

Volume 9. Nomor 1. Januari 2015

ISSN 1907 - 3348



MAJALAH TEKNIK SIMES



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS PROF. DR. HAZAIRIN, SH
Jl. Jenderal Sudirman No.185 Bengkulu
Telp.(0736)-7008640**

Aplikasi Metode Automata Gas Kisi Menggunakan Penghalang Model Persegi dengan Variasi Luas untuk Mengestimasi Porositas Efektif dan Permeabilitasnya

Halauddin¹
M. Ginting²

Abstract

The research purposed to calculate the effective porosity (ϕ_{eff}) and permeability (k) using the barrier model of the square with an area varying are 9 cm^2 , 16 cm^2 , 25 cm^2 , 36 cm^2 and 49 cm^2 . Effective porosity and permeability calculations performed using the model Lattice Gas Automata (LGA), which is implemented with Delphi 7.0 programming language. For model the barrier square with an area of 9 cm^2 , 16 cm^2 , 25 cm^2 , 36 cm^2 and 49 cm^2 , the value of effective porosity and permeability in a row: $\phi_{eff}(L_1)=0,927$, $k(L_1)=0,1077\text{ pixel}^2$; $\phi_{eff}(L_2)=0,884$, $k(L_2)=0,1114\text{ pixel}^2$; $\phi_{eff}(L_3)=0,8247$, $k(L_3)=0,1003\text{ pixel}^2$; $\phi_{eff}(L_4)=0,756$, $k(L_4)=0,7575\text{ pixel}^2$; dan $\phi_{eff}(L_5)=0,667$, $k(L_5)=0,0523\text{ pixel}^2$. From the simulation results, obtained by the area of the square will be a significant effect on the value of effective porosity and permeability. If a square highest, causing the collision LGA fluid flow models have problems more with the barrier, so that the effective porosity and permeability to be small. Conversely, if a square small, causing the collision model of fluid flow LGA experienced fewer barriers with a barrier, so that the effective porosity and permeability increase.

Keywords : effective porosity, permeability, area of square and model of LGA.

Pendahuluan

Ada dua cara umum studi mengenai fluida. Yang pertama adalah dengan mengambil sudut pandang makroskopik yang menggambarkan fluida sebagai kontinum. Yang kedua menggunakan sudut pandang mikroskopik yang menggambarkan interaksi antar partikel dalam fluida. Fluida memiliki karakteristik skala panjang. Pada skala makroskopik, karakteristik tersebut berkaitan dengan lebar channel atau diameter hambatan atau bisa juga ukuran pusaran. Pada skala mikro, karakteristik ini ditentukan oleh jarak perpindahan partikel sebelum terjadi tumbukan, atau *mean free path*. Pada skala mikro, *mean free path* untuk fluida cair jauh lebih kecil daripada gas (Bimo. BB, 2009).

Dengan kemajuan di bidang komputasi numerik, simulasi aliran fluida telah banyak dilakukan, walaupun masih ditemukan beberapa kesulitan dalam jumlah kisi, dan kestabilan numerik (Koponen, 1998). 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 laminer dari suatu fluida yang viskous dalam medium berpori.

¹Dosen Fak. MIPA Jur. Fisika UNIB

²Dosen Fak. MIPA Jur. Fisika UNIB

Majalah Teknis Simes Vol. 9 No. 1 Januari 2015

$$q = \frac{k}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

dimana :

q : laju aliran per luas penampang dinyatakan dalam sentimeter per sekon

k : permeabilitas hidrolik

η : viskositas fluida

$\frac{dp}{dx}$

: gradien tekanan

Persamaan (2) di dalam disiplin geohidrologi dapat dimodifikasi menjadi :

$$u = k_f \frac{\Delta h}{l} \quad (2)$$

dimana :

k_f = koefisien rembesan

Δh = beda tinggi head

l = panjang medium

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 poriporinya 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 (Koesoemadinata, R.P, 1980).

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 boeelan $n_i(x, t)$, 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:

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

(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 boeelan 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:

$$\sum_{x \in A} \sum_t [n_i(x, t+1) - n_i(x, t)] \quad (9)$$

$$= -(\text{flux netto massa yang keluar dari S})$$

Ruas kiri persamaan tersebut identik dengan persamaan *finite difference* dan ruas kanannya adalah pernyataan diskrit dari integral permukaan. Dengan menyatakan $\sum \langle n_i \rangle$ 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

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

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:

$$\sum_{x \in A} \sum_t [n_i(x, t+1) - n_i(x, t)] f_{i\alpha}$$

$$= -\text{flux nettomomentum arah } \alpha \text{ yang keluar dari S} \quad (12)$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk yang lebih sederhana menjadi:

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

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 (Frisch U, dkk., 1986):

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

dimana $\lambda_{\alpha\beta\gamma\delta}$ adalah tensor elastisitas.

Akhirnya dari persamaan (16) dapat dilakukan pendekatan persamaan yang mendekati bentuk nyata yaitu:

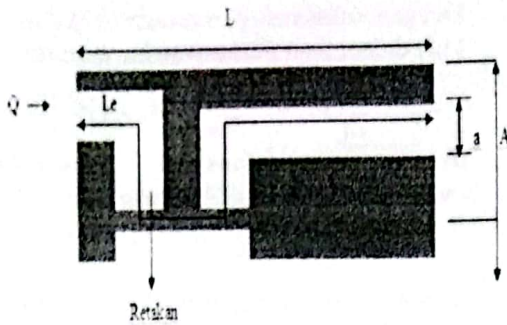
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_\alpha + 2 \frac{\partial}{\partial \beta} B(\rho) u_{\alpha\beta} \quad (19)$$

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

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 $\langle n_i \rangle$ (Frisch U, dkk., 1986).

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 (Halauddin, 2003). Pola retakan sederhana diperlihatkan pada Gambar 1.



Gb. 1. Ilustrasi pola retakan sederhana

L_e adalah panjang saluran efektif. Persamaan aliran volume fluida yang didapatkan dari ilustrasi di atas adalah (Dullien, 1992):

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

Porositas diperoleh dari persamaan (21) (Dullien, 1992):

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

Permeabilitas dihitung dengan persamaan (22), (Koponen, et al, 1996):

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

dengan: ϕ_{eff} : porositas efektif medium.

c : koefisien Kozeny.

S : *specific surface area*.

S dihitung melalui persamaan (23), (Dullien, 1992):

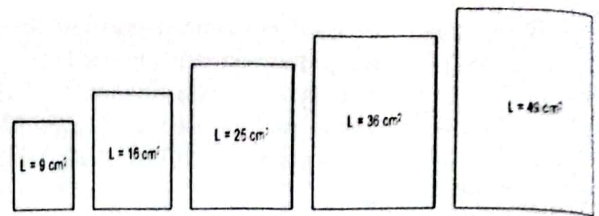
$$S = \frac{\phi}{R_0(1-\phi)} \quad (23)$$

dengan R_0 adalah tinggi hidrolis.

Metode Penelitian

Pembuatan Model Retakan

Ada 5 buah penghalang model persegi yang akan disimulasikan berdasarkan perbedaan luas. Kelima model persegi dibuat dengan ukuran luas bervariasi yaitu 9 cm^2 , 16 cm^2 , 25 cm^2 , 36 cm^2 dan 49 cm^2 , seperti diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi model retakan dengan persegi sebagai penghalang

2.2.2. 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.
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.

Hasil dan pembahasan

Hasil penelitian

Simulasi dilakukan dengan bahasa program Borland Delphi 7.0., dengan *time-step* konstan sebesar 1000 *time-step*. File disimpan dengan extension (*.md3). Ada beberapa parameter yang langsung diketahui setelah *running data*, yaitu:

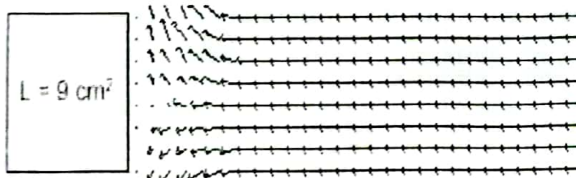
1. Dalam bentuk *notepad* mencatat besarnya porositas total dan porositas efektif dan nilai permeabilitas.
2. Dalam bentuk *bmp.image* diperoleh grafik porositas, grafik permeabilitas vs *time-step*, serta ilustrasi aliran fluida melalui retakan sampel untuk setiap variasi sudut pada saat sebelum dan sesudah *running data*.

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

Tabel 1. Hasil Pengamatan

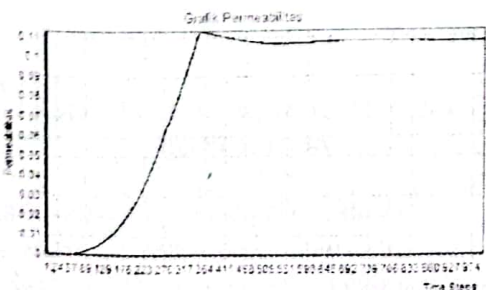
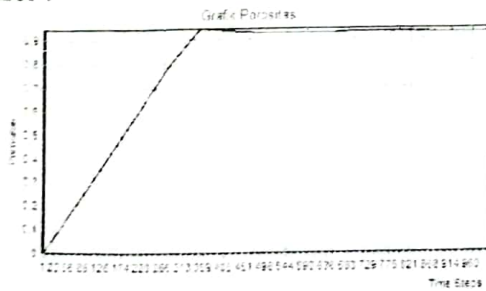
Luas Persegi	Time-step	Porositas Total (ϕ_{tot})	Porositas Efektif (ϕ_{eff})	Permeabilitas (k)
9 cm ²	1000	0,994	0,927	0,1077 piksel ²
16 cm ²	1000	0,992	0,884	0,1114 piksel ²
25 cm ²	1000	0,988	0,825	0,1003 piksel ²
36 cm ²	1000	0,985	0,755	0,7575 piksel ²
49 cm ²	1000	0,981	0,666	0,0523 piksel ²

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model dengan luas penghalang persegi 9 cm² pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 3.



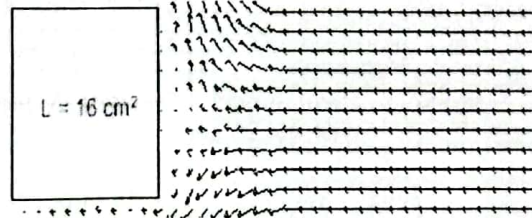
Gambar 3. Hasil model LGA untuk luas persegi 9 cm²

Pada Gambar 4, diperlihatkan besarnya nilai porositas efektif dan permeabilitas untuk luas persegi 9 cm², masing-masing dengan nilai 0,927 dan 0,1077 piksel².



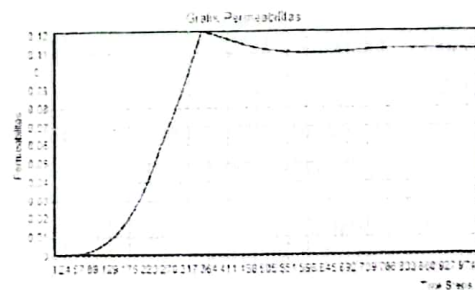
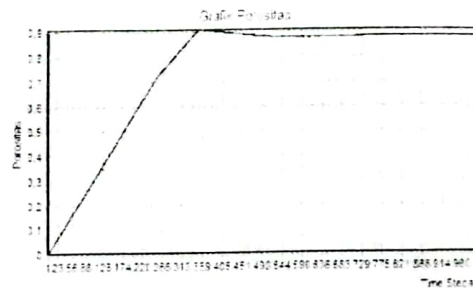
Gambar 4. Grafik Porositas dan Permeabilitas hasil model LGA untuk luas 9 cm²

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model dengan luas penghalang persegi 16 cm² pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 5.



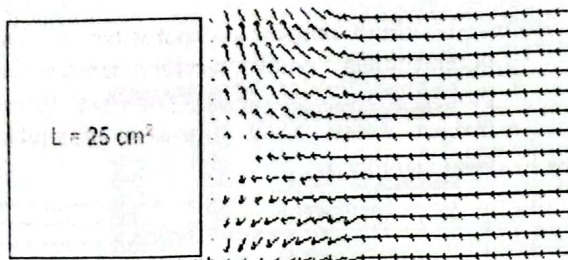
Gambar 5. Hasil model LGA untuk luas persegi 16 cm²

Pada Gambar 6, diperlihatkan besarnya nilai porositas efektif dan permeabilitas untuk luas 16 cm², masing-masing dengan nilai 0,992 dan 0,1114 piksel².



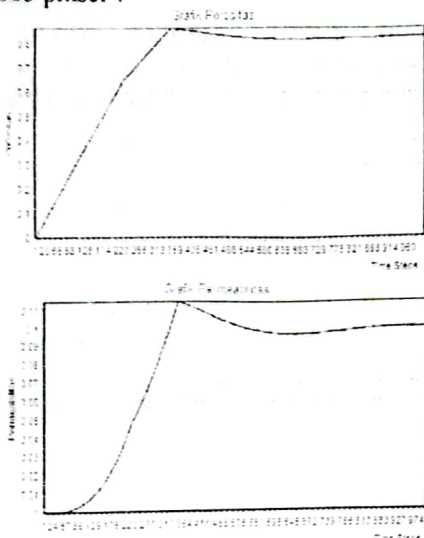
Gambar 6. Grafik Porositas dan Permeabilitas hasil model LGA untuk luas 16 cm²

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model dengan luas penghalang persegi 25 cm² pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 7.



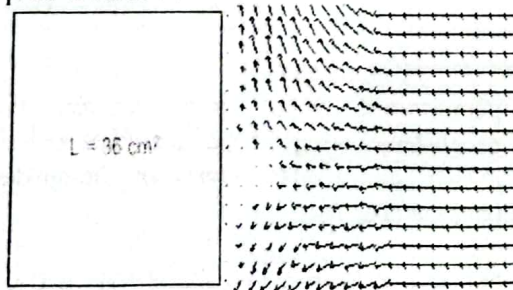
Gambar 7. Hasil model LGA untuk luas persegi 25 cm²

Pada Gambar 8, diperlihatkan besarnya nilai porositas efektif dan permeabilitas untuk luas persegi 25 cm², masing-masing dengan nilai 0,8247 dan 0,1003 piksel².



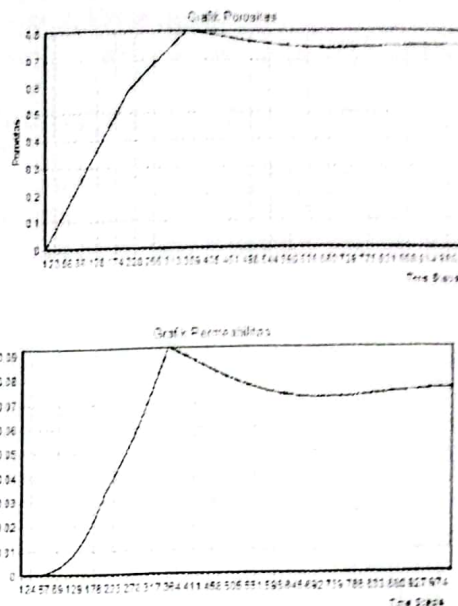
Gambar 8. Grafik Porositas dan Permeabilitas hasil model LGA untuk tinggi 25 cm²

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model dengan luas penghalang persegi 36 cm² pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 9.



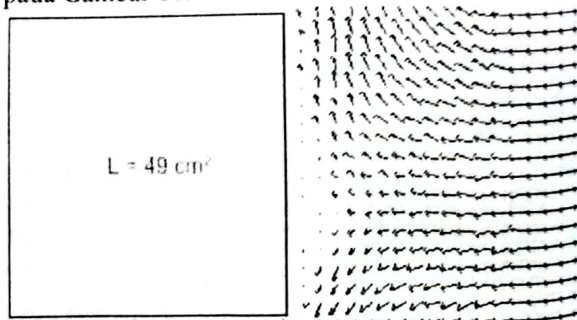
Gambar 9. Hasil model LGA untuk luas persegi 36 cm²

Pada Gambar 10, diperlihatkan besarnya nilai porositas efektif dan permeabilitas untuk luas 36 cm², masing-masing dengan nilai 0,756 dan 0,7575 piksel².



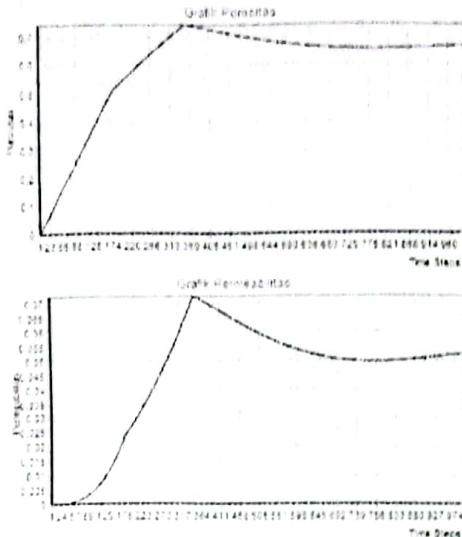
Gambar 10. Grafik Porositas dan Permeabilitas hasil model LGA untuk luas 36 cm²

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model dengan luas penghalang persegi 49 cm² pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Hasil model LGA untuk luas persegi 49 cm²

Pada Gambar 12, diperlihatkan besarnya nilai porositas efektif dan permeabilitas untuk luas 49 cm², masing-masing dengan nilai 0,667 dan 0,0523 piksel².



Gambar 12. Grafik Porositas dan Permeabilitas hasil model LGA untuk luas 49 cm²

Pembahasan

Dari hasil simulasi pada Gambar 3; 5; 7; 9 dan 11, ditunjukkan bahwa gerak fluida memiliki pola kecepatan yang kompleks (laminar dan turbulen). *Time-step* untuk setiap simulasi adalah 1000. Pemberian nilai *time-step* sebesar 1000 telah dicoba sebelumnya untuk kelima jenis image, jadi dapat dipastikan pada nilai *time-step* 1000 proses running data untuk menghitung porositas dan permeabilitas telah mencapai keadaan mantap (*steady state*). Proses fisis yang terjadi dalam model LGA ini adalah terbuktinya aliran laminar dan turbulen.

Model Lattice Gas Automata (LGA) dapat menghitung nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas terhadap *time-step* untuk variasi luas penghalang model persegi hasil model. Nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas sangat dipengaruhi oleh luas persegi yang diberikan. Semakin besar luas persegi akan menyebabkan nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas akan menjadi lebih kecil, begitu juga sebaliknya, jika luas persegi semakin kecil, menyebabkan nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas akan menjadi lebih besar. Hal ini disebabkan karena simulasi aliran fluida pada saat *running* data untuk luas persegi kecil menyebabkan fluida kurang mendapat hambatan sehingga menyebabkan ketiga variabel di atas menjadi

meningkat, begitu juga sebaliknya, jika untuk luas persegi besar menyebabkan fluida mendapat hambatan yang lebih banyak, sehingga menyebabkan ketiga variabel di atas menjadi menurun/kecil.

Secara hidrodinamika, pola aliran fluida untuk model persegi sebagai penghalang, tidak ada perbedaan yang terjadi secara signifikan untuk luas persegi yang kecil ataupun untuk luas persegi yang besar. Pola aliran fluida dengan menggunakan model automata gas kisi lebih didominasi oleh aliran laminar, dan aliran secara turbulensi hanya sedikit terjadi di daerah sisi persegi. Nilai porositas dan permeabilitas semata-mata hanya ditentukan oleh luas persegi, hal ini disebabkan karena fluida harus menempuh sesuai dengan besar atau kecilnya model luas persegi yang diberikan.

Kesimpulan

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

1. Nilai porositas efektif (ϕ_{eff}) dan permeabilitas (k) untuk 5 (lima) model persegi sebagai penghalang dengan luas 9 cm²; 16 cm²; 25 cm²; 36 cm²; dan 49 cm² diperoleh berturut-turut: $\phi_{eff}(L_1)=0,927$, $k(L_1)=0,1077$ piksel²; $\phi_{eff}(L_2)=0,884$, $k(L_2)=0,1114$ piksel²; $\phi_{eff}(L_3)=0,8247$, $k(L_3)=0,1003$ piksel²; $\phi_{eff}(L_4)=0,756$, $k(L_4)=0,7575$ piksel²; dan $\phi_{eff}(L_5)=0,667$, $k(L_5)=0,0523$ piksel².
2. Automata gas kisi model FHP dapat digunakan untuk mengestimasi besarnya permeabilitas retakan batuan dengan model penghalang model persegi berdasarkan luas 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. Bimo. BB, 2009., *Makrodinamika dan Mikrodinamika pada Lattice Gas*

Cellular Automata, Jurusan Fisika
Fakultas MIPA, 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 IGA*, 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.