

TORTUOSITAS PADA MODEL 3D BATUAN BERPORI

Firmansyah^{1*)}, Selly Feranie¹, Fourier D.E. Latief², Prana F. L. Tobing¹

¹Laboratorium Ilmu Pengetahuan Bumi dan Antariksa Jurusan Pendidikan Fisika FPMIPA UPI, Jl. Dr. Setiabudhi No. 229, Bandung 40154

²Fisika Bumi dan Sistem Komplek FMIPA ITB, Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

^{*)} Email: firmansyah72@student.upi.edu

Abstrak

Telah dilakukan perhitungan tortuositas dalam model 3D batuan berpori. Model 3D batuan berpori ini dibentuk oleh butiran bola yang didistribusikan secara acak, untuk melihat pengaruh distribusi tersebut terhadap nilai porositas (ϕ) dan tortuositas (τ). Perhitungan dibatasi pada model dengan porositas 10%, 15% dan 20% serta ukuran jari-jari butiran bola dalam rentang 5-10, 10-15, dan 15-20 (dalam ukuran pixel). Diperoleh hasil perhitungan untuk : 1) Porositas 10% dengan jari-jari butir seperti disebutkan sebelumnya, nilai tortuositas secara berurutan yaitu $\tau = 2,127 \pm 0,846$, $\tau = 1,669 \pm 0,610$ dan $\tau = 1,732 \pm 0,371$; 2) Porositas 15%, nilai tortuositas secara berurutan yaitu $\tau = 1,542 \pm 0,266$, $\tau = 1,477 \pm 0,231$ dan $\tau = 1,359 \pm 0,232$; 3) Porositas 20%, nilai tortuositas secara berurutan yaitu $\tau = 1,806 \pm 0,493$, $\tau = 1,708 \pm 0,502$ dan $\tau = 1,536 \pm 0,582$. Terlihat bahwa untuk porositas yang sama dengan jari-jari butir yang berbeda akan menghasilkan nilai tortuositas yang berbeda. Hal tersebut bisa terjadi karena pengaruh distribusi acak butiran. Nilai tortuositas paling tinggi berdasarkan hasil diatas adalah $\tau = 2,12$ sedangkan menurut asumsi dalam persamaan Kozeny-Carman untuk menghitung permeabilitas bernilai $\tau = 2,5$ untuk semua nilai porositas. Sehingga nilai tortuositas yang dianggap konstan untuk semua nilai porositas perlu dipertimbangkan kembali penggunaannya jika dilihat dari hasil perhitungan tortuositas pada model 3D batuan berpori ini.

Kata kunci : Jari-jari butiran, Tortuositas, Perumusan Kozeny-Carman, Model 3D batuan berpori

Abstract

Calculation of tortuosity (τ) in 3D porous rocks models have been done. The 3D porous rocks models were constructed of spherical grain which distributed randomly to observe the effect of the distribution to the porosity (ϕ) and tortuosity (τ). Calculation of tortuosity is limited for models with porosity of 10%, 15% and 20% as well as grain sizes in range of 5-10, 10-15 and 15-20 (in pixel unit). We obtained the result of investigation for: 1) Porosity 10% with the grain sizes as said before, the value of tortuosity is $\tau = 2,127 \pm 0,846$, $\tau = 1,669 \pm 0,610$ and $\tau = 1,732 \pm 0,371$; 2) Porosity 15%, the value of tortuosity is $\tau = 1,542 \pm 0,266$, $\tau = 1,477 \pm 0,231$ and $\tau = 1,359 \pm 0,232$; 3) Porosity 20%, the value of tortuosity is $\tau = 1,806 \pm 0,493$, $\tau = 1,708 \pm 0,502$ and $\tau = 1,536 \pm 0,582$. It can be seen that the same porosity with different grain sizes produces models with different tortuosity. This can be caused by the effect of the randomized distribution of grain size. The highest value of tortuosity based on the results

above is $\tau = 2,12$ while according to assumption in Kozeny-Carman's equation for measuring permeability, the tortuosity is $\tau = 2,5$. Hence from the result of this tortuosity analysis in this 3D porous rocks model, it is important to reconsider the uses of such assumption for all porosity value.

Keywords: Grain size, Porosity, Tortuosity, Kozeny-Carman's equation, 3D porous rocks model

PENDAHULUAN

Persamaan Kozeny-Carman (Carman, 1961) merepresentasikan hubungan antara besaran permeabilitas sebagai fungsi dari besaran-besaran fisis lainnya. Persamaan tersebut sering direpresentasikan dalam bentuk grafik permeabilitas (k) sebagai fungsi porositas (ϕ), permeabilitas (k) sebagai fungsi ukuran butir (r), dan permeabilitas (k) sebagai fungsi tortuositas (τ). Persamaan tersebut telah banyak diterapkan pada berbagai kasus, baik untuk model medium berpori, misalnya batuan berpori, dalam ruang 2D maupun 3D. Model tersebut menggunakan asumsi bahwa pori-pori batuan membentuk jalur aliran fluida silinder yang berbentuk pipa. Persamaan tersebut telah dikaji di antaranya oleh Sumantri (2007) yang melakukan analisis perbandingan nilai permeabilitas yang diperoleh dengan menggunakan persamaan ini dengan hasil yang didapat dari pendekatan fraktal, serta Dvorkin (2009) yang melakukan analisis tinjauan ulang persamaan Kozeny-Carman yang lebih komprehensif.

Pada persamaan Kozeny-Carman, nilai tortuositas sering digunakan nilai $\tau = 2,5$ untuk berbagai nilai porositas. Dalam kenyataannya, pengukuran tortuositas tidak mudah dilakukan. Sehingga tortuositas dianggap konstan untuk mempermudah perhitungan dalam mencari nilai permeabilitas. Namun demikian, beberapa penelitian misalnya Matyka dkk (2008) dan Duda dkk (2011) nilai tortuositas tidak konstan untuk nilai porositas yang berbeda-beda.

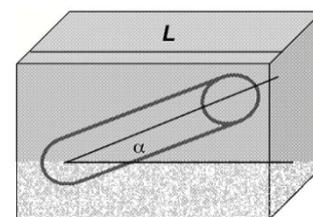
Penelitian ini mengkaji pengaruh ukuran butir dan porositas pada nilai tortuositas

untuk model batuan dengan butiran

sferis/bola. Oleh karena itu, peneliti membuat model 3D batuan berpori yang dibentuk oleh butiran bola yang didistribusikan secara acak. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh ukuran butir terhadap nilai porositas (ϕ) dan tortuositas (τ). Penelitian sejenis telah dilakukan oleh Nurwidyanto dkk(2006) pada kasus batupasir formasi Ngrayong.

METODE PENELITIAN

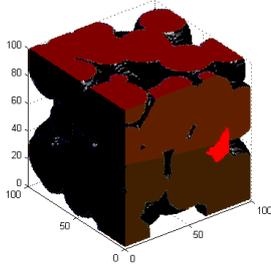
Dalam penelitian ini, model 3D batuan berpori dibuat dengan menggunakan butiran bulat sempurna/sferis/bola. Model ini akan digunakan menganalisis persamaan matematis Kozeny-Carman untuk menginvestigasi tortuositas. Model ini diasumsikan memenuhi model fisis untuk persamaan Kozeny-Carman, yaitu pori-porinya berbentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Jalur aliran fluida yang berbentuk pipa (Dvorkin, 2009)

Berbagai penelitian telah menghasilkan model-model batuan dengan bermacam pendekatan dan karakteristik yang khas dari masing-masing model tersebut. Salah satu di antaranya adalah model fraktal yang dibuat oleh Feranie (2010). Dalam penelitian ini, model 3D batuan berpori dibentuk oleh butiran berbentuk bola yang didistribusikan

secara acak dengan ukuran $100 \times 100 \times 100$. Ukuran butir dibuat berbeda dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran butir terhadap porositas dan tortuositas. Pengukuran model ini dibatasi hanya pada porositas 10%, 15% dan 20% serta ukuran jari-jari butiran bola dalam rentang 5-10, 10-15, dan 15-20 (dalam ukuran pixel). Lalu dalam model tersebut diperoleh visualisasi jalur aliran fluida (tortuositas) yang diidentifikasi dengan warna yang berbeda dari warna butir. Butiran bola dideskripsikan dengan warna hitam untuk permukaan butir dan warna merah tua untuk didalamnya, sedangkan jalur aliran fluida yang dapat mengalir melalui porositas batuan yang saling terhubung dideskripsikan dengan warna merah seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Model 3D batuan berpori dengan ukuran kotak $100 \times 100 \times 100$ tersusun oleh butiran bola.

Persamaan Kozeny-Carman dituliskan dalam Persamaan (1.1) berikut (Dvorkin, 2009):

$$k = \frac{1}{2} \frac{\phi^3}{s^2 \tau^2} \quad (0.1)$$

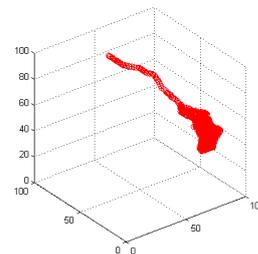
dengan k adalah permeabilitas, ϕ adalah porositas total, s adalah luas permukaan spesifik dan τ adalah tortuositas. Porositas (ϕ) didefinisikan sebagai volume pori total dibagi dengan volume total batuan. Secara matematis ditulis sebagai berikut:

$$\phi = \frac{\text{Volume pori total}}{\text{Volume total batuan}} \times 100\% \quad (0.2)$$

Kemudian, tortuositas (τ) didefinisikan sebagai panjang lintasan yang terbentuk oleh pori L' dibagi terhadap panjang terdekatnya L . Secara matematis ditulis sebagai berikut:

$$\tau = \frac{L'}{L} \quad (0.3)$$

Dalam penelitian ini, tortuositas dihitung dengan menggunakan metode *random walk* yang dikembangkan oleh Fauzi dan Ariwibowo (2006). Metode ini menggunakan pendekatan pelacakan jejak ruang pori berdasarkan hubungan tetangga terdekat (nearest neighbor) dengan prioritas sumbu utama dan kemudian sumbu diagonal. Hasil penelusuran metode tersebut dapat divisualkan seperti yang terlihat pada Gambar 3.

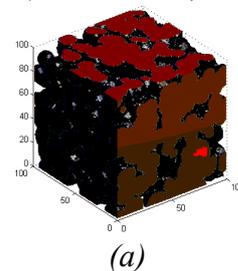


Gambar 3. Jalur aliran fluida pada struktur dalam batuan

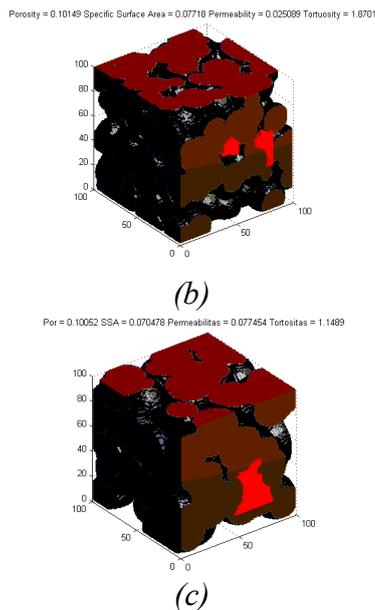
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil konstruksi model 3D batuan berpori untuk porositas 10% dengan jari-jari butir yang berbeda diperlihatkan pada Gambar 4. Pada model tersebut bagian tepian kubus model menunjukkan butiran-butiran yang terpotong. Hal ini dihasilkan dari metode pengambilan subsampel dari model keseluruhan untuk mengurangi efek ketidakseragaman distribusi pori secara statistik akibat geometri pada tepian matriks.

Porosity = 0.10007 Specific Surface Area = 0.096359 Permeability = 0.03101 Tortuosity = 1.3192

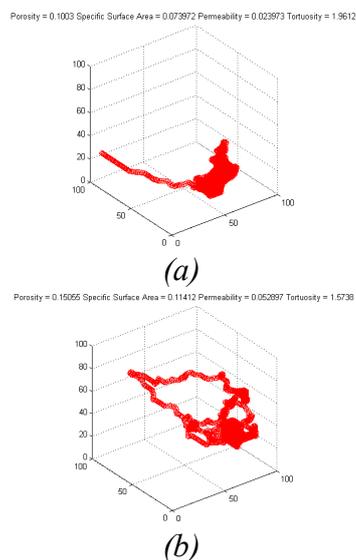


(a)



Gambar 4. Model 3D batuan berpori dengan porositas 10% dengan ukuran butir (a)5-10(b) 10-15(c) 15-20

Jalur pendeteksian keterhubungan pori yang dapat diinterpretasikan secara sederhana sebagai jalur aliran fluida dalam pori, dapat divisualkan terpisah dari geometri model batuan yang dihasilkan. Dua dari beberapa hasil metode *random walk* tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Visualisasi jalur aliran fluida (tortuositas) (a) Porositas 10% ukuran butir 10-15 (b) Porositas 15% ukuran butir 5-10

Parameter pemodelan dan hasil perbandingan tortuositas rata-rata untuk

setiap ukuran butir yang berbeda diperlihatkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pemodelan dan hasil perhitungan tortuositas rata-rata.

Porositas	10%	15%	20%
Ukuran Butir	Tortuositas	Tortuositas	Tortuositas
5 – 10	2,127±0,8463	1,542±0,2658	1,806±0,4934
10 – 15	1,669±0,6096	1,477±0,2309	1,708±0,5020
15 – 20	1,732±0,3709	1,359±0,2324	1,536±0,5817

Terlihat bahwa untuk porositas yang sama dengan jari-jari butir yang berbeda akan menghasilkan nilai tortuositas yang berbeda. Hal tersebut bisa terjadi karena pengaruh distribusi acak butiran. Semakin kecil ukuran butir maka nilai tortuositas akan semakin besar, begitu juga sebaliknya. Tortuositas tinggi mengandung arti yaitu semakin rumit jalur aliran fluida didalam batuan. Nilai tortuositas paling tinggi berdasarkan hasil diatas adalah $\tau = 2,12$ sedangkan menurut asumsi dalam persamaan Kozeny-Carman untuk menghitung permeabilitas bernilai $\tau = 2,5$ untuk semua nilai porositas.

KESIMPULAN

Nilai tortuositas dari model-model yang dibuat bervariasi antara 1,359 sampai 2,127. Dalam model-model dengan nilai porositas yang sama, makin besar ukuran butiran, makin kecil nilai tortuositas yang dihasilkan, yang menunjukkan bahwa butiran kecil menghasilkan struktur pori yang lebih kompleks. Dengan kata lain, fluida akan melalui jalur yang lebih rumit sehingga akan dapat diprediksi menghasilkan permeabilitas yang lebih kecil. Sedangkan secara umum, semakin besar nilai porositas, maka nilai tortuositasnya makin kecil, yang menunjukkan makin sederhananya struktur pori atau jalur yang dilalui fluida, sehingga dapat diprediksi nilai permeabilitas semakin

besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Duda, Z. Koza, dan M. Matyka, (2011): Hydraulic tortuosity in arbitrary porous media flow, *Physical Review E* 84, 036319.
- [2] J. Dvorkin (2009): Kozeny-Carman Equation Revisited.
- [3] M. I. Nurwidyanto, M. Yustiana, S. Widada (2006): Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas dan Permeabilitas Pada Batu Pasir (Studi Kasus: Formasi Ngrayong, Kerek, Ledok dan Selo). *Berkala Fisika* Vol. 9, No. 4, hal 97-195.
- [4] M. Matyka, A. Khalili, dan Z. Koza, (2008): Tortuosity-porosity relation in the porous media flow, *Physical Review E* 78, 026306.
- [5] P. C. Carman (1961): *The flow of gas Through Porous Media*, *Bibliothèque des Sciences et Techniques Nucléaires*. Paris: Presses Universitaires de France.
- [6] S. Feranie (2010): Pemodelan Struktur Pori Dari Batuan Geologi Dengan Fraktal, *Berkala Fisika* Vol. 12, No. 3, hal 91-96.
- [7] U. Fauzi dan T. Ariwibowo, (2006): Tortuosity and Coordination Number of Highly Porous Artificial Rocks Created Using Random Number Generator, *Proceedings of ICMNS 2006*.
- [8] Y. Sumantri (2007): Perbandingan Antara Hasil Perkiraan Permeabilitas Menggunakan Persamaan Kozeny-Carman dan Persamaan Fraktal, *Proceeding Simposium Nasional IATMI*, UPN "Veteran" Yogyakarta.