

MODEL NUMERIKAL *RESERVOIR* SISTEM PANASBUMI PADA DAERAH TOPOGRAFI RELATIF DATAR UNTUK Mencari KONDISI *NATURAL STATE* DAN Menganalisa SENSITIVITAS PANAS PADA *RESERVOIR* MENGGUNAKAN *SOFTWARE TOUGH2*

Frans Richard K., H. Suharsono, Damar Nandiwardhana
UPN "Veteran" Yogyakarta Jln SWK Ring Road Utara Condong Catur 55283,
e-mail : frkodong@gmail.com

Abstrak

Telah dilakukan pemodelan *reservoir* menggunakan software *Tough2* dengan data sintetik, berupa data permeabilitas dan porositas. Dimana terdiri dari 4 lapisan, yaitu lapisan *overburden*, lapisan *clay caps*, lapisan *recharge area* + lapisan *reservoir* (berada pada lapisan yang sama), dan lapisan *basement* dengan tujuan untuk menganalisa sensitivitas panas, serta untuk mencari kondisi *natural state* (*natural state* merupakan kondisi setimbang, yaitu dimana kondisi tekanan, temperatur dan kondisi *reservoir*-nya tidak berubah terhadap waktu). Dari hasil pemodelan *reservoir* oleh *Tough2* didapat bahwa kondisi *natural state* selama $2,20857E+4$ tahun, dimana terjadi penurunan suhu dari kondisi *natural state* tanpa sumur produksi berbanding kondisi *natural state* dengan sumur produksi, dimana suhu pada saat kondisi *natural state* tanpa sumur produksi sebesar $245^{\circ}C$ dan suhu pada saat kondisi *natural state* dengan sumur produksi sebesar $235^{\circ}C$ pada kedalaman 1350 m. Sedangkan untuk penggunaan rate 20 kg/s, 25 kg/s, 30 kg/s dan 35 kg/s untuk melihat sensitivitas heat nya, didapatkan bahwa semakin besar nilai rate yang dipakai dalam suatu sumur produksi, maka akan menurunnya nilai temperatur di sumur produksi tersebut.

Kata Kunci : *Natural state*, *Initial condition*, *Tough2*, *Reservoir*

1. PENDAHULUAN

Meskipun merupakan sumber energi yang terbarukan, masa produktif dari suatu lapangan panasbumi bukannya tidak terbatas dan tanpa masalah. Masalah yang umum dijumpai dalam pengelolaan lapangan panasbumi adalah penurunan tekanan uap dan penurunan temperatur *reservoir*. Pada akhirnya, produktivitas dari lapangan panasbumi tersebut sangat ditentukan oleh strategi pengelolaan lapangan panasbumi itu sendiri. Salah satu unsur penting dalam pengelolaan tersebut adalah pengetahuan tentang sistem *reservoir* panasbumi yang diperoleh melalui pemodelan. Secara umum, tujuan pemodelan dalam bidang panasbumi terdiri dari dua hal. (Axelsson dan Stefansson, 2002). Pertama, untuk memperoleh informasi tentang sistem *reservoir* suatu lapangan panasbumi, yang meliputi parameter-parameter fisik seperti: permeabilitas, dispersivitas, *mass recovery* dan sebagainya. Informasi ini diperoleh melalui *inverse modeling*. Kedua, untuk memperoleh prediksi mengenai respon sistem *reservoir* panasbumi terhadap produksi uap/ fluida panasbumi di masa depan, sehingga dapat dilakukan berbagai skenario manajemen lapangan panasbumi untuk mencapai pengoperasiannya yang optimal. Pemodelan ini dilakukan disebut juga *forward modeling*. Salah satu penyuplai informasi yang dibutuhkan sebagai input pemodelan sistem *reservoir* panasbumi dapat diperoleh melalui tes perunut (*tracer test*). Informasi langsung yang dihasilkan melalui tes perunut ini secara kualitatif berupa interkoneksi antara sumur reinjeksi dan sumur produksi, dan secara kuantitatif berupa informasi waktu terobosan (*breakthrough time*). Sedangkan informasi tidak langsung yang dapat diperoleh adalah karakter *reservoir* panasbumi secara *in situ*. Simulator *Tough2* adalah simulator yang digunakan untuk membuat pemodelan *reservoir* panasbumi. *Tough2* merupakan simulator *reservoir* panasbumi yang banyak digunakan secara luas baik oleh perusahaan, konsultan maupun untuk kepentingan studi. Dengan banyaknya pemakai *Tough2* menandakan bahwa simulator ini cukup handal untuk pemodelan *reservoir*, disamping harganya yang relatif murah. Kelebihan lain dari *Tough2* adalah dapat diatur sesuai dengan keinginan pengguna karena developer *Tough2* hanya menyediakan kode program tidak dalam bentuk *file executable*. *Output* dari Simulator *Tough2* berupa porositas, permeabilitas, tekanan, temperatur, saturasi, kandungan gas CO_2 , enthalpi dan massa di tiap-tiap grid. (Nenny dan Ali, 2012).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Panasbumi

Panasbumi merupakan energi yang berasal dari dalam bumi, dimana proses terjadinya karena adanya interaksi dari fluida meteorik ataupun fluida formasi (fluida meteorik – fluida yang berasal dari air hujan yang kemudian masuk ke bawah permukaan melalui rekahan-rekahan dan fluida formasi – fluida yang berasal dari formasi batuan) dengan magma (biasanya magma yang sudah membeku tetapi masih memiliki panas (magma plutonik/magma dari gunungapi purba)). Kata panasbumi secara literatur berarti "bumi" dan "panas". Untuk

mendefinisikan apa yang dimaksud panasbumi maka perlu kita ketahui terlebih dahulu jenis-jenis sumber daya panasbumi yang ada hingga saat ini yaitu hidrotermal, *geopressured*, *hot dry rock*, magma, dan energi bumi. (DiPippo, R, (2007)).

a) Sumber Daya Hidrotermal

Adalah *reservoir* yang mengandung uap atau air panas yang terbentuk karena masuknya air ke dalam bumi, terakumulasi dan kemudian terpanaskan oleh *hot rock* yang *fractured* atau yang *porous*. *Reservoir* ini kemudian dicapai dengan membuat sumur bor untuk mengirim air panas atau uap ke permukaan yang kemudian digunakan langsung maupun untuk menghasilkan listrik. Sumber daya ini keberadaannya sangat melimpah di seluruh dunia.

b) Sumber Daya *Geopressured*

Adalah air yang tertimbun sangat dalam, bertemperatur sedang, dan mengandung gas metan terlarut. Meskipun sudah ada teknologi yang dapat mengeksplorasi sumber daya ini namun secara ekonomi kurang bersaing. Di Amerika Serikat sumber daya ini memiliki *base* di *Gulf coast* yang merupakan bagian dari Texas dan Louisiana.

c) Sumber Daya *Hot Dry Rock*

Berada di kedalaman 5 – 10 mil (8 – 16 kilometer) dimanapun di bawah permukaan bumi, di beberapa tempat terkadang berada di kedalaman lebih dangkal. Untuk mengakses sumber daya ini dilakukan dengan menginjeksi air ke *subsurface* melalui sumur, mengalirkan air tersebut melalui rekahan pada *hot rock* kemudian mengeluarkan air yang sudah terpanaskan tadi melalui sumur yang lain.

d) Sumber Daya Magma (batuan yang melebur)

Menjanjikan sumber daya panasbumi dengan suhu sangat tinggi, namun teknologi yang sudah ada saat ini tidak dapat mengatasi panas dari sumber daya ini.

e) Sumber Daya Energi Bumi

Adalah panas yang terkandung dalam tanah dan batuan pada kedalaman dangkal. Sumber daya ini diakses dengan teknologi *panasbumi heat pumps* (DiPippo, R, (2007)).

2.2. *Reservoir* Panas Bumi

Reservoir panas bumi bisa saja dikelilingi oleh lapisan batuan yang memiliki permeabilitas sangat kecil (*impermeable*). Lapisan ini dikenal sebagai lapisan penudung atau *cap rock*. Batuan penudung ini umumnya terdiri dari mineral-mineral lempung yang mampu mengikat air namun sulit meloloskannya (*swelling*). Mineral-mineral lempung ini mengandung ikatan-ikatan hidroksil dan ion-ion seperti Ka dan Ca sehingga menyebabkan lapisan tersebut menjadi sangat konduktif. Sifat konduktif dari lapisan ini bisa dideteksi dengan melakukan survei magneto-tellurik (MT) sehingga posisi lapisan konduktif ini di bawah permukaan dapat terpetakan. Dengan mengetahui posisi dari lapisan konduktif ini, maka posisi *reservoir* dapat diperkirakan, karena *reservoir* panas bumi biasanya berada di bawah lapisan konduktif ini. (<http://irsamukhti.blogspot.com/2012/07/pengertian-dan-komponen-sistem-panas.html>).

2.3. *Caps Rock*

Caps rock atau batu penudung merupakan batuan yang biasa memiliki sifat *impermeable* dan memiliki rongga atau pori yang buruk, sehingga batu ini dapat menahan laju fluida yang melaluinya. Dalam panasbumi sendiri, batu *caps rock* dapat berupa (*cap rock/clay cap*), dimana biasanya *cap rock*nya di sini berupa batuan andesit atau batuan basalt yang merupakan batuan beku vulkanik, dimana terbentuknya tergantung dari sifat asam/basa magma asal batuan tersebut dan juga bisa karena proses alterasi. Sedangkan untuk *clay cap*, merupakan batuan ubahan alterasi argillik, dengan tingkat *impermeable* yang lebih besar dari *cap rock* biasa. Hal ini dikarenakan ukuran butir batulempung yang sangat kecil $< 1/256$, sehingga material lempung itu yang menutup pori-pori antar butir, sehingga menyebabkan lapisan *impermeable*. (<http://hasantoshare.wordpress.com/2012/04/02/panasbumi-alterasi/>).

2.4. Konsep Dasar Model Simulasi

- Model Sistem

Model merupakan suatu rekayasa sistem untuk menentukan penggambaran optimal tentang suatu obyek tertentu. Secara sederhana model adalah contoh, yaitu sesuatu yang mewakili atau menggambarkan yang dicontoh. Jadi model meliputi contoh sederhana dari sistem dan menyerupai sifat-sifat sistem yang dipertimbangkan, tetapi tidak sama dengan sistem. Model dikembangkan dengan tujuan untuk studi tingkah-laku sistem melalui analisis rinci tentang komponen sistem dengan interaksi antara satu dengan yang lain.

- Pemodelan dan Simulasi Komputer

Studi informatika yang mendukung simulasi komputer, antara lain : pemodelan dan simulasi, teori sistem, rekayasa perangkat lunak dan grafik animasi komputer.

- Model Numerik

Dalam problem-problem teknik, rekayasa ataupun perancangan, pada umumnya dapat diselesaikan atau dicari solusinya secara numerik, karena 'model matematik yang dimiliki diubah terlebih dahulu menjadi 'model numerik':

Dalam *software Tough2* diskretisasi space dibuat langsung dari dasar persamaan kesetimbangan, tanpa dikonversikan terlebih dahulu ke dalam persamaan diferensial. Metode *integral finite difference* tidak tergantung posisi dalam sistem koordinat secara global, kelebihan lainnya dapat diaplikasikan pada diskretisasi regular dan irregular dalam 1, 2, atau 3 dimensi. Metode ini juga memungkinkan menyederhanakan pemrosesan data geometrik, untuk mengimplementasikan dual ataupun multiple porosity pada media fracture, seperti pada metode *higher order differencing*. Untuk sistem yang regular, mengacu pada sistem koordinat global, metode *integral finite difference* memberikan hasil yang sama dengan metode *finite difference* konvensional. Sedangkan time didiskretkan secara *fully implicit*. Metode *upstream weighting* untuk flux pada interface digunakan untuk mencegah ketidakpraktisan batasan *time step* pada masalah aliran yang menyangkut keberadaan fasa dan untuk mencapai *unconditional stability*.

Diskretisasi menghasilkan persamaan-persamaan aljabar non linear. Semua ini diselesaikan secara simultan, dengan menggunakan iterasi Newton-Raphson. *Time step* secara otomatis dapat diatur (dinaikkan atau diturunkan) selama simulasi berlangsung, tergantung pada proses menuju konvergensi. Persamaan linear yang muncul pada tiap tahap iterasi diselesaikan dengan paket MA28, yang mengimplementasikan matrix versi *LU-decomposition* dan *backsubstitution*. (Nenny dan Ali, 2012).

- Pemodelan Tough2

Tough2 adalah suatu program simulasi numerik yang dapat digunakan untuk model multi dimensi, aliran fluida multi fasa dan multi komponen dalam media berpori atau *fracture* serta sistim non-isothermal. *Tough2* menyelesaikan persamaan kesetimbangan massa dan energi yang menggambarkan aliran fluida dan panas yang umumnya merupakan sistem multi fasa dan multi komponen. Aliran fluida digambarkan oleh hukum Darcy pada multi fasa (ada *diffusive mass* mengalir dalam gas). Dalam pemodelan secara numerik, aliran dari satu blok ke blok lainnya dihitung dengan menggunakan persamaan aliran Darcy, yang secara matematis dinyatakan oleh persamaan berikut ini:

$$V = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{dp}{dl} \right) \quad (III.1)$$

Aliran tersebut dalam tiga dimensi dinyatakan sebagai berikut:

$$V = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho_l g) \quad (III.2)$$

Apabila fluida terdiri dari dua fasa, yaitu uap dan air maka laju alir masa fluida (Q_m) adalah:

$$V_m = V_{m1} + V_{mv} \quad (III.3)$$

Masing-masing fasa dianggap mengalir mengikuti Hukum Darcy, sehingga:

$$V_{mv} = -\frac{k_{rv}}{\mu_v} (\nabla P - \rho_v g) \quad (III.4)$$

$$V_{m1} = -\frac{k_{r1}}{\mu_1} (\nabla P - \rho_1 g) \quad (III.5)$$

dengan,

- v = Kecepatan aliran
- μ = Viskositas fluida yang mengalir
- k = Permeabilitas
- p = Tekanan
- g = Konstanta gravitasi
- ρ = Massa jenis
- dp/dl = Gradien tekanan dalam arah aliran

Aliran panas terjadi karena konduksi dan konveksi, pada aliran panas konveksi dipengaruhi juga oleh efek panas laten. Laju alir panas dari satu blok ke blok lainnya ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_e = Q_e(\text{konveksi}) + Q_e(\text{konduksi}) \quad (III.6)$$

Laju alir panas secara konveksi adalah:

$$Q_e(\text{konveksi}) = h_1 Q_{m1} + h_v Q_{mv} \quad (III.7)$$

Sedangkan laju alir panas secara konduksi adalah:

$$Q_e(\text{konduksi}) = KVT \quad (III.8)$$

Aliran panas total menjadi

$$Q_e = (h_1 Q_{m1} + h_v Q_{mv}) - (KVT) \quad (III.9)$$

dengan,

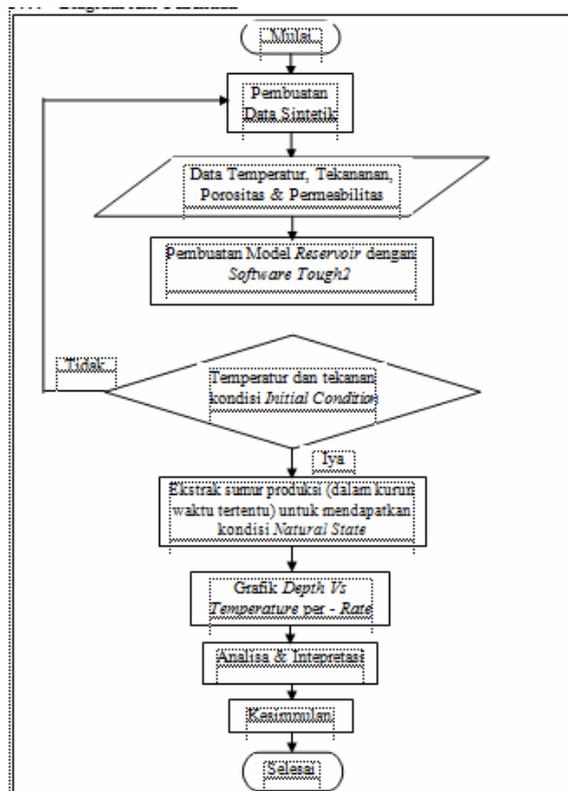
- hl = Entalpi air
- hv = Entalpi uap
- K = Konduktivitas panas
- T = Suhu

Tough2 pertama kali dirilis ke publik pada tahun 1991, kode 1991 telah diupdate pada tahun 1994 ketika satu set *preconditioned conjugate gradient solvers* ditambahkan yang memungkinkan solusi yang lebih efisien untuk masalah yang lebih besar. Versi 2.0 memiliki beberapa fitur baru modul properti fluida dan menawarkan kemampuan pemodelan yang prosesnya ditingkatkan, seperti ditambah *reservoir*-aliran lubang sumur, curah hujan dan efek disolusi, dan difusi multifase. Banyak perbaikan dalam versi terbaru ini dibandingkan versi yang dirilis sebelumnya dan fitur pengguna baru telah ditambahkan, seperti peningkatan pemecah persamaan linear, dan menulis file grafis. Modul T2VOC untuk tiga fase aliran air, udara dan bahan kimia organik yang mudah menguap (VOC), dan modul T2DM untuk dispersi hidrodinamik dalam 2-D sistem aliran telah terintegrasi ke dalam keseluruhan struktur kode dan termasuk dalam versi 2.0.

Data input *upwardly* kompatibel dengan versi sebelumnya. Perubahan Coding umumnya disimpan ke minimum, dan hanya dibuat sesuai kebutuhan untuk mencapai fungsi tambahan yang diinginkan. Versi 2.1 memiliki inti direstrukturisasi dan termasuk beberapa perbaikan bug. *Tough2* ditulis dalam Fortran77 standar dan dapat dijalankan pada platform apapun, seperti workstation, PC, Macintosh, mainframe dan superkomputer, yang sesuai FORTRAN compiler yang tersedia. (Nenny dan Ali, 2012).

3. METODE PENELITIAN

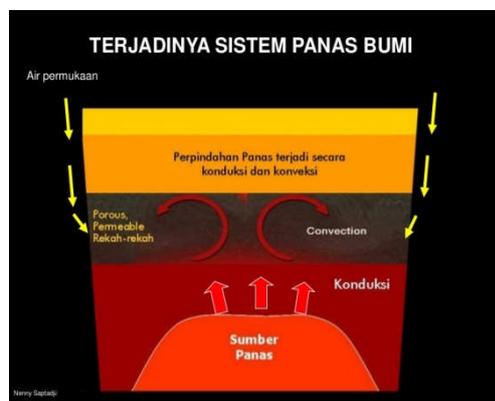
Untuk mencapai maksud dan tujuan dalam penelitian ini diperlukan beberapa tahapan sistematis yang dapat dilihat pada diagram alir yang digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

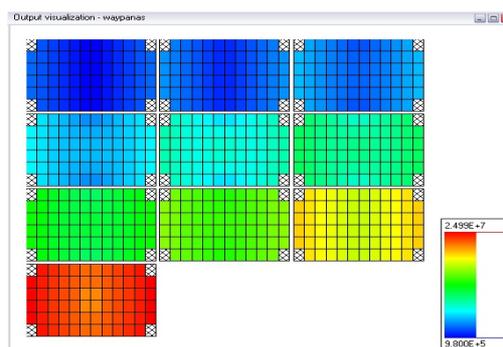
Dalam pelaksanaan penelitian digunakan *Software Tough2* untuk melakukan pemodelan *reservoir*. Dengan data yang digunakan untuk penelitian ini adalah data sintetik, di mana data sintetik ini dibuat untuk menggambarkan keadaan menyerupai lapangan panasbumi. Pemodelan *reservoir* ini terdiri dari lapisan *overburden*, lapisan *clay cap*, lapisan *recharge*, lapisan *reservoir*, dan lapisan *basement*. Yang kemudian mempersiapkan sebuah *case* (kasus) untuk dimodelkan. Dimana kasus yang dibuat disini adalah membuat model *reservoir* lapangan panasbumi dengan jenis lapangan panasbumi yang memiliki sistem *dominasi uap* (*vapor dominated systems*)

pada kondisi topografi permukaan yang relatif datar yang kemudian akan membentuk upflow *heat* keatas membentuk seperti jamur yang berasal dari *heat source* di bawah sebesar $22 \text{ Mw/km}^2 \times 4 \text{ cell}$. Dengan gambaran model seperti Gambar 2:



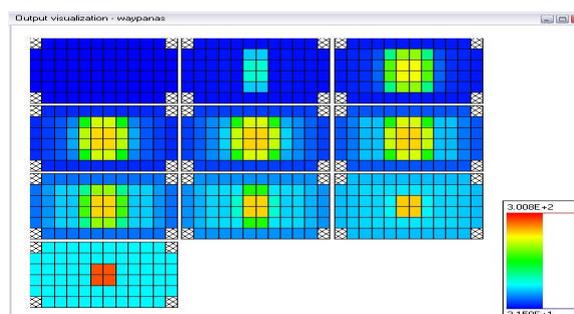
Gambar 2. Penampakan kasus model konseptual yang akan dibuat (<http://forum.iagi.or.id>)

Dengan cara membuat pemodelan *reservoir* dengan kedalaman mencapai 2,5 km, yang terdiri dari 4 lapisan : Lapisan 1 dengan kedalaman 0-300 m Merupakan lapisan *overburden*, Lapisan 2 dengan kedalaman 300-900 m, Merupakan lapisan *clay caps*, Lapisan 3 dengan kedalaman 901-1500 m, Merupakan lapisan *reservoir* dan *recharge*, Lapisan 4 dengan kedalaman 1501-2500 m, Merupakan lapisan *basement*. Yang kemudian memasukan data tekanan seperti Gambar 3:



Gambar 3. Penampakan output tekanan dari hasil pemodelan (Hasil Pemodelan *Reservoir* dengan Tough2 oleh Damar Nandiwardhana)

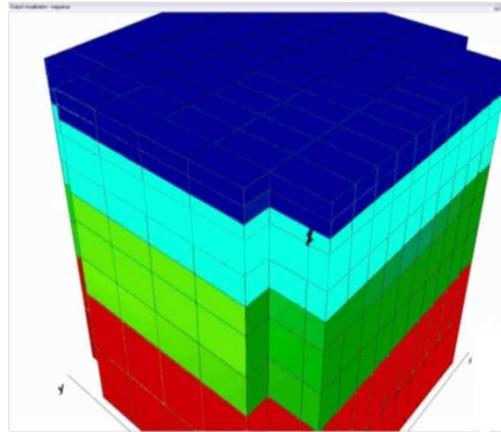
Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa nilai tekanan yang berada di *layer* atas bernilai lebih kecil dari nilai *layer* yang dibawahnya, hal ini dapat dilihat dari perubahan warna dari output tekanan pada Gambar 3, dimana yang berwarna biru yang merupakan *layer* atas bernilai kecil dan semakin kebawah menjadi warna merah, yang memiliki nilai tekanan lebih besar. Selain itu tekanan ditengah bernilai lebih kecil (warna lebih terang/ lebih muda) dibandingkan tekanan yang berada pinggir kanan dan kiri bernilai lebih besar (warna lebih gelap/ lebih tua). Sehingga dapat terciptannya *upflow heat* keatas yang membentuk seperti jamur, seperti Gambar 4



Gambar 4. Penampakan *upflow heat* (Hasil Pemodelan *Reservoir* dengan Tough2 oleh Damar Nandiwardhana)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

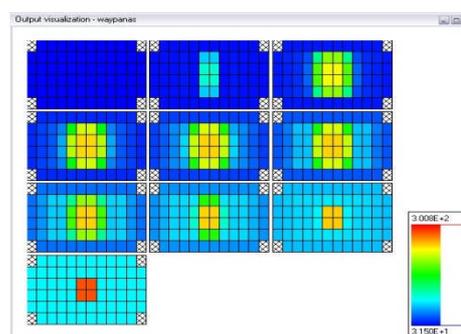
Dari hasil pemodelan pada Gambar 5 didapat kedalaman pemodelan *Reservoir* dengan kedalaman mencapai 2,5 km dengan dibagi menjadi 4 lapisan. Lapisan 1 dengan kedalaman 0-300 m, dengan warna biru tua Merupakan lapisan *overburden*. Lapisan 2 dengan kedalaman 301-900 m, dengan warna biru muda Merupakan lapisan *clay caps*. Lapisan 3 dengan kedalaman 901-1500 m, dengan warna hijau muda Merupakan lapisan *Reservoir* dan *recharge*. Lapisan 4 dengan kedalaman 1501-2500 m, dengan warna merah tua Merupakan lapisan *basement*.



Gambar 5. Hasil Pemodelan 3D oleh *Software Tough2* (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

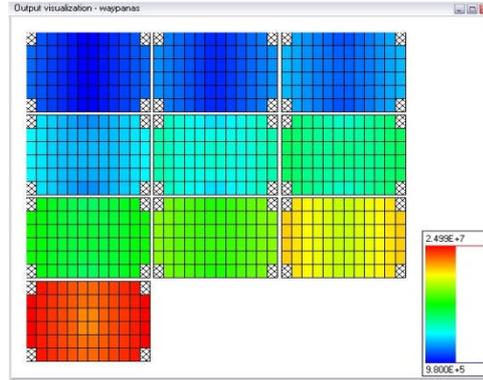
Dari hasil pemodelan pada Gambar 5 didapat kedalaman pemodelan *Reservoir* dengan kedalaman mencapai 2,5 km dengan dibagi menjadi 4 lapisan. Lapisan 1 dengan kedalaman 0-300 m, dengan warna biru tua Merupakan lapisan *overburden*. Lapisan 2 dengan kedalaman 301-900 m, dengan warna biru muda Merupakan lapisan *clay caps*. Lapisan 3 dengan kedalaman 901-1500 m, dengan warna hijau muda Merupakan lapisan *Reservoir* dan *recharge*. Lapisan 4 dengan kedalaman 1501-2500 m, dengan warna merah tua Merupakan lapisan *basement*. Selain itu tiap lapisan ini memiliki nilai permeabilitas dan porositas yang berbeda. Lapisan *overburden* Permeabilitas $1e-12 \text{ m}^2$ Porositas 15%, Lapisan *clay caps* Permeabilitas $1e-16 \text{ m}^2$ Porositas 10%, Lapisan *recharge* Permeabilitas $1e-13 \text{ m}^2$ Porositas 20%, Lapisan *Reservoir* Permeabilitas $1e-13 \text{ m}^2$ Porositas 20%, Lapisan *basement* Permeabilitas $1e-14 \text{ m}^2$ Porositas 15%.

4.1. Persebaran Heat



Gambar 6. Persebaran *Heat* pada saat kondisi *initial condition* (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

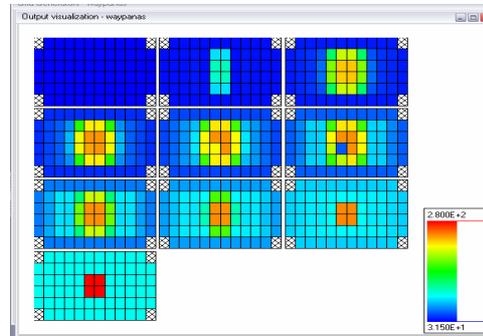
Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa terdapat 4 *cell* sumber panas sebesar $22 \text{ Mw/km}^2 \times 4 \text{ cell}$, yang dimana panasnya merambat keatas karena adanya lapisan porositas dan permeabilitas, serta tekanan yang mendorong panas tersebut untuk merambat keatas. Terlihat pula dari Gambar VI bahwa panas yang dihasilkan memiliki suhu yang lebih tinggi dibagian tengahnya, dibandingkan bagian sekelilingnya, hal ini dikarenakan selain sumber panas berada di tengah, karena pengaruh tekanan yang dimana tekanan ditengah lebih kecil (warna lebih terang/ lebih muda) dibandingkan tekanan yang berada pinggir kanan dan kiri (warna lebih gelap/ lebih tua). Seperti Gambar 7.



Pascal

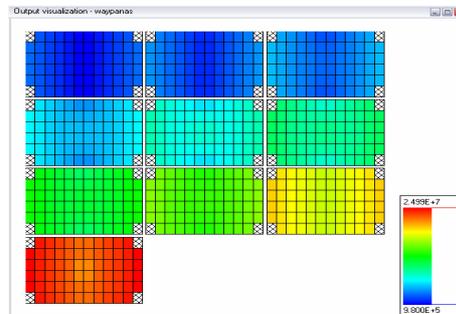
Gambar 7. Penampakan *output* tekanan dari hasil pemodelan (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

Sehingga apabila digambarkan bentuk *upflow heat*-nya seperti bentuk jamur. Sedangkan untuk persebaran *heat* yang telah diekstrak sumur, dapat dilihat terjadi penurunan suhu pada tempat/*cell* yang diekstrak sumur, hal ini dapat dilihat pada Gambar 8:



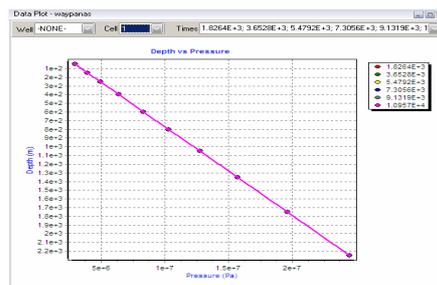
Gambar 8. Persebaran *Heat* setelah diekstrak sumur (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

4.2. Tekanan



Gambar 9. *Output* persebaran tekanan (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

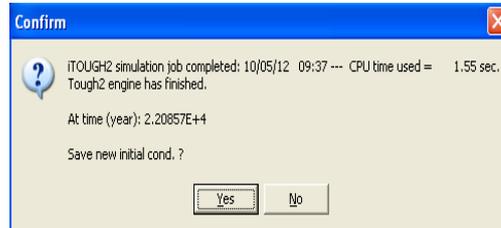
Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa tekanan yang berada ditengah lebih kecil (warna lebih terang/ lebih muda) dibandingkan tekanan yang berada pinggir kanan dan kiri (warna lebih gelap/ lebih tua).



Gambar 10. Grafik tekanan *Depth vs Pressure* (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

Dapat dilihat dari Gambar Grafik 10 bahwa tekanan semakin dalam kedalamannya, maka tekanan semakin besar, sehingga menghasilkan grafik *linier*. Untuk grafik tekanan pada kondisi *natural state* dan kondisi setelah diekstrak sumur, sama saja. Dimana tekanan semakin dalam kedalamannya, maka tekanan bertambah pula sara *linier*. Hal ini juga dapat dibuktikan dari hasil *ouput* tekanan pada Gambar 9 yang menunjukkan tekanan semakin dalam kedalamannya maka semakin meningkat dilihat dari perubahan warna yang terjadi dari pojok kiri atas dengan berwarna biru tua hingga pojok kiri bawah dengan warna merah tua.

4.3. Kondisi *Initial Condition* dan *Natural State*



Gambar 11. Kondisi *Natural State* (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

Dari hasil run pemodelan didapat kondisi *initial condition* selama 30 ribu tahun. *Initial Condition* merupakan kemampuan *Reservoir* untuk memproduksi *heat*, dengan keadaan belum diekstrak sumur produksi. Sedangkan untuk kondisi *natural state* dari pemodelan didapatkan selama 22 ribu tahun. *Natural state* merupakan kondisi setimbang, yaitu dimana kondisi tekanan, temperatur dan kondisi *Reservoir*nya tidak berubah terhadap waktu.

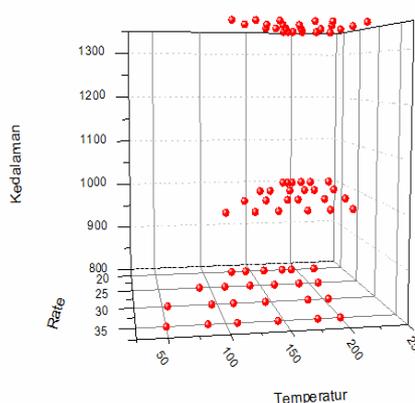
4.4. Grafik *Depth Vs Temperatur*

- Grafik *Depth Vs Temperatur* sebelum dan sesudah diinjeksi sumur produksi



Gambar 12. Grafik *depth vs temperatur* sebelum diinjeksi sumur produksi dan sesudah diinjeksi sumur produksi (Hasil Pemodelan *Reservoir* oleh Damar Nandiwardhana)

Dari Gambar Grafik 12 dapat dilihat bahwa keadaan suatu *Reservoir* sebelum diinjeksi sumur produksi terlihat terus bertambah suhunya seiring dengan bertambahnya kedalaman, sehingga dapat dikatakan suhu dan temperature berbanding lurus (*linier*). Keadaan berbanding terbalik saat *Reservoir* diinjeksi sumur produksi, dimana kedalaman yang diinjeksi sumur produksi mengalami penurunan suhu (temperatur).



Gambar 13. Grafik 3D semua kedalaman vs rate vs temperatur (Hasil Pembuatan Grafik 3D oleh Damar Nandiwardhana)

Dari Gambar Grafik 13 didapatkan bahwa semakin dalam kedalamannya maka temperatur akan naik, hal ini dapat dilihat dari kedalaman 800 m yang mempunyai temperatur 50°C yang kemudian pada kedalaman 1005 m yang mempunyai temperatur 110°C dan kemudian pada kedalaman 1300 m yang mempunyai temperatur 140°C . Perubahan suhu juga terjadi pada tingkatan rate dimana semakin besar nilai rate yang digunakan, maka temperatur akan turun dan sebaliknya, hal ini dapat dilihat dari rate 20 kg/s memiliki temperatur 130°C , kemudian rate 25 kg/s memiliki temperatur 90°C , rate 30 kg/s memiliki temperatur 55°C dan rate 35 kg/s memiliki temperatur 50°C .

5. KESIMPULAN

- Didapatkan kondisi *natural state* untuk pemodelan ini pada waktu 22 ribu tahun. Sedangkan untuk waktu *initial condition* didapat selama 30 ribu tahun.
- Terjadinya penurunan suhu dari kondisi *natural state* tanpa sumur produksi berbanding kondisi *natural state* dengan sumur produksi, dimana suhu pada saat kondisi *natural* tanpa sumur produksi sebesar 245°C dan suhu pada saat kondisi *natural state* dengan sumur produksi sebesar 235°C pada kedalaman 1350 m.
- Seiring dengan bertambahnya kedalaman, maka temperatur dan tekanan akan bertambah pula. Sehingga dapat dikatakan bahwa temperatur dan tekanan berbanding lurus.
- Semakin besar nilai rate yang dipakai dalam suatu sumur produksi, maka akan menurunnya nilai temperatur di sumur produksi tersebut.
- Dengan *heat source* sebesar $22 \text{ Mw/km}^2 \times 4 \text{ cell}$ selama 30 ribu tahun, suatu sistem panasbumi bisa mengenerate *heat* bertemperatur $240^{\circ}\text{C} - 280^{\circ}\text{C}$.
- Sumur produksi akan memiliki potensi yang bagus apabila dibuat pada kedalaman 1350m, dikarenakan suhu yang dihasilkan merupakan suhu potensial untuk panasbumi $175^{\circ}\text{C}-235^{\circ}\text{C}$ (Rate 20 kg/s) (termasuk sistem panas bumi bertemperatur tinggi $225^{\circ}\text{C} > (\text{Hochstein (1990)})$).

DAFTAR PUSTAKA

- Ali Ashat, (2012), *Persamaan Dasar Simulasi dan Struktur Simulator*, Research Associates Lab. Geothermal, Institut Teknologi Bandung.
- Andrea, (2011), *Metode Numerik*, (<http://andreasojomelu.blogspot.com/2011/03/tugas-metode-numerik.html>).
- Anonim (2006), *Catatan Kuliah Panasbumi*. (<http://taman.blogspot.com/category/panas-bumi/>).
- Anonim, (2012), Geodiscussion, <http://forum.iagi.or.id>.
- Anonim, (2012), *Model dan Simulasi*, (<http://bobbhendot.blogspot.com/2012/07/konsep-dasar-model-simulasi.html>).
- Axelsson, G, Stefansson, V, (2002), "Sustainable Management of Geothermal Resources". International Symposium on Geothermal.
- Badan Geologi, (2008), Potensi Energi Panas Bumi Indonesia.
- Croucher, A. (2011), "PyTOUGH: A Python scripting library for automating TOUGH2 simulations" *Proceedings of the New Zealand Geothermal Workshop 2011*, 21-23 November 2011, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- DiPippo, R, (2007), *Geothermal Power Plants*, 2nd Ed, McGraw-Hill.
- Goff, F., and Janik, C.J., (2000). *Geothermal Systems*, in (Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., and Stix, J., eds.) *Encyclopedia of Volcanoes: Academic Press*, San Diego, CA, p. 817-834.
- [Hasanto, \(2012\), \(Geothermal\) Alterasi. http://hasantoshare.wordpress.com/2012/04/02/geothermal-alterasi.](http://hasantoshare.wordpress.com/2012/04/02/geothermal-alterasi)
- Hochstein and Browne, (2000), *Surface Manifestations of Geothermal System with Volcanic Heat Sources*, in *Encyclopedia of Volcanoes*.
- Hochstein, Manfred P, Sudarman S, (2008), *History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000*, *Geothermics* 37, 220-266 pp.
- Lely, (2012), [Geothermal Week : Klasifikasi Sistem Panas Bumi, http://reinesin.blogspot.com/2012/03/klasifikasi-sistempanasbumi-klasifikasi.html.](http://reinesin.blogspot.com/2012/03/klasifikasi-sistempanasbumi-klasifikasi.html)
- Nenny Miryani Saptadji, Ali Ashat Dipl. Geotherm.En.Tech, (2012), *Pengenalan Simulasi Reservoir Panas Bumi*, Program Studi Magister Teknik Panas Bumi, Institut Teknologi Bandung.
- Nenny Miryani Saptadji, (2012), *Sekilas Tentang Panas Bumi*, Program Studi Magister Teknik Panas Bumi Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan ITB.
- Nenny Miryani Saptadji, (2012), *Simulasi Reservoir, Training "Advanced Geothermal Reservoir Engineering"*, Bandung, 6 - 17 Juli 2009, Program Studi Magister Teknik Panas Bumi Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan ITB.
- O'Sullivan, M.J., Barnett, B.G. and Razali, Y. (1990). *Numerical simulation of the Kamojang geothermal field*, Indonesia. *Trans. GRC*, 14, 1317-1324.
- OSullivan, M. J., and Bullivant, D., (1995), *A Graphical Interface for the TOUGH2 family of simulators. Proceedings TOUGH Workshop 1995 90-95*, Berkley, CA.

- O'Sullivan, M.J. and Mc.Kibbin R. (1987): Geothermal Reservoir Engineering, Course Material, Geothermal Institute - University of Auckland.
- Pruess, K. (2004), "The Tough2 codes – a family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media" *Vadose Zone Journal* 3(3), 738.
- Pruess, Karsten, Oldenburg, Curt and Moridis, George, (1999), *Tough2 User's Guide, Version 2.0*. Berkeley, CA, USA : Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43134.
- Research Associates Lab. Geothermal, (2012), *User Manual Interface iTough2*. Institut Teknologi Bandung.
- Robi Irsamukhti, (2012), *Pengertian dan Komponen Sistem Panasbumi*, (<http://irsamukhti.blogspot.com/2012/07/pengertian-dan-komponen-sistem-panas.html>).
- Standar Nasional SNI (18-6009-1999), *Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia*, Badan Standardisasi Nasional.
- Sudarman, (2000),. *Geothermal Development Progress In Indonesia: Country Update 1995-200*.
- Yamamoto, H., (2008), *Petrasim, A graphical user interface for the TOUGH2 family of multiphase flow and transport codes*. *Groundwater* 46 (4), 525-528.