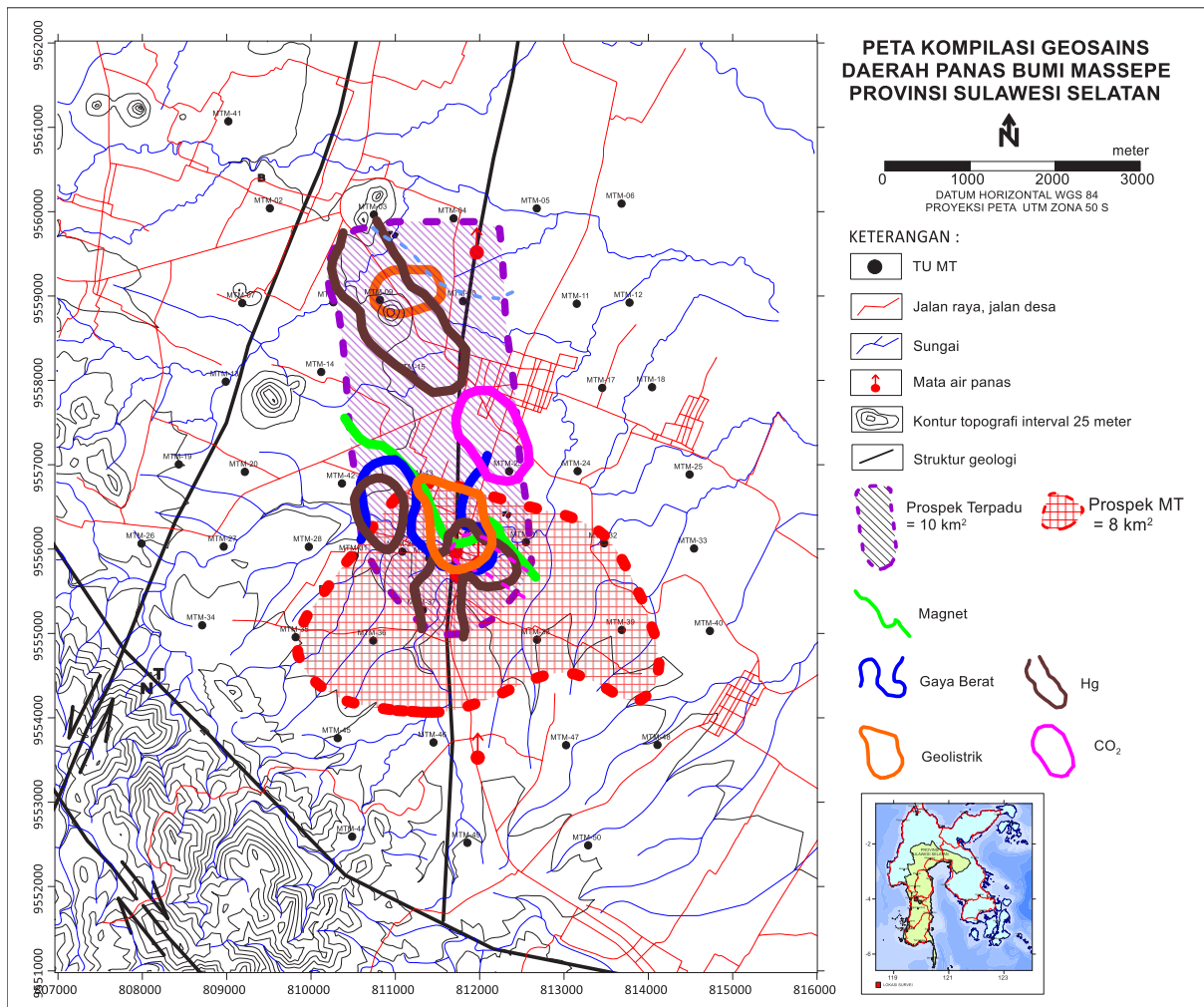
pengertian ini, model 2-D di daerah ini kurang sensitif terhadap struktur yang dalam. Faktor lingkungan geologi yang kompleks juga akan menghasilkan interpretasi model 2-D yang tidak optimal. Sehingga pada kasus daerah ini, model 3-D lebih realistis daripada model 2-D yang dihasilkan (Uchida, T., dan Sasaki, Y., 2006).

Hasil pemodelan 2-D dan 3-D data MT menunjukkan zona perubahan nilai tahanan jenis rendah  $< 20$  Ohm-m di sekitar mata air panas Pajalele diduga sebagai zona alterasi argilik yang kaya akan mineral lempung yang merupakan zona depresi dan terisi oleh sedimen Formasi Walanae dan sebagian tertindih oleh produk vulkanik tua di bagian barat mata air panas Pajalele. Produk lempung konduktif dari alterasi hidrotermal adalah penyebab menjadi zona tahanan jenis rendah diatas reservoir. Keberadaan top reservoir dari sistem panas bumi Masepe diperkirakan berada mulai kedalaman 700 meter hingga 800 meter.

Survei terpadu geologi, geokimia dan geofisika terdahulu memberikan hasil hasil delineasi area prospek yang luas yaitu 10 km<sup>2</sup> meliputi sekitar mata air panas Pajalele dan mata air panas Alakuang. Berdasarkan data tahanan jenis hasil survei geolistrik (konfigurasi Schlumberger) menunjukkan bahwa sebaran tahanan jenis semu pada  $AB/2 = 1000$  meter terlihat sebaran tahanan jenis rendah terkonsentrasi berupa spot-spot di sekitar mata air panas Pajalele dan di bagian baratdaya mata air panas Alakuang. Anomali negatif data gaya berat dan anomali negatif geomagnet juga cenderung terkonsentrasi di sekitar

mata air panas Pajalele (Anonim, 2008). Ketiga anomali geofisika tersebut dikompilasikan dengan anomali sebaran CO<sub>2</sub> dan Hg didelineasi sebagai area prospek panas bumi Masepe. Namun demikian delineasi ini mempunyai batasan yang kurang tegas.

Berdasarkan hasil data MT, perubahan anomali tahanan jenis rendah yang mengindikasikan adanya aktivitas fluida panas bumi yang membentuk batuan bersifat konduktif hanya berada di sekitar mata air panas Pajalele dan meluas ke arah barat dan timur daerah penelitian berupa spot memanjang relatif berarah barat - timur. Pada kedalaman 250 meter, sebaran tahanan jenis rendah  $< 20$  Ohm-m relatif melingkupi seluruh daerah penelitian. Pada kedalaman 500 meter, perubahan anomali tahanan jenis rendah terjadi di sekitar mata air panas Pajalele menjadi relatif meninggi, dan pada kedalaman 750 meter hingga 1000 meter. Perubahan anomali tahanan jenis rendah tersebut terlihat tegas meluas ke arah barat dan timur daerah penelitian dengan luas keprospekan sekitar 8 km<sup>2</sup>. Perkiraan daerah prospek hasil data MT ini masih bersesuaian dengan keberadaan anomali-anomali hasil penyelidikan sebelumnya, sehingga makin mempertegas keyakinan luasan anomali sistem panas bumi di bagian selatan daerah panas bumi Masepe (Gambar 11). Selain itu, anomali tahanan jenis hasil MT juga cukup tegas memperlihatkan perubahan nilai tahanan jenis di kedalaman sehingga dapat untuk memperkirakan kedalaman puncak reservoir dari sistem panas bumi Masepe yang diduga berada pada kedalaman 700 meter hingga 800 meter.



**Gambar 11.** Perkiraan area prospek hasil pemodelan inversi MT dikompilasikan dengan area prospek hasil data geosains pada penyelidikan sebelumnya

**KESIMPULAN**

Hasil pemodelan inversi 2D dan 3D data magnetotelurik di daerah panas bumi Masepe menunjukkan area prospek atau zona *upflow* berada di sekitar mata air panas Pajalele seluas 8 km<sup>2</sup>. Hasil delineasi ini diyakini lebih akurat dibandingkan dengan area prospek hasil delineasi menggunakan data tahanan jenis survei geolistrik, karena pada survei magnetotelurik penetrasi jauh lebih dalam. Perubahan anomali tahanan jenis di kedalaman dari data magnetotelurik juga lebih tegas memperlihatkan kedalaman puncak reservoir dimulai pada kedalaman 700 meter hingga 800 meter yang berada pada satuan batuan sedimen laut Formasi Walanae. Pola anomali tahanan jenis dari

data magnetotelurik juga dapat menjelaskan keberadaan struktur geologi di daerah panas bumi Masepe terutama struktur Sesar Masepe berarah relatif utara-selatan yang mengontrol kemunculan mata air panas di Pajalele dan Alakuang.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi atas pemberian ijin untuk penulisan makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Bidang Panas Bumi dan rekan-rekan di Bidang Panas Bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, E., Crosby, D., dan Ussher, G. (2000): Bulls Eye - Simple Resistivity Imaging to Reliably Locate the Geothermal Reservoir, Proceeding World Geothermal Congress, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000
- Anonim, 2008, Survei Terpadu Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Masepe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan, Prosiding Hasil Kegiatan Lapangan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun Anggaran 2008, Bandung.
- Anonim, 2015, Sistem Panas Bumi Non-Vulkanik di Sulawesi, ISBN: 978-602-7928-114.
- Chave, A. dan Jones, A.G. (2012): The Magnetotelluric Method, Cambridge University Press.
- Geosystem SRL, 2011, A guide to using WinGLink, the User's Manual
- Grandis, H., 2009, Pengantar pemodelan inversi geofisika, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Mackie, R., Rodi, W., dan Watts, M. D., 2001, 3-D magnetotelluric inversion for resource exploration, Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists 71<sup>st</sup> Annual Meeting, 1501-1504.
- Simpson, F. dan Bahr, K, 2005, *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press.
- Siripunvaraporn, W., 2006, "WSINV3-DMT version 1.0.0 for Single Processor Machine, User Manual, Department of Physics, Faculty of Science Mahidol University, Rama 6 Rd., Rachatawee, Bangkok 10400.
- Rodi, W., dan Mackie, R.L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion, *Geophysics Journal International*, 66(1):174-187
- Sasaki, Y., 1999, 3-D inversion of electrical and electromagnetic data on PC, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics, 128-131.
- Uchida, T, dan Sasaki, Y., 2006, Stable 3-D Inversion of MT data and its application to geothermal exploration, *Exploration Geophysics*, 223-230.
- Zhdanov M. S., Fang, S., dan Hursin, G., 2000, Electromagnetic inversion using quasi-linear approximation, *Geophysics*, 65, 1501-1513.

|           |                   |
|-----------|-------------------|
| Diterima  | : 22 Maret 2019   |
| Direvisi  | : 12 April 2019   |
| Disetujui | : 30 Agustus 2019 |