

SIMETRI

Jurnal Ilmu Fisika Indonesia

Volume 2 Nomor 1 Januari 2014

Fisika Teori, Kuantum, Matematik, Gravitasi
Fisika Zat Mampat, Material, Optika, Nuklir
Fisika Elektronika, Instrumentasi, Komputasi
Geofisika, Fisika Lingkungan

Diterbitkan Oleh:
Himpunan Fisika Indonesia (HFI) Wilayah Barat
(Konsorsium Jurusan Fisika BKS-PTN Wilayah Barat)

SIMETRI

Vol. 2

No. 1

Halaman
1 - 35

Januari
2014

ISSN
2301-7112

<http://jsimetri.wordpress.com>

Aplikasi Automata Gas Kisi untuk Mengestimasi Porositas Efektif dan Permeabilitas yang Menggunakan Penghalang Model Bola dengan Radius Bervariasi

HALAUDDIN

Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Bengkulu, Indonesia

INTISARI: Penelitian ini bertujuan untuk menghitung porositas efektif (ϕ_{eff}) dan permeabilitas (k) yang menggunakan penghalang model bola dengan dengan radius bervariasi yaitu 1 cm; 1,6 cm; 2 cm; 2,2 cm; dan 2,5 cm. Perhitungan porositas efektif dan permeabilitas dilakukan dengan menggunakan model Lattice Gas Automata (LGA) yang diimplementasikan dengan bahasa program Delphi 7.0. Untuk model penghalang bola dengan radius 1 cm, 1,6 cm, 2 cm, 2,2 cm dan 2,5 cm, diperoleh nilai porositas efektif dan permeabilitas berturut-turut: $\phi_{\text{eff}}(R_1)=0,615$, $k(R_1)=8,984$ piksel²; $\phi_{\text{eff}}(R_2)=0,534$, $k(R_2)=6,463$ piksel²; $\phi_{\text{eff}}(R_3)=0,525$, $k(R_3)=7,418$ piksel²; $\phi_{\text{eff}}(R_4)=0,489$, $k(R_4)=5,682$ piksel²; dan $\phi_{\text{eff}}(R_5)=0,447$, $k(R_5)=1,969$ piksel². Dari hasil simulasi, diperoleh bahwa radius bola akan berpengaruh signifikan terhadap nilai porositas efektif dan permeabilitas. Jika radius bola besar, menyebabkan tumbukan aliran fluida model LGA mengalami hambatan lebih banyak dengan penghalang, sehingga porositas efektif dan permeabilitas menjadi kecil. Sebaliknya, Jika radius bola kecil, menyebabkan tumbukan aliran fluida model LGA mengalami hambatan lebih sedikit dengan penghalang, sehingga porositas efektif dan permeabilitas semakin besar.

KATA KUNCI: porositas efektif, permeabilitas, radius bola dan model LGA.

Abstract: This research purposed to calculate the effective porosity (ϕ_{eff}) and permeability (k) using the barrier model of the sphere with a radius varying the 1 cm 1.6 cm, 2 cm 2.2 cm and 2.5 cm. 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 sphere with a radius of 1 cm, 1.6 cm, 2 cm, 2.2 cm and 2.5 cm, the value of effective porosity and permeability in a row: $\phi_{\text{eff}}(R_1)=0,615$, $k(R_1)=8,984$ pixel²; $\phi_{\text{eff}}(R_2)=0,534$, $k(R_2)=6,463$ pixel²; $\phi_{\text{eff}}(R_3)=0,525$, $k(R_3)=7,418$ pixel²; $\phi_{\text{eff}}(R_4)=0,489$, $k(R_4)=5,682$ pixel²; and $\phi_{\text{eff}}(R_5)=0,447$, $k(R_5)=1,969$ pixel². From the simulation results, obtained by the radius of the sphere will be a significant effect on the value of effective porosity and permeability. If a big sphere radius, 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 small sphere radius, 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, radius of sphere and model of LGA.

E-MAIL: halaustar@yahoo.com

1 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 pusanan. 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^[1].

Dengan kemajuan di bidang komputasi numerik, simulasi aliran fluida telah banyak dilakukan, walaupun masih ditemukan beberapa kesulitan dalam

jumlah kisi, dan kestabilan numerik^[2]. 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.

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

dengan q = laju aliran per luas penampang dinyatakan dalam sentimeter per sekon, k = permeabilitas hidrolik, η = viskositas fluida, dan dp/dx = gradien tekanan,

Pers.(2) di dalam disiplin geohidrologi dapat dimodifikasi menjadi:

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

dengan k_f = koefisien rembesan, Δh = beda tinggi head, dan 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 pori-porinya berhubungan satu dengan yang lain. Sebaliknya juga dapat dilihat, bahwa porositas tidak tergantung dari besar butir, dan permeabilitas merupakan suatu fungsi yang langsung terhadap besar butir^[3].

Persamaan Mikrodinamik dan Makrodinamik LGA

Aturan dan medium tumbukan dalam LGA adalah kisi-kisi berbentuk segitiga. Berikut ini adalah rumusan 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:

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

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

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 pers.(3) dengan c_i ,

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

Pers.(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. Pers.(8) dapat dituliskan sebagai:

$$\sum_{x \in A} \sum_i [n_i(x_i, t + 1) - n_i(x, t)] = -(\text{flux netto massa yang keluar dari S}) \quad (9)$$

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

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

sehingga pers.(10) dapat ditulis dalam bentuk

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_i \langle n_i \rangle = - \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_i \sum_j \langle n_i \rangle c_{i\alpha} c_{j\beta} \tag{11}$$

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

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

$$\sum_{x \in A} \sum_i [n_i(x,t+1) - n_i(x,t)] c_{i\alpha} \tag{12}$$

= -flux netto momentum arah yang keluar dari S

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

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

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

$$\rho = \sum_i \langle n_i \rangle \tag{14}$$

dan rapat momentumnya

$$\rho u_\alpha = \sum_i \langle n_i \rangle c_{i\alpha} \tag{15}$$

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

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

dengan mendefinisikan tensor fluks momentum untuk LGA sebagai:

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

maka persamaan makroskopik momentum menjadi:

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

Pada kasus kecepatan yang rendah, tensor $\Pi_{\alpha\beta}$ dapat diekspansi menjadi^[4]:

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

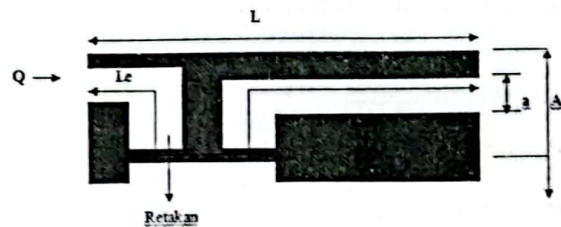
dimana $\lambda_{\alpha\beta\gamma\delta}$ adalah tensor elastisitas. Akhirnya dari pers.(16) dapat dilakukan pendekatan persamaan yang mendekati bentuk nyata yaitu:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_\alpha + 2 \frac{\partial}{\partial \beta} B(\rho) u_{\alpha\beta} = - \frac{\partial}{\partial \alpha} [p_0(\rho) + A(\rho) u^2] \tag{19}$$

Pers.(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^[4] $\langle n_i \rangle$.

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^[5]. Pola retakan sederhana diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi pola retakan sederhana

Le adalah panjang saluran efektif. Persamaan aliran volume fluida yang didapatkan dari ilustrasi di atas adalah^[6]:

$$Q = vA = v_p a \tag{20}$$

Porositas diperoleh dari pers.(21):

$$\phi = \frac{aL_e}{AL} \tag{21}$$

Permeabilitas dihitung dengan pers.(22)^[2],

$$k = \frac{\phi^3}{cS^2} \tag{22}$$

dengan ϕ_{eff} : porositas efektif medium.

c : koefisien Kozeny.

S : specific surface area.

S dihitung melalui persamaan (23)^[6],

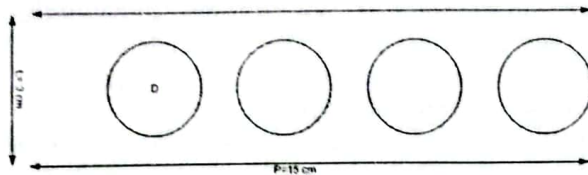
$$S = \frac{\phi}{R_0(1-\phi)} \tag{23}$$

dengan R_0 adalah radius hidrolis.

2 METODE PENELITIAN

Pembuatan Model Retakan

Ada 5 buah model retakan dengan penghalang model bola yang akan disimulasikan berdasarkan perbedaan radius. Kelima model dibuat berupa saluran (*channel*) dengan ukuran panjang dan lebar tetap yaitu 15 cm dan 3 cm, sedangkan radiusnya dibuat bervariasi dengan ukuran 1 cm; 1,6 cm; 2 cm; 2,2 cm; dan 2,5 cm seperti diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi retakan dengan penghalang model bola

Visualisasi program

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

1. 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. Menghitung besarnya porositas retakan.
3. Menghitung besarnya permeabilitas retakan.
4. Menghitung besarnya porositas retakan.
5. Menampilkan grafik antara porositas terhadap *time-step*.
6. Menampilkan grafik antara permeabilitas terhadap *time-step*.
7. Gambar hasil (visualisasi) retakan setelah dilewati fluida.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

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 ilus-

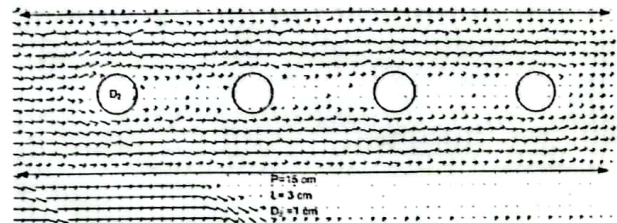
trasi aliran fluida melalui retakan sampel untuk setiap variasi sudut pada saat sebelum dan sesudah *running data*.

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

Tabel 1. Hasil Pengamatan

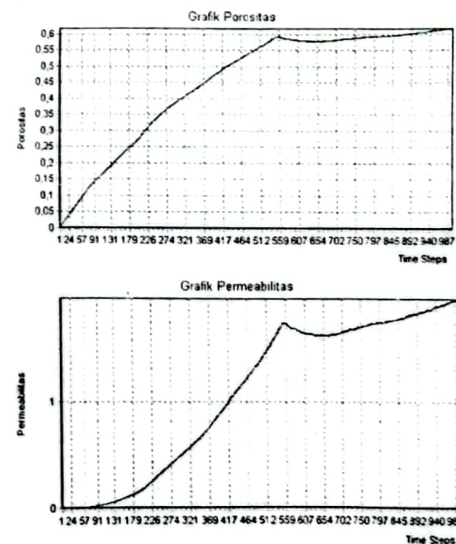
Radius	Time-step	Porositas Total (ϕ_{tot})	Porositas Efektif (ϕ_{eff})	Permeabilitas (k)
1,0 cm	1000	0,934	0,615	8,984 piksel ²
1,6 cm	1000	0,845	0,534	6,463 piksel ²
2,0 cm	1000	0,815	0,525	7,418 piksel ²
2,2 cm	1000	0,779	0,489	5,682 piksel ²
2,5 cm	1000	0,724	0,447	1,969 piksel ²

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model retakan dengan radius penghalang bola 1 cm pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil model LGA untuk radius bola 1 cm

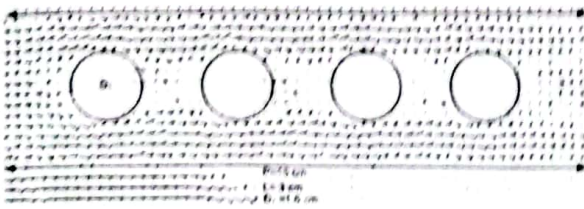
Pada Gambar 4, diperlihatkan besarnya nilai porositas total dan permeabilitas untuk radius 1 cm, masing-masing dengan nilai 0,934 dan 8,984 piksel².



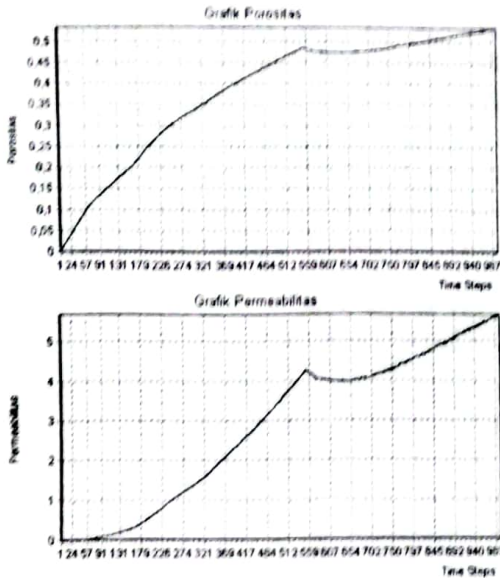
Gambar 4. Grafik porositas dan permeabilitas hasil model LGA untuk radius 1 cm

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model retakan dengan radius penghalang bola 1,6 cm pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada Gambar 6, diperlihatkan besarnya nilai porositas total dan permeabilitas untuk radius 1,6 cm, masing-masing dengan nilai 0,845 dan 6,463 piksel².

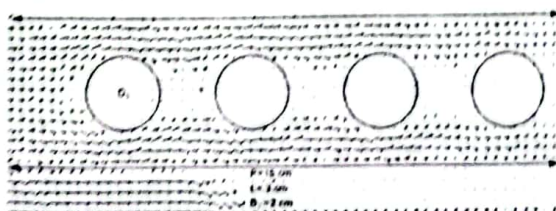


Gambar 5. Hasil model LGA untuk radius bola 1,6 cm



Gambar 6. Grafik porositas dan permeabilitas hasil model LGA untuk radius 1,6 cm

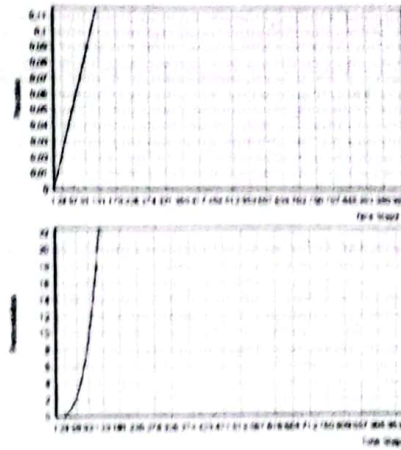
Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model retakan dengan radius penghalang bola 2 cm pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 7.



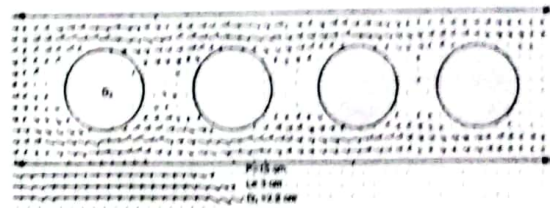
Gambar 7. Hasil model LGA untuk radius bola 2 cm

Pada Gambar 8, diperlihatkan besarnya nilai porositas total dan permeabilitas untuk radius 2 cm, masing-masing dengan nilai 0,815 dan 7,418 piksel².

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model retakan dengan radius penghalang bola 2,2 cm pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 9.

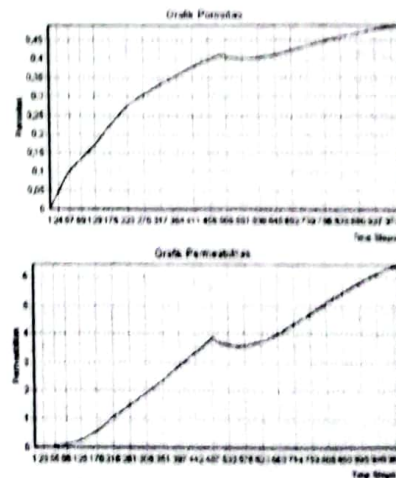


Gambar 8. Grafik porositas dan permeabilitas hasil model LGA untuk radius 2 cm



Gambar 9. Hasil model LGA untuk radius bola 2,2 cm

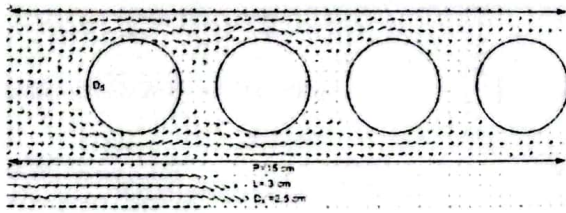
Pada Gambar 10, diperlihatkan besarnya nilai porositas total dan permeabilitas untuk radius 2,2 cm, masing-masing dengan nilai 0,779 dan 5,682 piksel².



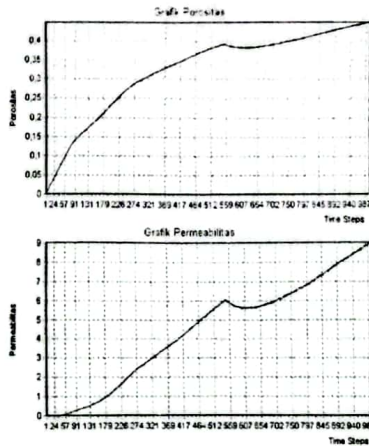
Gambar 10. Grafik porositas dan permeabilitas hasil model LGA untuk radius 2,2 cm

Perhitungan porositas dan permeabilitas untuk model retakan dengan radius penghalang bola 2,5 cm pada saat *running* dengan durasi 1000 *time-step* ditunjukkan pada Gambar 11.

Pada Gambar 12, diperlihatkan besarnya nilai porositas efektif dan permeabilitas untuk radius 2,5 cm, masing-masing dengan nilai 0,724 dan 1,969 piksel².



Gambar 11. Hasil model LGA untuk radius bola 2,5 cm



Gambar 12. Grafik porositas dan permeabilitas hasil model LGA untuk radius 2,5 cm

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 terbukanya aliran laminar dan turbulen.

Model Lattice Gas Automata (LGA) dapat menghitung nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas terhadap *time-step* untuk variasi radius penghalang model bola hasil model. Nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas sangat dipengaruhi oleh radius yang diberikan. Semakin besar radius bola akan berpengaruh linier terhadap kenaikan nilai porositas total, porositas efektif dan permeabilitas. Hal ini disebabkan karena simulasi aliran fluida pada saat *running data* arahnya horizontal menyebabkan fluida bertumbukan dengan model bola sebagai penghalang sesuai dengan variasi radius yang diberikan.

Secara hidrodinamika, untuk model bola sebagai penghalang, untuk radius yang kecil, pola aliran lebih didominasi oleh aliran laminar, menyebabkan aliran secara turbulensi hanya terjadi di daerah sisi bola saja menyebabkan permeabilitas besar. Sebaliknya, untuk model bola sebagai penghalang untuk radius yang besar, pola aliran lebih didominasi oleh aliran turbulensi, menyebabkan aliran secara laminar hanya terjadi di tengah bola saja menyebabkan permeabilitas semakin kecil.

4 SIMPULAN

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

1. Nilai porositas efektif (ϕ_{eff}) dan permeabilitas (k) untuk kelima model bola sebagai penghalang dengan radius 1 cm; 1,6 cm; 2 cm; 2,2 cm; dan 2,5 cm diperoleh berturut-turut: $\phi_{eff}(R_1)=0,615$, $k(R_1)=8,984$ piksel²; $\phi_{eff}(R_2)=0,534$, $k(R_2)=6,463$ piksel²; $\phi_{eff}(R_3)=0,525$, $k(R_3)=7,418$ piksel²; $\phi_{eff}(R_4)=0,489$, $k(R_4)=5,682$ piksel²; dan $\phi_{eff}(R_5)=0,447$, $k(R_5)=1,969$ piksel².
2. Automata gas kisi model FHP dapat digunakan untuk mengestimasi besarnya permeabilitas retakan batuan dengan model penghalang model bola berdasarkan radius 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.

REFERENSI

- [1] Bimo. BB, 2009., Makrodinamika dan Mikrodinamika pada Lattice Gas Cellular Automata, Jurusan Fisika Fakultas MIPA, ITB, Bandung.
- [2] Koponen, A., Kataja, M, 1986., Permeability and Effective Porosity of Porous Media, Phys. Rev. E 54, 406-410.
- [3] Koesoemadinata, R.P, 1980., Geologi Minyak dan Gas bumi, Jilid 1, Edisi Kedua, Penerbit ITB, Bandung.
- [4] 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.
- [5] Halauddin, 2003., Estimasi Permeabilitas Retakan Dengan Pendekatan Analitik dan Model LGA, Tesis Magister, Jurusan Geofisika Terapan, ITB, Bandung.
- [6] Dullien, F.A.L, 1992., Porous media fluida transport and pore structure, Academic Press, Inc., New York.