TANAH GOYANG
JURNAL GEOSAINS
e-ISSN: 3026-3263
Volume 2, Nomor 1 | Mei 2024

Analisis Sebaran Panas Bumi Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas di Daerah Panasbumi "S", Provinsi Sumatra Barat

Analysis of Geothermal Distribution Using Resistivity Method in "S" Geothermal Area, West Sumatra Province

Swenly Yolanda[1*], Warsa[2], Resti Limehuwey[1]

[1]Program Studi Teknik Geofisika Universitas Pattimura, Jln. Ir. M. Putuhena, Poka, Ambon

[2]Program Studi Teknik Geofisika Institut Teknologi Bandung, Jln. Ganesa No.10, Bandung 40132

swenly0408@gmail.com

Diterima: 09 Februari 2024; Disetujui: 25 April 2024

DOI: 10.30598/tanahgoyang.2.1.37-51

Kata Kunci:
Damped-least square
Geotermal
Inversi
Tahanan jenis

Abstrak

Provinsi Sumatra Barat merupakan wilayah yang memiliki potensi panasbumi sebesar 1.6 GWe, dan tersebar di 16 titik. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode resistivitas dalam mengkaji daerah panasbumi "S" dan diolah dengan teknik *inverse damped-least square*. Metode ini dapat memetakan lapisan bawah permukaan secara optimal melalui sifat kelistrikan pada lapisan batuan tersebut dan dapat memperkecil RMS *error* yang dihasilkan dari proses pemodelan data. Metode inversi tersebut diuji dengan metode inversi melalui IP2WIN. Hasil *inverse damped-least square* memberikan 5 sampai 6 lapisan bawah permukaan yang sama dengan hasil inversi menggunakan IP2WIN. RMS *error* dari *inverse damped-least square* pada setiap titik berada pada rentang 0.8 – 2.63, sehingga hasil inversi cukup akurat dan valid. Model penampang 2D dibuat dan tersusun atas *top soil*, andesit piroksen, batupasir, batulempung dan lapisan penudung berupa batulempung. Sebaran panasbumi diinterpretasi seluas 7.8 km² berada pada area resistivitas rendah yang memanjang dari manifestasi Air Panas Takis, Air Panas Sungai Limau, dan Air Panas Padangbaru.

Keywords:
Damped-Least Square
Geothermal
Inversion
Resistivity

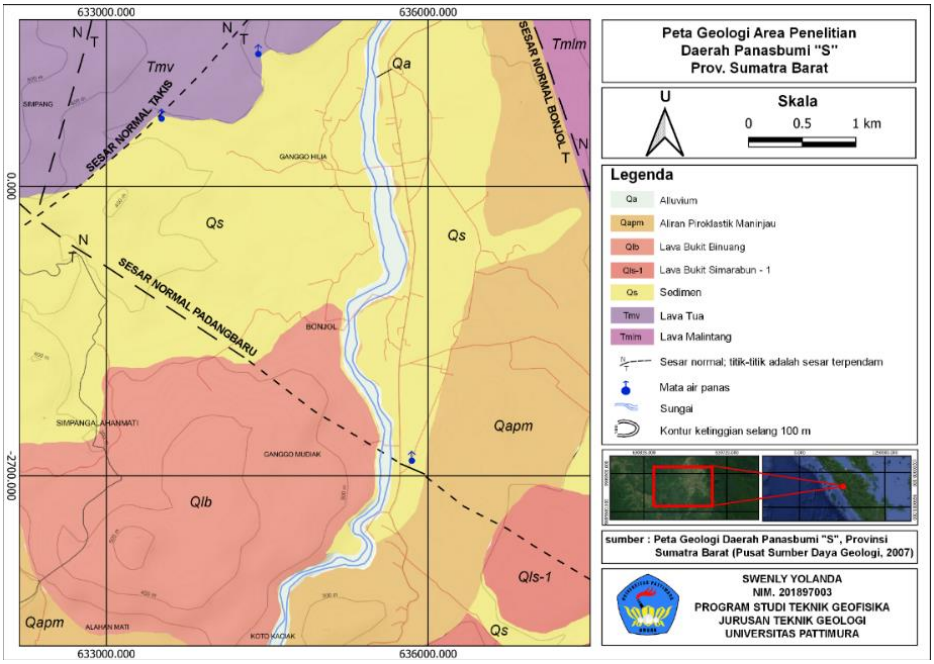
Abstract

West Sumatra Province is an area that has geothermal potential of 1.6 GWe, and is spread over 16 points. This study aims to apply the resistivity method in studying the geothermal area "S" and is processed by the inverse damped-least square modeling technique. This method can optimally map the subsurface layer through the electrical properties of the rock layer and can minimize the RMS error resulting from the data modeling process. The inversion method was tested with the inversion method via IP2WIN. The results of the inverse damped-least square modeling provide 5 to 6 subsurface layers which are the same as the inversion results using IP2WIN. The RMS error of the inverse damped-least square at each point is in the range of 0.8 – 2.63, so the inversion results are quite accurate and valid. A 2D cross-sectional model is made and is composed of top soil, andesite pyroxene, sandstone, claystone, and the caprock is claystone. Geothermal distribution is interpreted as covering area 7.8 km² in a low resistivity area that extends from the manifestations of Takis Hot Water, Limau Hot Water, and Padangbaru Hot Water.

1. PENDAHULUAN

Provinsi Sumatra Barat merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki prospek panasbumi cukup besar yaitu 1.656 MWe, dan tersebar di 16 titik. Daerah penelitian "S" merupakan salah satu lokasi panasbumi yang berada pada Kabupaten Pasaman, Provinsi Sumatra Barat dengan potensi yang cukup besar yaitu 100 MWe dengan temperatur air panas antara 49.7°C – 87.9°C (Pusat Sumber Daya Geologi, 2007).

Lokasi penelitian berada pada Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping (Rock dkk., 1983) dan Peta Geologi Lembar Padang (Kastowo dkk., 1973) yang menyatakan bahwa daerah ini tersusun atas batuan sedimen, metasedimen, batuan gunungapi, endapan permukaan, batuan malihan serta batuan terobosan. Area penelitian tepatnya berada pada bagian tengah Daerah Panasbumi "S". Area ini melewati beberapa satuan batuan di permukaan yaitu Satuan Alluvium (Qa), Satuan Aliran Piroklastik Maninjau (Qapm), Satuan Lava Bukit Binuang (Qlb), Satuan Lava Bukit Simarabun (Qls-1), Satuan Sedimen (Qs), Satuan Lava Tua (Tmv), dan Satuan Lava Malintang (Tmlm). Selain itu, area penelitian juga dilewati oleh Sesar Takis dan Sesar Padangbaru. Manifestasi yang muncul di permukaan berupa manifestasi Mata Air Panas Takis (APT), Mata Air Panas Sungai Limau (APL), dan Mata Air Panas Padangbaru (APPB) (Gambar 1).

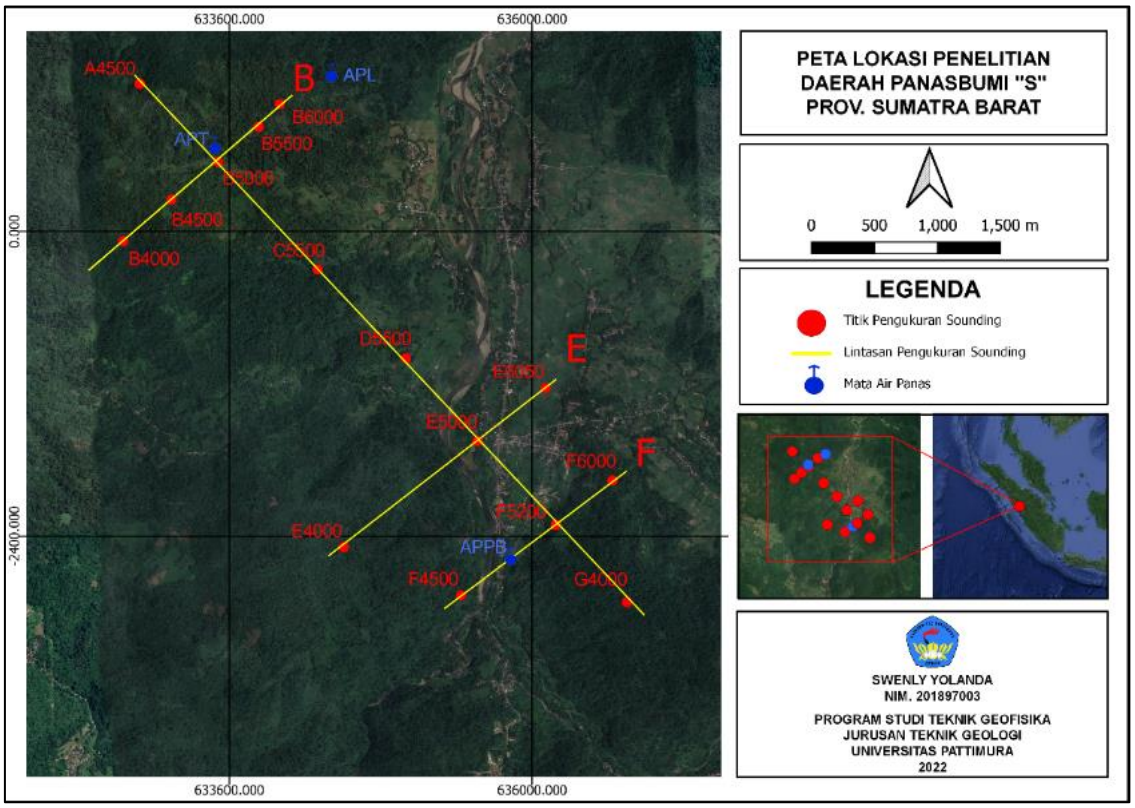


Gambar 1. Peta Geologi Area Penelitian Panasbumi "S", Provinsi Sumatra Barat (modifikasi dari Pusat Sumber Daya Geologi, 2007).

Untuk melihat sebaran panas bumi di Daerah Panas Bumi "S" maka dapat dilakukan penelitian geofisika menggunakan metode geolistrik dengan pengukuran *vertical electrical sounding* (VES). Data geolistrik dapat diolah menggunakan pemodelan *inverse damped-least square* dan hasilnya dibandingkan dengan inversi menggunakan *software* IP2WIN. Tujuan penelitian ini ialah untuk menguji validitas *inverse damped-least square,* melihat model bawah permukaan, dan menganalisa sebaran panasbumi.

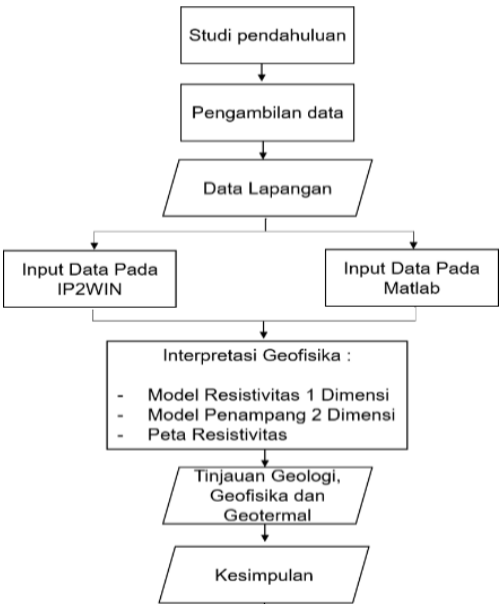
2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Daerah Panasbumi "S" Provinsi Sumatra Barat (Gambar 2) dengan menggunakan 15 titik data geolistrik *sounding* konfigurasi schlumberger dari Pusat Sumber Daya Geologi.



Gambar 2. Peta Lokasi Daerah Penelitian Panasbumi "S" (Google Satelite, 2022).

Dalam penelitian ini, dilakukan peninjauan geologi dan geokimia daerah penelitian. Selanjutnya, data *sounding* diolah secara *forward modeling* dan *inverse modeling*. Proses inversi dilakukan pada *software* IP2WIN dan *inverse damped-least square* pada *software* Matlab R2021a. Kedua hasil inversi dibandingkan satu sama lain sehingga dapat diuji validitas metode *inverse damped-least square.* Hasil pengolahan data dilakukan interpretasi secara geofisika. Kemudian dilakukan tinjauan kembali mengenai geologi, geofisika, dan geotermal area penelitian sehingga dapat ditarik kesimpulan (Gambar 3).



Gambar 3. Tahapan Penelitian.

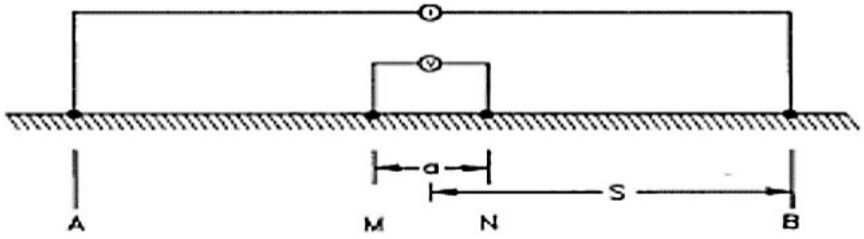
2.1.Metodologi

Metoda geolistrik dilakukan dengan mengalirkan arus listrik dari dua buah elektroda arus ke dalam bumi, kemudian diamati potensial yang terukur melalui dua buah elektroda potensial yang dipasang di tempat lain. Aliran arus yang melewati lapisan dan media di bawah permukaan akan memberikan nilai resistivitas yang dapat menjadi acuan dalam menentukan jenis lapisan di bawah permukaan (Everett, 2013). Namun, karena adanya berbagai material di bawah permukaan, nilai resistivitas terukur merupakan kombinasi nilai resistivitas berbagai macam material. Untuk memperoleh nilai resistivitas sesungguhnya atau resistivitas semu, dapat dilakukan pengolahan data selanjutnya yaitu inversi (Santoso, 2002). Adapun beberapa nilai resistivitas batuan secara umum seperti pada Tabel 1 (Telford dkk., 1990).

Table 1. Nilai resistivitas beberapa bahan (Telford dkk., 1990).

Jenis Batuan	Rentang Resistivitas (Ωm)
Granite Porphyry	$4.5 \times 10^3\ (wet) - 1.3 \times 10^6\ (dry)$
Feldspar Porphyry	$4 \times 10^3\ (wet)$
Syenite	$10^2 - 10^6$
Diorite Porphyry	$1.9 \times 10^3\ (wet) - 2.8 \times 10^4\ (dry)$
Porphyrite	$10 - 5 \times 10^4\ (wet) - 3.3 \times 10^3\ (dry)$
Carbonatized Porphyry	$2.5 \times 10^3\ (wet) - 6 \times 10^4\ (dry)$
Quartz Diorite	$2 \times 10^4 - 2 \times 10^6\ (wet) - 1.8 \times 10^5\ (dry)$
Porphyry (various)	$60 - 10^4$
Dacite	$2 \times 10^4\ (wet)$
Andesite	$4.5 \times 10^4\ (wet) - 1.7 \times 10^2\ (dry)$
Diabase (various)	$20 - 5 \times 10^7$
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$
Gabbro	$10^3 - 10^6$
Basalt	$10 - 1.3 \times 10^7\ (dry)$
Olivine norite	$10^3 - 6 \times 10^4\ (wet)$
Peridotite	$3 \times 10^3\ (wet) - 6.5 \times 10^3\ (dry)$
Hornfels	$8 \times 10^3\ (wet) - 6 \times 10^7\ (dry)$
Schists (calcareous and mica)	$20 - 10^4$
Tuffs	$2 \times 10^3\ (wet) - 10^5\ (dry)$
Graphite schist	$10 - 10^2$
Slates (various)	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Gneiss (various)	$6.8 \times 10^4\ (wet) - 3 \times 10^6\ (dry)$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8\ (dry)$
Skarn	$2.5 \times 10^2\ (wet) - 2.5 \times 10^8\ (dry)$
Quartzites (various)	$10^2 - 2 \times 10^8$
Consolidated shales	$20 - 2 \times 10^3$
Argilites	$10 - 8 \times 10^2$
Conglomerates	$2 \times 10^8 - 10^4$
Sandstones	$1 - 6.4 \times 10^8$
Limestones	$50 - 10^7$
Dolomite	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Unconsolidated wet clay	20
Marls	3 – 70
Clays	1 – 100
Oil sands	4 - 800

Nilai dari tahanan jenis semu akan bergantung pada rangkaian elektroda yang digunakan, yang akan didefinisikan oleh faktor geometri K. Konfigurasi elektroda yang digunakan pada penelitian ini ialah konfigurasi schlumberger (Gambar 4).



Gambar 4. Konfigurasi Schlumberger (Reynolds, 1997).

Spasi elektroda arus pada konfigurasi ini akan lebih jauh dengan elektroda potensial (Gambar 4). Untuk memperoleh nilai tahanan jenis semu, digunakan rumus :

$$\rho_a = \pi\left(s^2 - \frac{a^2}{4}\right)\frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

2.1.1. *Forward Modeling*

Pada *forward modeling* geolistrik, lapisan bumi diasumsikan sebagai lapisan homogen dan isotropik. Hal tersebut dinyatakan dalam suatu persamaan integral yang menyatakan bahwa resistivitas semu merupakan fungsi dari resistivitas dan ketebalan setiap lapisan. Persamaan tersebut merupakan *Hankel Integral* dengan rumus :

$$\rho_a = s^2 \int_0^\infty T(\lambda)\, J_1(\lambda S)\lambda d\lambda \quad (2)$$

dengan ρ_a merupakan resistivitas semu, *S* adalah setengah dari jarak antar elektroda arus, J_1 adalah fungsi *Bessel* orde satu, dan $T(\lambda)$ adalah fungsi transformasi resistivitas (Bahri *et* al, 2022; Ekinci & Demirci, 2008). Fungsi tersebut dapat dinyatakan dalam rumus :

$$T_i(\lambda) = \frac{T_{i+1}(\lambda) + \rho_i tanh(\lambda h_i)}{1 + T_{i+1}(\lambda)\tanh(\lambda h_i)/\rho_i} \quad i = n-1, \ldots, 1 \quad (3)$$

dimana n merupakan jumlah lapisan, ρ_i adalah nilai tahanan jenis lapisan ke-*i*, dan h_i adalah nilai ketebalan lapisan ke-*i.* Persamaan tersebut digunakan untuk proses *forward modeling* data resistivitas semu *sounding* 1-D. Persamaan di atas dapat dinyatakan dalam metode filter linier dengan rumus (Ghosh, 1970):

$$\rho_a = \sum_i T_i(\lambda) f_i \quad (4)$$

dengan f_i merupakan harga koefisien filter linier.

2.1.2. *Inverse Damped-Least Square*

Metode ini digunakan untuk memperkecil jumlah selisih kuadrat antara setiap titik pada model pengamatan dan model perhitungan sehingga diperoleh model yang paling ideal. Inversi ini dimulai dengan proses *fitting* antara data pengukuran dan data perhitungan (Gambar 4). Dalam prosesnya akan digunakan *damping factor* sehingga tidak terjadi *overprocessed* pada data yang menyebabkan berkurangnya akurasi data (Grandis, 2009). Metode *damped-least square* dirumuskan sebagai berikut (Levenberg, 1944) :

$$\Delta m = (A^T A + \varepsilon^2 I)^{-1} A^T \Delta d \quad (5)$$

dengan Δm = vektor perbedaan parameter model

Δd = vektor perbedaan data

A = matriks Jacobian

I = matriks identitas

ε = *damping factor*

Untuk membentuk matriks Jacobian, diperlukan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD) (Meju, 1994) dan dinyatakan dalam persamaan :

$$A = USV^T \quad (6)$$

Dimana untuk *n* data dan *p* parameter, setiap komponen matriks adalah *U(n×p), V(p×p),* dan *S(p×p).* S merupakan matriks diagonal yang berisi $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_p$ atau dapat disebut sebagai *singular value* dari matriks A. Sehingga, jika SVD diterapkan pada *damped-least square* (5) akan menjadi :

$$\Delta_\rho = (VS^2V^T + \varepsilon^2 I)^{-1} VSU^T \Delta d \quad (7)$$

Kemudian diterapkan *damping factor* yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

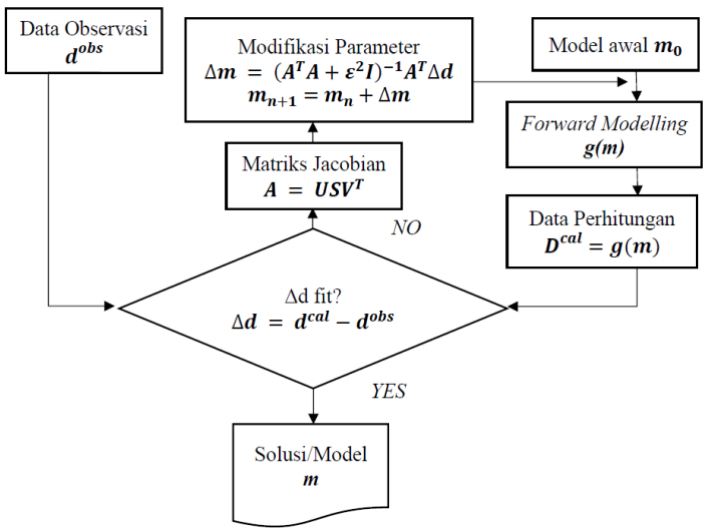
$$(VS^2V^T + \varepsilon^2 I) = Vdiag(\lambda_j^2 V^T + \varepsilon^2 I)$$

$$= Vdiag(\lambda_j^2 + \varepsilon^2)V^T \quad (8)$$

Selanjutnya inversi dari matriks $(VS^2V^T + \varepsilon^2 I)$ dihitung dan disubstitusikan kembali ke persamaan (7) sebagai berikut :

$$\Delta\rho = Vdiag\left\{\frac{\lambda_j}{\lambda_1^2+\varepsilon^2}\right\} U^T \Delta \quad (9)$$

Dengan demikian telah diperoleh bentuk perhitungan modifikasi parameter model pada *inverse damped-least square.*



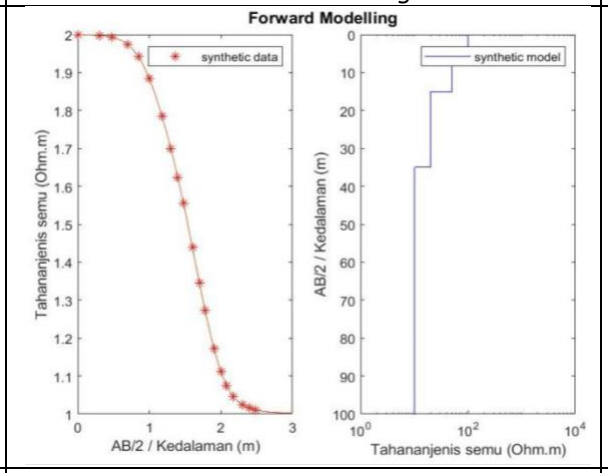
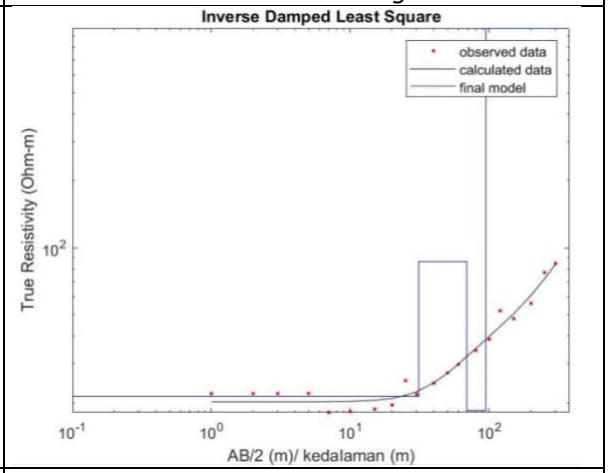
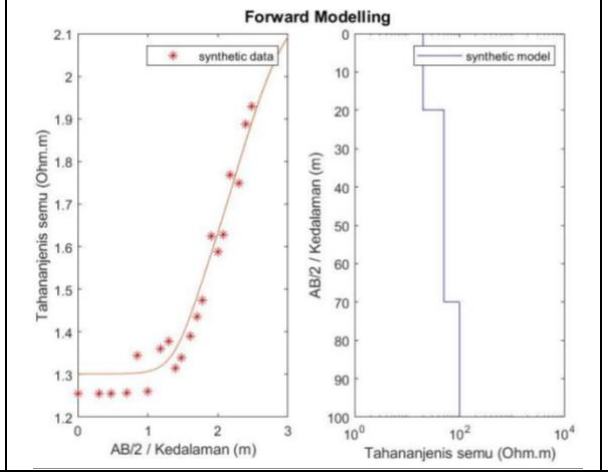
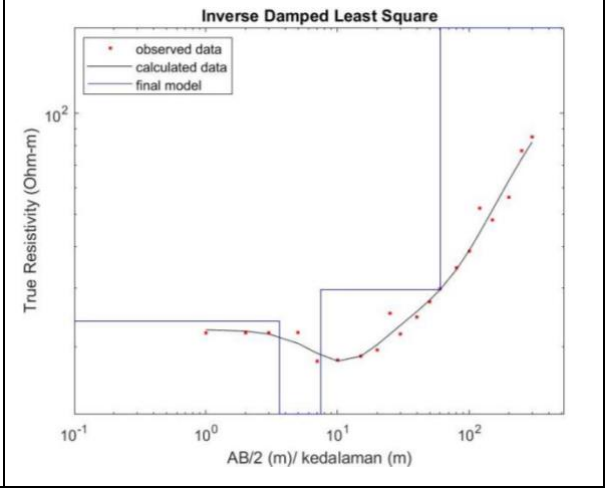
Gambar 5. Algoritma *Inverse Damped-Least Square*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Forward Modeling

Tahapan *forward modeling* dilakukan untuk menguji respon program *inverse damped-least square* terhadap model sintetik hasil *forward modeling*. Model yang digunakan merupakan model 4 lapisan dengan model A tanpa *noise* dan model B dengan *noise* 10%. Respon program inversi terhadap data sintetik menghasilkan kurva yang *fit* (Tabel 2). Hasil *inverse damped-least square* pada data sintetik memberikan model yang fit dengan RMS *error* model A sebesar 0.59 setelah iterasi ke-50 dan model B sebesar 2.81 setelah iterasi ke-39. Data dan parameter model sintetik juga memiliki perbedaan kecil dengan hasil dari inversi. Hal tersebut bahwa membuktikan program *inverse damped-least square* dapat diaplikasikan pada data *sounding* studi kasus Daerah Panasbumi "S", Provinsi Sumatra Barat.

Table 2. Model sintetik dan hasil inverse damped-least square data sintetik.

	Forward Modeling	*Inverse Modeling*
A		
B		

3.2. Implementasi Inverse Damped-Least Square pada Data Lapangan Model 1-D

Proses inversi dilakukan dengan metode *inverse modeling* pada *software* IP2WIN dan *inverse damped-least square* pada Matlab. Pemodelan dalam *inverse damped-least square* dilakukan dengan memasukkan model inisial berupa nilai resistivitas dan nilai kedalaman sembarang. Pada setiap titik dimasukkan nilai resistivitas

yang homogen karena tidak diketahui model lapisan bawah permukaan daerah penelitian. Pada pembahasan ini digunakan hasil dari titik D-5500 dan G-4000.

Hasil inversi titik D-5500 menunjukkan bahwa kedua metode inversi sama-sama memberikan 5 lapisan resistivitas. Selain itu, terlihat bahwa *error* pada IP2WIN sebesar 2.21% dengan nilai resistivitas lapisan pertama diperoleh sebesar 73.1 Ωm dengan ketebalan 1.09 pada kedalaman 0 - 1.09 meter (Tabel 3). Sedangkan hasil *inverse damped-least square* memberikan rms *error* sebesar 0.85 (Tabel 4) dengan lapisan pertama memiliki nilai resistivitas 72.14 Ωm, ketebalan 1.13 meter, serta kedalaman 0 - 1.13 meter (Tabel 5). Hal yang sama juga terjadi pada titik G-4000 yang memiliki perbedaan kecil antara hasil *inverse damped-least square* dan hasil inversi pada IP2WIN. Perbedaan yang kecil pada kedua hasil inversi menunjukkan bahwa metode *damped-least square* sudah dapat memberikan model inversi yang *fit*.

Table 3. Hasil Inversi Pada IP2WIN.

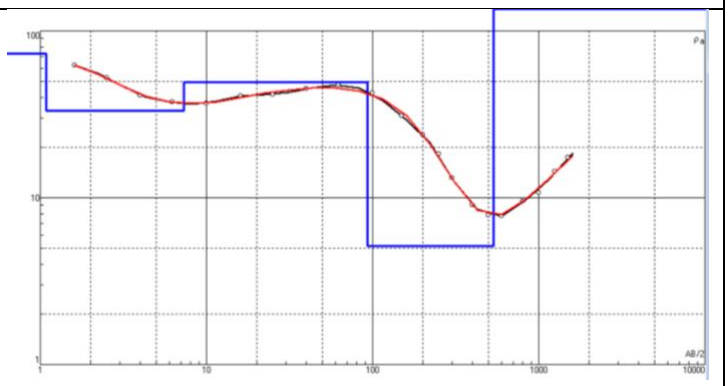
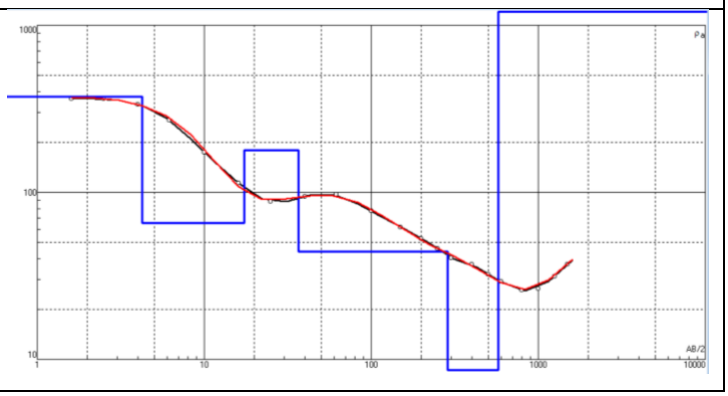
Nama	Model Inversi			Model
	Resistivitas	Ketebalan	Kedalaman	
D-5500	73.1	1.09	1.09	
	33.3	6.21	7.3	
	49.4	85.6	92.9	
	5.16	443	536	
	1439	-	-	
G-4000	374	4.25	4.25	
	65.5	13.1	17.4	
	179	19.3	36.7	
	44.2	250	287	
	8.64	290	576	
	1357	-	-	

Table 4. Hasil *Inverse Damped-Least Square.*

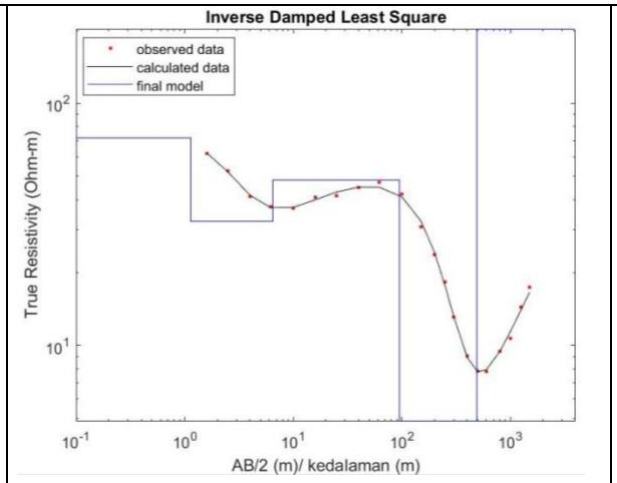
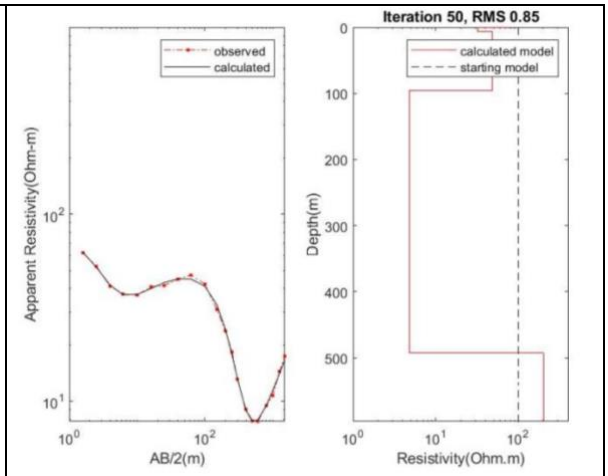
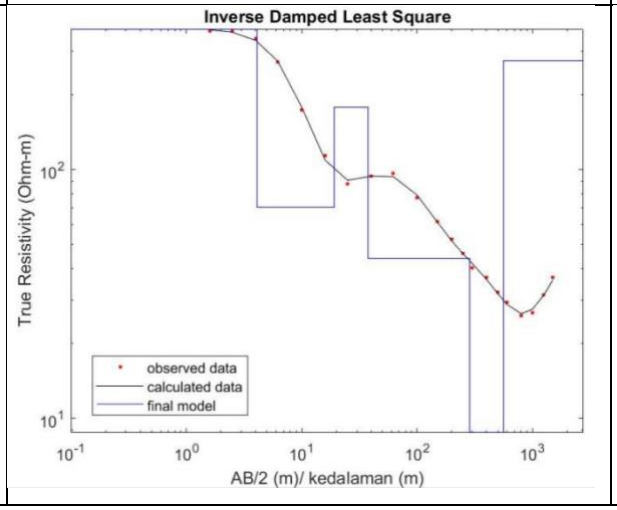
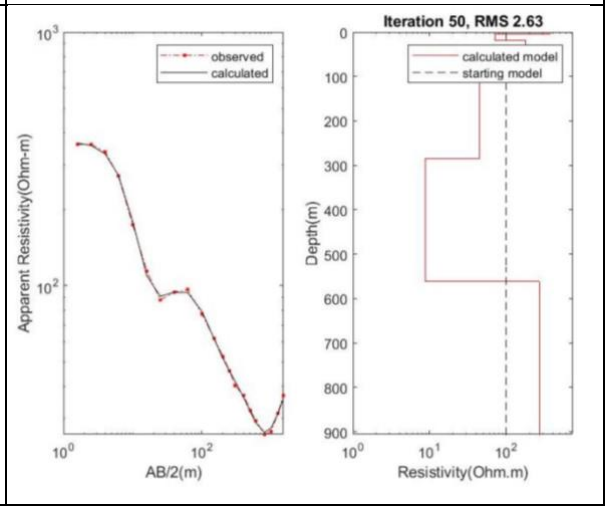
D-5500		
G-4000		

Table 5. Nilai Resistivitas, Ketebalan, dan Kedalaman melalui *Inverse Damped-Least square.*

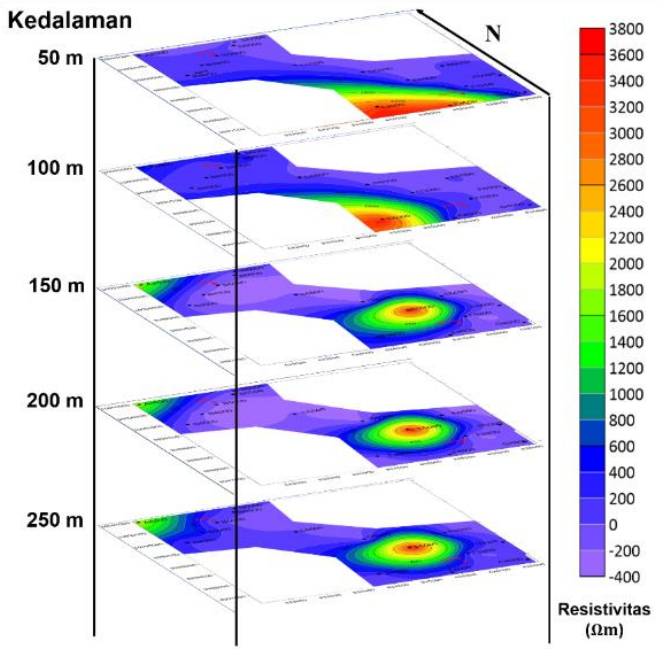
Nama	Model Inversi			Nama	Model Inversi		
	Resistivitas	Ketebalan	Kedalaman		Resistivitas	Ketebalan	Kedalaman
D-5500	72.14	1.13	1.13	G-4000	368.41	4.14	4.14
	32.52	5.36	6.49		70.69	14.98	19.12
	48.31	89.13	95.62		178.74	18.49	37.61
	4.86	397.08	492.70		44.02	246.52	284.13
	203.01	-	-		8.75	276.80	560.94
					273.71	-	-

3.3. Peta Resistivitas

Nilai resistivitas paling rendah pada setiap kedalaman rata-rata berada pada Lintasan B, C5500, D5500, E5000, E6050, Lintasan F, dan G4000. Jika mengikuti arah penyebaran nilai resistivitasnya, nilai rendah

berada pada arah barat daya-tenggara, sedangkan nilai resistivitas tinggi berada pada arah selatan dan barat laut paling atas (Gambar 9).

Berdasarkan peta geologi (Gambar 1), pada kedalaman 50 – 250 meter terdapat beberapa titik dengan nilai resistivitas rendah - menengah karena tersusun atas Satuan Sedimen Danau (Qs). Sedangkan titik-titik yang cenderung resistif disebabkan oleh adanya Satuan Aliran Lava 1 Bukit Binuang (Qlb) dan Satuan Lava Tua (Tmv) yang memiliki dominan batuan beku andesit piroksen, serta Satuan Aliran Piroklastik Maninjau (Qapm) pada daerah tersebut.



Gambar 6. Peta Resistivitas per Kedalaman.

3.4. Model Penampang 2-D

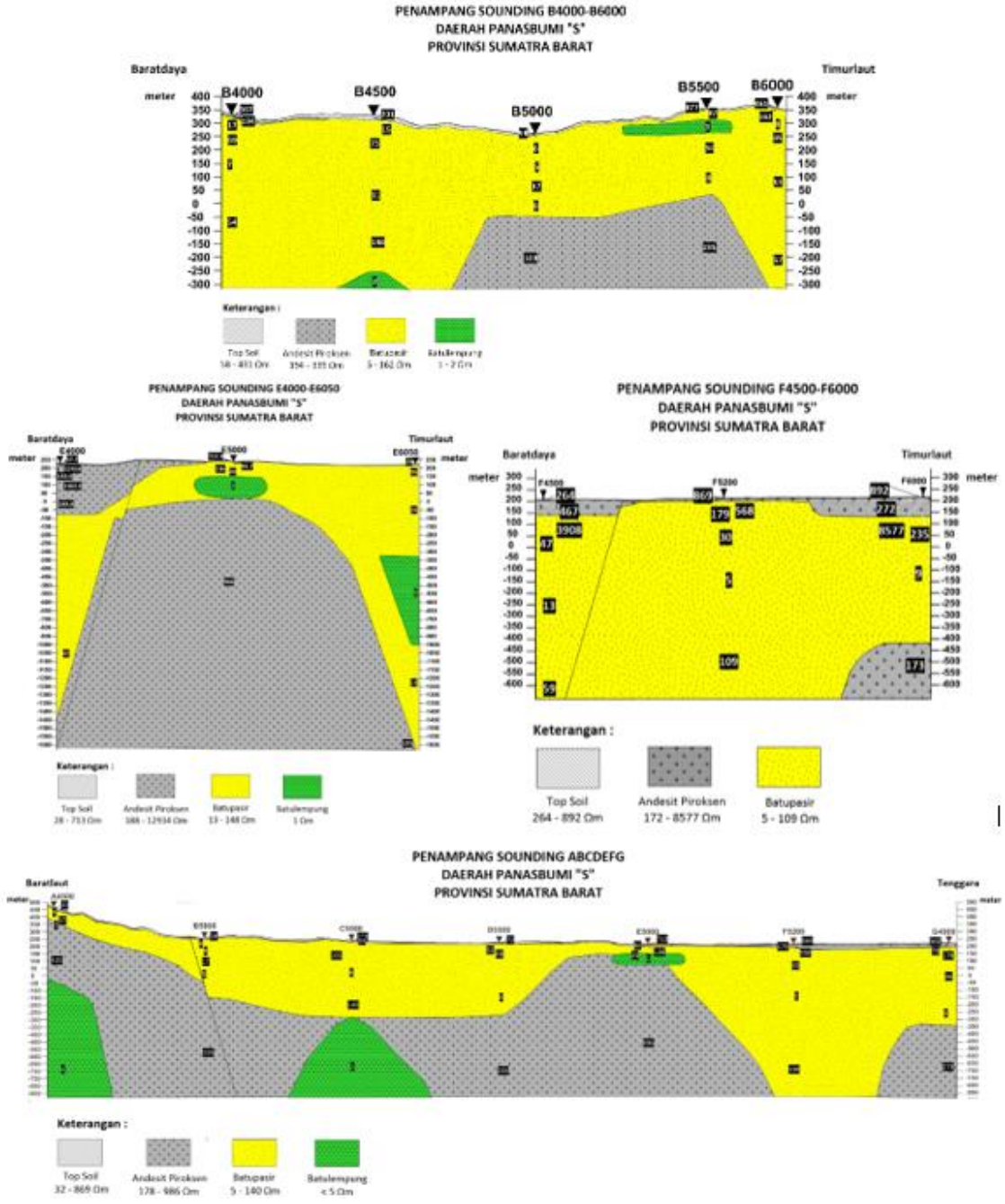
Penampang 2-D dibentuk oleh beberapa titik sounding yang memperlihatkan model bawah permukaan secara 2 dimensi. Pembuatan model penampang 2-D perlu memperhatikan elevasi dari setiap titik *sounding* sehingga lapisan di bawah permukaan dapat terbentuk sesuai kondisi sebenarnya.

Berdasarkan hasil *inverse damped-least square* dapat diklasifikasikan lapisan tanah atau batuan pada daerah penelitian dengan rentang resistivitas yang berbeda-beda seperti pada Tabel 6. Penentuan lapisan tanah atau batuan didasarkan pada rentang nilai resistivitas jenis-jenis batuan seperti pada Tabel 1 dan beberapa singkapan yang ditemukan di area penelitian yaitu andesit piroksen, batupasir, dan batulempung (Pusat Sumber Daya Geologi, 2007).

Table 6. Klasifikasi lapisan tanah atau batuan berdasarkan rentang nilai resistivitas daerah penelitian.

Lapisan Tanah atau Batuan	Rentang Nilai Resistivitas (Ωm)
Top soil	28 - 892
Batuan beku (andesit piroksen)	172 - 12934
Batuan sedimen (batupasir)	5 - 162
Batuan sedimen (batulempung)	< 5

Pada lintasan B, E, F, dan ABCDEFG terdapat beberapa lapisan yaitu lapisan *top* soil, lapisan andesit piroksen, lapisan batupasir, dan lapisan batu lempung (Gambar 7). Pada lintasan B ditemukan lapisan dengan nilai resistivitas 2 Ωm diduga merupakan lapisan penudung atau *caprock* pada kedalaman > 500 meter dengan jenis batuan batu lempung karena memiliki nilai resistivitas 2 Ωm. Sedangkan pada lintasan E dan F ditemukan Sesar Normal Padangbaru yang memotong lapisan batuan beku dan batuan sedimen. Sesar tersebut diduga merupakan media keluarnya Mata Air Panas Padangbaru di permukaan. Selain itu, pada penampang lintasan ABCDEFG, ditemukan lapisan penudung atau *caprock* dengan resistivitas < 5 Ωm pada kedalaman > 500 meter. Sesar Normal Takis juga ditemukan pada penampang lintasan ABCDEFG dan diduga merupakan pengontrol munculnya Mata Air Panas Takis di permukaan.

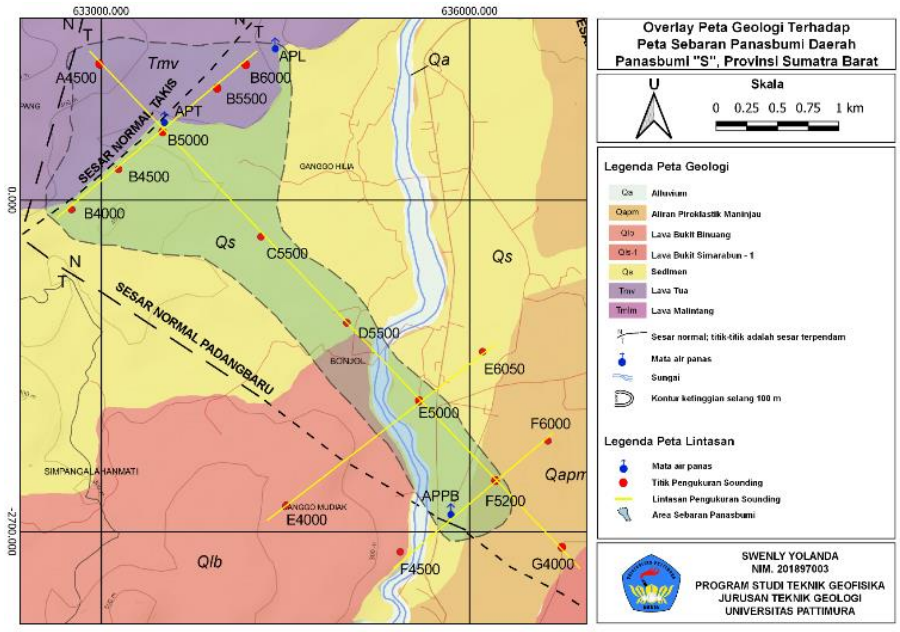


Gambar 7. Penampang Lintasan B, E, F, dan ABCDEFG.

3.5. Analisis Sebaran Panasbumi "S"

Pada daerah penelitian terdapat 3 sampel mata air panas yaitu Air Panas Takis (APT), Air Panas Sungai Limau (APL), dan Air Panas Padangbaru (APPB). Berdasarkan data geokimia dari Pusat Sumber Daya Geologi 2007, ketiga mata air panas memiliki konsentrasi klorida yang lebih tinggi daripada konsentrasi HCO_3 dan SO_4, sehingga air panas ini diindikasikan sebagai *deep water*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa mata airpanas berasal langsung dari reservoir (Nicholson, 1993). Nilai pH netral pada setiap mata air panas juga menunjukkan bahwa fluida asam yang berasosiasi dengan sistem panasbumi telah mengalami kontak dengan batuan disekitarnya. Selain itu, data geokimia Na, K, dan Mg, menunjukkan posisi ketiga mata air panas berada pada *partial equilibrium* yang mengindikasikan bahwa manifestasi air panas dipengaruhi oleh interaksi fluida dengan batuan panas sebelum bercampur dengan air permukaan (Pusat Sumber Daya Geologi, 2007). Manifestasi ini diduga berasal dari fluida panas di bawah Bukit Binuang tepatnya di bawah lokasi munculnya mata Air Panas Takis, secara vertikal naik ke permukaan melewati batuan sedimen dan mengalami pencampuran dengan air permukaan sehingga terjadi penurunan temperatur (didukung dengan posisi pada *partial equilibrium*).

Sebaran manifestasi panasbumi didukung dengan hasil pengukuran metode geolistrik yang mendeteksi adanya lapisan penudung atau *caprock*. Hasil kompilasi data geologi, geofisika, dan geokimia, diperoleh area sebaran panasbumi dengan luas 7.8 km². Jika dilihat pada Gambar 8, area sebaran panasbumi ini melewati daerah dengan geologi permukaan berupa Satuan Lava Tua (Tmv), Satuan Sedimen Danau (Qs), Satuan Aliran Lava 1 Bukit Binuang (Qlb), dan Satuan Aliran Piroklastik Maninjau (Qapm). Singkapan yang ditemukan pada daerah penelitian merupakan andesit piroksen yang diduga merupakan sumber panas. Selain itu, area sebaran ini juga melewati struktur geologi yaitu Sesar Normal Takis di baratdaya, dan Sesar Normal Padangbaru di baratlaut yang diduga sebagai pengontrol munculnya mata air panas di permukaan. Area sebaran panasbumi juga dibatasi oleh area resistivitas rendah yang memanjang dari Air Panas Takis, Air Panas Sungai Limau, dan Air Panas Padangbaru.



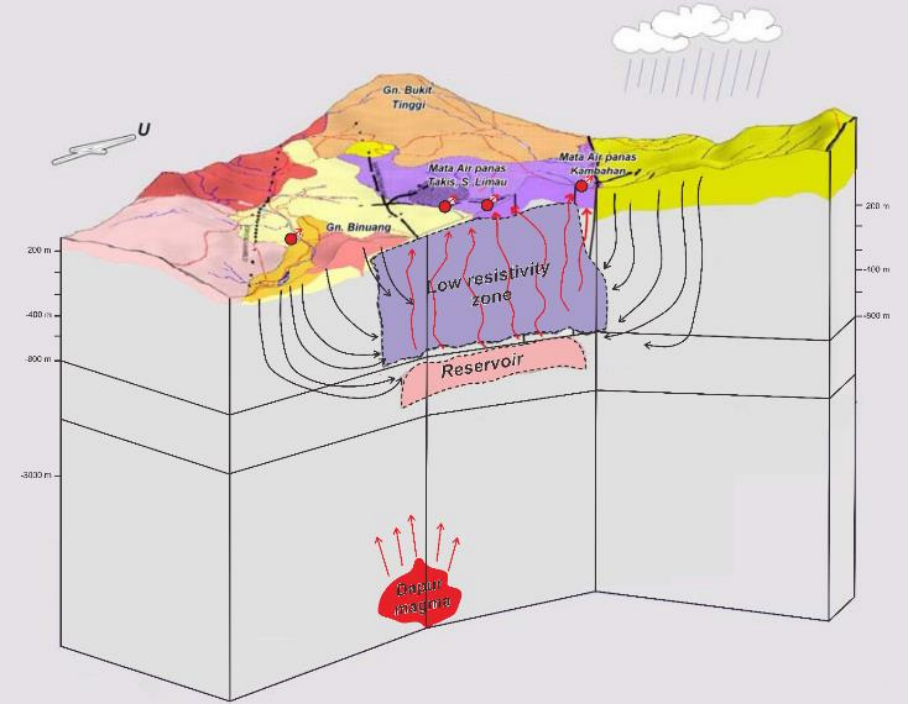
Gambar 8. *Overlay* Peta Geologi Terhadap Peta Sebaran Panasbumi Daerah Panasbumi "S", Provinsi Sumatra Barat.

3.6. Model Sistem Panasbumi Tentatif

Indonesia merupakan wilayah yang terletak di dalam *ring of fire* atau jalur cincin api sehingga terdapat banyak gunung api yang tersebar di pulau Sumatra, Jawa, NTT, Maluku, dan Sulawesi yang memiliki 117 gunung api aktif. Sehingga terbentuk busur vulkanik yang menjadi dasar dari besarnya potensi panasbumi di Indonesia (Katili, 1973). Energi panasbumi berasal dari aktivitas tektonik, dimana adanya interaksi antar lempeng sehingga menimbulkan aktivitas magmatik. Aktivitas tersebut yang memicu terjadinya proses *partial melting* di bawah permukaan sehingga terdapat suatu sumber panasbumi, dan juga terbentuk suatu struktur pengontrol panasbumi tersebut. Sistem panasbumi vulkanik memiliki perpindahan panas yang berkaitan dengan cairan magmatik, piroklastik, dan aliran lava dari area pelepasan panas di sekitar saluran atau kawah letusan (Hochstein dkk., 2015).

Sistem panasbumi yang terletak pada beberapa kilometer di bawah permukaan bumi meliputi uap dan fluida panas yang berpindah ke arah permukaan. Anomali panas yang terekam di permukaan berdasarkan pengukuran yang dilakukan mengindikasikan adanya konsentrasi energi panas pada suatu sistem panasbumi (Broto dkk., 2011). Sistem ini memiliki 4 hal utama yaitu, batuan reservoir yang permeabel, sistem hidrologi yang membawa air ke permukaan, sumber panas (*heat source*), dan batuan penudung (*caprock*). Selain itu, sistem ini dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai parameter, seperti suhu reservoir. Suhu ini pada suatu sistem panasbumi dapat berupa reservoir temperatur rendah (T > 125°C), reservoir temperatur intermediat (T = 125-225°C), dan reservoir temperatur tinggi (T > 225°C) (Hochstein, 1990).

Pada Gambar 9 terdapat model sistem panasbumi tentatif daerah penelitian. Sumber panas dari sistem panasbumi daerah penelitian diduga merupakan sisa panas dapur magma dari kerucut gunung api muda, atau bisa berupa tubuh batuan intrusi muda. Menurut informasi geologi, terdapat Bukit Binuang yang berumur 1.3 ± 0.1 juta tahun (Plistosen) dengan produk batuan andesit yang memiliki kemungkinan menyimpan sisa panas dari dapur magma (Pusat Sumber Daya Geologi, 2007). Hasil pengolahan data geolistrik tidak dapat menjangkau sumber panas tersebut, namun diduga sumber panas berada pada kedalaman > 3000 meter di bawah permukaan laut. Selanjutnya 2 sesar pada area penelitian yaitu Sesar Normal Takis dan Sesar Normal Padangbaru yang dapat menjadi media keluarnya air ke permukaan. Hasil pengolahan data geolistrik dapat mendeteksi keberadaan sesar tersebut pada lintasan E, lintasan F, dan lintasan ABCDEFG yang memotong lapisan batuan beku dan lapisan batuan sedimen. Selain itu, batuan yang diduga sebagai penudung terdeteksi melalui pengolahan data geolistrik dan terdapat pada kedalaman 500-543 meter dengan nilai resistivitas < 5 Ωm. Lapisan penudung tersebut diduga merupakan batulempung dan semakin menebal ke arah selatan. Sedangkan kedalaman lapisan reservoir tidak dapat dideteksi karena keterbatasan metode geolistrik yang hanya bisa menjangkau kedalaman dangkal. Namun, diduga lapisan ini berada pada kedalaman > 600 meter dengan indikasi *caprock* yang berada pada kedalaman 500-543 meter. Reservoir juga diduga merupakan satuan batuan vulkanik tua yang kaya akan rekahan dan bersifat permeabel.



Gambar 9. Model Sistem Panasbumi Tentatif Daerah Panasbumi "S" (Pusat Sumber Daya Geologi, 2007).

4. KESIMPULAN

a) Berdasarkan proses inversi yang dilakukan, 15 titik *sounding* tersusun atas 5-6 lapisan dengan litologi yang berbeda. Kedalaman lapisan tedalam yang terdeteksi ialah 600 meter di bawah permukaan. Lapisan yang diperoleh dari 4 lintasan penelitian yaitu *top soil*, andesit piroksen, batupasir, batulempung, dan lapisan penudung (caprock) berupa batulempung. Sesar Normal Takis dan Sesar Normal Padangbaru juga dideteksi pada penampang sounding lintasan E, F, dan ABCDEFG. Sebaran panasbumi diinterpretasi memiliki luas 7.8 km² berada pada area resistivitas rendah yang memanjang dari manifestasi Air Panas Takis, Air Panas Sungai Limau, dan Air Panas Padangbaru.

b) Hasil *inverse damped-least square* memberikan model dengan nilai RMS *error* 0.85 sampai 2.63. Nilai resistivitas, ketebalan, dan kedalaman pada hasil *inverse damped-least square* dan inversi pada IP2WIN terlihat memiliki perbedaan kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa *inverse damped-least square* sudah dapat memberikan hasil yang cukup akurat dan valid.

DAFTAR PUSTAKA

Bahri, S., Aponno, S. V., and Zulfiah. (2022). Global Optimization Very Fast Simulated Annealing Inversion for The Interpretation of Groundwater Potential. JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi), 8 (3), 225-236. https://doi.org/10.23960/jge.v8i3.233.

Broto, S. dan Putranto, T. T. (2011). Aplikasi Metode Geomagnet Dalam Eksplorasi Panasbumi. *TEKNIK*, 32 (1), 79-87.

Ekinci Y. L. and Demirci A. (2008). A Damped Least-Square Inversion Program for the Interpretation of Schlumberger Sounding Curves. *Journal of Applied Sciences.* 8 (22), 4070-4078.

Everett, M. E. (2013). Near-Surface Applied Geophysics. New York: Cambridge University Press.

Ghosh, D. P. (1970). The Application of Linear Filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity Measurements. Doctoral Thesis. TU Delft.

Grandis, H. (2009). Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI). Jakarta.

Hochstein, M. P. (1990). Classification and Assessment of Geothermal Resources. UNITAR/UNDP Centre For Small Energy Resources, Rome, Italy, 31-59.

Hochstein, M. P. dan Sayogi, S. (2015). Indonesian Volcanic Gothermal Systems. *Proceedings World Geothermal Congress.*

Kastowo, Leo, G. W., Gafoer, S. dan Amin, T. C., (1996). Peta Geologi Lembar Padang, Sumatra, Skala 1:250000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Katili. (1973). Volcanism and Plate Tectonics in The Indonesian Island Arcs. *Tectonophysics*. 26, 165-188.

Levenberg, K. (1944). A Method for The Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. Quarterly of Applied Mathematics, 2, 164-168.

Meju, M. A. (1994). Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysic Course Notes Series, No. 6, 1st Edition, SEG Publisher.

Nicholson, K. (1993). Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Techniques. Berlin: Springer-Verlac Inc.

Pusat Sumber Daya Geologi. (2007). Survei Terpadu Daerah Panas Bumi Bonjol, Kabupaten Pasaman, Provinsi Sumatra Barat. Bandung.

Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, England: John Wiley & Sons Ltd.

Rock, N. M. S., Aldis, D. T., Aspden, J. A., Clarke, M. C. G., Djunuddin A., Kartawa, W., Miswar, Thomson S. J. dan Whandoyo, R. (1983). Peta Geologi Lembar Lubuksikaping, Sumatra, Skala 1:250000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Santoso, D. (2002). Pengantar Teknik Geofisika, Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Telford, W.M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics Second Edition. New York: Cambridge University Press.