



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN RESERVOIR SISTEM GEOTHERMAL DENGAN
SIMULASI RESERVOIR TOUGH2**

NURINA KD

0606068524

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN RESERVOIR SISTEM GEOTHERMAL DENGAN
SIMULASI RESERVOIR TOUGH2**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Sains**

NURINA KD

0606068524

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Nurina KD

NPM : 0606068524

Tanda Tangan :

Tanggal : 24 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : NURINA KD

NPM : 0606068524

Program Studi : Geofisika

Judul Skripsi : PEMODELAN RESERVOIR SISTEM GEOTHERMAL DENGAN
SIMULASI RESERVOIR TOUGH2

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc.

Pembimbing II: Dr. Jatmiko P. A

Penguji : Dr. Zainal A.

Penguji : Dr. Supriyanto

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'alamiin. Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

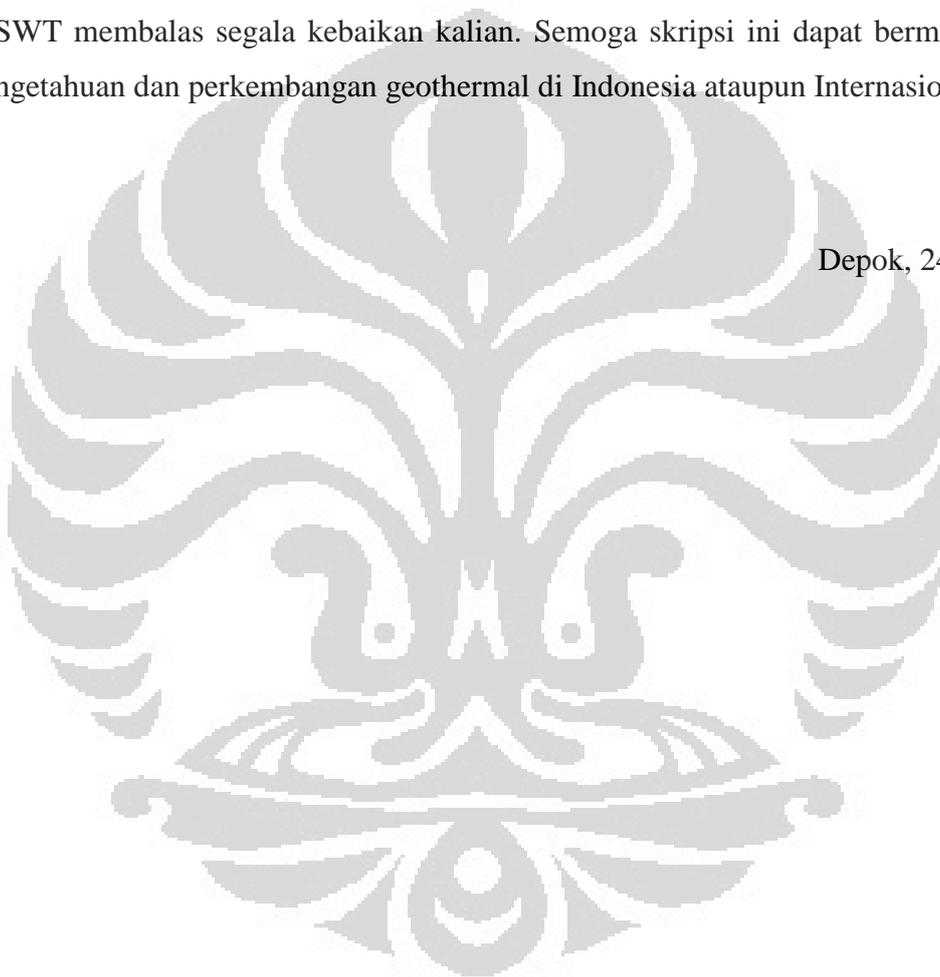
Saya sangat menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai dengan penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini. Selalu memberikan dukungan, saran dan masukan yang sangat bermanfaat dalam proses pembuatan skripsi ini maupun untuk kedepannya.
2. Dr. Jatmiko P.A, selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu, mengajari banyak hal mengenai reservoir dan hal lainnya. Terimakasih banyak atas kesediaan waktu, tenaga dan pikirannya untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
3. Terkhusus untuk kedua orang tua dan keluarga saya yang tidak pernah hentinya memberikan dukungan baik moral maupun material, semangat serta doa yang selalu kalian curahkan. Terimakasih banyak Mama, Papa, Mas Febri, dan Dek Fira, semoga kalian senantiasa dalam lindungan Allah SWT. Amiin.
4. Pradipta Ranggaseño yang telah banyak menemani dan selalu memberikan semangat dan dukungan ketika pengerjaan skripsi ini. Terimakasih banyak juga untuk Om Prayudi, Mama Tis, Mba Anty, Mama Titiek, Om Bang, dan Mba Mita yang juga selalu memberikan dukungan dan semangat.
5. Ka Lendri dan Ka Surya, terima kasih banyak atas masukan, dukungan serta diskusi yang selalu dan sangat bermanfaat.

6. Wulan Yuliasuti, *my room mate* yang selalu memberikan dukungan dan semangat. Serta masukan-masukan yang sangat berarti.
7. Seluruh sahabat dan teman-teman. Heni, Intan, Puspita, Atul, Lia, Andy, Icha, Mursi, Faizal, Arfan, Momoi, Mamet, Mello, Erwin, Ka Rian, Habi, Mas Budi, Hendi, dan lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih banyak atas doa dan dukungannya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, terima kasih banyak untuk semua pihak yang telah membantu. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan kalian. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi ilmu pengetahuan dan perkembangan geothermal di Indonesia ataupun Internasional.

Depok, 24 Juni 2010



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nurina KD
NPM : 0606068524
Program Studi : Geofisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, meyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

PEMODELAN RESERVOIR SISTEM GEOTHERMAL DENGAN SIMULASI RESERVOIR TOUGH2

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/penciptaan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 24 Juni 2010
Yang menyatakan

(Nurina KD)

ABSTRAK

Nama : Nurina KD
Program Studi : Geofisika
Judul : PEMODELAN RESERVOIR SISTEM GEOTHERMAL DENGAN SIMULASI RESERVOIR TOUGH2

Area geothermal Hayati merupakan daerah prospek yang terbentuk karena aktivitas tektonik dan vulkanik. Secara stratigrafi memiliki formasi batuan vulkanik yang terbentuk pada zaman kuartar di bagian atasnya, dan formasi sedimen terbentuk pada zaman pra-Tertier di bagian bawahnya. Sistem geothermal ini ditunjukkan dengan adanya upflow di bagian tengah yang diindikasikan oleh manifestasi fumarol, serta fluida yang mengalir membentuk outflow ke tenggara dengan ditemukannya *hot springs* di daerah tersebut. Data MT menunjukkan adanya lapisan clay cap yang membentuk up-dome shape dan data gravity membentuk kaldera. Untuk mengetahui karakteristik reservoir, letak dan besar energi heat source, serta hidrogeologi maka diperlukan pemodelan dan simulasi reservoir dengan menggunakan simulator TOUGH2. Parameter yang digunakan berdasarkan data geofisika, geologi, geokimia dan data sumur yang meliputi batas sistem yang dimodelkan, permeabilitas, porositas, densitas batuan serta kapasitas panas spesifik. Hasil model simulasi merupakan kondisi *natural state* yang dicapai ketika data temperatur sumur dan hasil simulasi sesuai. Pemodelan hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk 3-dimensi. Diperoleh bahwa *heat source* berada di sekitar G.Putik, G.Hayati dan G.Paras dengan *top reservoir* yang berada pada elevasi 200 m serta luas reservoir sekitar 6,7 km². Hasil simulasi juga merekomendasikan letak sumur-sumur produksi dan injeksi untuk tahap pengembangan.

Kata kunci : sistem geothermal, reservoir, simulasi reservoir, *upflow*, *outflow*, TOUGH2, *natural state*, *heat source*

ABSTRACT

Name : Nurina KD
Study program : Geophysics
Title : MODELLING OF GEOTHERMAL SYSTEM USING TOUGH2
RESERVOIR SIMULATOR

Hayati geothermal is a geothermal prospect area formed due to tectonic and vulcanic activities. Stratigraphically this area is composed of volcanic rocks formations from the quartial age on its top and the formations of sedimentary rocks from the pre-tertiary age on its bottom. This geothermal system showed an upflow in center, indicated of fumarol manifestation, and fluid flow forming an outflow in the south east with occurred hot springs. MT data shows up-dome shape clay cap, and gravity data shows a caldera. To determine about reservoir characteristic, location and energy total of heat source, and hydrogeology, furthermore the reservoir simulation is done with TOUGH2 simulation. The simulation requires several parameters based on geophysics, geology, geochemistry, and well data are including the system boundary that will be modeled, permeability, porosity, rock density and specific heat capacity. The result of the simulation is a natural state condition model that reached when the temperature well data and result of the simulation are match. Modeling of the simulation result are showed on three-dimensional. The obtained results are the heat source exists in the vicinity of Mt.Putik, Mt.Hayati, Mt.Paras with top reservoir exists on elevation 200 m and has a reservoir area of approximately 6.7 km². As an addition, the simulation results are recommending of production and injection wells location for development stage.

Keywords : geothermal system, reservoir, reservoir simulation, upflow, outflow, TOUGH2, natural state, heat souce

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PENGESAHAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR DIAGRAM	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Batasan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Simulasi reservoir	5
2.2 Jenis fasa fluida	5
2.2.1 Sistem dominasi uap	5
2.2.2 Sistem dominasi air	6
2.3 Aliran fluida	8
2.4 Kesetimbangan massa	10
2.5 Kesetimbangan panas	12
2.6 Parameter fisik batuan	12
2.7 Grid	15
BAB III TINJAUAN DAERAH PENELITIAN	17
3.1 Kondisi geologi daerah penelitian	17
3.1.1 Fisiografi dan morfologi	18
3.2 Kondisi geokimia	18
3.2.1 Manifestasi permukaan	19
3.3 Data geofisika	19
3.3.1 Hasil metode MT	19
3.3.2 Hasil metode gravitasi	24

3.3	Distribusi permeabilitas reservoir	25
3.4	Batas reservoir	26
3.5	Model konseptual geothermal Sibayak	27
3.6	Hidrogeologi	27
BAB IV DATA SUMUR DAN SIMULASI RESERVOIR		29
4.1	Data sumur	29
4.2	Simulasi reservoir 3-dimensi	31
4.2.1	Data Input	31
4.2.1.1	Batasan koordinat	31
4.2.1.2	EOS (<i>Equation-Of-State</i>)	32
4.2.1.3	Sistem grid	33
4.2.1.4	Permeabilitas dan parameter batuan	35
4.2.1.5	Batas dan <i>initial conditions</i>	37
4.2.1.6	<i>Sinks and sources</i>	38
4.3	Proses simulasi <i>natural state</i> 3-dimensi	39
4.4	Hasil simulasi reservoir 3-dimensi	41
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		44
5.1	Interpretasi terintegrasi	44
5.1.1	Model sistem geothermal dan model simulasi	49
5.2	Rekomendasi skenario sumur produksi dan injeksi	54
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		55
6.1	Kesimpulan	55
6.2	Saran	56
DAFTAR PUSTAKA		57

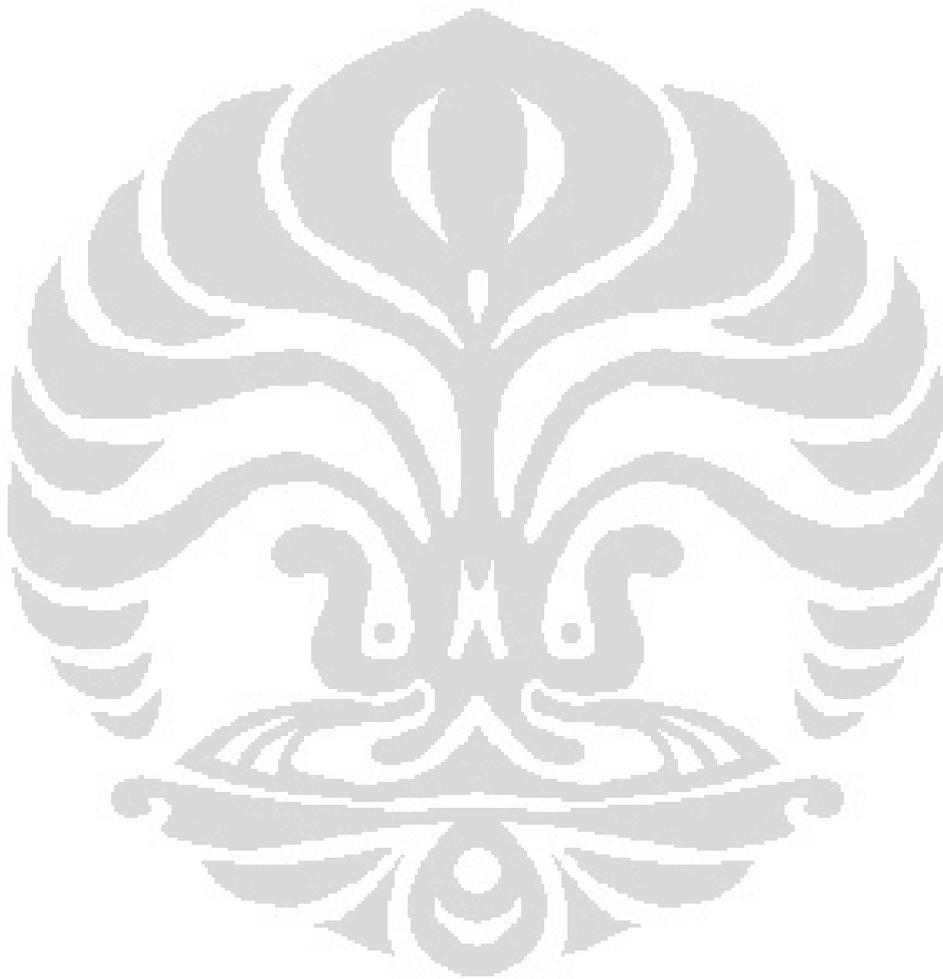
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Letak geografis Hayati	1
Gambar 2.1	<i>Vapour dominated system</i>	6
Gambar 2.2	<i>Liquid dominated system</i>	7
Gambar 2.3	Dimensi medium berpori antara permukaan-permukaan pada tekanan konstan	8
Gambar 2.4	Grid n yang berhubungan dengan m pada penampang 2 dimensi	10
Gambar 2.5	Data geometri pada metode integral <i>finite difference</i>	11
Gambar 2.6	Grid 2-D penampang vertikal	15
Gambar 3.1	Peta Geologi Hayati	18
Gambar 3.2	Desain pengukuran	20
Gambar 3.3	Line MT-1	20
Gambar 3.4	Line MT-6	22
Gambar 3.5	Peta distribusi spasial yang menginterpretasikan bentuk <i>up-dome</i> pada lapisan resistivitas di bawah lapisan batuan yang teralterasi	23
Gambar 3.6	Hasil pengukuran anomali residual gravitasi	24
Gambar 3.7	Model konseptual anomali residual gravitasi	25
Gambar 3.8	Distribusi permeabilitas Hayati	26
Gambar 3.9	Batas reservoir Hayati berdasarkan data geofisika	26
Gambar 3.10	Model konseptual geothermal Hayati	27
Gambar 3.11	Peta hidrogeologi area geothermal Hayati	28
Gambar 4.1	Distribusi litologi dan lokasi <i>water loss zones</i> sumur Hayati	29
Gambar 4.2	Sirkulasi <i>water loss zones</i> pada elevasi -450 m diatas permukaan laut	30
Gambar 4.3	Batas koordinat sistem yang disimulasikan	31
Gambar 4.4	Modul EOS yang digunakan	32
Gambar 4.5	Grid dengan metode <i>Meshmaker</i>	34
Gambar 4.6	Penampang grid horizontal simulasi model 3-dimensi	34
Gambar 4.7	Parameter batuan	37

Gambar 4.8	<i>Initial condition</i>	38
Gambar 4.9	<i>Sinks dan sources</i>	38
Gambar 4.10	Lapisan horizontal model simulasi pada layer 1	40
Gambar 4.11	Plot temperatur data sumur dan simulasi	42
Gambar 5.1	Distribusi tipe batuan “barr”	44
Gambar 5.2	Distribusi tipe batuan “high”	45
Gambar 5.3	Distribusi tipe batuan “vlow” dan “dens”	46
Gambar 5.4	Distribusi tipe batuan “bott”, “top”, “med” dan “low”	47
Gambar 5.5	Distribusi tipe batuan “side1” dan “side2”	47
Gambar 5.6(a)	Distribusi temperatur arah barat laut – tenggara	48
Gambar 5.6(b)	Distribusi temperatur arah utara, timur laut dan tenggara	49
Gambar 5.7	Distribusi tekanan dengan visualisasi 3-Dimensi	49
Gambar 5.8	Temperatur <i>top reservoir</i>	50
Gambar 5.9	Distribusi <i>heat source</i>	51
Gambar 5.10	Geometri lapisan <i>clay</i>	52
Gambar 5.11	Arah aliran <i>upflow</i> dan <i>outflow</i> dari <i>fluida</i>	53
Gambar 5.12	Distribusi temperatur secara horizontal	53
Gambar 5.13	Rekomendasi sumur produksi dan sumur injeksi	54

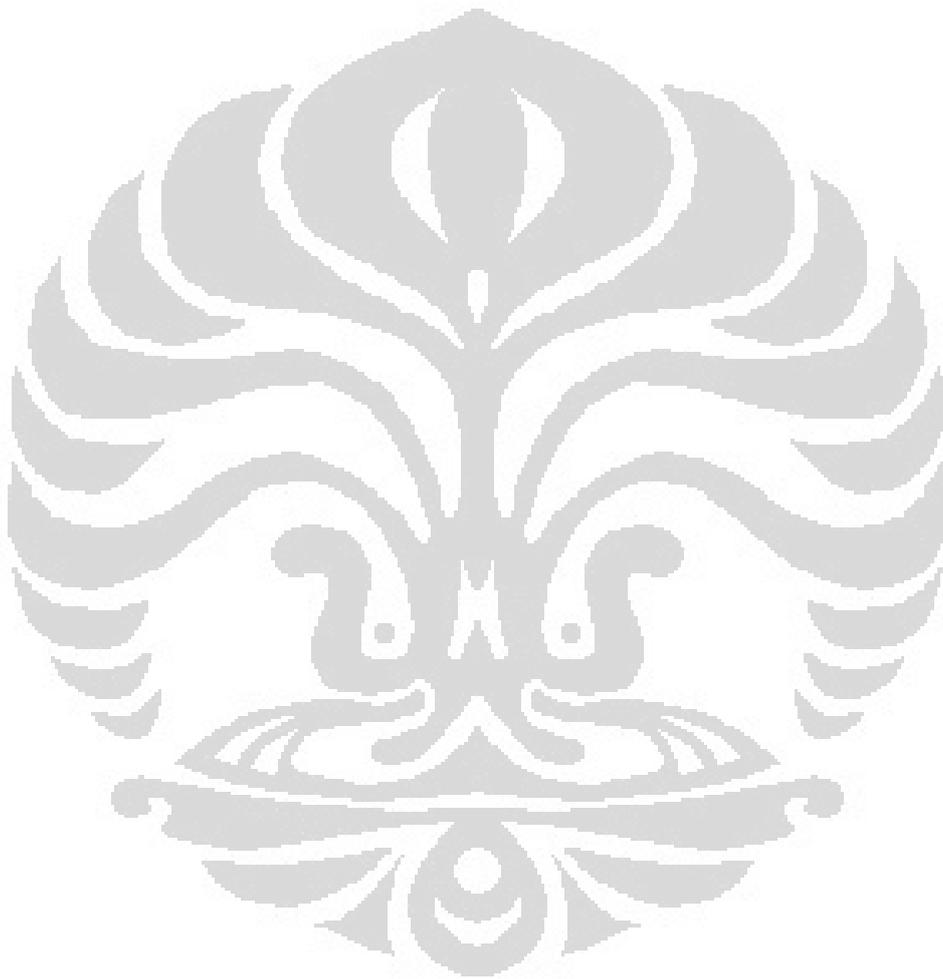
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai parameter fisik batuan	13
Tabel 4.1	Modul EOS fluida tahun 1991	32
Tabel 4.2	Modul EOS fluida terbaru	33
Tabel 4.3	Parameter batuan	37



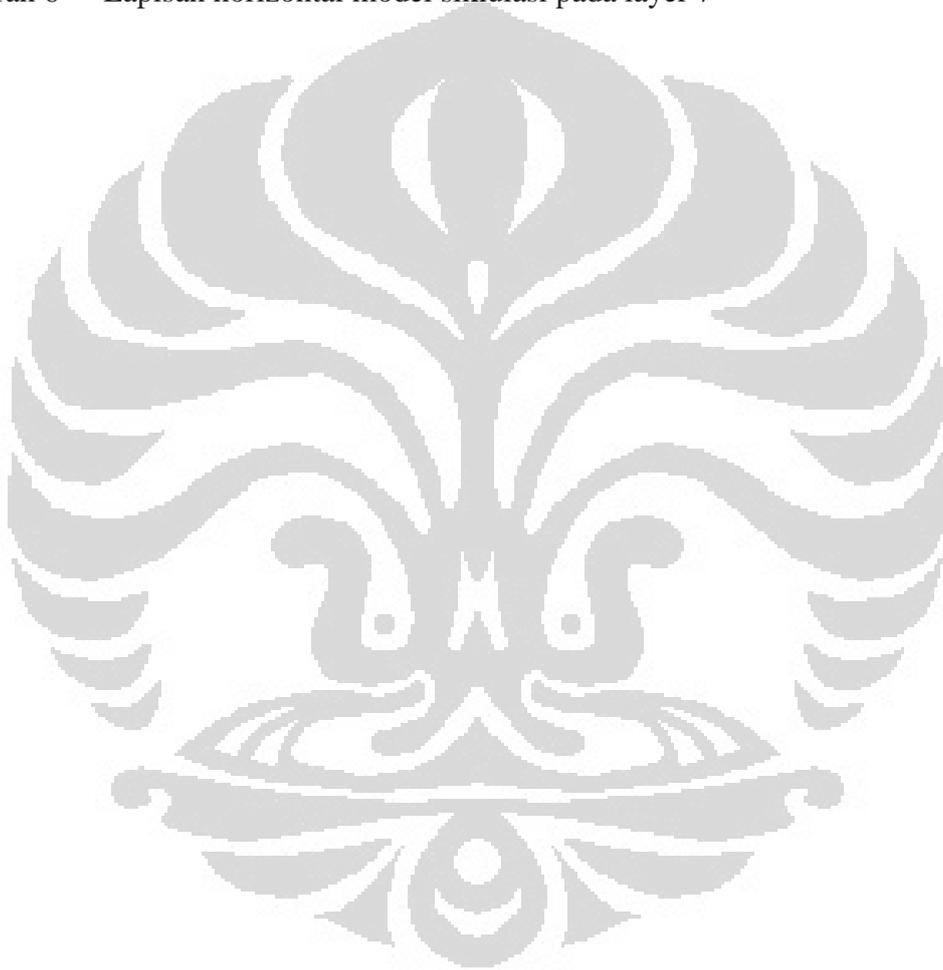
DAFTAR DIAGRAM

Diagram 1.1	Diagram alir pemodelan reservoir geothermal	4
Diagram 2.1	Parameter fisik batuan	12



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Lapisan horizontal model simulasi pada layer 2	59
Lampiran 2	Lapisan horizontal model simulasi pada layer 3	60
Lampiran 3	Lapisan horizontal model simulasi pada layer 4	61
Lampiran 4	Lapisan horizontal model simulasi pada layer 5	62
Lampiran 5	Lapisan horizontal model simulasi pada layer 6	63
Lampiran 6	Lapisan horizontal model simulasi pada layer 7	64

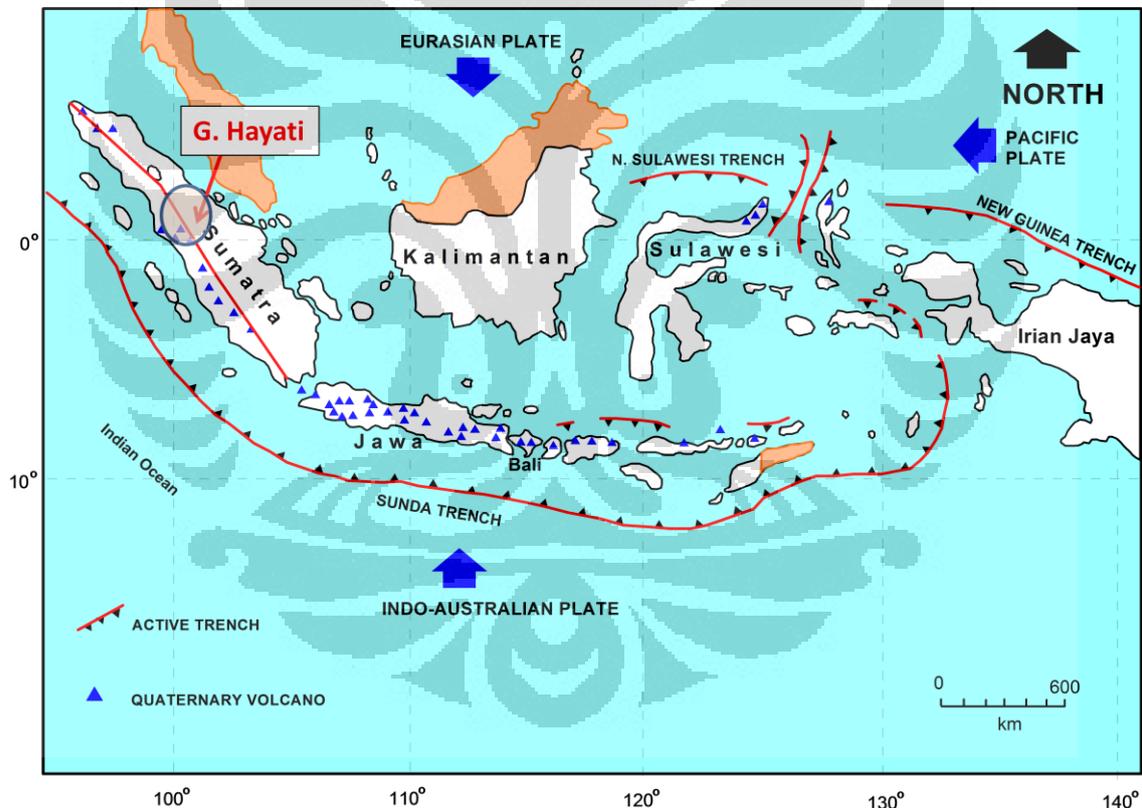


BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Hayati merupakan area prospek geothermal yang berlokasi di Pulau Sumatra dan terletak pada Kaldera Side dengan elevasi 1400 serta diapit oleh tiga gunung vulkanik aktif, diantaranya Gunung Putik (2212 m), Gunung Hayati (2000 m), dan Gunung Paras (1844 m). Oleh sebab itu, keadaan geologis dari daerah Hayati ini dipengaruhi oleh adanya aktivitas tektonik dan vulkanik. Secara stratigrafi kondisi geologis di daerah prospek geothermal Hayati memiliki formasi batuan vulkanik yang terbentuk pada zaman kuartar di bagian atasnya, dan formasi sedimen yang terbentuk pada zaman pra-Tertier di bagian bawahnya (Atmojo, 2000).



Gambar 1.1 Letak geografis Hayati (modifikasi: Daud, 2009)

Aktivitas tektonik dan vulkanik yang terjadi pada Kaldera Side menyebabkan terbentuknya banyak patahan sehingga kaldera Side merupakan zona lemah dan memiliki permeabilitas tinggi yang memudahkan fluida untuk mengalir. Selain itu, banyaknya

struktur berupa patahan yang terjadi pada zona lemah ini mengakibatkan munculnya manifestasi permukaan. Manifestasi yang muncul adalah *hot spring* dengan tipe bikarbonat sulfat dan *travertine* di sekitarnya yang mengindikasikan adanya aliran *outflow* (Atmojo,dkk,2000). Selain itu, manifestasi yang muncul adalah *fumarol* dan sulfatara yang berada di bagian tenggara dari Gunung Putik dengan temperatur $90^{\circ} - 116^{\circ} \text{ C}$ yang mengindikasikan adanya aliran *upflow*.

Banyaknya manifestasi berupa *fumarol* dan *hot spring* yang muncul di permukaan dan diperkuat oleh data MT yang menunjukkan bahwa di sekitar G.Putik dan G.Hayati hingga ke selatan memiliki indikasi *clay* dengan diperoleh hasil yang menunjukkan nilai resistivitas rendah. Serta data *gravity* menunjukkan adanya anomali residual yang rendah di G.Putik dan G.Hayati serta G.paras yang mengindikasikan adanya kaldera di daerah tersebut. Serta di dukung oleh data temperatur sumur, maka area sistem geothermal Hayati ini dikembangkan dengan membuat 10 sumur dari 3 *well pad*. Hasil yang diperoleh dari 10 sumur yang ada, menunjukkan bahwa Hayati memiliki sistem geothermal dengan potensi besar dan dapat dimanfaatkan. Maka perlu dilakukan simulasi reservoir dengan menggunakan metode estimasi simulasi reservoir yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik reservoir dari lapangan panas bumi Hayati, seberapa besar entalpi *heat source* yang dimiliki dengan melakukan simulasi model untuk mencari *natural state* dari lapangan panas bumi Hayati. Simulasi reservoir yang dilakukan berdasarkan hasil penyelidikan data geologi, geofisika, geokimia yang diintegrasikan dengan data sumur serta karakteristik reservoir geothermal.

1.2 Batasan Masalah

Dalam pembuatan model simulasi reservoir diperlukan parameter – parameter yang mempengaruhi sistem reservoir geothermal yang didapat dari data geologi, geofisika, dan geokimia dan mengintegrasikannya dengan data sumur. Simulasi reservoir menggunakan simulator TOUGH2 yang telah dipadukan oleh software PetraSim yang perlu dilakukan pengembangan terlebih dahulu. Identifikasi temperatur data sumur sebagai parameter kesesuaian antara hasil model simulasi dengan keadaan sesungguhnya di lapangan.

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini memiliki tujuan adalah sebagai berikut :

- Mengetahui letak dan karakteristik reservoir dari sistem geothermal Hayati.
- Mengetahui letak *heat source* dari sistem geothermal Hayati.
- Mengetahui hidrogeologi yang terdapat di daerah prospek geothermal Hayati.
- Membuat model terpadu sistem geothermal Hayati.
- Mengetahui model simulasi *natural state* sistem geothermal Hayati.

1.4 Manfaat Penelitian

Keluaran dari seluruh hasil penelitian ini diharapkan nantinya dapat digunakan untuk membantu menganalisis mengenai reservoir sistem geothermal di area prospek Hayati, yang tahap selanjutnya jika sistem ini sudah diketahui atau diperkirakan dengan menggunakan berbagai macam metode baik geologi, geokimia, maupun geofisika dapat diketahui mengenai letak dan karakteristik dari reservoir sistem geothermal di daerah tersebut. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat mengetahui model *natural state* dari lapangan panas bumi.

1.5 Metodologi Penelitian

Secara umum metode penelitian yang dilakukan dalam penyusunan tugas akhir ini antara lain meliputi pengkajian data geologi, geokimia, dan geofisika yang dimiliki. Setelah itu mengintegrasikan semua data tersebut dengan data sumur. Bila semua data yang dimiliki telah sesuai, maka dilakukan pembuatan konseptual model. Identifikasi data geofisika berupa pengukuran MT digunakan untuk mengetahui model dasar dari persebaran batuan dengan permeabilitas yang berbeda. Letak dan karakteristik reservoir geothermal diidentifikasi melalui data permeabilitas batuan serta data distribusi persebaran MT. Data hidrogeologi dari lapangan panas bumi Hayati digunakan untuk mengetahui arah aliran dari fluida reservoir.

Lalu menentukan bagian sistem yang akan dimodelkan. Selain itu, dipersiapkan pula data-data yang harus diinput pada simulator TOUGH2 yang telah dipadukan oleh software PetraSim yang akan digunakan untuk simulasi. Data-data yang diinput merupakan parameter yang dibutuhkan dalam proses simulasi, berupa porositas,

permeabilitas, densitas, kapasitas panas spesifik dan konduktivitas panas batuan. Setelah semua data tersebut diinput dalam simulator, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan memvariasikan parameter-parameter yang ada dan menganalisa hasilnya. Setelah itu melakukan pembuatan model *natural state* dengan menggunakan metode simulasi reservoir.

Seluruh metodologi ini digambarkan menjadi sebuah alur penelitian yang dapat dilihat pada diagram 1.1

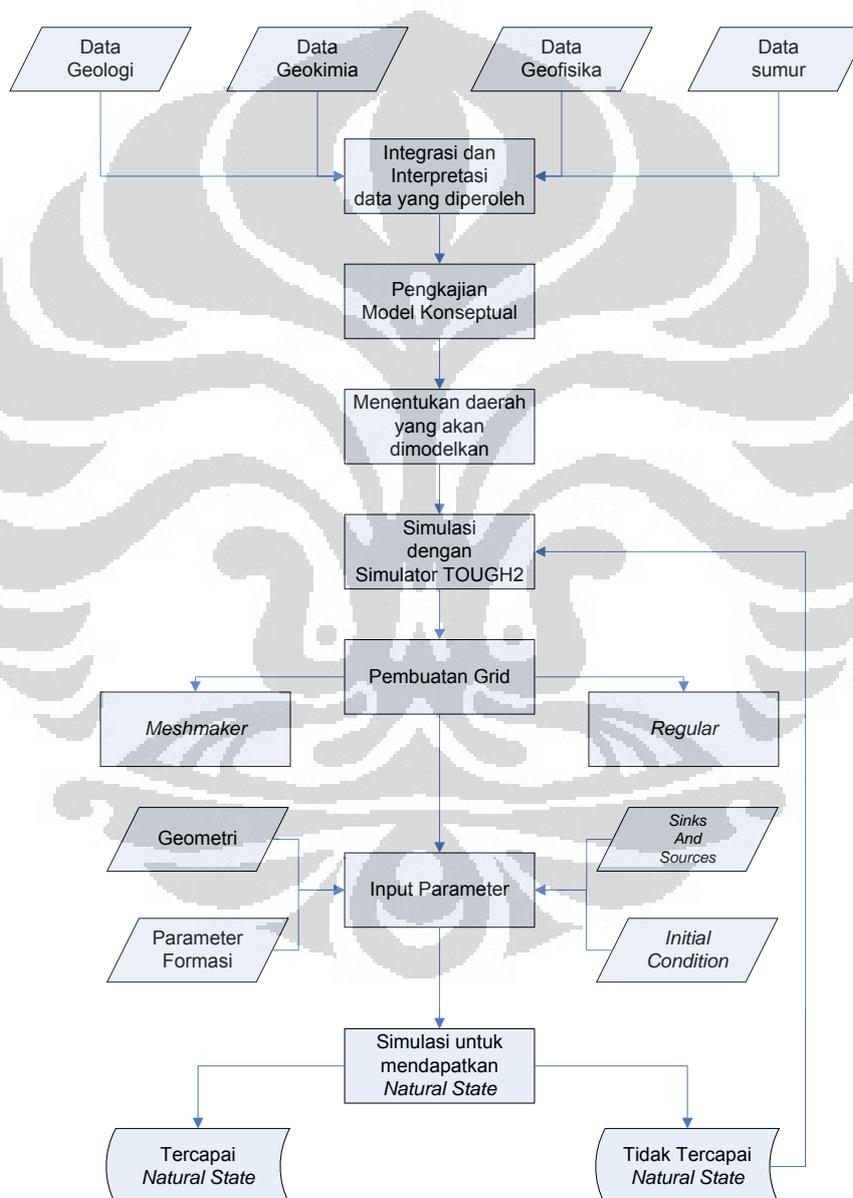


Diagram 1.1 Diagram alir pemodelan reservoir geothermal

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Simulasi reservoir

Metode simulasi reservoir merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik reservoir dan mengetahui besar potensi yang dimiliki. Pembuatan model geometri dan karakteristik reservoir menggunakan simulator TOUGH2. Model simulasi dibuat dalam bentuk grid yang memiliki bentuk geometri serta batas reservoir yang didapatkan dari data geofisika (*Magnetotelluric/MT*). Model konseptual yang dari data *Magnetotelluric (MT)* sangat menentukan model grid yang akan digunakan dalam melakukan simulasi. Batas geometri dan banyaknya grid yang digunakan akan mempengaruhi hasil dari simulasi model reservoir geothermal.

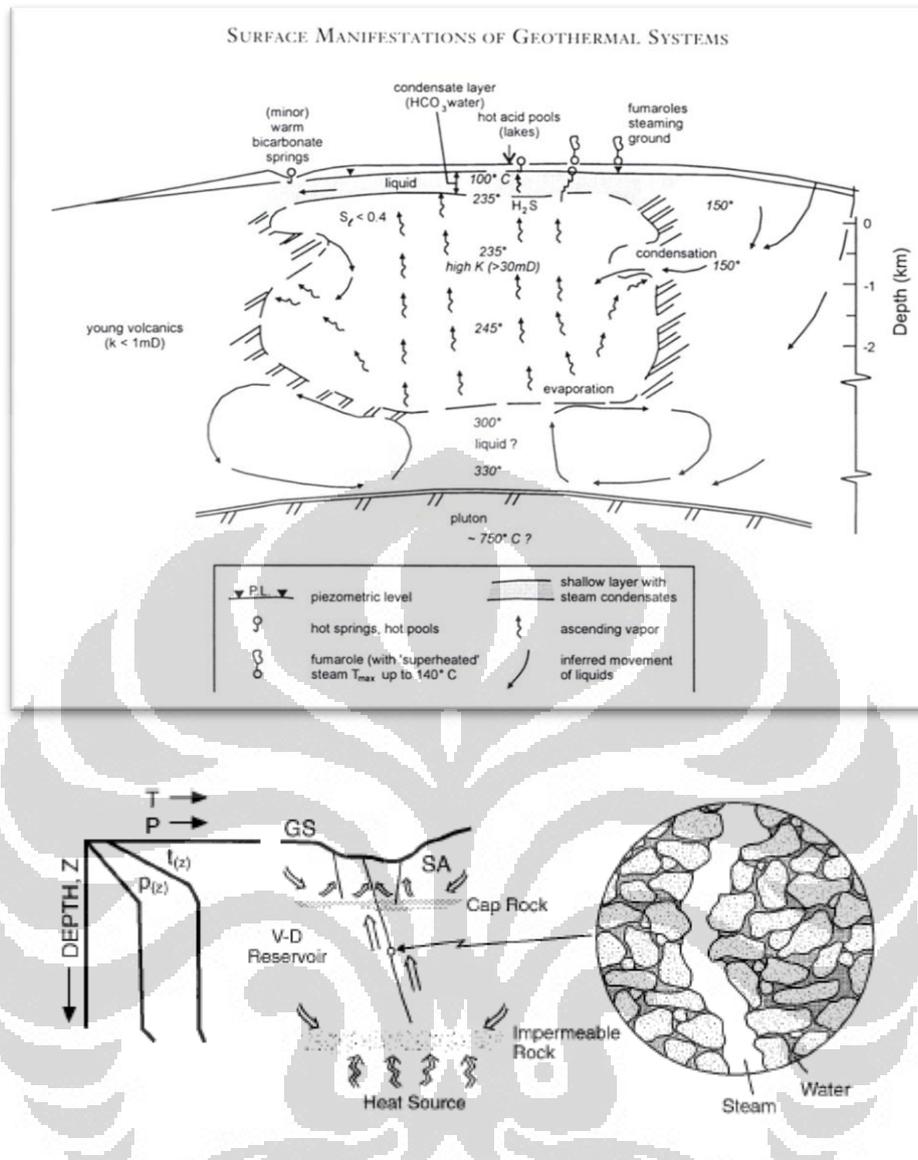
Parameter fisik batuan yang diinput pada simulator TOUGH2 berupa densitas, porositas, permeabilitas, konduktivitas panas, serta kapasitas panas spesifik. Keberadaan kedalaman serta ketebalan dari batuan di lapangan didapatkan dari data sumur. Temperatur serta produksi massa (ton/jam) juga didapat dari data sumur.

2.2 Jenis fasa fluida

Pengklasifikasian jenis fasa fluida tergantung pada kandungan dari fasa fluidanya. Terdapat dua jenis fasa fluida, satu fasa dan dua fasa. Masing-masing dari jenis fasa memiliki karakteristik dan kandungan fluida yang berbeda. Sistem satu fasa fluida umumnya berisi air yang mempunyai temperatur $90^{\circ} - 180^{\circ}\text{C}$ dan tidak terjadi pendidihan selama masa eksploitasi. Sedangkan sistem dua fasa fluida terdiri dari *vapour dominated system* (sistem dominasi uap) dan *water dominated system* (sistem dominasi air).

2.2.1 Sistem dominasi uap

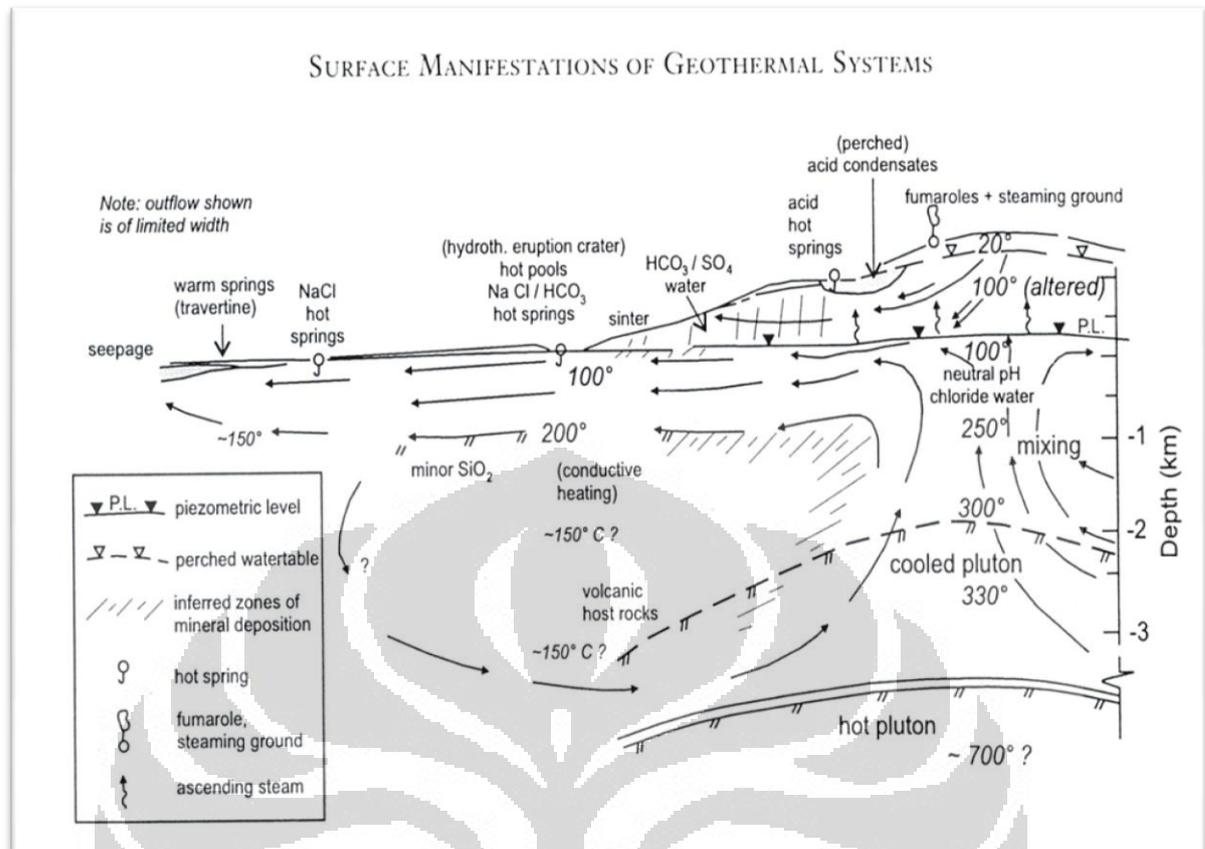
Sistem dominasi uap atau *vapour dominated system* merupakan sistem tertutup dari model sistem geothermal. Pada *close system* terjadi proses konveksi yang menyebabkan homogenisasi pada tekanan dan temperatur. Dengan demikian, profil temperatur yang dihasilkan terhadap kedalaman adalah konstan. Hal ini dikarenakan fluida yang berada di dalam *close system* dalam lapisan *impermeable* pada Gambar 2.1 tidak ada yang keluar dari lapisan tersebut.



Gambar 2.1 Vapour dominated system (Sigurdsson, 2000)

2.2.2 Sistem dominasi air

Sedangkan sistem dominasi air atau *liquid dominated system* merupakan sistem terbuka dari sistem geothermal dengan indikasi bahwa pada sistem tersebut terdapat aliran *outflow*. Hal ini dikarenakan lapisan *impermeable* yang dimiliki sistem tidak tertutup sempurna sehingga mengakibatkan fluida panas yang berada di dalamnya mengalir keluar. Oleh sebab itu, grafik temperatur dan tekanan yang dihasilkan seperti pada gambar 2.2.

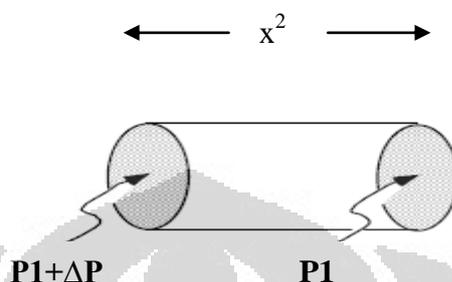


Gambar 2.2 *Liquid dominated system* (Sigurdsson, 2000)

Pada Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa grafik temperatur yang melengkung serta grafik tekanan yang lurus dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan jenis sistem geothermal bahwa sistem tersebut merupakan *liquid dominated system*. Penelitian simulasi reservoir yang dilakukan pada area G.Hayati ini termasuk dalam tipe sistem dominasi air. Pada bab 4 akan dibahas mengenai bentuk grafik temperatur yang diperoleh dari hasil simulasi dan dilakukan *curve matching* dengan temperature data sumur.

2.3 Aliran fluida

Fluida yang mengalir menghasilkan suatu gaya, didasarkan pada eksperimen yang dilakukan oleh Henri Darcy (1856). Pada gambar di bawah ini, terjadi perubahan tekanan, sehingga fluida mengalir dari $P_1 + \Delta P$ ke P_1 .



Gambar 2.3 Dimensi medium berpori antara permukaan-permukaan pada tekanan konstan (Pruess, 2002)

Kecapatan fluida yang mengalir tidak didasarkan pada perubahan tekanan, melainkan perubahan intensitas tekanan yang disebut dengan gradient tekanan ($\Delta P / \Delta x$). Percobaan tersebut menunjukkan bahwa kecepatan aliran fluida per unit luas pada suatu medium sebanding dengan gradient tekanan. Tanda minus pada persamaan 2.1 karena fluida mengalir dari tekanan tinggi ke tekanan rendah yang dapat dianalogikan seperti transfer panas dari temperatur tinggi ke temperatur rendah (Pruess, 2002).

$$F = -k (\rho / \mu) (\Delta P / \Delta x) \quad (2.1)$$

Keterangan :

- F = kecepatan aliran massa fluida per unit luas per satuan waktu ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
- k = permeabilitas (m^2)
- ρ = densitas (kg/m^3)
- μ = viskositas (Pa-s)
- ΔP = perubahan tekanan (Pa)
- Δx = ketebalan medium berpori (m)

Gradient tekanan memiliki 3 komponen (x, y, dan z). Dimana pada komponen vertikal disebut dengan *body-force* yang disebabkan adanya gaya gravitasi. Pada persamaan 2.2 dapat dituliskan secara matematis vector notasinya (F_x, F_y, F_z) sebagai **F**.

Sehingga didapatkan gradient tekanannya sebagai $(\Delta P/\Delta x, \Delta P/\Delta y, \Delta P/\Delta z - \rho g) = \nabla P$ (persamaan 2.2).

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = -k \frac{\rho}{\mu} \begin{pmatrix} \Delta P/\Delta x \\ \Delta P/\Delta y \\ \Delta P/\Delta z - \rho g \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{F} = -k \frac{\rho}{\mu} (\nabla P - \rho g) \quad (2.3)$$

Vektor g merupakan percepatan gravitasi. Kecepatan aliran fluida yang mengalir pada suatu densitas fluida tertentu dalam satu waktu dinamakan fluks volumetrik (u) (persamaan 2.4).

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho g) \quad (2.4)$$

Pada hidrologi *groundwater* fluks volumetrik dapat ditulis secara matematis dalam *head pressure* $h = P/(\rho g)$, sehingga didapatkan sebuah persamaan matematis pada persamaan 2.5 :

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K} \nabla h \quad (2.5)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= k\rho g/\mu &&= \text{konduktivitas hidraulik (m/s)} \\ h &= P/(\rho g) + z &&= \text{hydraulic head permeabilitas batuan (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

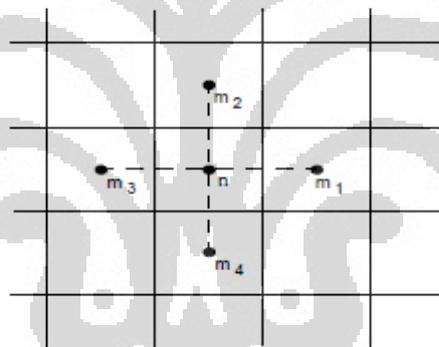
Dalam reservoir geothermal seringkali ditemukan fluida dalam dua fasa, *liquid* dan *gas*. Masing-masing fluida pada dua fasa mengalir di bawah gradient tekanannya. Namun pada fluida satu fasa mengalir dengan permeabilitas yang relatif mengalami penurunan pada setiap mediumnya. Hal ini disebabkan karena masing-masing dari fasa fluida memiliki rongga berpori. Sehingga efek tersebut disebut dengan faktor pengurang permeabilitas (*permeability reduction factors*) atau permeabilitas relatif $k_{r\beta}$. β menandakan bahwa fluida tersebut dua fasa, *liquid* dan *gas* (Pruess, 2002).

$$\mathbf{F}_\beta = -k \frac{k_{r\beta} \rho_\beta}{\mu_\beta} (\nabla P_\beta - \rho_\beta g) \quad (2.6)$$

Koefisien $k_{r\beta}$ merepresentasikan penurunan permeabilitas yang dikarenakan fraksi pada medium berpori dua fasa (S_β). Sehingga permeabilitas relatif sebagai fungsi S_β . k_β menjadi $= k_{r\beta}(S_\beta)$. Permeabilitas relatif fungsi $k_{r\beta}(S_\beta)$ tergantung pada geometri pada rongga berpori dan konektivitas antar rongga.

2.4 Keseimbangan massa

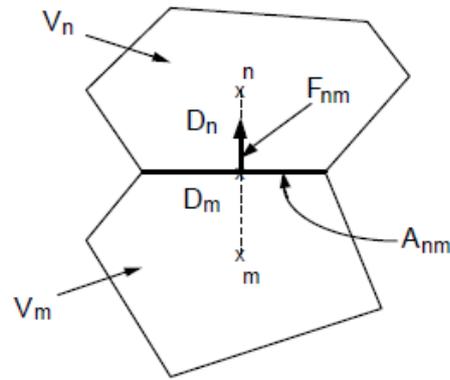
Keseimbangan massa yang terdapat pada sistem reservoir di tentukan oleh banyaknya fluida yang mengalir pada zona lemah yang memiliki permeabilitas yang tinggi. Selain itu, volume fluida yang berasal dari *sinks* (sumur produksi) dan *sources* (sumur injeksi) mempengaruhi perubahan volume massa fluida atau keseimbangan massa. Bila volume massa fluida sebanding dengan fluida yang terdapat pada zona lemah dan sumur produksi dan injeksi, maka keseimbangan massa fluida pada sistem reservoir akan terjadi.



Gambar 2.4 Grid n yang berhubungan dengan m pada penampang 2 dimensi

(Pruess, 2002)

Pada simulasi reservoir, volume total dari reservoir terdiri dari sub volume dengan ukuran yang lebih kecil dan masing-masing grid diatur agar terbentuk keseimbangan massa. Pada sistem satu fasa dengan satu komponen yang terdiri dari air, keseimbangan massa terjadi pada grid n. Fluida mengalir ke grid n dari grid m pada saat simulasi dilakukan. Luas permukaan antara grid n dan grid m adalah A_{nm} , dan F_{nm} adalah fluks massa yang terdapat pada permukaan. Fluks massa akan bernilai positif apabila fluida mengalir dari grid m ke grid n. Perubahan total massa fluida mengalir pada satuan waktu tertentu Δt .



Gambar 2.5 Data geometri pada metode integral *finite difference* (Pruess, 2002)

$$\Delta \rho V_n = V_n \Delta M_n = \Delta t \{ \sum_m A_{nm} F_{nm} + Q_n \} \quad (2.7)$$

Keterangan :

Q_n = Total aliran massa fluida per satuan waktu (kg/s)

V_n = volume grid

$\Delta \rho V_n$ = perubahan massa fluida pada V_n

ΔM_n = perubahan massa fluida per unit volume pada waktu tertentu

Perubahan massa per unit volume berbeda-beda untuk setiap kondisinya. Baik pada satu fasa satu komponen, satu fase banyak komponen, dan dua fasa banyak komponen.

$$\text{Satu fasa, satu komponen} \quad M = \Phi \rho \quad (2.8)$$

$$\text{Satu fasa, banyak komponen} \quad M^\kappa = \Phi \rho X^\kappa \quad (2.9)$$

$$\text{Dua fasa, banya komponen} \quad M^\kappa = \Phi \sum_\beta S_\beta \rho_\beta X_\beta^\kappa \quad (2.10)$$

Keterangan :

Φ = porositas

X^κ = fraksi massa pada komponen κ

S_β = saturasi pada dua fasa

Kecepatan fluida satu fasa pada persamaan 2.3 memiliki fluks massa permukaan pada grid n dan m sehingga dapat ditulis pada persamaan 2.11.

$$F_{nm} = k_{nm} \left| \frac{\rho}{\mu} \right| \left[\frac{P_m - P_n}{D_{nm}} + \rho_{nm} g_{nm} \right] \quad (2.11)$$

Notasi (nm) merupakan notasi permukaan antara grid n dan m. Tekanan yang terjadi pada grid n dan m adalah P_n dan P_m . Sedangkan D_{nm} merupakan jarak nodal points antara titik pusat n dan m (Pruess, 2002).

2.5 Keseimbangan panas

Keseimbangan panas yang terjadi pada sistem reservoir dapat ditulis secara matematis pada persamaan 2.12.

$$M^h = \Phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} + (1 - \Phi) \rho_R C_R T \quad (2.12)$$

M^h merupakan keseimbangan panas, sedangkan C_R merupakan spesifik panas suatu batuan. Temperatur dilambangkan dengan T dan u_{β} adalah energi dalam yang terjadi pada dua fasa. Perubahan energi dalam yang terjadi pada saat dimulai dan selesai simulasi pada periode waktu tertentu merupakan salah satu kondisi termodinamika yang terjadi.

2.6 Parameter fisik batuan

Batas model geometri disesuaikan dengan daerah yang akan dimodelkan. Sedangkan parameter formasi berupa parameter fisik batuan yang terdiri dari konduktivitas panas, kapasitas panas spesifik, permeabilitas, porositas, dan densitas dapat dilihat pada table 2.1.

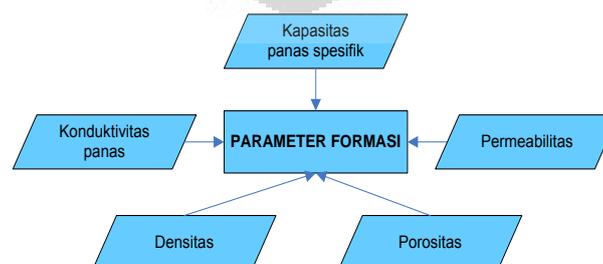


Diagram 2.1 Parameter fisik batuan

Parameter-parameter fisik didapat dari data G & G (Geologi dan Geofisika) dan data sumur kemudian data tersebut diinput pada data parameter formasi. Parameter-parameter fisik tersebut antara lain adalah :

Tabel 2.1 Nilai parameter fisik batuan

Jenis Batuan	Density (ton/m ³)	Porosity	Permeability (m ²)	Thermal Conductivity (W/m °C)	Specific Heat Capacity (KJ/kg K)
	Wohlenberg (1982)	Freeze and Cherry (1979)	Hearst, Nelson (1985)	Engineering ToolBox	Engineering ToolBox
Tuff	-	-	-	0.5 - 2.5	-
Clay	1.3 - 2.3	0.40 - 0.70	10 ⁻¹⁵ - 10 ⁻¹⁹	0.6 - 2.5	0.92
Fractured basalt	2.8 - 3.0	0.05 - 0.50	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻⁹	-	0.84
Gravel	1.4 - 2.3	0.25 - 0.40	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻⁷	-	-
Sand	1.4 - 2.3	0.25 - 0.50	10 ⁻¹³ - 10 ⁻⁹	2.0 - 4.0	0.8
Silt	-	0.35 - 0.50	10 ⁻¹⁶ - 10 ⁻¹³	-	-
Karst limestone	2.3 - 2.9	0.05 - 0.50	10 ⁻¹³ - 10 ⁻⁹	-	-
Sandstone	2.2 - 2.8	0.05 - 0.30	10 ⁻¹⁷ - 10 ⁻¹³	1.7	0.92
Limestone, dolomite	2.4 - 2.9	0.00 - 0.20	10 ⁻¹⁷ - 10 ⁻¹²	1.26 - 1.33	-
Shale	2.3 - 2.8	0.00 - 0.10	10 ⁻²⁰ - 10 ⁻¹⁸	-	-

a. Porositas (Φ)

Porositas (Φ) merupakan salah satu parameter fisik yang penting dalam pembuatan model volumetrik. Total porositas dari sebuah batuan merupakan total volume dari batuan yang dapat terisi oleh fluida. Namun tidak semua pori-pori yang berhubungan (*interconnection*) memiliki porositas yang efektif. Dimana porositas tersebut memiliki kemampuan yang baik untuk dapat menyimpan fluida. Sehingga untuk mendapatkan nilai porositas yang lebih akurat dapat digunakan *well core analysis*.

b. Permeabilitas (k)

Permeabilitas merupakan bagian dari hukum Darcy yang menjelaskan mengenai kemampuan suatu batuan untuk dapat mengalirkan fluida. Nilai permeabilitas yang dimiliki oleh batuan akan mempengaruhi pada laju aliran dari fluida. Permeabilitas biasanya dinyatakan dalam satuan mD (mili Darcy) namun dalam geothermal seringkali menggunakan satuan m^2 , dimana 1 Darcy sama dengan 10^{-12} m^2 . Besarnya permeabilitas yang dimiliki batuan tidak sama ke segala arah. Umumnya permeabilitas pada arah vertikal memiliki nilai yang lebih besar daripada permeabilitas arah horizontalnya. Batuan reservoir geothermal memiliki permeabilitas sangat kecil antara 1 sampai 100 mD. Permeabilitas dapat ditulis secara matematis pada persamaan 2.1.

c. Laju alir fluida (u)

Laju alir fluida biasa disebut dengan kecepatan Darcy, bergantung pada permeabilitas, viskositas, ataupun porositas dari suatu batuan. Semakin besar permeabilitasnya maka lebih besar laju fluida batuan dan semakin kecil viskositasnya, semakin besar nilai laju alir dari fluida.

$$u = \Phi v \quad (2.13)$$

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2.14)$$

d. Densitas

Densitas atau kerapatan masa didefinisikan sebagai perbandingan antara masa dengan satuan volume. Densitas dari fluida tergantung dari wujud fluidanya, uap atau air dan dapat digunakan untuk mengetahui saturasi dari air atau uap.

e. Konduktivitas panas

Konduktivitas panas suatu batuan merupakan parameter yang menyatakan besarnya kemampuan suatu batuan tersebut untuk menghantarkan panas dengan cara konduksi apabila pada batuan tersebut ada perbedaan temperatur (Alchofino, 2009).

Secara matematis dapat dinyatakan dengan :

$$K = \frac{Q}{\left(\frac{dT}{dz}\right)} \quad (2.15)$$

Dimana Q = laju aliran panas per satuan luas

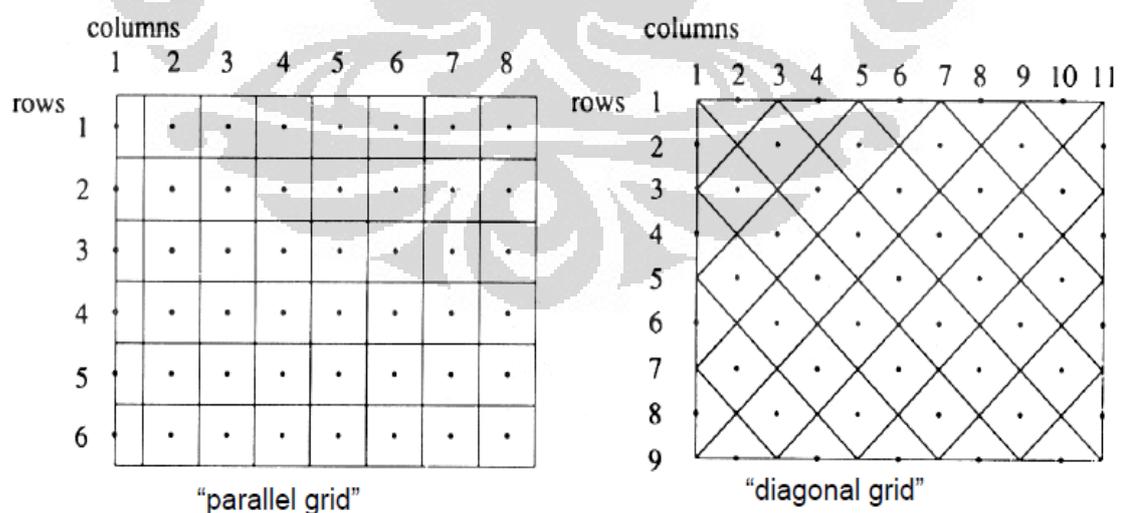
dT/dz = gradient temperatur

f. Kapasitas panas spesifik

Kapasitas panas spesifik (c) merupakan banyaknya energi yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur sebesar 1°C setiap 1 kg massa.

2.7 Grid

Dalam metode ini digunakan model pendekatan parameter heterogen. Pemodelan dapat dilakukan dengan membagi sistem reservoir menjadi sejumlah blok atau grid yang satu sama lain saling berhubungan. Pemodelan dari grid atau sub-volume ini dapat berbentuk parallel maupun diagonal tergantung pada bentuk reservoir yang akan disimulasikan. Ukuran dan banyaknya grid yang disimulasikan disesuaikan berapa besar luas dan volume dari reservoir dengan ukuran dari masing-masing grid yang merepresentasikan satu luasan zona reservoir. Semakin kecil ukuran grid yang digunakan, maka akan semakin detail hasil simulasi yang akan didapatkan dan begitupula sebaliknya.



Gambar 2.6 Grid 2-D penampang vertikal (Pruess, 2002)

Penampang grid 2-dimensi pada elemen subvolume ini saling berhubungan antara grid m dan n. Pusat dari grid m dan n disebut dengan *nodal points* dan memiliki tekanan dan temperatur rata-rata dari setiap gridnya. Pada dasarnya semua grid yang dibentuk di atur masing-masing untuk setiap blok nya, namun saling kontinu dan berhubungan satu dengan lainnya.

Dalam membuat grid 3-dimensi ada dua metode, yaitu dengan *regular* atau *meshmaker*. *Regular* merupakan pembuatan grid dengan hanya menginput data banyaknya blok pada sumbu x, y, dan z serta factor x, y, dan z. Simulator TOUGH2 ini akan secara otomatis membagi grid volum dengan ukuran yang sama apabila factor x, y, dan z sama dengan 1.0. Metode berikutnya dalam pembuatan grid adalah menggunakan *meshmaker*. Grid yang akan dibuat diinput dengan banyaknya jumlah serta ukuran yang diinginkan.

Pembagian blok dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa faktor diantaranya adalah jenis dan karakteristik batuan, struktur batuan, lokasi sumur, dan lokasi manifestasi permukaan. Dengan cara ini maka keanekaragaman permeabilitas, porositas, kandungan air dan kandungan uap di dalam reservoir serta sifat fluidanya, baik secara lateral maupun secara vertikal dapat diperhitungkan (BSN, 1999).

Metode ini umumnya digunakan pada lapangan panas bumi yang mempunyai sumur telah berproduksi, sehingga keanekaragaman sifat batuan dapat diketahui dari data sumur bor. Dengan metode ini reservoir dimodelkan sebagai suatu sistem yang terdiri dari sejumlah blok dan masing-masing saling berhubungan. Metode ini juga memberikan gambaran yang lebih baik mengenai penyebaran permeabilitas di dalam reservoir dan perubahan-perubahan yang terjadi di dalamnya pada saat diproduksi (BSN, 1999).

Dengan menggunakan simulator kemudian dihitung besarnya tekanan, temperatur, saturasi air dan saturasi uap di tiap blok serta laju alir masa dan laju alir uap dari blok yang satu ke blok lainnya untuk berbagai variasi waktu. Hasil perhitungan yang didapat berupa perubahan tekanan dan temperatur terhadap kedalaman, baik di sumur maupun di tempat-tempat lainnya dan perubahan tekanan, temperatur, laju alir massa fluida, entalphi fluida.

BAB III

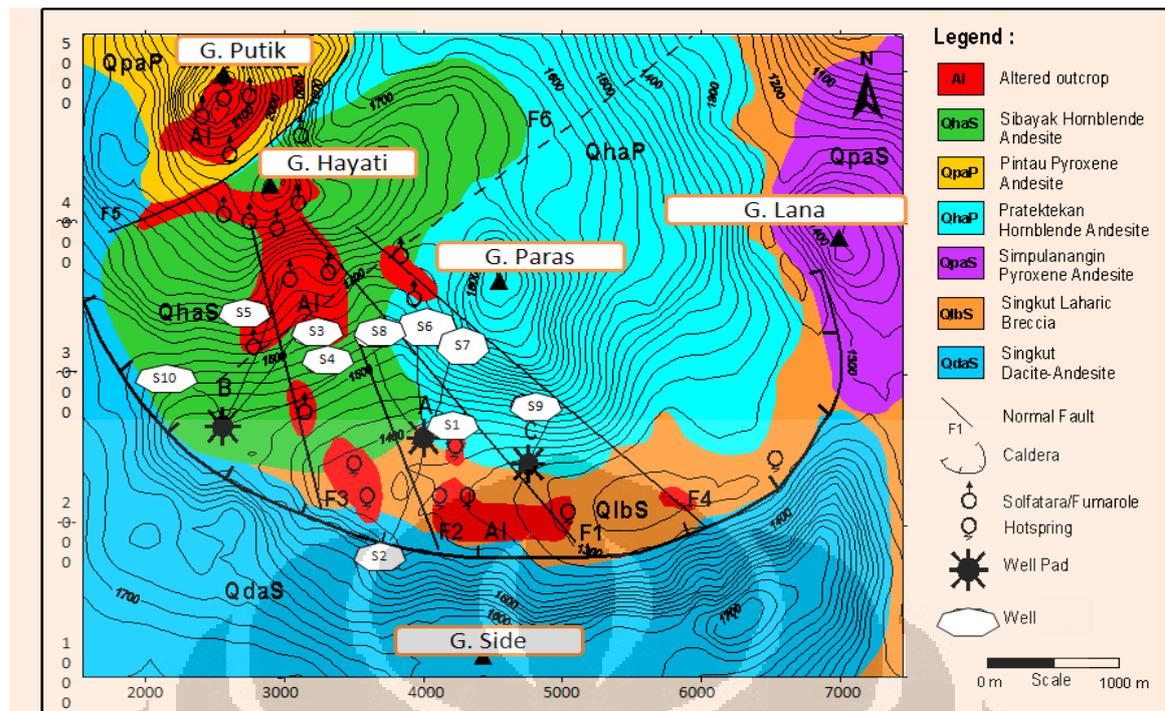
TINJAUAN DAERAH PENELITIAN

3.1 Kondisi geologi daerah penelitian

Pada daerah ini, yang menjadi objek penelitian adalah zona lemah yang berada di dalam Kaldera Side. Pada area geothermal Hayati ini terdapat Gunung Hayati, Gunung Putik di bagian utara dari Gunung Hayati, Gunung Paras di bagian tenggara Gunung Hayati, Gunung Lana di bagian timur dari Gunung Hayati, serta Gunung Side yang berada di bagian selatan kaldera.

Hayati terdiri dari formasi sedimen pada bagian bawah yang terbentuk pada zaman pra tersier sampai dengan tersier dan *unconformity* formasi batuan yang terjadi pada zaman kuartar. Formasi sedimen tidak terlihat di permukaan, namun berdasarkan data sumur menunjukkan bahwa terdapat formasi tersebut yang berada pada kedalaman 1150 m dari permukaan. Formasi ini terdiri dari batupasir yang bercampur dengan *shale* dan terkadang *limestone*. Alterasi hidrotermal yang terjadi menyebabkan terjadinya perubahan formasi batuan menjadi batuan sedimen. Aktivitas vulkanik yang terjadi di daerah panas bumi Hayati sangat kompleks. Terdapat banyak pusat-pusat erupsi yang terjadi di sepanjang waktu kwarter. Pada daerah Kaldera Side dan Gunung Hayati, unit batuan terbagi menjadi dua yaitu unit-unit pre dan post kaldera yang keduanya termasuk dalam umur kwarter dan Gunung Hayati merupakan gunung aktif paling muda. Formasi batuan tersebut terdiri dari *dacite-andesite*, *pyroxene andesite* dan *Laharic breccias*, *pyroxene andesite*, *homblende andesite*, *pyroxene andesite* dan *homblende andesite*. Berdasarkan dari data sumur menunjukkan bahwa formasi batuan tersebut juga terdiri dari *andesite lava*, *andesite volcanic breccias* dan *tuff breccias* (Atmojo, 2001)

Struktur Hayati secara dominan berarah dari barat laut ke tenggara yang merupakan patahan normal. Namun terdapat juga patahan yang berarah dari timurlaut ke baratdaya yang memisahkan Gunung Hayati dan Gunung Paras. Terlihat bahwa batuan yang teralterasi tersebar mulai dari Gunung Putik sampai dengan bagian selatan dalam kaldera. Adanya kemenerusan alterasi yang terjadi antara Gunung Putik dan Gunung Hayati dapat terlihat pada Gambar 3.1. Namun kemenerusan tersebut terpotong oleh struktur sehingga alterasi dibagian selatan bergeser ke arah barat daya dari arah yang seharusnya (Daud, 2009).



Gambar 3.1 Peta Geologi Hayati (modifikasi: Daud, 2009)

3.1.1 Fisiografi dan morfologi

Berdasarkan pada Gambar 3.1 terlihat bahwa daerah penelitian dikelilingi oleh beberapa pegunungan dengan ketinggian yang beragam dan berada di kaldera dengan ketinggian yang lebih rendah dari sekitarnya. Daerah penelitian di dominasi oleh perkebunan milik warga sekitar. Pada lereng-lereng gunung seringkali terjadi longsor ketika musim hujan.

Pada Kaldera Side terdapat sepuluh sumur yang terbagi dalam tiga *well pad*. Sumur-sumur tersebut berfungsi sebagai sumur produksi ataupun sumur injeksi yang masing-masing memiliki kedalaman sumur yang berbeda.

3.2 Kondisi geokimia

Kondisi geokimia yang terdapat di area prospek geothermal Hayati di dapat berdasarkan pada data geokimia manifestasi di permukaan. Dari manifestasi tersebut dapat dianalisa mengenai kandungan kimia yang terkandung di dalamnya sehingga dapat diperkirakan sumber dari manifestasi tersebut maupun hidrogeologinya.

3.2.1 Manifestasi permukaan

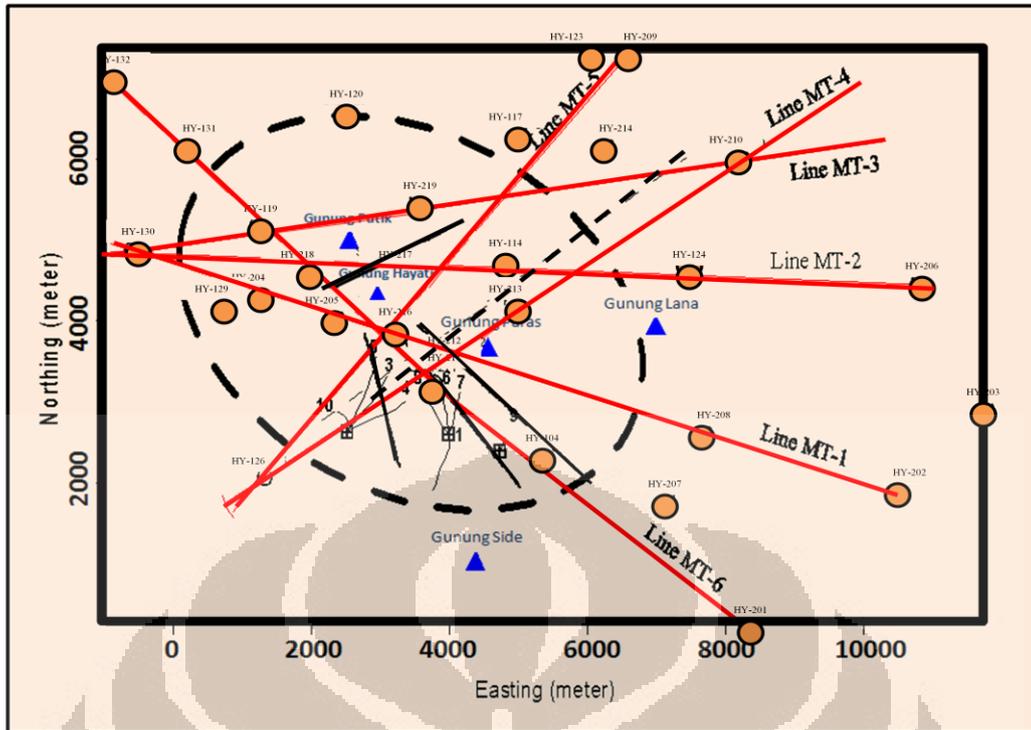
Di sekitar Gunung Hayati terdapat banyak alterasi batuan di sekitar Gunung Hayati dan Gunung Putik. Selain itu, alterasi juga terjadi pada daerah *outflow* yang memiliki manifestasi permukaan. Pada elevasi tinggi di daerah banyak terdapat solfatara/fumarol dan *hot spring* pada elevasi rendah. Manifestasi permukaan yang muncul berupa solfatara/fumarol merupakan salah satu indikasi bahwa terdapat sumber panas bumi yang mengalir secara *upflow* di bagian bawahnya. Sedangkan *hot spring* merupakan indikasi *outflow*. Persebaran manifestasi dapat dilihat pada Gambar 3.1 yang mengacu pada referensi (Daud, 2009).

Temperatur dari *hot spring* sekitar 30° - 63°C dengan kandungan asam pH 5.5 - 6. Namun beberapa *hot springs* lainnya memiliki kandungan asam sangat tinggi mencapai pH 2.2 - 2.5 (Atmojo, 2000). Sedangkan fumarol/solfatara memiliki temperatur sekitar 90° - 116°C dan kandungan gas 2.7% wt dengan konsentrasi gas H₂S dan SO₂ mencapai 19,75 mol % dan 164 ppm. Air yang terkondensasi pada fumarol ini memiliki kandungan klorid yang tinggi.

3.3 Data Geofisika

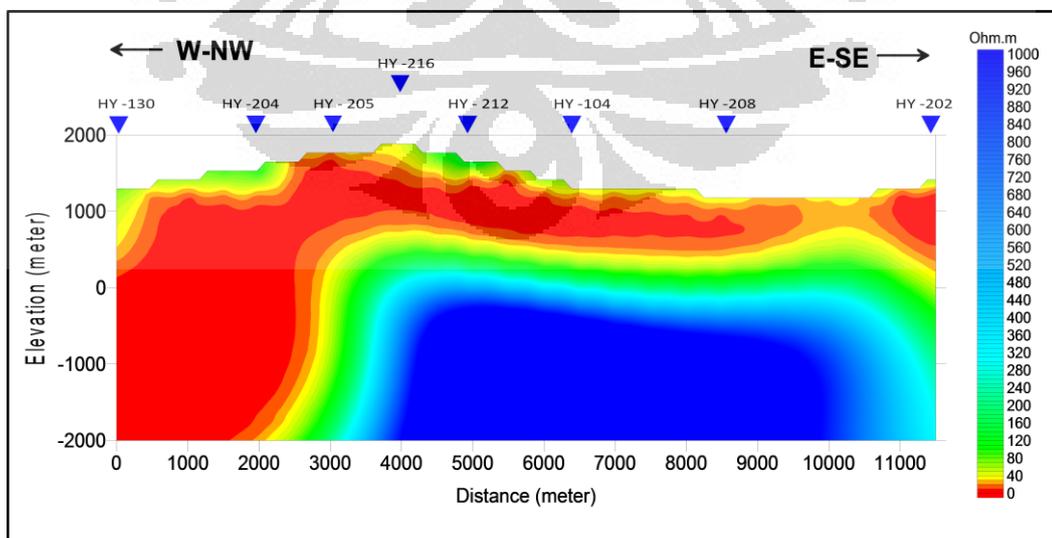
3.3.1 Hasil metode MT

Desain pengukuran pada lapangan Hayati sistem geothermal ini dibuat agar mendapatkan hasil yang berupa konseptual model dari prospek geothermal di area ini. Dasar dari pembuatan desain pengukuran MT (*Magnetotelluric*) ini berupa penampakan geologis berupa Kaldera Gunung Side. Kaldera ini merupakan zona lemah yang memiliki permeabilitas tinggi sehingga fluida dengan mudah dapat terakumulasi. Selain itu, manifestasi permukaan berupa fumarol dan *hot spring* yang tersebar di sekitar kaldera ini pun menjadi salah satu bukti keberadaan sistem geothermal. Oleh sebab itu, untuk mengetahui lebih jelas keberadaan dari pusat reservoirnya diperlukan adanya pengukuran dengan menggunakan metode magnetotellurik (Daud, 2009).



Gambar 3.2 Desain pengukuran MT (modifikasi: Daud, 2009)

Desain pengukuran MT Gambar 3.2 dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih jelas dari sistem geothermal yang terdapat di area tersebut. Pengukuran MT dilakukan sebanyak enam line (Line MT-1, Line MT-2, Line MT-3, Line MT-4, Line MT-5, Line MT-6). Keenam line pengukuran berada di dalam kaldera, hal ini dikarenakan bahwa kaldera merupakan zona lemah (Daud,2009).

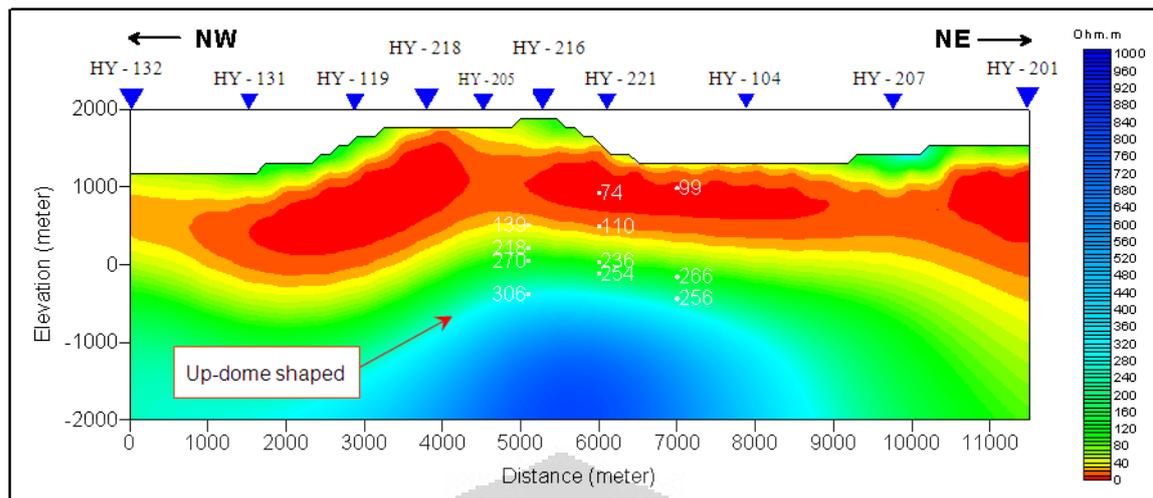


Gambar 3.3 Line MT-1 (modifikasi: Daud, 2009)

Pengukuran MT pada line MT-1 memanjang dari barat sampai dengan tenggara sepanjang 11 km yang melalui 8 titik pengukuran. Berdasarkan pengukuran line MT-1 yang dilakukan menunjukkan bahwa adanya batuan yang teralterasi dengan ketebalan yang berbeda di sepanjang line pengukuran. Pada bagian barat batuan alterasi (*clay cap*) sangat tebal hingga ke permukaan dengan ketebalan sekitar 3 km dan semakin menuju ke tenggara ketebalan dari batuan alterasi berkurang. Batuan alterasi tersebut memiliki harga resistivitas sangat rendah (kurang dari 10 ohm m). Terdapat perbedaan nilai resistivitas di setiap kedalaman yang berbeda dari lapisan batuan. Bertambahnya kedalaman, nilai resistivitas batuan semakin tinggi hingga mencapai 1000 ohm m. Begitupula dengan distribusi temperatur dan juga tekanan yang semakin tinggi pada lapisan batuan yang paling dalam. Dari hasil MT menunjukkan bahwa adanya struktur berupa patahan yang berada pada 3 km dari arah barat. Hal ini terlihat dari Gambar 3.2 bahwa pengukuran line MT-1 memotong struktur yang memisahkan Gunung Hayati dengan Gunung Putik (Daud, 2009).

Data yang dihasilkan dari pengukuran line MT-2 menunjukkan hasil yang menyerupai hasil pengukuran line MT-1. Pengukuran line MT-2 ini memanjang dari barat ke timur. Terlihat dengan adanya lapisan batuan yang teralterasi yang lebih tebal di bagian barat hingga ke permukaan dan semakin tipis di bagian timurnya. Nilai resistivitas batuan yang dimiliki juga hampir serupa dengan line MT-1. Dari hasil line MT-2 ini pun terlihat adanya patahan pada 3 km dari arah barat. Struktur patahan yang terdeteksi oleh pengukuran line MT-2 sama dengan struktur yang terdeteksi oleh line MT-1. Lapisan batuan sebelah timur dari patahan memiliki nilai resistivitas yang sangat tinggi hingga mencapai 1000 ohm m (Daud, 2009).

Sama halnya dengan hasil pengukuran line MT-1 dan MT-2, terdapat alterasi batuan yang lebih tebal di bagian barat dari struktur yang membentang dari baratdaya hingga ke timurlaut. Terdapat perbedaan ketebalan yang sangat kontras dari lapisan batuan yang teralterasi. Sehingga pada hasil line MT-3 pun terindikasi dengan adanya patahan di 4km dari arah barat pengukuran. Bagian lapisan batuan yang terdapat pada ketiga line (line MT-1, line MT-2, dan line MT-3) dengan nilai resistivitas sangat tinggi merupakan reservoir yang dimiliki oleh sistem geothermal Hayati (Daud, 2009).



Gambar 3.4 Line MT-6 (modifikasi: Daud, 2009)

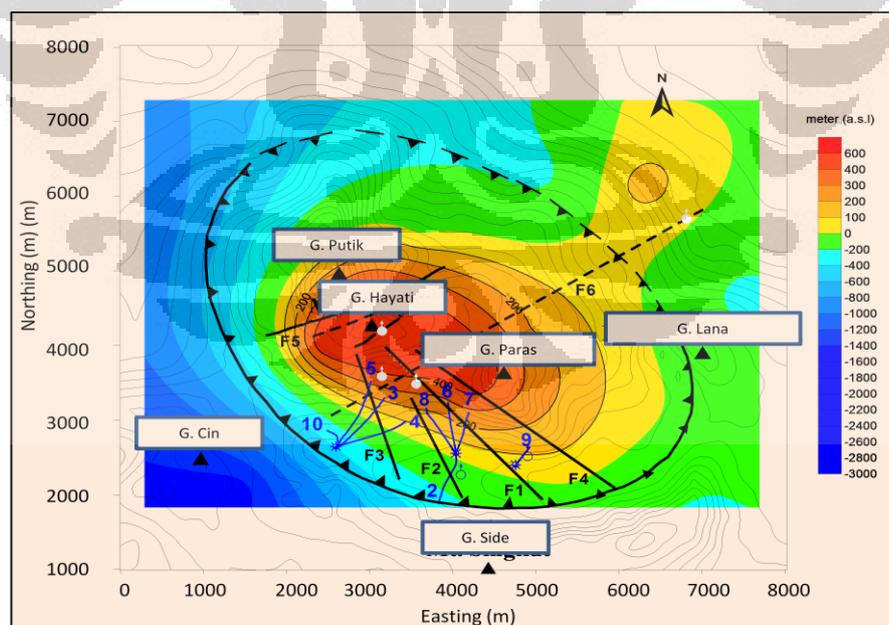
Hasil pengukuran line MT-6 dengan metode MT (*Magnetotelluric*) dapat terlihat pada Gambar 3.4. Pengukuran line MT-6 memanjang dari barat laut sampai dengan tenggara sepanjang 11 km. Pengukuran line MT-6 ini memotong 2 struktur patahan, dimana patahan 1 membentang dari baratdaya ke timurlaut dan patahan 2 membentang dari tenggara sampai barat daya. Pada Gambar 3.4 terlihat bahwa pada elevasi dibawah 0 m dari permukaan laut membentuk *dome* dengan harga resistivitas sangat tinggi hingga mencapai 1000 ohm m. Lapisan tersebut merupakan reservoir dari sistem geothermal dengan temperatur reservoir bagian atas 306°C (Daud,2009).

Pada sistem geothermal terjadi distribusi temperatur dengan temperatur tertinggi berada pada reservoir dan paling rendah pada permukaan dengan temperature di bawah 74°C. Begitupula dengan harga resistivitas batuan dan tekanan yang dimiliki oleh sistem geothermal tersebut. Harga resistivitas batuan pada line MT-6 ini semakin menurun hingga ke permukaan. Begitupula dengan distribusi tekanan yang terbentuk. Permukaan dari sistem geothermal ini memiliki nilai paling rendah dibandingkan pada lapisan dengan elevasi yang lebih dalam. Adanya distribusi temperatur dan tekanan ini membuat batuan yang terdapat didalamnya mengalami perubahan dan teralterasi sehingga membentuk lapisan *clay*. Lapisan ini memiliki resistivitas sangat rendah dibawah 10 ohm m (Daud, 2009).

Pada Gambar 3.4 lapisan *clay* yang terbentuk cukup tebal mencapai sekitar 1 km hingga ke permukaan. Lapisan tersebut memiliki ketebalan yang beragam dan cenderung

mengikuti bentuk dari reservoirnya. Sehingga lapisan yang berada di atas *up-dome* memiliki ketebalan *clay* yang lebih tipis dibandingkan dengan sekitarnya. Titik HY-218, HY-205, dan HY-216 memiliki topografi yang tinggi. Hal ini dikarenakan titik pengukuran tersebut berada di sekitar Gunung Hayati. Hal ini sesuai dengan teori bahwa sistem geothermal berada di area gunung api vulkanik yang mengalami pendinginan. Dimana pada ketiga titik tersebut keberadaannya sesuai dengan lokasi dari *up-dome* hasil pengukuran dengan metode MT (Daud, 2009).

Hasil *cross-section* dari pengukuran MT dapat ditentukan distribusi nilai resistivitas lapisan yang berada di bawah lapisan batuan yang teralterasi berdasarkan pada bentuk *up-dome* nya. Pada bagian Gunung Hayati dan gunung Paras memiliki nilai resistivitas sangat rendah dibandingkan dengan daerah sekitarnya dan berada pada elevasi tinggi, sekitar 300 m – 600 m di atas permukaan laut. Hal ini menunjukkan bahwa pada daerah tersebut batuan telah mengalami alterasi. Batuan yang teralterasi ini disebabkan karena salinitas fluida dan temperatur. Pada Gambar 3.4 terlihat bahwa terdapat kontras nilai resistivitas batuan yang merupakan batas dari Kaldera Side. Perbedaan nilai resistivitas batuan ini juga dapat membantu untuk menginterpretasi permeabilitas batuan yang terjadi.

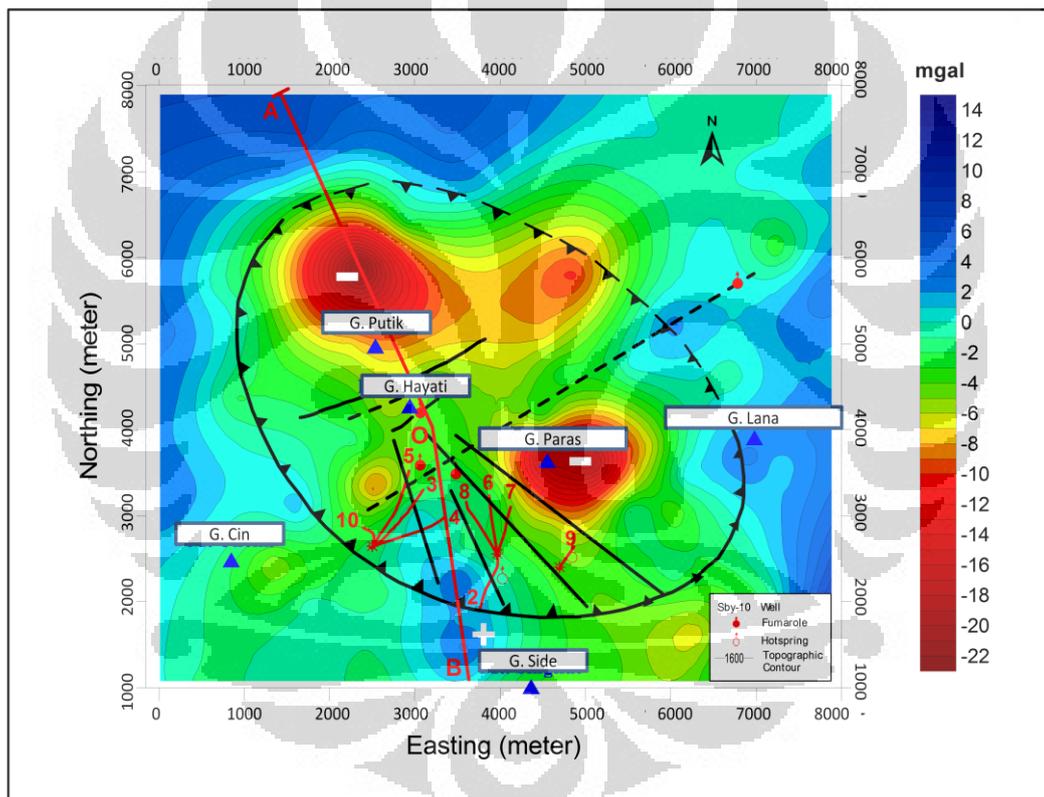


Gambar 3.5 Peta distribusi spasial yang menginterpretasikan bentuk *up-dome* pada lapisan resistivitas di bawah lapisan batuan yang teralterasi (modifikasi: Daud, 2009)

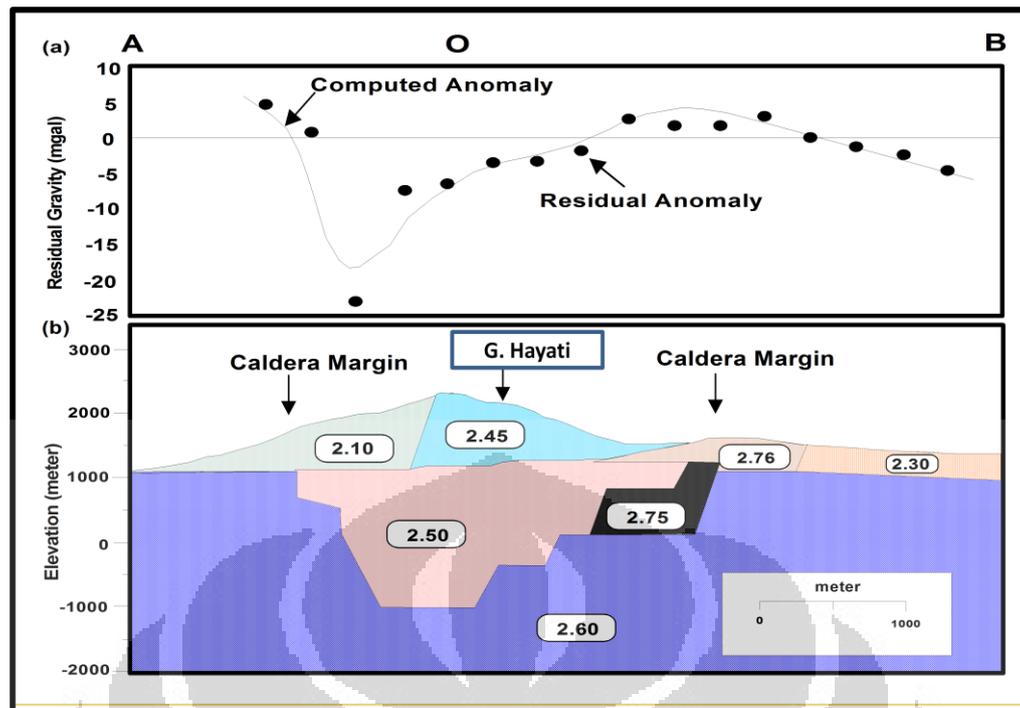
3.3.2 Hasil metode gravitasi

Berdasarkan data hasil anomali residual gravitasi pada Gambar 3.6 menunjukkan bahwa terdapat anomali di sekitar G.Hayati dan G.Paras. Pada daerah tersebut memiliki nilai anomali gravitasi sangat rendah. Sedangkan dibagian lain memiliki nilai anomali gravitasi lebih tinggi dibandingkan dengan nilai gravitasi di daerah lain.

Model konseptual pada Gambar 3.7 yang dihasilkan dari data gravitasi-pun menunjukkan bahwa adanya kaldera dengan luasan sekitar 6 km². Nilai gravitasi di dalam kaldera lebih rendah daripada di luar kaldera. Dimungkinkan batuan yang berada di dalam kaldera adalah batuan sedimen (Daud, 2009).



Gambar. 3.6 Hasil pengukuran anomali residual gravitasi (modifikasi: Daud, 2009)

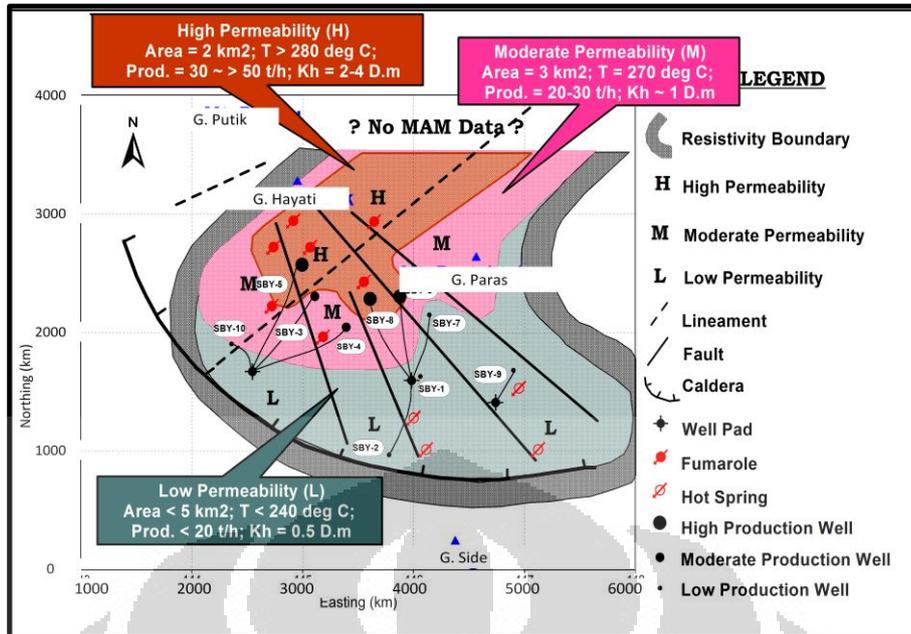


Gambar. 3.7 Model konseptual anomali residual gravitasi (modifikasi: Daud, 2009)

3.3 Distribusi permeabilitas reservoir

Distribusi permeabilitas ditentukan berdasarkan data distribusi lapisan resistivitas. Berdasarkan referensi (Daud, 2009), distribusi permeabilitas reservoir daerah Hayati terbagi menjadi tiga bagian, yaitu permeabilitas tinggi (*high*), sedang (*moderate*), dan rendah (*low permeability*). Kesemua bagian yang memiliki permeabilitas berada pada zona struktur (patahan). Dimana pada zona tersebut fluida sangat mudah untuk mengalir. Klasifikasi distribusi nilai permeabilitas Hayati dapat dilihat pada Gambar 3.8.

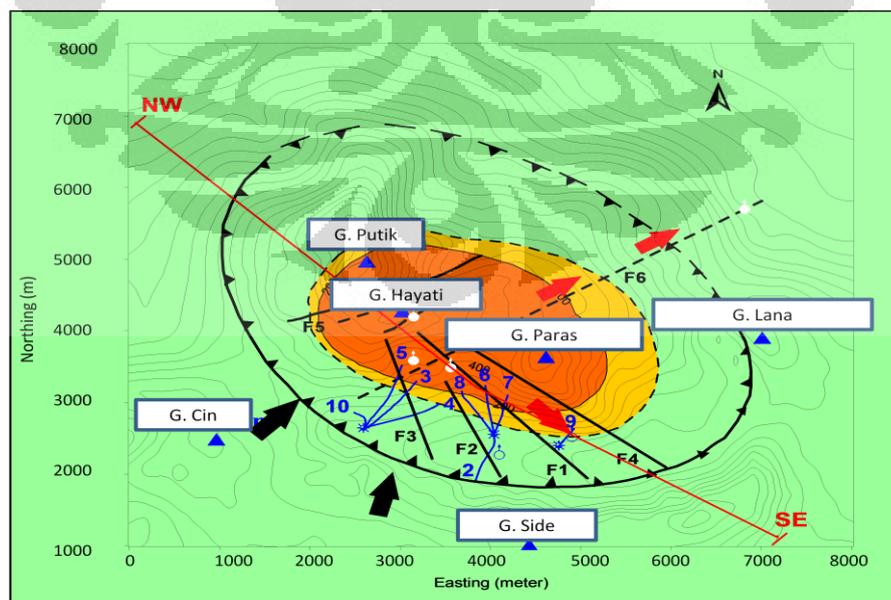
Lapisan dengan permeabilitas tinggi memiliki luasan kira-kira 2 km² dengan nilai permeabilitas 2 - 4 mD yang berada pada bagian reservoir dan memiliki temperatur reservoir paling tinggi, sekitar 280°C. Pada lapisan tersebut merupakan pusat dari reservoir. Lapisan dengan nilai permeabilitas sedang (*moderate permeability*) memiliki nilai permeabilitas sebesar 1 mD dengan luasan 3 km² dengan temperatur reservoir lebih rendah dari pusatnya yaitu 270°C. Lapisan ini berada di sekitar lapisan *high permeability*. Lapisan terluar dari reservoir memiliki permeabilitas paling rendah dengan nilai permeabilitas 0.5 mD.



Gambar. 3.8 Distribusi permeabilitas Hayati (modifikasi: Daud, 2009)

3.4 Batas reservoir

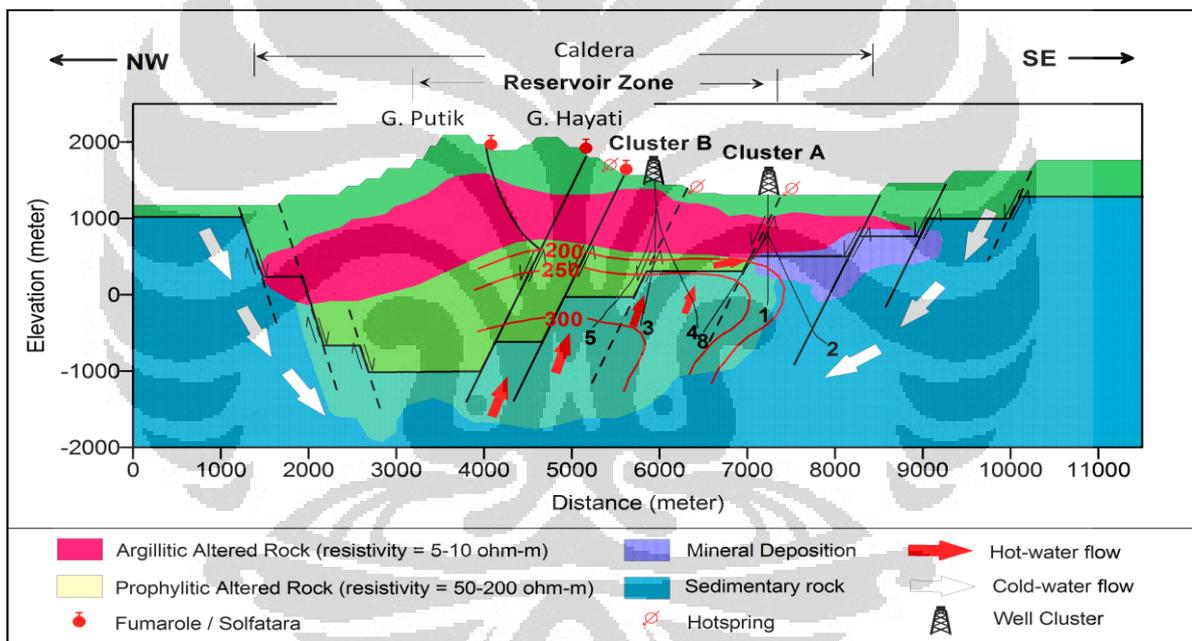
Reservoir merupakan zona lemah dengan permeabilitas tinggi. Batas reservoir ini di dapat berdasarkan hasil data reservoir daerah panas bumi Hayati ini berada di dalam kaldera dan berada di sekitar G. Putik, G. Hayati, dan G. Paras. Dimana ketiga gunung tersebut merupakan gunung vulkanik (Daud, 2009).



Gambar 3.9 Batas reservoir Hayati berdasarkan data geofisika (modifikasi: Daud, 2009)

3.5 Model konseptual geothermal Hayati

Model konseptual ini merupakan *cross-section* arah barat laut – tenggara. Model konseptual ini berupa kaldera dengan zona reservoir yang berada di dalamnya. Daerah *recharge zone* berada di sekitar kaldera yang memiliki banyak struktur dan merupakan batuan sedimen. Bagian *top reservoir* memiliki temperatur 300°C dengan batuan sedimen yang teralterasi dan memiliki resistivitas sekitar 50 – 200 ohm m. Distribusi temperatur secara vertikal menunjukkan bahwa adanya aliran fluida panas secara *upward* ke bagian G.Hayati. Di bagian atas elevasi 0 – 1000 m terdapat *argilitic altered rock* yang berupa *clay* dengan permeabilitas sangat kecil sehingga membatasi aliran fluida. Dengan demikian, fluida tersebut mengalir ke daerah yang memiliki banyak struktur dan keluar berupa *hot springs* di permukaan (Daud, 2009).

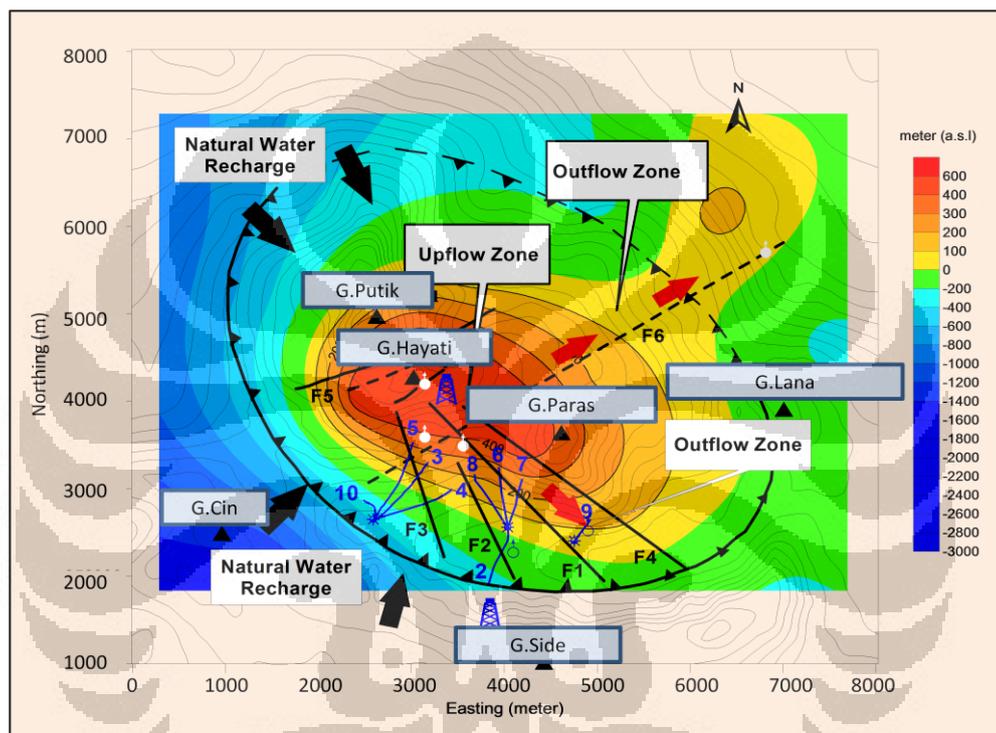


Gambar 3.10 Model konseptual geothermal Hayati (modifikasi: Daud, 2009)

3.6 Hidrogeologi

Berdasarkan data persebaran manifestasi permukaan, terdapat manifestasi berupa fumarol di daerah G.Hayati. Hal ini memperkuat bukti bahwa di daerah tersebut merupakan zona *upflow*. Sedangkan di bagian tenggara dan timurlaut merupakan zona *outflow* dengan topografi yang lebih rendah dari sekitarnya seperti pada Gambar 3.11. Indikasi lain yang memperkuat bahwa bagian tersebut merupakan zona *outflow* adalah

terdapat banyak *hot spring* di bagian tenggara. Adanya persebaran manifestasi yang berada di dalam Kaldera Side disebabkan karena terdapat banyak struktur-struktur berupa patahan yang membentang dari barat laut ke tenggara. Struktur tersebut menyebabkan fluida dari bawah sistem geothermal yang memiliki tekanan dan temperatur yang tinggi naik ke permukaan. *Recharge zone* berada di sekitar batas dari Kaldera Side yang merupakan zona lemah. Sehingga zona tersebut memiliki permeabilitas yang sangat tinggi dan memudahkan fluida untuk masuk ke dalamnya (Daud, 2009).



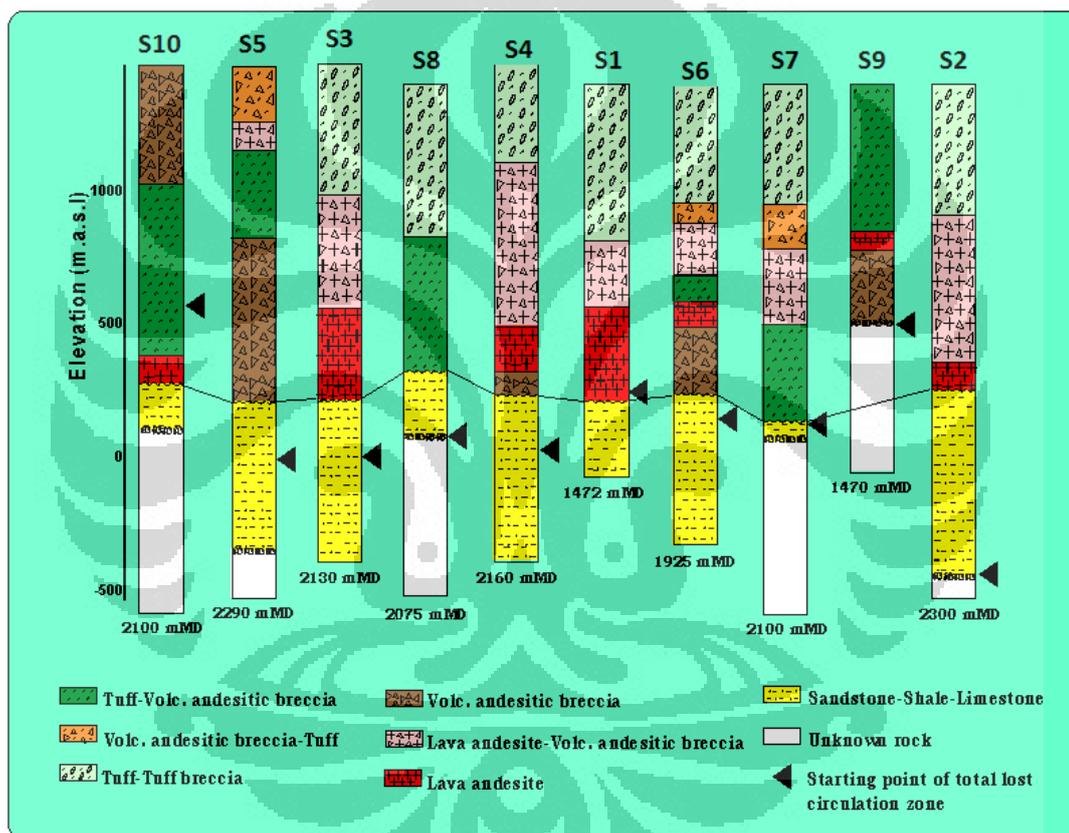
Gambar 3.11 Peta hidrogeologi area geothermal Hayati (modifikasi: Daud, 2009)

BAB IV

DATA SUMUR DAN SIMULASI RESERVOIR

4.1 Data Sumur

Area sistem geothermal Hayati memiliki 10 sumur yang terbagi dalam tiga *well pad* yaitu *well pad* A, B, dan C. *Well pad* A terdiri dari 5 sumur (S1, S2, S6, S7, dan S8) dengan elevasi 1384 m di atas permukaan laut. *Well pad* B terdiri dari 4 sumur (S3, S4, S5, dan S10) dengan elevasi 1468 m di atas permukaan laut. Sedangkan *well pad* C hanya terdiri dari satu sumur dengan elevasi 1337 m di atas permukaan laut, yaitu sumur S9.



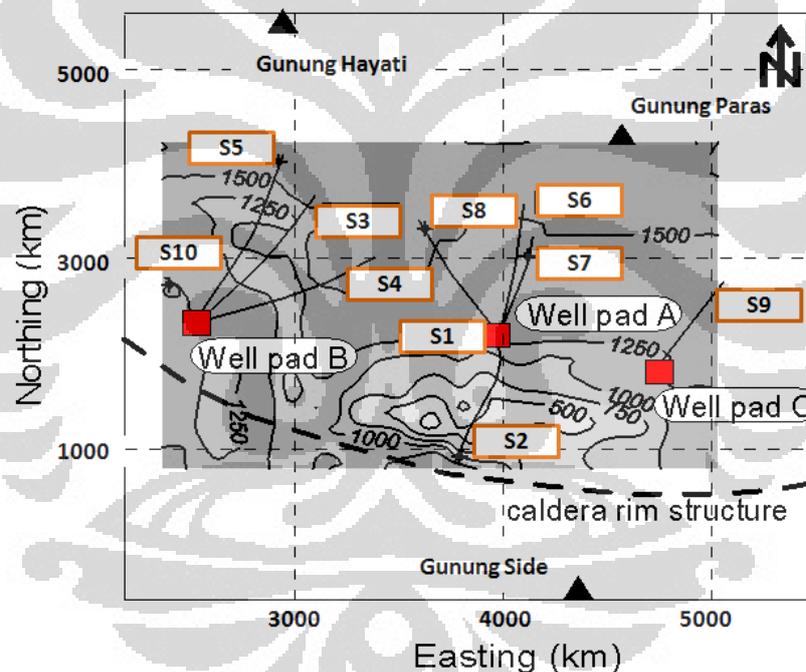
Gambar 4.1 Distribusi litologi dan lokasi *water loss zones* sumur Hayati

(modifikasi: Daud, 2009)

Berdasarkan data sumur pada Gambar 4.1 mengindikasikan bahwa litologi daerah Hayati terdiri dari dua tipe. Tipe pertama merupakan tipe batuan vulkanik yang terdiri dari *tuff breccias*, *volcanic andesite breccias*, *lava andesite*, dan *tuff* pada zona yang lebih atas. Tipe kedua merupakan batuan sedimen yang tersiri dari *sandstone*, *shale*, dan *limestone* di

bagian bawahnya. Litologi batuan yang dihasilkan dari data sumur merepresentasikan bahwa batuan sedimen dominan terletak pada elevasi 200 m – 250 m di atas permukaan laut, kecuali pada sumur S8 yang terletak pada elevasi 275 m di atas permukaan laut. Pada data sumur S7 lapisan batuan sedimen terletak pada elevasi 120 m di atas permukaan laut. Namun berbeda dengan sumur S9, litologi batuan tipe sedimen tidak terdeteksi (Atmojo, 2001).

Variasi litologi batuan dan kedalaman dapat mengindikasikan adanya *water loss zones*. Sehingga dilakukan uji coba injeksi pada sumur dan dihasilkan variasi permitivitas antara 0,3 – 13,1 m-darcy. Permitivitas tertinggi berada pada sumur S3 dan S7 di bagian utara dan permitivitas rendah pada sumur S1, S4, S9, dan S10. Distribusi lateral dari sirkulasi *water loss zones* dapat dilihat pada Gambar 4.2 (Atmojo, 2001).



Gambar 4.2 Peta sirkulasi *water loss zones* pada elevasi -450 m di atas permukaan laut

(Atmojo, 2001)

Water loss zones paling besar terjadi pada batas antara batuan vulkanik dan sedimen. Zona tersebut berada elevasi di bawah permukaan laut walaupun beberapa data sumur mengindikasikan adanya zona tersebut pada elevasi yang dangkal. Sirkulasi hilangnya fluida lebih besar terjadi di bagian utara pada sumur S3, S5, S6, dan S8 serta

sumur SBY-4. Kelima sumur tersebut berada di sekitar Gunung Hayati dan Gunung Paras dan pada atau dekat dengan struktur.

4.2 Simulasi reservoir 3-dimensi

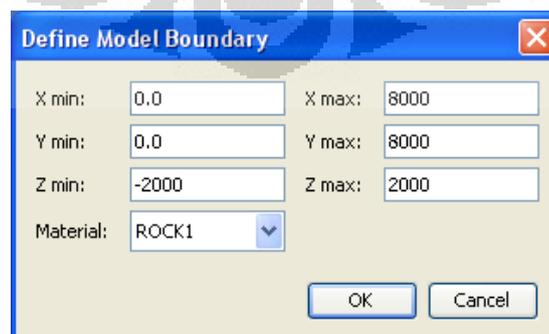
Lokasi daerah geothermal di kontrol oleh keadaan geologi serta kondisi fisik seperti permeabilitas dan porositas batuan, struktur berupa rekahan atau patahan serta sumber panasnya. Fenomena keadaan hidrologi pada sistem tersebut berupa sistem aliran fluida. Semua kondisi tersebut dapat digunakan untuk mengimplementasikan kondisi lapangan geothermal menyerupai kondisi di lapangan menggunakan simulasi model dengan simulasi reservoir 3-dimensi (Atmojo, 2001).

4.2.1 Data Input

Natural state merupakan suatu kondisi dimana tidak terdapat fluida yang keluar atau masuk ke dalam sistem. Begitupula dengan panasnya. Kondisi *natural state* didapatkan ketika terjadinya kesetimbangan massa dan juga kesetimbangan energi. Tidak terdapat lagi perubahan tekanan dan perubahan temperatur di dalam sistem. Beberapa hal yang diperlukan ketika membuat model *natural state* adalah lokasi yang akan dimodelkan, ukuran dan jumlah grid, *initial condition*, distribusi batuan dengan perbedaan permeabilitas, sumber panas (*heat source*), serta manifestasi permukaan yang ada.

4.2.1.1 Batasan koordinat

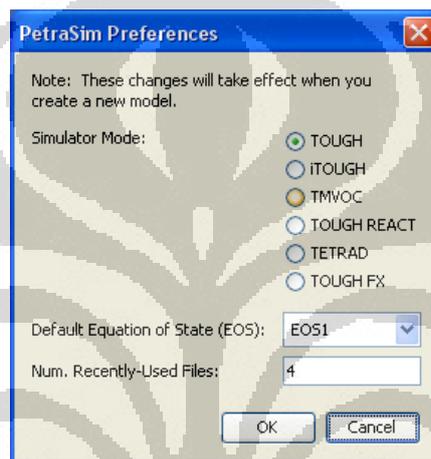
Sistem geothermal yang akan disimulasikan memiliki batasan koordinat seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Batas koordinat sistem yang disimulasikan

4.2.1.2 EOS (*Equation-Of-State*)

Simulator TOUGH2 pertama pada tahun 1991 dengan memiliki lima EOS (*equation-of-state*) untuk kelima properti fluida yang berbeda. Kelima EOS tersebut dinamakan EOS1 sampai dengan EOS5 dan selanjutnya TOUGH2 dikembangkan. Tipe EOS dan aplikasinya dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan 4.2. Penggunaan tipe EOS ini disesuaikan dengan tipe sistem yang akan dimodelkan. Pada simulasi ini, modul EOS yang digunakan adalah EOS 1 karena sistem pada daerah geothermal Hayati berupa *water*, dapat dilihat pada Gambar 4.4 (Atmojo, 2001)..



Gambar 4.4 Modul EOS yang digunakan

Tabel 4.1 Modul EOS fluida tahun 1991 (Atmojo, 2001)

Tipe EOS	Pengaplikasian
EOS1*	air
EOS2	air, CO ₂
EOS3*	air, udara
EOS4	air, udara, dengan tekanan uap yang rendah
EOS5*	air, hidrogen

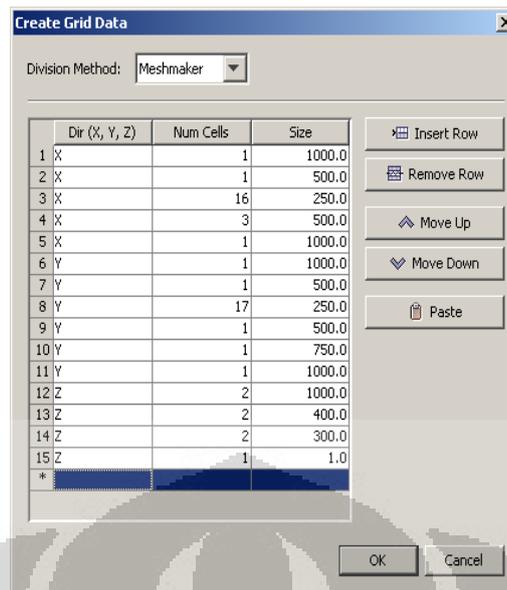
* Berlaku hanya pada keadaan temperatur konstan

Tabel 4.2 Modul EOS fluida terbaru (Atmojo, 2001)

Tipe EOS	Pengaplikasian
EOS7*	air, <i>brine</i> , udara
EOS7R*	air, brine, udara, parent-daughter radionuclides
EOS8*	air, "dead" oil, NCG
EOS9	aliran variabel isothermal yang tersaturasi berdasarkan persamaan Richard
EWASG*	air, NaCl, NCG
ECO2	air, CO ₂ , NaCl
T2VOC	air, udara, volatile organic compound
TOUGH-FX	Hydrates
TMVOC	air, udara, volatile organic compound hingga mencapai 19

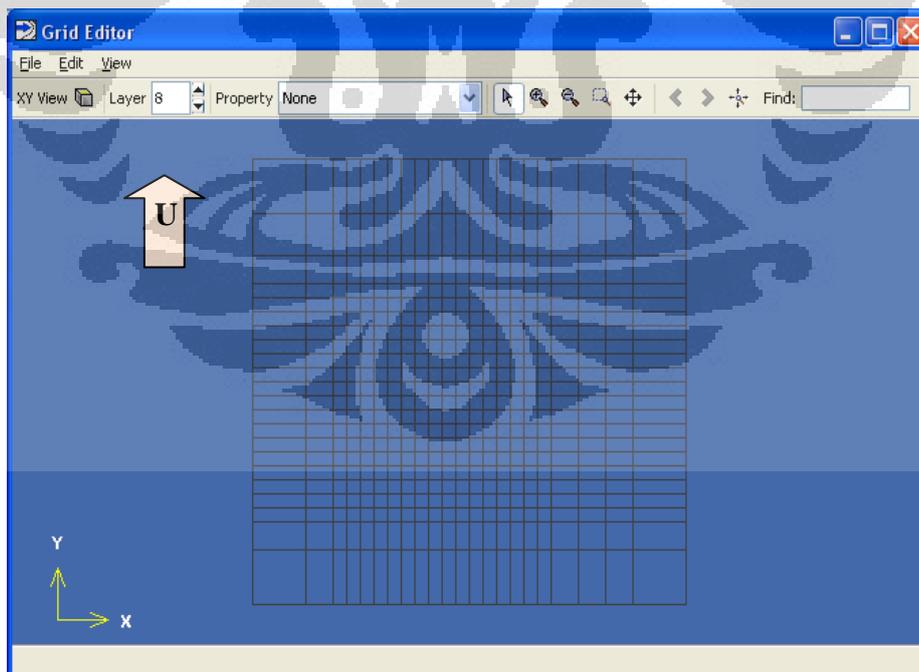
4.2.1.3 Sistem grid

Sistem geothermal yang akan dimodelkan berukuran 8 km x 8 km x 4 km. Lapisan batuan terdiri dari 7 lapisan dengan ketebalan yang bervariasi. Jumlah grid keseluruhan dari model simulasi ini adalah 3872 elemen dengan ukuran grid yang bervariasi. Ukuran grid yang dibuat terdiri dari beberapa ukuran, diantaranya adalah (1 x 1 km), (1 x 0,5 km), (1 x 0,25 km), (0,5 x 0,5 km), (0,5 x 0,25 km), dan (0,25 x 0,25 km). Letak dari ukuran grid disesuaikan dengan data yang ada, seperti data sumur, manifestasi, ataupun data lain yang sudah valid. Besar kecilnya ukuran grid akan mempengaruhi hasil yang di dapat setelah simulasi. Semakin kecil ukuran grid, maka akan semakin jelas hasil yang didapatkan.



Gambar 4.5 Grid dengan metode *Meshmaker*

Data *contour* yang diinput, akan mempengaruhi ketebalan grid pada bagian atas dari lapisan, dan didapatkanlah grid dengan tabel *meshmaker* seperti pada Gambar 4.5. Sehingga didapatkan penampang grid horizontal 3-dimensi dari sistem yang akan dimodelkan dan dapat dilihat pada Gambar 4.6.



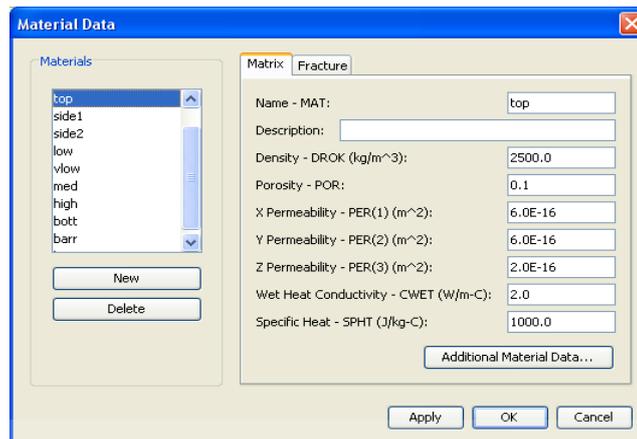
Gambar 4.6 Penampang grid horizontal simulasi model 3-dimensi

4.2.1.4 Permeabilitas dan parameter batuan

Distribusi permeabilitas batuan yang terdapat pada sistem geothermal Hayati ini didasarkan pada data sumur dan data pengukuran MT yang saling mendukung. Terdapat 10 tipe batuan dengan permeabilitas dan parameter fisik yang berbeda seperti pada Tabel 4.3. Pada dasarnya semua jenis batuan pada sistem geothermal ini merupakan batuan vulkanik sedimen yang terlihat berdasarkan dari peta geologi pada Gambar 3.1 dan stratigrafi daerah tersebut. Sehingga dapat dilihat bahwa semua parameter batuanya berada dalam kisaran batuan vulkanik (*tuff*) sedimen pada Tabel 2.1 yang memiliki karakteristik dengan kisaran nilai yang tidak jauh berbeda. Berdasarkan referensi pada tabel tersebut menunjukkan bahwa nilai densitas batuan vulkanik berkisar $1,3 - 3 \text{ ton/m}^3$, porositas berkisar dari 0,05 sampai dengan 2,7. Permeabilitas yang dimiliki oleh batuan vulkanik lebih rendah dibandingkan dengan batuan sedimen. Nilai permeabilitas yang dimiliki berkisar $10^{-9} - 10^{-19} \text{ m}^2$, konduktivitas termal berkisar $0,5 - 2,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ dan *specific heat capacity* dengan kisaran 920 KJ/kg K . Karakteristik batuan sedimen meliputi nilai densitas yang lebih kecil dari batuan vulkanik, dengan kisaran 1,4 sampai $2,9 \text{ ton/m}^3$ dan porositas $0 - 0,5$. Permeabilitas yang dimiliki oleh batuan sedimen lebih tinggi dari batuan vulkanik sekitar 10^{-7} hingga 10^{-17} m^2 . Untuk kisaran nilai konduktivitas yang dimiliki oleh batuan sedimen sebesar 1,2 sampai dengan $4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ dan *specific heat capacity* sekitar 920 KJ/kg K . Area reservoir memiliki batuan dengan permeabilitas yang sangat tinggi dan sedang seperti yang terdapat pada data MT Gambar 3.5. Banyaknya struktur patahan yang terdapat pada zona tersebut menyebabkan karakteristik batuan di zona reservoir memiliki permeabilitas yang lebih besar dibandingkan dengan batuan lainnya. Begitupula dengan nilai porositasnya yang lebih besar dibandingkan dengan tipe batuan lain. Hal ini menandakan bahwa batuan pada zona ini memiliki rongga yang besar sehingga mampu terisi fluida dan saling interkoneksi. Pada bagian atas reservoir berupa *clay cap* dengan permeabilitas sangat rendah (*very low*) yang merupakan bagian penutup dan kedap air. Di sisi kaldera bagian timur laut, timur, dan tenggara berupa batuan dengan permeabilitas rendah (*low*). Sedangkan di bagian selatan, barat daya, barat, barat laut hingga utara merupakan kaldera. Batuan pada daerah ini memiliki permeabilitas yang kecil sehingga diklasifikasikan sebagai *impermeable rock*.

Simulasi yang dilakukan dengan menggunakan simulator TOUGH2 memiliki beberapa istilah tipe batuan seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.3. Masing-masing dari

tipe batuan tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Stratigrafi menunjukkan bahwa bagian bawah dari sistem geothermal Hayati merupakan batuan sedimen dan bagian atasnya berupa batuan vulkanik. Dengan demikian, tipe batuan yang digunakan dalam simulasi pun terklasifikasi menjadi dua bagian, yaitu batuan vulkanik dan batuan sedimen. Tipe batuan vulkanik terdiri dari tipe batuan “top”, “side1”, “side2”, “low”, “vlow”, “dens” dan “barr”. Sedangkan tipe batuan sedimen terdiri dari tipe batuan “bott”, “high”, dan “med”. Tipe batuan yang mengidentifikasi zona reservoir adalah tipe batuan “high”. Batuan ini memiliki karakteristik permeabilitas dan porositas yang besar. Begitupula dengan tipe batuan “med” yang memiliki karakteristik yang hampir sama dengan tipe batuan “med”. Sedangkan tipe batuan yang mengidentifikasi lapisan *clay* adalah “vlow”. Pada Tabel 4.3 terlihat bahwa pada tipe batuan “vlow” dan “dens” memiliki nilai *specific heat capacity* yang tinggi hingga mencapai 2500 J/kg°C. Hal ini disebabkan adanya kandungan asam yang memiliki nilai *specific heat capacity* asam sebesar 2,18 KJ/kg°C (The Engineering Tool Box, 2010), sehingga tipe batuan “vlow” memiliki *specific heat capacity* yang besar. Diperkuat dengan data geofisika dan geokimia, yang menunjukkan bahwa zona distribusi tipe batuan “vlow” berada di aliran *upflow* dan disekitarnya terdapat manifestasi berupa fumarol yang bersifat asam. Pada sisi kaldera di bagian timur laut, timur dan tenggara diidentifikasi dengan beberapa tipe batuan yang memiliki karakteristik hampir sama, yaitu tipe batuan “side1”, “side2”, dan “low”. Sedangkan di bagian selatan, barat daya, barat, barat laut hingga utara digambarkan dengan tipe batuan “barr” yang mengidentifikasi adanya batas kaldera. Pada tipe batuan “barr” memiliki nilai *specific heat capacity* yang juga besar. Hal ini disebabkan oleh adanya kandungan asam serta adanya *recharge area* berupa fluida dengan *specific heat capacity* sekitar 4000 KJ/kg°C (The Physics Hypertextbook, 2010) di sisi dari tipe batuan. Sehingga menyebabkan *specific heat capacity* tipe batuan “barr” menjadi besar. Untuk bagian *heat source* diidentifikasi dengan tipe batuan “bott”. Sedangkan pada lapisan 6 pada Gambar 4.7 merupakan tipe batuan “top”.



Gambar 4.7 Parameter batuan

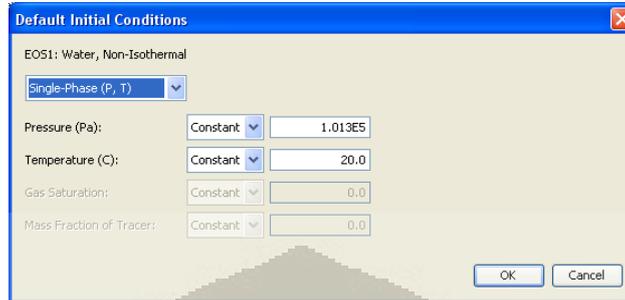
Tabel 4.3 Parameter batuan

Rock type	Density	Porosity	Permeability (m ²)			Thermal conductivity	Spec.Heat capacity
	(Kg/m ³)	(-)	kx	Ky	kz	(W/m ⁰ C)	(J/kg ⁰ C)
Atmos	1	0.99	1 x 10 ⁻¹⁴	1 x 10 ⁻¹⁴	1 x 10 ⁻¹⁴	2.5	9 x 10 ⁵
Top	2500	0.1	6 x 10 ⁻¹⁶	6 x 10 ⁻¹⁶	2 x 10 ⁻¹⁶	2	1000
Side 1	2500	0.05	2 x 10 ⁻¹⁶	2 x 10 ⁻¹⁶	5 x 10 ⁻¹⁷	2	1000
Side 2	2500	0.05	3 x 10 ⁻¹⁶	3 x 10 ⁻¹⁶	6 x 10 ⁻¹⁷	2	1000
Low	2500	0.05	3 x 10 ⁻¹⁶	3 x 10 ⁻¹⁶	5 x 10 ⁻¹⁷	2	1000
Vlow	2600	0.04	3.5 x 10 ⁻¹⁸	3.5 x 10 ⁻¹⁸	7 x 10 ⁻¹⁹	1	2500
Dens	2600	0.04	5 x 10 ⁻¹⁸	5 x 10 ⁻¹⁸	8 x 10 ⁻¹⁹	1	2500
Med	2500	0.1	1.5 x 10 ⁻¹⁴	1.5 x 10 ⁻¹⁴	4 x 10 ⁻¹⁵	2.5	1250
High	2500	0.1	2.5 x 10 ⁻¹⁴	2.5 x 10 ⁻¹⁴	5 x 10 ⁻¹⁵	2.5	1250
Bott	2500	0.1	1 x 10 ⁻¹⁴	1 x 10 ⁻¹⁴	2 x 10 ⁻¹⁵	2.5	1000
Barr	2600	0.05	1 x 10 ⁻¹⁸	1 x 10 ⁻¹⁸	1 x 10 ⁻¹⁹	0.8	3350

4.2.1.5 Batas dan *initial condition*

Kondisi batas dari sistem reservoir diisi oleh air dengan tekanan yang konstan sebesar 1 bar dan temperatur konstan 20°C. Batas di sekitar reservoir diatur agar tidak ada panas ataupun fluida yang masuk ke dalam sistem, sehingga diasumsikan bahwa daerah di sekeliling reservoir merupakan batuan yang *impermeable* (permeabilitas kecil).

Initial condition diasumsikan sebagai tekanan hidrostatik mula-mula. Data input *initial condition* akan tersimpan dalam disk file SAVE yang kemudian terjadi proses kalkulasi dan tersimpan dalam file INCON.

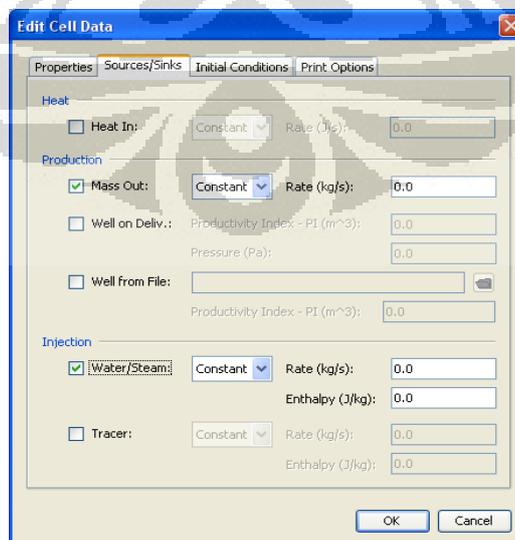


Gambar 4.8 *Initial condition*

4.2.1.6 Sinks and sources

Sinks merupakan sumur produksi dan *sources* merupakan sumur reinjeksi. Besar *mass rate* serta entalpi dari sumur produksi dan injeksi akan sangat mempengaruhi kestabilan dari reservoir geothermal dan dapat mencegah *decline* dari hasil produksi.

Kondisi batas dari sistem reservoir diisi oleh udara dengan tekanan yang konstan sebesar 1 bar dan temperatur konstan 20°C. Batas di sekitar reservoir diatur agar tidak ada panas ataupun fluida yang masuk ke dalam sistem, sehingga diasumsikan bahwa daerah di sekeliling reservoir merupakan batuan yang *impermeable* (permeabilitas kecil).

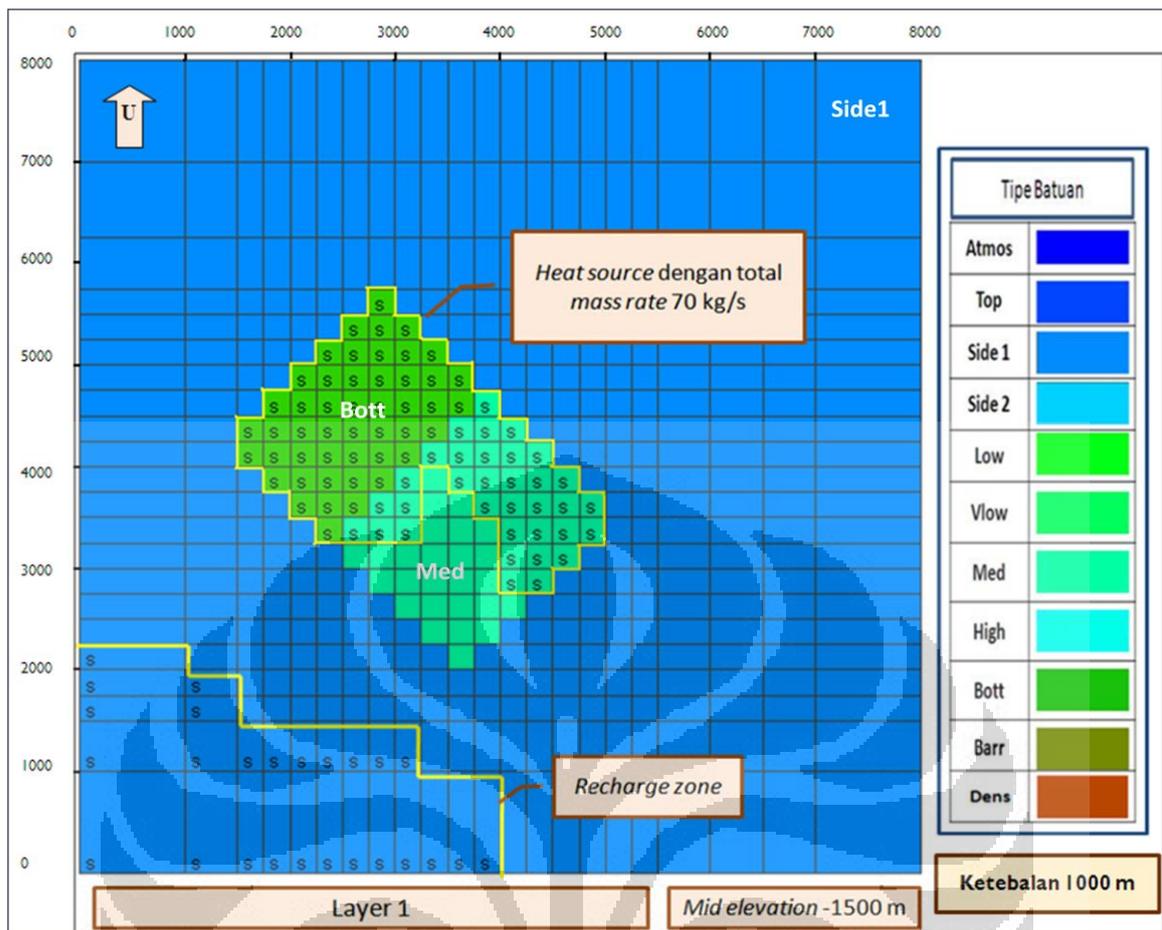


Gambar 4.9 *Sinks dan sources*

4.3 Proses simulasi *natural state* 3-dimensi

Proses simulasi reservoir yang dilakukan untuk mendapatkan hasil model *natural state* perlu dilakukan berulang kali dengan mempertimbangkan data geofisika berupa data MT, data geologi serta data sumur dari daerah yang akan dimodelkan. Simulasi model ini dilakukan dengan melakukan perubahan letak dan besar entalpi dari *heat source*, permeabilitas batuan, *recharge area* dan hasil simulasi disesuaikan dengan data sumur.

Reservoir dengan permeabilitas sangat tinggi berada pada elevasi 0 m hingga ke dasar. Data ini didapatkan dari data MT pada line MT-6 seperti pada Gambar 3.4. Reservoir berada di dalam kaldera yang pada simulasi merupakan tipe batuan “barr”. Batuan ini memiliki permeabilitas rendah. Kaldera berada mengelilingi reservoir di bagian selatan dan baratnya. Di bagian tenggara kaldera terbuka, hal ini dikarenakan pada distribusi data MT terdapat *outflow* yang ditunjukkan dengan adanya *hot spring* di bagian tenggara. Begitu juga dengan bagian timur dan timur laut yang juga merupakan *outflow*. Lapisan *clay* yang merupakan bagian penudung dengan permeabilitas sangat rendah atau *impermeable* berada pada bagian atas dari reservoir dengan elevasi 0 m hingga ke permukaan. Keberadaan *heat source* berada di sekitar Gunung Hayati dan Gunung Putik yang merupakan gunung vulkanik.



Gambar 4.10 Lapisan horizontal model simulasi pada layer 1

Simulasi yang dilakukan terdiri dari 7 layer dengan ketebalan yang berbeda. Layer pertama berada pada *mid elevation* -1500 m dengan ketebalan 1000 m. Begitupula dengan layer ke dua dengan ketebalan yang sama berada pada *mid elevation* -500 m. Layer ke tiga dan ke empat memiliki ketebalan 400 m dan berada pada *mid elevation* masing-masing 200 m dan 600 m. Selanjutnya, layer ke lima berada pada *mid elevation* 950 m dan layer ke enam berada pada *mid elevation* 1250 m dengan ketebalan 300 m, namun di daerah sekitar gunung memiliki lapisan yang lebih tebal dibandingkan dengan sekitarnya.

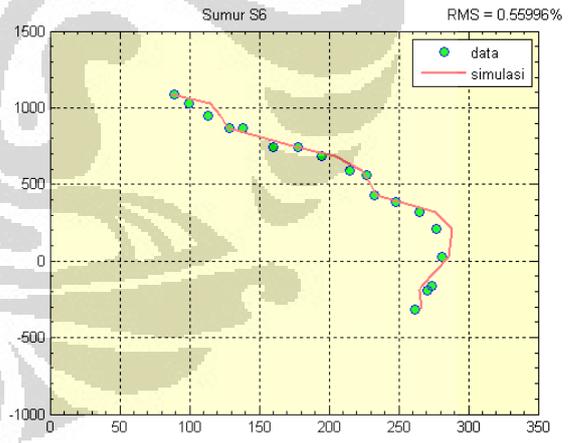
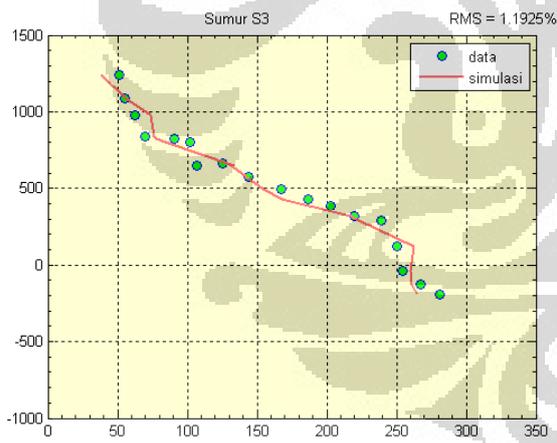
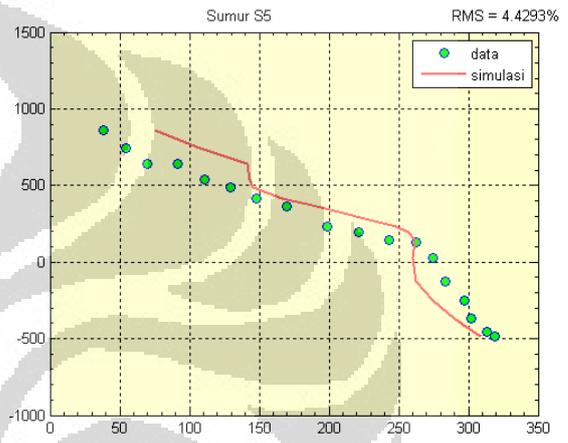
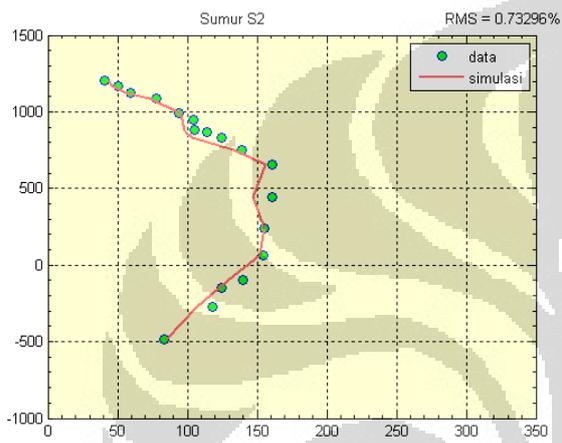
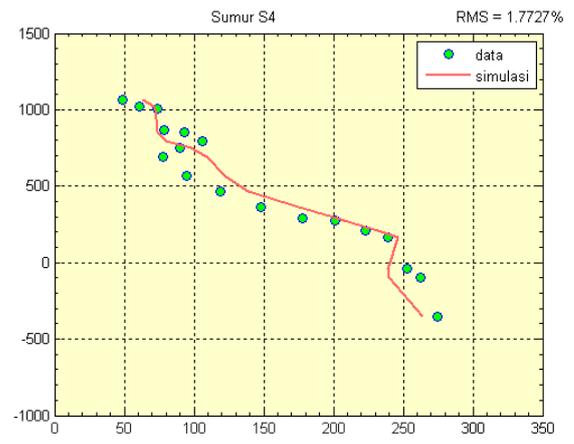
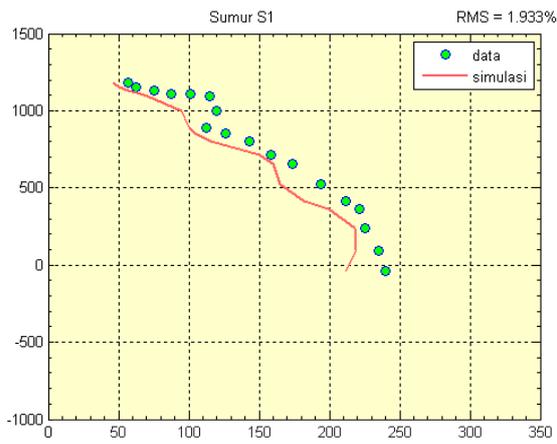
Hasil persebaran batuan pada lapisan horizontal layer 1 dapat dilihat pada Gambar 4.10. Layer satu merupakan lapisan batuan dengan elevasi terendah hingga mencapai -2000 m. Pada layer ini terdapat tipe batuan “bott” yang berwarna hijau dan tipe batuan “med” yang berwarna biru toska dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.3. Tipe batuan “side1” berwarna biru berada di sekeliling batuan tersebut. Setiap elemen yang bertandakan huruf “S” merupakan elemen yang merupakan *source*. Pada bagian tengah

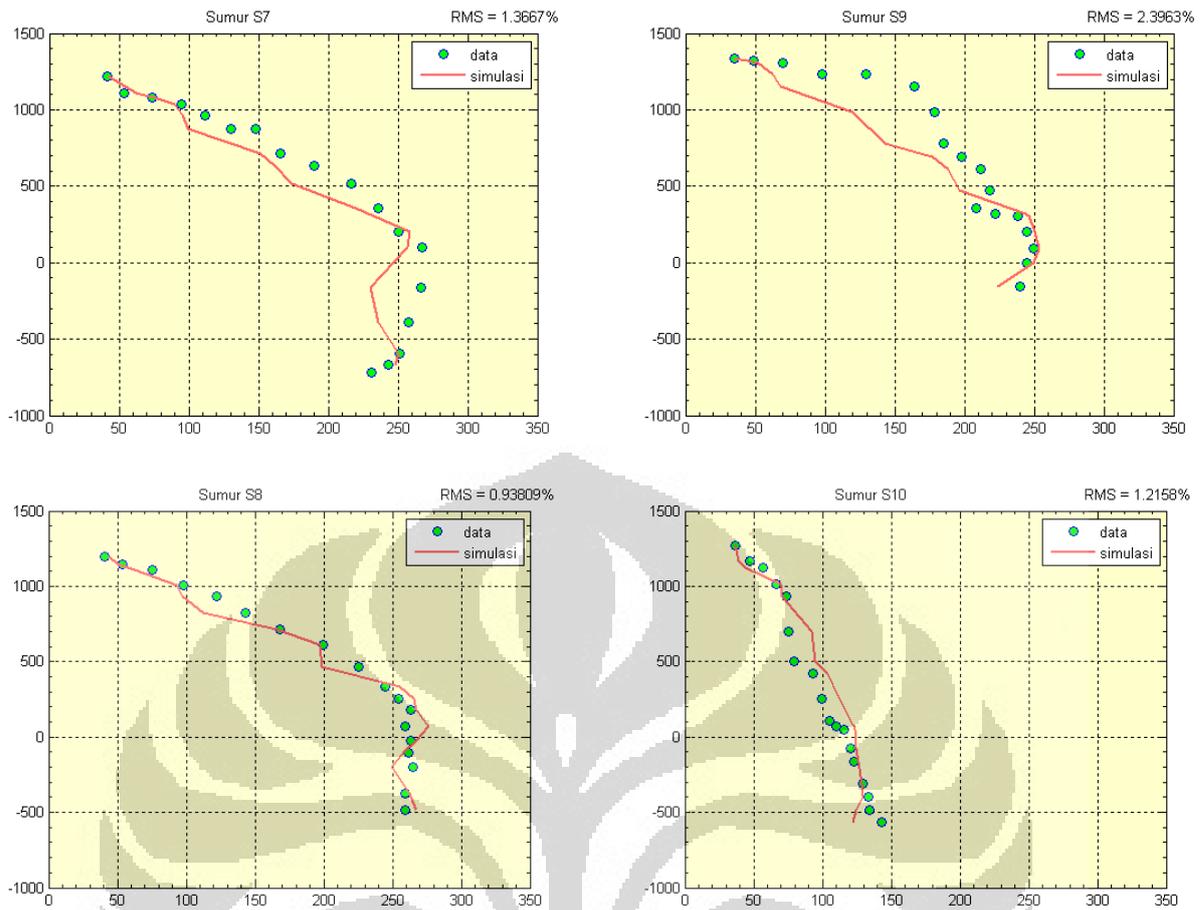
diasumsikan sebagai *heat source* yang diidentifikasi dengan tipe batuan “bott” memiliki nilai total *mass rate* sebesar 70 kg/s dan entalpi yang bervariasi 2×10^6 J/kg dan menurun hingga 1,5 J/kg di bagian tenggara. Sedangkan di bagian selatan dan barat daya diasumsikan sebagai *recharge area* yang berada hingga layer ke tiga. Distribusi lapisan horizontal pada layer ke tiga sampai dengan layer ke tujuh dapat dilihat pada lampiran. Pada layer ke dua hingga ke tiga terdapat tipe batuan “high”. Sedangkan, di bagian barat laut hingga ke selatan terdapat batuan berwarna coklat yang merupakan tipe batuan “barr” yang berada hingga layer ke-lima dengan karakteristik batuan seperti pada Tabel 4.3. Tipe batuan ini menggambarkan adanya kaldera. Kemudian di layer ke-tiga, terdapat batuan berwarna hijau dengan tipe batuan “low” yang diasumsikan sebagai *outflow* dari fluida. Arah aliran *outflow* dari fluida mengarah ke timur laut, timur, dan tenggara. Hal ini disebabkan karena pada arah tersebut terdapat struktur yang melintang arah tenggara – barat laut dan barat daya – timur laut. Dengan demikian, fluida mengalir melalui struktur patahan dan rekahan pada arah tersebut. Kemudian pada layer enam, sistem didominasi oleh tipe batuan “top” dan sedikit terdapat tipe batuan “vlow” yang mengalami penebalan di bagian tengah karena membentuk *up-dome shape*. Sedangkan pada layer tujuh terdapat “atmos” dimana pada layer ini merupakan atmosfer. Pada setiap elemen atmos terdapat tanda “F” yang di setting *fixed state*.

4.4 Hasil simulasi reservoir 3-dimensi

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 4.10 selanjutnya diplot dan disesuaikan dengan data temperatur yang dapat dilihat pada Gambar 4.11. Data temperatur sumur dengan simulasi dibandingkan sehingga didapatkan nilai *RMS error*-nya untuk masing-masing sumur.

Kurva yang dihasilkan dari hasil simulasi ini berupa garis lengkung. Hal ini menunjukkan kesesuaian dengan teori pada Gambar 2.2 yang menjelaskan bahwa lapangan geothermal Hayati merupakan sistem dominasi air. Kurva melengkung seperti pada sumur S2, S6, S7, dan S9 memiliki arti bahwa terjadi arus konveksi fluida pada sumur tersebut. Sedangkan kurva lurus seperti pada sumur lainnya menandakan terjadi arus konduksi. Data temperatur pada sumur S3, S4, dan S5 menunjukkan bahwa pada sumur tersebut memiliki temperatur yang sangat tinggi. Hal ini dikarenakan ketiga sumur ini letaknya paling dekat dengan *heat source* dibandingkan dengan sumur lainnya.





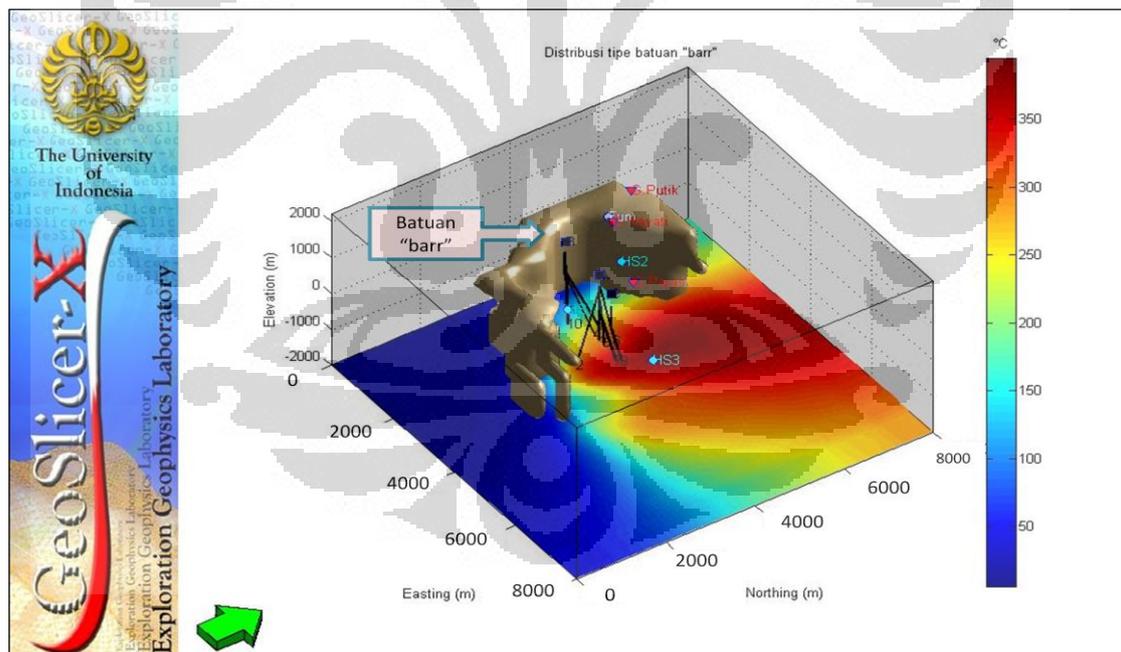
Gambar 4.11 Plot temperatur data sumur dan simulasi

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Interpretasi terintegrasi

Distribusi temperatur, tekanan dan permeabilitas batuan yang ada di lapangan geothermal Hayati didapatkan berdasarkan hasil simulasi dengan menggunakan simulator TOUGH2. Selanjutnya data-data tersebut divisualisasikan 3-dimensi dengan menggunakan software GeoSlicer-X yang dikembangkan oleh Laboratorium Geofisika Eksplorasi Universitas Indonesia. Software ini dikembangkan dengan menggunakan *Graphical User Interface (GUI)* dengan fasilitas MATLAB. GeoSlicer-X merupakan software yang interaktif dan tidak sulit penggunaannya. Visualisasi gambar yang dihasilkan dapat berupa gambar statis ataupun dinamis sehingga sangat membantu dalam menganalisis dan menginterpretasi hasil 3-dimensi. Selain itu, software ini juga dapat menampilkan litologi distribusi batuan seperti pada Gambar 5.1. Dengan begitu, hasil analisis dan interpretasi yang didapat lebih jelas dan akurat (Daud, 2010).

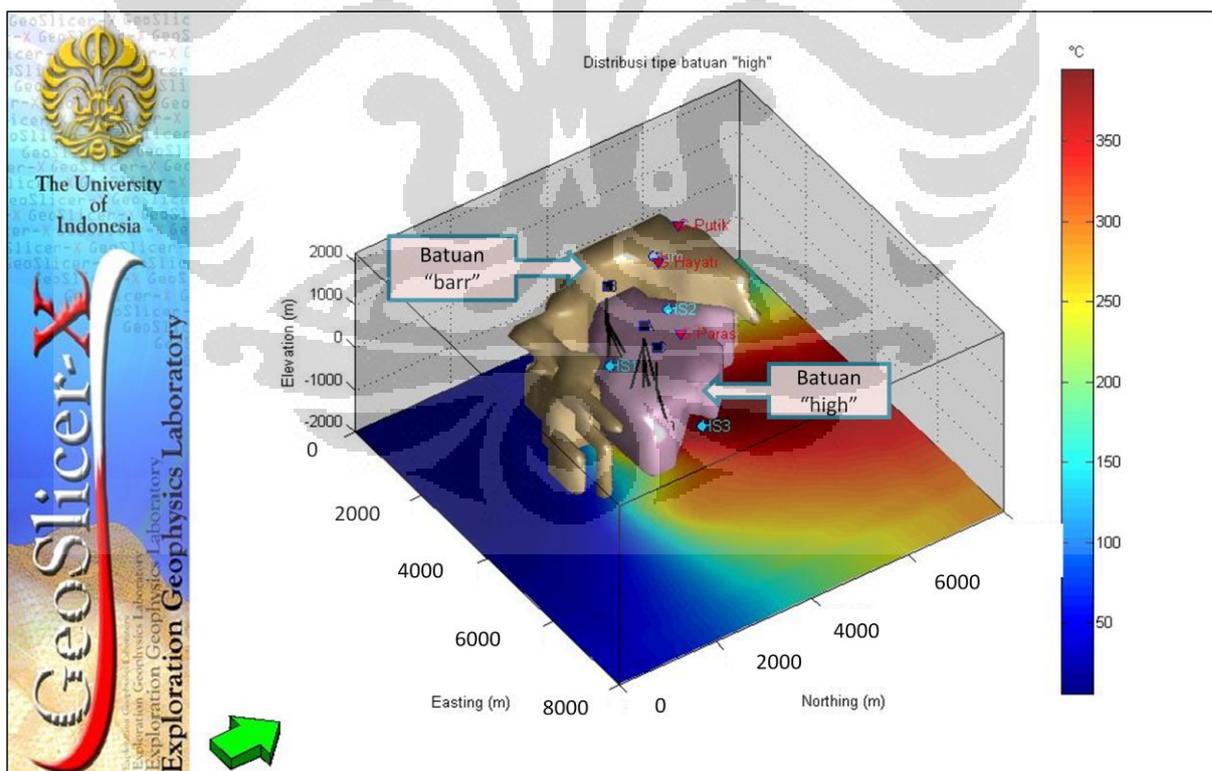


Gambar 5.1 Distribusi tipe batuan "barr"

Lapangan panas bumi Hayati berada dibatasi oleh suatu tipe batuan dengan karakteristik permeabilitas yang kecil hingga mencapai $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$. Batuan tersebut terdistribusi dibagian utara, barat, hingga ke selatan dan berada pada elevasi 1000 m

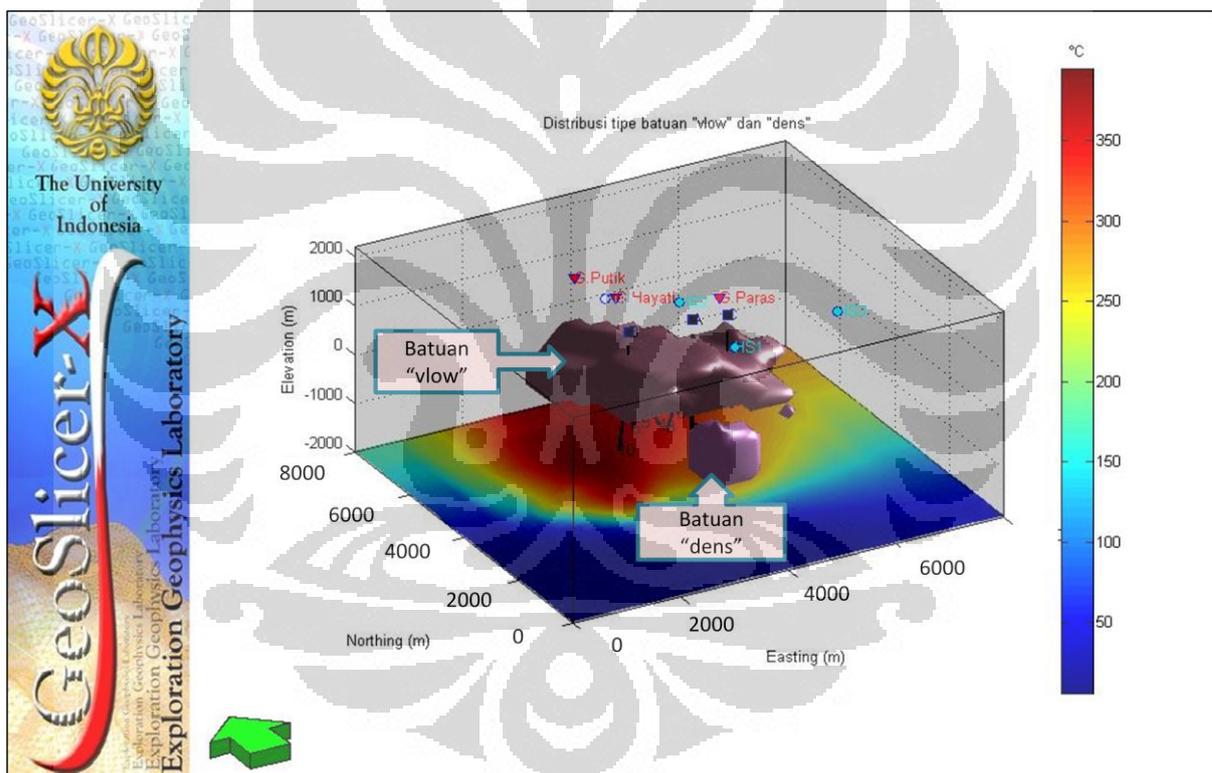
sampai dengan -1000 m dengan ketebalan 2 km dan dapat dilihat pada Gambar 5.1. Batuan dengan tipe “barr” memiliki densitas sebesar 2600 kg/m^3 dan porositas sebesar $0,05 \text{ m}^2$. Terbukti dari data model konseptual anomali gravitasi pada Gambar 3.7 batuan tersebut bernilai 2,6 mGal yang membuktikan bahwa batuan tersebut memiliki densitas yang tinggi. Berdasarkan model konseptual geothermal pada Gambar 3.10 batuan dengan tipe “barr” ini merupakan jenis batuan sedimen.

Berdasarkan simulasi, zona lemah pada lapangan panas bumi Hayati berada pada zona yang memiliki banyak struktur, yaitu di bagian dalam dari tipe batuan “barr”. Zona ini memiliki permeabilitas tinggi yang ditunjukkan dengan adanya distribusi tipe batuan “high” seperti pada Gambar 5.2. Pada zona tersebut fluida sangat mudah untuk terakumulasi. Tipe batuan ini berada disekitar Gunung Putik, Gunung Hayati, hingga menerus sampai ke Gunung Paras dengan bagian atas berada pada elevasi 200 m dan berada di dalam kaldera. Hal ini terbukti dari data gravitasi yang menunjukkan nilai anomali residual yang kecil dan menunjukkan bahwa area tersebut berupa kaldera seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 5.2 Distribusi tipe batuan “high”

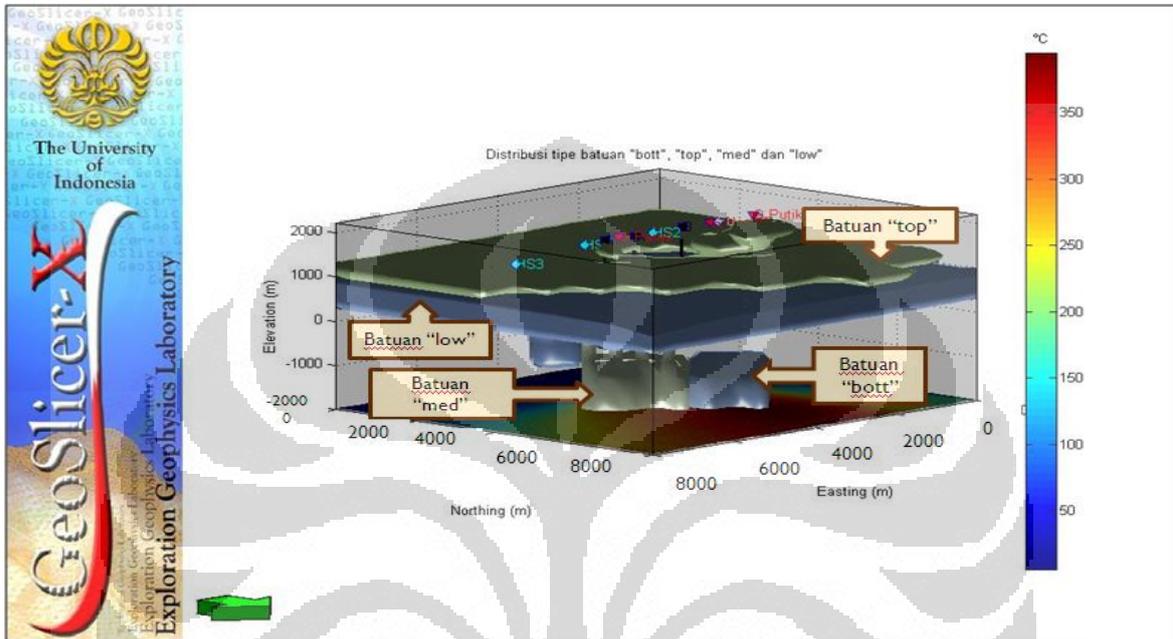
Distribusi persebaran tipe batuan “vlow” berada pada elevasi sekitar 1400 m hingga 200 m dengan ketebalan sekitar 1,2 km. Tipe batuan ini memiliki karakteristik dengan permeabilitas yang sangat kecil hingga mencapai $7 \times 10^{-19} \text{ m}^2$. Dengan karakteristik seperti yang telah dijelaskan pada bab 4 menyebabkan fluida tidak dapat mengalir melalui lapisan tersebut. Tipe batuan “vlow” ini berada di atas dari tipe batuan “high” sehingga melindungi fluida yang berada di dalamnya tidak dapat mengalir. Berdasarkan data model konseptual geothermal pada Gambar 3.10, tipe batuan “vlow” ini merupakan batuan *argilitic altered rock*. Dimana tipe batuan ini mengalami perubahan atau terlaterasi oleh panas yang berada di bawah. Pada bagian selatan di elevasi 200 m hingga -1000 m terdapat tipe batuan “dens”. Tipe batuan ini memiliki permeabilitas yang sangat kecil. Hal ini dibuktikan bahwa pada bagian tersebut terjadi densifikasi.



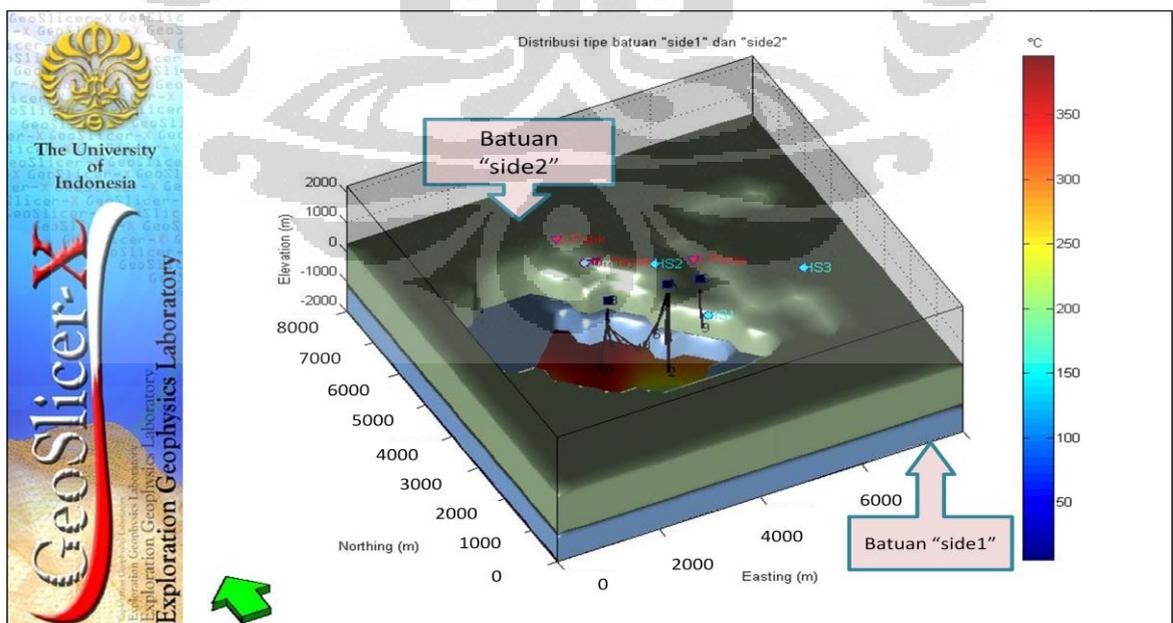
Gambar 5.3 Distribusi tipe batuan “vlow” dan “dens”

Lapisan batuan dengan elevasi terendah yang berada di dalam kaldera memiliki permeabilitas tinggi yang digambarkan dengan tipe batuan “bott” dan berada pada elevasi -1000 m sampai -1500 m. Sedangkan tipe batuan “low” berada pada elevasi 1000 m sampai 500 m dengan ketebalan 500 m yang tersebar dibagian atas namun bearada di luar kaldera. Tipe batuan ini memiliki permeabilitas sekitar $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$. Namun, dibagian timur laut

batuan tipe “low” ini menebal hingga pada elevasi 200 m dan dibagian selatan hingga elevasi -1000 m. Sedangkan tipe batuan dengan nilai permeabilitas yang sedang seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.4 merupakan tipe batuan “med” yang berada diluar dari tipe batuan “high”. Sedangkan batuan yang berada diluar kaldera merupakan tipe batuan “side1” dan “side2” seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.5.



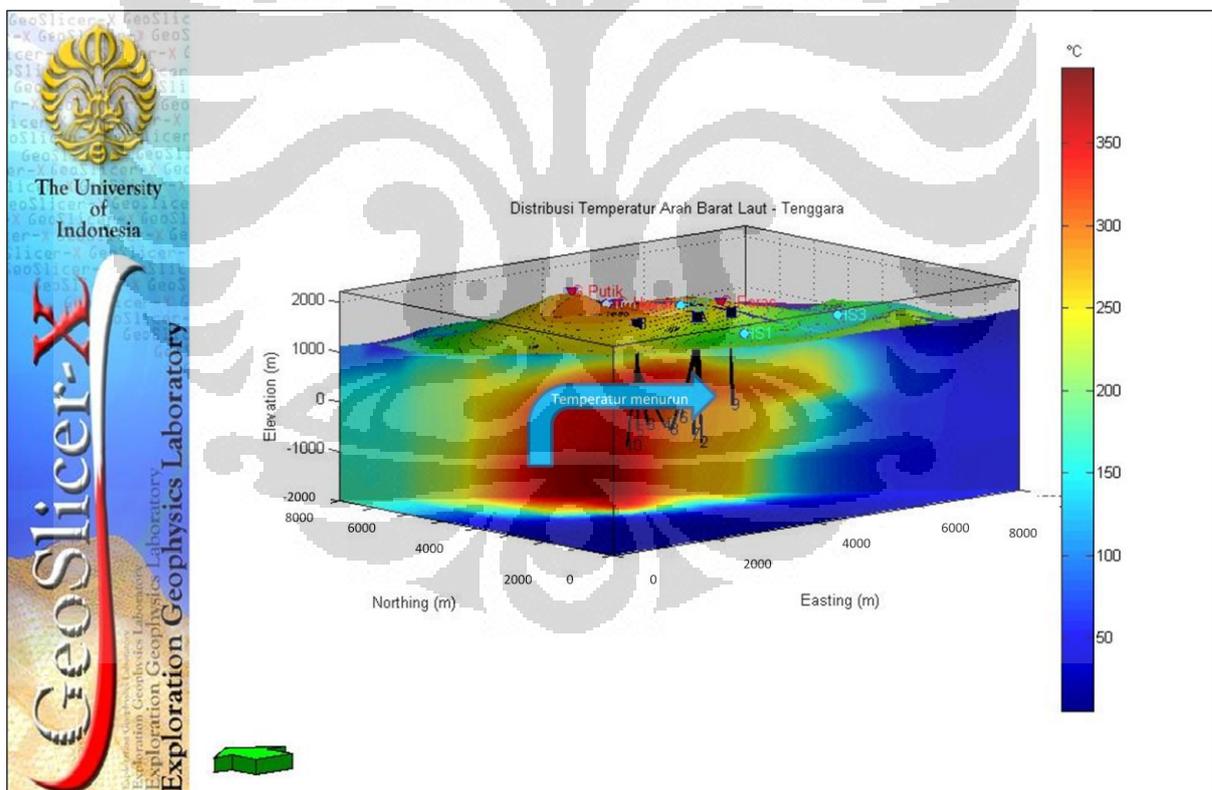
Gambar 5.4 Distribusi tipe batuan “bott”, “top”, “med” dan “low”



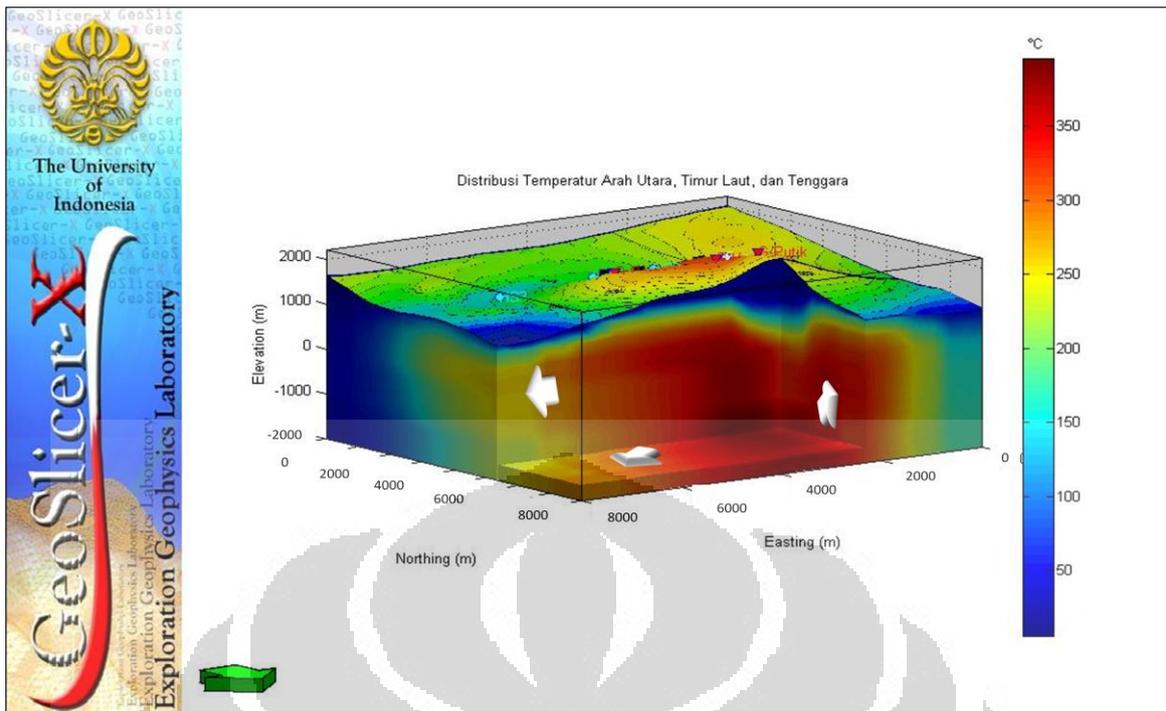
Gambar 5.5 Distribusi tipe batuan “side1” dan “side2”

Adanya distribusi batuan yang tersebar dengan permeabilitas yang berbeda menyebabkan adanya distribusi temperatur dan distribusi tekanan yang dihasilkan. Dapat dilihat pada Gambar 5.6 (a) dan (b) bahwa temperatur tertinggi berada di bawah G.Putik dan G.Hayati dengan elevasi -1500 m. Semakin berkurangnya elevasi, temperatur yang dihasilkan semakin menurun. Begitu juga terlihat pada arah utara, timur laut, timur dan tenggara, temperatur terdistribusi menurun pada arah tersebut. Hal ini dibuktikan dengan data peta distribusi spasial pada Gambar 3.5 yang menunjukkan pada arah utara, timur laut, timur, hingga tenggara terjadi distribusi nilai resistivitas yang semakin menurun.

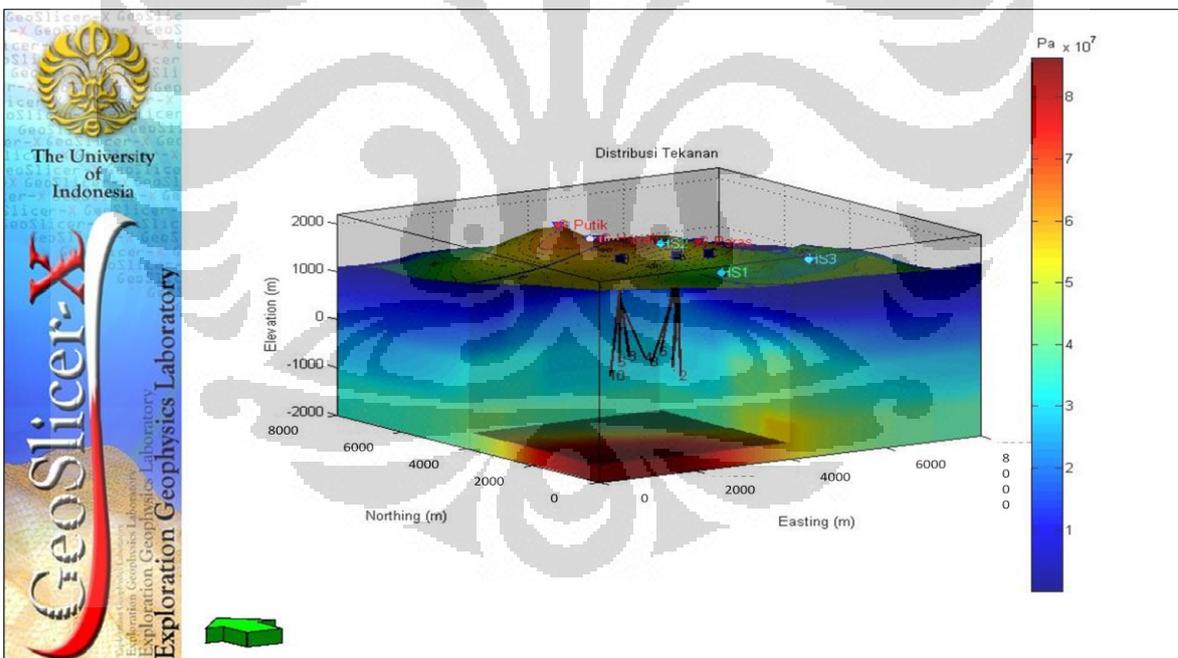
Begitu pula dengan tekanan, pada sistem geothermal Hayati ini tekanan terdistribusi seperti pada Gambar 5.7. Pada bagian selatan dan barat daya memiliki tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan di dalam kaldera. Sehingga menyebabkan pada bagian tersebut fluida mengalir dari luar kaldera menuju ke kaldera dengan zona permeabilitas tinggi.



Gambar 5.6 (a) Distribusi temperatur arah barat laut – tenggara



Gambar 5.6 (b) Distribusi temperatur arah utara, timur laut dan tenggara



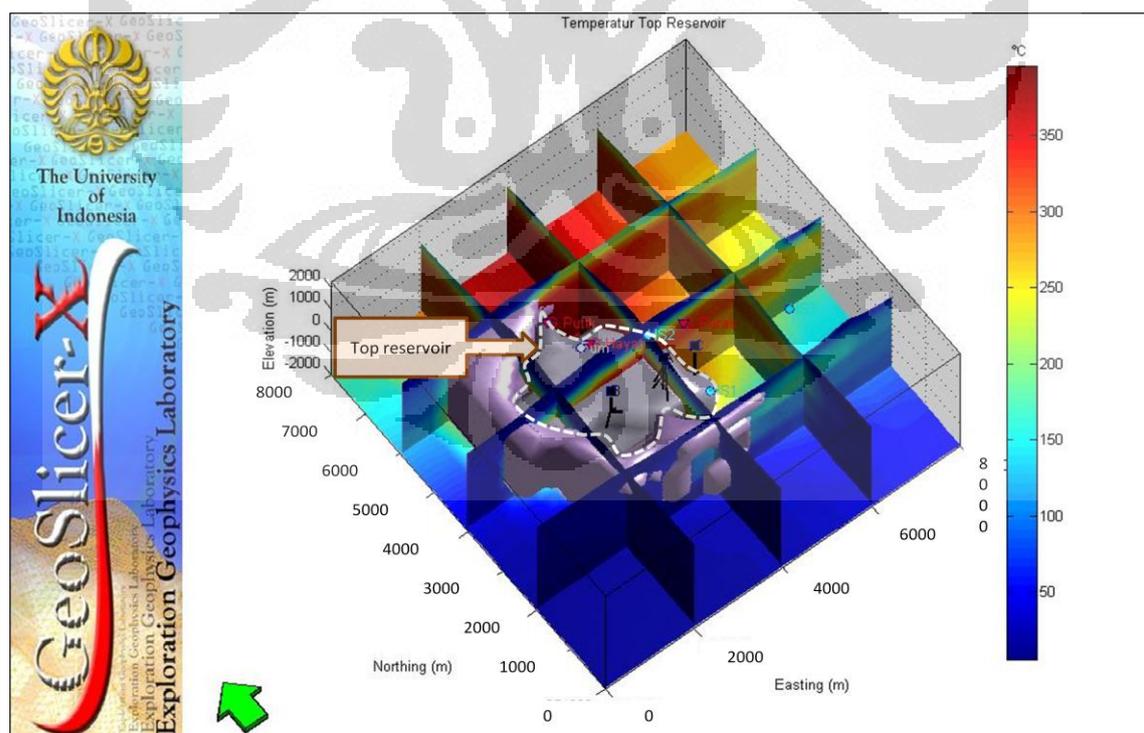
Gambar 5.7 Distribusi tekanan dengan visualisasi 3-Dimensi

5.1.1 Model sistem geothermal dan model simulasi

Sistem geothermal lapangan panas bumi Hayati merupakan tipe sistem dominasi air. Hal ini berdasarkan grafik temperatur yang dihasilkan dari simulasi. Terdapat beberapa

gunung pada sistem geothermal ini. Di dalam kaldera terdapat tiga gunung, yaitu G.Putik, G.Hayati, dan G. Paras. Sedangkan yang berada di luar kaldera adalah G.Lana, G.Side, dan G.Cin.

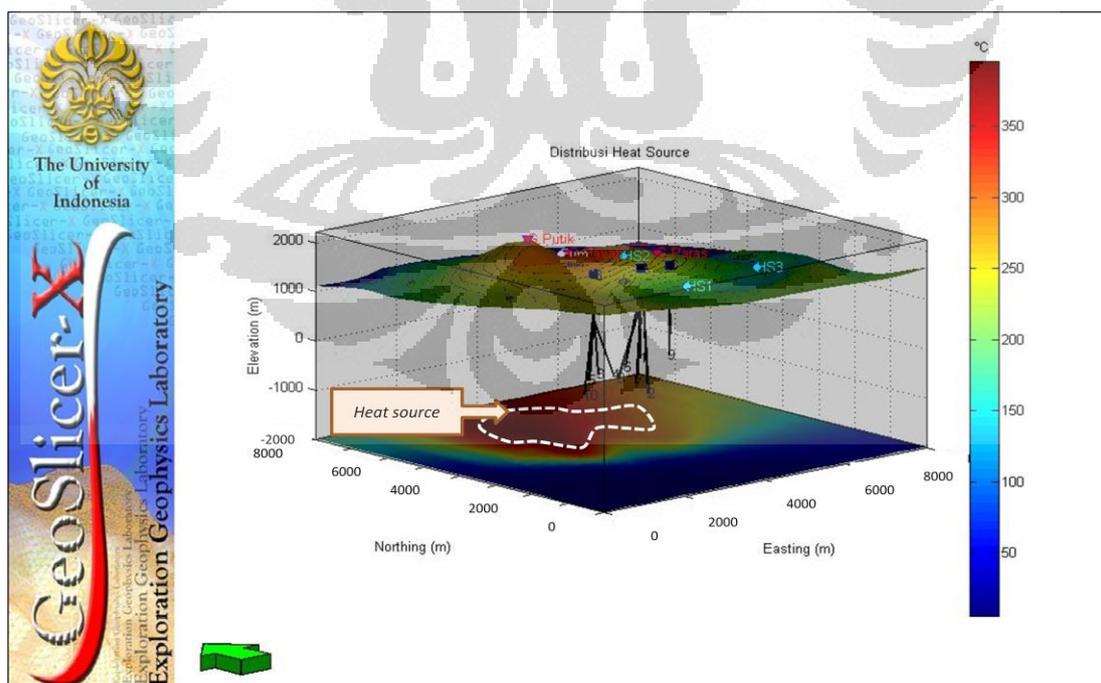
Kaldera yang ditunjukkan dengan adanya tipe batuan “barr” pada simulasi merupakan batas kaldera dari kaldera Side. Kaldera tersebut memiliki permeabilitas yang sangat kecil sehingga sulit untuk dilalui fluida. Namun dibagian barat daya terdapat struktur yang memanjang dari barat daya – timur laut. Begitu pula dengan bagian selatan yang terdapat banyak struktur yang memanjang dari tenggara – barat laut. Hal ini menyebabkan area yang terkena struktur memiliki permeabilitas tinggi dan memungkinkan fluida masuk dari luar kaldera menuju ke kaldera. Ditambah dengan data distribusi tekanan yang menunjukkan bahwa bagian barat daya dan selatan memiliki tekanan lebih tinggi dibandingkan di dalam kaldera. Selain itu, berdasarkan plot data sumur dengan data simulasi pada Gambar 4.9 terlihat bahwa pada sumur S2 yang berada dibagian selatan memiliki bentuk kurva yang melengkung dengan artian bahwa terjadi arus konveksi pada area tersebut. Hal ini memperkuat bahwa di bagian barat daya dan selatan merupakan *recharge area*.



Gambar 5.8 Temperatur *top reservoir*

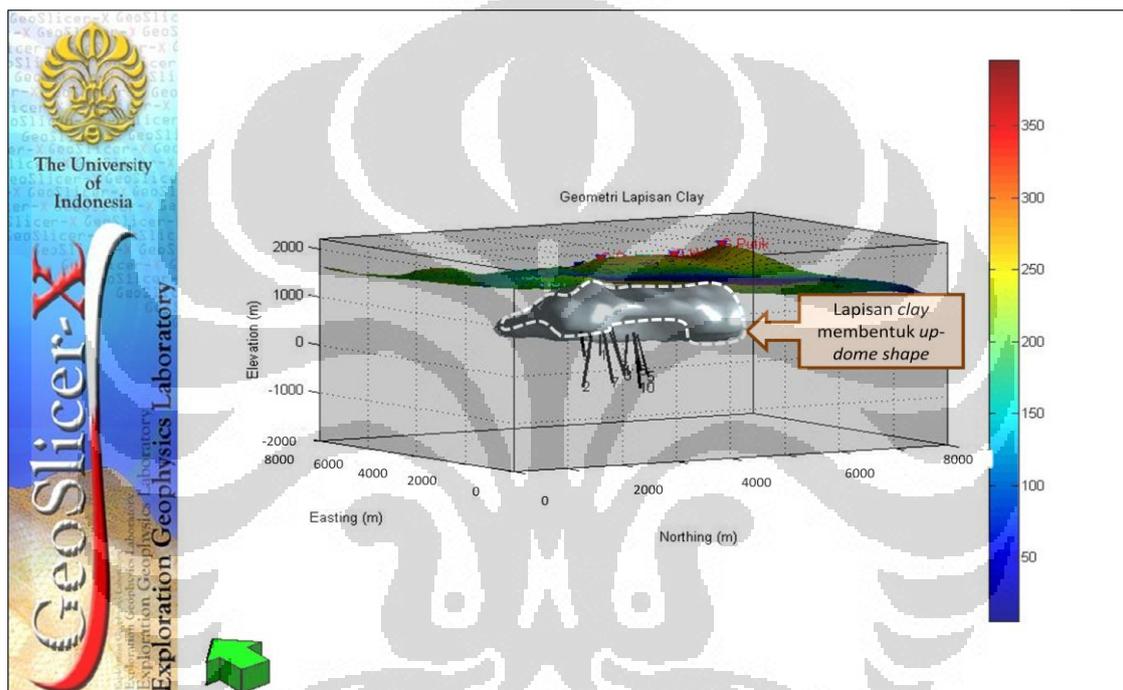
Zona lemah yang berada di bawah G.Putik dan G.Hayati seluas 6,7 km² memiliki permeabilitas yang tinggi seperti pada Gambar 5.2 merupakan reservoir dari sistem geothermal dengan *top reservoir* berada pada elevasi 200 m. Pada zona tersebut memiliki temperatur *top reservoir* sekitar 250° - 300° C dan dapat dilihat pada Gambar 5.8. Hal ini diperkuat dengan adanya data pendukung berupa model konseptual yang menunjukkan bahwa bagian *top reservoir* memiliki temperatur kisaran 300° C.

Heat source berada di sekitar Gunung Putik, Gunung Hayati dan Juga Gunung Paras dengan elevasi -1500 m. Namun besar *heat source* di ketiga gunung ini tidak sama. *Heat source* terbesar berada di sekitar Gunung putik dan Gunung Hayati, dan semakin mengecil menuju ke Gunung Paras. Hal ini disebabkan karena umur dari Gunung Putik yang paling muda dibandingkan dengan umur Gunung Paras. Berdasarkan hasil simulasi, *heat source* berada di sekitar Gunung Putik, Gunung Hayati dan Gunung Paras. Terjadi kemenerusan sumber panas pada ketiga gunung ini. Hal ini dimungkinkan karena sebelum terbentuk kaldera merupakan satu sumber *heat source* terbesar berada di sekitar Gunung putik dengan *rate mass* sebesar 70 kg/s dengan entalpi 2×10^6 J/kg di sekitar G.Putik dan semakin mengecil menuju ke Gunung Paras dengan entalpi $1,5 \times 10^6$ J/kg dapat dilihat pada Gambar 5.9.



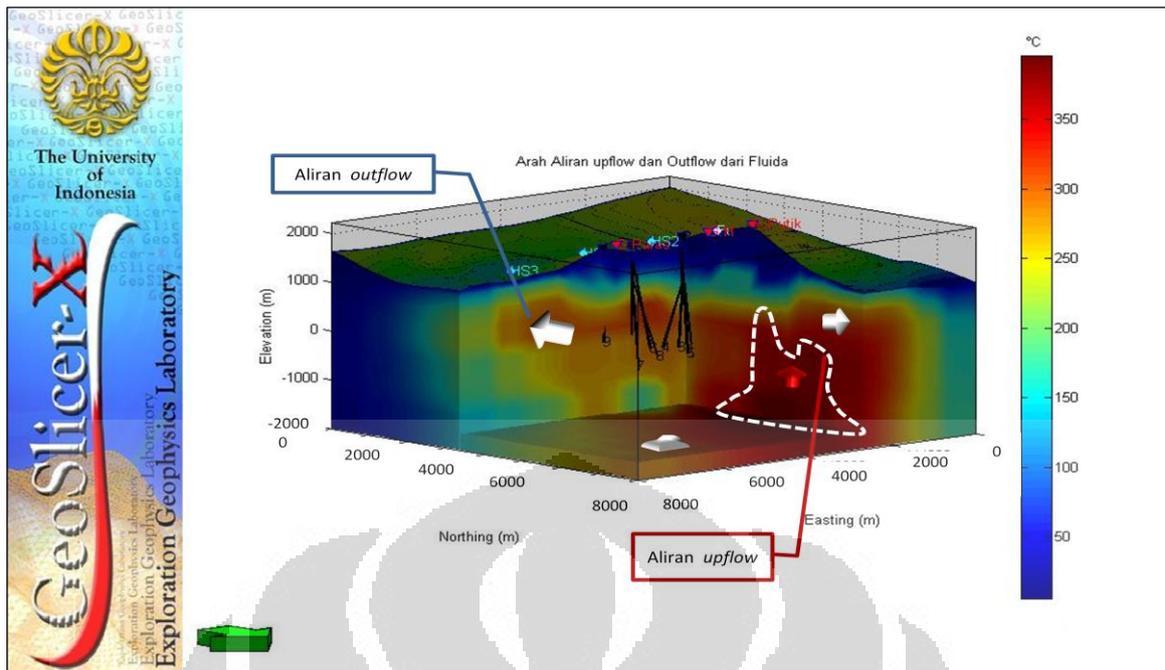
Gambar 5.9 Distribusi *heat source*

Lapisan batuan *clay* yang merupakan salah satu indikasi adanya reservoir dan memiliki temperatur sekitar 70° - 250° C. Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa *clay* dengan tipe batuan “*vlow*” berada pada elevasi tertinggi hingga elevasi 1400 m hingga 200 m. Lapisan *clay* semakin menebal ke arah barat dan selatan dan menipis di bagian utara dan timur. Bentuk lapisan *clay* ini membentuk *up-dome* pada Gambar 5.10 dan sesuai dengan data MT dan konseptual model pada Gambar 3.10. Pada bagian selatan terdapat lapisan *clay* di sekitar sumur S2, hal ini disebabkan adanya densifikasi yang menyebabkan batuan pada area tersebut teralterasi.



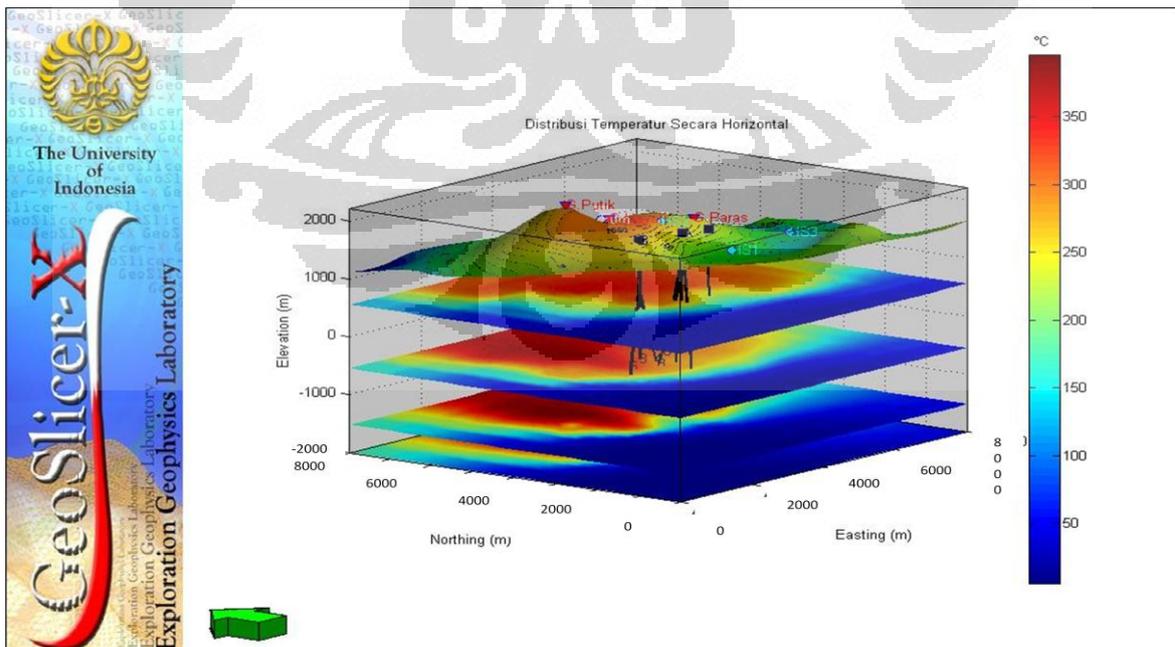
Gambar 5.10 Geometri lapisan *clay*

Berdasarkan gambar distribusi temperatur pada Gambar 5.6 dan Gambar 5.11, dapat didefinisikan bahwa arah aliran fluida pada sistem geothermal Hayati berupa *upflow* menuju Gunung Putik dan Hayati. Hal lain yang menguatkan adalah dengan munculnya manifestasi berupa fumarol di antara G.Putik dan G. Hayati. Sedangkan aliran *outflow* dari fluida menuju ke bagian timur hingga ke tenggara. Hal ini dibuktikan dengan kontur topografi yang semakin rendah di bagian timur laut. Selain itu, munculnya manifestasi berupa *hot spring* dengan tipe sulfat bikarbonat di bagian timur dan tenggara juga merupakan bukti bahwa aliran *outflow* dari fluida mengarah ke timur laut, timur dan tenggara.



Gambar 5.11 Arah aliran *upflow* dan *outflow* dari fluida

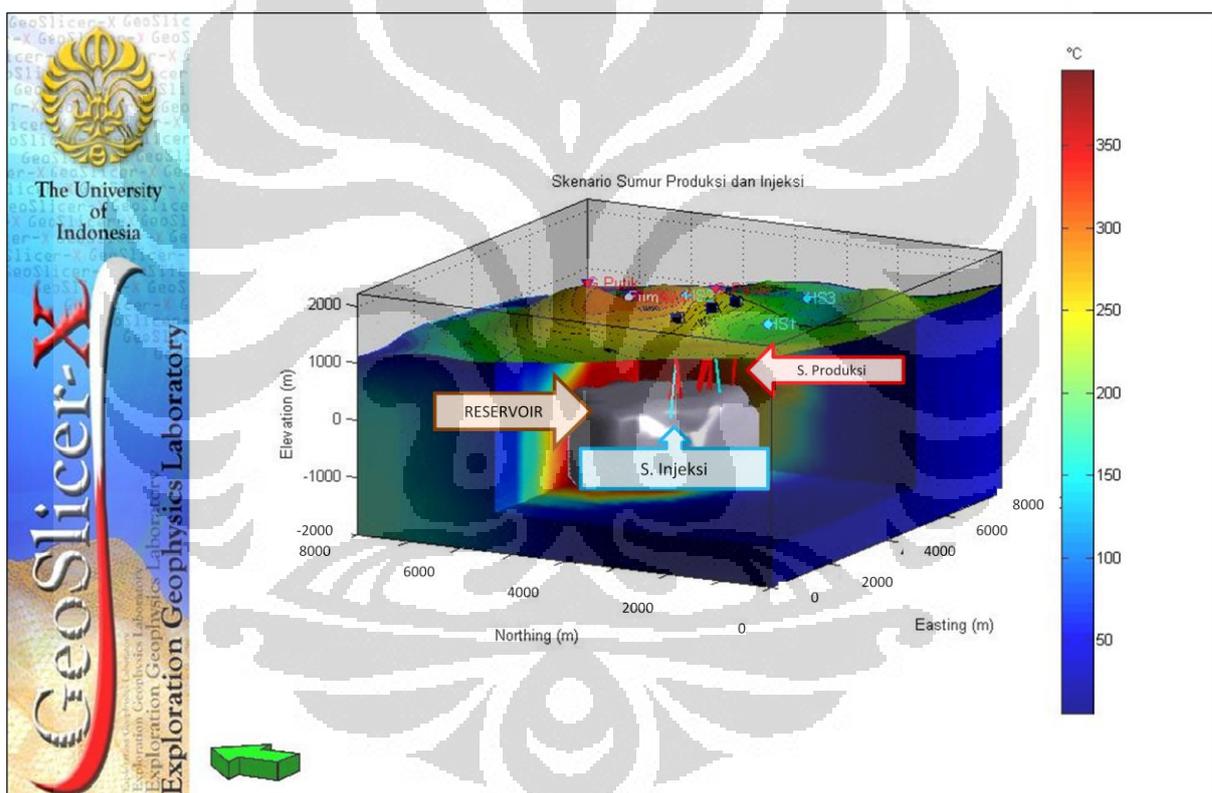
Pada Gambar 5.12 terlihat bahwa di bagian tenggara dari G.Putik memiliki temperatur yang tinggi. Hal ini disebabkan adanya *the gassing* yang mengandung asam dan kadar H_2S yang sangat tinggi dan dapat menyebabkan korosif. Terjadinya *collapse* pada daerah tersebut merupakan salah satu bukti bahwa terdapat *the gassing*.



Gambar 5.12 Distribusi temperatur secara horizontal

5.2 Rekomendasi skenario sumur produksi dan injeksi

Berdasarkan hasil simulasi model yang telah dilakukan dan dibuktikan dengan data pendukung, maka dapat direkomendasikan bahwa dalam proses skenario sumur produksi dan injeksi, sumur S2 dan S10 sangat baik untuk dijadikan sumur injeksi. Hal ini dikarenakan pada area sumur S2 dan S10 merupakan *recharge zone*. Sedangkan sumur lainnya dilakukan untuk produksi. Sumur yang sangat mungkin dapat menghasilkan produksi sangat besar adalah sumur S5, karena pada kondisi *natural state* saja mencapai temperatur 320°C. Untuk Sumur yang letaknya dengan *heat source* jangan dijadikan sumur injeksi, seperti sumur S3, S4, S5. Jika hal ini dilakukan maka akan merusak sistem reservoir Hayati dan akan mengurangi panas dari *heat source*.



Gambar 5.13 Rekomendasi sumur produksi dan sumur injeksi

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

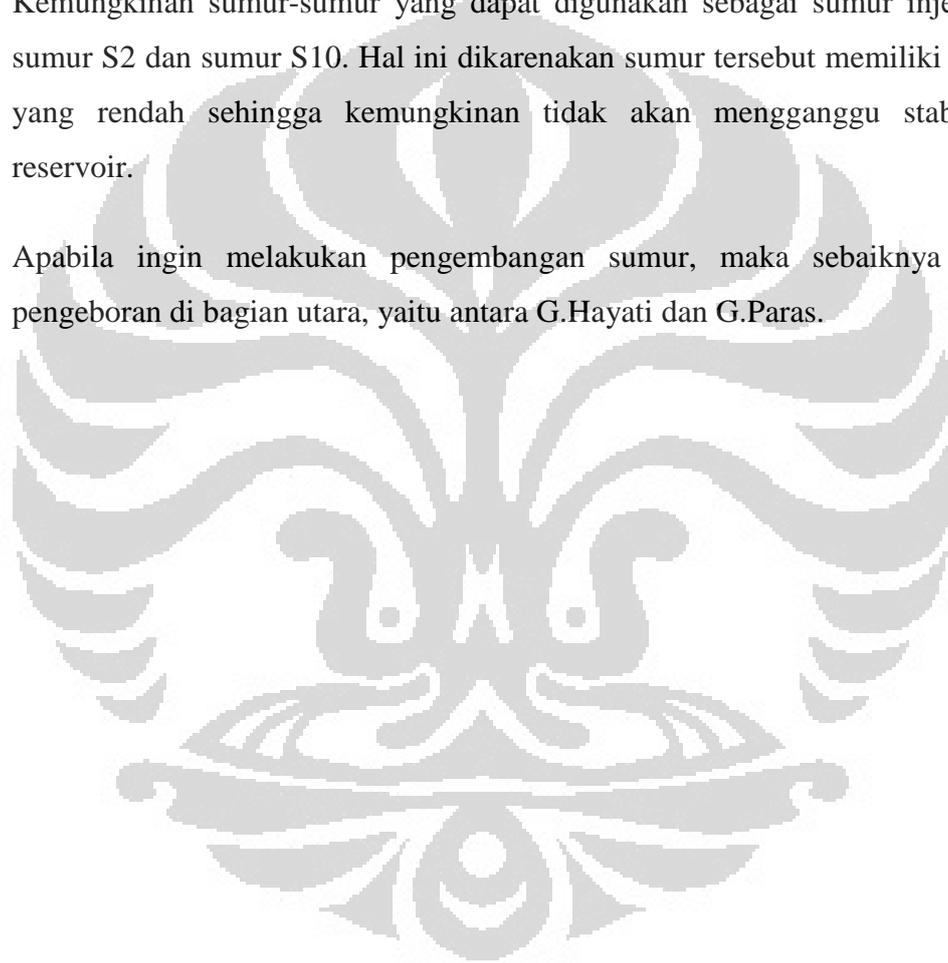
Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan guna melakukan pemodelan reservoir sistem geothermal dengan menggunakan simulasi reservoir TOUGH2 dan didukung oleh data penunjang lain seperti data geofisika, geologi, geokimia, serta data sumur, maka dapat disimpulkan bahwa :

- Reservoir berada di bawah G.Putik dan G.Hayati seluas 6.7 km^2 dengan permeabilitas yang tinggi. Top reservoir berada pada elevasi 200 m. Pada zona tersebut memiliki temperatur *top reservoir* sekitar 300° C .
- Heat source berada disekitar G.Putik dan G. Hayati dan menerus menuju ke G.Paras pada elevasi -1500 m. Pusat heat source berada di antara G.Putik dan G.Hayati dengan total *rate mass* 70 kg/s dan entalpi sebesar $2 \times 10^6 \text{ J/kg}$. Menuju ke G.Paras, *rate mass* dan entalpi semakin berkurang menjadi $1,5 \times 10^6 \text{ J/kg}$.
- Hidrogeologi dari sistem geothermal ini diketahui bahwa bagian *upflow*-nya berada di sekitar G.Putik dan G. Hayati dengan manifestasi yang muncul di permukaan adalah fumarol dan solfatara yang mengindikasikan aliran *upflow*. Sedangkan *outflow*-nya megarah ke bagian timur laut, timur dan tenggara. Bukti yang mendukung aliran *outflow* ini adalah munculnya manifestasi permukaan berupa *hot spring* dengan kandungan bikarbonat sulfat di bagian timur dan tenggara.
- Sistem geothermal Hayati termasuk dalam tipe *water dominated system*. Pada sistem geothermal tersebut terdapat kaldera dengan permeabilitas kecil berada di sebelah barat yang memanjang dari utara hingga ke selatan dan clay berada di elevasi 1400 m – 200 m yang berada di atas reservoir. Di dalam kaldera terdiri dari batuan mulai dari *high permeability* hingga *very low permeability*.
- Berdasarkan simulasi model *natural state* yang dilakukan, dapat diketahui letak distribusi permeabilitas batuan, distribusi temperatur dan distribusi tekanan. Simulasi yang dilakukan mencapai *state condition* pada jangka waktu 1 juta tahun.

6.2 Saran

Dari hasil keseluruhan penelitian yang dilakukan, penulis memiliki beberapa saran yang mungkin berguna untuk simulasi kedepannya, diantaranya adalah :

- Kondisi *natural state* yang telah diperoleh dapat digunakan untuk menentukan skenario sumur produksi dan injeksi sehingga dapat diketahui jangka waktu reservoir dapat diproduksi.
- Kemungkinan sumur-sumur yang dapat digunakan sebagai sumur injeksi adalah sumur S2 dan sumur S10. Hal ini dikarenakan sumur tersebut memiliki temperatur yang rendah sehingga kemungkinan tidak akan mengganggu stabilitas dari reservoir.
- Apabila ingin melakukan pengembangan sumur, maka sebaiknya dilakukan pengeboran di bagian utara, yaitu antara G.Hayati dan G.Paras.



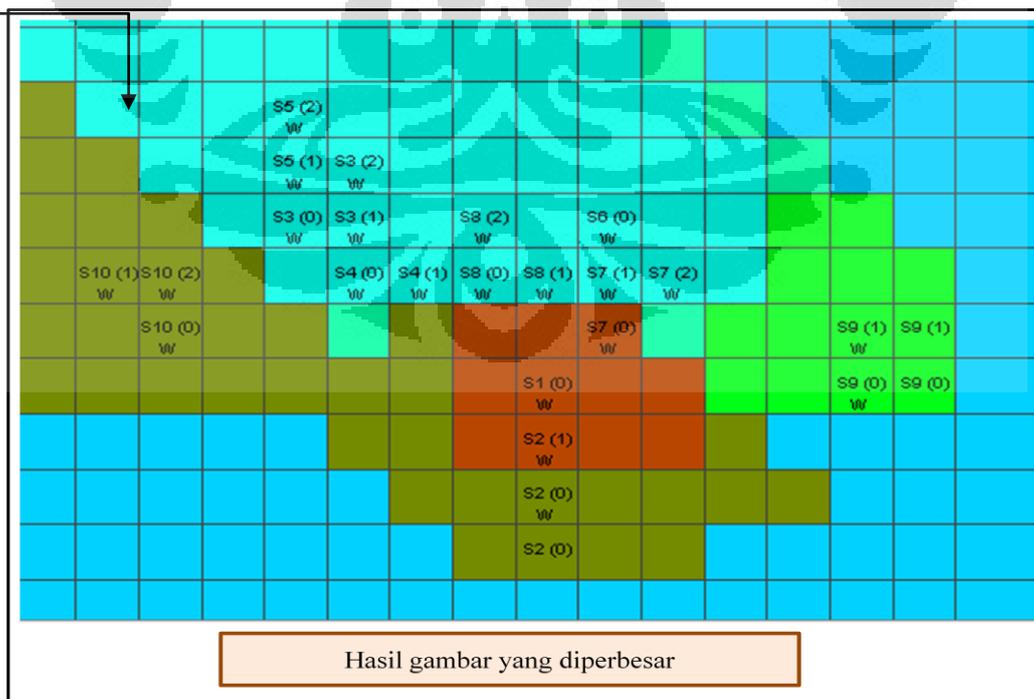
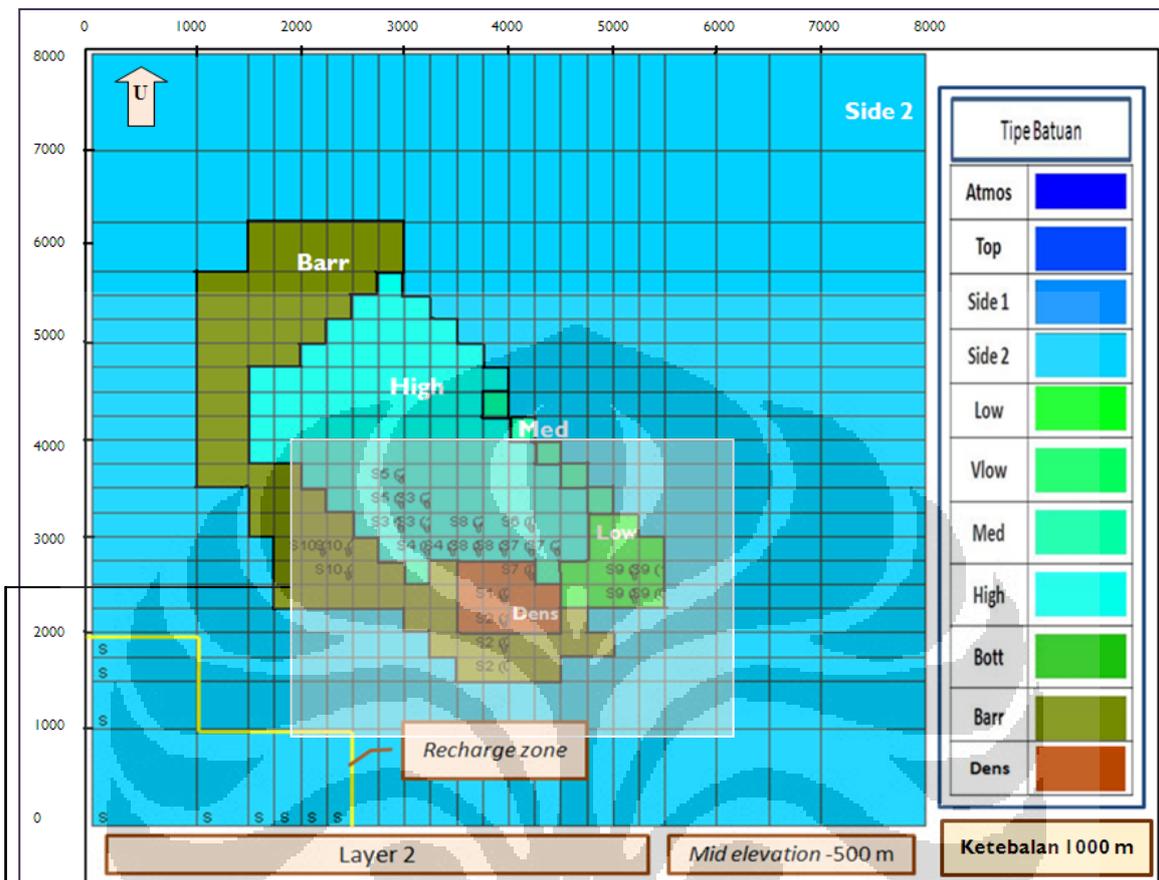
DAFTAR PUSTAKA

- Atmojo, J.P., et al. (2000). *Modeling Studies of Sibayak Geothermal Reservoir Northern Sumatra, Indonesia*. PROCEEDINGS, World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan.
- Atmojo, J.P. (2001). *Study on Numerical Modeling of Geothermal Reservoir in Sibayak Field Indonesia*. Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University.
- Atmojo, J.P. (2001). *Numerical Modeling Study of Sibayak Geothermal Reservoir, North Sumatra, Indonesia*. PROCEEDINGS, Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, California.
- Atmojo, J.P. (2010). *Geophysical Properties Of Planet Earth*. Diktat kuliah Geofisika Universitas Indonesia. Depok.
- Alchofino, T. (2009). *Pemodelan Dua Dimensi Reservoir Geothermal Sistem Dua Fasa Menggunakan Metode Finite Difference*. Institut Teknologi Bandung.
- BSN. (1999). *Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. Standar Nasional Indonesia. Indonesia.
- Daud, Y. (2009). *Geophysical Studies Over a Difficult Geothermal Area (a case study)*. Catatan kuliah Geofisika Universitas Indonesia. Depok.
- Daud, Y. (2009). *Klasifikasi Sistem Geothermal*. Catatan kuliah Geofisika Universitas Indonesia. Depok.
- Daud, Y., Sudarman, S., Ushijima, K. (2001). *Imaging Reservoir Permeability of The Sibayak Geothermal Field, Indonesia Using Geophysical Measurements*. PROCEEDINGS, Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, California.
- Daud, Y., Saputra, R. (2010). *GeoSlicer-X: A 3-D Interactive Software for Geothermal Data Analysis*. PROCEEDINGS, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.

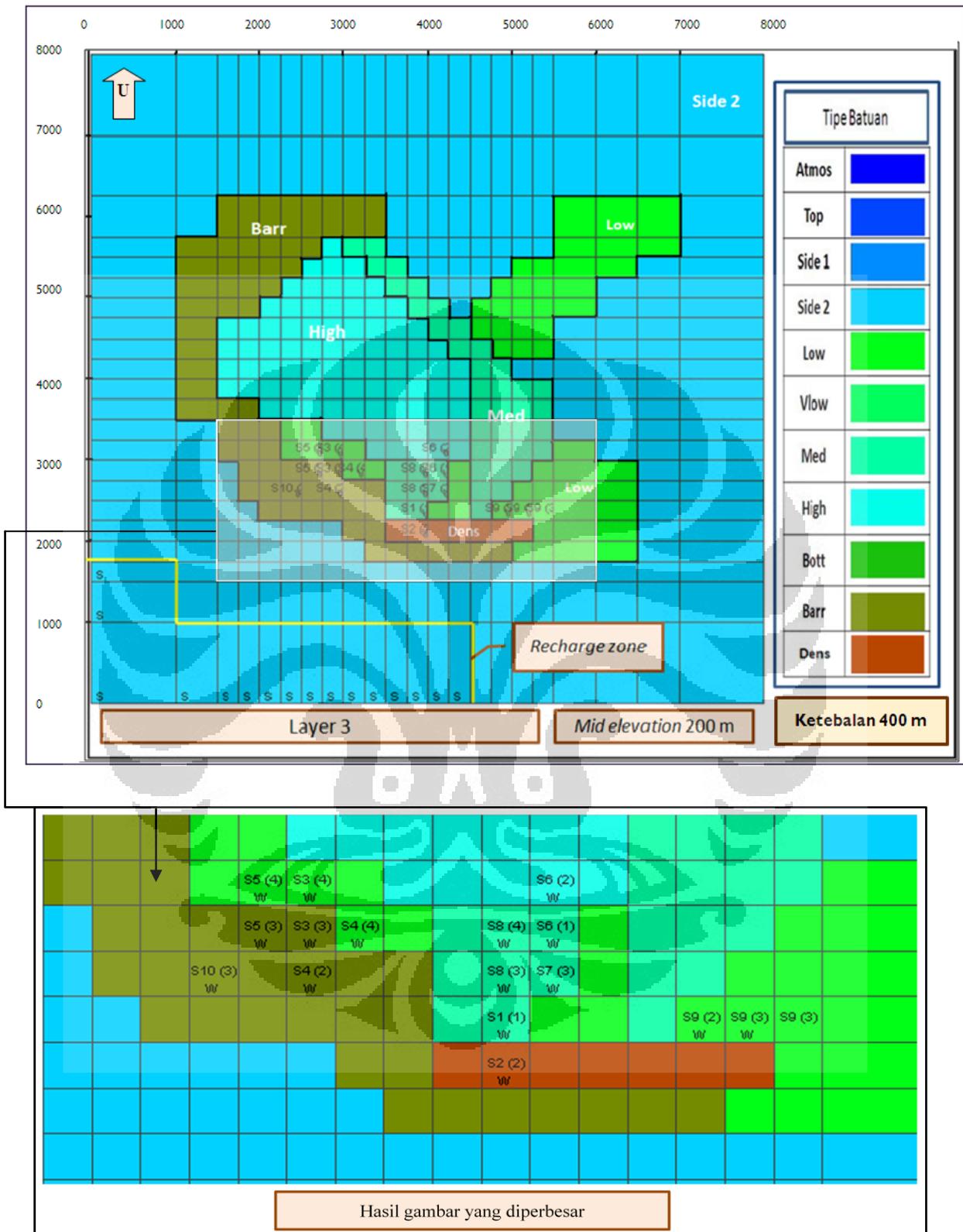
- Freeston D, Gunn C. (1993). *Wellbore Simulation – Case Studies*. PROCEEDINGS, Eighteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, California.
- Hendrick, P. (2004). *Optimization of Electrical Power Production Process for The Sibayak Geothermal Field, Indonesia*. Geothermal Training Programme, Iceland.
- Pruess, Karsten. (2002). *Mathematical Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in Geothermal Systems – an Introduction in Five Lectures*. United Nations University, Geothermal Training Programme. Reykjavik, Iceland.
- Sigurdsson, Haraldur., et al. (2000). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. A Harcourt Science and Technology Company.
- The Engineering Tool Box. (25 Mei 2010). *Liquids and Fluids – Specific heat capacity*. http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-fluids-d_151.html.
- The Physics Hypertextbook. (25 Mei 2010). Sensible Heat. <http://physics.info/phases/>.
- Usher G, Harvey C, Johnstone R, Anderson E. (2000). *Understanding The Resistivities Observed in Geothermal Systems*. PROCEEDINGS, World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan.

Lampiran

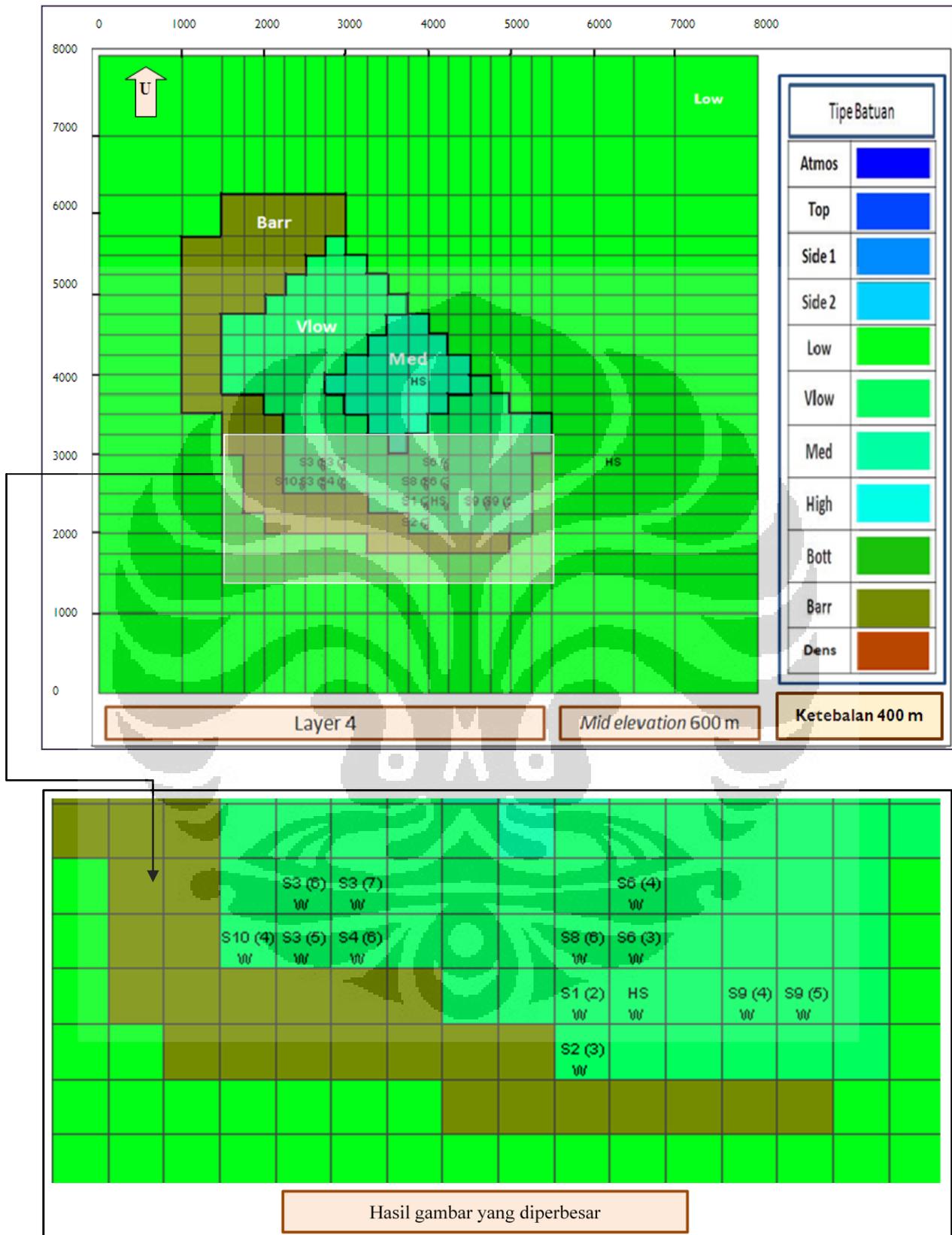
Lampiran 1 : Lapisan horizontal model simulasi pada layer 2



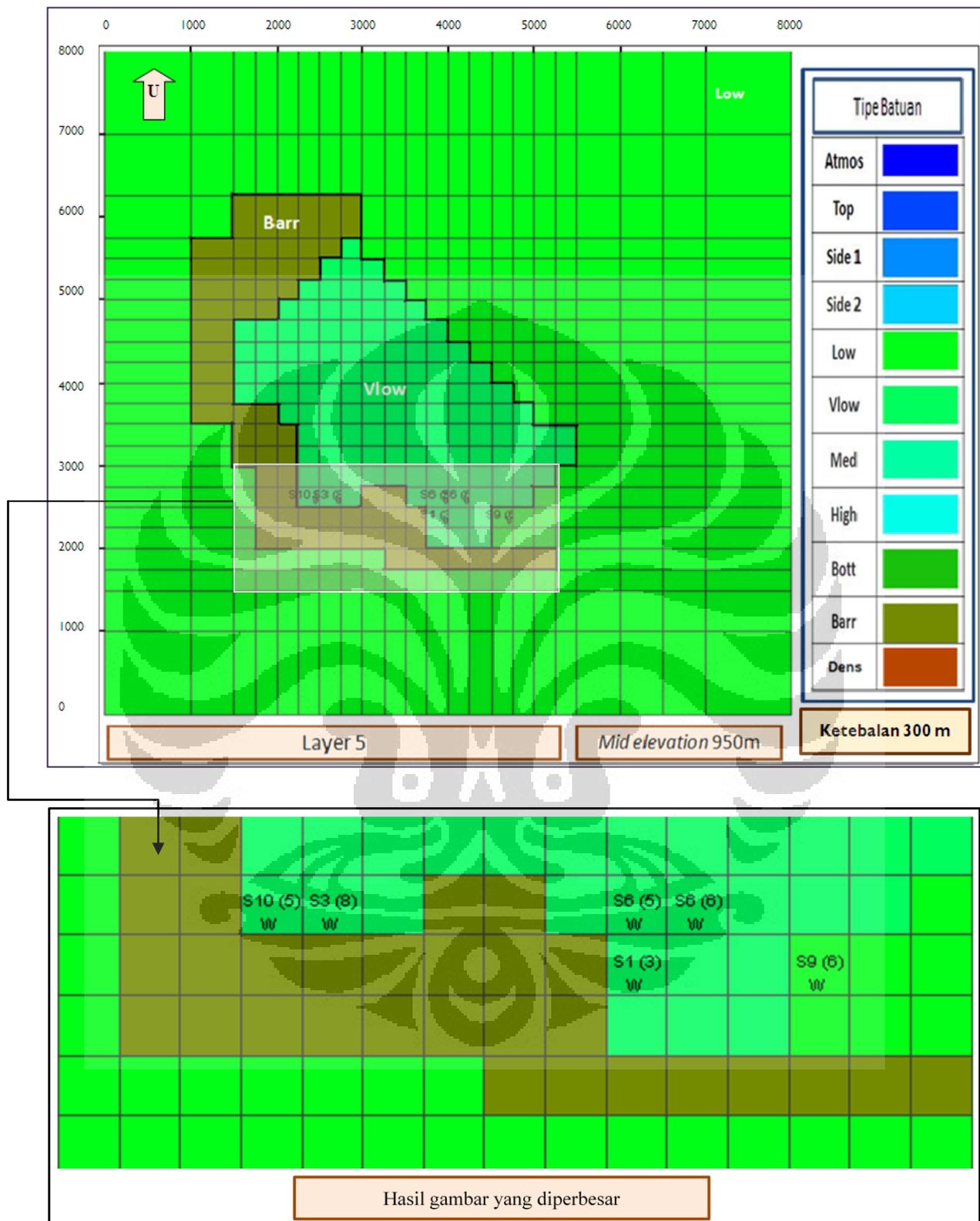
Lampiran 2 : Lapisan horizontal model simulasi pada layer 3



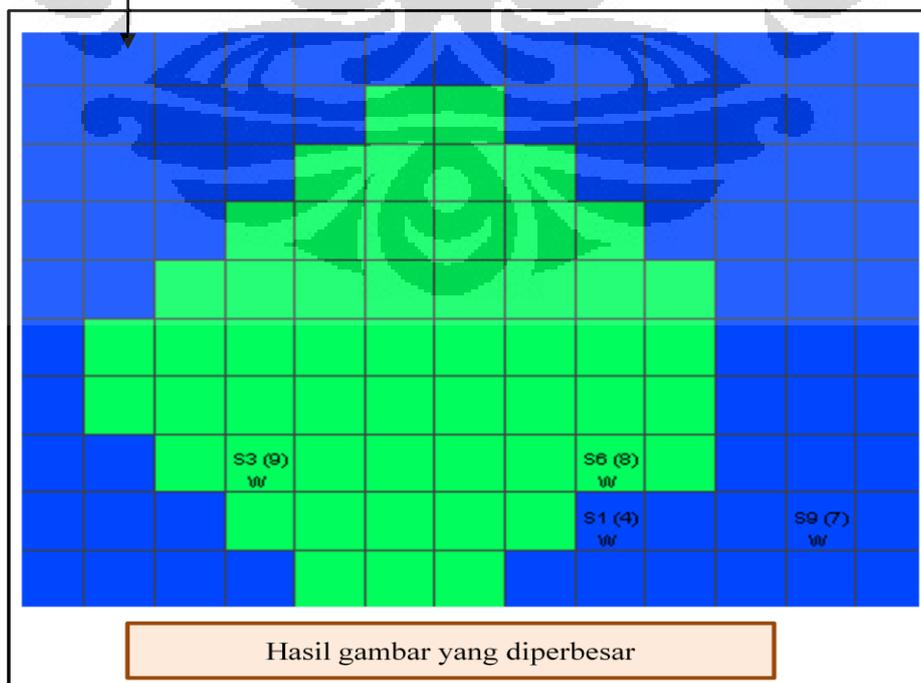
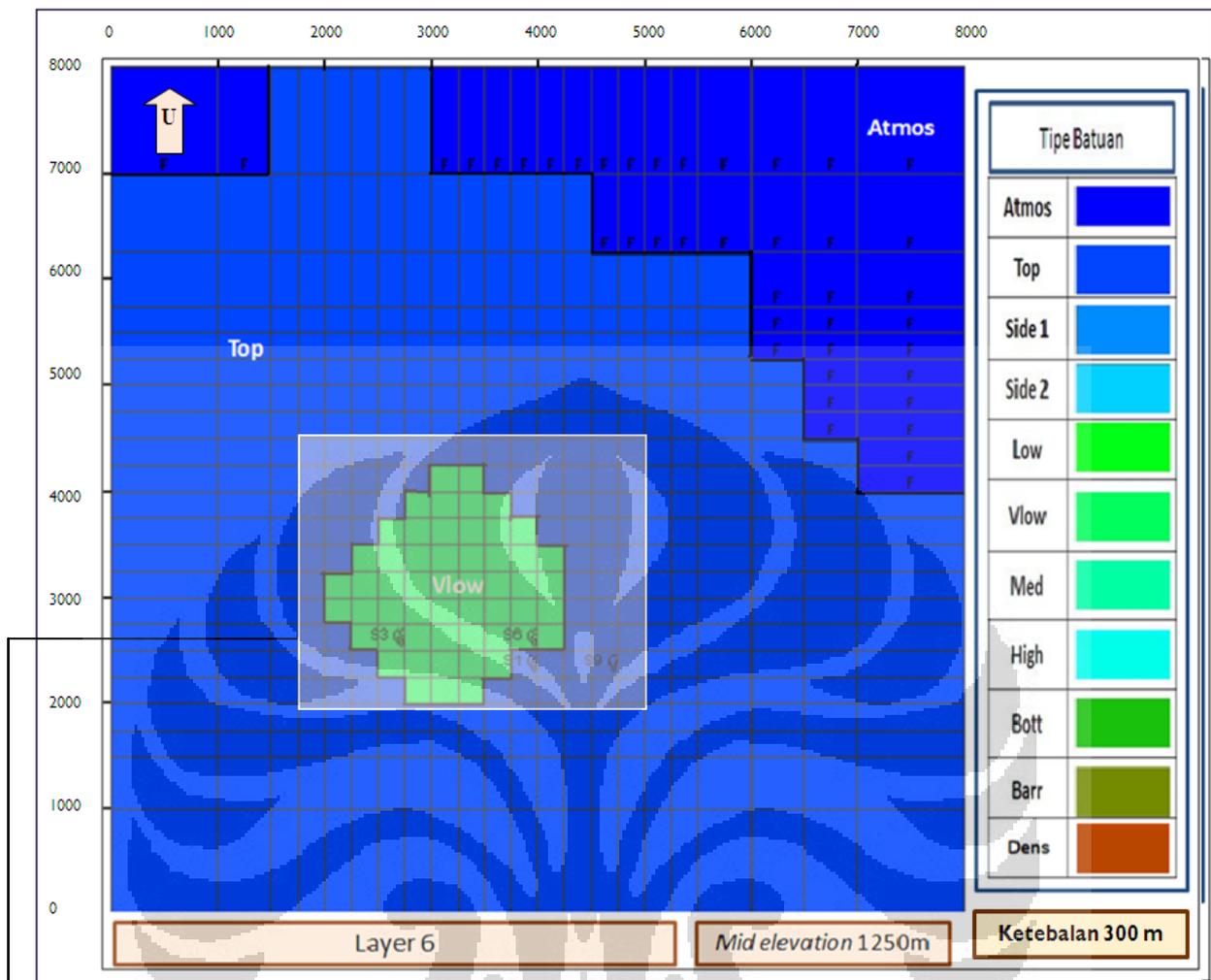
Lampiran 3 : Lapisan horizontal model simulasi pada layer 4



Lampiran 4 : Lapisan horizontal model simulasi pada layer 5



Lampiran 5 : Lapisan horizontal model simulasi pada layer 6



Lampiran 6 : Lapisan horizontal model simulasi pada layer 7

