

Modeling of Geothermal System at Sibayak Field Using TOUGH2 and iTOUGH2 Simulator

Desy Rhobiatul Adhawiyah^{1,3}, Yunus Daud^{2,3} and Jatmiko Prio Atmojo^{2,4}

¹PT. NewQuest Geotechnology, Indonesia

²Master Program in Geothermal Exploration, Graduate Program of Physical Science, The University of Indonesia

³Geothermal Laboratory, Department of Physics, The University of Indonesia

⁴PT. Pertamina Upstream Technology Center

desy.rhobiatul@newquest-geotechnology.com

Keywords: Modeling, geothermal system, reservoir, heat source, forward, inverse, TOUGH2, iTOUGH2

ABSTRACT

Geothermal system at Sibayak field is a caldera-type system which was developed by volcanic and tectonic activities. The Sibayak area composed of pre-Tertiary-Tertiary sedimentary formation in the lower part, and unconformably covered by Quaternary volcanic rock formation. Surface manifestations present in this area are fumaroles right above Mount Pintau and Mount Sibayak and hot-springs in north-east and south-east direction from the center of the system. MT data informs the present of up-dome shape, while gravity data shows the reservoir location with low gravity anomaly. For understanding the characteristic of reservoir, heat source location, and hydrogeology, the modeling of geothermal system at Sibayak field was conducted by using TOUGH2 and iTOUGH2 simulator in forward and inverse modeling respectively. Input for forward modeling were composed based on geological, geophysical, geochemical and well-bore data. The calculated output from forward modeling was then used as input data for inversion process in order to optimize the Natural State condition being obtained. Natural State condition is reached when the temperature profiles of the model show relatively good agreement with measured temperature from wells. The result indicates that the heat source located beneath Mount Pintau and Mount Sibayak, with present outflow to the south-east and north-east direction outward the system, while recharge zones located at south-west and north-west from the system. Top of reservoir was estimated to be 200 m above sea level. Recommendation for production and reinjection wells is also given based on measured temperature profiles.

PENDAHULUAN

Panasbumi telah dikenal sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan “terbarukan”. Namun konsep “terbarukan” ini harus difahami dengan benar agar kita dapat terus mengambil manfaat dari begitu banyak sistem panasbumi di Indonesia.

Sistem panasbumi merupakan sistem yang dinamis, di mana kondisinya akan terus berubah sejalan dengan perlakuan yang diberikan selama proses eksploitasi. Kegiatan produksi akan menimbulkan beberapa perubahan fisis dalam reservoir panasbumi, diantaranya penurunan tekanan dan pengurangan massa fluida. Jika tekanan terus menurun dan massa fluida terus berkurang, sistem akan menjadi tidak stabil dan akan berdampak pada menurunnya produksi uap secara berkesinambungan, bahkan dapat berakibat fatal pada matinya sistem panasbumi yang bersangkutan. Karenanya, produksi uap yang dihasilkan harus diimbangi dengan reinjeksi air yang cukup, sehingga sistem dapat terus menghasilkan uap dalam jumlah yang konstan dalam kurun

waktu yang lama. Dengan demikian diperlukan manajemen yang baik dalam pemanfaatan sistem panasbumi.

Manajemen sistem panasbumi yang sedang diproduksi dapat dilakukan jika kita memiliki pemahaman yang baik terhadap kondisi sistem panasbumi yang bersangkutan. Oleh karena itu dilakukanlah pemodelan sistem panasbumi dengan membuat model 3-dimensi yang diekspektasikan dapat menggambarkan sistem yang sebenarnya di lapangan (*Natural State*). Dengan model ini dapat dilakukan simulasi sistem panasbumi, sehingga pada akhirnya dapat diperkirakan performa produksi reservoir selama beberapa kurun waktu ke depan dengan perlakuan tertentu yang diberikan. Namun penelitian ini terbatas pada pembuatan model *Natural State* dan belum sampai pada prediksi performa produksi.

Lapangan yang dimodelkan adalah Lapangan Sibayak yang terletak di pulau Sumatra. Pemodelan dilakukan dengan simulator TOUGH2 untuk *forward* dan iTOUGH2 untuk *inversi*. Keduanya dilakukan untuk menghasilkan profil temperatur yang sesuai dengan data sumur. Kesesuaian temperatur inilah yang menjadi kriteria keberhasilan dalam penelitian yang dilakukan. Proses *inversi* dilakukan untuk memaksimalkan hasil yang diperoleh dari model *forward*, sehingga diperoleh kesesuaian profil temperatur yang lebih baik.

TINJAUAN LAPANGAN

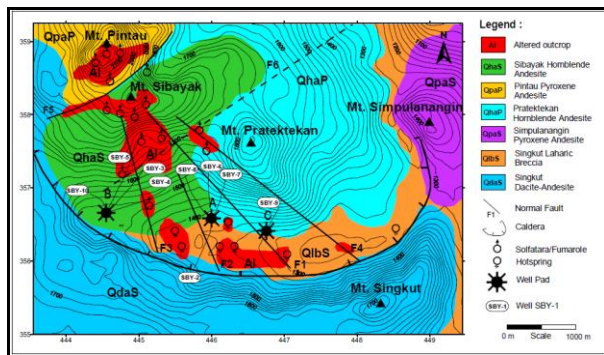
Secara geologi (Gambar 1), Lapangan Sibayak terdiri dari formasi batuan sedimen berumur Pra-Tersier sampai Tersier yang berada pada lapisan bawah, serta batuan beku yang melapisi batuan sedimen secara *unconformity*. Lapisan batuan sedimen tidak terlihat di permukaan, namun data sumur menunjukkan keberadaan lapisan ini pada kedalaman sekitar 1150 m dari permukaan. Formasi ini terdiri dari *sandstone*, *shale* dan *limestone* dan diduga merupakan zona reservoir karena terdapat *circulation-loss-zone* di dalamnya. Lapisan batuan beku terbentuk dari beberapa letusan gunung pada zaman Kuartar. Pada Kuartar awal, terbentuk kaldera besar karena letusan gunung Singkut. Di dalam kaldera terdapat formasi batuan beku yang dibagi menjadi dua, yaitu formasi pra-kaldera dan pos-kaldera. Formasi pra-kaldera terdiri dari Singkut dasite-andesite dan Singkut laharic-breccia, sedangkan pos-kaldera terdiri dari Simpulanangin pyroxene-andesite, Pratektekan hornblende-andesite, Pintau pyroxene-andesite, dan Sibayak hornblende-andesite (Atmojo, 2000; Daud, 2001).

Struktur geologi pada lapangan panasbumi Sibayak yang terdapat di dalam kaldera Singkut mengarah ke tenggara-baratlaut yang sejajar dengan sesar Sumatera, dan merupakan akses *outflow* arah tenggara. Namun sesar ini terpotong oleh sesar arah baratdaya-timurlaut yang memisahkan Gunung Pintau dan Gunung Sibayak serta sejajar dengan *lineament* yang berperan sebagai akses *outflow* arah timurlaut. Zona *outflow* tersebut ditandai

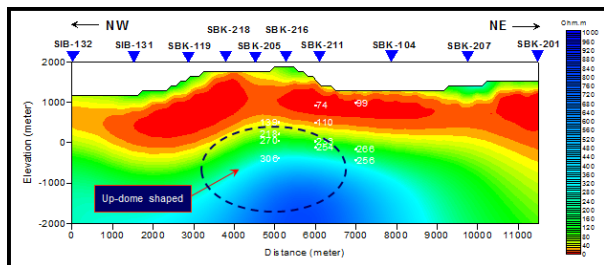
dengan keberadaan mata air panas dengan pH bervariasi dari sangat asam (2.2 – 2.5) sampai hampir netral (5.5-6). Sedangkan zona *upflow* ditandai dengan keberadaan fumarol disekitar Gunung Pintau dan Gunung Sibayak. Sesar-sesar tersebut yang memungkinkan adanya zona permeabel di dalam kaldera yang berfungsi sebagai reservoir bagi sistem panasbumi yang ada.

Data geofisika yang tersedia di lapangan panasbumi Sibayak adalah data Magnetotelluric (MT) dan data anomali gravitasi (Daud, 2001). Data MT (Gambar 2) menunjukkan adanya zona resistivitas rendah yang mengindikasikan keberadaan *clay cap* pada elevasi 1500 m sampai 0 m. Zona reservoir diindikasikan dengan adanya zona resistivitas menengah (ditunjukkan dengan warna hijau) yang berada pada elevasi 200 m sampai -1000 m. Di bawah zona reservoir, terdapat zona dengan anomali resistivitas tinggi yang membentuk *up-dome shape* dan diperkirakan sebagai zona *heat source* dari sistem.

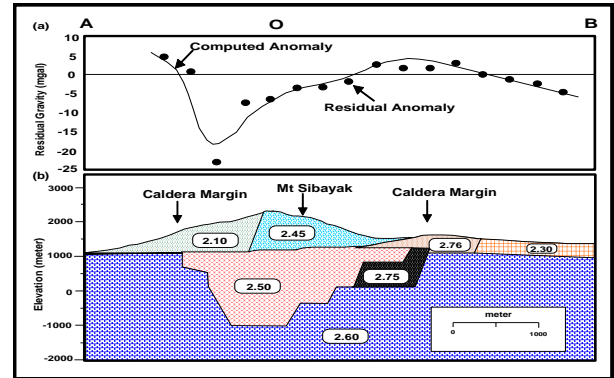
Hasil data MT ini sesuai dengan data anomali gravitasi (Gambar 3) yang di-*slice* pada zona yang kurang lebih sama (Daud, 2002). Dari data gravitasi, terdapat anomali gravitasi rendah yang mengindikasikan adanya zona dengan permeabilitas tinggi karena struktur patahan pada zona tersebut. Letak zona dengan permeabilitas tinggi ini bersesuaian dengan data MT yang diduga merupakan zona reservoir. Selain itu terdeteksi juga adanya struktur berupa kaldera yang membatasi zona dengan permeabilitas yang tinggi tersebut.



Gambar 1. Peta geologi lapangan panasbumi Sibayak (Daud, 2001)



Gambar 2. Penampang melintang distribusi resistivitas semu pada line 6 pengukuran MT (Daud, 2002)



Gambar 3. Model konseptual anomali residual gravitasi (Daud, 2002)

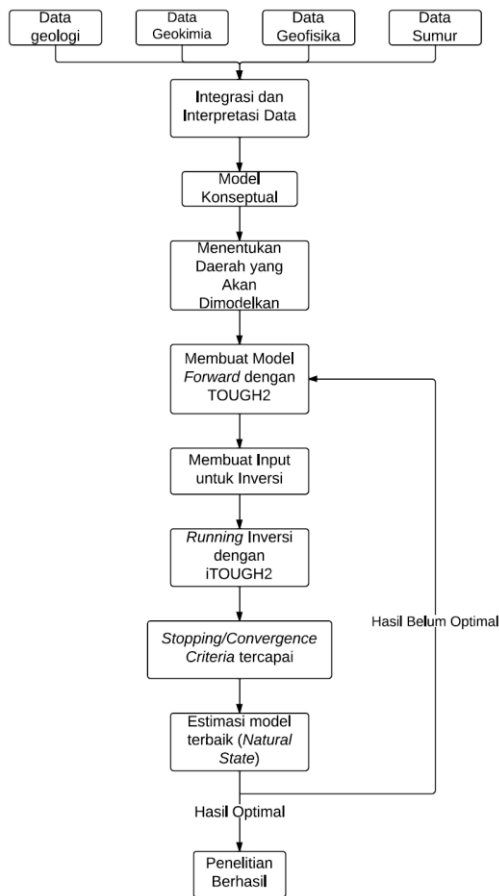
METODOLOGI

Metodologi yang dilakukan dalam studi ini (Gambar 4) meliputi pengkajian data geologi, geokimia dan geofisika yang dimiliki. Kemudian semua data tersebut diintegrasikan dengan data sumur. Setelah itu dibuatlah model konseptual (Gambar 5), sehingga dapat ditentukan wilayah mana yang akan dimodelkan. Wilayah yang akan dimodelkan ini merupakan zona reservoir, di mana terjadi dinamisasi parameter fisis selama produksi. Peran data geologi dan geokimia adalah sebagai referensi jenis material yang akan dimasukkan sebagai *input parameter*, sedangkan peran data geofisika berupa *gravity* dan *Magnetotelluric (MT)* berfungsi untuk mengetahui model dasar dari persebaran batuan berdasarkan kontras densitasnya, sehingga bisa diperkirakan nilai permeabilitasnya.

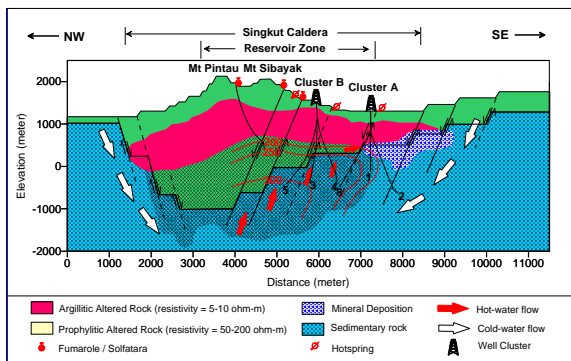
Kemudian dilakukan pemodelan *forward* dengan TOUGH2. Langkah awal pemodelan ini adalah membuat grid dengan pilihan *meshmaker*.

Selanjutnya dilakukan input parameter berupa geometri dan kondisi batas, parameter formasi, *sink and source*, serta *initial condition* nya. Parameter formasi yang dimaksud adalah nilai densitas, permeabilitas, porositas, kapasitas panas spesifik dan konduktivitas termal. Setelah semua parameter dimasukkan, *software* dijalankan sehingga muncul hasil perubahan temperatur dan tekanan. Nilai temperatur di setiap sumur pada simulasi kemudian di plot berdasarkan elevasi, dan di sesuaikan dengan data temperatur sumur dari sumur pengeboran. Jika data sumur dan data simulasi telah sesuai, maka dikatakan bahwa kondisi *natural state* telah tercapai. Namun jika belum sesuai, dilakukan kembali simulasi dengan mengubah parameter material pada blok-blok grid, terutama grid yang ada sumur didalamnya. Proses ini berulang kali dilakukan sampai tercapai kondisi *Natural State*.

Untuk mendapatkan hasil *natural state* yang lebih mendekati kondisi sesungguhnya dilapangan, dilakukanlah inversi menggunakan *software* iTOUGH2. Input dari proses inversi ini adalah parameter dan hasil *forward*. Input tersebut kemudian di *run* sehingga terjadi beberapa kali iterasi sampai model mencapai *convergence* kriteria, dan estimasi terbaik dari model diperoleh. Model dengan estimasi terbaik ini merupakan hasil maksimum dari *Natural State* yang diinginkan.



Gambar 4. Diagram alir penelitian



Gambar 5. Model konseptual panasbumi lapangan Sibayak (Daud, 2002)

HASIL DAN PEMBAHASAN

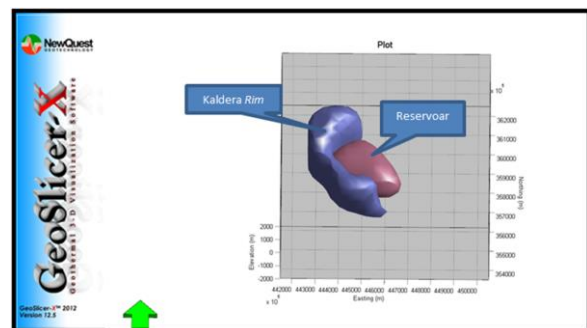
• Distribusi Batuan

Dari data-data yang ada, baik itu data geologi, geofisika, geokimia dan data sumur, serta pemodelan yang telah dilakukan, diperoleh sebuah model tiga dimensi yang menggambarkan kondisi sistem panasbumi lapangan Sibayak. Model *forward* dengan TOUGH2 mengalami perubahan nilai parameter fisis setelah dilakukan proses inversi dengan iTOUGH2. Hasil pemodelan ini divisualisasikan dengan *software* GeoSlicer-X (Daud dan Saputra, 2010) untuk memudahkan analisa dan memberikan gambaran yang lebih jelas tentang distribusi batuan dan

temperatur pada lapangan Sibayak. *Software* GeoSlicer-X merupakan *software* yang dikembangkan oleh PT.NewQuest Geotechnology, dan telah banyak digunakan untuk visualisasi berbagai data eksplorasi panasbumi.

Sistem panasbumi lapangan Sibayak merupakan sistem tipe Kaldera dengan sumber panas yang berumur tersier. Dalam pemodelan, kaldera yang digambarkan dengan jenis batuan bernama Kaldera *Rim* berada pada lingkaran luar Gunung Pintau, Gunung Sibayak dan Gunung Pratektekan. Jenis batuan ini berada pada elevasi sekitar 1500 sampai -1200 m. Batuan Kaldera *Rim* merupakan jenis batuan vulkanik dengan densitas senilai 2,6 mGal berdasarkan data anomali gravitasi, sehingga nilai densitas yang diberikan pada jenis batuan ini dalam pemodelan *forward* dengan TOUGH2 adalah 2600 kg/m^3 . Nilai permeabilitas yang diberikan dalam pemodelan *forward* untuk arah X dan Y adalah $1,0 \times 10^{-18}$, sedangkan arah Z adalah $1,0 \times 10^{-19}$. Setelah dilakukan inversi dengan iTOUGH2, nilai permeabilitas Kaldera *Rim* di-adjust secara otomatis menjadi $1,5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ untuk arah X dan Y, serta $1,9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ untuk arah Z. Dari hasil ini, penulis menginterpretasikan bahwa jenis batuan Kaldera *Rim* merupakan batuan beku yang benar-benar masih *fresh* dan hampir tidak ada struktur di dalamnya, karena nilai permeabilitasnya yang sangat kecil.

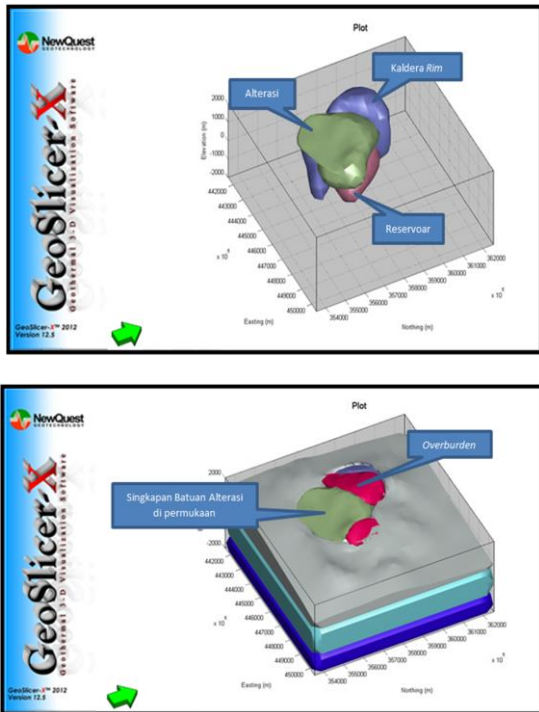
Di bagian dalam Kaldera *Rim* terdapat jenis batuan yang memiliki nilai permeabilitas sangat tinggi, berdasarkan data anomali gravitasi yang rendah. Batuan ini diinterpretasikan sebagai batuan yang memiliki banyak struktur dan diekspektasi sebagai daerah reservoir sistem panasbumi lapangan Sibayak. Tipe batuan Reservoir ini merupakan batuan sedimen dan berada di bawah Gunung Pintau, Gunung Sibayak hingga Gunung Pratektekan. Pada reservoir inilah fluida terakumulasi dan siap untuk diproduksi. Ketebalan reservoir diperkirakan sekitar 1 km pada elevasi 0 sampai -1000 m, atau kedalaman top reservoir sekitar 2000 m dari permukaan. Nilai prediksi awal permeabilitas reservoir yang diberikan pada pemodelan *forward* dengan TOUGH2 adalah $2,5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ untuk arah X dan Y, serta $5,0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ untuk arah Z. Setelah dilakukan inversi dengan iTOUGH2, nilai estimasi terbaik permeabilitasnya ternyata jauh lebih besar pada arah X dan Y, yakni bernilai $2,1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, sedangkan untuk arah Z tidak jauh berbeda dengan nilai prediksi awal, yakni $7,0 \times 10^{-15}$. Distribusi batuan Kaldera *Rim* dan reservoir dapat dilihat dengan lebih jelas pada Gambar 6.



Gambar 6. Distribusi batuan Kaldera Rim dan Reservoir

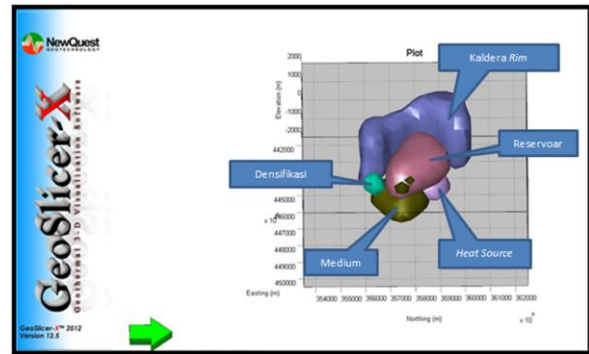
Di atas batuan Reservoir terdapat lapisan alterasi yang biasa disebut *clay cap*. Tipe batuan Alterasi ini awalnya merupakan batuan beku yang mengalami perubahan mineralisasi karena temperatur tinggi dari reservoir. *Clay cap* dikenal dengan karakteristiknya yang hampir impermeabel, sehingga nilai permeabilitas prediksi awal yang diberikan dalam pemodelan *forward* sangat rendah, yakni mencapai $7,0 \times 10^{-19} \text{ m}^2$. Namun setelah dilakukan inversi dengan iTOUGH2, nilai permeabilitas estimasi terbaiknya ternyata sedikit lebih besar, yaitu sekitar $2,2 \times 10^{-18}$

18 m². Batuan alterasi ini terletak tepat di atas zona reservoir, dengan ketebalan sekitar 1,5 km pada elevasi 1500 sampai 0 m. Berdasarkan data geologi, sebagian batuan alterasi ini tersingkap ke permukaan, yakni di sekitar Gunung Sibayak dan Gunung Pintau, sehingga pemodelan yang dilakukan juga disesuaikan dengan data geologi tersebut. Sejalan dengan singkapan batuan Alterasi di permukaan juga terdapat tipe batuan *Overburden* yang merupakan jenis batuan *Hornblende Andesite*. Distribusi batuan alterasi dan singkapannya di permukaan dapat dilihat pada Gambar 7.

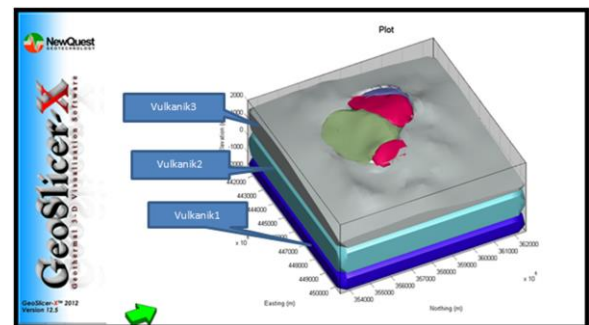


Gambar 7. Distribusi batuan Alterasi dan singkapannya di permukaan, serta batuan *Overburden*

Di sebelah selatan reservoir, terdapat tipe batuan densifikasi yang memiliki nilai densitas tinggi, yakni 2600 kg/m³ dengan nilai permeabilitas yang sangat rendah. Nilai permeabilitas prediksi awal yang diberikan saat pemodelan dengan TOUGH2 adalah $5,0 \times 10^{-18}$ m² untuk arah X dan Y, serta $8,0 \times 10^{-19}$ m² untuk arah Z. Setelah di inversi dengan iTOUGH2, nilai estimasi terbaik dari permeabilitas tersebut ternyata tidak jauh berbeda, yakni $4,6 \times 10^{-18}$ untuk arah X dan Y, serta $1,4 \times 10^{-18}$ untuk arah Z. Dekat dengan tipe batuan densifikasi, yakni di bagian bawahnya terdapat tipe batuan Medium. Batuan medium ini merupakan batuan sedimen dengan karakteristik hampir sama dengan batuan tipe Reservoir, yakni memiliki nilai permeabilitas yang tinggi. Batuan Medium juga merupakan zona *bottom recharge* dari sistem panasbumi lapangan Sibayak. Nilai prediksi awal permeabilitasnya adalah $1,5 \times 10^{-14}$ m² untuk arah X dan Y, sedangkan nilai estimasi terbaik dari iTOUGH2 adalah $1,0 \times 10^{-13}$. Untuk arah Z, nilai prediksi awalnya adalah $4,0 \times 10^{-15}$, dengan nilai estimasi terbaik dari iTOUGH2 sekitar $3,1 \times 10^{-16}$. Tipe batuan Medium ini berada pada elevasi -1000 m sampai -2000 m, atau pada kedalaman sekitar 3000-4000 m dari permukaan. Bersisian dengan batuan Medium, terdapat *Heat Source*. *Heat Source* ini memiliki entalpi 1561 kJ/kg dengan *mass flow* sebesar 56kg/s dan berada di bawah Gunung Pintau dan Gunung Sibayak. Letak tipe batuan Densifikasi, Medium dan *Heat Source* dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 8.



Gambar 8. Distribusi batuan Densifikasi, Medium dan Heat Source



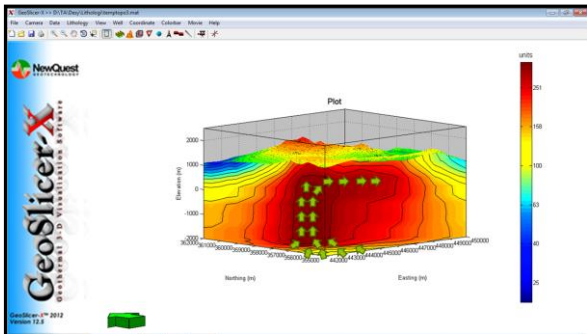
Gambar 9. Distribusi batuan Vulkanik1, Vulkanik2 dan Vulkanik3

Sebagai *host rock* dalam pemodelan, formasi batuan beku dibagi menjadi tiga tipe, yaitu batuan Vulkanik1, Vulkanik2, dan Vulkanik3. Batuan Vulkanik1 menjadi *host rock* pada layer 1, batuan Vulkanik2 menjadi *host rock* pada layer 2 dan 3, sedangkan batuan Vulkanik3 menjadi *host rock* layer 4. Ketiga tipe batuan beku ini berada diluar zona utama sistem panasbumi, yakni reservoir yang berada di tengah-tengah model. Batuan-batuan tersebut berfungsi sebagai akses zona recharge yang melalui struktur-struktur yang ada. Walaupun sama-sama batuan beku, ketiga *host rock* tersebut memiliki nilai permeabilitas yang berbeda-beda. Untuk Vulkanik1, nilai prediksi awal permeabilitas untuk arah X dan Y adalah $6,0 \times 10^{-16}$ dengan nilai estimasi terbaik $9,7 \times 10^{-18}$, sedangkan untuk arah Z nilai prediksi awal permeabilitasnya adalah $2,0 \times 10^{-16}$ dengan nilai estimasi terbaik $6,0 \times 10^{-17}$. Untuk Vulkanik2, nilai prediksi awal permeabilitas arah X dan Y adalah $3,0 \times 10^{-16}$ dengan nilai estimasi terbaik $8,8 \times 10^{-17}$, sedangkan nilai prediksi awal dan estimasi terbaik untuk arah Z berturut-turut adalah $6,0 \times 10^{-17}$ dan $4,0 \times 10^{-17}$. Yang terakhir untuk Vulkanik3, nilai prediksi awal permeabilitas arah X dan Y adalah $3,0 \times 10^{-16}$ dengan nilai estimasi terbaik senilai $3,3 \times 10^{-15}$, sedangkan untuk arah Z, nilai prediksi awal dan estimasi terbaik nya masing-masing adalah $5,0 \times 10^{-17}$ dan $1,0 \times 10^{-16}$. Untuk lebih jelasnya, distribusi ketiga tipe batuan tersebut dapat dilihat pada Gambar 9.

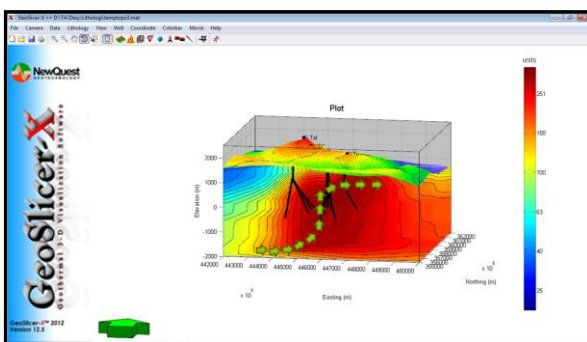
• **Distribusi Temperatur dan Arah Aliran Fluida**

Distribusi batuan mengakibatkan adanya distribusi temperatur pada sistem panasbumi lapangan Sibayak yang dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11 . Pada kedua gambar tersebut terlihat bahwa pusat panas pada sistem berada di bawah Gunung Pintau dan Gunung Sibayak dengan temperatur maksimum sebesar 341°C. Terlihat pula bahwa semakin ke arah tenggara, dan timur laut temperaturnya semakin menurun. Dari distribusi temperatur ini dapat di analisis bahwa arah aliran fluida pada sistem terbagi menjadi tiga, yaitu aliran *recharge*, *upflow* dan

outflow. Zona upflow berada tepat di bawah Gunung Pintau dan Gunung Sibayak yang dikonfirmasi dengan adanya sejumlah fumarol di daerah tersebut (Gambar 1). Sedangkan zona outflow mengarah ke tenggara (Gambar 10) dan timur laut (Gambar 11) yang dikonfirmasi dengan adanya sejumlah *hot spring* pada wilayah tersebut. Sedangkan zona *recharge* terletak di arah barat daya dan barat laut dari sistem.



Gambar 10. Distribusi panas dan hidrogeologi arah tenggara-baratlaut



Gambar 11. Distribusi temperatur dan hidrogeologi arah timurlaut-baratdaya

• Kesesuaian Kurva Temperatur Hasil Simulasi dan Data Sumur

Dari kedua pemodelan yang dilakukan, yakni pemodelan dengan TOUGH2 dan pemodelan dengan iTOUGH2, diperoleh hasil *matching* kurva temperatur terhadap elevasi yang berbeda, dengan kesesuaian yang lebih baik pada hasil iTOUGH2. Empat dari sepuluh sumur, yaitu Well1, Well6, Well7 dan Well8, yang kemudian diwakili oleh sumur Well1 (Gambar 12) menunjukkan kesesuaian kurva simulasi yang sangat baik dengan data sumur. Empat sumur tersebut letaknya berdekatan karena memang berada dalam satu *Well-pad*, sehingga tren data sumur yang ada juga tidak jauh berbeda. Temperatur di *bottom well* pada keempat sumur rata-rata 250°C. Jika diperhatikan, kurva pada sumur Well1 memiliki tren yang sedikit berbeda pada temperatur rendah. Menurut analisis penulis, hal ini mungkin disebabkan karena adanya zona *outflow* pada elevasi sekitar 1100 m yang dilalui oleh sumur Well1. Secara keseluruhan, ke empat profil temperatur sumur tersebut sesuai dengan profil temperatur teoritis untuk sistem panasbumi dominasi air. Pada sumur Well3 dan Well4, yang diwakili oleh sumur Well3 (Gambar 12), peranan pemodelan *inverse* lebih terlihat, yakni dari peningkatan kesesuaian hasil simulasi dengan data sumur yang ada. Secara garis besar, tren kurva hasil *forward* (TOUGH2) dan *inverse* (iTOUGH2) hampir mirip. Namun jika diperhatikan, kurva hasil *inverse* lebih sesuai dengan data sumur pada beberapa titik yang menunjukkan perubahan temperatur yang detail. Hasil yang lebih baik ini terjadi karena iTOUGH2 mengubah nilai

parameter batuan secara otomatis selama proses iterasi dalam inversi. Nilai parameter ubahan tersebut merupakan nilai estimasi terbaik yang lebih *reasonable* daripada nilai prediksi awal yang diberikan. Untuk temperatur *bottom well*, seperti halnya empat sumur yang telah dibahas sebelumnya, sumur Well3 dan Well4 memiliki nilai yang mirip, yaitu sekitar 275°C.

Empat sumur yang lain (Gambar 12) menunjukkan kesesuaian yang baik pada daerah-daerah tertentu. Untuk sumur Well2 dan sumur Well10, kesesuaian yang baik terjadi pada elevasi dangkal, sedangkan sumur Well5 dan Well9, kesesuaian justru terjadi pada elevasi yang dalam. Analisis penulis untuk ketidaksesuaian tren pada elevasi dalam untuk kasus Well2 dan Well10 serta ketidaksesuaian tren pada elevasi dangkal untuk sumur Well5 dan Well9 adalah nilai permeabilitas dan atau nilai konduktivitas panas yang terlalu besar pada pemberian input parameter prediksi awal, sehingga iTOUGH2 kurang mampu menyesuaikan kondisi tersebut dengan data sumur yang ada. Analisis lain yang mungkin adalah kondisi *real* dari sumur tersebut yang kurang pas dengan jenis EOS yang digunakan. Untuk sumur Well9, diperkirakan terdapat *non-condensable gas* (NCG) pada elevasi antara 1200 m sampai 800 m. Keberadaan NCG ini tidak terdefinisi dalam EOS1 yang digunakan, karena dalam EOS1, sistem dianggap hanya berisi air dan atau *tracer*. Keberadaan NCG dapat didefinisikan jika EOS yang digunakan adalah EOS14. Namun karena keterbatasan *software* TOUGH2 dan iTOUGH2 yang dimiliki saat ini, maka penulis hanya bisa menggunakan EOS1 dalam penelitian tugas akhir ini. Namun demikian, secara keseluruhan terlihat bahwa pemodelan inversi dapat meningkatkan kesesuaian kurva simulasi dengan data sumur yang ada.

Dari semua kurva yang telah ditampilkan, sumur Well2 memiliki tren temperatur yang berbeda daripada yang lain, yakni pada kedalaman tertentu temperturnya justru berkurang. Hal ini mengindikasikan adanya zona *recharge* dari air meteorik, sehingga sumur Well2 dapat direkomendasikan sebagai sumur reinjeksi. Sumur lain yang dapat direkomendasikan sebagai sumur reinjeksi adalah sumur Well10, karena temperturnya juga relatif rendah daripada sumur-sumur yang lain. Dengan demikian kedelapan sumur yang lain merupakan sumur produksi. Dari delapan sumur produksi tersebut, sumur yang diperkirakan akan menghasilkan daya terbesar adalah sumur Well5, karena temperatur maksimumnya mencapai 320°C.

Sejalan dengan peningkatan kesesuaian kurva tersebut, iTOUGH2 juga mengubah nilai parameter prediksi awal menjadi nilai estimasi terbaik. Nilai estimasi terbaik ini diinterpretasikan sebagai nilai yang lebih mendekati kebenaran dari nilai parameter yang sebenarnya di lapangan panasbumi Sibayak. Tabel 1 a dan b menampilkan nilai estimasi terbaik dari parameter-parameter batuan yang dimaksud.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari pembahasan pada bagian sebelumnya adalah:

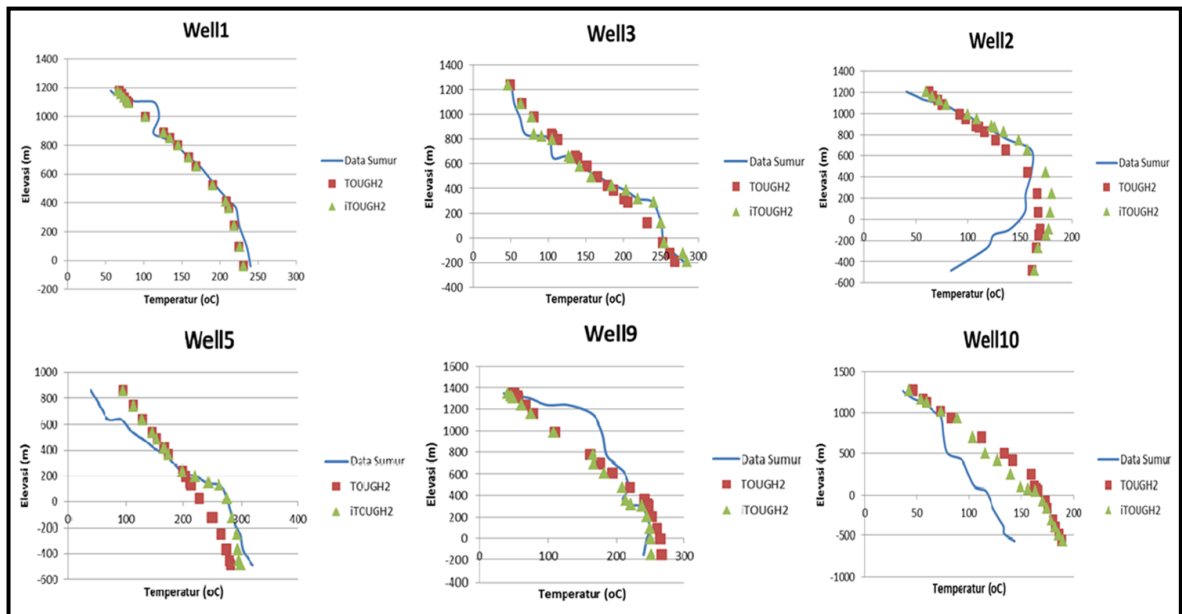
1. Kondisi *Natural State* yang diindikasikan dengan kesesuaian profil temperatur sumur dengan hasil simulasi telah tercapai, dengan nilai estimasi terbaik parameter fisis batuan yang diberikan oleh hasil inversi dengan *software* iTOUGH2. Dalam visualisasi model tiga dimensi, juga terlihat kesesuaian model simulasi dengan data geologi, geofisika dan geokimia yang ada. Kondisi *Natural State* tersebut adalah sebagai berikut:
 - a. Heat Source berada di bawah Gunung Pintau dan Gunung Sibayak dengan entalpi dengan entalpi

1561 kJ/kg dan *flow rate* dari fluida yang mengalir ke dalam sistem sebesar 56 kg/s.

- b. Reservoir berada di bawah Gunung Pintau, Gunung Sibayak dan Gunung Pratektekam pada elevasi sekitar 0 sampai 1000 m, atau kedalaman top reservoirnya 2000 m dari permukaan
 - c. *Clay cap* berada tepat di atas reservoir dengan ketebalan sekitar 1500 m, dengan singkapan batuan alterasi di permukaan
 - d. *Upflow* berada tepat di bawah Gunung Pintau dan Gunung Sibayak, dengan konfirmasi keberadaan fumarol dipermukaan
 - e. *Outflow* mengarah ke tenggara dan timur laut dari Gunung Pintau dan Gunung Sibayak dengan konfirmasi keberadaan *hot spring* di permukaan
 - f. *Zona Recharge* berada pada arah barat daya dan barat laut Gunung Sibayak
2. Proses inversi model dengan iTOUGH2 secara keseluruhan dapat meningkatkan kesesuaian temperatur sumur dengan temperatur hasil simulasi. Hal ini dapat dilihat dari kurva-kurva yang disajikan pada bagian hasil dan pembahasan

DAFTAR ACUAN

1. Atmojo, J.P., Itoi, R., Tanaka, T., Fukuda, M., Sudarman, S. and Widiyarso, A. 2000. Modeling Studies of Sibayak Geothermal Reservoir, Northern Sumatra, Indonesia. *Proceedings of World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, Japan.
2. Daud, Y., Sudarman, S. and Ushijima, K. 2001. Imaging Reservoir Permeability of The Sibayak Geothermal Field, Indonesia Using Geophysical Measurements. *Proceedings of Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California.
3. Daud, Y. 2002. *Geophysical Studies Over The Sibayak Geothermal Area (Indonesia)*. Unpublished PhD Disertation, Kyushu University, Japan.
4. Daud, Y. and Saputra, R. 2010. GeoSlicer-X – A 3-D Interactive Software for Geothermal Data Analysis. *Preceeding of World Geothermal Congress 2010, 1-5*. Bali.



Gambar 12. Profil temperatur terhadap elevasi untuk sumur Well1, sumur Well3, serta sumur Well2, Well10, Well5, Well9

Tabel 1. Tabel parameter fisis prediksi awal pada pemodelan forward dengan TOUGH2 dan hasil estimasi terbaik yang dihasilkan oleh inversi dengan iTOUGH2

a)

Tipe Batuan	Permeabilitas-X (m2)		Permeabilitas-Y (m2)		Permeabilitas-Z (m2)	
	Prediksi Awal	Estimasi Terbaik	Prediksi Awal	Estimasi Terbaik	Prediksi Awal	Estimasi Terbaik
<i>Overburden</i>	1,0 E-14	7,9 E-16	1,0 E-14	7,9 E-16	1,0 E-14	7,5 E-16
Vulkanik1	6,0 E-16	9,7 E-18	6,0 E-16	9,7 E-18	2,0 E-16	6,0 E-17
Vulkanik2	3,0 E-16	8,8 E-17	3,0 E-16	8,8 E-17	6,0 E-17	4,6 E-17
Vulkanik3	3,0 E-16	3,3 E-15	3,0 E-16	3,3 E-15	5,0 E-17	1,0 E-16
Alterasi	3,5 E-18	1,2 E-14	3,5 E-18	1,2 E-14	7,0 E-19	2,2 E-18
Densifikasi	5,0 E-18	4,6 E-18	5,0 E-18	4,6 E-18	8,0 E-19	1,4 E-18
Medium	1,5 E-14	1,0 E-13	1,5 E-14	1,0 E-13	4,0 E-15	3,1 E-16
Reservoar	2,5 E-14	2,1 E-11	2,5 E-14	2,1 E-11	5,0 E-15	7,0 E-15
<i>Heat Source</i>	1,0 E-14	9,3 E-15	1,0 E-14	9,3 E-15	2,0 E-15	5,0 E-12
Kaldera Rim	1,0 E-18	1,5 E-18	1,0 E-18	1,5 E-18	1,0 E-19	1,9 E-19

b)

Tipe Batuan	Porositas		Kapasitas Panas Spesifik (J/kg°C)		Konduktivitas Panas (W/m°C)	
	Prediksi Awal	Estimasi Terbaik	Prediksi Awal	Estimasi Terbaik	Prediksi Awal	Estimasi Terbaik
<i>Overburden</i>	0,10	0,60	1000	629	2,0	2,6
Vulkanik1	0,05	0,04	1000	629	2,0	2,6
Vulkanik2	0,05	0,04	1000	629	2,0	2,6
Vulkanik3	0,05	0,04	1000	629	2,0	2,6
Alterasi	0,04	0,28	2500	3054	1,0	0,7
Densifikasi	0,04	0,28	2500	3054	1,0	0,7
Medium	0,10	0,60	1250	448	2,5	0,5
Reservoar	0,10	0,60	1250	448	2,5	0,5
<i>Heat Source</i>	0,10	0,60	1000	629	2,5	0,5
Kaldera Rim	0,05	0,04	3350	2271	0,8	0,8