

Pola Distribusi Termal Geothermal Jaboi, Sabang Dengan Pendekatan Numerik 2D

Thermal Distribution Pattern of Jaboi Geothermal, Sabang with 2D Numerical Approach

Nanda Gristina¹, Muhammad Isa^{1*} dan Muksin²

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Unsyiah

²Tsunami and Disaster Mitigation Research Center (TDMRC), Unsyiah

Received September, 2018, Accepted September, 2018

Telah dilakukan pemodelan numerik menggunakan teknik beda hingga berdasarkan algoritma Gauss – Seidell. Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan proses transfer panas kasus *steady state* lapangan geothermal Jaboi, Sabang dengan menggunakan parameter fisis nilai konduktivitas termal material. Teknik ini berfungsi mendapatkan model sebaran suhu kemudian dibandingkan terhadap literatur. Teknik ini sesuai untuk struktur geologi kompleks seperti daerah penelitian. Pengujian sensitivitas sebelum memodelkan daerah geothermal Jaboi dilakukan untuk melihat efek geometri daerah geothermal dengan perubahan parameter masukan nilai konduktivitas dan syarat batas terhadap algoritma numerik yang dipakai. Dari hasil pengujian model sintesis sederhana diketahui bahwa litologi lapisan-lapisan batuan bawah permukaan mempengaruhi pola distribusi temperatur yang dihasilkan. Semakin tinggi konduktivitas termal batuan maka semakin tinggi distribusi temperatur yang akan dihasilkan. Berdasarkan hasil penelitian pola distribusi suhu model geologi daerah Jaboi, diperkirakan lapisan batuan berpotensi sebagai top reservoir berada di kedalaman >1000 m dengan perolehan temperatur sekitar 240°C di kedalaman 1050 m. Hasil perhitungan numerik memperkirakan temperatur maksimum di kedalaman 800 m dan kedalaman 900 m masing-masing sebesar 135°C dan 173°C, mengingat skala model bukan skala peta sebenarnya.

Numerical modeling has been done using finite difference techniques based on the Gauss-Seidell algorithm. The purpose of this study was to explain the heat transfer process in the case of the steady state of Jaboi geothermal field, Sabang by using the physical parameters of the material's thermal conductivity value as input. This technique is to obtain a temperature distribution model, then compare it to the literature. This technique is suitable for complex geological structures such as the study area. Sensitivity testing before modeling the Jaboi geothermal area is done to see the geometrical effect of the geothermal area by changing input parameters of conductivity values and boundary conditions. The results of the simple synthetic model testing show that the lithology of the subsurface rock layers affects the temperature distribution pattern produced. The higher the thermal conductivity of the rock, the higher the temperature distribution will be produced. Based on the results of the study of the temperature distribution pattern of the Jaboi regional geological model, it is estimated that the rock layer has the potential as a top reservoir at a depth of > 1000 m, with a temperature of around 240°C at a depth of 1050 m. The results of numerical calculations estimate the maximum temperature at a depth of 800 m and a depth of 900 m with respectively 135°C and 173°C, considering the scale of the model is not the actual map scale.

Keywords: geothermal, modeling, reservoir, caprock, boundary condition

Pendahuluan

Indonesia memiliki potensi geothermal melimpah dengan 331 titik potensi tersebar dari Sabang sampai Merauke sebagaimana hasil survei

dan inventarisasi oleh Badan Geologi Kementerian ESDM, yang tersebar sepanjang jalur sabuk gunung api mulai dari Pulau Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi Utara hingga Maluku. Indonesia

berkeinginan mengoptimalkan pemanfaatan energi ini dalam sektor pembangkit listrik sebesar 7.242 MW pada tahun 2025 (Anonim, 2017). Dalam mengestimasi potensi geotermal suatu wilayah maka perlu dilakukan kajian ilmu geologi, geokimia, geofisika dan teknik reservoir. Energi geotermal adalah energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung didalamnya. Potensi sumber daya geotermal di bawah permukaan ditunjukkan dari adanya perbedaan temperatur lebih tinggi dari temperatur tanah disekitarnya karena perpindahan panas secara konduksi yang terjadi dari batuan bawah permukaan ke batuan permukaan dan perpindahan panas konveksi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas. Secara umum, sistem geotermal terdiri dari empat bagian utama yaitu, sumber panas, batuan reservoir (batuan permeabel), lapisan penudung *cap rock* (batuan impermeabel) dan sirkulasi fluida. Karakteristik utama kondisi sistem geotermal adalah pola penyebaran panas yang dihasilkan. Pola distribusi temperatur dari reservoir ke permukaan dipengaruhi oleh variasi konduktivitas termal batuan daerah tersebut. Oleh karenanya, diperlukan metode atau teknik pemilihan model yang paling sesuai untuk mengetahui bagaimana pola distribusi suhu bawah permukaan dan pengaruh nilai konduktivitas termal batuan. Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan penyebaran panas bumi dua dimensi daerah Jaboi dengan teknik beda hingga (*finite difference*) berdasarkan algoritma Gauss–Seidel dengan parameter masukan nilai konduktivitas termal material. Hasil pemodelan digunakan untuk mempelajari hubungan keterkaitan nilai konduktivitas termal batuan terhadap sistem panas bumi dan juga diharapkan menjadi nilai tambah dalam penyelidikan terpadu geosains serta sebagai kontribusi kepada pihak terkait untuk pengembangan survei selanjutnya

Metodologi

Pendekatan teknik beda hingga 2D algoritma numerik Gauss-Seidel

Mekanisme perpindahan kalor pada sistem panas bumi terjadi melalui konduksi dan konveksi. Berdasarkan hukum Fourier diperoleh persamaan umum difusi panas. Dalam keadaan *steady state*, distribusi suhu tanpa sumber panas 2D memenuhi persamaan Laplace. Untuk menyelesaikan

persamaan Laplace tersebut digunakan metode beda-hingga berdasarkan algoritma numerik Gauss–Seidel (K. Stuwe, 2008). Berdasarkan solusi persamaan tersebut maka perhitungan temperatur di masing-masing node didapatkan pada Pers. [1].

$$T_{i,j} = \frac{\left(\frac{k_{i+1,j}T_{i+1,j} + k_{i,j}T_{i+1,j} + k_{i,j}T_{i-1,j} + k_{i-1,j}T_{i-1,j}}{2\Delta x^2} \right)}{\left(\frac{k_{i+1,j} + 2k_{i,j} + k_{i-1,j}}{2\Delta x^2} \right)} + \frac{\left(\frac{k_{i,j+1}T_{i,j+1} + k_{i,j}T_{i,j+1} + k_{i,j}T_{i,j-1} + k_{i,j-1}T_{i,j-1}}{2\Delta y^2} \right)}{\left(\frac{k_{i,j+1} + 2k_{i,j} + k_{i,j-1}}{2\Delta y^2} \right)} \quad [1]$$

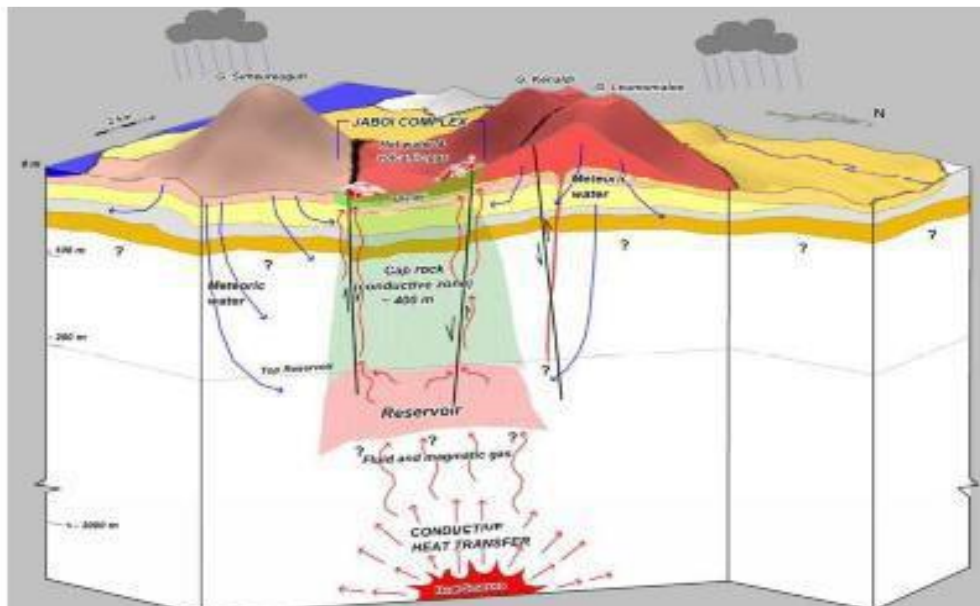
Daerah prospek geotermal

Gambar 1 mengilustrasikan model konseptual daerah panas bumi Jaboi. Daerah upflow dari sistem panas bumi Jaboi diindikasikan oleh manifestasi fumarol yang berasosiasi dengan air panas asam, tanah panas dan alterasi asam yang kuat (Anonim, 2017). Menurut Setiadarma & Hasan (2005) litologi daerah panas bumi Jaboi mempunyai berbagai macam, yaitu aliran piroklastik pulau Weh, lava pulau Weh, dan batuan yang telah mengalami alterasi.

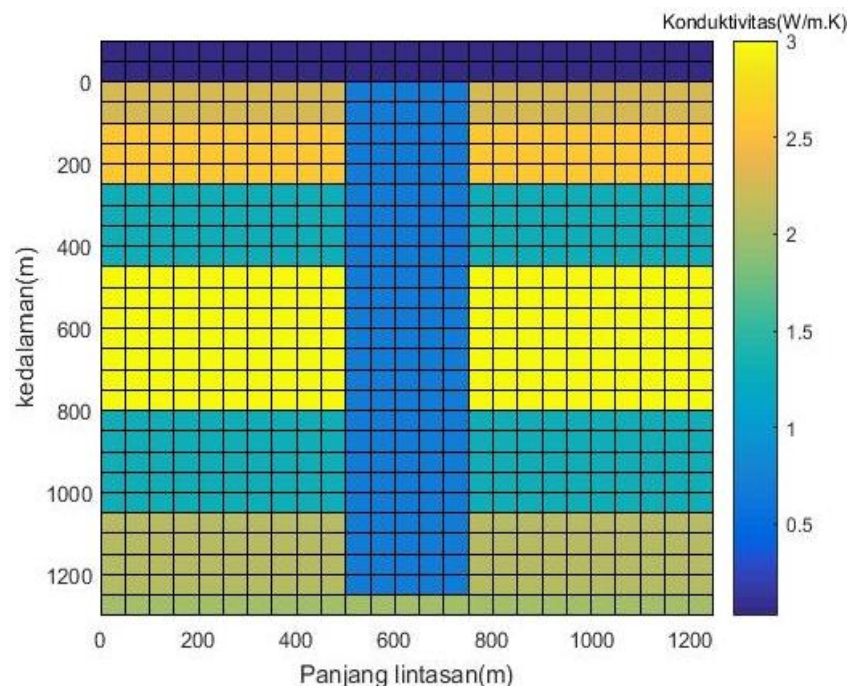
Tabel 1 Nilai konduktivitas termal batuan untuk model geologi Jaboi

Indeks Warna	Parameter	
	Jenis Batuan	Konduktivitas Termal (W/m.K)
	udara	0,02625
	piroklastik	2,3
	Lava	2,6
	breksi andesitan	1,32
	andesit tufan	3
	Basal terubah	2,11
	sumber	2
	Air panas	0,677

Selain itu, hasil interpretasi penampang bawah permukaan dari penelitian Fauzi (2018) berdasarkan anomali magnetik di kawasan gunung api Jaboi, ia menduga adanya lima lapisan batuan ubahan yang terdapat di kawasan patahan ceneuhot, Jaboi, yakni; andesit breksian di kedalaman 0 – 135 m di bawah permukaan, breksi andesitan di kedalaman 10 – 450 m, andesit tufan 290 – 790 m, breksi



Gambar 1 Model Konseptual Sistem Panas Bumi di Daerah Jaboi (Anonim, 2017)



Gambar 2 Model konduktivitas termal geologi daerah panas bumi Jaboi

andesitan di kedalaman 600 – 1060 m dan batuan basal berubah di kedalaman 830 – 1200 m. Dalam penelitian ini, pemodelan pola termal konduksi 2D bawah permukaan geothermal Jaboi, Sabang menggunakan nilai konduktivitas material seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 sebagai parameter masukan. Konstruksi model dibentuk berdasarkan informasi penelitian terkait di kawasan Jaboi. Gambar 2 mengilustrasikan geometri model geologi Jaboi dimana susunan material berada di kedalaman

tertentu. Model tersusun atas node-node sebanyak 28 baris dan 25 kolom dengan jarak antar node sebesar 50 m dengan ketinggian 100 m diatas permukaan hingga 1300 m di bawah permukaan dengan panjang lintasan 1250 m. Pada ketinggian 0 – 100 m diatas permukaan, fluida merupakan udara dengan temperatur 35°C, asumsi suhu udara berdasarkan Ismail et al. (2003) dimana survei radiasi termal lapangan Jaboi mencapai suhu 30 – 41°C. Kemudian material selanjutnya ialah aliran

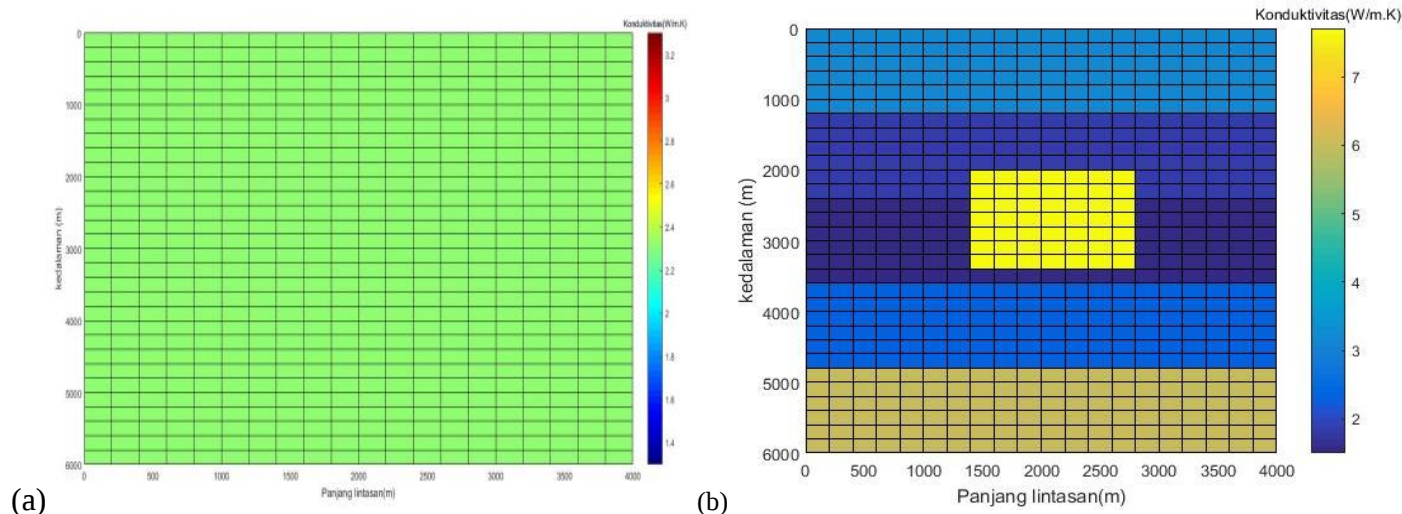
piroklastik pulau Weh pada kedalaman 0 – 100 m, Lava di kedalaman 150 – 250 m, selanjutnya batuan-batuan alterasi; breksi andesitan pada kedalaman 300 – 450 m, andesit tufan di kedalaman 500 – 800 m, breksi andesitan pada kedalaman 800 – 1000 m, dan batuan basal terubah di kedalaman 1050 – 1200 m di bawah permukaan. Sementara material di lapisan terakhir ialah sumber panas di kedalaman 1200 – 1300 m di bawah permukaan. Disamping itu, juga diasumsikan adanya air panas seluas 500 m dari kedalaman 0 – 1250 m di bawah permukaan pada panjang lintasan 500 – 750 m dengan bentuk pipa tegak yang muncul dari rekahan hasil patahan. Pada ketinggian 0 – 100 m diatas permukaan (Gambar 2), fluida merupakan udara dengan temperatur 35°C dengan nilai konduktansi sebesar 0,02625 W/m.K. Asumsi suhu udara berdasarkan Ismail, et. al., (2005) dimana survei radiasi termal lapangan Jaboi mencapai suhu 30 – 41°C. Kemudian material selanjutnya ialah aliran piroklastik pulau Weh, lava dan batuan-batuan alterasi (Setiadarma & Hasan, 2005). Disamping itu juga diasumsikan adanya air panas di kedalaman 0 – 1250 m di bawah permukaan pada panjang lintasan 500 – 750 m dengan bentuk pipa tegak yang muncul dari rekahan hasil patahan. Nilai konduktivitas termal air panas sebesar 0,677 W/m.K merupakan nilai saat air bertemperatur 95°C, berdasarkan hasil survei Anonim (2017) dimana air panas dan fumarol Jaboi mengindikasikan temperatur cukup tinggi 95 – 99,5°C. Percobaan dilakukan dengan memberikan nilai distribusi awal temperatur di masing-masing node bernilai nol kecuali di node-node batas. Gradien kenaikan temperatur terhadap kedalaman

masing – masing di kedua sisi batas vertikal diatur sebesar 4,2°C per 50 m. Temperatur bawah permukaan pada kedalaman 1300 m sebagai sumber diatur sebesar 345°C. Nilai ini dihitung berdasarkan kenaikan gradien temperatur 20 – 22,5°C per 100 m dan 17°C per 100 m yang didapati pada 2 sumur lokasi pemboran (Anonim, 2017).

Hasil Penelitian

Pengujian sensitivitas

Uji sensitivitas model dilakukan untuk melihat efek geometri daerah geotermal, parameter masukan nilai konduktivitas dan kondisi batas (*boundary condition*) terhadap algoritma numerik yang dipakai dengan menggunakan beberapa model sintetik sederhana sebelum memodelkan daerah geotermal Jaboi. Pengujian terdiri dari model bumi homogen (Gambar 3a) dan berlapis dengan anomali konduktivitas di pusat daerah (Gambar 3b). Warna mencerminkan jenis material seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2. Model yang ditunjukkan oleh Gambar 3 tersusun atas node-node sebanyak 30 baris dan 20 kolom dengan jarak antar node sebesar 200 m sehingga total dimensi sebesar 4000 x 6000 m. Pengujian dilakukan dengan memberikan syarat kondisi batas (*boundary condition*), yaitu nilai temperatur awal masing-masing node bernilai nol, temperatur sumber panas di kedalaman 6000 m bernilai 240°C, suhu udara permukaan di bagian atas sebesar 25°C dan gradien temperatur terhadap kedalaman masing-masing batas vertikal diatur sebesar 3,6°C per 100 m.



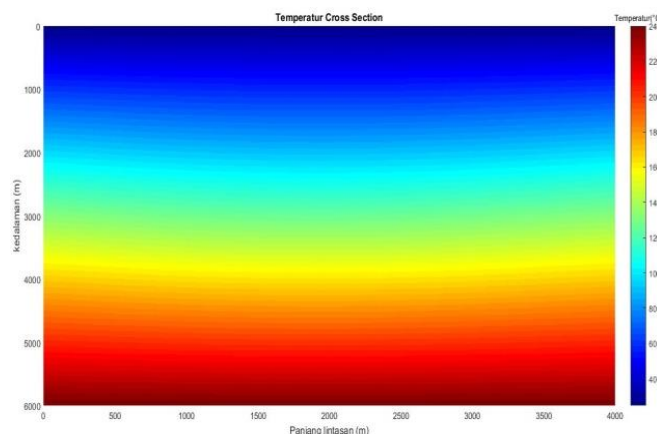
Gambar 3 model sederhana untuk pengujian sensitivitas (a) bumi homogen (b) bumi berlapis anomali

Tabel 2 Nilai konduktivitas termal batuan untuk pengujian sensitivitas model

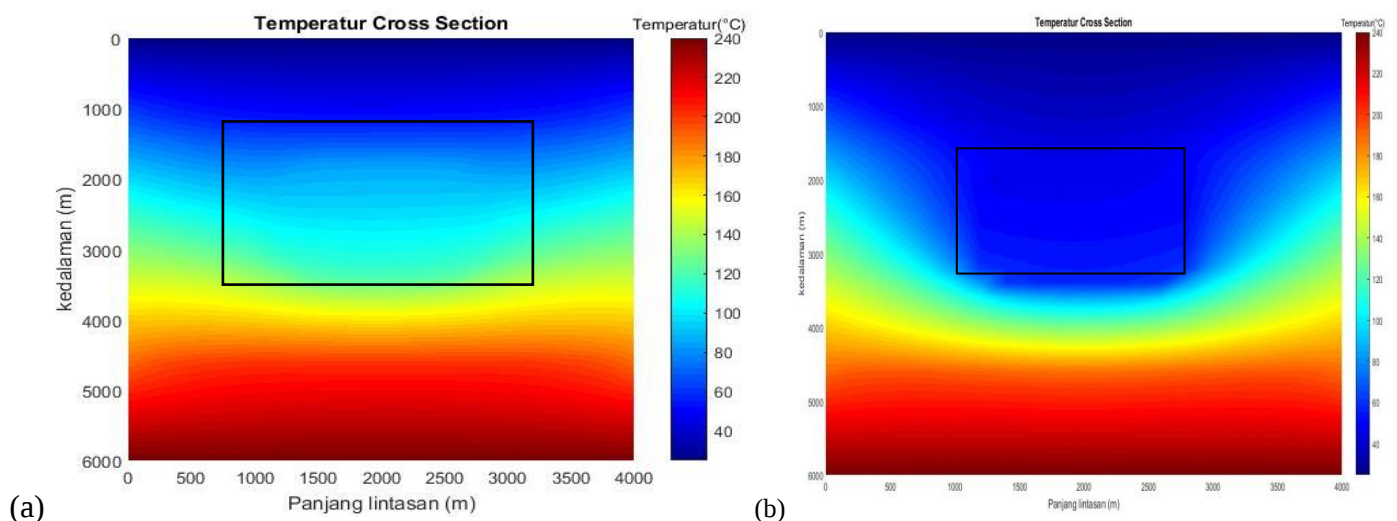
Indeks Warna	Parameter	
	Jenis Batuan	Konduktivitas termal (W/m.K)
	Shaly Sandstone (bumi homogen)	2,3
	sandstone	3,2
	Basal	1,8
	Slate	1,5
	Serpentine (bumi berlapis)	2,3
	Kwarsit	6
	granit (anomali 1)	7,71
	timbal (anomali 2)	34,7

Pemilihan nilai gradien berdasarkan gradien temperatur kedalaman area non termal berkisar 10 - 40 °C/km, sehingga di kedalaman 6000 m suhu diperkirakan mencapai 240°C. Hasil pemodelan model bumi homogen (Gambar 4) menunjukkan

nilai temperatur menurun secara bertahap ketika semakin mendekati permukaan dan terlihat pola distribusi masih teratur. Artinya tidak ada gangguan medan temperatur yang signifikan disebabkan tidak adanya perbedaan nilai konduktivitas material di tiap kedalaman. Sementara itu, model kedua (Gambar 5a) memperlihatkan perubahan vertikal pola distribusi signifikan terjadi pada kedalaman sekitar 1500 m hingga sekitar 2500 m pada panjang lintasan 1000 m hingga 3000 m dikarenakan terdapat anomali batuan walaupun anomali diletakkan di kedalaman 2000 m hingga 3400 m. Sedangkan, jika batuan anomali diganti dengan logam timbal (Gambar 5b) di posisi kedalaman dan panjang lintasan yang sama maka pola distorsi temperatur yang muncul akan menjadi lebih tampak. Hal ini terlihat pada perbedaan temperatur yang mencolok dari sekitarnya di panjang lintasan 1000 m hingga 3000 m.



Gambar 4 Hasil simulasi numerik distribusi temperatur 2D bumi homogen

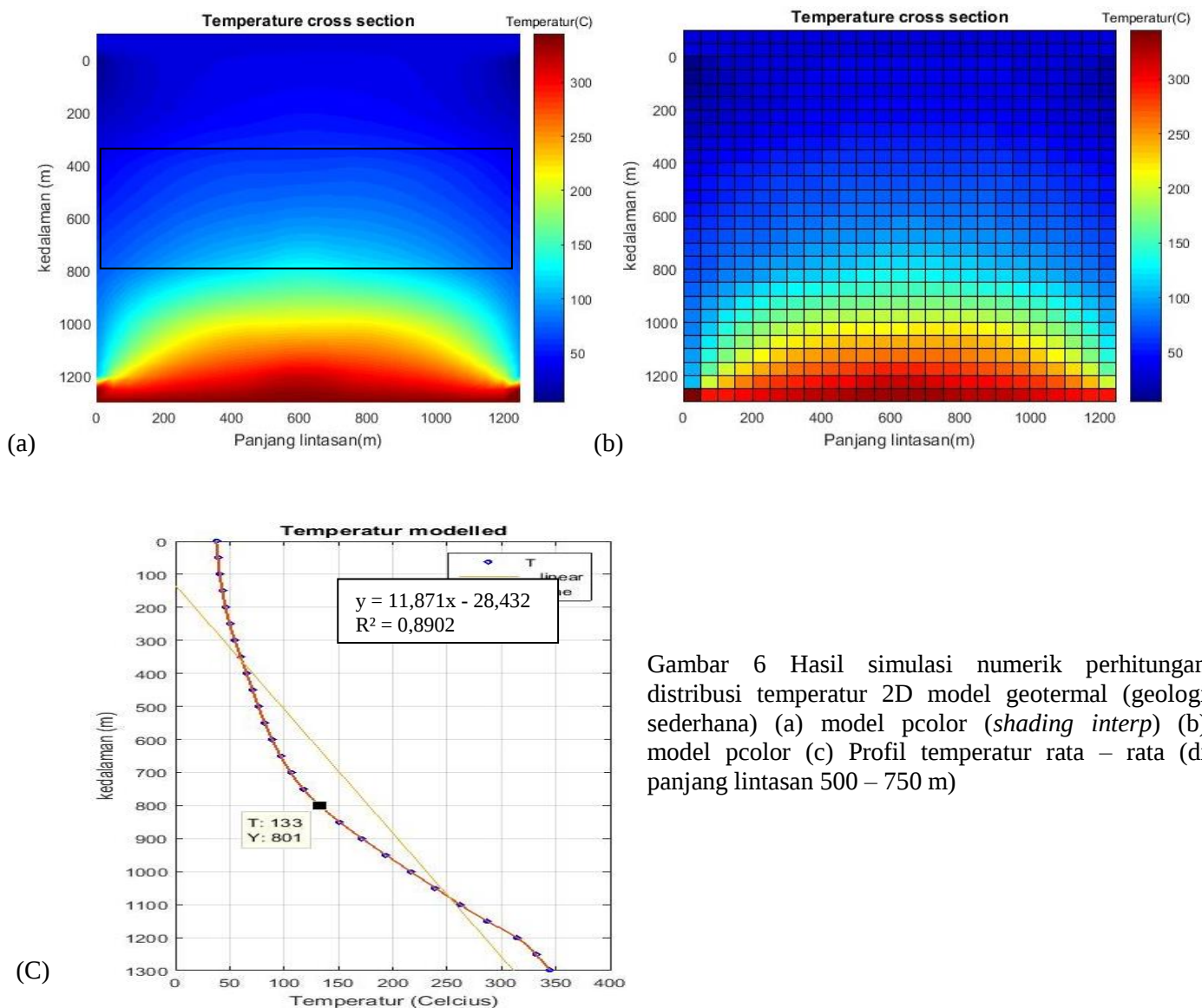


Gambar 5 Hasil simulasi numerik distribusi temperatur 2D bumi berlapis anomali (a) granit (b) timbal

Gambar tersebut juga memperlihatkan bahwa distribusi temperatur daerah anomali timbal lebih rendah dari granit meskipun timbal memiliki nilai konduktivitas batuan relatif lebih tinggi dibandingkan granit. Berdasarkan teori, nilai konduktivitas material yang tinggi memiliki daya hantar kalor yang tinggi pula. Oleh karenanya, hal ini diduga karena geometri anomali tidak seimbang terhadap geometri model. Dengan demikian, eksperimen ini menunjukkan bahwa pola penyebaran aliran kalor dipengaruhi oleh kondisi lapisan-lapisan batuan dan perkiraan luas anomali menjadi penting terhadap bangunan model. Berdasarkan hal ini maka algoritma numerik Gauss–Seidel dapat digunakan untuk menentukan distribusi daerah geothermal Jaboi.

Pemodelan numerik pola termal daerah geothermal Jaboi

Hasil pemodelan daerah geothermal Jaboi 2D diilustrasikan oleh Gambar 6a. Profil distribusi kenaikan suhu belum tampak mencapai permukaan. Suhu tinggi air panas di permukaan sebesar 90 °C tidak diperoleh dari model ini. Kenaikan dari dasar bawah permukaan hanya terjadi hingga kedalaman sekitar 500 m dari bawah permukaan. Hal ini diduga karena nilai konduktivitas termal batuan berubah andesit tufan relatif lebih tinggi dibandingkan nilai konduktivitas material lainnya sehingga kenaikan temperatur mencapai sekitar 500 m. Gambar 6c mengilustrasikan perolehan suhu rata rata di panjang lintasan 500 m – 750 m, dimana asumsi awal fluida merupakan pipa tegak seluas 500 m



Gambar 6 Hasil simulasi numerik perhitungan distribusi temperatur 2D model geothermal (geologi sederhana) (a) model pcolor (shading interp) (b) model pcolor (c) Profil temperatur rata – rata (di panjang lintasan 500 – 750 m)

Dari grafik terlihat, di kedalaman 800 m, temperatur yang diperoleh sebesar 133 °C dan pada kedalaman 900 m bernilai 172 °C. Sementara, hasil perhitungan numerik dengan teknik beda hingga dari distribusi termal didapatkan temperatur maksimum di sepanjang lintasan di kedalaman 800 m dan kedalaman 900 m masing – masing sebesar 135 °C dan 173 °C, mengingat skala model bukan skala peta sebenarnya. Temperatur sekitar 200 °C baru ditemukan pada kedalaman 1000 m. Dengan demikian perkiraan nilai distribusi suhu model ini masih belum mendekati data penyelidikan Anonim (2017) dimana temperatur bawah permukaan reservoir diperkirakan sekitar 250 °C dan puncak reservoir diduga berada di kedalaman ≥ 850 meter. Hal ini diduga dikarenakan susunan kedudukan batuan belum mendekati kondisi nyata di lapangan.

Kesimpulan

Telah dilakukan prosedur pemodelan numerik untuk distribusi temperatur 2D konduksi bawah permukaan dalam kasus *steady state* dengan menggunakan teknik beda hingga melalui penyelesaian algoritma numerik linier Gauss – Seidell. Model diperoleh dari beberapa integrasi data dan dilakukan inisialisasi untuk membuat kondisi nyata lapangan. Berdasarkan pola distribusi suhu yang diperoleh, diperkirakan lapisan batuan berpotensi sebagai *top* reservoir berada di kedalaman >1000 m dengan perolehan temperatur sekitar 240 °C di kedalaman 1050 m. Selain itu, dengan asumsi awal manifestasi fluida merupakan pipa tegak seluas 500 m maka diperoleh temperatur sebesar 133°C di kedalaman 800 m dan bernilai 172 °C di kedalaman 900 m. Selain itu, dari hasil eksperimen model – model sintesis sederhana diketahui bahwa variasi nilai konduktivitas termal batuan dan kondisi atau struktur lapisan – lapisan batuan bawah permukaan mempengaruhi pola penyebaran termal yang dihasilkan. Nilai konduktivitas termal batuan tinggi akan menghasilkan distribusi suhu yang tinggi pula.

Referensi

Anonim. 2017. *Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi Di Indonesia, Jilid 1*, Direktorat Panas Bumi, Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral

B. O, S., M, P. J., C, K. H., & Gwaha, L. Y. 2010. *Statistical Analysis On The Thermal Conductivity Of Rocks In The Republic Of*

Korea, Proceedings World Geothermal Congress. Daejeon, Republic Of Korea

Chapra SC. 2011. *Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists*, 3rd ed, Mc Graw-Hill Higher Education, Pennsylvania

Duan, C., Zheng, X., Xia, B., dan Wang, Z. 2016. *Temperature Distribution Modeling in Geothermal Wellbore and Formation During the Well Test in Yangyi Geothermal Field*, Proceedings 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford

Fauzi, Rahmad. 2018 “*Pendugaan Reservoir Sistem Panas Bumi Berdasarkan Anomali Magnetik Pada Kawasan Gunung Api Jaboi, Sabang*”, Jurusan Fisika FMIPA Unsyiah, Banda Aceh.

Hoang, V. T. 2010. *Estimation of on-Situ Thermal Conductivities from Temperature Gradient Measurements*, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, California Digital Library.

Incropera, F. R., and Dewitt. D. P. 2007. *Fundamental of Heat Tranfer and Mass Tranfer*, 5nd edition, John Wiley & Sons. Inc, New York.

Isa, M. 2005 *Estimasi Model Dua Dimensi Distribusi Panas Bumi Di Daerah Mata Air Panas Nglimut Gunungapi Ungaran Dengan Teknik Beda Hingga*, Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta.

Ismail, N., Marwan, & Surbakti, S. 2003. *Studi Penyebaran Temperatur Pada Lapangan Panas Bumi Jaboi Berdasarkan Pengukuran Radiasi Termal*, FMIPA, Unsyiah, Banda Aceh.

Kebulin, J. R. 2014. *Analisis Termal Di Daerah Prospek Panas Bumi Air Keliansar Kabupaten Empat Lawang Sumatera*, Prosiding Seminar Nasional Basic Science VI, Ambon.

K. Stuwe. 2008 “*Principles of heat flow modeling*,” Course Notes on Heat Flow for INTREPID GEOPHYSICS

Kusnadi, D., and Supeno. 2005. “*Penyelidikan Geokimia Panas Bumi Daerah Jaboi Kota Sabang, Nangroe Aceh Darussalam*”, Jurnal Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi.

- Maystrenko, Y. P., Elveb, H. K., Ganerød, G. V., Lutro, O., dan Olesen, O. 2014. "2D Structural and Thermal Models in Southeastern Norway Based on the Recently Drilled Årvollskogen Borehole and 2D Density, Magnetic and Thermal Modeling", Geothermal Energy a Springer Open Journal.
- Putra, S. D., Fajar, S. J., dan Srigutomo, W. 2014. *Numerical Modeling of 2D Conductive Heat Transfer and Its Application for the Characterization of Geothermal Systems*, Internal Conference of Physics (ICP 2014), Bandung: Atlantis Press.
- Recktenwald, G. W. 2011. "Finite-Difference Approximations to the Heat Equation", Mechanical Engineering Department Portland State University.
- Sampurno, J. 2017. "Application of Implicit Finite Difference Method to Determine the 2D Patterns of Unsteady State Thermal Spreading of Geothermal Systems", Journal of Physics Conf. Ser. 877 012012.
- Setiadarma, D., & Hasan, A. R. 2005. *Geologi Panas Bumi Jaboi, Sabang*, Provinsi Nangroe Aceh Darussalam. Subdirektorat Panas Bumi Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral , 1-6.
- Suhanto, E. 2005. "Penyelidikan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Jaboi Sabang", Jurnal Pemaparan Hasil kegiatan Survei Panas Bumi, direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral, Halaman 1-2.
- Sun, Q., Chen, S. E., Gao, Q. 2017. "Analyses Of The Factors Influencing Sandstone Thermal Conductivity", Vol 14.
- Widodo, Sri., dan Suhanto, E., 2005. "Penyelidikan Geolistrik Schlumberger di Daerah Panas Bumi Jaboi Kota Sabang, Provinsi Nangroe Aceh Darussalam", Jurnal Pemaparan Hasil kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi, Survei Panas Bumi, direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral