

## Studi Perubahan Struktur Pori 3D Pada Batuan *Clay Cap* Panas Bumi Akibat Pengaruh Tekanan *Uniaxial* Daerah Potensi Panas Bumi Semarang

Sumarni<sup>1\*</sup>, Nanang Dwi Ardi<sup>1</sup>, Fourier Dzar Eljabbar Latief<sup>2</sup>, Selly Feranie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudhi 229 Bandung 40154, Indonesia

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

\* Corresponding author. E-mail: sumarnis093@gmail.com (Sumarni),

### ABSTRAK

*Clay cap* pada panas bumi merupakan lapisan yang bersifat kedap air. Hal ini menyebabkan pergerakan fluida panas yang terdapat di reservoir tertahan untuk sampai ke permukaan. Sampel batuan diambil dari lapisan *clay cap* daerah potensi panas bumi Semarang yang telah dianalisis untuk mengetahui perubahan struktur pori 3D dan karakteristik akibat pengaruh tekanan *uniaxial*. Struktur pori 3D dianalisis menggunakan metode *Digital Image Processing and Analysis*. Sampel yang digunakan berupa batuan breksi andesit terubah yang berbentuk silinder dengan ukuran diameter 4,4 cm dan tinggi 4,3 cm. Sampel batuan diambil dari sumur landaian suhu pada kedalaman 590 m. Sampel batuan diberikan tekanan *uniaxial* mulai dari 59 bar, 75 bar, 91 bar, 107 bar, 123 bar dan 156 bar. Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya perubahan struktur pori selama peningkatan tekanan. Besaran fisis yang diperoleh berupa distribusi ukuran pori dan rata-rata ukuran pori meningkat seiring kenaikan tekanan 59 bar-156 bar, porositas struktur pori fungsi tekanan  $\{\phi(P)\}$  bersifat power. Luas permukaan spesifik meningkat pada tekanan 59 bar-91 bar dan menurun pada tekanan 107 bar-156 bar serta dimensi fraktal meningkat pada tekanan 59 bar-107 bar dan menurun pada tekanan 123 bar-156 bar. Hal ini dipengaruhi oleh perubahan bentuk pori. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang karakteristik struktur pori pada batuan *clay cap* daerah potensi panas bumi.

**Kata Kunci:** *Clay cap*; Daerah potensi panas bumi; Struktur pori 3D; Tekanan *uniaxial*.

### ABSTRACT

Clay cap on geothermal is a water-resistant layer. It happens because the movement of hot fluid in the reservoir which is held and can not reach the surface. A sample of clay cap rock is taken from the geothermal potential area in Semarang that has been analyzed to know the structure change of 3D pore and to know the characteristics of uniaxial pressure. The 3D pore structure is analyzed by using Digital Image Processing and Analysis method. The sample is an altered ceses andesit breccia with diameter of 4.4 cm and height of 4.3 cm. The rock sample is collected from 590 m depth. The rock sample is given uniaxial pressure treatment by 59 bar, 75 bar, 91 bar, 107 bar, 123 bar, and 156 bar. The result shows that the pore structure changes during the increasing pressure. The physical magnitude is obtained as distribution of pore size and the average of increasing pore size depends on increasing pressure of 59 bar-156 bar, the pressure function porosity  $\{\phi(P)\}$  is a power. The specific surface area increases from 59 bar-91 bar but it decreases when the pressure is 107 bar-156 bar and fractal dimension increases when the pressure is 59 bar-107 bar and it decreases when the pressure is 123 bar-156 bar. It is influenced by the change of pore shape. The result of this study is expected to give an overview about the characteristics of the pore structure in clay cap geothermal potential area.

**Keywords:** Clay cap; Regional geothermal potential; 3D pore structure; Uniaxial pressure.

## 1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang terletak pada bagian Cincin Api Pasifik (*Ring of Fire on Pacific Rims*) sehingga memiliki potensi sumber energi panas bumi. Sumber energi panas bumi yang terdapat di Indonesia terjadi akibat pergerakan tiga lempeng, yaitu lempeng India-Australia, lempeng Pasifik, dan lempeng Eurasian [1]. Secara umum, sistem panas bumi terdiri dari sumber panas, cairan, daerah reservoir, dan lapisan penutup (*clay cap*) [2]. *Clay cap* pada panas bumi bersifat kedap air sehingga menyebabkan pergerakan fluida panas yang berasal dari reservoir tertahan sampai ke permukaan. Di lingkungan tektonik aktif batuan *clay cap* mengalami deformasi dan membentuk rekahan, tetapi dengan adanya proses kimia (alterasi hidrotermal) berupa pengendapan mineral sangat membantu dalam menutup rekahan yang terbentuk. Alterasi hidrotermal yang terjadi pada batuan *clay cap* menyebabkan *clay cap* bersifat kedap air (*impermeable*) dan memiliki permeabilitas yang rendah. Permeabilitas batuan yang rendah dapat diatasi dengan pemberian perlakuan pada batuan, diantaranya *hydraulic fracturing* [3], rekahan yang diinduksi dengan panas [4] dan stimulasi kimia [5].

Studi tentang peranan tekanan dalam reservoir telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pemberian *hydraulic fracturing* pada reservoir panas bumi berhasil menciptakan rekahan baru, meningkatkan produktivitas panas bumi dan perawatan dilakukan dengan *proppant* untuk menciptakan fraktur konduktif jangka panjang [3]. Penurunan tekanan pada reservoir menyebabkan rekahan tertutup mineral dan permeabilitas menurun [6]. Akan tetapi, tidak hanya lapisan reservoir yang penting untuk diteliti tetapi lapisan *clay cap* panas bumi sangat penting untuk diteliti karena untuk mengetahui karakteristik *clay cap* panas bumi yang ditinjau dari perubahan struktur pori 3D secara mikroskopis.

Struktur pori meliputi pori-pori dalam bentuk butir, pori berupa rekahan. Pori yang berupa rekahan dalam panas bumi terbentuk akibat pergerakan lempeng dan tekanan dari reservoir. Tekanan memegang peranan penting dalam sifat batuan. Banyak peneliti yang sudah melakukan penelitian tentang tekanan pada sifat mekanis batuan seperti Ozbek dkk (2012) [7], Batzle dkk. (1980) [8], Bernabe dkk. (1987) [9], Bobet dkk. (1998) [10], Eberthardt dkk.

(1999) [11], Kawakata dkk. (1997) [12], Wawersik dkk. (1970) [13] dan Yanagidani dkk. (1985) [14]. Oleh karena itu, terdapat banyak peneliti yang sudah melakukan penelitian tentang tekanan pada sifat mekanis batuan namun masih kurang peneliti yang menggunakan *digital rock physics* untuk karakteristik parameter struktur pori dalam bentuk citra 3D.

*Digital Rock Physics* merupakan analisis batuan yang dilakukan secara digital tanpa mengganggu struktur internal secara destruktif. Data yang digunakan berupa citra digital yang diperoleh menggunakan *Micro Computed Tomography (CT) Scan*.

Oleh karena itu, penelitian ini membahas tentang studi perubahan struktur pori 3D dan karakteristik pada batuan penutup panas bumi yang dipengaruhi oleh tekanan *uniaxial*.

## 2. Bahan dan Metode

### 2.1. Sampel Penelitian

Sampel batuan diambil dari sumur pemboran landaian suhu (*thermal gradient*) pada daerah potensi panas bumi yang berlokasi di kabupaten Semarang, provinsi Jawa Tengah yang dapat dilihat pada Gambar 1. Sampel batuan diambil pada kedalaman 590 m dari 702,60 m. Sampel batuan berbentuk silinder dengan diameter 4,4 cm dan panjang 4,3 cm dapat dilihat pada Gambar 2. Jenis batuan berupa breksi andesit terubah. Sampel batuan termasuk pada lapisan penutup (*clay cap*).



Gambar 1. Peta lokasi pengambilan sampel batuan.



Gambar 2. Sampel batuan penelitian.

## 2.2. Pemberian Perlakuan Tekanan

Sampel batuan panas bumi memiliki tekanan alami sebesar 59 bar hal ini karena batuan diambil dari kedalaman 590 meter, setiap kedalaman 10 meter tekanan naik 1 bar. Pemberian perlakuan tekanan pada sampel batuan dilakukan pada 5 keadaan yaitu, tekanan 75 bar, 91 bar, 107 bar, 123 bar dan 156 bar. Pemberian perlakuan tekanan dilakukan menggunakan peralatan pengujian kuat tekan *uniaxial* yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Peralatan pengujian tekan *uniaxial*.

## 2.3. Tahapan Pemindaian

Penelitian ini menggunakan instrumen *Micro CT Scan* produksi Bruker dengan tipe 1173 yang dapat dilihat pada Gambar 4. Pemindaian ini menggunakan sumber arus sebesar  $60 \mu\text{A}$  dan sumber tegangan sebesar 125 kV. Waktu pencahayaan selama 300 ms, menggunakan filter brass 0,25 mm dengan resolusi kamera  $1120 \times 1120$  piksel sesuai dengan kamera *binning*  $2 \times 2$ . Posisi objek sampel batuan terhadap sumber sebesar 166,412 mm dan kamera sumber sebesar 364,000 mm, ukuran gambar piksel isotropik yang dihasilkan adalah  $45,603425 \mu\text{m}$ . Proses scan batuan berlangsung selama 1 jam 17 menit 29 detik dan menghasilkan 1200 gambar proyeksi mentah.



Gambar 4. Bruker *Micro CT Scan* 1173

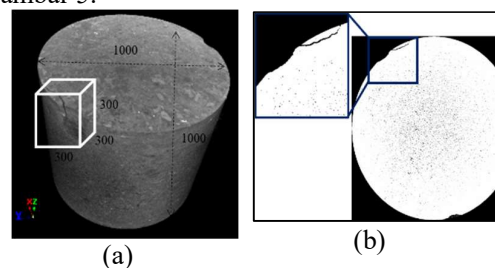
Hasil dari pemindaian sampel tersebut menghasilkan sekumpulan citra skala keabuan digital 2D yang dikenal dengan *raw image* dengan tingkat keabuan merepresentasikan tingkat atenuasi pada citra.

## 2.4. Tahapan Rekonstruksi

Rekonstruksi data digital merupakan proses pengirisan *cross-section* bayangan hasil pemindaian menjadi citra sayatan tipis (*thin section*) per 1 piksel yang diiris searah sumbu *z*. Rekonstruksi data digital menggunakan perangkat lunak NRecon. Tahapan rekonstruksi meliputi *beam hardening correction* dan *ring artifact reduction*.

## 2.5. Penentuan Perubahan Struktur Pori 3D

Data digital hasil rekonstruksi dilakukan *thresholding* menggunakan menggunakan perangkat lunak ImageJ dengan jenis *thresholding Auto Local Threshold* Metode Phansalkar [15]. Selanjutnya, penentuan *Region of Interest* dilakukan menggunakan perangkat lunak CTAn. Pemilihan *Region of Interest* untuk struktur pori berukuran  $300 \times 300 \times 300$  piksel yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemilihan *Region of Interest* (ROI) meliputi: (a) sub sampel untuk struktur pori; (b) citra 2D struktur pori pada *slice* ke-950 dengan tekanan 91 bar.

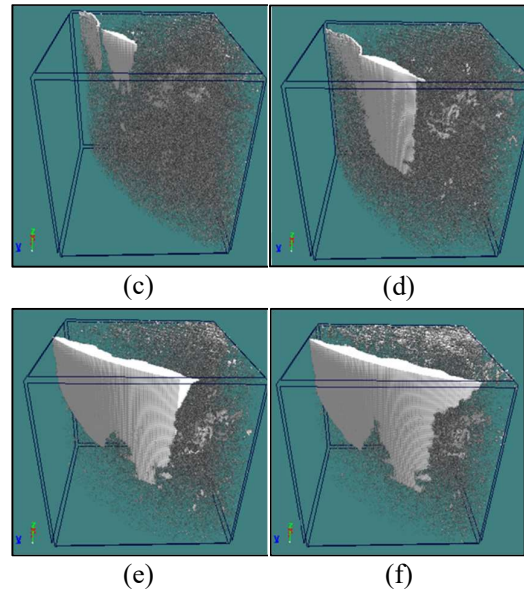
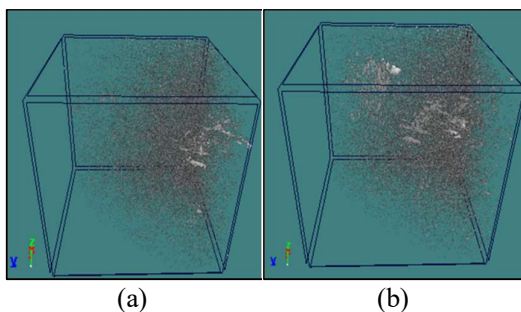
Kemudian dilakukan karakterisasi perubahan besaran fisis struktur pori 3D akibat pengaruh tekanan *uniaxial* terdiri dari distribusi

ukuran pori, rata-rata ukuran pori, porositas, luas permukaan spesifik dan dimensi fraktal.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Visualisasi 3D

Struktur pori meliputi pori-pori dalam bentuk butir, pori berupa rekahan dan bagian sisi atas yang pecah akibat perlakuan tekanan *uniaxial*. Berdasarkan hasil visualisasi 3D yang dapat dilihat pada Gambar 6 menunjukkan struktur pori 3D untuk variasi tekanan 59 bar, 75 bar, 91 bar, 107 bar, 123 bar dan 156 bar yang warna hitam adalah pori-pori pada batuan dan rekahan serta warna putih menunjukkan medium. Visualisasi 3D pada tekanan 59 bar yang ditunjukkan pada Gambar 6 (a) menggambarkan struktur pori 3D berupa pori-pori pada batuan dengan ukuran pori yang kecil dan tidak ada rekahan alamiah pada batuan tersebut. Visualisasi 3D pada tekanan 75 bar yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b) menggambarkan struktur pori 3D berupa pori-pori antar batuan dan rekahan yang terbentuk akibat pengaruh tekanan *uniaxial*. Visualisasi 3D pada tekanan 91 bar yang ditunjukkan pada Gambar 6 (c) menunjukkan struktur pori 3D berupa pori-pori yang bertambah dan tekanan menginduksi rekahan sehingga terbentuk rekahan baru yang memanjang. Visualisasi 3D pada tekanan 107 bar yang ditunjukkan pada Gambar 6 (d) menunjukkan adanya perubahan struktur pori berupa penambahan lebar dan panjang rekahan serta penambahan pori-pori. Visualisasi 3D pada tekanan 123 bar yang ditunjukkan pada Gambar 6 (e) menunjukkan rekahan pori yang mengalami pecah apabila dibandingkan dengan tekanan 107 bar maka ada penambahan rekahan yang semakin melebar dan memanjang. Visualisasi 3D pada tekanan 156 bar yang ditunjukkan pada Gambar 6 (f) menunjukkan rekahan pori yang mengalami pecah namun dapat dilihat pecahan batumannya mengalami pelebaran dan pemanjangan.



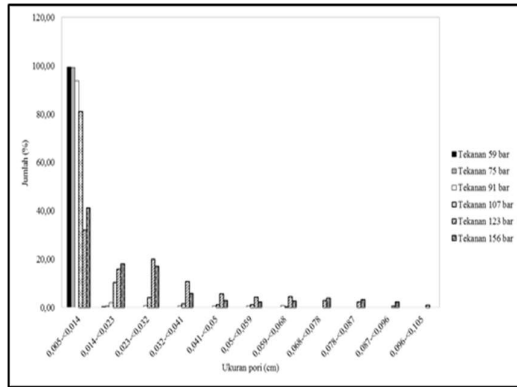
Gambar 6. Visualisasi 3D perubahan struktur pori pada sampel batuan: (a) pada tekanan alamiah 59 bar; (b) pada tekanan 75 bar; (c) pada tekanan 91 bar; (d) pada tekanan 107 bar; (e) pada tekanan 123 bar; (f) pada tekanan 156 bar.

#### 3.2. Besaran fisis struktur pori

Besaran fisis struktur pori terdiri dari distribusi ukuran pori, rata-rata ukuran pori, porositas, luas permukaan spesifik ( $S_sA$ ) dan dimensi fraktal.

##### a. Distribusi ukuran pori

Parameter besaran distribusi ukuran pori yang ditinjau berupa pori, rekahan dan sisi batuan bagian atas yang pecah. Distribusi ukuran pori-pori batuan dianalisis menggunakan perangkat lunak CTAn. Hasil citra 3D dianalisis menggunakan *structure separation* yang berfungsi untuk mengetahui distribusi ukuran pori menggunakan perangkat lunak CTAn [16]. Distribusi ukuran pori yang dianalisis hasil perlakuan tekanan 59 bar, 75 bar, 91 bar, 107 bar, 123 bar dan 156 bar dapat dilihat pada Gambar 7.

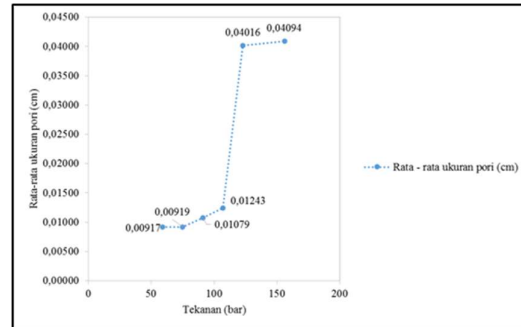


Gambar 7. Grafik hubungan frekuensi terhadap ukuran pori.

Grafik hubungan frekuensi terhadap ukuran pori untuk setiap kenaikan tekanan pada sub sampel batuan yang ditunjukkan pada Gambar 7 menjelaskan bahwa pada tekanan 59 bar yang merupakan tekanan alamiah menunjukkan bahwa distribusi ukuran pori bersifat homogen karena bentuk pori berupa pori-pori kecil. Pada tekanan 75 bar, 91 bar, dan 107 bar menunjukkan distribusi ukuran pori bersifat homogen karena bentuk pori berupa pori-pori kecil, rekahan dan sisi batuan bagian atas yang pecah sehingga bentuk pori akan melebar dan memanjang. Pada tekanan 123 bar dan 156 bar distribusi ukuran pori bersifat heterogen karena bentuk pori berupa pori-pori kecil dan sisi batuan bagian atas yang pecah melebar dan memanjang.

b. Rata-rata ukuran pori

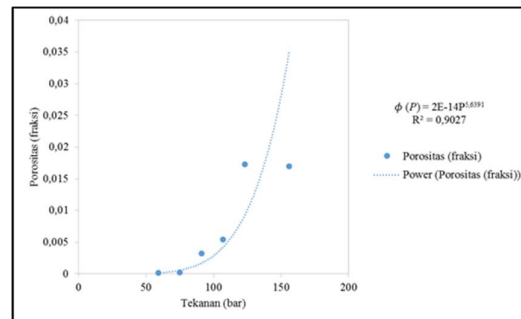
Rata-rata ukuran pori dianalisis menggunakan perangkat lunak CTAn. Grafik hubungan rata-rata ukuran pori terhadap tekanan yang ditunjukkan pada Gambar 8 menjelaskan bahwa kenaikan tekanan akan mempengaruhi ukuran pori. Pada tekanan 59 bar bentuk pori berupa pori-pori kecil. Pada tekanan 75 bar bentuk pori berupa pori-pori kecil dan rekahan. Pada tekanan 91 bar dan 107 bar bentuk pori berupa pori-pori kecil, rekahan dan sisi batuan yang pecah. Pada tekanan 123 bar dan 156 bar bentuk pori berupa pori-pori kecil dan sisi batuan yang pecah.



Gambar 8. Kurva hubungan rata-rata ukuran pori terhadap tekanan. Rata-rata ukuran pori pada tekanan 59 bar-156 bar memiliki rentang nilai antara 0,00917-0,04094 cm.

c. Porositas

*Open porosity* salah satu fungsi dari perangkat lunak CTAn dalam menganalisis porositas rekahan dengan satuan %. Hubungan porositas terhadap tekanan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva hubungan *open porosity* terhadap tekanan pada sub sampel.

Secara matematis, hubungan *open porosity* terhadap tekanan dapat dituliskan dengan Persamaan (1) berikut:

$$\phi(P) = 2 \times 10^{-14} P^{5,6391} \quad (1)$$

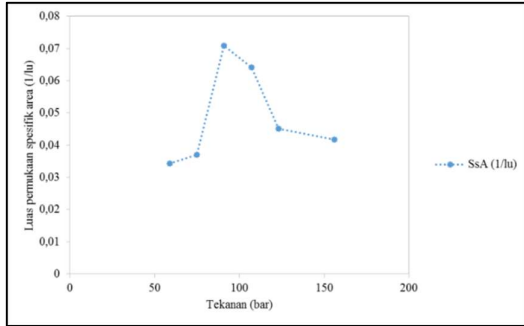
Berdasarkan Persamaan (1) menggambarkan bahwa porositas fungsi tekanan memiliki pola *Power* karena nilai  $R^2$  yang paling besar. Kenaikan tekanan mempengaruhi nilai porositas rekahan. Pola yang diperoleh semakin besar tekanan yang diberikan maka porositas rekahan membesar karena struktur pori dipengaruhi oleh rekahan yang akan melebar akibat tekanan yang menginduksi rekahan.

d. Luas permukaan spesifik

Luas permukaan spesifik menggambarkan luas permukaan pori per unit volume. *Object surface density* salah satu fungsi dari perangkat lunak CTAn dalam menganalisis luas permukaan spesifik dengan satuan 1/cm.



Hubungan luas permukaan spesifik terhadap tekanan dapat dilihat pada Gambar 10. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai luas permukaan spesifik meningkat pada tekanan 59 bar dan 75 bar sedangkan luas permukaan spesifik menurun pada tekanan 91 bar sampai dengan 156 hal ini karena dipengaruhi oleh bentuk pori rekahan.



Gambar 10. Kurva hubungan luas permukaan spesifik terhadap tekanan.

e. Dimensi Fraktal

Dimensi fraktal pada perubahan struktur pori akibat pengaruh tekanan *uniaxial* dengan perlakuan tekanan 59 bar, 75 bar, 91 bar, 107 bar, 123 bar dan 156 bar dihitung menggunakan metode *box-counting* [10]. Sampel yang digunakan 300×300×300 maka sub kubus yang digunakan 2, 3, 4, dan 5. Hasil dimensi fraktal pada perubahan struktu pori dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi Fraktal perubahan struktur pori akibat pengaruh tekanan *uniaxial*.

Tekanan (bar)	Rata-rata dimensi fraktal pori
59	2,5154
75	2,5519
91	2,6981
107	2,7295
123	2,6474
156	2,6393

Dimensi fraktal pori bukan bilangan bulat hal ini menunjukkan bahwa sampel batuan berupa objek fraktal. Perubahan dimensi fraktal pori pada setiap kenaikan tekanan maka nilai dimensi fraktal semakin naik ditunjukkan pada tekanan 59 bar sampai dengan tekanan 107 bar tetapi nilai dimensi fraktal menurun pada tekanan 123 bar dan tekanan 156 bar hal ini

disebabkan karena adanya perubahan mikrostruktur pori yakni pada tekanan 123 bar dan tekanan 156 bar struktur porinya dipengaruhi oleh bentuk pori rekahan yang melebar sehingga nilai dimensi fraktalnya menurun. Dimensi fraktal pori ini dapat dihubungkan dengan nilai porositas.

4. Simpulan

Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya perubahan struktur pori selama peningkatan tekanan. Distribusi ukuran pori pada tekanan 59 bar, 75 bar, 91 bar, 107 bar bersifat homogen sedangkan pada tekanan 123 bar dan 156 bar bersifat heterogen. Hal ini disebabkan karena bentuk pori yang terdiri dari pori-pori kecil, rekahan, dan sisi batuan yang pecah. Rata-rata ukuran pori pada tekanan 59 bar-156 bar memiliki rentang nilai antara 0,00917-0,04094 cm. Kenaikan tekanan mempengaruhi nilai porositas rekahan. Pola yang diperoleh semakin besar tekanan yang diberikan maka porositas rekahan membesar karena struktur pori dipengaruhi oleh rekahan yang akan melebar akibat tekanan yang menginduksi rekahan. Besaran fisis porositas  $\phi(P)$ . Luas permukaan spesifik meningkat pada tekanan 59 bar dan 75 bar sedangkan luas permukaan spesifik menurun pada tekanan 91 bar sampai dengan 156 hal ini karena dipengaruhi oleh bentuk pori rekahan. Nilai dimensi fraktal akan semakin naik pada tekanan 59 bar, 75 bar, 91 bar dan 107 bar dan semakin turun pada tekanan 123 bar dan 156 bar, hal ini karena perubahan bentuk pori.

5. Ucapan Terima Kasih

Saya mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sumber Daya Mineral Batu Bara dan Panas Bumi, Bandung yang telah memberikan sampel batuan panas bumi untuk diteliti. Penelitian ini merupakan bagian dari program penelitian “PDUPT Kemenristekdikti” dengan nomor kontrak 074/UN40.D/PP/2018.

6. Referensi

[1] Saptadji, N. M. (2009). Karakteristik reservoir panas bumi. Training Advanced Geothermal Engineering, 6-17.  
 [2] Idral, A., & Geologi, P. S. D. (2009). Penerapan Metoda Eksplorasi Geofisika Pada Penyelidikan Sumber Daya Mineral Dan Energi. Program Penellitian Bawah Permukaan Pusat Sumber Saya Geologi.

- Jakarta.
- [3] Legarth, B., Huenges, G., Zimmermann, G. (2005). Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and Implications. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42:1028-1041.
- [4] Charlez, P., Lemonnier, P., Ruffet, C., Boutéca, M. J., & Tan, C. (1996, January). Thermally induced fracturing: analysis of a field case in North Sea. *European Petroleum Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- [5] Bartko, K. M., Nasr-El-Din, H. A., Rahim, Z., & Al-Muntasheri, G. A. (2003, January). Acid fracturing of a gas carbonate reservoir: the impact of acid type and lithology on fracture half length and width. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [6] Ozbek, A., Unsal, M., & Dikec, A. (2013). Estimating Uniaxial Compressive Strength Of Rocks Using Genetic Expression Programming. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(4): 325-329.
- [7] Batzle, M. L., Simmons, G., & Siegfried, R. W. (1980). Microcrack Closure in Rocks Under Stress: Direct Observation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85:7072-7090.
- [8] Bernabe, Y. (1987). The effective pressure law for permeability during pore pressure and confining pressure cycling of several crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B1), 649-657.
- [9] Bobet, A., & Einstein, H. H. (1998). Fracture Coalescence In Rock-Type Materials Under Uniaxial And Biaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7):863-888.
- [10] Feranie S, Fauzi U, Bijaksana S. (2011). 3D Fractal Dimension and Flow Properties In The Pore Structure Of Geological Rocks. *Fractals*. 19(03):291-7.
- [11] Eberhardt, E., Stead, D., & Stimpson, B. (1999). Quantifying Progressive Pre-Peak Brittle Fracture Damage in Rock During Uniaxial Compression. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences*, 36(3):361-380.
- [12] Kawakata, H., Cho, A., Yanagidani, T., & Shimada, M. (1997). The Observations of Faulting in Westerly Granite Under Triaxial Compression By X-Ray CT Scan. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34:151-e1.
- [13] Wawersik, W. R., & Fairhurst, C. (1970). A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 7:561-575).
- [14] Yanagidani, T., Ehara, S., Nishizawa, O., Kusunose, K., & Terada, M. (1985). Localization of Dilatancy in Ohshima Granite Under Constant Uniaxial Stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90:6840-6858.
- [15] Phansalkar, N., More, S & Sabale, A et al. (2011). Adaptive Local Thresholding for Detection of Nuclei in Diversity Stained Cytology Images. *International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSPP)*: 218-220, doi: 10.1109/ICCSPP.2011.5739305.
- [16] Hildebrand, T. O. R., & Rügsegger, P. (1997). Quantification Of Bone Microarchitecture With The Structure Model Index. *Computer Methods in Biomechanics and Bio Medical Engineering*, 1(1):15-23.