

## PERBANDINGAN ANALISIS POROSITAS PORITES MENGUNAKAN TEKNIK MICRO-CT DAN OPTIK

### *A COMPARISON OF OPTICAL AND MICRO-CT TECHNIQUE FOR POROSITY ANALYSIS OF PORITES*

**Lina Nur Listiyowati**

Puslit Geoteknologi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jl. Sangkuriang, Bandung

**ABSTRAK** Makalah ini membahas perbandingan nilai porositas sampel karang *Porites* berdasarkan citra yang dihasilkan dari teknik optik dan *micro-CT*. Teknik optik biasa digunakan dalam perhitungan porositas batuan dengan menghitung prosentasi lubang pori dengan matrik batuan pada sayatan tipis. Sedangkan *micro-CT* merupakan teknik *nondestructive* yang sering digunakan dalam analisa 3D untuk menginvestigasi struktur internal sebuah benda, termasuk rongga pori. Karakteristik dan nilai porositas karang *Porites* ditentukan dengan mengklasifikasikan citra *micro-CT* dan optik sebagai pori dan matrik berdasarkan tingkat keabuannya. Karakteristik pori menunjukkan bahwa teknik optik lebih bisa mengidentifikasi struktur pori yang menerus dan memanjang, sedangkan *micro-CT* lebih mampu mengidentifikasi pori dengan kebundaran tinggi. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa metode *micro-CT* mampu mengidentifikasi ruang pori lebih banyak dibanding pada klasifikasi secara optik pada lapisan yang sama. Nilai porositas karang *Porites* berdasarkan teknik *micro-CT* dan teknik optik tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan sehingga teknik *micro-CT* dapat digunakan dalam perhitungan porositas karang

*Porites* dimana teknik *micro-CT* mampu mengidentifikasi pori yang sering tidak teridentifikasi oleh teknik optik.

**Kata kunci:** Porositas, Micro-CT, Optik, *Porites*.

**ABSTRACT** This paper discusses the porosity value comparison of *Porites* coral based on optical and micro-Computed Tomography (*micro-CT*) images to get the optimum value of porosity. Optical techniques are commonly used in rock porosity measurement by measure prosentase of holes and matrix based on thin sections, whereas *micro-CT* as a non-destructive 3D analysis technique is commonly used to investigate internal structures of an object, including rock porosity void. Characteristic and porosity value of *Porites* coral were determined based on the percentage of pores void and matrices. These pores and matrices were identified using grey scale-based *micro-CT* and optical images classification. Pore-based characteristic shows that optical method is better to identify continuous and elongated pore structures than the *micro-CT* method, which is good to identify high circular pores. *Micro-CT* method is able to identify pore space better than optical classification method. There were not significant differences of *Porites* coral values based on *micro-CT* and optical techniques. These results show that *micro-CT* technique can be used for *Porites* porosity measurement. Furthermore, unidentified pore by optical technique can be detected by *micro-CT*.

**Keywords:** Porosity, micro-CT, Optic, *Porites*.

#### PENDAHULUAN

Porositas batuan adalah perbandingan antara volume ruang pori pada batuan dengan volume total batuan. Porositas batuan menjadi salah satu parameter penting dalam beberapa studi seperti

---

Naskah masuk : 2 Januari 2018  
Naskah direvisi : 24 Mei 2018  
Naskah diterima : 25 Mei 2018

---

Lina Nur Listiyowati  
Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI  
Kompleks LIPI Gd. 70, Jl Sangkuriang Bandung 40135  
Email : linalistiyowati24@gmail.com

studi mengenai kualitas batubara sebagai reservoir *Coalbed Methane* (Clarkson dan Bustin, 1996; Wu et al., 2011; Meng et al., 2015), dan studi mengenai pengaruh lingkungan terhadap kalsifikasi karang (Caroselli et al., 2011; Bucher et al., 1998). Pengukuran porositas batuan biasanya dilakukan melalui analisis stereologi dari sayatan tipis, yang biasa disebut sebagai teknik optik (Anselmetti, 1998). Kekurangan dari teknik optik ini adalah diperlukannya waktu yang lama dalam preparasi sampel dan merupakan pendekatan analisis yang destruktif. Sebagai alternatif lain, dalam studi ini digunakan metode *micro-CT* untuk pengukuran porositas sehingga tidak merusak sampel. Secara teori, *micro-CT* dapat memvisualisasikan 3D struktur internal suatu sampel tanpa merusak sampel tersebut, sehingga dapat dilakukan karakterisasi ruang pori secara kuantitatif (Carlson et al., 2003).

Prinsip kerja *micro-CT* sama dengan peralatan *CT* medis, tetapi mempunyai resolusi yang lebih tinggi hingga mencapai kurang dari 5  $\mu\text{m}$ . *Micro-CT* sudah banyak digunakan dalam bidang kebumihan. *Micro-CT* bisa digunakan untuk menganalisa spasi dan bukaan *cleat* batubara (Mazumder et al., 2006; Yao et al., 2009), penghitungan porositas mikro secara kuantitatif pada batupasir, karbonat, *shale* dan batubara (Mayo et al., 2015) dan memvisualisasikan struktur pori dalam 3D (Carlson et al., 1999; Landis et al., 2000). Penghitungan porositas dengan teknik *micro-CT* juga dilakukan pada karang dari jenis *Acropora pulchra* (Roche et al., 2010) dimana karakteristik porositas dapat menunjukkan pengaruh antropogenik saat pertumbuhannya.

Fokus studi ini adalah melakukan perhitungan porositas pada sampel karang *Porites*. Karang yang tumbuh pada musim kemarau memiliki porositas lebih tinggi dengan nilai absorbansi lebih rendah dibandingkan dengan karang yang tumbuh pada musim hujan (Caroselli et al., 2011). Semakin besar porositas maka semakin berkurang kekuatan karang untuk mentoleransi kerusakan fisik akibat gelombang dan abrasi, sehingga karang akan lebih mudah rusak (Bucher, 1998). Tujuan penelitian ini adalah melakukan perbandingan nilai porositas karang *Porites* berdasarkan citra yang dihasilkan dengan teknik optik dan teknik *micro-CT* untuk mendapatkan hasil perhitungan yang optimal.

## METODE

### *Pengambilan Sampel Porites*

Studi ini menggunakan sampel karang *Porites* dari endapan karbonat berumur kuartar. Sampel berupa inti bor dengan diameter 25,4 mm dan panjang total 150 mm yang diambil dari dalam laguna Pulau Panggang, Kepulauan Seribu. Pengambilan sampel karang dilakukan dengan menggunakan bor tangan dengan tenaga penggerak yang bersumber pada tekanan udara. Sampel yang digunakan sepanjang 40 mm dari bagian bawah, dan dipotong menjadi empat bagian dengan interval 10 mm, dimana sebelumnya karang dipindai dengan *micro-CT*. Preparasi sayatan tipis dilakukan menggunakan resin impregnasi *enthelan* dan dilekatkan pada kaca objek dan dipoles hingga ketebalan sekitar 10-30  $\mu\text{m}$ . Analisa sayatan tipis dilakukan di laboratorium optik Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI dan pemindaian *micro-CT* dilakukan di laboratorium *micro-CT* FMIPA-ITB.

### *Pengambilan citra micro-CT dan citra optikal*

Citra yang dihasilkan *micro-CT* merupakan hasil rekaman proyeksi *X-ray* sebuah objek pada sudut yang berbeda-beda. Algoritma *back projection* digunakan untuk merekonstruksi irisan virtual sebuah obyek, sehingga dapat menggambarkan variasi koefisien atenuasi linier. Nomor atom dan densitas obyek serta energi *X-ray* yang digunakan akan mempengaruhi koefisien atenuasi. Rekonstruksi citra 3D dapat dihasilkan dengan menumpuk beberapa irisan citra 2D. Pemindaian menggunakan pemindai *micro-CT* SkyScan 1173 Bruker, Belgia yang dapat menghasilkan energi *X-ray* yang tinggi sehingga sesuai untuk memindai karang *Porites* yang merupakan batuan dengan densitas tinggi. Pemindaian dilakukan pada 100 kV dan 80  $\mu\text{A}$  selama 3 jam. Pemindaian 360° dilakukan dengan lima proyeksi *X-ray* setiap 0,2 derajat, dengan masing-masing waktu paparan selama 1150 ms. Ukuran *voxel* adalah sekitar 32  $\mu\text{m}$  untuk sampel berdiameter 25,4 mm.

Analisis porositas juga dilakukan pada citra hasil sayatan tipis berdasarkan *grid* yang telah ditentukan. Analisis dilakukan dengan mikroskop polarisasi Nikon Eclipse 50iPOL yang dilengkapi dengan Nikon DS-Fi1, kamera video untuk memverifikasi hasil *micro-CT*. Sampel sayatan tipis diamati menggunakan polarisasi nikol sejajar dan nikol silang dengan perbesaran 5x dengan

mengambil foto yang representatif dari masing-masing sampel. Foto hasil pengamatan ditransmisikan ke *hardware*, sehingga citra dapat disimpan dalam sebuah format jpeg (1280x960 pixels).

### **Pemrosesan citra micro-CT**

Rekonstruksi dari proyeksi *X-ray* menggunakan modifikasi dari algoritma *back-projection* (Li et al., 2014) dengan menggunakan *software* Nrecon SkyScan v. 1.6.5 (Bruker microCT, Belgia) untuk menghasilkan citra irisan melintang. Artefak harus dihilangkan atau diminimalisasi sebelum proses kuantifikasi agar dapat menampilkan bagian dalam suatu obyek secara jelas (Van Geet et al., 2001). Artefak yang paling sering pada proses kuantifikasi adalah *beam hardening*. Citra dioptimalkan menggunakan algoritma kompensasi standar *post-alignment*, diperlakukan menggunakan filter *smoothing* dengan *Gaussian window kernel* agar histogram skala keabuan dan resolusi mempunyai kisaran yang sama dan untuk koreksi artefak cincin.

*Beam hardening* terjadi karena peralatan *micro-CT* menggunakan sumber *X-ray polychromatic*. Hal ini disebabkan oleh adanya energi *X-ray* yang rendah terserap, sehingga spektrum energi *X-ray* polikromatik berubah selama menembus obyek dimana atenuasi akan berubah (Van Geet et al., 2003). Pengurangan *beam hardening* ini dapat dilakukan dengan menggunakan *hardware filters* berupa logam dan menggunakan metode linierisasi dari persamaan Beer's (Van Geet, 2001). Selanjutnya koreksi *beam hardening* dilakukan dengan menggunakan *software* NRecon untuk mengecek bahwa seluruh profil intensitas *X-ray* tetap linear.

Nilai *threshold* ditentukan melalui dua metode pendekatan umum: *edge-detection* dan berdasarkan histogram. Algoritma *edge-detection* (Hasan and Ko, 2016; Canny, 1986) membedakan matrik terhadap pori dengan delineasi batas berdasarkan perubahan densitas spasial. Setiap data set citra, skala keabuan citra diolah menggunakan algoritma *edge-detection*, dan nilai *threshold* dipilih dimana terdapat kesesuaian antara citra biner dengan tepi pori-pori yang terdeteksi. *Threshold* berdasarkan histogram ditentukan menggunakan histogram dari skala keabuan dataset citra. Nilai *threshold* dipilih dengan mengidentifikasi dua puncak tertinggi dari histogram pada masing-masing dataset citra dan

level skala keabuan sesuai dengan titik terendah diantara puncak, yang mempresentasikan transisi antara matrik dan pori. Proses pemilihan *threshold* menggunakan histogram juga diverifikasi dengan inspeksi secara lokal dari bentuk pori setelah *thresholding*. Dari karang *Porites* yang dianalisis, koefisien variasi *threshold* yang digunakan adalah 71. Gambar 3 (E-H) menunjukkan citra hasil rekonstruksi dengan kode warna dimana warna yang lebih gelap mengindikasikan area dengan densitas rendah, dan paling gelap mengindikasikan pori-pori yang terisi oleh udara.

### **Penghitungan ruang pori pada citra micro-CT**

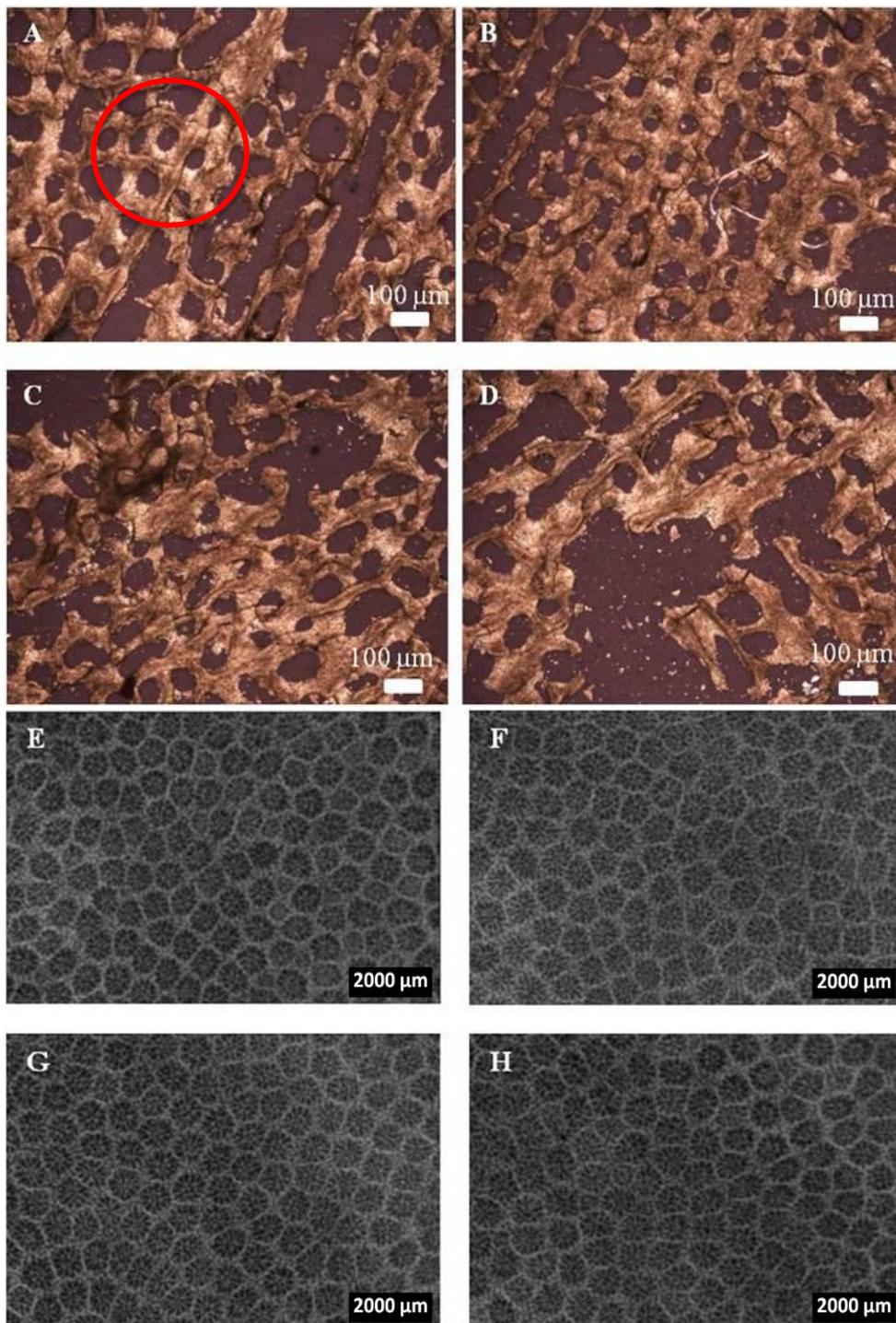
Porositas diartikan sebagai rasio antara volume ruang kosong (pori) dan volume batuan seluruhnya. Bagian yang mempresentasikan pori-pori ditentukan dengan memilih semua *voxel-voxel* dengan nilai densitas lebih rendah dari nilai *threshold*. *Threshold* dipilih berdasarkan pada asumsi bahwa terdapat hubungan linier antara nilai CT dengan densitas (Taud et al., 2005) sehingga pori teridentifikasi (Keller, 1998). Masing-masing *voxel* diperhatikan dalam menghitung porositas. Nilai CT mempunyai kesamaan dengan tingkat keabuan. Nilai CT yang rendah mempunyai tingkat keabuan 0 (gelap) dan diidentifikasi sebagai pori.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Perbandingan karakteristik pori**

Citra 3D yang dihasilkan *micro-CT* merupakan hasil tumpukan citra 2D, yang dapat dilakukan analisa baik secara menyeluruh atau pada bagian tertentu dari sampel secara bersamaan tanpa merusak sampel. Berbeda dengan teknik optik, dimana citra yang didapat merupakan citra 2D hasil dari penyayatan dari sampel yang berakibat merusak sampel. Preparasi sampel untuk analisis optik membutuhkan ketelitian dan waktu yang lama karena sayatan yang dianalisa harus memiliki ketebalan tertentu dengan permukaan yang rata. Sedangkan, sampel yang digunakan untuk analisis *micro-CT* tidak membutuhkan preparasi secara khusus dan waktu pemindaian dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

Koefisien atenuasi linier pada citra *micro-CT* merupakan atenuasi rata-rata dari seluruh *voxel*, yang dihitung baik berupa pori-pori maupun matrik batuan. Koefisien atenuasi linier dapat dikorelasikan dengan densitas dan porositas sampel, setelah *beam hardening* dikoreksi (Van

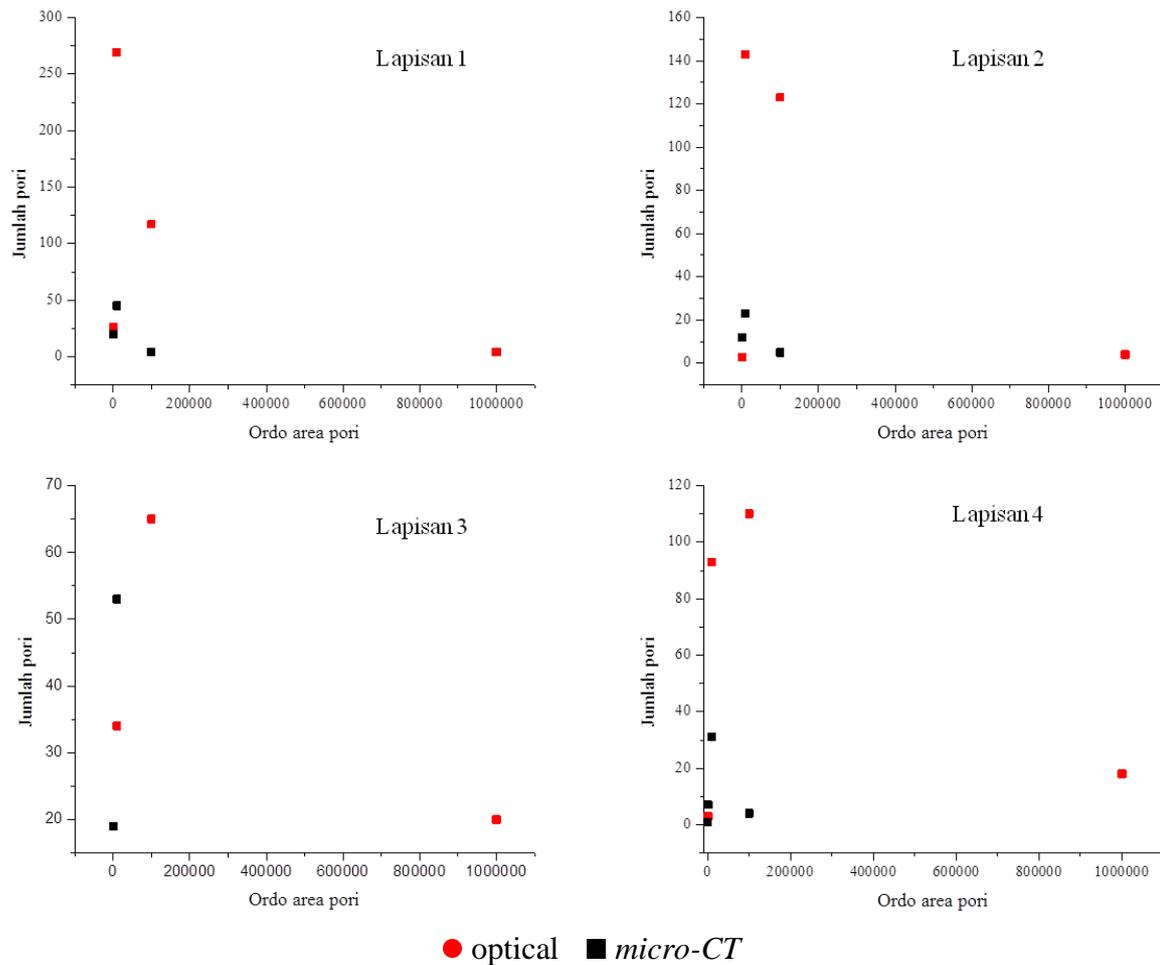


Gambar 1. Citra hasil mikroskop polarisasi nikol bersilang (A-D) dan citra *micro-CT* (E-H) pada sampel *Porites* dari Pulau Panggang.

Geet, 2003). Sekitar 1280 irisan dipindai secara tegak lurus terhadap sumbu longitudinal dari sampel yang berbentuk silinder. Koefisien atenuasi rata-rata setiap irisan dihitung untuk menghitung porositas dimana merupakan hasil dari konversi densitas rata-rata. Citra hasil

pemindaian *micro-CT* dan citra hasil analisis sayatan tipis ditampilkan pada Gambar 1.

Citra yang dihasilkan tidak menunjukkan luas area yang sama karena adanya keterbatasan resolusi citra saat pemindaian menggunakan *micro-CT*.



Gambar 2. Sebaran ukuran pori pada citra optik dan *micro-CT*.

Hal ini dikarenakan pada teknik *micro-CT*, ukuran sampel mempengaruhi resolusi (Cnudde et al., 2009; Cnudde and Boone, 2013), semakin kecil ukuran sampel maka resolusi akan semakin tinggi. Resolusi citra *micro-CT* akan sama dengan citra optik untuk ukuran sampel diperkecil hingga mencapai satuan milimeter. Perbedaan resolusi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai porositas *Porites*, hal ini terlihat pada nilai porositas yang didapatkan dari kedua teknik ini relatif sama. Kelebihan citra optik dibanding citra *micro-CT* adalah mempunyai multi *chroma* sehingga memudahkan dalam interpretasi citra.

Dari hasil teknik optik (Gambar 1A-D), ditunjukkan adanya struktur dinding terdiri dari beberapa pori yang besar dikelilingi oleh pori yang lebih kecil. Pori berbentuk *tube* yang membentuk seperti sarang lebah dan mempunyai ukuran yang bervariasi dengan ukuran pori terbesar sekitar

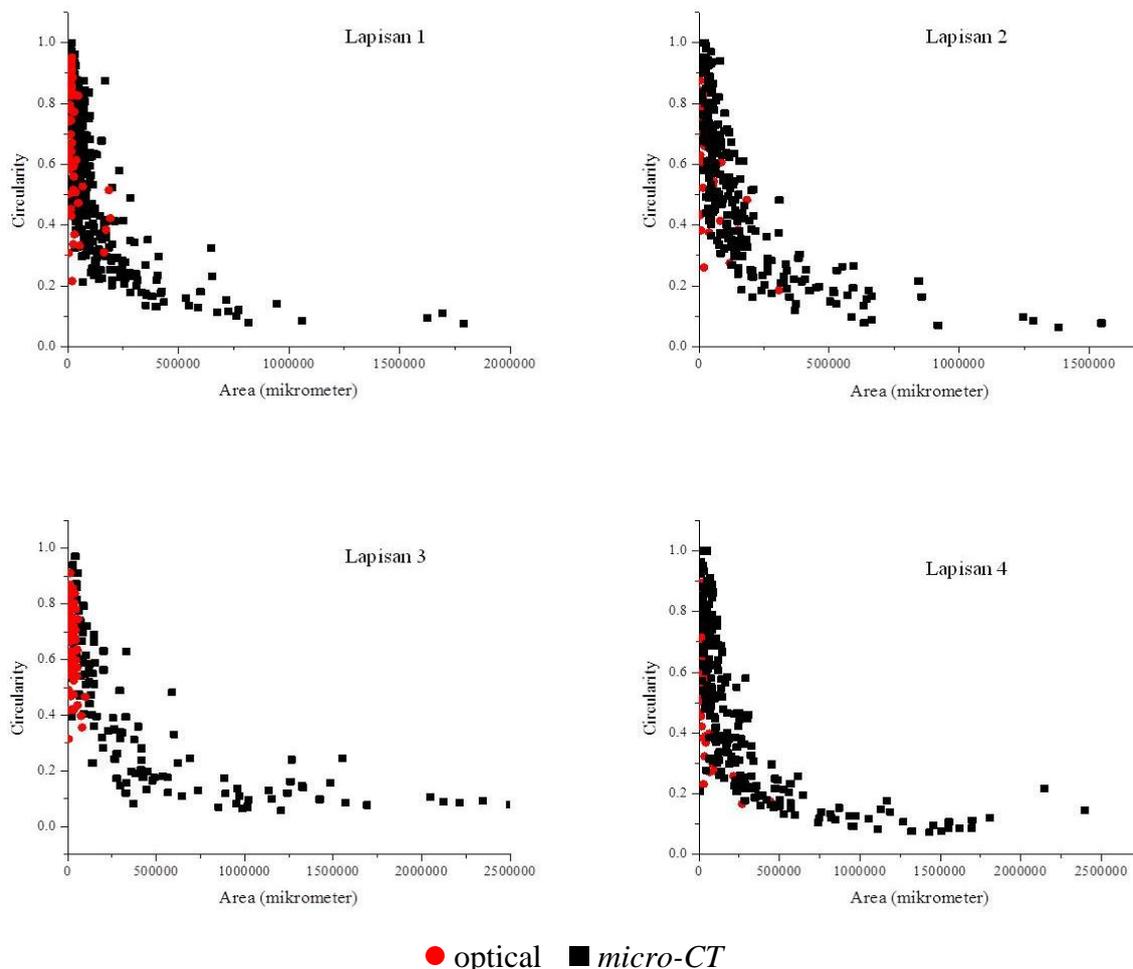
441,375  $\mu\text{m}$  dan yang terkecil sekitar 697  $\mu\text{m}$ . Adanya warna yang lebih gelap di tengah yang berbentuk memanjang pada citra optik diduga karena adanya sementasi pada contoh. Citra hasil *micro-CT* mempunyai kenampakan massa yang *porous* dengan lubang-lubang pori kecil berkelompok dan dipisahkan oleh skeleton yang lebih tebal. Ukuran kelompok pori relatif sama dengan bentuk relatif lingkaran. Pada citra *micro-CT* struktur pori terlihat lebih seragam dibandingkan pada citra optik, hal ini disebabkan oleh resolusi citra *micro-CT* lebih rendah dibanding pada citra optik. Perbedaan resolusi citra mengakibatkan perbedaan jumlah pori yang berhasil diidentifikasi, dimana jumlah pori pada citra optik jauh lebih sedikit dibanding pada citra *micro-CT*.

Distribusi ukuran pori mempunyai jangkauan yang sangat luas dari ratusan hingga jutaan

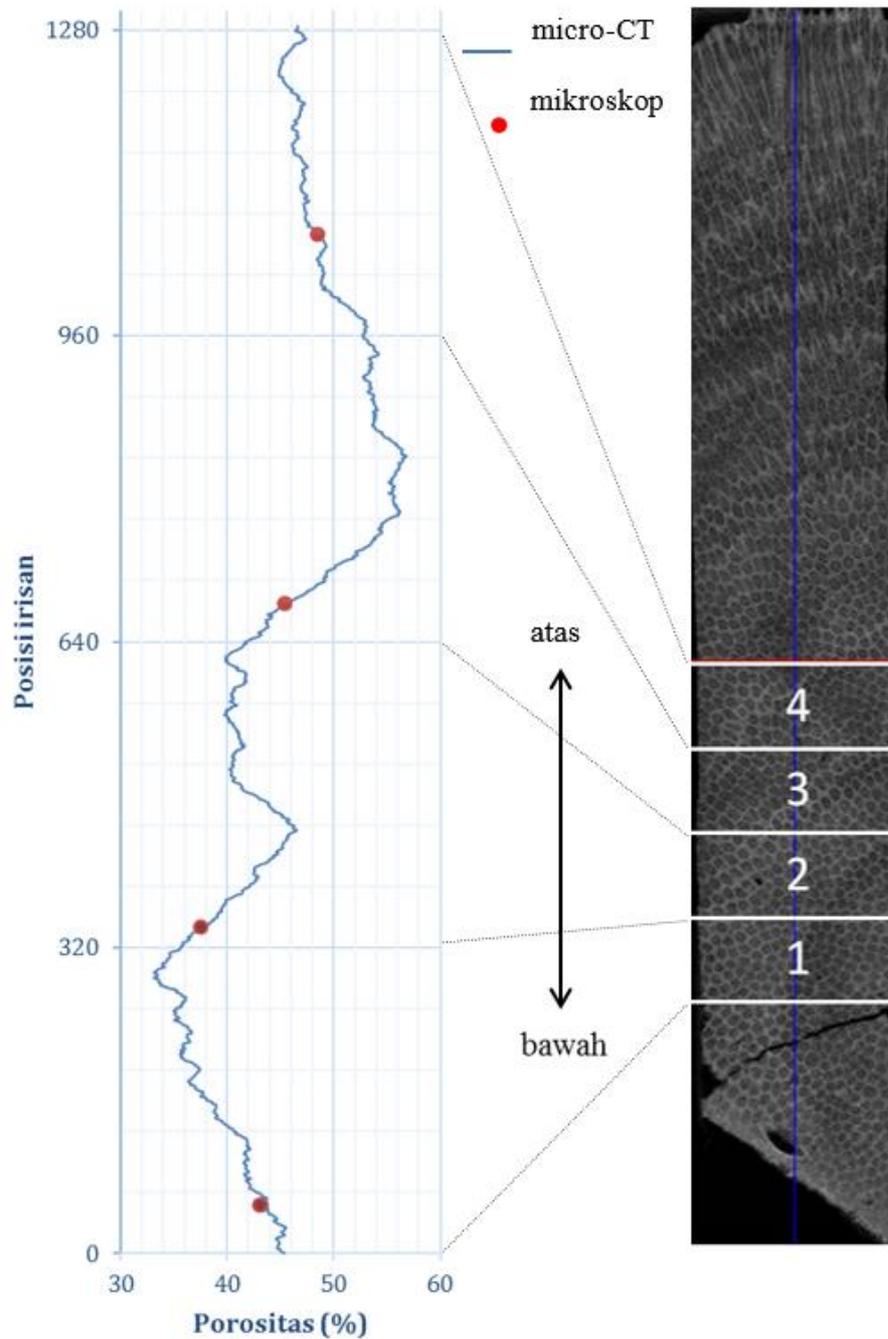
mikrometer, sehingga perlu pengelompokan ukuran pori. Pengelompokan ukuran pori berdasarkan ordo juga sudah dilakukan oleh Laine et al., (2008). Ordo terkecil pada citra adalah ordo dua yang mempunyai ukuran ratusan mikrometer dan ordo terbesar adalah ordo lima. Citra biner pada citra *micro-CT* didominasi oleh pori dengan ukuran ordo lima, sedangkan citra biner pada citra optik didominasi oleh ordo empat. Pada citra optik ukuran pori terkecil yang teridentifikasi adalah ordo dua dan ukuran pori terbesar adalah ordo lima. Sedangkan pada citra *micro-CT* ukuran pori terkecil yang teridentifikasi adalah ordo tiga dan ukuran pori terbesar adalah ordo lima. Hal ini menunjukkan bahwa citra optik lebih bisa mengidentifikasi ukuran pori dengan ukuran lebih kecil, tetapi hal ini bisa dikarenakan oleh resolusi citra yang berbeda antara resolusi citra optik

dengan citra *micro-CT*. Pada Gambar 2, terlihat sebaran ukuran pori pada citra *micro-CT* lebih konsisten daripada citra optik. Proporsi sebaran ukuran pori pada citra optik menggambarkan berbagai proporsi dari jumlah pori. Berdasarkan perbandingan kebundaran pada Gambar 3 menunjukkan bahwa citra *micro-CT* lebih mampu menggambarkan pori yang kecil dengan lebih *circular* dari pori pada citra optik. Kebundaran berkurang dengan bertambahnya luas area pori.

Hal ini menunjukkan bahwa *micro-CT* secara jelas dapat digunakan untuk pengukuran porositas total. *Micro-CT* dapat memvisualisasikan pori - pori dalam 3D, sehingga dapat menyediakan informasi mengenai konektivitas pori-pori. Pengelompokan antara pori - pori dengan matrik dievaluasi dengan *thresholding*. Hasil pengukuran porositas dari



Gambar 3. Perbandingan kebundaran pori dengan area pori. Kebundaran pori merupakan fungsi dari area dan rata-rata keliling.



Gambar 4. Evaluasi pengukuran porositas *Porites* menggunakan *micro-CT* dan mikroskop polarisasi. Titik merah merupakan nilai porositas hasil pengukuran dengan sayatan tipis.

kedua teknik diplot pada Gambar 4, meskipun kedua teknik ini menghasilkan dua tipe informasi yang berbeda (2 Dimensi vs 3 Dimensi), namun hasil perhitungan mempunyai tren yang hampir sama pada 4 irisan yang mewakili 40 mm karang *Porites*. Dari citra hasil *micro-CT* diperoleh porositas total rata-rata 43,15%, 37,54%, 45,41%,

dan 47,75% berurutan dari bawah ke atas. Hasil perhitungan porositas menggunakan teknik sayatan tipis menghasilkan nilai porositas 42,52%, 37,93%, 45,41%, dan 48,51% berurutan dari lapisan bawah ke atas, dimana nilai-nilai tersebut masuk dalam *range* nilai porositas masing-masing blok kedalaman (Gambar 4).

Perhitungan porositas selain dilakukan dengan teknik *micro-CT* dan optik, juga dilakukan perhitungan porositas dengan percobaan laboratorium untuk kalibrasi nilai porositas dengan kedua teknik yang digunakan. Pengukuran porositas di laboratorium menggunakan metode *imbibition*. Porositas hasil pengukuran laboratorium adalah 41% dimana lebih kecil dibanding dengan porositas rata-rata hasil pengukuran *micro-CT* maupun secara optik. Hal ini dikarenakan, perhitungan laboratorium dipengaruhi oleh keterhubungan antar pori, sedangkan pada perhitungan *micro-CT*, setiap pixel bernilai rendah akan diklasifikasikan sebagai pori. Pada pengukuran porositas dengan sayatan tipis, tidak akan bisa membedakan antara pori-pori terisolasi dengan pori-pori terhubung, dimana *connected pores* yang saling terhubung akan memungkinkan dilewati oleh fluida.

#### **Variasi porositas setiap lapisan sampel**

Kerangka dalam *Porites* pada dasarnya sebagian besar terdiri dari massa yang berkembang dengan orientasi vertikal (Barnes dan Devereux, 1988). Jumlah dan spasi kerangka vertikal membentuk karakteristik taksonomi yang penting dalam pertumbuhan karang (Veron dan Pichon, 1982). Pertumbuhan *Porites* akan membentuk *banding* gelap terang dimana satu pasang gelap terang merupakan pertumbuhan *Porites* dalam satu tahun. Dalam penelitian tidak dilakukan perbandingan antara porositas pada *band* gelap dengan *band* terang, karena keterbatasan dari akuisisi data pada sayatan tipis. Kerapatan *banding* dikontrol oleh beberapa faktor, seperti perubahan intensitas cahaya karena perubahan musim, temperatur air laut, sedimentasi, dan turbiditas. Intensitas cahaya akan mempengaruhi pertumbuhan alga. Tingkat kalsifikasi akan mempengaruhi kerapatan kerangka dimana akan mempengaruhi nilai porositas dari kerangka yang terbentuk. Laju pertumbuhan *Porites* yang cepat membentuk kerangka yang lebih *porous* (Al-Rousan et al., 2012). Pengurangan kalsifikasi terjadi karena aktivitas fotosintesis terhambat dengan kenaikan temperatur air laut (Caroselli et al., 2011). Porositas juga dipengaruhi oleh tingkat keasaman air laut, dengan menurunnya pH maka nilai porositas meningkat (Movilla et al., 2016). Porositas hasil *micro-CT* maupun optik menunjukkan peningkatan nilai porositas dari bawah (umur tua) ke atas (umur muda). Terjadinya peningkatan porositas menunjukkan

adanya perubahan lingkungan saat pertumbuhan *Porites* tersebut.

#### **KESIMPULAN**

Berdasarkan citra *micro-CT* maupun citra optik, nilai porositas karang *Porites* yang didapat tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan sehingga teknik *micro-CT* dapat digunakan dalam perhitungan porositas karang *Porites* dimana teknik *micro-CT* mampu mengidentifikasi pori yang sering tidak teridentifikasi oleh teknik optik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik optik mampu memberikan data tambahan berupa *feature* dari proses diagenesa karang, karena memiliki *chroma* yang spesifik. Teknik optik lebih bisamengidentifikasi struktur pori yang menerus dan memanjang, sedangkan *micro-CT* lebih mampu mengidentifikasi pori dengan kebulatan tinggi. Hasil dari perbandingan tersebut menunjukkan bahwa metode CT mampu mengidentifikasi pori yang sering diabaikan oleh klasifikasi citra optik, sehingga teknik *micro-CT* dapat menjadi pelengkap untuk mengidentifikasi struktur pori dalam batuan.

#### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Ucapan terima kasih kepada Puslit Geoteknologi LIPI. Terima kasih juga kami ucapkan kepada saudara Marfarsan Hendrizan dan Sri Yudawati Cahyarini untuk segala masukannya, saudara Wawan atas bantuan dalam preparasi sampel. Serta tidak lupa, terima kasih kami sampaikan kepada *reviewer* yang telah mengoreksi makalah ini. Tulisan ini berkontribusi dalam kegiatan Kompetensi Inti Puslit Geoteknologi LIPI 2016 No 3408.001.014.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Al-Rousan, S., Al-Shloul, R., Al-Horani, F., and Abu-Hilal, A., 2012. Heavy metals signature of human activities recorded in coral skeletons along the Jordanian coast of the Gulf of Aqaba, Red Sea. *Environ Earth Sci.* 67, 2003–2013.
- Anselmetti, F.S., Luthi, S., Eberli, G.P., 1998. Quantitative characterization of carbonate pore system by digital Image Analysis. *AAPG Bulletin*, 82 (10), 1815-1836.
- Barnes, D.J. and Devereux, M.J., 1988. Variation in skeletal architecture associated with density banding in the hard coral *Porites*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 121, 37-54.

- Bucher, D.J., Harriott, V.J., Roberts, L.G., 1998. Skeletal micro-density, porosity and bulk density of acroporid corals. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 228, 117-136.
- Canny, J., 1986. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 6, 679-98.
- Carlson, W.D., Denison, C., Ketcham, R.A., 1999. High-Resolution X-ray computed tomography as a tool for visualization and quantitative analysis of igneous textures in three dimensions. *Electronic Geosci.* 4, 3.
- Carlson, W.D., Rowe, T., Ketcham, R.A., Colbert, M.W., 2003. Applications of high-resolution X-ray computed tomography in petrology, meteoritics and paleontology. In: Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M., Jacobs, P. (Eds.), *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences: Geological Society, London, Special Publication*, 215, 7-22.
- Caroselli, E., Prada, F., Pasquini, L., Marzano, F. N., Zaccanti, F., Falini, G., Levy, O., Dubinsky, Z., Goffredo, S., 2011. Environmental implications of skeletal micro-density and porosity variation in two scleractinian corals. *Zoology* 114, 255-264.
- Clarkson, C.R., Bustin, R.M., 1996. Variation in micropore capacity and size distribution with composition in bituminous coal of the Western Canadian Sedimentary Basin: implications for coalbed methane potential. *Fuel* 75:1483-1498. DOI: 10.1016/0016-2361(96)00142-1.
- Cnudde, V., Boone, M.N., 2013. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences : A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews.* 123, 1-17.
- Cnudde, V., Silversmit, G., Boone, M., Dewanckele, J., De Samber, B., Schoonjans, T., Van Loo, D., De Witte, Y., Elburg, M., Vincze, L., Van Hoorebeke, L., Jacobs, P., 2009. Multi-disciplinary characterisation of a sandstone surface crust. *Sci. Total. Environ.* 407 (20), 5417-5427.
- Hasan, S.M.A., and Ko, K., 2016. Depth edge detection by image-based smoothing and morphological operations. *J. Comp. Design. Eng.* 3, 191-197.
- Keller, 1998. High resolution, Non-destructive measurement and characterization of fracture apertures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35 (8), 1037-1050.
- Laine, J., Labady, M., Albornoz, A., Yunes, S., 2008. Porosities and pore sizes in coralline calcium carbonate. *Mater. Charact.* 59 (10), 1522-1525.
- Landis, E.N., Petrell, A.L., Lu, S., dan Nagy, E.N., 2000. Examination of pore structure using three-dimensional X-ray analysis of microtomographic data. *Concrete Sci. Eng.* 2, 162-169.
- Li, X. W., Cho, S J., dan Kim, S.T., 2014. High security and robust optical image encryption approach based on computer-generated integral imaging pickup and iterative back-projection techniques. *Opt. Laser. Eng.* 55, 162-182.
- Mayo, S., Josh, M., Nesterets, Y., Esteban, L., Pervukhina, M., Clennell, M.B., Maksimenko, A., Hall, C., 2015. Quantitative micro-porosity characterization using synchrotron micro-CT and xenon K-edge subtraction in sandstones, carbonates, shales and coal. *Fuel.* 154, 167-173.
- Mazumder, S., Wolf, K.H.A.A., Elewaut, K., Ephraim, R., 2006. Application of X-ray computed tomography for analyzing cleat spacing and cleat aperture in coal samples. *Int. J. Coal. Geol.* 68, 205-222.
- Meng, Y., Li, Z., dan Lai, F., 2015. Experimental study on porosity and permeability of anthracite coal under different stresses. *J. Petrol. Sci. Eng.* 133, 810-817.
- Movilla, J., Calvo, E., Coma, R., Serrano, E., Lopez-Sanz, A., dan Pelejero, C., 2016. Annual response of two Mediterranean azooxanthellate temperate corals to low-pH and high-temperature conditions. *Mar. Biol.* 163:135. doi:10.1007/s00227-016-2908-9.
- Roche, R.C., Abel, R.A., Johnson, K.G., Perry, C. T., 2010. Quantification of porosity in

- Acropora pulchra (Brook 1891) using X-ray micro-computed tomography techniques. *J. Exp. Mar. Ecol.* 396. 1-9.
- Taud, H., Martinez-Angeles, R., Parrot, J.F., Hernandez-Escobedo, L., 2005. Porosity estimation method by X-ray computed tomography. *J. Petrol. Sci. Eng.* 47, 209–217.
- Teng, J., Mastalerz, M., Hampton, L., 2017. Maceral controls on porosity characteristics of lithotypes of Pennsylvanian high volatile bituminous coal: Example from the Illinois Basin. *Int. J. Coal. Geol.* 172, 80-94.
- Van Geet, M., Lagrou, D., Swennen, R., 2003. Porosity measurement of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography ( $\mu$ CT). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Geological Society, London, Special Publication, 215, 51-60.0305-8719,03/S15.
- Van Geet, M., Swennen, R., Wevers, M., 2001. Towards 3-D petrography: application of microfocus computer tomography in geological science. *Comput. Geosci.* 27, 1091-1099.
- Veron, J.E.N., Pichon, M., 1982. Scleractinia of eastern Australia, part IV, family Poritidae. *Australian Institute of Marine Science Monograph Series*. 5, 159.
- Wu, L., Yanming, Z., Shangbin, C., Hui, W., 2011. Respon of coal reservoir porosity to magma intrusion in the Shandong Qiwu Mine, China. *Min. Sci. Tech. (China)* 21, 185-190.
- Yao, Y., Liu, D., Che, Y., Tang, D., Tang, S., Huang, W., 2009. Non-destructive characterization of coal sampels from China using microfocus X-ray computed tomography. *Int. J. Coal. Geol.* 80, 113-123.