

Aplikasi Lattice Gas Automata untuk Mengestimasi Porositas dan Permeabilitas Retakan di Halaman Mesjid Sunda Kelapa Pondok Kelapa Bengkulu Tengah

Halauddin
e-mail : halaustar@yahoo.com

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Indonesia

Diterima 25 Mei 2012; Disetujui 2 Juni 2012

Abstrak - Penelitian ini bertujuan untuk menentukan porositas (ϕ) dan permeabilitas (k) terbesar dan terkecil dari delapan retakan yang bervariasi di halaman Mesjid Sunda Kelapa Pondok Kelapa Bengkulu Tengah. Perhitungan porositas dan permeabilitas dilakukan dengan menggunakan model Lattice Gas Automata (LGA) yang diimplementasikan dengan bahasa program Delphi 7.0. Dari hasil data perhitungan, diperoleh bahwa retakan yang mempunyai permeabilitas sangat besar diperoleh pada Retakan 1 dengan nilai $k = 0,142203880096761$ piksel², dan porositas total untuk Retakan 1 diperoleh sebesar 0,0518810. Sedangkan retakan yang mempunyai permeabilitas sangat kecil diperoleh pada Retakan 6 dengan nilai $k=0,0072498776126890$ piksel², dan porositas total untuk Retakan 6 diperoleh sebesar 0,0106255.

Simulasi aliran fluida pada saat *running* data untuk porositas kecil menyebabkan tumbukan aliran fluida model LGA semakin sering terjadi, dengan demikian menyebabkan permeabilitas menurun. Sebaliknya, porositas besar menyebabkan tumbukan aliran fluida model LGA semakin sedikit terjadi, dengan demikian menyebabkan permeabilitas semakin meningkat.

Kata Kunci: Retakan, porositas, permeabilitas, model LGA dan Mesjid Sunda Kelapa.

1. Pendahuluan

Aliran fluida dalam batuan reservoir bersifat sangat kompleks. Sampai saat ini belum semuanya dapat dipahami dan sukar untuk diterangkan [1]. Dengan kemajuan di bidang komputasi numerik, simulasi aliran fluida telah banyak dilakukan, walaupun masih ditemukan beberapa kesulitan dalam jumlah kisi, dan kestabilan numerik [6]. Beberapa relasi antar parameter reservoir telah dapat diterangkan dengan pemodelan numerik, salah satunya adalah metoda Automata Gas Kisi (LGA, *Lattice Gas Automata*). LGA merupakan variasi dari sistem cellular automata, dengan kisi sebagai mediumnya.

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan fisika (*physical modelling*) untuk validasi mekanisme aliran fluida dalam medium berpori. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan pemahaman komprehensif tentang mekanisme aliran fluida dalam medium berpori dengan yang sebenarnya..

Permeabilitas adalah suatu sifat batuan reservoir untuk dapat meluluskan cairan melalui pori-pori yang berhubungan, tanpa merusak partikel pembentuk atau kerangka batuan tersebut. Henry Darcy telah memperkenalkan suatu persamaan yang sederhana untuk menghitung kecepatan aliran laminar dari suatu fluida yang viskous dalam medium berpori.

Dengan demikian jelaslah bahwa permeabilitas adalah k yang dinyatakan dalam darcy. Definisi API untuk 1 darcy : suatu medium berpori mempunyai permeabilitas sebesar 1 darcy, jika cairan berfasa satu dengan kekentalan 1 sentipoise mengalir dengan kecepatan 1 cm/sekon melalui penampang seluas 1 cm² pada gradien hidrolik satu atmosfer (76,0 mm Hg) per sentimeter dan jika cairan tersebut seluruhnya mengisi medium tersebut.

Dari definisi diatas tidak dijelaskan hubungan antara permeabilitas dan porositas. Sebetulnya tidak ada hubungan antara permeabilitas dan porositas. Batuan yang permeabel selalu porous, tetapi sebaliknya, batuan

yang porous belum tentu permeabel. Hal ini disebabkan karena batuan yang berporositas lebih tinggi belum tentu pori-porinya berhubungan satu dengan yang lain. Juga sebaliknya dapat dilihat, bahwa porositas tidak tergantung dari besar butir, dan permeabilitas merupakan suatu fungsi yang langsung terhadap besar butir [5].

2 Metode Penelitian

2.1 Persamaan Mikrodinamik dan Makrodinamik LGA
Aturan dan medium tumbukan dalam LGA adalah kisi-kisi berbentuk segitiga. Berikut ini adalah perumusan matematis untuk menggambarkan aliran fluida dari sistem cellular metoda LGA.

$$n_i(x + c_i, t + 1) = n_i(x, t) + \Delta[n_i(x, t)] \quad (3)$$

Partikel bergerak dalam kisi heksagonal sebagai variabel boeolan $n_i(x,t)$, nilai tersebut akan bernilai 1 jika ada partikel dan 0 jika tidak ada partikel yang bergerak dari posisi x ke posisi $x+c_i$. Operator delta (Δ) adalah operator tumbukan yang menggambarkan perubahan nilai $n_i(x,t)$. Operator tumbukan ini dapat berharga 0, 1 atau -1. Jika tidak ada perubahan dalam jumlah partikel i akibat peristiwa tumbukan, yaitu jumlah partikel sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama maka nilai $\Delta_i = 1$. Partikel bergerak dari posisi x ke posisi $x+c_i$, partikel bergerak dengan kecepatan satuan unit dalam arah:

$$c_i = \left[\cos\left(\frac{2\pi i}{6}\right), \sin\left(\frac{2\pi i}{6}\right) \right] \quad (4)$$

dimana $i = 1, 2, 3, \dots, 6$.

Partikel-partikel bertumbukan dalam medium kisi gas dan harus memenuhi hukum kekekalan massa, syaratnya

$$\sum_i \Delta_i(n) = 0 \quad (5)$$

dan memenuhi hukum kekekalan momentum

$$\sum_i c_i \Delta_i(n) = 0 \quad (6)$$

dengan menggunakan hubungan (6), maka persamaan mikrodinamik untuk seluruh arah i , hukum kekekalan massa menjadi

$$\sum_i n_i(x + c_i, t + 1) = \sum_i n_i(x, t) \quad (7)$$

Sedangkan untuk mendapatkan persamaan kekekalan momentum diperoleh dengan mengalikan persamaan (3) dengan c_i ,

$$\sum_i c_i n_i(x + c_i, t + 1) = \sum_i c_i n_i(x, t) \quad (8)$$

Persamaan (7) dan (8) menggambarkan evolusi massa dan momentum dalam medan boeolan dan dapat dianggap sebagai persamaan keseimbangan massa dan momentum dari sistem gas kisi.

Persamaan makrodinamik LGA diperoleh dengan melihat kasus pada Gambar 1 yang menggambarkan evolusi yang terjadi dalam sistem. Pada gambar tersebut digambarkan suatu daerah A , dari kisi yang dikelilingi oleh garis S . Persamaan (8) dapat dituliskan sebagai

$$\sum_{x \in A} \sum_i [n_i(x_i, t + 1) - n_i(x, t)] = -(\text{flux netto eluar dari } S)$$

Ruas kiri persamaan tersebut identik dengan persamaan *finite difference* dan ruas kanannya adalah pernyataan diskrit dari integral permukaan. Dengan menyatakan $\langle n_i \rangle$ sebagai jumlah rata-rata partikel untuk semua komponen i dalam satu grup dan diasumsikan $\langle n_i \rangle(x,t)$ berubah lambat terhadap ruang dan waktu. Hukum kekekalan massa mikroskopik dapat dinyatakan menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum \langle n_i \rangle(x, t) = 0 \quad (10)$$

sehingga persamaan (10) dapat ditulis dalam bentuk

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_i \langle n_i \rangle = -\frac{\partial}{\partial \beta} \sum_i \sum_i \langle n_i \rangle c_{i\alpha} \quad (11)$$

dimana komponen α dari kecepatan c_i dinyatakan $c_{i\alpha}$.

Uraian tersebut diatas juga berlaku untuk fluks momentum, sehingga persamaan hukum kekekalan momentum dapat dituliskan sebagai

$$\sum_{x \in A} \sum_i [n_i(x, t + 1) - n_i(x, t)] c_{i\alpha} = -\text{flux nettomomentum arah } \alpha$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk yang lebih sederhana menjadi

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_i \langle n_i \rangle = -\frac{\partial}{\partial \beta} \sum \langle n_i \rangle c_{i\alpha} c_{i\beta} \quad (13)$$

Untuk menyatakan persamaan (12) dan (13), didefinisikan variabel fisika densitas

$$\rho = \sum_i \langle n_i \rangle \quad (14)$$

dan rapat momentumnya

$$\rho u_\alpha = \sum_i \langle n_i \rangle c_{i\alpha} \quad (15)$$

Dengan substitusi persamaan (12) dan (13) ke (11) didapatkan persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = -\frac{\partial}{\partial \alpha} (\rho u_\alpha) \quad (16)$$

dengan mendefinisikan tensor fluks momentum untuk LGA sebagai

$$\Pi^{(0)}_{\alpha\beta} = \sum_i \langle n_i \rangle c_{i\alpha} c_{i\beta} \quad (17)$$

maka persamaan makroskopik momentum menjadi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_\alpha) = -\frac{\partial}{\partial \beta} \Pi^{(0)}_{\alpha\beta} \quad (18)$$

Pada kasus kecepatan yang rendah, tensor $\Pi_{\alpha\beta}$ dapat diekspansi menjadi [3].

$$\Pi_{\alpha\beta} = p_0(\rho)\delta_{\alpha\beta} + \lambda_{\alpha\beta\gamma\delta}(\rho)u_\gamma u_\delta + O(u^4)$$

dimana $\lambda_{\alpha\beta\gamma\delta}$ adalah tensor elastisitas. Akhirnya dari persamaan (16) dapat dilakukan pendekatan persamaan yang mendekati bentuk nyata yaitu:

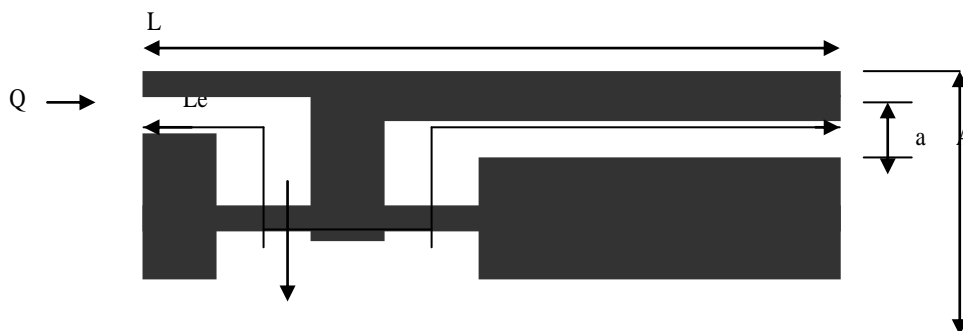
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_\alpha + 2\frac{\partial}{\partial \beta} B(\rho)u_{\alpha\beta} = -\frac{\partial}{\partial \alpha} [p_0(\rho) + A(\rho)u^2]$$

Persamaan (19) tersebut mirip dengan persamaan Euler untuk kasus aliran termampatkan. Sedangkan A dan B adalah dua modul elastis bebas yang dapat diperoleh dari populasi rata-rata $\langle n_i \rangle$ [3].

2.2 Persamaan permeabilitas pada porositas retakan batuan

Pemahaman tentang pola aliran fluida dalam retakan sangat penting untuk dilakukan. Dalam eksplorasi dan eksploitasi, baik itu untuk minyak maupun untuk mencari air tanah, informasi tentang pola retakan dapat memberikan gambaran pergerakan fluida. Sehingga dimungkinkan untuk memprediksi posisi fluida berada. [4].

Pola retakan sederhana diperlihatkan pada Gambar 1.



Gb. 1. Ilustrasi pola retakan sederhana

Le adalah panjang saluran efektif. Persamaan aliran volume fluida yang didapatkan dari ilustrasi di atas adalah [2]:

$$Q = vA = v_p a \quad (20)$$

Porositas diperoleh dari persamaan (21) [2]:

$$\phi = \frac{aL_e}{AL} \quad (21)$$

Permeabilitas dihitung dengan persamaan (22), [6]:

$$k = \frac{\phi_{eff}^3}{cS^2} \quad (22)$$

dengan: ϕ_{eff} : porositas efektif medium.

c : koefisien Kozeny.
 S : *specific surface area*.

$$S = \frac{\phi}{R_0 (1 - \phi)}$$

S dihitung melalui persamaan (23), [2]:
 dengan R_0 adalah radius hidrolis

3.1 Pembuatan Model Retakan

Ada 8 buah retakan yang akan disimulasikan berdasarkan perbedaan porositasnya. Retakan ini diambil dengan menggunakan kamera digital di halaman Mesjid di Desa Sunda Kelapa, Pondok Kelapa, Bengkulu Tengah. Retakan yang di foto mempunyai pola kemenerusan retakan yang berada pada satu jalur. Profil dari kedelapan retakan tersebut adalah seperti ditunjukkan pada Lampiran 1.

3.2 Visualisasi program

Program model ini terdiri atas beberapa program dan keseluruhan program dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman BORLAND DELPHI 6, serta visualisasinya. Program-program tersebut adalah :

1. Program input, di mana program ini digunakan untuk memilih retakan, menentukan arah aliran fluida pada retakan, menentukan time-step aliran fluida serta perintah untuk menjalankan (*run*) program.
2. Program menghitung besarnya porositas retakan.

Dalam bentuk *Notepad* mencatat besarnya porositas total dan porositas efektif dan nilai permeabilitas.

1. Dalam bentuk *bmp.image* diperoleh grafik porositas, grafik permeabilitas vs *time-step*,

3. Program menghitung besarnya permeabilitas retakan.
4. Program menghitung besarnya porositas retakan.
5. Program untuk menampilkan grafik antara Porositas terhadap *time-step*.
6. Program untuk menampilkan grafik antara Permeabilitas terhadap *time-step*.
7. Program gambar hasil (visualisasi) retakan setelah dilewati fluida.

Sedangkan hasil permeabilitas model LGA dituliskan secara lengkap pada Tabel 1.

3. Hasil penelitian

Simulasi dilakukan dengan bahasa program Borland Delphi 7,0., dengan *time-step* konstan sebesar 1500-1700 *time-step*. File disimpan dengan extention (*.md3). Ada beberapa parameter yang langsung diketahui setelah *running* data, yaitu

1. serta ilustrasi aliran fluida melalui retakan sampel untuk setiap variasi sudut pada saat sebelum dan sesudah *running* data

Tabel 1. Hasil Pengamatan

Image	Time-step	Porositas Total (ϕ_{tot})	Porositas Efektif (ϕ_{eff})	Permeabilitas (k)
1	1500	0.0518810	0.0209234216526456	0.142203880096761 piksel ²
2	1500	0.0338579	0.00556938025832445	0.00902223120826222 piksel ²
3	1500	0.0138823	0.00647383635387997	0.042947934702818 piksel ²
4	1500	0.014781	0.00476183311768423	0.0189597117023684 piksel ²
5	1500	0.0128613	0.00415358451072737	0.0116199706719135 piksel ²
6	1700	0.0106255	0.00404910782369986	0.00724987761268907 piksel ²
7	1500	0.0119473	0.00375031736244605	0.00805277288529415 piksel ²
8	1500	0.0244863	0.0161112885482097	0.0886576433445668 piksel ²

4. Kesimpulan

Grafik permeabilitas dan porositas untuk kedelapan retakan pada saat *running* dengan durasi 1500-1700 *time-step* ditunjukkan pada Lampiran 2.

Dari proses *running* data dengan menggunakan model Lattice Gas Automata (LGA) dapat diketahui nilai porositas efektif dan permeabilitas terhadap *time-step* untuk masing-masing retakan. Nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas sangat dipengaruhi oleh porositas retakan. Semakin besar porositas akan berpengaruh linier terhadap kenaikan nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas. Hal ini disebabkan karena simulasi aliran fluida pada saat *running* data untuk porositas kecil menyebabkan tumbukan aliran fluida model LGA semakin sering terjadi, dengan demikian menyebabkan permeabilitas menurun. Sebaliknya, porositas besar menyebabkan tumbukan aliran fluida model LGA semakin sedikit terjadi, dengan demikian menyebabkan permeabilitas meningkat juga.

Dari hasil data perhitungan, diperoleh bahwa retakan yang mempunyai permeabilitas sangat besar diperoleh pada Retakan 1 dengan nilai $k = 0,142203880096761$ piksel², dan porositas total untuk Retakan 1 diperoleh sebesar 0,0518810. Sedangkan retakan yang mempunyai permeabilitas sangat kecil diperoleh pada Retakan 6 dengan nilai $k = 0,0072498776126890$ piksel², dan porositas total untuk Retakan 6 diperoleh sebesar 0,0106255.

Jika ditinjau dari sifat aliran, nilai porositas besar menghasilkan nilai permeabilitas akan besar juga, disebabkan oleh karakteristik aliran yang terjadi pada porositas besar adalah bersifat laminar, dalam hal ini fluida tidak mengalami tumbukan dengan penghalang, tetapi nilai porositas kecil menghasilkan nilai permeabilitas kecil, disebabkan oleh karakteristik aliran yang terjadi bersifat turbulensi, sehingga fluida mengalami tumbukan yang sering terjadi dengan penghalang.

.Dari hasil pengamatan dan pembahasan, dapat dibuat beberapa kesimpulan antara lain:

1. Nilai permeabilitas untuk Retakan 1 adalah 0.142203880096761 piksel², mempunyai porositas total 0.0518810; Nilai permeabilitas untuk Retakan 2 adalah 0.00902223120826222 piksel², mempunyai porositas total 0.0338579; Nilai permeabilitas untuk Retakan 3 adalah 0.042947934702818 piksel², mempunyai porositas total 0.0138823; Nilai permeabilitas untuk Retakan 4 adalah 0.0189597117023684 piksel², mempunyai porositas total 0.014781; Nilai permeabilitas untuk Retakan 5 adalah 0.0116199706719135 piksel², mempunyai porositas total 0.0128613; Nilai permeabilitas untuk Retakan 6 adalah 0.00724987761268907 piksel², mempunyai porositas total 0.0106255; Nilai permeabilitas untuk Retakan 7 adalah 0.00805277288529415 piksel², mempunyai porositas total 0.0119473; serta Nilai permeabilitas untuk Retakan 8 adalah 0.0886576433445668 piksel², mempunyai porositas total 0.0244863.
2. Automata gas kisi model FHP dapat digunakan untuk mengestimasi besarnya permeabilitas retakan batuan berdasarkan parameter apertur retakan dan radius retakan dengan sudut yang bervariasi. Walaupun pola simulasi bersifat deskriptif (pergerakan fluida bersifat random), tidak persis seperti aliran fluida sebenarnya, tetapi model ini dapat mengenali pola retakan untuk mengestimasi permeabilitas dengan baik.

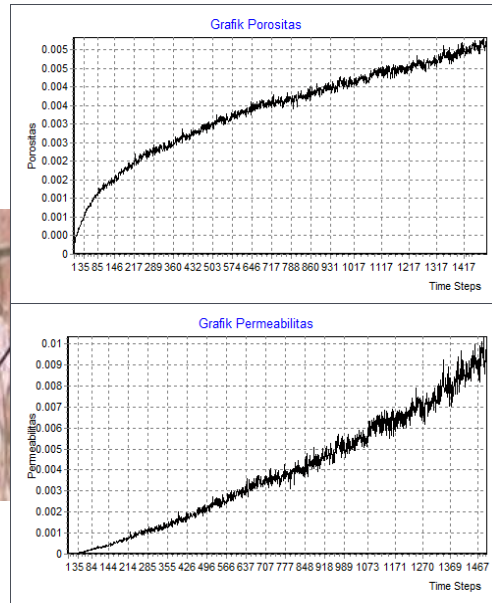
Daftar Pustaka

- [1] Arsyad, Muhammad, 1999., *Simulasi Aliran Non-Newtonian Melalui Media Pori Dengan Kisi Boltzmann*, Tesis Magister, Jurusan Geofisika Terapan, ITB, Bandung.
- [2] Dullien, F.A.L, 1992., *Porous media fluida transport and pore structure*, Academic Press, Inc., New York.
- [3] Frisch U, Hasslacher B, and Pomeau Y, 1986., *Lattice-Gas Automata for the Navier-Stokes Equation*, Physical Review Letters , Vol 56, No 14, pp 1505 - 1508.

- [4] Halauddin, 2003., *Estimasi Permeabilitas Rekahan Dengan Pendekatan Analitik dan Model LGA*, Tesis Magister, Jurusan Geofisika Terapan, ITB, Bandung.
- [5] Koesoemadinata, R.P, 1980., *Geologi Minyak dan Gasbumi*, Jilid 1, Edisi Kedua, Penerbit ITB, Bandung.
- [6] Koponen, A., Kataja, M, 1986., *Permeability and Effective Porosity of Porous Media*, Phys. Rev. E 54, 406-410.

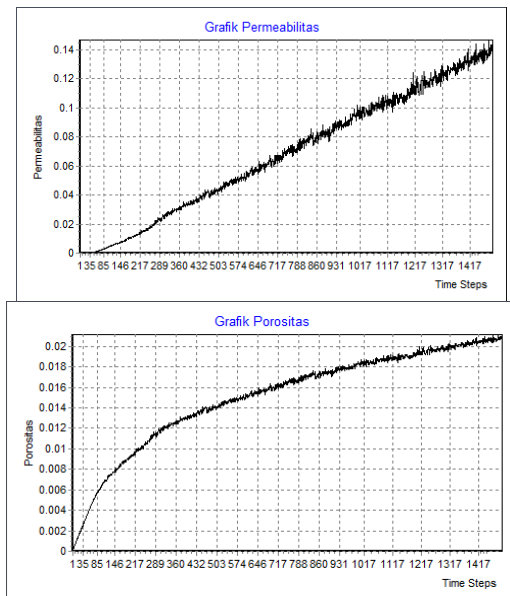
6. Lampiran

6.1. Lampiran 1. Profil kemenerusan kedelapan retakan

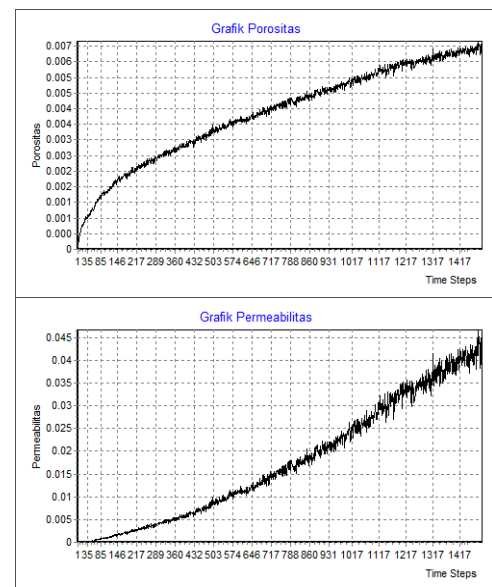


Retakan 2.

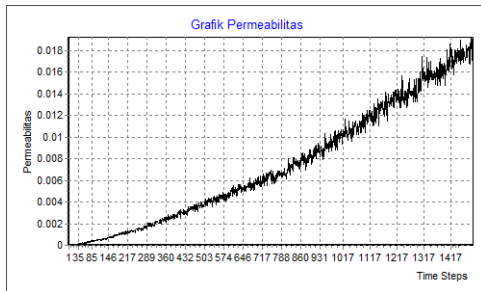
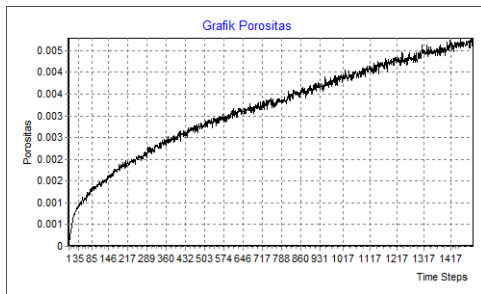
6.2. Lampiran 2. Grafik Permeabilitas dan Porositas untuk kedelapan retakan



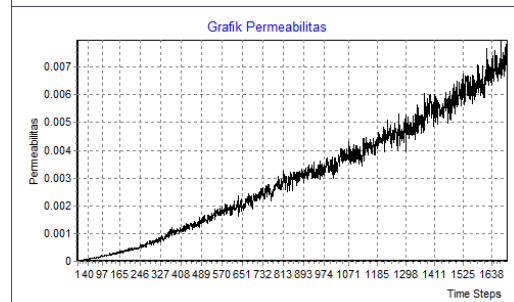
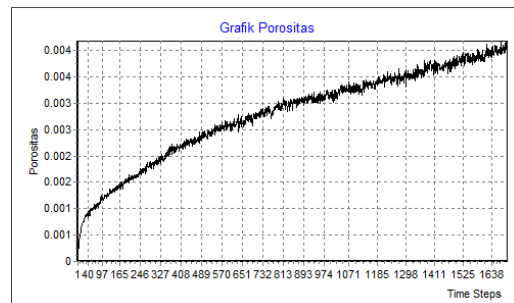
Retakan 1.



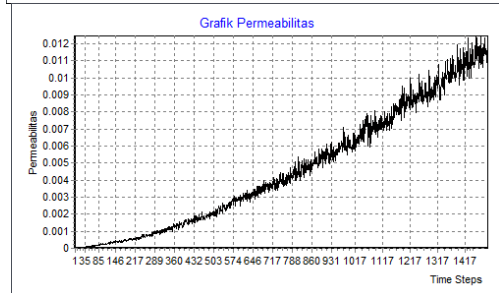
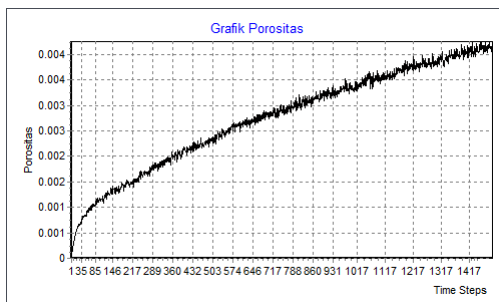
Retakan 3.



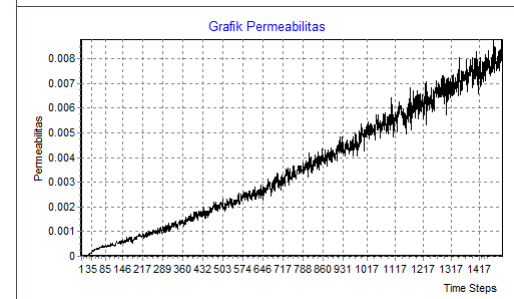
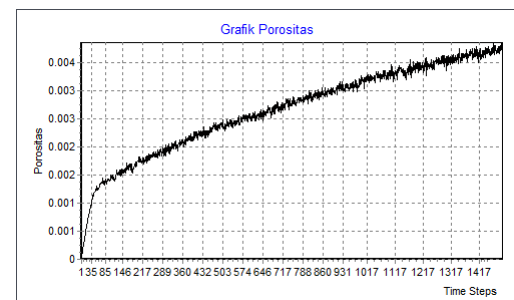
Retakan 4.



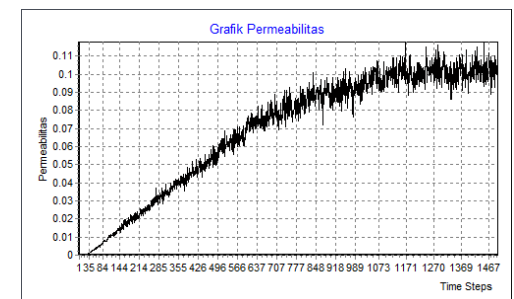
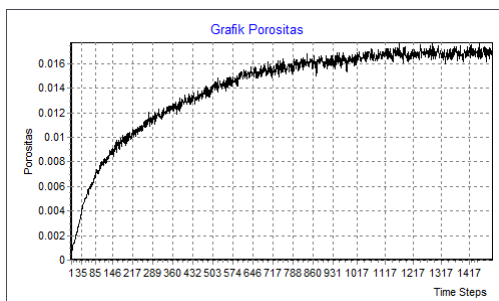
Retakan 6.



Retakan 5.



Retakan 7.



Retakan 8.