

## STUDY OF INVERSE MODELING TO INFER PERMEABILITY DISTRIBUTION OF GEOTHERMAL RESERVOIR BASED ON PRODUCTION HISTORY DATA USING ENSEMBLE KALMAN FILTER

Robi Irsamukhti and Zuher Syihab

Geothermal Master Program  
Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Institut Teknologi Bandung  
Jln. Ganesha 10, Bandung, Indonesia  
irsamukhti@gmail.com

### **ABSTRACT**

*The research is accomplished to evaluate the application of EnKF method in the reservoir geothermal simulation based on production history data. Two experimental models are constructed and simulated using TOUGH2 reservoir simulation. One of the experimental models is assigned with single permeability in all grids, while the other one is assigned with various permeability value distributed in all grids of model. It is also performed several data assimilation scenarios.*

*This research indicates that EnKF method can be applied in history matching process to inverse model permeability from geothermal reservoir. It also shows that pressure data assimilation gives a better matching than temperature data assimilation. However, EnKF method may give non-unique outcomes or solutions for the very great range of permeability in a model. The addition of extra information (a priori information) to the inversion process or data assimilation is proven to diminish the effect of non-uniqueness.*

### **PENDAHULUAN**

Proses *history matching* konvensional melakukan kalibrasi permeabilitas secara manual dalam rangka memperoleh keselarasan antara model reservoir panas bumi dengan data observasi. Metode yang umum digunakan adalah memperkirakan sebaran permeabilitas secara kualitatif berdasarkan data geologi permukaan. Nilai-nilai perkiraan selanjutnya dimasukkan ke dalam model reservoir. Jika nilai perkiraan ini mampu menyebabkan model reservoir memberikan keluaran dengan tingkat kesesuaian yang cukup baik dengan data sejarah produksi, maka nilai perkiraan ini diterima sebagai nilai sebaran permeabilitas di dalam reservoir panas bumi. Jika nilai perkiraan tersebut malah menyebabkan model reservoir memberikan nilai keluaran yang tidak

cukup selaras dengan data sejarah produksi, maka nilai perkiraan harus diganti hingga diperoleh model reservoir yang memberikan nilai keluaran yang dapat diterima tingkat kesesuaianya dengan data observasi (data sejarah produksi).

Ketika nilai perkiraan pada proses *history matching* konvensional terlalu jauh dari nilai sesungguhnya maka keseluruhan proses *history matching* bisa menjadi sangat memakan waktu dan melelahkan karena adanya proses tebakan yang berulang-ulang. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan atau metode untuk memperkirakan permeabilitas di dalam reservoir panas bumi secara kuantitatif sehingga proses *history matching* di dalam simulasi reservoir panas bumi dapat dilakukan dengan lebih efisien.

*Ensemble Kalman Filter (EnKF)* adalah metode asimilasi data yang mampu memperkirakan nilai parameter statis dari suatu model dinamis dengan melakukan asimilasi data-data dinamis ke dalam model. Di dalam simulasi dan pemodelan reservoir panas bumi pada studi ini, parameter statis yang diestimasi adalah permeabilitas dari model reservoir sedangkan data dinamis yang diasimilasikan adalah data pengukuran tekanan dan / atau temperatur reservoir / sumur sepanjang waktu produksi.

Tujuan dari studi ini adalah mengkaji kemungkinan penerapan metode *EnKF* dalam proses *history matching* pada simulasi reservoir panas bumi untuk memperoleh atau menginversi nilai permeabilitas dari suatu model reservoir panas bumi. Metode ini diharapkan dapat menghasilkan sebuah proses *history matching* di dalam simulasi reservoir panas bumi yang dapat dilakukan dengan lebih efisien.

Metode simulasi digunakan di dalam penelitian ini. Perangkat model uji yang dianggap mewakili segmen reservoir panas bumi dibangun dan disimulasikan dengan menggunakan simulator reservoir TOUGH2. Proses *history matching* terhadap model uji dilakukan

dengan menggunakan metode asimilasi data *EnKF*. Metode ini akan mengubah-ubah nilai permeabilitas tebakan pada model uji hingga diperoleh nilai permeabilitas yang mampu memberikan hasil simulasi yang selaras dengan data observasi.

## **TAHAPAN - TAHAPAN DI DALAM SIMULASI RESERVOIR PANAS BUMI**

### **Pemodelan Konseptual (*Conceptual Modeling*)**

Model konseptual adalah model sistem panas bumi yang diturunkan langsung dari data-data geosains. Pemodelan konseptual membutuhkan pemahaman menyeluruh tentang aspek dan karakteristik geologi, karakteristik geokimia, dan karakteristik geofisika dari sistem panas bumi yang ditinjau. Pemahaman tentang aspek-aspek ini kadang kala membutuhkan data sumur jika data itu tersedia.

Pada tahap pemodelan konseptual, data geologi harus mampu memberikan informasi mengenai litologi dan struktur permeabilitas yang berkembang. Informasi mengenai arah aliran fluida di bawah permukaan, zona *upflow*, zona *outflow*, dan jenis fluida dari reservoir dapat disarikan dari data-data geokimia. Karakteristik fluida reservoir panas bumi dan perkiraan temperatur reservoir andaikan data sumur belum tersedia juga dapat diturunkan dari data geokimia. Geometri dari reservoir, baik luas maupun ketebalan, dapat didelineasi dengan menggunakan data-data geofisika.

Semua data geologi, geokimia, geofisika, dan data sumur jika tersedia, disintesis untuk membuat sebuah model konseptual terpadu. Model ini harus mampu menggambarkan komponen-komponen dari sistem panas bumi secara utuh, yaitu: reservoir, batuan penudung (*caprock*), zona *recharge* dan *discharge*, serta sumber panas. Selain itu, arah aliran fluida, kontur isotermal, distribusi permeabilitas, serta litologi batuan juga harus tergambaran dengan baik di dalam sebuah model konseptual.

### **Pemodelan Keadaan Alami (*Natural State*)**

Pemodelan keadaan alami (*natural state modeling*) adalah pemodelan sistem reservoir panas bumi sebelum adanya proses produksi dan atau reinjeksi terhadap reservoir. Pemodelan ini bertujuan untuk mengkalibrasi distribusi dan struktur permeabilitas pada model konseptual. Konsep dasar dari *natural state modeling* adalah memperkirakan struktur permeabilitas berdasarkan model konseptual yang diturunkan dari data geosains. Model ini harus memenuhi prinsip konservasi massa dan energi pada kesetimbangan termal. Berdasarkan prinsip dari konservasi massa maka debit fluida manifestasi antara model dan kondisi faktual di lapangan harus

sama besar. Berdasarkan prinsip konservasi energi dalam kesetimbangan termal maka fluks energi input pada model harus sama besar dengan fluks energi keluar pada manifestasi permukaan di lapangan. Besarnya fluks energi keluar pada manifestasi permukaan di lapangan dapat dihitung menggunakan metode perhitungan hilang panas (*heat loss*).

Pemodelan keadaan alami akan lebih baik jika tersedia data *PT Shut-in* dari sumur-sumur awal sebelum adanya proses produksi dan atau reinjeksi terhadap lapangan tersebut. Data *PT Shut-in* adalah data tekanan dan temperatur yang diukur pada sumur dalam keadaan sumur ditutup sehingga tercipta kesetimbangan antara kondisi di dalam sumur dan kondisi di reservoir. Jika data ini tersedia maka *natural state modeling* dianggap valid ketika data tekanan dan temperatur pada model mampu mendekati profil data *PT Shut-in* pada zona yang ditinjau.

### **History Matching**

*History matching* adalah proses mengintegrasikan variabel dinamis dari data observasi ke dalam model reservoir panas bumi sehingga diperoleh suatu model reservoir dengan variabel statis yang selaras dengan data observasi. Keselarasan dicapai ketika variabel dinamis dari hasil perhitungan model bernilai sama atau mendekati nilai variabel dinamis dari data observasi langsung. Sepanjang sejarah produksi nilai berbagai variabel dinamis akan terus berubah karena variabel dinamis adalah jenis variabel bergantung waktu (*time dependent*).

Pada suatu waktu tertentu, simulator reservoir akan menghitung nilai berbagai variabel dinamis, seperti tekanan, temperatur, dan saturasi, berdasarkan kepada model yang telah dibangun oleh variabel statis. Hasil-hasil perhitungan variabel dinamis dari simulator tersebut selanjutnya dibandingkan dengan nilai variabel dinamis hasil observasi pada waktu tersebut. Jika diperoleh keselarasan antara keduanya maka model reservoir dapat dianggap valid karena telah terverifikasi oleh data faktual di lapangan. Jika tidak diperoleh keselarasan antara keduanya maka nilai variabel statis harus diubah dan model dijalankan kembali dari waktu awal untuk selanjutnya *backward* kembali ke depan di waktu mana data observasi tersebut tersedia. Proses ini terus diulang hingga diperoleh keselarasan antara hasil model dengan data observasi. Dapat dikatakan bahwa proses ini memakai pendekatan *trial and error*. Pada proses *history matching* konvensional, hal ini dilakukan dengan mengubah-ubah variabel statis secara manual.

Masalah pada *history matching* konvensional muncul ketika keselarasan tidak kunjung diperoleh. Proses

*trial and error* terus dilakukan dengan mengubah permeabilitas berbagai segmen di dalam zona reservoir guna mengejar keselarasan antara hasil simulasi dengan data observasi. Pada akhirnya, proses *history matching* ini berpotensi menjadi sangat memakan waktu dan melelahkan.

Di lain pihak, metode *EnKF* hadir untuk menawarkan kemungkinan melakukan koreksi otomatis terhadap variabel statis dari model di dalam usaha memperoleh keselarasan antara hasil perhitungan model dengan data observasi. Hal ini membawa kepada sebuah harapan akan adanya sebuah skema *history matching* yang dapat dilakukan dengan lebih efisien.

### **Peramalan Skenario Pengembangan (*Forecasting*)**

Peramalan skenario pengembangan adalah proses menguji berbagai skenario produksi dan skenario reinjeksi dengan menggunakan model akhir yang telah terverifikasi oleh data produksi pada proses *history matching*.

Hasil akhir dari *history matching* digunakan sebagai titik pangkal untuk setiap simulasi skenario pengembangan (*forecasting*). Skema-skema produksi dan reinjeksi dimasukkan ke dalam model reservoir dan disimulasikan untuk pengembangan lapangan panas bumi setidaknya hingga 30 tahun mendatang. Tujuan akhir yang ingin dicapai adalah memperoleh skenario pengembangan terbaik yang mampu mempertahankan keberlangsungan reservoir dalam jangka panjang dan juga mampu memberikan keuntungan ekonomi yang optimal.

### **ENSEMBLE KALMAN FILTER (ENKF)**

#### **Asimilasi Data Sekuensial**

Asimilasi data didefinisikan sebagai penggabungan data observasi ke dalam suatu model dinamis. Metode asimilasi data dapat dikelompokkan ke dalam dua jenis yaitu metode variasional dan metode sekuensial. Metode asimilasi data variasional didasarkan pada teori kontrol optimum. Sedangkan metode asimilasi data sekuensial didasarkan pada kerangka probabilistik.

Dalam metode asimilasi data variasional, optimisasi dilakukan pada parameter yang tidak diketahui (*unknown*) dengan cara meminimalkan fungsi objektif yang mengukur *misfit* antara model dengan data. Sedangkan metode asimilasi data sekuensial menggunakan pendekatan lain dengan memberikan perkiraan keadaan terhadap keseluruhan sistem secara berurutan dengan cara mempropagasi informasi dalam alur waktu maju. Oleh karena itu, metode sekuensial tidak memerlukan penurunan invers atau *adjoint* dari model sehingga secara

numerik metode ini akan lebih mudah untuk diaplikasikan. *EnKF* termasuk ke dalam jenis metode asimilasi data sekuensial.

Di dalam kasus *history matching* pada simulasi reservoir panas bumi, di dalam studi ini, data observasi diwakili oleh data tekanan dan / atau data temperatur bawah permukaan dari sumur yang diobservasi. Di dalam kenyataan di lapangan, pengukuran ini dapat dilakukan pada sumur dalam keadaan tertutup (*shut-in*). Data observasi tekanan dan / atau temperatur dari sumur akan diasimilasi ke dalam model dinamis reservoir sehingga diperoleh seperangkat data baru, yaitu permeabilitas, yang konsisten dengan data observasi tersebut. Selanjutnya model reservoir diperbarui dengan cara melakukan koreksi permeabilitas. Setelah dikoreksi, maka model ini dapat digunakan untuk tujuan prediksi ke depan (*forecasting*). Ketika data observasi terbaru tersedia di masa datang, maka model ini dapat diperbarui kembali dengan cara yang sama, dengan menggunakan model terakhir sebagai basis.

#### **Konsep dan Formulasi Metode EnKF**

Ensemble Kalman Filter (*EnKF*) merupakan suatu estimator yang digunakan untuk mengestimasi keadaan-keadaan dari sistem dinamis nonlinear. *EnKF* termasuk ke dalam jenis filter partikel. Titik pangkal di dalam filter partikel adalah pemilihan sekumpulan partikel (*sampling*) yang akan merepresentasikan distribusi peluang inisial. Kumpulan partikel tersebut dikatakan sebagai ensemble dari keadaan terestimasi. Pada tahap berikutnya, sekumpulan partikel ini dipropagasi melalui sistem dinamis nonlinear dan fungsi kerapatan peluang dari keadaan faktual diperkirakan dengan menggunakan ensemble dari keadaan terestimasi tersebut.

Anggap terdapat sebuah sistem dinamis nonlinear yang didiskretisasi di dalam domain waktu sebagai berikut,

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (1)$$

dan data observasi dari sistem tersebut sebagai berikut,

$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (2)$$

dimana  $k$  adalah indeks waktu,  $x_k, w_k \in \mathbb{R}^n$ , dan  $u_k \in \mathbb{R}^m$ , serta  $y_k, v_k \in \mathbb{R}^p$ . Dalam hal ini,  $w_k$  dan  $v_k$  adalah *noise* yang diasumsikan sebagai *gaussian white noise* dengan matriks kovariansi masing-masing  $Q_k$  dan  $R_k$ . Diasumsikan pula bahwa  $x_0, w_k$  dan  $v_k$  tidak saling berkorelasi sehingga ketiganya saling ortogonal.

Formulasi dari metode *EnKF* dapat dituliskan dalam tiga tahap, yaitu: representasi galat, analisis, dan prediksi. Meski pada akhirnya metode *EnKF* dapat dinyatakan hanya dalam dua langkah utama, yaitu *forward step* dan *analysis step*.

### **Representasi Galat (Error)**

Diasumsikan pada waktu  $k$  terdapat sebuah ensembel dengan sejumlah  $q$  anggota atau realisasi, mengandung galat acak, dan sedang berada dalam alur waktu maju. Ensembel ini dinotasikan sebagai  $X_k^f \in \mathbb{R}^{n \times q}$  dimana,

$$X_k^f \simeq x_k^{f_1}, \dots, x_k^{f_q}$$

indeks  $f$  menyatakan keadaan ensembel sedang berada dalam alur waktu maju (*forward in time*). Nilai rata-rata dari ensembel tersebut dapat dinyatakan sebagai,

$$\bar{x}_k^f \simeq \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_k^{f_i}$$

Oleh karena nilai dari  $x_k$  sesungguhnya tidak diketahui maka dalam rangka untuk mendefenisikan kovariansi dari galat, diterapkan metode aproksimasi dengan menggunakan anggota-anggota dari ensembel. Sehingga didefinisikan ensembel dari galat hampiran di sekitar nilai rata-rata dari  $x_k$  sebagai berikut,

$$E_k^f \simeq [x_k^{f_1} - \bar{x}_k^f \ \dots \ x_k^{f_q} - \bar{x}_k^f]$$

dan ensembel dari galat keluaran sebagai,

$$E_{y_k}^f \simeq [y_k^{f_1} - \bar{y}_k^f \ \dots \ y_k^{f_q} - \bar{y}_k^f]$$

Maka aproksimasi terhadap kovariansi dari galat dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}\hat{P}_k^f &\simeq \frac{1}{q-1} E_k^f (E_k^f)^T \\ \hat{P}_{xy_k}^f &\simeq \frac{1}{q-1} E_k^f (E_{y_k}^f)^T \\ \hat{P}_{yy_k}^f &\simeq \frac{1}{q-1} E_{y_k}^f (E_{y_k}^f)^T\end{aligned}$$

Dengan demikian, nilai rata-rata dari ensembel dianggap sebagai nilai estimasi terbaik dan sebaran anggota ensembel di sekitar nilai rata-rata dianggap sebagai galat (*error*) antara nilai estimasi dan keadaan aktual.

### **Analisis**

Tahap analisis merupakan tahap untuk memperbaiki ensembel dengan cara mengasimilasikan data observasi ke dalam model estimasi. Guna mendapatkan estimasi analisis dari keadaan  $x$ , *EnKF* menjalankan sebuah ensembel dari suatu siklus asimilasi data paralel, sebagai berikut,

$$x_k^{a_i} = x_k^{f_i} + \hat{R}_k (y_k^i - h(x_k^{f_i})) \quad (10)$$

dimana indeks  $a$  menyatakan keadaan analisis, indeks  $i$  menyatakan anggota ensembel ke- $i$ , indeks  $k$  menyatakan waktu,  $\hat{R}_k$  merupakan *filter gain* atau biasa dikenal sebagai *kalman gain*, dan  $y_k^i$  adalah observasi terganggu atau biasa dikenal sebagai *perturbed observation* yang diberikan oleh,

$$y_k^i = y_k + v_k^i, \quad (11)$$

dimana  $v_k^i$  adalah *noise* yang diasumsikan sebagai *gaussian white noise* dengan kovariansi adalah  $R_k$ . Selanjutnya aproksimasi terhadap kovariansi pada tahap analisis dinyatakan sebagai,

$$\hat{P}_k^a \simeq \frac{1}{q-1} E_k^a (E_k^a)^T \quad (12)$$

dimana  $E_k^a$  pada persamaan kovariansi (4.18) tersebut dinyatakan sebagai berikut,

$$E_k^a \simeq [x_k^{a_1} - \bar{x}_k^a \ \dots \ x_k^{a_q} - \bar{x}_k^a] \quad (13)$$

(5) *Kalman gain* atau  $\hat{R}$  pada waktu  $k$  ditentukan dengan menggunakan relasi berikut,

$$\hat{R}_k = \hat{P}_{xy_k}^f (\hat{P}_{yy_k}^f)^{-1} \quad (14)$$

### **Prediksi**

Prediksi adalah memperkirakan perilaku model pada waktu ke-( $k+1$ ) dengan menggunakan model di waktu  $k$  sebagai basis. Model di waktu  $k$  tersebut telah mengalami pemutakhiran pada tahap analisis (7) dengan mengasimilasikan data observasi di waktu  $k$  tersebut. Prediksi ke waktu  $k+1$  dinyatakan sebagai,

$$x_{k+1}^{f_i} = f(x_k^{a_i}, u_k) + w_k^i \quad (15)$$

(9) dimana  $w_k^i$  adalah *noise* yang diasumsikan sebagai *gaussian white noise* dengan kovariansi adalah  $Q_k$ .

### **Prosedur History Matching Menggunakan Metode *EnKF***

Metode *EnKF* mengkategorikan variabel model ke dalam dua jenis variabel, yaitu variabel dinamis (*time*

*dependent)* dan variabel statis (*time independent*). Jika kedua jenis variabel ini digabungkan maka disebut sebagai vektor keadaan (*state vector*). Di dalam studi ini, variabel dinamis akan diwakili oleh tekanan dan / atau temperatur dari sumur observasi sedangkan variabel statis adalah permeabilitas.

Prosedur *history matching* di dalam simulasi reservoir panas bumi dengan menggunakan metode *EnKF* terdiri dari tahap inisiasi, *forward*, dan *analysis*. Algoritma dari metode *EnKF* untuk proses *history matching* akan dijabarkan sebagai berikut.

### Inisiasi

Inisiasi adalah proses pembangkitan ensemble inisial dari vektor keadaan yaitu,

$$\mathbf{X} = [\mathbf{m}^T \mathbf{d}^T]^T \quad (16)$$

dimana vektor  $\mathbf{m}$  mengandung variabel statis yaitu permeabilitas dan vektor  $\mathbf{d}$  mengandung variabel dinamis yaitu tekanan dan / atau temperatur dari sumur observasi sedangkan *superscript T* menyatakan transpose dari matriks. Pada tahap ini, hanya vektor  $\mathbf{m}$  (permeabilitas) yang dibangkitkan secara acak dengan mengikuti fungsi distribusi normal sedangkan vektor  $\mathbf{d}$  (tekanan dan / atau temperatur dari sumur observasi) dihitung sebagai fungsi dari vektor  $\mathbf{m}$  (permeabilitas) dengan menggunakan simulator reservoir TOUGH2, dimana dalam hal ini  $\mathbf{d} = \mathbf{f}(\mathbf{m})$ . Jumlah inisiasi dari vektor  $\mathbf{m}$  akan menyatakan jumlah dari realisasi atau jumlah dari anggota ensemble.

### Forward

Dalam tahap ini, ensemble berada dalam alur waktu maju (*forward*) yaitu,

$$\mathbf{X}^f = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{W} \quad (17)$$

dimana vektor  $\mathbf{W} = (w^1, \dots, w^q)$  dengan  $w^i = N(0, \Sigma_i^w)$  atau *gaussian white noise*. Pada tahap ini, model dipropagaskan hingga waktu  $k$  dimana data observasi telah tersedia pada waktu tersebut. Nilai  $\mathbf{f}(\mathbf{X})$  merupakan nilai dari vektor keadaan pada waktu tersebut dimana nilai tekanan dan / atau temperatur yang dikandung oleh vektor keadaan tersebut dihitung dengan menggunakan simulator reservoir TOUGH2. Sedangkan nilai permeabilitas yang juga dikandung oleh vektor keadaan tersebut masih merupakan nilai permeabilitas pada waktu  $k - 1$ .

### Analysis

Pada tahap ini, dibangkitkan vektor pengamatan  $\mathbf{Y}$  dengan melakukan pertubasi terhadap hasil observasi

sesungguhnya. Vektor keadaan  $\mathbf{X}$  dari hasil *forward* selanjutnya diperbarui menjadi vektor keadaan  $\mathbf{X}^a$  dengan cara mengasimilasi vektor  $\mathbf{X}^f$  dan vektor  $\mathbf{Y}$  secara bersamaan dengan menggunakan formulasi,

$$\mathbf{X}^a = \mathbf{X}^f + QH^T(HQH^T + R)^{-1}(\mathbf{Y} - H\mathbf{X}^f) \quad (18)$$

dimana  $Q$  adalah kovariansi dari  $\mathbf{X}^f$ ,  $R$  adalah kovariansi dari data observasi,  $\mathbf{Y}$  menyatakan *perturbed observation*, dan  $H$  adalah konstanta vektor output yang digunakan untuk mengeluarkan vektor  $\mathbf{d}$  dari vektor  $\mathbf{X}$ . Bentuk matriks konstanta  $H$  yaitu  $H = [0|I]$  dimana  $[0]$  adalah matriks yang semua elemennya nol dan  $[I]$  adalah matriks identitas. Matriks  $[0]$  berukuran  $n \times m$  dimana  $n$  menyatakan jumlah dari variabel dinamis (tekanan dan / atau temperatur) dan  $m$  menyatakan jumlah dari parameter model (permeabilitas) sedangkan matriks  $[I]$  berukuran  $n \times n$ . Vektor keadaan  $\mathbf{X}^a$  merupakan vektor keadaan baru yang telah diperbarui oleh proses asimilasi data observasi pada waktu  $k$  tersebut sehingga nilai permeabilitas yang dikandung oleh vektor keadaan tersebut merupakan nilai permeabilitas baru yang telah selaras dengan data observasi pada saat tersebut.

### Back to Forward Step

Kembali ke tahap *forward* dan algoritma berhenti setelah mencapai waktu observasi yang terakhir.

## APLIKASI METODE ENKF PADA INVERSI PERMEABILITAS TUNGGAL

### Desain Model Uji

Pada kasus inversi permeabilitas tunggal di dalam studi ini tidak digunakan model kompleks dari sistem reservoir panas bumi. Hal ini didasarkan pada pemikiran bahwa aplikasi yang lebih kompleks dari algoritma metode *EnKF* pada kasus *history matching* akan lebih nyata (*feasible*) jika aplikasi pada model sederhana terbukti berhasil. Oleh karena itu, kasus ini menggunakan sebuah model uji yang dianggap mewakili suatu segmen di dalam sistem reservoir panas bumi dengan satu nilai permeabilitas reservoir yang homogen isotropis. Homogen yaitu nilai permeabilitas adalah sama di semua tempat pada model uji dan isotropis yaitu nilai permeabilitas adalah sama pada semua arah dalam ruang. Kondisi inisial dan nilai berbagai parameter dari model uji tersebut selanjutnya ditunjukkan oleh Tabel 1.

Geometri dari model uji terdiri dari 108 sel dengan  $6 \times 6$  grid pada bidang horizontal dan 3 lapisan (*layer*) dalam arah vertikal seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Zona merah pada Gambar 1 merupakan

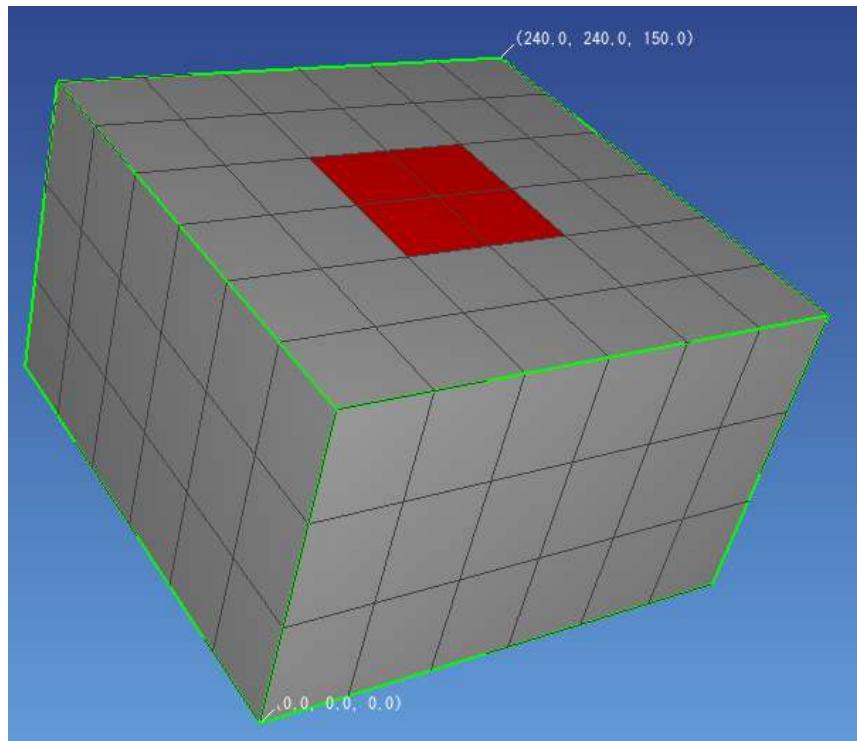
zona produksi yang dianggap mewakili sumur

produksi. Zona ini menembus ketiga lapisan dari

Tabel 1. Parameter Model Uji Kasus Inversi Permeabilitas Tunggal

Parameter Inisial	Nilai	Satuan	Keterangan
Tekanan	34	bar	Homogen
Temperatur	-	-	Fungsi dari P dan $S_g$
Saturasi uap	0.7	fraksi	Homogen

Parameter Model	Nilai	Satuan	Keterangan
Densitas batuan	2600	kg/m <sup>3</sup>	Homogen
Porositas batuan	0.1	fraksi	Homogen
Konduktivitas panas	2	W/m K	Homogen
Kapasitas panas spesifik	1	kJ/kg K	Homogen



Gambar 1. Grid Model Uji Kasus Inversi Permeabilitas Tunggal

model uji dan diproduksikan dengan laju alir massa konstan.

### **Persiapan Data Produksi**

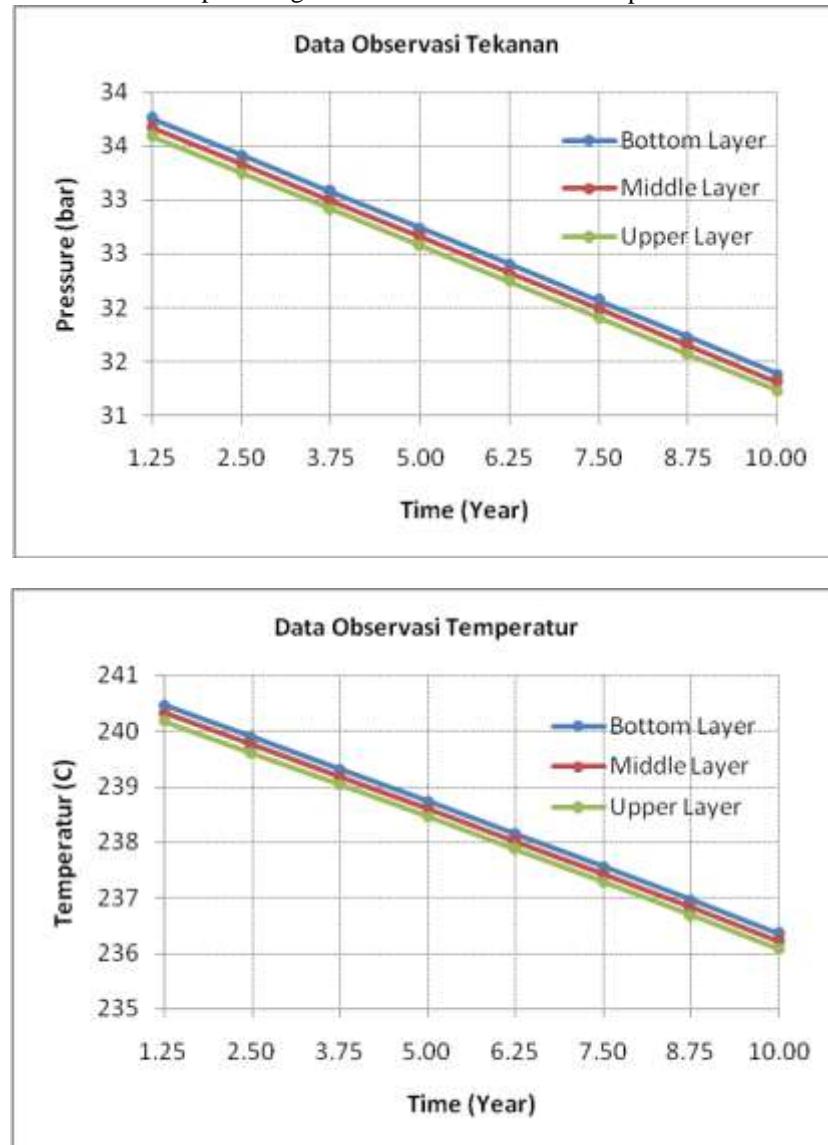
Dalam rangk menirukan proses produksi, model uji diproduksikan dengan laju alir massa konstan sepanjang waktu. Data tekanan dan temperatur bawah permukaan pada zona produksi diobservasi. Rentang observasi adalah selama 10 tahun dengan interval pengambilan data adalah 1.25 tahun. Sehingga secara

keseluruhan akan diperoleh 8 pasang (*series*) data observasi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.

Data observasi pada Gambar 2 dihitung pada nilai permeabilitas sebesar 30 mD. Selama proses *history matching*, data observasi tersebut diasimilasikan ke dalam model uji dengan menggunakan metode asimilasi *EnKF*. Kemampuan metode *EnKF* untuk melakukan *history matching* akan diukur dari

seberapa jauh metode *EnKF* mampu menginversi

kembali nilai permeabilitas sebesar **30** mD tersebut



Gambar 2. Tekanan dan Temperatur Masing-Masing *Layer* Selama Produksi

yang dianggap sebagai nilai permeabilitas sesungguhnya dari model (*true value*).

### **Pembangkitan Ensemبل Inisial**

Ukuran ensemبل merupakan hal yang penting di dalam metode *EnKF*. Metode *EnKF* mengambil asumsi bahwa nilai rata-rata dari ensemبل adalah pendekatan terbaik terhadap nilai sesungguhnya dari model. Pendekatan ini cenderung bergantung kepada ukuran dari ensemبل. Beberapa studi mengusulkan ukuran ensemبل yang besar dengan **100** atau lebih realisasi. Bahkan kadang dibutuhkan hingga **400** realisasi untuk mendapatkan hasil yang memuaskan. Bagaimanapun, ukuran dari ensemble berhubungan

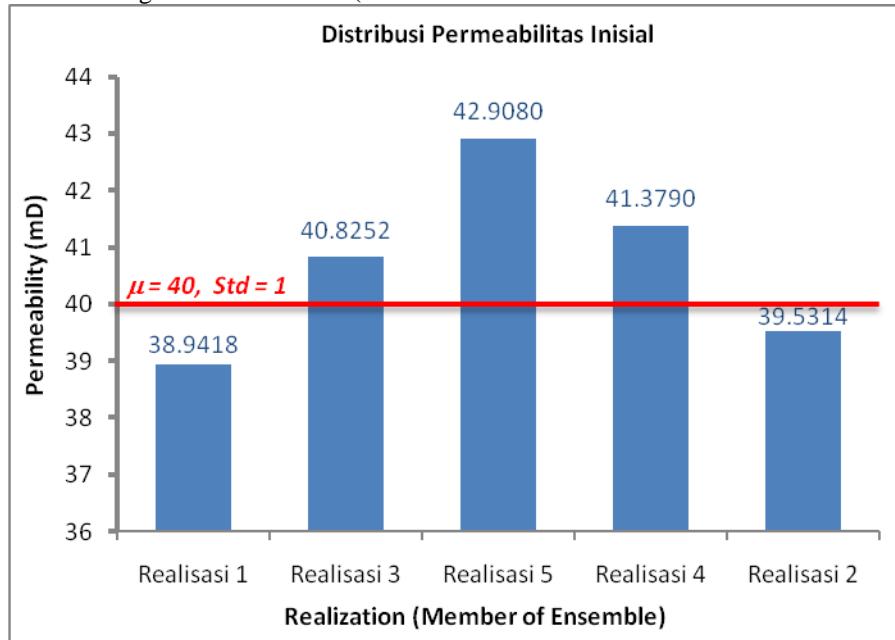
langsung dengan efisiensi dari metode *EnKF* seperti waktu, usaha, dan biaya komputasi (Lee, 2011).

Namun demikian, untuk kasus inversi permeabilitas tunggal di dalam studi tesis ini digunakan ensemبل ukuran kecil dengan hanya **5** realisasi (*very small size ensemble*). Pembangkitan ensemبل ini dilakukan dengan menebak nilai rata-rata sebesar **40.0** mD pada standar deviasi sebesar **1.0** mD. Realisasi atau anggota dari ensemبل ini tersebar di sekitar nilai rata-rata mengikuti distribusi Gaussian seperti diperlihatkan pada Gambar 3.

Masing-masing dari kelima realisasi model akan dipropagasi (*forward*) sepanjang waktu dari **0** tahun hingga **10** tahun. Propagasi tersebut dilakukan

secara bertahap dengan menggunakan simulator reservoir TOUGH2 dan dengan interval waktu (*time*

*step*) sebesar 1.25 tahun. Pada setiap interval, data



Gambar 3. Distribusi Permeabilitas Inisial Dari Ensemبل

observasi yang telah diperlihatkan pada Gambar 2 diasimilasikan ke dalam masing-masing realisasi model. Sehingga sepanjang interval asimilasi akan terdapat 8 kali proses *updating* terhadap masing-masing realisasi model. Data observasi ini akan memperbaharui semua realisasi dari model dan memperbaiki permeabilitas tebakan yang di awal telah ditebak sebesar 40.0 mD.

#### Hasil History Matching Dari Model Uji

##### **Asimilasi Gabungan Temperatur & Tekanan**

Dalam kasus ini, data temperatur observasi dan data tekanan observasi dari sumur diasimilasikan secara bersamaan pada setiap interval propagasi (*time step*) dari realisasi model. Untuk setiap realisasi model, pada awalnya simulator TOUGH2 dijalankan dari 0 tahun menuju 1.25 tahun, selanjutnya tekanan dan temperatur sumur dari model uji akan dibaca dan dibandingkan dengan tekanan dan temperatur observasi pada saat tersebut, jika terdapat perbedaan maka metode *EnKF* akan melakukan penyesuaian dengan menghitung *Kalman gain*, dan setelah itu permeabilitas diperbaharui berdasarkan kepada perhitungan *Kalman gain*.

Proses yang sama dengan di atas dilanjutkan lagi dari waktu 1.25 tahun menuju waktu 2.5 tahun, hingga mencapai waktu asimilasi terakhir yaitu 10 tahun. Dalam kasus ini terdapat 8 series data observasi, 8

interval asimilasi, sehingga akan terdapat pula 8 kali proses *analysis / updating* terhadap realisasi model. Pada setiap interval asimilasi, yakni setiap 1.25 tahun, data observasi yang terdiri dari temperatur dan tekanan dari sumur akan diasimilasikan dan model diperbaharui.

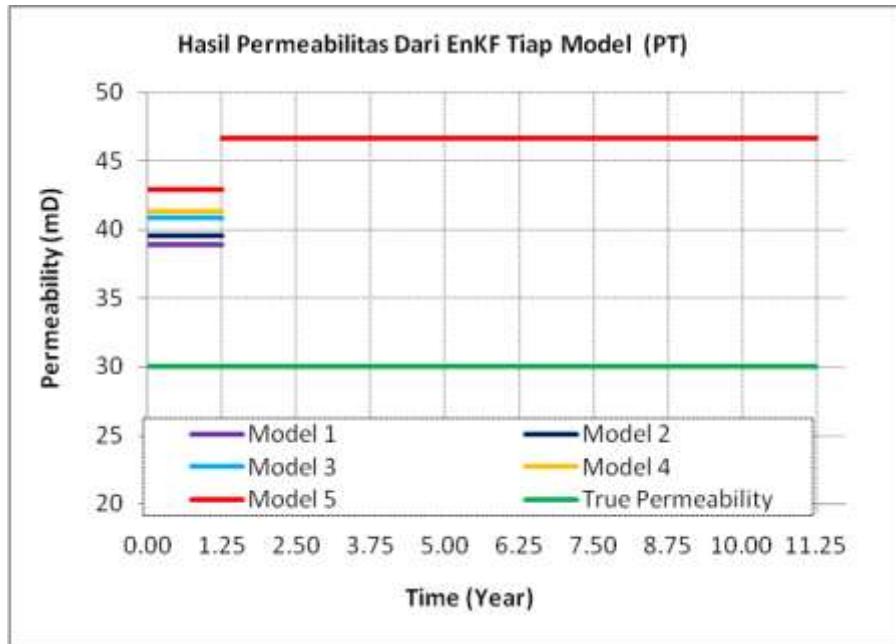
Gambar 4 berikut memperlihatkan hasil inversi permeabilitas dari model uji sepanjang interval asimilasi untuk setiap realisasi dari model uji.

Terlihat pada Gambar 4 bahwa kelima realisasi model langsung konvergen setelah asimilasi data observasi pertama yaitu setelah 1.25 tahun. Akan tetapi, konvergensi yang terjadi tidak menuju ke nilai permeabilitas aktual yaitu 30 mD, melainkan menjauh melampaui angka 40 mD yang merupakan nilai tebakan awal. Metode *EnKF* menganggap nilai rata-rata dari semua realisasi model sebagai pendekatan terbaik terhadap nilai parameter model aktual. Gambar 5. selanjutnya akan memperlihatkan nilai rata-rata dari hasil inversi permeabilitas dari kelima realisasi model.

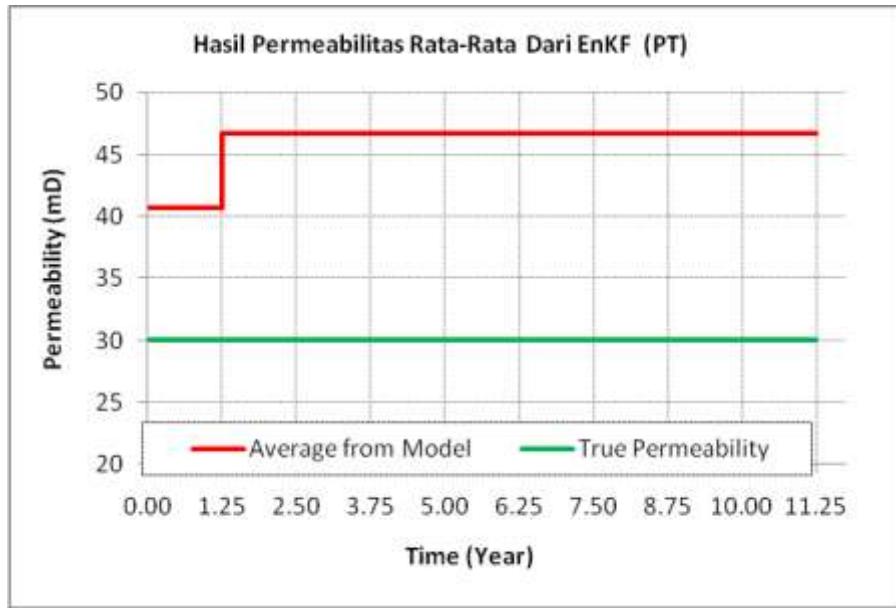
Hasil dari *joint assimilation* antara temperatur dan tekanan seperti diperlihatkan pada Gambar 4 dan 5 menunjukkan bahwa permeabilitas hasil inversi yang diperoleh justru menjauh dari nilai permeabilitas model sesungguhnya meski dalam hal ini telah tercapai keselarasan antara data hasil model dengan

data observasi. Hal ini mengarahkan pada kesimpulan bahwa *joint assimilation* antara data temperatur dan

tekanan observasi berpotensi memberikan hasil yang presisi namun tidak akurat.



Gambar 4. Hasil Inversi Permeabilitas Tiap Realisasi Model Dari Asimilasi *P&T*



Gambar 5. Hasil Inversi Permeabilitas Rata-Rata Dari Asimilasi *P* dan *T*

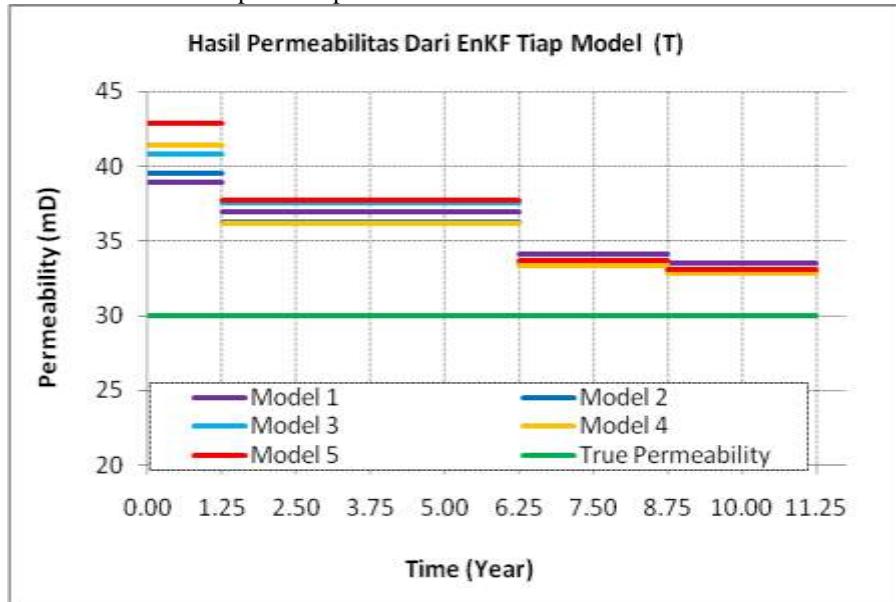
#### *Asimilasi Temperatur*

Perbedaan skenario ini dengan skenario sebelumnya hanya terletak pada jenis data observasi yang diasimilasikan. Di dalam skenario ini hanya data temperatur observasi saja yang diasimilasikan. Oleh karena itu, hanya data temperatur pula yang

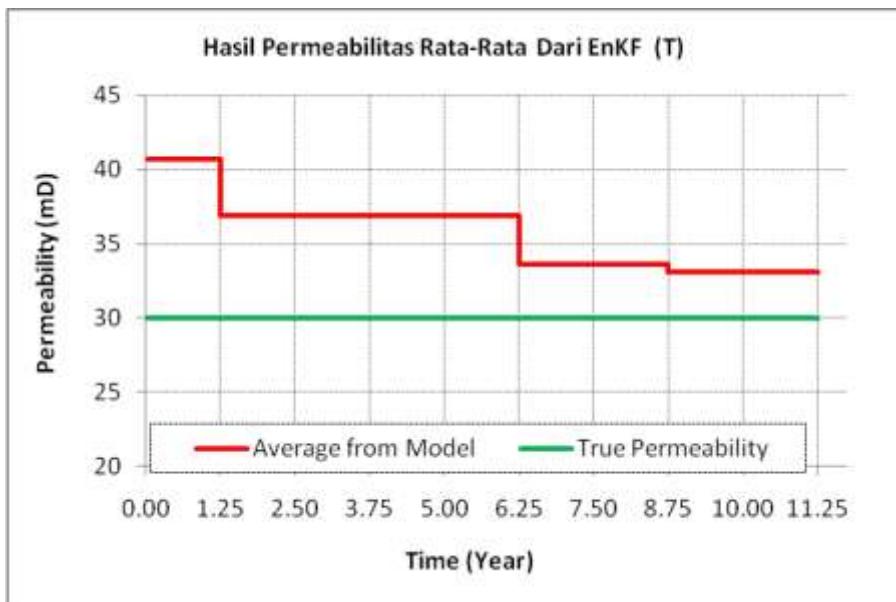
diselaraskan selama proses *history matching* dalam skenario ini. Gambar 6 berikut memperlihatkan hasil inversi permeabilitas dari model uji sepanjang interval asimilasi untuk setiap realisasi model pada skenario asimilasi data temperatur. Selanjutnya Gambar 7 akan memperlihatkan nilai permeabilitas rata-rata hasil inversi *EnKF* dari kelima realisasi

model. Metode *EnKF* menganggap nilai rata-rata ini sebagai pendekatan terbaik terhadap nilai permeabilitas model aktual.

abilitas model aktual.



Gambar 6. Hasil Inversi Permeabilitas Dari Tiap Realisasi Model Dari Asimilasi T



Gambar 7. Hasil Inversi Permeabilitas Rata-Rata Dari Skenario Asimilasi T

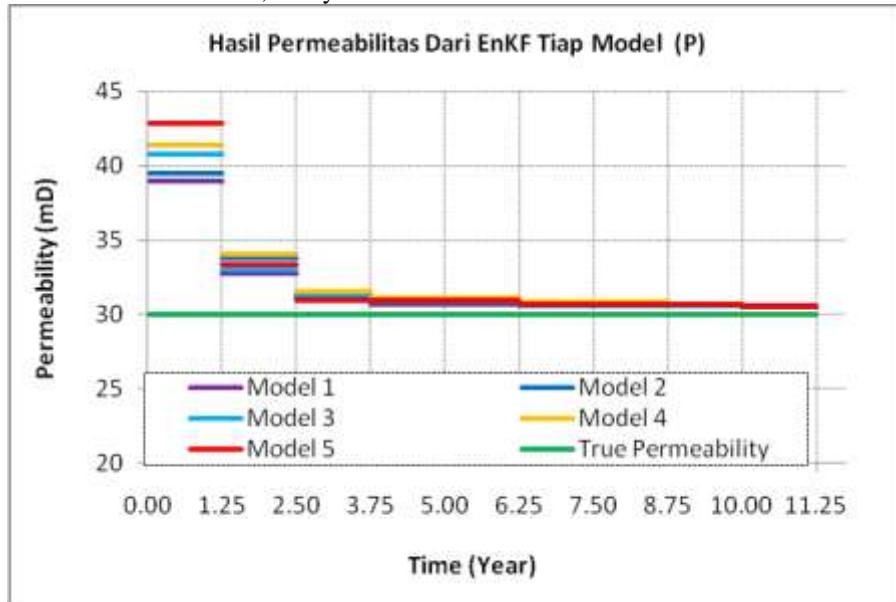
Terlihat pada Gambar 6 dan Gambar 7 bahwa kelima realisasi konvergen secara bertahap menuju permeabilitas sesungguhnya yaitu 30 mD. Kelima realisasi juga konvergen menuju ke nilai rata-rata dari ensemble atau nilai rata-rata dari kelima realisasi. Permeabilitas rata-rata dari hasil *EnKF* konvergen ke nilai 33.0781 mD pada akhir interval asimilasi. Walaupun hingga tahun terakhir asimilasi data, permeabilitas hasil inversi *EnKF* seperti terlihat pada

Gambar 6 dan Gambar 7 tidak sampai menyentuh angka 30.0 mD, namun konvergensi yang terjadi konsisten menuju angka 30.0 mD. Diperkirakan bahwa jika interval asimilasi dibuat menjadi semakin panjang maka kurva permeabilitas rata-rata hasil inversi *EnKF* akan mendekati kurva permeabilitas sesungguhnya dari model uji secara asimtotik.

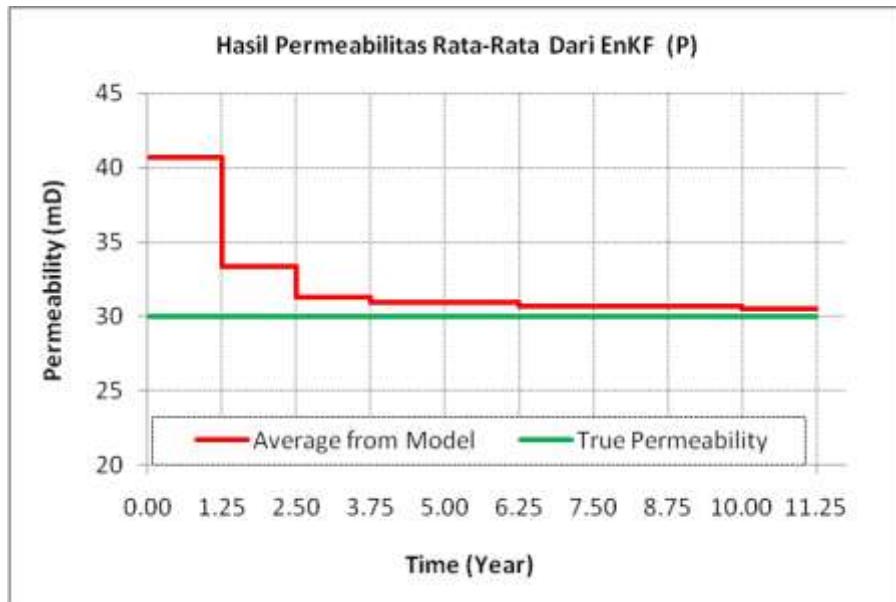
### Asimilasi Tekanan

Pada skenario ini hanya data tekanan observasi saja yang diasimilasikan. Oleh karena itu, hanya data

tekanan pula yang diselaraskan selama proses *history matching*.



Gambar 8. Hasil Inversi Permeabilitas Dari Tiap Realisasi Model Dari Asimilasi  $P$



Gambar 9. Hasil Inversi Permeabilitas Rata-Rata Dari Skenario Asimilasi  $P$

Terlihat pada Gambar 8 dan Gambar 9 bahwa kelima realisasi konvergen secara signifikan menuju nilai permeabilitas sesungguhnya dari model uji yaitu 30 mD. Kelima realisasi juga konvergen secara cepat menuju ke nilai rata-rata dari ensembel atau nilai rata-rata dari seluruh realisasi. Permeabilitas rata-rata dari hasil EnKF bahkan telah mendekati angka 30.0 mD pada saat asimilasi data ketiga, yaitu pada tahun

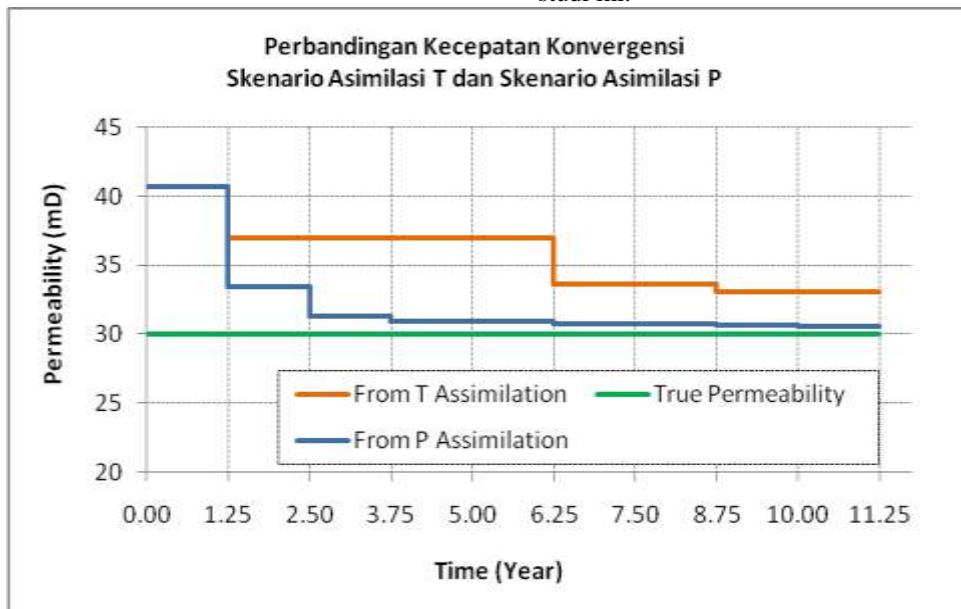
ke-2.5, dengan nilai permeabilitas saat itu sebesar 30.9447 mD. Pada akhir asimilasi, permeabilitas rata-rata dari hasil EnKF mencapai angka 30.56 mD.

### Perbandingan Antar Skenario Asimilasi

Berdasarkan hasil kajian di atas, dapat disimpulkan bahwa asimilasi data tekanan atau data temperatur observasi secara sendiri-sendiri ke dalam skema algoritma EnKF untuk menginversi permeabilitas

model reservoir panas bumi pada tahap *history matching* dapat dilakukan. Namun, kecepatan konvergensi kedua skenario asimilasi ini terlihat

berbeda. Gambar 10 berikut memperlihatkan perbandingan kecepatan tersebut yang diperoleh dari hasil studi ini.



Gambar 10. Kecepatan Konvergensi Skenario Asimilasi *T* dan Skenario Asimilasi *P*

Terlihat pada Gambar 10 di atas bahwa pada skenario asimilasi data tekanan, permeabilitas rata-rata dari hasil inversi *EnKF* jauh lebih cepat konvergen menuju nilai permeabilitas model aktual, sementara skenario asimilasi data temperatur memberikan konvergensi menuju permeabilitas aktual yang berjalan lambat.

Hasil ini bersama-sama dengan hasil yang telah dipaparkan sebelumnya memberikan rekomendasi bahwa hanya data tekanan observasi dari sumur panas bumi yang dapat diasimilasikan ke dalam skema algoritma metode *EnKF* guna menginversi permeabilitas dari model reservoir pada tahap *history matching* di dalam simulasi reservoir panas bumi dengan hasil yang presisi, akurat, dan dapat dipercaya (*reliable*).

Di sisi lain, asimilasi data tekanan dan data temperatur secara bersamaan justru berpotensi memberikan hasil yang presisi namun tidak akurat dan tidak dapat dipercaya (*unreliable*).

## APLIKASI METODE ENKF PADA INVERSI DISTRIBUSI PERMEABILITAS

### Desain Model Uji

Dalam kasus ini, model uji yang digunakan adalah model satu lapis dengan ukuran grid  $5 \times 5$ . Permeabilitas dari setiap grid dibuat berbeda dan

terdistribusi secara sangat acak pada lapisan tersebut. Sehingga dalam kasus ini akan terdapat 25 nilai permeabilitas yang berbeda. Model uji ini merupakan model distribusi permeabilitas dengan sifat non-homogen isotropis dimana nilai permeabilitas di semua tempat pada model uji adalah berbeda namun nilai permeabilitas pada semua arah dalam ruang tetap sama. Kondisi inisial dan nilai berbagai parameter dari model uji ditunjukkan oleh Tabel 2.

Geometri dari model uji diperlihatkan oleh Gambar 11. Warna grid yang berbeda menunjukkan material batuan yang berbeda. Perbedaan dari material batuan terbatas pada perbedaan nilai permeabilitas. Gambar permeabilitas aktual (*actual permeability image*) yang digunakan di dalam kasus ini diperlihatkan oleh Gambar 12 berikut. *Actual permeability image* tersebut berada di dalam rentang nilai permeabilitas  $9 \leq k \leq 120$  mD dan terdistribusi secara acak pada model uji. Gradien permeabilitas antara dua grid bertetangga bisa saja kecil di suatu tempat namun pada tempat lain gradien permeabilitas antara dua grid bertetangga bisa saja sangat besar.

Tujuan yang ingin dicapai di dalam studi kasus ini adalah mendapatkan kembali *actual permeability image* seperti pada Gambar 12 dengan cara melakukan *history matching* terhadap model uji menggunakan metode *EnKF*.

### **Studi Kasus 3 Sumur Observasi (Case for Less Observed Data)**

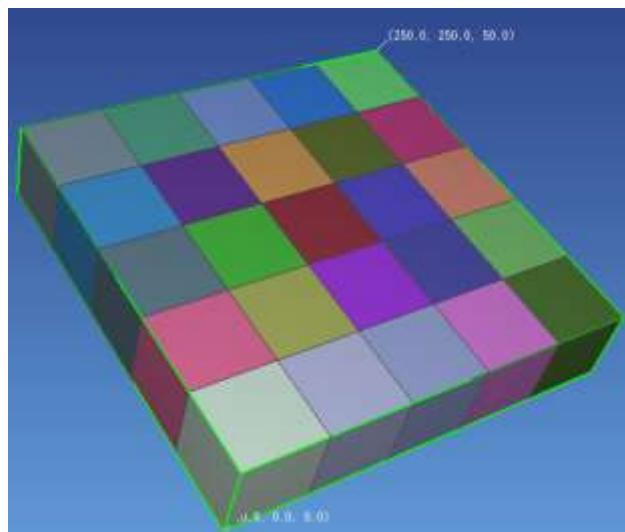
Dalam kasus ini, data observasi yang diasimilasikan adalah berupa data tekanan yang berasal dari 3 sumur

observasi yang terdiri dari 1 sumur produksi dan 2 sumur pemantauan (*monitoring wells*). Posisi ketiga

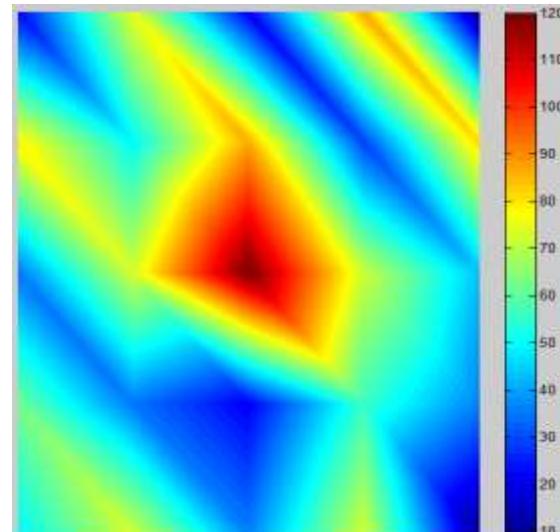
Tabel 2. Parameter Model Uji

Parameter Inisial	Nilai	Satuan	Keterangan
Tekanan	34	bar	Homogen
Temperatur	-	-	Fungsi dari P dan $S_g$
Saturasi uap	0.7	fraksi	Homogen

Parameter Model	Nilai	Satuan	Keterangan
Densitas batuan	2600	kg/m <sup>3</sup>	Homogen
Porositas batuan	0.1	fraksi	Homogen
Konduktivitas panas	2	W/m K	Homogen
Kapasitas panas spesifik	1	kJ/kg K	Homogen

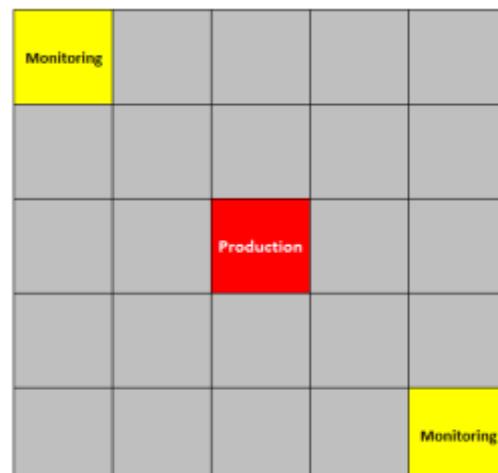


Gambar 11. Grid Model Uji



Gambar 12. Permeabilitas Aktual Model

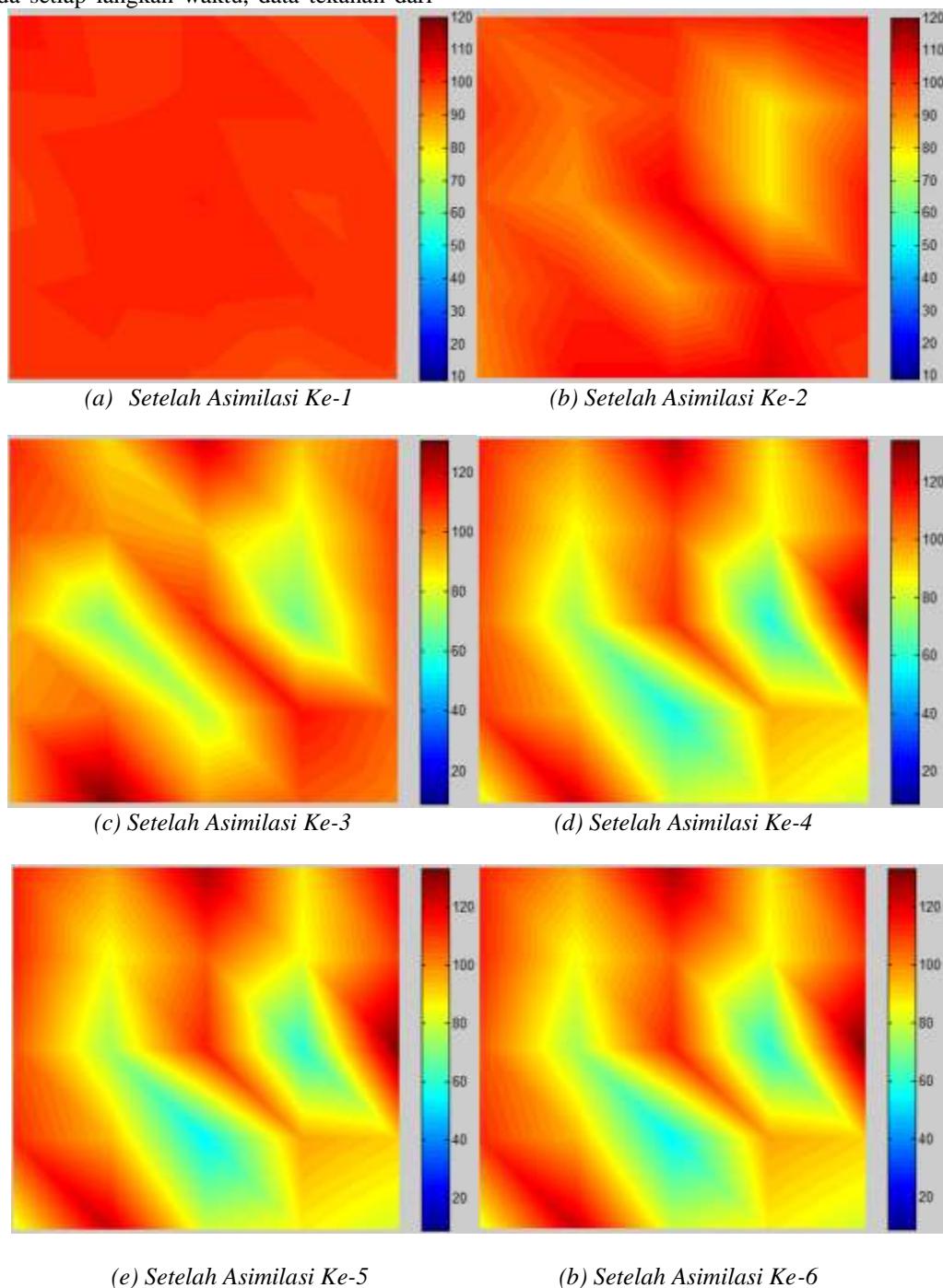
sumur tersebut di dalam model uji diperlihatkan oleh Gambar 13 di bawah ini.



Gambar 13. Posisi Sumur Di Dalam Model Uji Dalam kasus *history matching* dengan menggunakan 3 sumur observasi ini, dibangkitkan ensemble inisial dengan jumlah realisasi model sebanyak 30 model. Permeabilitas realisasi model ditebak pada nilai 100 mD dengan standar deviasi sebesar 1 mD.

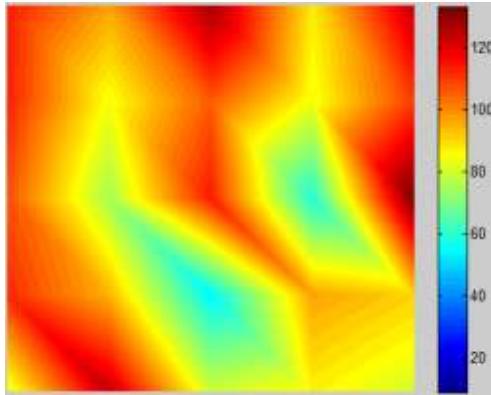
Dengan menggunakan simulator reservoir TOUGH2, masing-masing realisasi dari model uji akan dijalankan dengan langkah waktu (*time step*) selama 1 tahun. Pada setiap langkah waktu, data tekanan dari

sumur observasi untuk setiap realisasi model direkam dan dibandingkan dengan data tekanan observasi. Data tekanan observasi berasal dari data tekanan yang dihasilkan oleh model dengan distribusi permeabilitas aktual seperti diperlihatkan oleh Gambar 12. Jika terdapat perbedaan antara hasil model dan data observasi, maka algoritma akan menghitung matriks *Kalman gain*, dan *permeability image* tebakan sebelumnya akan diperbarui oleh matriks *Kalman gain*.



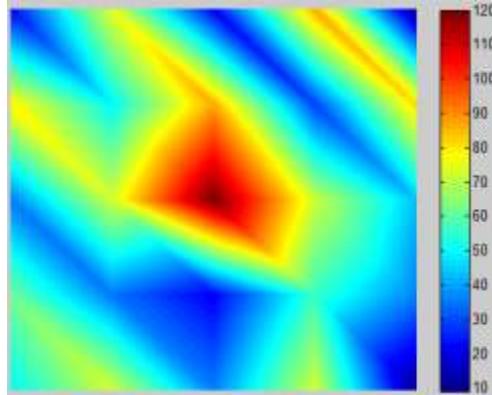
Gambar 14. *Permeability Image* Setelah Asimilasi Data Observasi Dari Ketiga Sumur

Gambar 14 memperlihatkan *permeability image* setelah asimilasi data observasi dari ketiga sumur di dalam model uji. Asimilasi data observasi dilakukan sebanyak enam kali dengan interval waktu setiap 1 tahun. Asimilasi dinyatakan cukup sampai enam kali karena mulai dari asimilasi  $k=4$  hingga  $k=6$  tidak terdapat perubahan *image* yang signifikan baik pola maupun jangkauannya.



(a) Distribusi Permeabilitas Hasil EnKF

Perbandingan antara hasil *EnKF* tersebut dengan *permeability image* aktual dari model diperlihatkan oleh Gambar 15. Terlihat pada Gambar 15 bahwa hasil *EnKF* masih jauh dari sebaran permeabilitas aktual. Meski demikian, setidaknya sudah terdapat beberapa *spot* yang polanya mengikuti sebaran permeabilitas aktual. Rentang nilai permeabilitas Gambar 15 hasil *EnKF* adalah  $53.62 \leq k \leq 133.39$



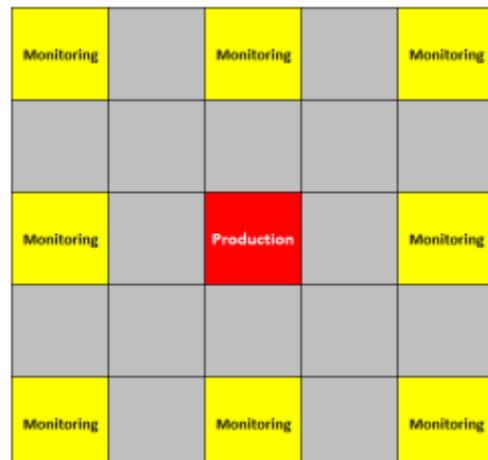
(b) Distribusi Permeabilitas Aktual

Gambar 15. Perbandingan Antara Hasil *EnKF* Dengan Permeabilitas Sesungguhnya (Aktual)  
Kasus Asimilasi Data 3 Sumur Observasi

sedangkan rentang nilai permeabilitas aktual adalah  $9.0 \leq k \leq 120$ .

#### Studi Kasus 9 Sumur Observasi (Case for More Observed Data)

Dalam kasus ini, data observasi yang diasimilasikan adalah berupa data tekanan yang berasal dari 9 sumur observasi yang terdiri dari 1 sumur produksi dan 8 sumur pemantauan (*monitoring wells*). Posisi sumur-sumur tersebut di dalam model uji diperlihatkan oleh Gambar 16 berikut.

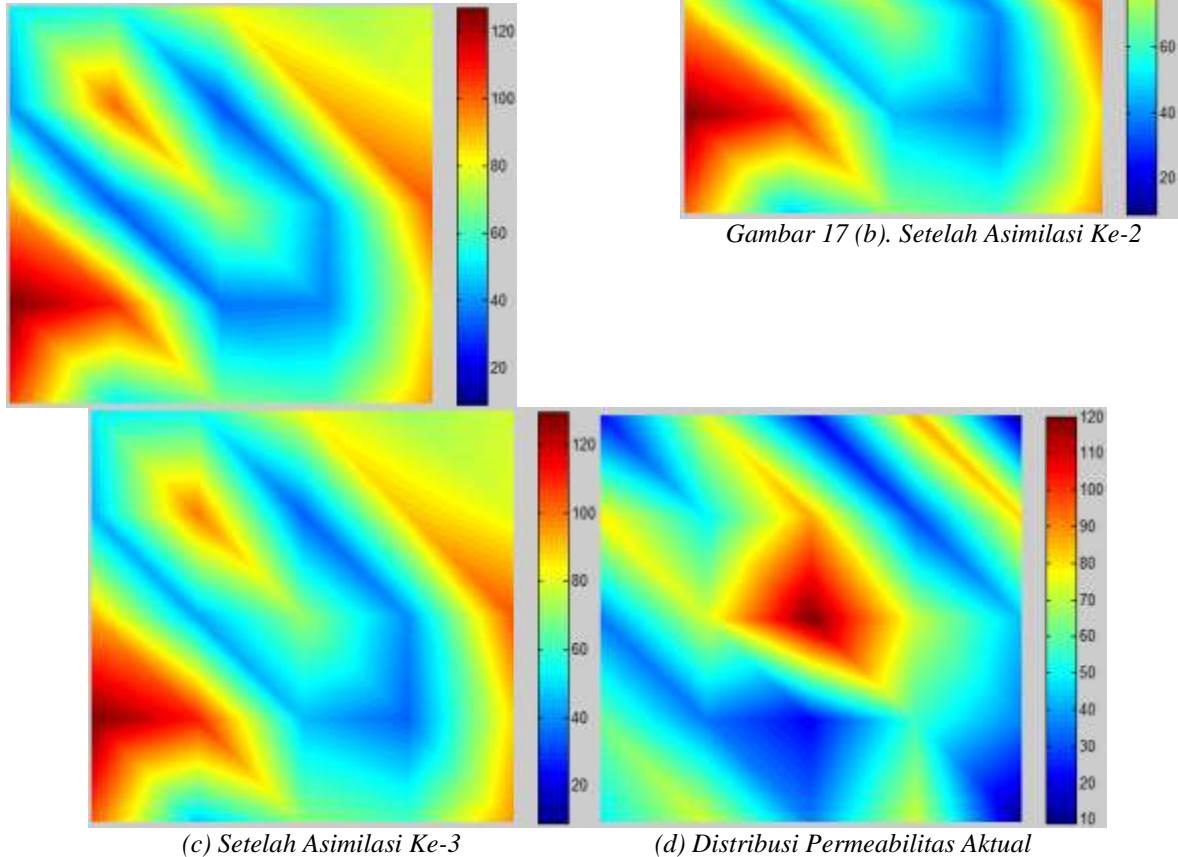


Gambar 16. Posisi Sumur Di Dalam Model Uji

Dalam kasus *history matching* dengan menggunakan 9 sumur observasi ini, dibangkitkan ensemble inisial dengan jumlah realisasi model yang jauh lebih banyak dari sebelumnya yaitu sebanyak 100 model. Permeabilitas realisasi model ditebak pada nilai rata-rata 80 mD dengan standar deviasi sebesar 2 mD. Dengan menggunakan simulator reservoir TOUGH2,

masing-masing realisasi model dijalankan dengan langkah waktu (*time step*) selama 1 tahun.

Gambar 17 berikut memperlihatkan *permeability image* setelah asimilasi data observasi dari 9 sumur dalam model uji. Asimilasi data observasi dilakukan sebanyak 3 kali dengan interval waktu setiap 1 tahun.



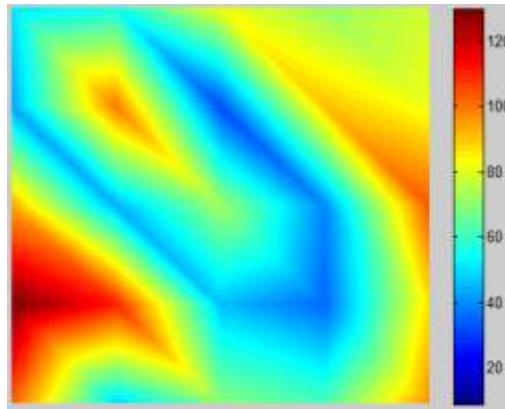
Gambar 17. *Permeability Image* Setelah Asimilasi Data Observasi dan Permeabilitas Aktual  
Kasus Asimilasi Data 9 Sumur Observasi

Asimilasi dinyatakan cukup sampai 3 kali karena tidak ada lagi perubahan pola yang signifikan dari asimilasi ke-2 hingga asimilasi ke-3. Terlihat pada Gambar 17 bahwa hasil dari *EnKF* mulai makin mendekati sebaran permeabilitas aktual. Rentang nilai permeabilitas pada Gambar 17 hasil *EnKF* adalah  $34.09 \leq k \leq 129.66$  sedangkan rentang nilai permeabilitas aktual adalah  $9.0 \leq k \leq 120$ .

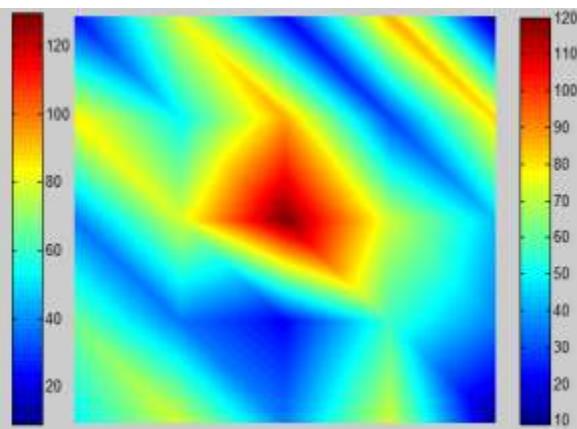
#### **Studi Kasus 9 Sumur Observasi Dengan Ekstra Informasi (Case for More Observed Data with A Priori Information)**

Perbedaan antara kasus ini dengan kasus asimilasi data 9 sumur observasi sebelumnya adalah bahwa pada kasus ini ditambahkan informasi ekstra ke

Gambar 17 (a). Setelah Asimilasi Ke-1



Gambar 17 (b). Setelah Asimilasi Ke-2

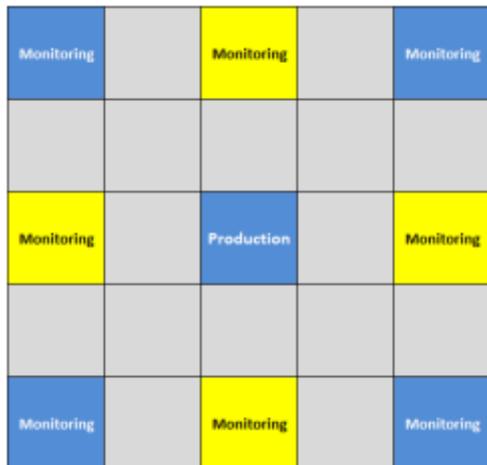


(d) Distribusi Permeabilitas Aktual

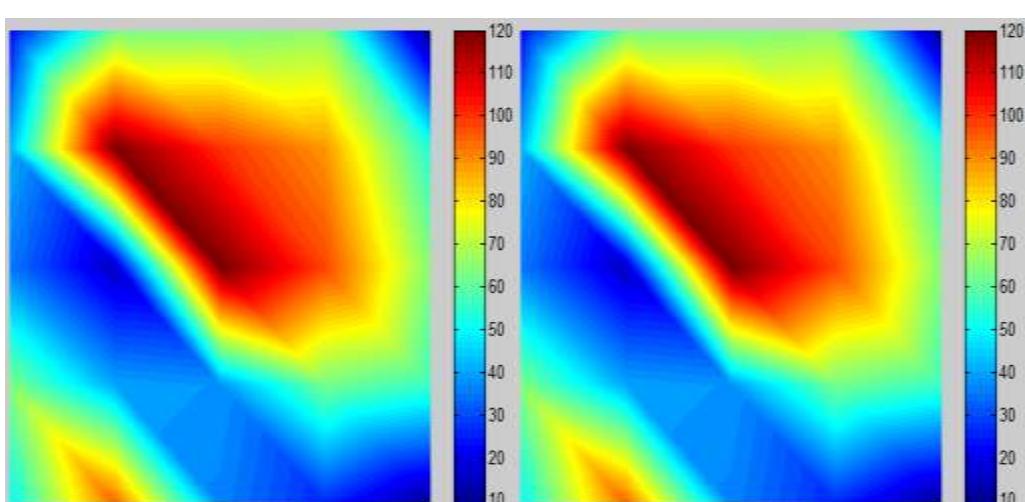
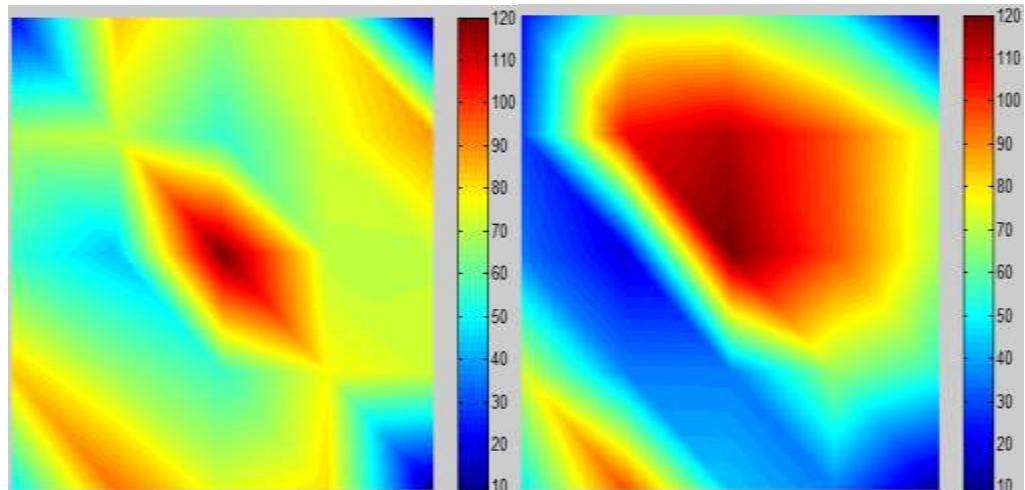
dalam proses inversi. Informasi ekstra yang ditambahkan yaitu nilai permeabilitas sesungguhnya dari 5 sumur observasi yang dimasukkan ke dalam proses inversi dan bertindak sebagai *control points*. Nilai permeabilitas ini dianggap telah diketahui dari awal (*a priori information*) sehingga tidak perlu dikomputasi sepanjang proses asimilasi. Dalam kenyataan di lapangan, informasi ini dapat diketahui dari data logging atau pun data uji sumur. Posisi kelima sumur yang bertindak sebagai *control points* tersebut di dalam model uji ditunjukkan oleh grid biru pada Gambar 18.

Gambar 19 selanjutnya memperlihatkan hasil *permeability image* setelah asimilasi data observasi dari 9 sumur di dalam model uji dengan penambahan

ekstra informasi. Asimilasi data observasi dilakukan sebanyak 4 kali dengan interval waktu setiap 1 tahun. Asimilasi dinyatakan cukup sampai 4 kali karena tidak ada lagi perubahan yang terjadi dari asimilasi ke-3 hingga asimilasi ke-4.



Gambar 18. Posisi Sumur Di Dalam Model Uji

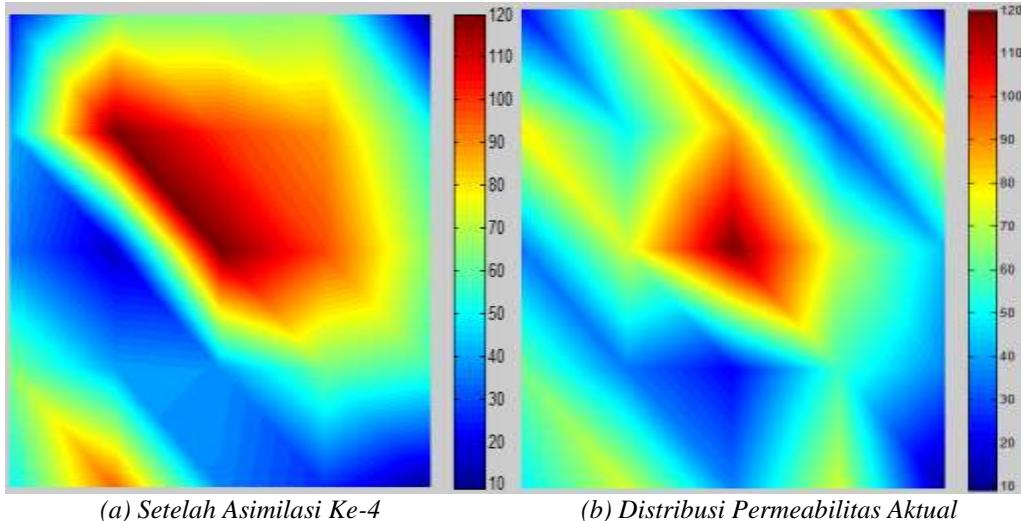


Gambar 20 selanjutnya memperlihatkan perbandingan antara hasil *EnKF* dengan *permeability image* aktual / sebenarnya dari model. *Permeability image* ini jauh lebih baik dibandingkan dengan *image* yang dihasilkan oleh dua jenis skenario sebelumnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan informasi ekstra (*a priori information*) ke dalam proses inversi dengan menggunakan metode *EnKF* tersebut dapat memperbaiki kualitas dan mengurangi ketidak-unikan (*non-uniqueness*) dari *permeability image* yang dihasilkan.

(c) Setelah Asimilasi Ke-3

(d) Setelah Asimilasi Ke-4

Gambar 19. *Permeability Image* Setelah Asimilasi Data Observasi



Gambar 20. Perbandingan Antara Hasil EnKF Dengan *Permeability Image* Aktual

## **KETERBATASAN METODE ENKF DAN USULAN SOLUSI**

Keterbatasan metode *EnKF* berhubungan dengan kehadiran matriks singular dalam proses komputasi yang dapat menyebabkan instabilitas komputasi. Selain itu, juga terdapat keterbatasan yang berhubungan dengan ketidak-unikan solusi yang dihasilkan oleh metode *EnKF*.

## **Masalah Singularitas**

Pada tahap *analysis*, ensembel akan diperbaharui dengan formulasi:

$$X^a = X^f + QH^T(HQH^T + R)^{-1}(Y - HX^f)$$

Proses komputasi terhadap formulasi di atas tidak dapat dilakukan ketika suku  $(HQH^T + R)$  menghasilkan matriks singular. Hal ini karena determinan dari matriks singular bernilai nol sehingga sebuah matriks singular tidak akan memiliki invers. Matriks hasil dari  $(HQH^T + R)$  ini sangat dipengaruhi oleh matriks *cross-covariance* antara parameter model dan data observasi, yaitu matriks Q. Masalah singularitas ini dapat diatasi dengan teknik sederhana yaitu dengan menambahkan bilangan  $\lambda$  ke dalam elemen diagonal dari matriks *cross-covariance*. Nilai  $0 \leq \lambda \leq 1$  dan otomatis menjadi nol ketika matriks tidak singular.

Jadi, penambahan faktor konstanta  $\lambda$  dapat dilakukan dengan mengubah skema pada tahap *analysis* di dalam algoritma *EnKF* menjadi,

$$X^a = X^f + \rho H^T (H \rho H^T + R + M)^{-1} (Y - H X^f)$$

Skema *analysis* yang diusulkan ini disebut sebagai *modified analysis scheme*.

*Rule of thumb*, sebagai tebakan awal dapat digunakan nilai  $\lambda = 1 \times 10^{-14}$ . Ketika diterapkan pada matriks *well-conditioned*, nilai  $\lambda$  tersebut tidak menyebabkan perubahan pada hasil akhir di dalam studi ini. Dengan kata lain, dengan atau tanpa penambahan faktor  $\lambda$ , pada matriks yang *well-conditioned* nilai permeabilitas dari masing-masing realisasi adalah tetap. Hal ini karena pada matriks yang *well-conditioned*, perubahan kecil pada elemen-elemen matriks tidak menyebabkan perubahan yang berarti pada himpunan penyelesaian.

### **Masalah Ketidak-unikan**

Masalah ketidak-unikan solusi di dalam studi ini muncul pada kasus inversi distribusi permeabilitas. *Permeability image* yang digunakan di dalam studi ini merupakan suatu distribusi permeabilitas acak pada bidang (*layer*) horizontal. Terdapat zona-zona ekstrem antara *high permeability* dengan *low permeability*. Di antara beberapa studi kasus, metode *EnKF* terlihat tidak mampu merekonstruksi kembali *permeability image* aktual tersebut dengan cukup baik.

Masalah ketidak-unikan solusi dapat dikurangi dengan mengasimilasikan data observasi yang lebih rapat secara spasial ke dalam model. Namun, seperti

yang telah ditunjukkan di dalam hasil studi ini, asimilasi data observasi yang lebih rapat secara spasial dengan cara mengasimilasikan lebih banyak sumur ternyata belum mampu memperbaiki *permeability image* yang dihasilkan secara sempurna. Hal ini ditengarai karena distribusi permeabilitas dari model bersifat sangat acak dengan zona-zona ekstrem antara *high permeability* dengan *low permeability*.

Ketidak-unikan (*non-uniqueness*) dari solusi dapat dikurangi secara signifikan dengan cara menambahkan *prior information* ke dalam proses inversi. *Prior information* dalam hal ini merupakan informasi tentang nilai permeabilitas aktual dari beberapa sumur yang dianggap telah diketahui dari awal. Informasi ini berfungsi sebagai *control points* dan dimasukkan ke dalam model sepanjang proses asimilasi dan akan mengunci *permeability image* pada titik-titik dimana informasi tersebut berasal. Teknik ini seperti telah diperlihatkan pada hasil studi ini terlihat mampu mengurangi ketidak-unikan dari solusi yang dihasilkan secara signifikan.

## **KESIMPULAN**

Di dalam studi ini telah dilakukan pengkajian analisis metode *Ensemble Kalman Filter* untuk memperkirakan permeabilitas dari suatu model uji reservoir panas bumi selama proses *history matching* baik pada kasus permeabilitas tunggal maupun pada kasus permeabilitas terdistribusi. Hasil-hasil yang telah diperoleh antara lain:

1. Permeabilitas dari model reservoir panas bumi dapat diperkirakan selama proses *history matching* di dalam simulasi reservoir panas bumi dengan menggunakan metode *EnKF* dengan cara mengasimilasikan data tekanan atau data temperatur dari sumur-sumur observasi.
2. Kasus inversi permeabilitas tunggal pada studi ini telah mengindikasikan bahwa asimilasi data tekanan dari sumur observasi ke dalam algoritma metode *EnKF* selama proses *history matching* mampu memberikan hasil permeabilitas yang lebih presisi dan lebih akurat dibandingkan dengan asimilasi data temperatur.
3. Di dalam beberapa kasus, matriks yang dibentuk oleh *cross-covariance* antara parameter model (permeabilitas) dengan respon model (data observasi tekanan atau temperatur) berpotensi menghasilkan matriks singular yang dapat menyebabkan instabilitas di dalam komputasi. Masalah ini dapat dihindari dengan teknik sederhana yaitu menambahkan bilangan  $\lambda$  ke dalam elemen diagonal dari matriks *cross-*

*covariance*. Nilai  $0 \leq \lambda \leq 1$  dan otomatis menjadi nol ketika matriks tidak singular.

4. Dalam kasus yang lebih kompleks, yakni dalam kasus inversi distribusi permeabilitas yang terdistribusi secara sangat acak dan terdapat zona-zona ekstrem antara *high permeability* dan *low permeability*, metode *EnKF* berpotensi menghasilkan solusi yang tidak unik.
5. Ketidak-unikan (*non-uniqueness*) dari solusi yang dihasilkan oleh metode *EnKF* dapat dikurangi dengan cara mengasimilasikan data observasi yang lebih rapat secara spasial dan dapat dikurangi secara lebih signifikan lagi dengan cara menambahkan informasi ekstra (*a priori information*) ke dalam proses asimilasi data selama *history matching*. Informasi ini dianggap telah diketahui dari awal dan bertindak sebagai *control points*.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Devegowda, Deepak., et al. 2007. *Efficient and Robust Reservoir Model Updating Using Ensemble Kalman Filter With Sensitivity-Based Covariance Localization*. SPE 106144.
- Duru, Obinna O. and Roland Horne. 2010. *Joint Inversion of Temperature and Pressure Measurements for Estimation of Permeability and Porosity Fields*. SPE 134290.
- Evensen, Geir. 2009. Data Assimilation: The Ensemble Kaman Filter. Springer-Verlag, Berlin.
- Evensen, Geir. 2003. *The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation*. Ocean Dynamics, vol. 53, p. 343-367.
- Finsterle, S., 2007. *iTOUGH2 User's Guide*. Lawrence Barkeley National Laboratory. University of California.
- Gillijns, S., et al. 2006. *What Is the Ensemble Kalman Filter and How Well Does it Work?*. Proceedings of the 2006 American Control Conference.
- Hadgu, Teklu., et al. 1995. *Coupled Reservoir-Wellbore Simulation of Geothermal Reservoir Behavior*. Geothermics, vol. 24, no. 2, pp. 145-166.
- Heidari, Leila., et al. 2011. *History Matching of Reservoir Models by Ensemble Kalman Filtering: The State of the Art and a Sensitivity Study*. AAPG Memoir 96, p. 249-264.

Kosack, Christian., et al. 2011. *Stochastic Permeability Estimation for the Soultz-Sous-Forêts EGS Reservoir*. Proceedings of the Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University.

Lee, Kyung-Book., et al. 2011. *Improvement of Ensemble Kalman Filter for Improper Initial Ensembles*. Geosystem Engineering, 14(2), p. 79-84.

Srigutomo, Wahyu., et al. 2006. *Quantitative Analysis of Self-Potential Anomaly: Derivative Analysis, Least-Squares Method and Non-Linear Inversion*. Indonesian Journal of Physics, Vol 17 No. 2, p. 49-55.

Tureyen, Omer Inanc and Mustafa Onur. 2011. *Investigation of the Use of the Ensemble Kalman Filter (EnKF) for History Matching Pressure Data from Geothermal Reservoirs*. Proceedings of the Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University.

Tureyen, Omer Inanc., et al. 2007. *Assessing Uncertainty In Future Pressure Changes Predicted By Lumped-Parameter Models: A Field Application*. Proceedings of the Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University.

Vogt, Christian., et al. 2010. *Quantifying Uncertainty in Geothermal Reservoir Modeling*.

Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.

Vogt, Christian., et al. 2010. *Reducing Temperature Uncertainties by Stochastic Geothermal Reservoir Modelling*. Geophys. J. Int., vol. 181, p. 321-333.