

Inovasi dan Optimasi Metode Pirolisis Material Karbon berbasis Serat Bulu Ayam untuk Aplikasi Material Penyimpanan Hidrogen

Deni S. Khaerudini^{1,2}, A. Barduzzaman³, A. Hardiansyah², Cecep E. Rustana³

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana, Jakarta

²Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Serpong Banten

³Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta

E-mail: deni.shidqi@mercubuana.ac.id; deni008@lipi.go.id

Abstrak--Pembuatan material karbon dari limbah serat bulu ayam telah dilakukan untuk mengkaji optimasi metode pirolisis dengan variasi waktu tahan dan temperatur terhadap struktur, luas permukaan, pori, dan morfologi. Inovasi metode pirolisis two-step yang digunakan yaitu untuk mencapai proses karbonisasi optimal berbasis serat bulu ayam. Metode pirolisis dengan variasi two step berdurasi lama, yaitu step one pada temperatur 215 °C selama 15 jam dan dilanjutkan step two dengan variasi pada temperatur 400, 425, dan 450 °C dengan masing-masing variasi waktu tahan selama 1 dan 0,5 jam. Variasi selanjutnya, inovasi metode pirolisis two-step dilakukan dengan kondisi waktu tahan berdurasi singkat, yaitu: step one pada temperatur 200 °C selama 1 jam dan step two pada temperatur 400 °C selama 1 dan 0,5 jam. Laju pemanasan dan pendinginan yang digunakan yaitu 3 °C/menit. Berdasarkan hasil uji true density, nilai densitas semakin kecil pada waktu tahan yang lama dan temperatur karbonisasi terendah. Hasil pengamatan Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) menunjukkan bahwa morfologi permukaan karbon dengan nilai densitas terkecil telah terbentuk pori. Hasil uji Brunnaeur-Emmet-Teller (BET) menunjukkan bahwa pori dan luas permukaan tertinggi terbentuk pada karbon dengan densitas terkecil. Berdasarkan hasil pengujian difraksi sinar-X (XRD), menunjukkan struktur karbon berupa semikristalin.

Kata kunci: Pirolisis, serat bulu ayam, karbon, material penyimpan hidrogen

Abstract--Carbon material from chicken feather waste was manufactured to investigate the effect on optimization of pyrolysis method with variation on holding times and temperatures into their structure, surface area, pore, and morphology characteristics. The innovation of two-step pyrolysis methods are proposed for carbonization process based on chicken feather fiber. The two-step pyrolysis variation method with long duration time is for the step one at 215 °C for 15 h, continued with step two with the temperature variation at 400, 425, and 450 °C with each holding times variations are 0.5 and 1 h. The short duration of pyrolysis method is carried out at temperature of 200 °C for 1 h for step one and 400 °C in 1 and 0.5 h for step two. The applied heating and cooling rate is 3 °C/min. Based on results, the true density is decreasing in lower carbonization temperature and longer holding time of pyrolysis. The observation of Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) show that the pores of carbon surface morphology with lowest density is formed. The Brunnaeur-Emmet-Teller (BET) testing show that pores and surface area are established on carbon with lowest value of true density. Based on the X-ray diffraction (XRD) result, it show that the carbon is formed in semicrystalline structure.

Keywords: Pyrolysis, chicken feather fiber, carbon, hydrogen storage material

1. PENDAHULUAN

Hidrogen merupakan elemen yang paling berlimpah dengan prosentase sekitar 75% dari total massa unsur alam semesta, tapi biasanya selalu dalam keadaan terikat dengan unsur lain. Keberadaan hidrogen sangat penting sebagai salah satu energi alternatif dan memiliki nilai kalor bakar tiga kali lebih tinggi dibandingkan energi fosil yang keberadaannya terbatas [1]. Selain itu, proses pembakaran hidrogen tidak menghasilkan emisi CO₂ seperti halnya minyak bumi, melainkan hanya H₂O dan energi panas.

Hidrogen menjadi salah satu bahan bakar yang sedang dikembangkan, karena merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan dan dapat

berkelanjutan. Ragam cara yang telah dikembangkan dalam menghasilkan hidrogen, seperti gasifikasi batu bara, *steam methane reforming* dan elektrolisis [2]. Hidrogen dapat disimpan dalam ragam bentuk, yaitu *compressed gas* (tangki bertekanan tinggi 300 - 700 bar), *liquid (cryogenic, -252,87 °C)*, dan *solid (sponge metal alloy)* [1,2]. Namun, kelemahan dari teknologi tersebut adalah biaya yang sangat mahal, diperlukan tekanan yang tinggi atau kondisi temperatur rendah yang ekstrim dalam pengoperasiannya. Oleh Karena itu diperlukan material alternatif yang mampu menyimpan dengan rapat penyimpanan tinggi dan mengurangi tekanan penyimpanan meskipun disimpan dalam kondisi temperatur ruang.

Saat ini masih terus dikembangkan alternatif teknik penyimpanan hidrogen berbasis *solid* dengan memanfaatkan material murah dan ramah lingkungan. Secara prinsip teknik penyimpanan yang dilakukan adalah berbasis *adsorption storage* mampu menyimpan hidrogen secara signifikan dan cukup dengan tekanan rendah yaitu 0,1-4 MPa (1-10 bar) [3], sehingga dapat mengurangi resiko berbahaya pada tekanan tinggi. Material alternatif yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah material berpori sebagai media penyimpan hidrogen dengan teknik adsorpsi dari karbon aktif berbasis serat bulu ayam. Pertimbangan memilih material tersebut karena ketersediannya berlimpah, murah (bahkan dianggap sebagai limbah) dan prosesnya lebih mudah dibandingkan dengan *sponge* dari *metal hydrid*. Pada penelitian ini karbon aktif dari serat bulu ayam difabrikasi dengan inovasi metode pirolisis *two-step* dan proses aktivasi tanpa kimiawi sehingga diharapkan diperoleh karakteristik material yang sesuai sebagai material penyimpan hidrogen.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh pirolisis karbonisasi *two-step sintering* dan variasi waktu tahan terhadap karakteristik fisika-kimia dan mikrostruktur karbon yang dihasilkan.

Material yang digunakan sebagai bahan utama sumber karbon adalah serat bulu ayam dari peternakan ayam potong. Bulu ayam sebelumnya dibersihkan dengan pencucian awal menggunakan air mengalir, direndam dengan hidrogen peroksida, pembilasan dengan air mengalir dan pengeringan. Proses karbonisasi dilakukan dengan metode pirolisis *two-step sintering* dengan durasi lama dan singkat di dalam *tube furnace*. Untuk durasi lama, pirolisis dilakukan pada temperatur 215 °C waktu tahan 15 jam dan dilanjutkan variasi temperatur 400, 425 dan 450 °C dengan variasi waktu tahan 1 dan 0,5 jam. Untuk durasi singkat, pirolisis dilakukan pada temperatur 200 °C waktu tahan 1 jam dan dilanjutkan 400 °C variasi waktu tahan 1 dan 0,5 jam. Untuk penyederhanaan penyajian, setiap kondisi perlakuan diberi kode, misal C1 untuk 215 °C/15 jam dilanjutkan 400 °C/1 jam, C2 untuk 215 °C/15 jam dilanjutkan 400 °C/0,5 jam hingga untuk sampel dengan durasi singkat C8 untuk 200 °C/1 jam dilanjutkan 400 °C/0,5 jam, berturut-turut dengan total 8 variasi kondisi. Kedua metode tersebut dilakukan dengan laju panas dan pendinginan sama yaitu 3 °C/menit dan dalam kondisi atmosfer gas *inert*. Setelah proses karbonisasi, dilakukan proses homogenisasi ukuran serbuk dengan mortar dan lolos ayakan 150 mesh.

Karakterisasi sampel dilakukan dengan

analisa Brunauer-Emmett-Teller (BET, Quantachrome Nova 4200E) untuk mengetahui luas pori dan distribusi karbon, pengamatan morfologi sampel dengan *Field-Emission Scanning Electron Microscopy* (FE-SEM, JEOL JIB 4610F), uji *X-ray Diffraction* (XRD, Smartlab Rigaku) untuk mengetahui fasa dan struktur kristal karbon menggunakan sumber radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,541862 \text{ \AA}$) dengan rentang sudut $10 \leq 2\theta \leq 90^\circ$ dan *step scan* 0,01°, dan uji *true density* (piknometer) untuk mengetahui densitas serbuk karbon.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Temperatur Sinter terhadap Yield Karbon

Proses karbonisasi setiap kondisi dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk setiap kondisi pirolisis dan secara bertahap (*two-step sintering*) hingga mencapai temperatur target dalam kondisi gas *inert* (nitrogen) untuk mendapatkan data perolehan karbon (*yield* arang). Pengondisian gas *inert* bertujuan untuk membatasi jumlah oksigen yang terlibat ketika proses pemanasan (*sintering*) dan untuk menghilangkan kandungan zat volatil dari serat bulu ayam, sehingga diperoleh *yield* arang atau karbon yang tinggi.

Tabel 1. Yield arang dari serat bulu ayam

Kode sampel	Massa awal (g)	Massa akhir (g)	Yield arang (%)	Yield arang rata-rata (%)
C1	12,755	3,595	28,19	28,42
	12,511	3,509	28,05	
	13,432	3,897	29,01	
C2	12,195	3,866	31,70	30,45
	14,235	4,167	29,27	
	13,547	4,117	30,39	
C3	15,495	4,884	31,52	31,26
	15,644	4,906	31,36	
	14,789	4,569	30,89	
C4	15,914	4,825	30,32	30,39
	15,675	4,680	29,86	
	16,459	5,101	30,99	
C5	17,373	4,727	27,21	26,93
	16,457	4,432	26,93	
	17,534	4,674	26,66	
C6	19,479	5,012	25,73	25,64
	18,398	4,708	25,59	
	19,087	4,887	25,60	
C7	15,959	4,199	26,31	24,40
	15,611	4,011	25,69	
	15,997	4,230	26,44	
C8	15,355	3,700	24,09	26,15
	15,702	3,570	22,74	
	21,354	5,312	24,88	

Pada saat proses pemanasan (*sintering*) pirolisis karbonisasi pada rentang temperatur

rendah (150-215 °C) atau fasa lambat karbonisasi, reaksi utama yang terjadi adalah dehidrasi (penguapan kandungan air) dan dekomposisi serat bulu ayam, dengan produk reaksi berupa karbon padatan (C), air (H₂O), karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂). Pada penelitian ini, pada fasa lambat, karbonisasi dilakukan pada temperatur 200 - 215 °C dengan variasi penahanan waktu *sintering* (1 dan 15 jam). Ketika waktu *sintering* diperpanjang, maka reaksi aktivasi yang terjadi diharapkan dapat lebih menguraikan senyawa volatil lebih sempurna dan meningkatkan *crystallinity* karbon. Pada kondisi ini, keratin dari serat bulu ayam mulai terurai membentuk karboksil dan amida yang berperan dalam pembentukan karbon yang lebih struktural [4]. Selanjutnya, pada temperatur di atas 200 °C dihasilkan lebih banyak asap (sebagai indikasi senyawa volatil dari serat bulu ayam menguap), karbon (arang), dan uap. Fasa cepat karbonisasi, dalam penelitian ini 400 - 450 °C, pada tahap ini terjadi *secondary cracking* pada bahan volatil yang kemungkinan tersisa. Selama kondisi fasa cepat, ikatan disulfida dari keratin akan rusak dan disaat bersamaan akan terbentuk reaksi *crosslinking* antara struktur α -*helix* asam amino *sequence* dan β -*sheet* yang saling mengikat sehingga membentuk struktur otentik karbon dan terjadi peningkatan volume dan diameter pori [3], sehingga proses adsorpsi dapat lebih maksimal. Proses karbonisasi dianggap selesai ketika serat bulu ayam sepenuhnya berubah warna menjadi hitam dan asap yang keluar hanya sedikit (senyawa volatil sudah menguap).

Tabel 1 menunjukkan *yield* arang (karbon) hasil aktivasi fisika berdasarkan pengukuran masa sebelum dan sesudah proses pirolisis. Berdasarkan data Tabel 1, diperoleh rentang *yield* arang rata-rata adalah sebesar 24,40 – 31,26 %. *Yield* arang (karbon) pada penelitian ini termasuk kecil khususnya bila dibandingkan dengan dari pirolisis berbasis biomasa (nabati) [5] dan proses *one-step sintering* dengan aktivasi kimia. Pengurangan masa terjadi karena banyaknya senyawa yang mudah menguap (volatil) seperti gas H₂, CH₄, CO, CO₂, lemak dan tar [3] khususnya akibat dari proses *two-step sintering*. Tetapi, perolehan rentang nilai di atas masih sesuai dengan fenomena degradasi masa berbasis serat selulosa hewani (keratin) yaitu sekitar 70% atau lebih [3,4]. Kondisi terbaik dari *yield* arang yaitu C3 (215 °C/15 jam dilanjutkan 425 °C/1 jam) dan terendah adalah C7 (200 °C/1 jam dilanjutkan 400 °C/1 jam).

Secara umum, berdasarkan Tabel 1, proses durasi lama pada saat reaksi lambat (215 °C) untuk C1-C6 berpengaruh pada hasil akhir *yield* karbon yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan durasi cepat (200 °C) pada C7-C8. Namun *yield* pada C8 (26,15%) menunjukkan sedikit lebih baik

dari C6 (25,64%). Hal tersebut mengindikasikan kondisi maksimum temperatur pirolisis tidak boleh melebihi 450 °C. Selain itu, secara umum kondisi karbonisasi berbasis bulu ayam dilakukan pada temperatur 400 °C dengan waktu tahan 1 sampai 2 jam dan dilanjutkan proses aktivasi secara kimiawi (impregnasi berbasis asam, seperti KOH atau HCl dengan molaritas tertentu) [6,7]. Dalam penelitian ini hanya dilakukan proses aktivasi secara fisika. Berdasarkan *yield* arang maka optimasi temperatur karbonisasi adalah pada 425 °C untuk sampel C3. Untuk perbedaan waktu tahan (0,5 dan 1 jam) pada masing-masing kondisi, secara umum untuk temperatur *sinter* 400 °C (C1-C2, dan C7-C8) waktu tahan 0,5 jam menunjukkan *yield* karbon lebih tinggi dibandingkan waktu tahan 1 jam (dengan margin sekitar 2%). Sedangkan temperatur karbonisasi 425 dan 450 °C (C3-C6) menunjukkan kebalikannya yaitu waktu tahan 1 jam sedikit lebih baik dibandingkan 0,5 jam dalam perolehan *yield* karbon (dengan margin hanya sekitar 1%). Proses pirolisis dengan temperatur lebih tinggi memungkinkan pengurangan senyawa volatil lebih banyak, sehingga pengurangan masa lebih signifikan. Tetapi nilai *yield* karbon hanya indikasi awal dari karbonisasi, karakteristik lain yang lebih penting adalah struktur otentik karbon itu sendiri yang akan dijelaskan pada sub bab selanjutnya.

3.2 Karakterisasi *True Density* dan BET

Parameter penting lain yang menjadi pertimbangan dari struktur otentik karbon yaitu nilai *true density*. Pengujian *true density* dapat mengindikasikan morfologi serbuk yang terbentuk karena medium (kerosin) dapat berpenetrasi ke dalam celah pori serbuk (sampel) selama proses pengujian (perendaman).

Tabel 2. *True density* dari *yield* karbonisasi

Kode Sampel	Densitas Rata-rata (g/cm ³)
C1	1,181
C2	1,199
C3	1,230
C4	1,211
C5	1,231
C6	1,206
C7	1,210
C8	1,201

Hasil uji *true density* sampel setelah pirolisis dari *yield* karbonisasi ditunjukkan Tabel 2. Nilai *true density* terkecil adalah untuk kondisi sampel C1 (1,181 g/cm³) dan terbesar adalah C5 (1,231 g/cm³). Secara umum, rentang nilai tersebut komparabel terhadap referensi yaitu dalam rentang 0,8 – 1,4 g/cm³ [3,4,8,9]. Tabel 2 juga menunjukkan bahwa perbedaan waktu tahan pada fasa reaksi cepat karbonisasi (400 °C), yaitu 1 dan 0,5 jam, berpengaruh langsung terhadap nilai *true density* yang lebih rendah untuk waktu tahan 1 jam dibandingkan 0,5 jam untuk semua

kondisi masing-masing sampel C1-C8.

Selanjutnya, untuk pengamatan struktur otentik karbon dilakukan uji BET. Pemilihan untuk pengujian BET berdasarkan perbedaan nilai *true density* signifikan sampel. Dalam hal ini adalah sampel C1, C5 dan C8. Luas permukaan karbon aktif merupakan salah satu aspek penting dalam penentuan aplikasi karbon yang tepat. Karbon aktif dengan luas permukaan tinggi dapat diaplikasikan sebagai adsorben yang penggunaannya melalui proses adsorpsi (*hydrogen storage*). Pengkondisian standar sebelum uji dilakukan yaitu proses *degassing* untuk menjamin tidak adanya kontaminasi gas pada pori karbon. Hasil uji lengkap BET dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji BET sampel C1, C5 dan C8

Parameter	Sampel		
	C1	C5	C8
A_{ads} (m ² /gram)	0,132	0,022	0,041
A_{des} (m ² /gram)	2,234	0,014	0,023
$\varnothing_{pori-ads}$ (nm)	2,883	244,862	93,452
$\varnothing_{pori-des}$ (nm)	1,685	83,446	37,483
$V_{pori-ads}$ (cm ³ /gram)	0,005	0,003	0,003
$V_{pori-des}$ (cm ³ /gram)	0,002	0,002	0,002
$V_{mikropori}$ (cm ³ /gram)	0,284	0,184	0,210

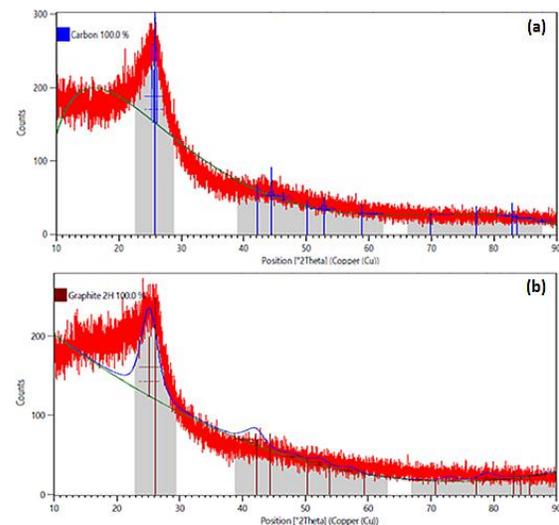
Untuk luas permukaan desorpsi karbon (A_{des}), dari hasil pengujian, sampel C1 memiliki nilai tertinggi (2,234 m²/gram), selanjutnya sampel C8 dan C5 yaitu 0,023 dan 0,014 m²/gram. Nilai tersebut menunjukkan korelasi terhadap nilai *true density* (Tabel 2) yaitu sampel dengan densitas lebih kecil menunjukkan luas permukaan lebih besar. Demikian halnya dengan volume mikropori karbon, sampel C1 menunjukkan nilai tertinggi (0,284 cm³/gram) diikuti oleh sampel C8 dan C5 (0,210 dan 0,180 cm³/gram). Demikian halnya untuk nilai diameter pori desorpsi ($\varnothing_{pori-des}$) C1 (1,685 nm) menunjukkan lebih kecil dibandingkan C8 dan C5 (37,483 dan 83,446 nm). Berdasarkan referensi [10], nilai jari-jari atom hidrogen *calculated* adalah 53 pm (0,053 nm) atau dalam diameter 0,106 nm. Sedangkan jari-jari atom Van der Waals untuk hidrogen [11,12] 120 pm (0,12 nm) atau dalam diameter 0,24 nm. Berdasarkan karakteristik ideal material penyimpan hidrogen [3,4,13-17], rentang diameter pori adalah $0,08 < \varnothing_{pori} < 2,0$ nm. Sedangkan dari ketiga nilai diameter pori, sampel C1 (1,685 nm) memiliki potensi tingkat selektifitas lebih baik dibandingkan kondisi sampel C5 dan C8. Meskipun, bila dibandingkan dengan nilai diameter *calculated* atom hidrogen (0,106 nm) maka diameter pori desorpsi sampel C1 (1,685 nm) menunjukkan masih ada kemungkinan dapat meloloskan unsur atau atom lainnya. Tapi bila dibandingkan secara atomik Van der Waals, maka diameter yang diperoleh telah memenuhi rentang nilai yang

disyaratkan.

Dari hasil uji BET di atas menunjukkan bahwa kondisi aktivasi fisika durasi lama pada fase lambat karbonisasi (200 °C) C1, berpengaruh signifikan terhadap pembentukan diameter pori dan luas permukaan yang lebih baik dibandingkan sampel C8 (durasi singkat). Demikian halnya dengan nilai *yield* karbon C1 menunjukkan lebih tinggi dari sampel C8 (Tabel 1). Berdasarkan hasil pengujian BET di atas, kondisi temperatur terbaik untuk fasa cepat karbonisasi adalah 400 °C dengan kondisi durasi lama pada fasa lambat karbonisasi 200-215 °C. Hal tersebut dapat dibuktikan pada kondisi yang serupa antara C1 dan C8, dimana C1 menunjukkan karakteristik karbon yang jauh lebih baik dibandingkan C8. Untuk kasus sampel C5, dimana fasa reaksi cepat karbonisasi 450 °C, karakteristik karbon yang dihasilkan menunjukkan kondisi yang sangat tidak ideal, seperti nilai diameter pori yang terlalu besar. Hal ini dapat dijelaskan karena kondisi aktivasi pada temperatur yang terlalu tinggi menyebabkan kerusakan pada struktur karbon, sehingga diameter pori yang terbentuk terlalu besar dan mengakibatkan rendahnya luas permukaan. Namun dari hasil penemuan ini masih dapat lebih dioptimalkan untuk karakteristik yang ideal seperti yang disyaratkan sebagai material penyimpan hidrogen.

3.3 Karakterisasi Mikrostruktur dan Morfologi

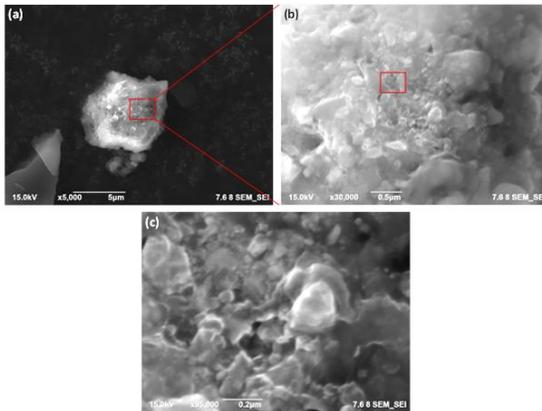
Konfirmasi pengujian struktur otentik karbon dilakukan dengan uji XRD untuk mengetahui struktur kristal sampel yang terbentuk dan selanjutnya dikonfirmasi secara mikromorfologi dengan FESEM.



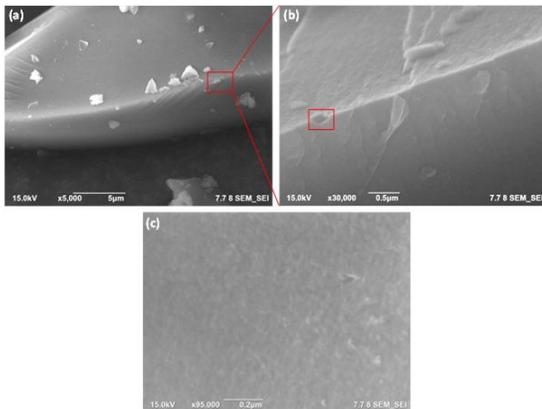
Gambar 1. Difraktogram puncak XRD untuk sampel (a) C1 dan (b) C8

Berdasarkan hasil uji BET (Tabel 3), maka

sampel C1 dan C8 dipilih untuk dilakukan karakterisasi lebih lanjut. Gambar 1 menunjukkan perbandingan puncak spektrum XRD sampel C1 dan C8. Puncak difraksi terdeteksi pada sudut 2θ $25,69^\circ$ dan $26,19^\circ$ untuk sampel C1 dan C8 dengan struktur heksagonal. Pola puncak sampel C1 (Gambar 1a) menunjukkan puncak difraksi yang cenderung lancip mengindikasikan fasa kristalin sudah mulai terbentuk atau semi-kristalin. Sedangkan pola puncak sampel C8 (Gambar 1b), menunjukkan terjadi pelebaran puncak mengindikasikan penurunan kristalinitas atau cenderung amorf. Hal ini dapat dijelaskan karena pengaruh perlakuan termal (fasa reaksi lambat karbonisasi) yang singkat saat pirolisis berlangsung pada sampel C8. Hal tersebut menunjukkan bahwa durasi waktu tahan lama berpengaruh terhadap kristalinitas sampel.



Gambar 2. FESEM morfologi sampel C1 dengan perbesaran (a) 5000x, (b) 30000x dan (c) 95000x



Gambar 3. FESEM morfologi sampel C8 dengan perbesaran (a) 5000x, (b) 30000x dan (c) 95000x

Gambar 2 dan 3 menunjukkan hasil pengamatan FESEM untuk sampel C1 dan C8. Dari perbandingan Gambar 2 dan 3 dapat diamati dengan jelas perbedaan bentuk morfologi sampel C1 dan C8. Sampel C1 menunjukkan pori yang sudah terbentuk dan relatif merata, sedangkan C8 sulit untuk diamati pori atau celah rekahan yang

terbentuk. Sedangkan pengujian BET menunjukkan terdapat nilai volume pori sampel C8 meskipun jumlahnya sedikit. Dengan demikian mungkin saja sampel C8 memiliki pori, tapi dalam jumlah yang sedikit dan tidak merata (Gambar 3b). Hasil pengamatan FESEM juga mengkonfirmasi pengujian luas permukaan adsorpsi pengujian BET, dimana sampel C1 ($2,234 \text{ m}^2/\text{gram}$) memiliki luas permukaan lebih signifikan (sekitar 100 kali) dari C8 ($0,023 \text{ m}^2/\text{gram}$). Begitu juga halnya pola difraksi XRD yang terbentuk. Lebih jauh, dari pengamatan FESEM ini juga memperkuat bahwa proses aktivasi fisika dengan durasi lama, khususnya pada temperatur rendah (fasa reaksi lambat karbonisasi) memiliki pengaruh lebih signifikan terhadap karakteristik struktur otentik karbon yang terbentuk, sehingga memungkinkan untuk variasi waktu tahan yang lebih lama, seperti yang ditunjukkan pada perbandingan karakteristik C1 dan C8 di atas.

4. KESIMPULAN

Perekayaan metode pirolisis dan aktivasi fisika karbon telah dilakukan untuk karbonisasi serat bulu ayam. Dari hasil variasi temperatur aktivasi mempengaruhi perolehan *yield* karbon aktif. Pendekatan inovasi *two-step sintering* ini menunjukkan hasil pengamatan yang menarik bahwa kondisi aktivasi durasi lama pada temperatur rendah ($200\text{-}215 \text{ }^\circ\text{C}$) sangat berpengaruh terhadap struktur otentik karbon yang dihasilkan. Sedangkan proses aktivasi pada temperatur tinggi berpengaruh pada *secondary cracking* dan *crosslinking* sampel, kondisi yang terbaik adalah $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Sedangkan kondisi temperatur yang lebih tinggi (425 dan $450 \text{ }^\circ\text{C}$) dapat menyebabkan kerusakan pada struktur karbon. Pendekatan nilai *true density* terhadap luas permukaan uji BET sampel (C1, C5 dan C8) menunjukkan korelasi linear. Sampel dengan densitas terendah memiliki luas permukaan tertinggi dan sampel dengan densitas tinggi memiliki luas permukaan terendah. Hasil luas permukaan desorpsi tertinggi pada penelitian ini dihasilkan dari karbon aktif sampel C1 sebesar $2,234 \text{ m}^2/\text{gram}$ dengan diameter pori desorpsi sekitar $1,685 \text{ nm}$. Hasil pengamatan FESEM sampel C1 telah mengkonfirmasi keberadaan pori yang terbentuk dan relatif merata. Uji XRD juga menunjukkan kristalinitas yang lebih baik pada sampel C1 dibandingkan C8.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Penelitian Teknologi Fuel Cell dan Hidrogen, Pusat Penelitian Fisika LIPI untuk dukungan fasilitas penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Bossel U., Eliason B. (2003). *Energy and the Hydrogen Economy*. Hydrogen Economy Report. [Online] Available at: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf [Accessed: 20.01.2019].
- [2]. Lipman T. (2011). *An Overview Hydrogen Production and Storage System with Renewable Hydrogen Case Studies*. A Clean Energy State Alliance Report. [Online] Available at: <https://www.cesa.org/assets/2011-Files/Hydrogen-and-Fuel-Cells/CESA-Lipman-H2-prod-storage-050311.pdf> [Accessed: 20.01.2019].
- [3]. Senoz, E., Wool, R. P. (2011). Hydrogen Storage on Pyrolyzed Chicken Feather Fibers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36(12): 7122-7127.
- [4]. Senoz, E., Wool, R. P. (2010). Microporous Carbon-Nitrogen Fibers from Keratin Fibers by Pyrolysis. *Journal of Applied Polymer Science*. 118(3): 1752-1765.
- [5]. Kamil, K., Krzysztoforski, J., Bajer, K., Dudynsk, M.. Bioenergy from Feathers Gasification - Efficiency and Performance Analysis. *Biomass and Bioenergy*. 59: 402-411.
- [6]. Buczek, B. (2016). Preparation of Active Carbon by Additional Activation with Potassium Hydroxide and Characterization of Their Properties. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016: 1-4
- [7]. Li, S., Han K., Si, P., Li, J. Lu, C. (2018). High-performance Activated Carbons Prepared by KOH Activation of Gulfweed for Supercapacitors. *Int. J. Electrochem. Sci*. 13: 1728-1743.
- [8]. Haaland, D. (1976). Graphite-liquid-vapor triple point pressure and the density of liquid carbon. *Carbon*. 14(6): 357-361.
- [9]. Lowell, S., Shields, J.E., Thomas, M.A., Thommes, M. (2004). *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*. Netherland: Springer Science+Business Media B.V. 58.
- [10]. Sansonetti J. E., Martin W. C. (2005). Handbook of Basic Atomic Spectroscopic Data, *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 34(4): 1559-2259.
- [11]. Rahm M., Hoffmann R., Ashcrof N. W. (2016). Atomic and Ionic Radii of Elements 1–96. *Chem. Eur. J*. 22: 14625-14632.
- [12]. Periodic Tabel of Elements, Los Alamos National Laboratory (LANL), USA. [Online] Available at: <https://periodic.lanl.gov/1.shtml> [Accessed: 20.01.2019].
- [13]. Zuttel, A. (2003). Materials for Hydrogen Storage. *Materials Today*. 6(9): 24-33
- [14]. Schlapbach, L., Zuttel, A. (2001). *Hydrogen-Storage Materials for Mobile Applications*. *Nature*. 414: 353-358.
- [15]. Simonovski, I., Baraldi, D., Melideo, D., Acosta-Iborra, B. (2015). Thermal Simulations of a Hydrogen Storage Tank during Fast Filling. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40(36): 12560-12571.
- [16]. Liu, X., Peaslee, D., Jost, C., Baumann T. F., Majzoub, E. H. (2011). Systematic Pore-Size Effects of LiBH₄; Elimination of Diborane Release and Tunable Behavior for Hydrogen Storage Application. *Chemistry of Materials*. 23(5): 1331-1336.
- [17]. Gross, A. F., Vajo, J. J., Van Atta S. L., Olson G. L. (2008). Enhanced Hydrogen Storage Kinetics of LiBH₄ in Nanoporous Carbon Scaffolds. *Journal of Physical Chemistry C*. 112(14): 5651-5657.