

# ANALISIS KOMPLEKSITAS STRUKTUR PORI PADA SAMPEL DIGITAL MEDIUM BERPORI

Ulpa Zein Fawziah<sup>1, a)</sup>, Aceng Kurnia Rochmatulloh<sup>1, b)</sup>,  
Rizki Fahmi Sumaryono<sup>1, c)</sup>, Selly Feranie<sup>1, d)</sup>, Fourier Dzar Eljabbar Latief<sup>2,3 e)</sup>

<sup>1</sup>Departemen Fisika FPMIPA UPI, Jl. Dr. Setiabudi No 299, Bandung 40154

<sup>2</sup>Fisika Bumi dan Sistem Kompleks FMIPA ITB, Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

<sup>3</sup>Laboratorium Micro-CT FMIPA ITB, Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

Email: <sup>a)</sup>zeinulpa@gmail.com, <sup>b)</sup>kurniaaceng2012@gmail.com, <sup>c)</sup>fahmisumaryono@gmail.com,  
<sup>d)</sup>sferanie@yahoo.com, <sup>e)</sup>fourier@fi.itb.ac.id

## Abstrak

Kompleksitas struktur pori terhubung pada sampel digital medium berpori 2D telah dianalisis menggunakan parameter tortuositas. Jalur pori terhubung dilacak dengan menggunakan *Simple Neurite Tracer*. Metode pelacakan dan perhitungan tortuositas tersebut diujikan pada lima model sederhana yang menunjukkan perbedaan tingkat kompleksitas yang signifikan. Metode analisis kompleksitas tersebut kemudian diterapkan pada sampel medium berpori berupa citra digital batuan berukuran  $560 \times 393$  piksel, dan tanah berukuran  $560 \times 475$  piksel. Citra digital sampel tanah dan batuan yang dianalisis berupa irisan 2D pada bidang  $z-y$  (*sagittal*) yang diambil dari sampel 3D hasil pemindaian menggunakan  $\mu$ -CT Scanner SkyScan 1173. Pelacakan jalur pori terhubung pada sampel model maupun sampel digital 2D batuan dan tanah yang menggunakan *Simple Neurite Tracer* menghasilkan koordinat jalur pori terhubung yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai tortuositas. Tortuositas dihitung dengan menggunakan definisi rasio antara jumlah total sudut keberlikuan jalur terhadap jarak antara dua sisi sampel yang saling berhadapan. Untuk 5 sampel model yang menunjukkan kompleksitas yang berbeda, diperoleh bahwa semakin kompleks struktur pori tersebut, maka semakin besar nilai tortuositasnya. Untuk analisis pada sampel digital batuan, nilai tortuositasnya yaitu 0,0392 sedangkan pada sampel tanah didapat nilai tortuositas sebesar 0,0431.

**Kata-kata kunci:** *simple neurite tracer*, tortuositas, kompleksitas, medium berpori

## Abstract

The complexity of the connected pore structure of 2D porous digital media samples has been analyzed using tortuosity parameter. Connected pore was traced using the *Simple Neurite Tracer*. The tracing method and the tortuosity calculation were tested on five simple models showing significant differences in complexity levels. The complexity analysis method was then applied on digital image of a rock sample with the size of  $560 \times 393$  pixels, and a soil sample with the size of  $560 \times 475$  pixels. Digital images of the rock and soil samples were analyzed on the 2D slices in the  $zy$  (*sagittal*) plane which were obtained from the scanned 3D samples using the  $\mu$ -CT SkyScan 1173 Scanner. Connected pore tracing for both the 2D models as well as the rock and soil samples was done using the *Simple Neurite Tracer* which produce the coordinate of the connected pore path which is then used to calculate the value of

tortuosity. Tortuosity is calculated by using the definition of the ratio between the sum of the curvaceous angles of the connected pore path to the distance between two facing sides of the sample. For 5 sample models with distinctive complexity, it was found that the more complex the pore structure, the greater the tortuosity value. For analysis on digital samples of rocks, the tortuosity is 0.0392 whereas in the soil sample, the tortuosity is 0.0431.

**Keywords:** simple neurite tracer, tortuosity, complexity, porous medium.

## PENDAHULUAN

Studi mengenai media berpori telah banyak dikembangkan oleh para peneliti, terutama analisis mengenai sifat aliran pada media berpori. Salah satu tujuan dari berbagai kajian fisis mengenai struktur pori ini adalah untuk memahami sifat aliran fluida pada reservoir minyak maupun gas dalam bumi. Tanah dan batuan reservoir di dalam perut bumi merupakan media berpori di mana minyak bumi dan gas merupakan fluida pengisi rongga porinya. Atas dasar inilah para ahli petrofisika mempelajari hubungan antara berbagai parameter fisis media berpori tersebut dengan sifat aliran fluida pengisi porinya.

Penelitian mengenai struktur pori telah banyak dikembangkan, salah satunya mengenai sifat aliran pada struktur pori dari batuan geologi [1]. Salah satu parameter fisis yang digunakan untuk menganalisis struktur pori pada medium berpori adalah tortuositas. Tortuositas sering digunakan untuk menganalisis sifat aliran pada media berpori. Dalam aplikasinya pada sampel digital medium berpori 2D nilai tortuositas yang berbeda pada arah  $x$  dan  $y$  merepresentasikan struktur pori yang berbeda di kedua arah tersebut yang dapat dihubungkan dengan sifat anisotropi aliran fluida. Pada beberapa literatur tortuositas didefinisikan sebagai parameter geometri dari struktur pori [2][3].

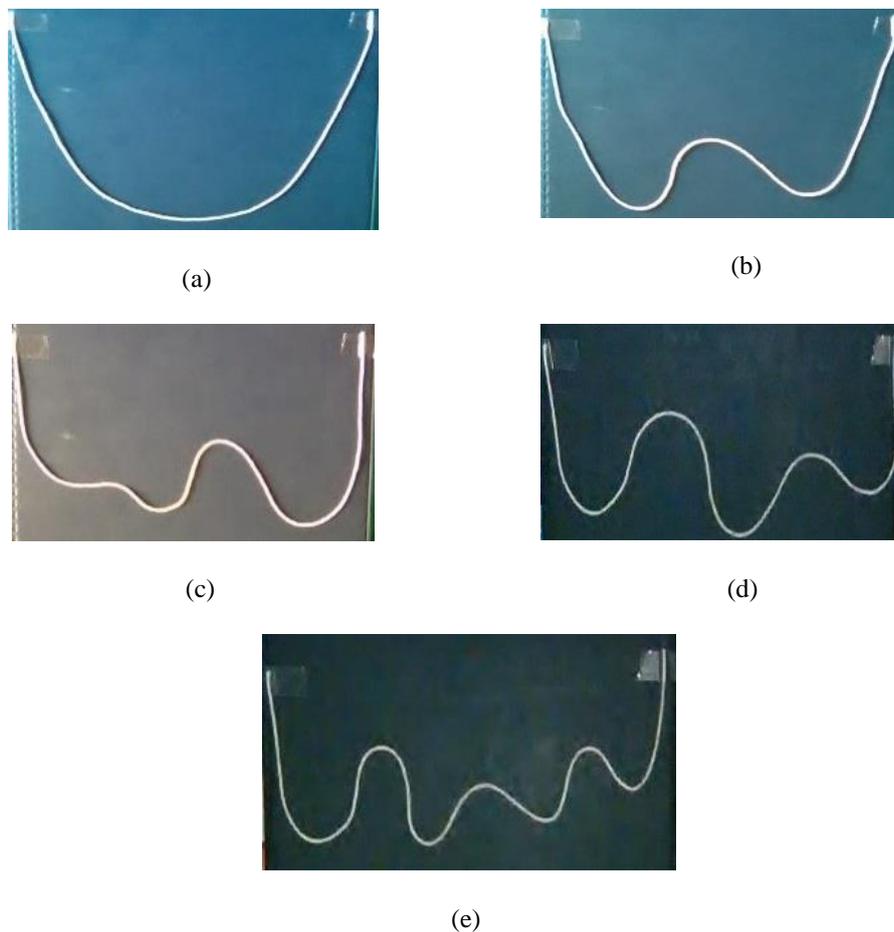
Perhitungan tortuositas pada sampel digital medium berpori telah dikembangkan oleh Firmansyah [4] dengan menggunakan definisi tortuositas yang digunakan pada persamaan Kozeny-Carman. Analisis citra digital pada model batuan yang dibuat berbasis komputer maupun sampel digital hasil pemindaian medium berpori dilakukan untuk karakterisasi struktur pori pada medium berpori. Menurut Dvorkin [5], model fisis dari jalur aliran fluida yang memenuhi persamaan Kozeny-Carman ini diasumsikan berbentuk pipa. Namun, pada kenyataannya jalur aliran fluida terutama yang terdapat pada sampel digital hasil pemindaian batuan maupun media berpori lainnya tidak selalu berbentuk pipa. Metode perhitungan lain untuk menentukan nilai tortuositas juga telah dilakukan oleh Latour [6] dengan menggunakan metode koefisien difusi. Namun metode ini tidak mendapatkan hasil yang baik jika diterapkan pada batuan sedimen berpori karena sifat mikrogeometri batuan yang kompleks dan distribusi pori batuan yang tersebar. Oleh karena itu diperlukan metode perhitungan lain yang dapat menentukan nilai tortuositas dan juga sifat kompleksitas struktur pori.

Secara spesifik, aliran fluida berkaitan erat dengan pori yang saling terhubung sehingga secara geometri, keberlikuan atau kompleksitas dari jalur pori terhubung tersebut akan mempengaruhi sifat aliran fluida di dalamnya. Studi ini bertujuan untuk mengkaji tortuositas sebagai parameter kompleksitas dari struktur pori terhubung dengan menggunakan definisi tortuositas yang disajikan oleh Dougherty [7]. Kajian dilakukan pada lima sampel model dengan tujuan untuk menghubungkan konsep kompleksitas secara kualitatif dan kuantitatif. Kemudian metode yang sama diterapkan pada sampel digital batuan dan tanah.

### METODE PENELITIAN

Untuk dapat mengetahui apakah tortuositas dapat dijadikan sebagai parameter untuk menentukan sifat kompleksitas aliran fluida, maka dibuatlah model aliran fluida dengan lima tingkat kompleksitas yang berbeda seperti ditunjukkan dalam GAMBAR 1. Model dibuat dengan menggunakan seutas benang yang merepresentasikan jalur pori terhubung dalam suatu media berpori sederhana. Nilai tortuositas akan menjadi parameter untuk bisa merepresentasikan tingkat kompleksitas dari struktur pori tersebut. Dasar inilah yang digunakan untuk bisa menganalisis kompleksitas dari struktur pori pada sampel batuan dan tanah yang akan diteliti.

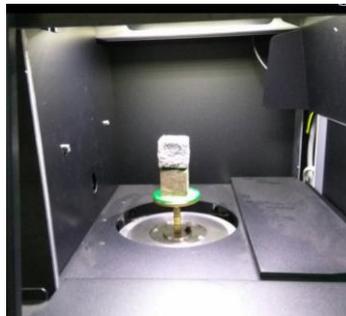
Nilai tortuositas dianalisis pada masing-masing sampel untuk mengetahui hubungan dari parameter tortuositas terhadap tingkat kompleksitas struktur pori terhubung. Jalur pori yang dilewati aliran fluida ( $L'$ ) pada kelima model yang digunakan dibuat sama panjang, sedangkan model tersebut dibuat memiliki panjang sisi sebesar  $L$ . Metode analisis kompleksitas inilah yang digunakan untuk menganalisis tortuositas pada sampel digital medium berpori. Medium berpori yang digunakan untuk penelitian ini yaitu sampel batuan dan tanah seperti yang ditunjukkan pada GAMBAR 2. Kedua sampel digital tersebut diperoleh dari hasil pemindaian menggunakan perangkat pencitraan digital berbasis tomografi sinar-X yaitu Bruker X-Ray Micro-CT SkyScan 1173 yang terinstal di Laboratorium Micro-CT FMIPA ITB.



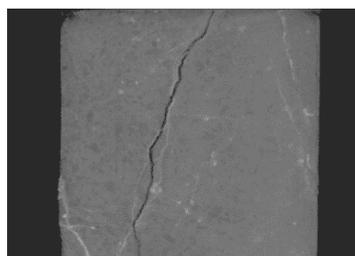
**GAMBAR 1.** Model aliran fluida dengan tingkat kompleksitas berbeda.

Hasil pemindaian dari kedua sampel tersebut menghasilkan sekumpulan citra digital berupa *raw projection images* (citra proyeksi) yang merupakan citra skala-keabuan (*grayscale image*) dalam format 16-bit TIF. Kumpulan citra proyeksi tersebut kemudian direkonstruksi menggunakan

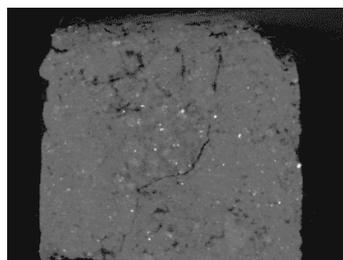
perangkat lunak NRecon yang berbasis algoritma *Feldkamp Backprojection* sehingga menghasilkan citra rekonstruksi berupa sekumpulan citra skala-keabuan 2D yang merupakan potongan dalam arah sumbu  $z$  (trans-axial) dari suatu struktur 3D yang lengkap. Irisan sumbu  $z$  (*trans-axial*) dan sumbu  $y$  (*sagittal*) diambil pada sampel 3D untuk menghasilkan sampel digital 2D seperti yang tertera pada GAMBAR 3. Pelacakan jalur pori terhubung diterapkan pada 5 model uji dan kedua sampel tersebut dilakukan dengan *Simple Neurite Tracer* yang telah diimplementasikan dalam perangkat lunak Fiji.



**GAMBAR 2.** Sampel batuan dan tanah yang akan dipindai menggunakan *Micro-CT Scanner SkyScan 1173*.



(a)



(b)

**GAMBAR 3.** (a) Sampel digital batuan berukuran  $560 \times 393$  piksel, (b) Sampel digital tanah berukuran  $560 \times 475$  piksel

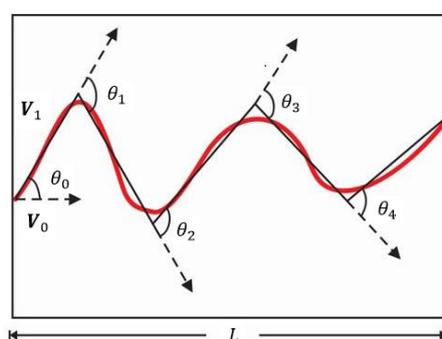
Selain *Simple Neurite Tracer* terdapat metode lain untuk pelacakan jalur aliran fluida yaitu *Cubical Full Random Walk* yang telah digunakan oleh Selly [1]. Metode perhitungan tortuositas yang digunakan adalah metode yang dipakai oleh Dougherty [7] untuk menganalisis tortuositas dari pembuluh darah. Pada perhitungan tortuositas yang dilakukan oleh Dougherty [7], digunakan definisi sebagai berikut:

$$\tau = \frac{\Sigma \theta}{L} [\text{m}^{-1}] \quad (1)$$

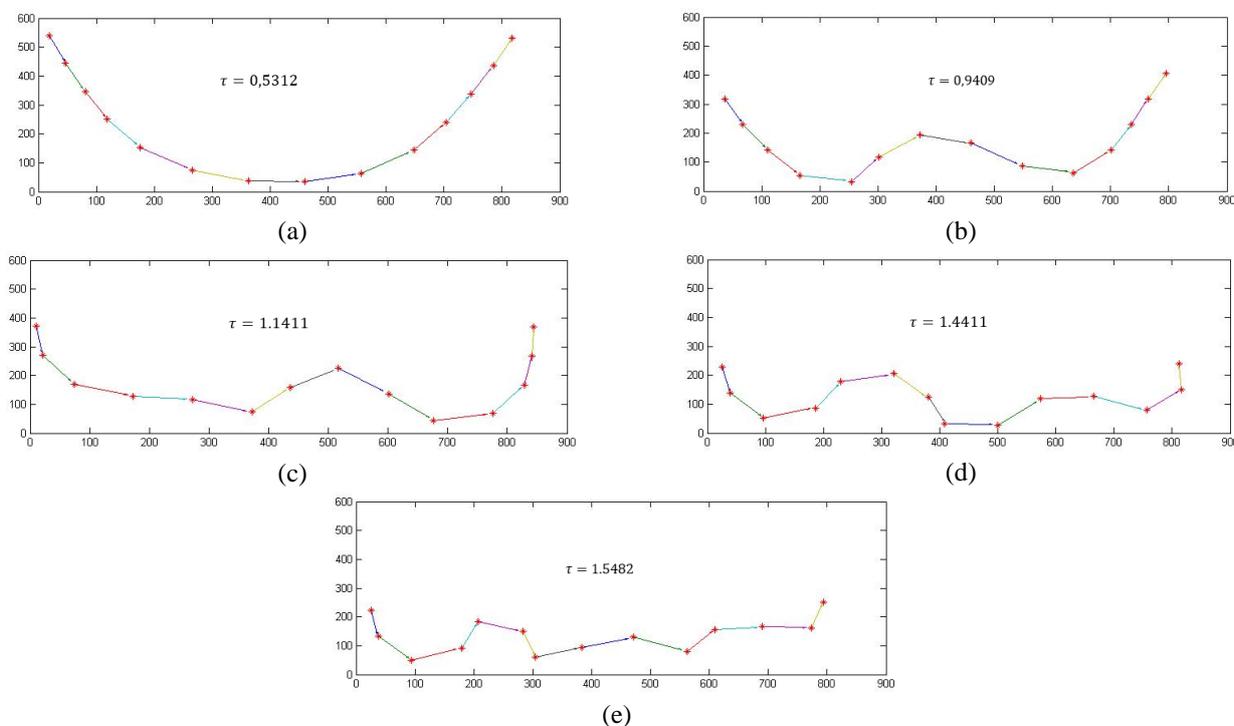
dengan tortuositas ( $\tau$ ) merupakan rasio antara jumlah total sudut keberlikuan jalur terhadap jarak antara dua sisi sampel yang saling berhadapan,  $\theta$  merupakan sudut keberlikuan jalur pori terhubung seperti yang ditunjukkan pada GAMBAR 4, dan  $L$  merupakan jarak antara dua sisi sampel yang saling berhadapan [dalam m]. Sudut keberlikuan dihitung dengan definisi sudut antara dua vektor dalam ruang dua dimensi  $\mathbf{v}_0$  dan  $\mathbf{v}_1$  (untuk contoh 2 segmen pertama) sebagai berikut:

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left( \frac{v_{0x}v_{1x} + v_{0y}v_{1y}}{\left(\sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2}\right)\left(\sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2}\right)} \right) \quad (2)$$

dengan  $v_{0x}$  dan  $v_{0y}$  adalah komponen vektor segmen pertama sedangkan  $v_{1x}$  dan  $v_{1y}$  adalah komponen vektor segmen kedua. Jalur pori terhubung terlebih dahulu disegmentasi untuk mendapatkan vektor-vektor yang mewakili keberlikuannya. Ilustrasi segmentasi tersebut dapat dilihat pada GAMBAR 4. GAMBAR 5 menunjukkan hasil segmentasi dari sampel model yang ditunjukkan pada GAMBAR 1.



GAMBAR 4. Sudut keberlikuan jalur aliran fluida

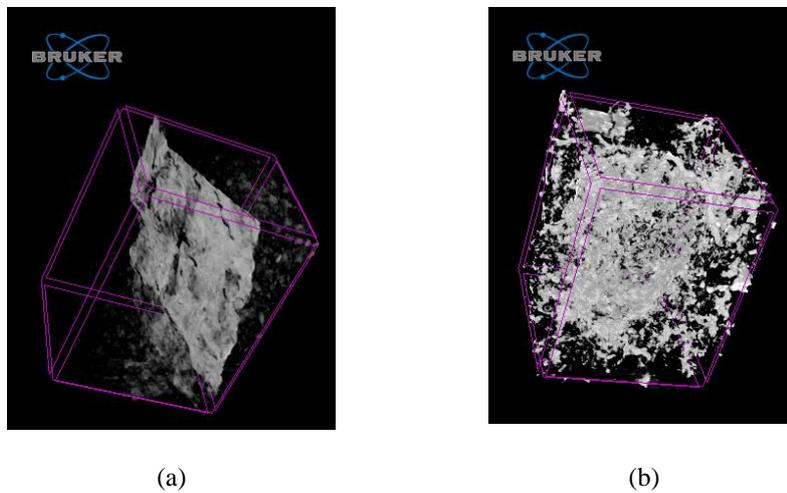


GAMBAR 5. Perbandingan nilai tortuositas dari lima model sampel jalur pori terhubung dengan tingkat kompleksitas yang berbeda.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

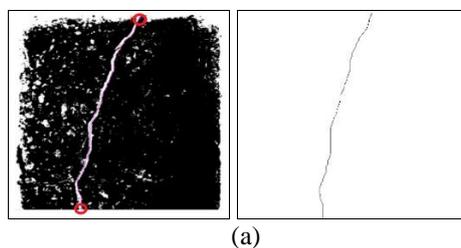
Hasil perhitungan tortuositas pada masing-masing model tertera pada GAMBAR 5, yaitu (dalam  $m^{-1}$ ) berurutan dari model jalur yang paling sederhana (a) ke yang paling kompleks (e): 0,5312; 0,9409; 1,1411; 1,4411; 1,5482. Dari GAMBAR 5, dapat diamati bahwa untuk model yang jalur pori terhubungnya sederhana seperti pada GAMBAR 5.a, diperoleh tortuositas paling rendah. Sebaliknya untuk model yang jalur pori terhubungnya paling kompleks seperti pada GAMBAR 5.e diperoleh tortuositas paling tinggi. Dengan demikian tortuositas dapat dijadikan parameter untuk mendeskripsikan kompleksitas dari struktur pori terhubung. Pola nilai tortuositas terhitung sesuai dengan tingkat kompleksitas jalur yaitu semakin kompleks struktur pori tersebut, maka semakin besar nilai tortuositasnya.

Metode perhitungan inilah kemudian digunakan untuk menentukan nilai tortuositas dari sampel digital batuan dan tanah. Dari hasil rekonstruksi didapatkan struktur pori dari kedua sampel seperti ditunjukkan pada GAMBAR 6. Pada gambar tersebut dapat diamati secara kualitatif bahwa sampel batuan memiliki jaringan pori terhubung yang lebih sederhana dibandingkan sampel tanah.

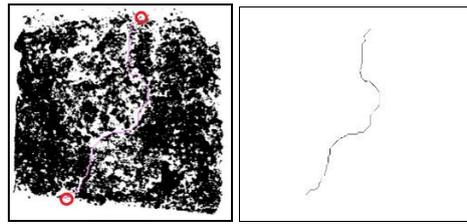


GAMBAR 6. Visual dari *volumetric rendering* (3D) untuk sampel (a) batuan, (b) tanah.

GAMBAR 7.a dan 7.b sebelah kiri menunjukkan sampel digital yang telah diubah kedalam bentuk *binary image* melalui proses *thresholding*. Lingkaran berwarna merah pada gambar tersebut menunjukkan titik pelacakan jalur fluida yang terhubung. Hasil jalur aliran fluida yang terlacak pada sampel dapat terlihat pada GAMBAR 7.a dan GAMBAR 7.b sebelah kanan.



(a)



(b)

**GAMBAR 7.** Hasil pelacakan salah satu jalur pori terhubung menggunakan *Simple Neurite Tracer* untuk struktur pori dari sampel (a) batuan, dan (b) tanah.

## SIMPULAN

Berdasarkan kelima model jalur pori terhubung yang telah dibuat dengan tingkat kompleksitas jalur yang jelas berbeda secara kualitatif, didapat hasil bahwa semakin kompleks jalur pori terhubung tersebut maka semakin besar pula nilai tortuositasnya, begitu juga sebaliknya. Dengan demikian tortuositas dapat dijadikan parameter untuk menentukan kompleksitas struktur pori terhubung dari sampel digital medium berpori. Dari kedua sampel digital yang dianalisis dengan menggunakan metode perhitungan tortuositas yang sama seperti pada kelima sampel didapat nilai tortuositas batuan sebesar 0,0392 sedangkan untuk tanah yaitu 0,0431. Dari jalur pori yang terlacak pada kedua sampel tersebut dapat disimpulkan bahwa sampel tanah memiliki jalur pori terhubung yang lebih kompleks. Namun demikian kesimpulan ini diambil dari citra 2D yang belum bisa merepresentasikan kondisi sampel tersebut. Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat perlu dihitung nilai tortuositas untuk sampel digital 3D, sehingga kompleksitas yang terhitung dapat lebih representatif.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami selaku penulis mengucapkan terima kasih kepada Firmansyah S.Si juga Laboratorium Micro-CT Scan FMIPA ITB yang telah membantu dalam proses pemindaian sampel penelitian.

## REFERENSI

- [1] S. Feranie, U. Fawzi, and S. Bijaksana, "3D fractal dimension and flow properties in the pore structure of geological rocks", *Fractals*, 2011, Vol. 19, No. 3, p.291-207.
- [2] M. Barrande, R. Bouchet, R. Denoyel "Tortuosity of porous particles", *Anal. Chem.* 2007, 79, 9115-9121
- [3] B. Ghanbarian, M. Sahimi, A. Gerhard, "Tortuosity in porous media: a critical review", *Soil Science Society of Amerika Journal*, September 2013
- [4] Firmansyah, S. Feranie, F. Latief, "Tortuositas pada model 3D batuan berpori", *Spektra*, 2014, Vol. 15 No. 2.
- [5] Dvorkin, Jack. "Kozeny-Carman equation revisited", unpublished
- [6] L.L. Latour, R.L. Kleinberg, P.P. Mitra, C. H. Sotak, "Pore-size distribution and tortuosity in heterogeneous porous media", *Journal of Magnetic Resonance*, 1995 Series A 112, 83 – 91
- [7] G. Dougherty, J. Varro, "A quantitative index for the measurement of the tortuosity of blood vessels", *Medical Engineering & Physics*, 2000, 22, 567-574.

