

## Simulasi Aliran Konveksi Fluida Di Daerah Reservoir Panas Bumi

Alamta Singarimbun<sup>1</sup> dan Famelia Nurlela<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>KK Fisika Bumi dan Sistem Kompleks, Program Studi Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha 10 Bandung  
Email: [alamta@fi.itb.ac.id](mailto:alamta@fi.itb.ac.id)

### *Abstrak*

Potensi panas bumi dapat diketahui dengan melakukan klasifikasi potensi berdasarkan simulasi yang dilakukan. Hasil simulasi menunjukkan kualitas potensi panas bumi yang dapat dioptimalkan pemanfaatannya. Pada kondisi alami, sebuah sistem panas bumi terdiri dari sumber panas, lapisan batuan dasar, lapisan reservoir, dan lapisan batuan tudung. Proses perpindahan kalor terjadi secara konduksi ketika sebuah sumber panas mentransfer panasnya ke batuan dasar kemudian batuan dasar ini mentransfer panas secara konveksi ke reservoir. Proses transfer panas tersebut membuat temperatur di setiap kedalaman berbeda dan akan berubah seiring bertambahnya waktu. Simulasi numerik dan pemodelan 2-dimensional dilakukan untuk mensimulasikan sebaran temperatur fluida di reservoir panas bumi yang memenuhi persamaan aliran fluida pada medium berpori untuk aliran fasa tunggal (Hukum Darcy). Parameter-parameter yang diobservasi adalah distribusi temperatur, tekanan, dan arah aliran fluida dalam reservoir. Persamaan matematis didiskritisasi dengan menggunakan metode beda-hingga atau *finite difference*. Proses komputasi dilakukan dengan menggunakan piranti lunak Matlab.

*Kata kunci: entalpi, hukum Darcy, metode beda-hingga, temperatur, tekanan*

### *Abstract*

The potential of geothermal energy can be determined by the potential classification based on performed simulation. The simulation results show the quality of geothermal energy utilization can be optimized. Under natural conditions, a geothermal system consists of a heat source, the bedrock layer, reservoir layer, and cap rock layers. The process of conduction heat transfer occurs when a heat source to transfer heat to the bedrock and bedrock is heat transfer by convection to the reservoir. Heat transfer process makes the temperature at any depth is different and will change with time. Numerical simulation and modeling of two-dimensional sebaran done to simulate the fluid temperature in the geothermal reservoir which satisfy equations of fluid flow in a porous medium for single phase flow (Darcy's law). The observed parameters are the temperature distribution, pressure, and direction of fluid flow in a reservoir. Didiskritisasi mathematical equations using finite difference or difference-up. Computational process is done by using Matlab software.

*Keywords: Enthalpy, Darcy law, diff-up method, temperature, pressure*

## PENDAHULUAN

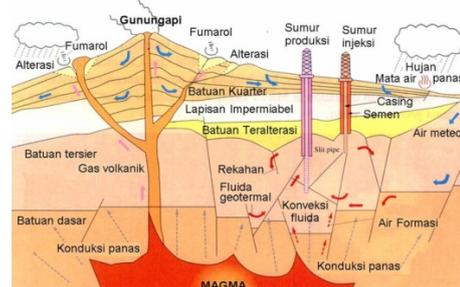
Secara geologis, Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Eropa-Asia, India-Australia, dan Pasifik yang berperan dalam proses pembentukan gunung api di Indonesia. Kondisi ini membuat Indonesia memiliki sumber daya panas bumi yang sangat potensial untuk menjadi sumber energi alternatif. Penyelidikan panas bumi bertujuan untuk mengetahui potensi panas bumi yang dimiliki suatu kawasan dengan melakukan klasifikasi potensi berdasarkan estimasi yang telah dilakukan. Untuk mengestimasi kandungan panas bumi dapat dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya mengestimasi kehilangan panas (*natural heat loss*) yang dilakukan pada awal eksplorasi, membandingkan dengan daerah panas bumi lain yang mempunyai kemiripan lapangan dan telah diketahui potensinya, mengestimasi energi panas yang terkandung dalam batuan maupun fluida, dan mengestimasi kandungan massa fluida dengan memperhitungkan energi panas yang terdapat dalam fluida. Dari hasil estimasi, maka akan diketahui kualitas potensi panas bumi tersebut sehingga dapat diketahui pemanfaatannya baik sebagai sumber energi listrik maupun pemakaian langsung. Estimasi tersebut dapat dimodelkan melalui perhitungan dan simulasi numerik.

## SISTEM PANAS BUMI

Struktur dalam bumi terdiri dari tiga lapisan utama, yakni inti bumi, mantel bumi, dan kulit bumi. Kulit bumi dan bagian atas selubung bumi terdiri dari lempeng-lempeng batu tipis dan kaku yang mengapung di atas atmosfer atau selubung bumi bagian tengah. Lempeng ini bergerak secara perlahan-lahan dan memisah atau saling mendorong. Lempeng-lempeng yang saling mendorong salah satunya akan menumpang ke bawah lempeng lainnya. Ujung lempeng batu tersebut akan meleleh dan memiliki temperatur yang tinggi karena panas di dalam atmosfer dan panas akibat

gesekan batuan. Proses tersebut merupakan suatu proses magmatisasi.

Material panas yang terdapat di bawah permukaan bumi menyebabkan terjadinya aliran panas dari sumber panas tersebut ke permukaan dan terjadinya perubahan temperatur dari bawah hingga permukaan. Sistem panas bumi merupakan perpindahan panas dari sumber panas ke sekeliling. Perpindahan panas terjadi secara konduksi (melalui batuan) dan konveksi. Pada perpindahan panas secara konveksi terdapat kontak antara sumber panas dengan air. Air memiliki kecenderungan untuk selalu bergerak ke bawah karena pengaruh gaya gravitasi. Jika air tersebut melakukan kontak dengan sumber panas maka temperatur air akan naik dan air akan menjadi lebih ringan. Air panas akan bergerak ke atas dan air yang lebih dingin akan bergerak ke bawah sehingga terjadi arus konveksi. Air panas tersebut tidak menjadi uap karena tidak bersentuhan langsung dengan udara.



Gambar1. Sistem Panas Bumi (<http://ibnudwibandono.files.wordpress.com>)

## PEMODELAN ALIRAN KONVEKSI PADA RESERVOIR

### Persamaan Kontinuitas Massa

Sistem kontinuitas massa menyatakan bahwa aliran yang masuk, aliran yang keluar dan perubahan dalam penyimpanan

$$(\nabla \cdot \rho v_d) = \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

(1)

massa dalam suatu sistem harus seimbang. Persamaan kontinuitas massa dapat direpresentasikan dengan

Dimana  $\rho$  = rapat massa fluida,  $\Phi$  = porositas,  $t$  = waktu, dan  $\vec{v}_d$  = vektor fluks massa fluida per satuan waktu.

Persamaan momentum untuk aliran fluida pada medium berpori ialah

$$\nabla P + \nabla \cdot \tilde{\tau} - \rho g = 0$$

(2)

Dimana  $P$  = tekanan fluida,  $\tilde{\tau}$  = tensor deviator tekanan. Persamaan diatas diperoleh dari persamaan

momentum untuk sistem fluida homogen

dengan mengabaikan gaya inersia  $\left( \rho \frac{DV}{Dt} \right)$

yang nilainya sangat kecil bila dibandingkan dengan  $(\nabla \cdot \tilde{\tau})$  untuk aliran berlapis di dalam media berpori. Dengan menggabungkan observasi empiris dari Darcy (1856) pada media isotropik yang memiliki kesamaan dengan tipe aliran Poiseuille pada tabung berdiameter kecil dan persamaan momentum untuk aliran fluida pada medium berpori maka diperoleh

$$v_d = -\frac{k}{\mu} z(\nabla P - \rho g)$$

(3)

Persamaan ini disebut juga dengan hukum Darcy pada media berpori yang isotropik. Dengan mengkombinasikan persamaan kontinuitas dan momentum maka akan diperoleh persamaan aliran

$$\nabla \cdot \rho \left[ \frac{k}{\mu(\nabla P - \rho g)} \right] = \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

(4)

Persamaan aliran untuk fluida yang sedikit kompresibel seperti air lebih baik diselesaikan pada ranah tekanan dibandingkan dengan kepadatan, maka bagian kanan dari persamaan diuraikan menjadi

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} = \rho \frac{\partial \beta}{\partial P}$$

(5)

Dimana  $\kappa$  merupakan kompresibilitas fluida,  $\beta$  ialah ekspansivitas termal fluida sedangkan  $\alpha$  ialah kompresibilitas vertikal dari media berpori.

Mengikuti penelitian Remson, Hornberger, dan Molz (1971), diasumsikan bahwa kecepatan dari partikel-partikel solid dapat diabaikan dan perubahan bentuk atau deformasi dari matriks padatan hanya ada pada arah vertikal. Selanjutnya, hubungan ekspansivitas termal  $\phi\beta \frac{\partial T}{\partial t}$  dapat dihilangkan karena sangat kecil nilainya bila dibandingkan dengan besaran kompresibilitas  $(\rho\alpha + \phi\rho\kappa) \frac{\partial P}{\partial t}$  yang memberikan perbedaan besar pada respon waktu antara sistem termal dan hidrolis, yaitu  $\frac{\partial T}{\partial t} \ll \frac{\partial P}{\partial t}$ . Sehingga ekspansivitas termal tersebut dapat diabaikan dalam persamaan (5) dan persamaan aliran dapat ditulis menjadi

$$\nabla \cdot \rho \left[ \frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho g) \right] = C \frac{\partial P}{\partial t}$$

(6)

Dengan  $C = \rho(\phi\kappa + \alpha)$  merupakan koefisien kompresibilitas. Sorey (1978)

#### Persamaan Aliran Energi

Persamaan aliran energi untuk transfer panas pada media berpori yang isotropik dalam keadaan sederhana dapat dinyatakan sebagai berikut

$$(\rho c)_m \frac{\partial P}{\partial t} + (\rho c)_f v \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T) + q_m'''$$

(7)

Dimana  $(\rho c)_m$ ,  $k_m$  dan  $q_m'''$  masing-masing adalah kapasitas total kalor, total konduktivitas termal, dan kalor konduksi per unit volume secara keseluruhan dari media berpori. Masing-masing didefinisikan sebagai berikut

$$(\rho c)_m = (1 - \Gamma)(\rho c)_s$$

$$(8) \quad k_m = (1 - \Phi)k_s$$

(9)

$$q_m''' = (1 - \Phi)q_s'''$$

(10)

Hubungan pada sisi sebelah kanan merupakan persamaan yang menggambarkan perpindahan panas secara konduksi sekaligus konveksi akibat adanya gerakan fluida. Pergerakan fluida yang diakibatkan oleh arus konveksi kembali dirumuskan dengan hukum Darcy.

**Diskritisasi Dengan Metode Beda Hingga**

Untuk menyelesaikan persamaan-persamaan matematis diatas dan dituangkan kedalam bentuk komputasi 2-dimensi dibutuhkan metoda pendekatan solusi persamaan diferensial parsial yang didekati dengan kombinasi linear dari nilai-nilai fungsi pada titik-titik grid atau blok-blok tinjauan yang berinterval tertentu yang disebut metoda beda hingga (*finite difference*).

i. Diskritisasi Persamaan Kontinuitas Massa

Persamaan kontinuitas massa memerlukan penyesuaian sebelum dapat diaproksimasi dengan menggunakan metoda beda hingga, diantaranya ialah

1. Integral terhadap volum blok

$$\int \nabla \cdot \rho \left[ \frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho \vec{g}) \right] dV = \int C \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

massa

2. Bagian kiri persamaan diintegrasikan terhadap blok area massa untuk menghilangkan

$$\oint_{area} \left[ \rho \frac{k}{\mu} \nabla P - \frac{k}{\mu} \rho^2 \vec{g} \right] \cdot d\vec{A} = \int_{volum} C \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

hubungan fluks

Setelah terbentuk persamaan (12) diatas, metoda beda-hingga differensial maju dan mundur diaplikasikan. Dengan asumsi bahwa integral permukaan pada bagian kiri persamaan  $d\vec{A}$  dan integral volum  $dV$  pada bagian kanan persamaan ialah konstan, maka

$$\frac{k}{\mu} \sum_m \left( \rho_{n,m} \frac{P_m - P_n}{d} A - \rho_{n,m}^2 g \eta A \right) = C \frac{\Delta P_n}{\Delta t} Vol_n$$

(13)

Bobot dari densitas  $\rho_{n,m}$  diambil secara rata-rata dengan interpolasi linear dan dengan memindahkan luasan  $A$  ke ruas kanan,  $Vol_n/A = d$ , sehingga diskritisasi persamaan kontinuitas massa dapat ditulis sebagai berikut

$$\frac{k}{\mu} \sum_m \left( \rho_{n,m} \frac{P_m - P_n}{d} - \rho_{n,m}^2 g \eta \right) = C \frac{\Delta P_n}{\Delta t} d$$

(14)

ii. Diskritisasi Persamaan Aliran Energi

Langkah pertama dalam melakukan diskritisasi persamaan aliran energi ialah dengan mengaplikasikan faktor identitas terhadap persamaan aliran energi itu. Selanjutnya langkah-langkah dalam mendiskritisasi persamaan aliran energi ini sama halnya dengan saat melakukan

diskritisasi persamaan kontinuitas massa, yaitu dengan melakukan integral terhadap volum blok energi dan dengan mengaplikasikan teorema divergensi

(11)

terhadap persamaan diatas, sehingga bentuk persamaan tersebut menjadi

$$\int \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int (K_m \nabla T) \cdot d\vec{A} - \int (\rho \vec{v}_d c T) \cdot d\vec{A} + \int T_n \rho \vec{v}_d c \cdot d\vec{A}$$

(15)

Setelah diintegrasikan terhadap volum dan luas blok energinya, persamaan tersebut menjadi

$$\overline{\rho c} \frac{\Delta T_n}{\Delta t} Vol_n = \sum_m \left[ \left( K_m \nabla T \right) \cdot \overline{A}_{n,m} - \left( \overline{\rho} \overline{v}_d c T \right) \cdot \overline{A}_{n,m} + T_n \left( \overline{\rho} \overline{v}_d c \right)_{n,m} \cdot \overline{A}_{n,m} \right] \tag{16}$$

$K_m$ ,  $c$ , dan  $\overline{\rho c}$  diasumsikan konstan atau tidak berubah terhadap temperatur dan tekanan, sehingga bila dilakukan diskritisasi diferensial maju dan mundur, persamaan menjadi

$$\overline{\rho c} \frac{\Delta T_n}{\Delta t} Vol_n = \sum_m \left[ K_m \frac{T_m - T_n}{d} A - \rho_{n,m} \overline{v}_{d,n,m} \cdot \overline{A}_{n,m} c T_{n,m} + T_n \rho_{n,m} \overline{v}_{d,n,m} \cdot \overline{A}_{n,m} c \right] \tag{17}$$

Dengan  $\overline{v}_{d,n,m} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho_{n,m} \overline{g})$  dimana bobot dari densitas  $\rho_{n,m}$  dan temperatur pada pertemuan dua blok energi  $T_{n,m}$  ditentukan dengan interpolasi linier maka diskritisasi persamaan aliran energi

$$\overline{\rho c} \frac{\Delta T_n}{\Delta t} d = \sum_m \left[ K_m \frac{T_m - T_n}{d} + \frac{k}{\mu} \rho_{n,m} c \times \frac{P_m - P_n}{d} \left( \frac{T_m - T_n}{2} \right) \right] \tag{18}$$

### Geometri dan Syarat Batas Model Aliran Konveksi Fluida Dalam Reservoir

Dalam pemodelan ini, dideskripsikan sebuah lapisan akuifer yang berisi fluida air dengan temperatur awal 100 °C sedangkan bagian dasar reservoir berupa batuan panas dengan temperatur 500 °C yang mentransfer panasnya secara konduksi dan konveksi ke dalam reservoir yang berisi air. Pada keadaan awal ini, diasumsikan tidak terdapat fluida yang keluar ataupun mengalami penambahan fluida dari luar pada reservoir.

Reservoir tersebut berada 500 meter di bawah permukaan tanah dengan lebar 1200 meter dan tebal 400 meter serta grid pemodelan berukuran 20x20 m<sup>2</sup>. Dinding-dinding reservoir ini dianggap impermeable. Temperatur awal bagian bawah reservoir yang merupakan formasi batu panas memiliki temperatur 500°C. Sedangkan daerah bagian atas reservoir bertemperatur 100°C dengan tekanan awal yang dimiliki sebesar 80 bar. Fluida pada reservoir ini bersifat homogen dengan

karakteristik porositas sebesar 10% dan densitas sebesar 910kg/m<sup>3</sup>.

Adapun parameter/variabel fisis lainnya yang digunakan pada pemodelan ini diantaranya ialah

Tabel1. Nilai Parameter/Variabel Fisis

Parameter/Variabel Fisis	Nilai	Satuan
Kompresibilitas vertikal media berpori	4 X 10 <sup>-11</sup>	m s <sup>2</sup> /kg
Kompresibilitas fluida	4,5 X 10 <sup>-9</sup>	m s <sup>2</sup> /kg
Konduktifitas termal batuan	1,7	kg m/s <sup>3</sup> °C
Permeabilitas intrinsik	1 X 10 <sup>-14</sup>	m <sup>2</sup>
Panas spesifik batuan	800	m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup> °C
Ekspansivitas termal fluida	5 x 10 <sup>-4</sup>	°C <sup>-1</sup>
Viskositas dinamik fluida	0.0004	kg/m s
Kecepatan gravitasi	9,8	m/s <sup>2</sup>
Panas spesifik fluida	3500	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> °C
Densitas batuan	3000	kg/m <sup>3</sup>

Pada model reservoir dengan gangguan, sistem reservoir dengan keadaan yang sama seperti pada model pertama diganggu dengan adanya aliran fluida bersuhu rendah dengan porositas tinggi dan permeabilitas yang tinggi pula. Dengan demikian kecepatan aliran fluida ini lebih tinggi dari kecepatan di dalam reservoir.

Eksekusi kedua model reservoir ini akan menghasilkan distribusi temperatur maupun tekanan reservoir, dan juga kontur temperatur dan arah aliran fluida yang terjadi di dalam reservoir yang solusinya diselesaikan secara eksplisit dengan menggunakan MATLAB.

### Hasil pEMODELAN DAN PEMBAHASAN

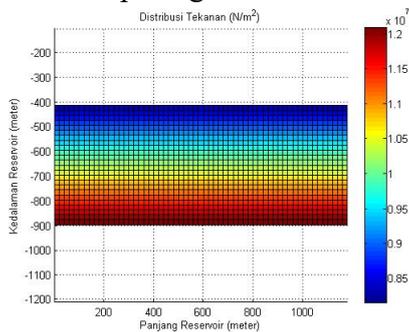
#### Hasil Pemodelan Konveksi Fluida Alami Pada Reservoir

Pemodelan pertama yang dilakukan adalah pemodelan konveksi fluida secara

alami pada reservoir. Pada pemodelan ini, reservoir terbentuk dari suatu proses alami yang kemudian diberi dua titik panas. Titik panas tersebut untuk memicu kenaikan temperatur secara signifikan sehingga dapat memicu munculnya arus konveksi. Hasil pemodelan yang didapat ialah berupa distribusi tekanan, distribusi temperatur terhadap waktu, dan arah aliran fluida.

i. Distribusi Tekanan

Hasil pemodelan distribusi tekanan diperlihatkan pada gambar 2.



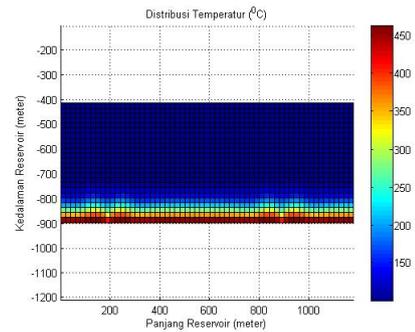
Gambar2. Distribusi Tekanan terhadap Kedalaman Tahun ke-1500

Hasil pemodelan distribusi tekanan menunjukkan bahwa distribusi tekanan tidak ada perubahan seiring dengan penambahan waktu. Hal ini dikarenakan pada awal pemodelan ini ditetapkan tidak adanya pengurangan ataupun penambahan massa dan energi pada reservoir. Sehingga distribusi tekanan tersebut merupakan distribusi tekanan hidrostatik. Nilai tekanan reservoir juga bergantung pada densitas batuan dan kedalaman.

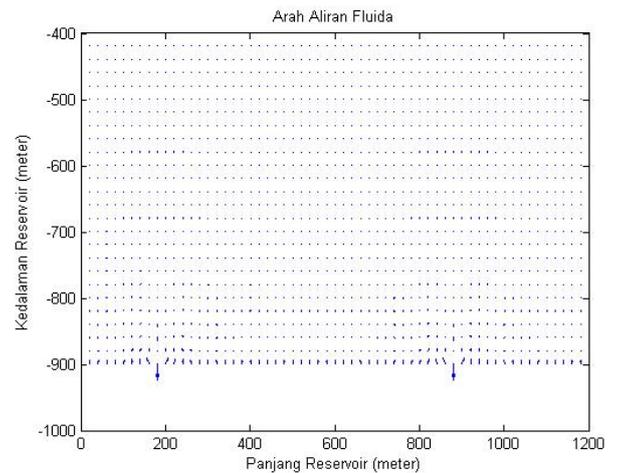
ii. Distribusi Temperatur

Hasil pemodelan memperlihatkan distribusi temperatur reservoir yang diberi dua titik panas yang berada pada titik (1,10) dan (1,45).

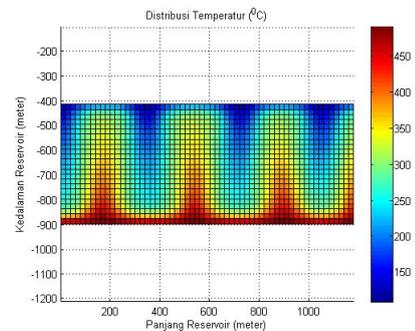
Pada tahun pertama belum ada aktivitas perpindahan kalor yang berarti. Pada tahun ke-100 sudah terlihat perpindahan panas dari dasar reservoir dan mulai terbentuk aliran konveksi.



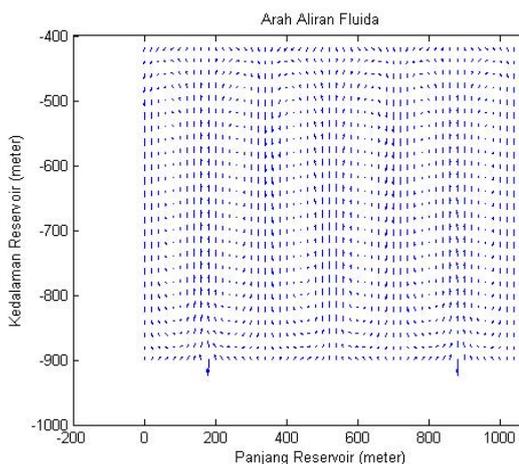
Gambar3. Distribusi Temperatur terhadap Kedalaman Tahun ke-100



Gambar4. Arah Aliran Fluida Tahun ke-100



Gambar5. Distribusi Temperatur terhadap Kedalaman Tahun ke-1500



Gambar6. Arah Aliran Fluida Tahun ke-1500

Pada tahun ke-1500 pemodelan distribusi temperatur telah konvergen dimana perubahan temperatur sangat kecil terhadap waktu. Model distribusi temperatur yang telah konvergen dianggap sudah dapat dieksploitasi. Arah pergerakan fluida pada distribusi temperatur konvergen (tahun ke-1500) menunjukkan terdapat 7 buah arus konveksi.

Panas yang merambat melalui fluida membentuk transfer panas berupa arus konveksi. Fluida dengan temperatur rendah atau fluida dingin akan memiliki kecenderungan bergerak ke bawah mendekati dasar reservoir karena massanya yang lebih berat dan pengaruh dari gaya gravitasi. Ketika mencapai dasar reservoir fluida tersebut terpanaskan. Fluida dengan temperatur tinggi atau fluida panas akan bergerak ke atas karena massanya yang lebih ringan. Pergerakan fluida panas dan fluida dingin membentuk suatu sirkulasi fluida atau arus konveksi.

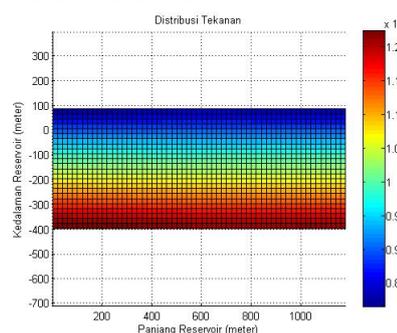
**Hasil Pemodelan Konveksi Fluida Dengan Gangguan**

Distribusi parameter fisis termodinamika yang dihasilkan oleh pemodelan arus konveksi pada tahun ke-1500 menjadi kondisi awal bagi pemodelan konveksi dengan gangguan. Gangguan yang diberikan ialah berupa fluida dengan suhu

yang lebih rendah pada kedalaman 600 meter dari permukaan.

**i. Distribusi Tekanan**

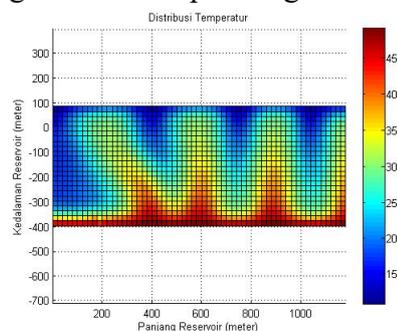
Hasil pemodelan distribusi tekanan dengan gangguan ditunjukkan pada gambar7. hasil pemodelan distribusi tekanan memperlihatkan bahwa tidak ada perubahan seiring dengan waktu meskipun telah diberi gangguan. Hal ini dikarenakan tidak adanya pengurangan massa dari reservoir.



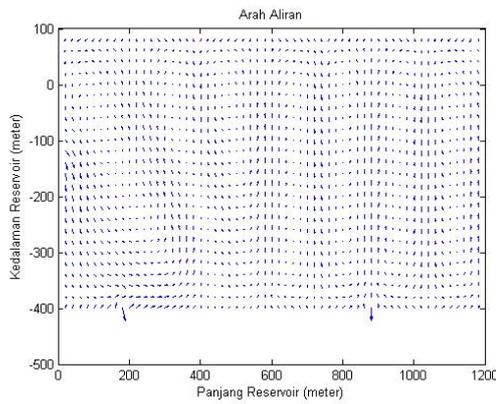
Gambar7. Distribusi Tekanan terhadap Kedalaman dengan Gangguan

**ii. Distribusi Temperatur**

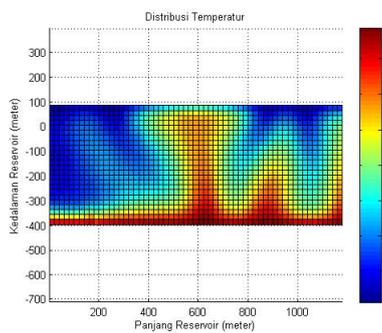
Hasil pemodelan distribusi temperatur dengan gangguan terdapat pada gambar8. sampai dengan



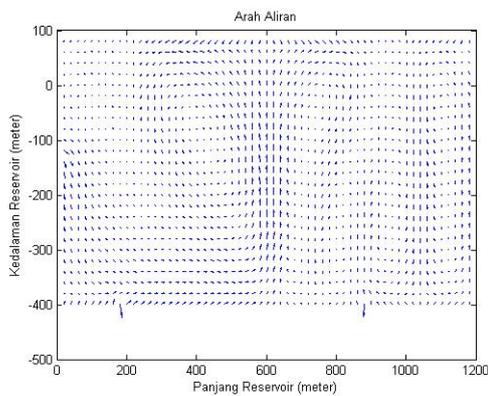
Gambar8. Distribusi Temperatur terhadap Kedalaman dengan Gangguan Tahun ke-500



**Gambar9.** Arah Aliran Fluida dengan Gangguan Tahun ke-500



**Gambar10.** Distribusi Temperatur terhadap Kedalaman dengan Gangguan Tahun ke-1000



**Gambar11.** Arah Aliran Fluida dengan Gangguan Tahun ke-1000

Gangguan berupa fluida dengan temperatur lebih rendah diberikan pada kedalaman 600 meter dari permukaan hanya memberikan sedikit pengaruh pada distribusi temperatur pada tahun ke-50. Pada distribusi temperatur tahun ke-500 mulai terlihat secara jelas adanya pengaruh dari gangguan fluida tersebut. Pola

perambatan panas secara konveksinya bergeser ke kanan. Aliran panas tersubstitusi oleh aliran fluida dari gangguan sehingga pada bagian kiri model terisi oleh fluida yang bersuhu rendah dikarenakan kecepatan dan tekanan fluida dari sumber gangguan lebih besar bila dibandingkan dari reservoir. Pada distribusi temperatur tahun ke-1000 fluida dengan suhu tinggi mencapai lapisan atas reservoir. Arah pergerakan fluida pada distribusi temperatur tahun ke-1000 memperlihatkan adanya 3 arus konveksi.

**Kesimpulan**

Model reservoir mencapai keadaan konvergen pada tahun ke-1500 dan memiliki tujuh buah arus konveksi. Distribusi tekanan pada model reservoir ini tidak berubah, hal ini dikarenakan asumsi awal yang digunakan dalam pemodelan menggunakan persamaan kontinuitas massa/kekekalan massa.

Untuk model reservoir yang diberi gangguan, terjadi perubahan pola konveksi yakni terjadi pergeseran ke kanan dikarenakan kecepatan dan tekanan fluida dari sumber gangguan lebih besar sehingga pada bagian kiri terisi oleh fluida bersuhu rendah. Sedangkan fluida dengan suhu tinggi tergeser dan bergerak menuju lapisan atas reservoir. Arah pergerakan fluida pada distribusi temperatur tahun ke-1000 memperlihatkan adanya 3 arus konveksi. Walaupun telah diberi gangguan, distribusi tekanan tidak mengalami perubahan setiap waktunya karena tidak adanya pengurangan massa dari reservoir.

**References**

- [1] Katz, D. L., and Lee, R. L., 1990, *Natural Gas Engineering*, Singapore, McGraw-Hill Inc, pp.468-475.
- [2] Remson, I., Hornberger, G. M., and Molz, F. J., 1971, *Numerical methods in subsurface hydrology*: New York, Wiley-Interscience, 389 p.
- [3] Sorey, M. L., 1978, *Numerical Modeling of Liquid geothermal Systems*, Washington, U.S. Government Printing Office.
- [4] Bear, J., 1972, *Dynamics of fluids in porous media*: New York, American Elsevier Pub., 764 p.
- [5] Saptadji, N. M. 2001. *Teknik Panas Bumi (Diktat Kuliah)*. Bandung - Institut Teknologi Bandung.
- [6] Goff, F. and Cathy J.J., *Encyclopedia of Volcanoes: Geothermal system*, Academic Press, 2000,817-834 pp.
- [7] Marini, Luigi., *Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy*, Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Universita degli Studi di Genova, Italy, 2001
- [8] [http://2.bp.blogspot.com/\\_aWO6Wqwwzx4/SwyD7qyxLU/AAAAAAAAAAc/GBff-9xAPFg/s1600/bumi\\_struktur.jpg](http://2.bp.blogspot.com/_aWO6Wqwwzx4/SwyD7qyxLU/AAAAAAAAAAc/GBff-9xAPFg/s1600/bumi_struktur.jpg) (diakses tanggal 2 Sep 2011)