

PENGARUH SUHU KARBONISASI TERHADAP STRUKTUR DAN KONDUKTIVITAS LISTRIK ARANG SERABUT KELAPA

Fredina Destyorini, Andi Suhandi, Achmad Subhan, dan Nanik Indayaningsih

Pusat Penelitian Fisika-LIPI
Kawasan Puspiptek Serpong, 15314 Tangerang Selatan
E-mail: fredina_destyorini@yahoo.com

ABSTRAK

Karakteristik yang dimiliki arang dari bahan alam sangat dipengaruhi oleh kondisi saat proses karbonisasi berlangsung, salah satunya yaitu parameter suhu. Penelitian tentang pengaruh perubahan suhu karbonisasi terhadap mikrostruktur dan konduktivitas listrik arang serabut kelapa telah dilakukan. Proses karbonisasi serabut kelapa dilakukan pada suhu 500°C, 900°C dan 1300°C. Untuk pembuatan arang suhu 500°C dan 900°C, proses karbonisasi dilakukan selama 1 jam di dalam tungku dengan suasana inert (gas N₂), sedangkan pembuatan arang 1300°C dilakukan menggunakan *Spark Plasma Sintering* (SPS). Karakterisasi mikrostruktur arang serabut kelapa dilakukan menggunakan teknik XRD dan SEM, sedangkan pengukuran konduktivitas listrik dilakukan menggunakan LCR meter. Analisis data XRD menunjukkan bahwa peningkatan suhu karbonisasi hingga 1300°C menyebabkan peningkatan derajat kristalinitasnya, dan struktur karbon yang dihasilkan mendekati struktur kristal karbon grafit. Pengamatan SEM menampilkan pembentukan pori dengan diameter ±10 µm pada permukaan arang serabut kelapa hasil karbonisasi. Peningkatan suhu karbonisasi juga menyebabkan konduktivitas listrik arang meningkat yaitu sebesar (0,39x10⁻⁵) S/m - (0,43x10⁻⁵) S/m untuk arang 500°C; 0,21 S/m – 0,23 S/m untuk arang 900°C, dan (0,12x10²) S/m - (0,18x10²) S/m untuk arang 1300°C.

Kata kunci : Arang, karbon, suhu karbonisasi, konduktivitas listrik.

ABSTRACT

Characteristics of the charcoal from natural materials are influenced by conditions during the carbonization process in progress, one of them is the temperature parameter. Research on the effect of carbonization temperature on the microstructure and electrical conductivity of coconut fiber charcoal had been done. Coconut fiber carbonization process conducted at temperature of 500°C, 900°C and 1300°C, respectively. The carbonization process to produce the charcoal at 500°C and 900°C was carried out for 1 hour in the furnace with inert gas condition (N₂), while charcoal 1300°C was made by a Spark Plasma Sintering (SPS). Microstructure characterization of charcoal was performed using XRD and SEM techniques, while the electrical conductivity measurements were carried out using LCR meter. XRD data analysis showed that increasing carbonization temperature up to 1300°C caused an increase in the degree of crystallinity, and the resulting carbon structure was near the crystal structure of carbon graphite. SEM observations showed the formation of pores with diameter ± 10 µm on the surface of the coconut fiber charcoal. Effect of carbonization temperature also caused an increase in the electrical conductivity of charcoal. They were (0.39 x10⁻⁵) S / m - (0.43 x10⁻⁵) S / m for charcoal 500°C; 0.21 S / m - 0.23 S / m for charcoal 900°C, and (0.12 x10²) S / m - (0.18 x10²) S / m for charcoal 1300°C.

Keywords: Charcoal, carbon, carbonization temperature, electrical conductivity.

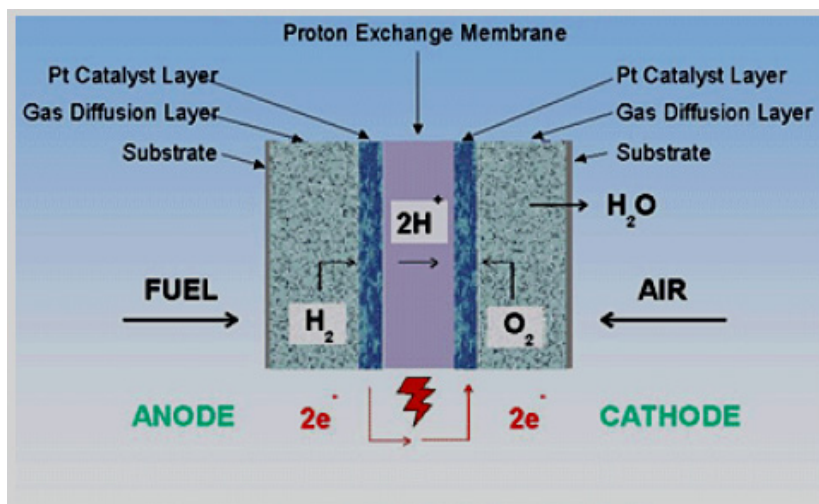
PENDAHULUAN

Pemenuhan kebutuhan energi tampaknya masih tetap menjadi salah satu tantangan yang harus dihadapi dan membutuhkan solusi nyata untuk mengatasi berbagai masalah yang ditimbulkannya khususnya krisis energi. Semakin bertambahnya kebutuhan akan energi membuat banyak pihak harus berpikir untuk tidak terlalu bergantung pada sumber energi dari bahan bakar fosil yang digunakan saat ini. Hal ini membuat banyak peneliti di seluruh dunia mulai memfokuskan penelitian pada bidang energi untuk mencari sumber energi alternatif yang baru dan terbarukan, salah satunya penelitian tentang material untuk pembangkit energi. Indonesia merupakan negara agraris yang menghasilkan banyak produk pertanian dan sekaligus menghasilkan limbah pertanian yang belum termanfaatkan secara maksimal. Salah satu contohnya yaitu serabut kelapa yang dihasilkan dari perkebunan kelapa. Pada penelitian kali ini akan dikaji karakteristik karbon dari serabut kelapa yang berpotensi untuk dijadikan material dasar untuk membuat komponen fuel cell yaitu *Gas Diffusion Layer (GDL)*. Fuel cell merupakan salah satu pembangkit energi alternatif yang mulai dikembangkan untuk menghadapi ancaman krisis energi. GDL merupakan salah satu komponen fuel cell yang berfungsi untuk mendistribusikan gas H_2 dan O_2 , sebagai media transport elektron, dan *catalyst support* [1]. Oleh karena itu material dasar penyusun GDL yaitu karbon harus memiliki sifat porous dan konduktif. Material karbon dapat diperoleh dari hasil karbonisasi bahan alam seperti kayu-kayuan. Untuk menghasilkan material karbon yang bersifat konduktif, maka bahan alam dikarbonisasi pada suhu $800^\circ C$ atau lebih [2]. Material karbon yang digunakan pada penelitian ini diambil dari serabut kelapa yang dikarbonisasi dan selanjutnya dianalisis sifat-sifat fisik dan listriknya untuk mengetahui potensinya sebagai material dasar penyusun GDL. Mikrostruktur dan sifat listrik karbon dari arang serabut kelapa dapat dipengaruhi oleh suhu karbonisasinya. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh perubahan suhu karbonisasi terhadap mikrostruktur dan konduktivitas listrik karbon pada arang serabut kelapa, serta mengetahui hubungan antara mikrostruktur terhadap nilai konduktivitas listriknya. Sehingga dapat ditentukan suhu karbonisasi yang tepat untuk menghasilkan arang serabut kelapa dengan kualitas optimal sebagai kandidat material dasar penyusun GDL.

TEORI

Fuel cell merupakan divais elektrokimia yang dapat mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik [3]. Salah satu jenis fuel cell yang sekarang sedang dikembangkan yaitu *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*. Fuel cell jenis ini memproduksi energi listrik dari hasil reaksi elektrokimia antara gas hidrogen dan gas oksigen. Sebuah sel PEMFC terdiri dari komponen elektrolit atau *proton exchange membrane* dan GDE yang tersusun dari lembaran *gas diffusion layer (GDL)* dan

catalyst layer (CL). Agar terbentuk sebuah sel stack, masih ada komponen lainnya yaitu *current collector* yang sisi permukaannya membentuk *gas channel* [4], lihat Gambar 1.



Gambar 1. Skema sel PEMFC [4]

GDL merupakan salah satu komponen utama dalam sel PEMFC memiliki beberapa fungsi antara lain bertugas mendifusikan gas hidrogen (anoda) dan gas oksigen (katoda), sebagai *catalytic support*, dan sebagai media penghantar pergerakan elektron [1]. GDL saat ini diproduksi dari material berbasis karbon seperti dari *carbon paper* [5], *carbon cloth* [6], atau *carbon nanotube* [7]. Material-material karbon tersebut membutuhkan proses produksi yang relatif rumit, sehingga mempengaruhi harga jualnya. Penelitian saat ini masih berkembang untuk mendapatkan material karbon dari sumber lainnya dengan proses produksi yang relatif sederhana, jumlahnya melimpah dan berpotensi menggantikan produk karbon komersil tersebut.

Karbon merupakan unsur yang berlimpah jumlahnya di alam. Unsur ini dapat ditemukan pada material organik seperti kayu, batu bara, atau serat alam. Untuk menghasilkan karbon dari material organik dilakukan melalui proses penguraian senyawa organik yang disebut dengan proses karbonisasi. Proses ini merupakan proses untuk mengkonversi material organik menjadi arang dengan pemanasan tanpa kehadiran oksigen, sehingga senyawa-senyawa kompleks yang menyusun material organik terurai menjadi arang dengan kandungan unsur karbon yang tinggi. Senyawa-senyawa kompleks yang menyusun material organik diantaranya terdiri atas hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Masing-masing senyawa tersebut terurai pada suhu yang berbeda.

Senyawa hemiselulosa yang merupakan polimer dari beberapa monosakarida seperti pentosan dan heksosan terurai paling awal yaitu pada suhu 200°C-260°C, kemudian diikuti oleh penguraian

selulosa pada suhu 240°C-350°C, dan lignin terurai paling akhir yaitu pada 280°C-500°C [8]. Hal ini sesuai dengan hasil analisis DTA bahwa proses pelepasan energi pada serabut kelapa berakhir pada suhu 500°C. Dan material residu yang dihasilkan, yaitu arang, memiliki kandungan unsur karbon tinggi dan berporous. Karena beberapa karakter yang dimiliki oleh material karbon, maka material ini banyak diaplikasikan di berbagai bidang contohnya sebagai bahan penyerap dan penjernih, baterai, *hydrogen storage*, super kapasitor, dan elektroda fuel cell. Karakteristik karbon seperti struktur, porositas, dan sifat listrik yang terdapat pada arang dapat dioptimalkan melalui kondisi proses karbonisasinya, salah satunya suhu proses [9].

METODA PENELITIAN

Karbonisasi

Material organik yang digunakan yaitu serabut kelapa yang telah dibersihkan dari jaringan gabusnya dan dikeringkan. Bahan dasar tersebut kemudian dikarbonisasi pada suhu 500°C untuk menghasilkan arang 500°C. Sedangkan arang 900°C dan 1300°C dihasilkan dengan melanjutkan proses karbonisasi pada suhu 900°C dan 1300°C dari arang 500°C. Proses karbonisasi untuk suhu 500°C dan 900°C dilakukan dalam tungku dengan kondisi inert (gas N₂). Sedangkan untuk menghasilkan arang 1300°C dilakukan dari arang 900°C yang dipanaskan lebih lanjut dalam *Splash Plasma Sintering* (SPS) mencapai suhu 1300°C. Diagram alir tahapan eksperimen diperlihatkan pada Gambar 2.

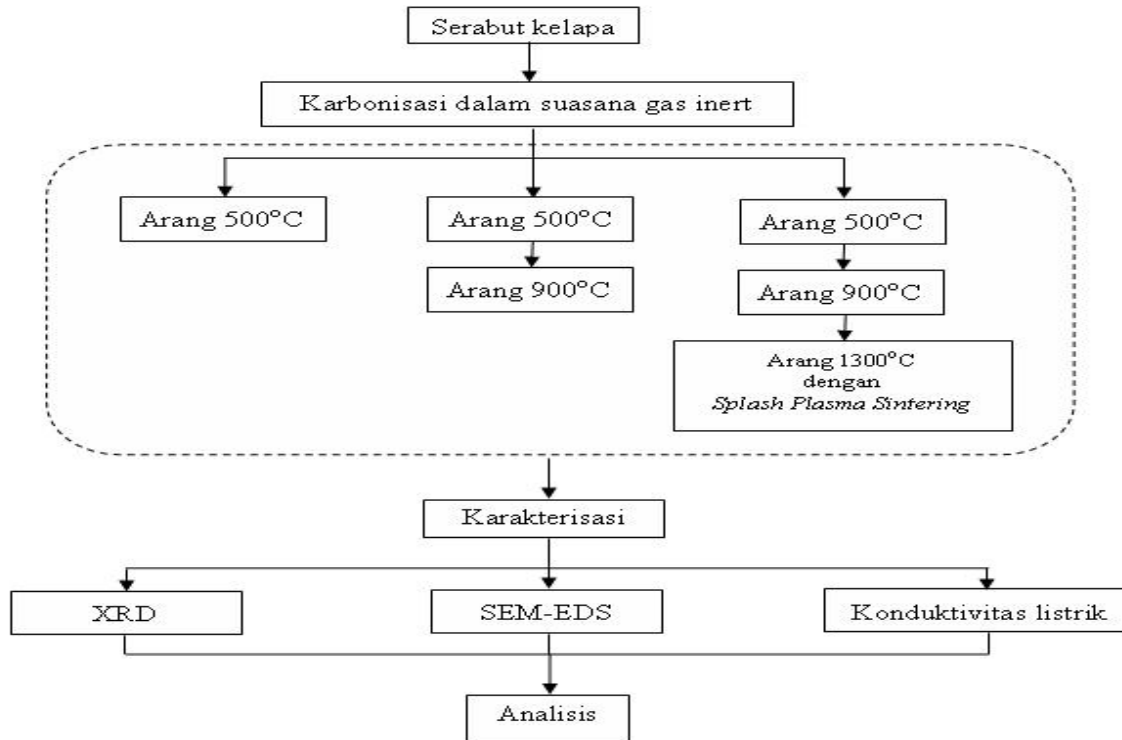
Karakterisasi Arang Serabut Kelapa

Karakterisasi mikrostruktur arang serabut kelapa dilakukan dengan teknik difraksi sinar-X (XRD) dan *scanning electron microscope* (SEM). Analisis XRD dilakukan menggunakan SHIMADZU XRD-7000 *X-Ray Diffractometer* dengan tegangan 40 kV, arus 30 mA, slit 1°, *scan range* 10 deg – 60 deg, *scan speed* 2 deg/min, dan sumber radiasi Cu K α untuk mengetahui perubahan struktur kristal serta menentukan derajat kristalinitas arang. Sedangkan pengamatan morfologi arang serabut kelapa dilakukan dengan SEM JEOL JSM-6390 Series). Nilai konduktivitas listrik arang serabut kelapa diukur menggunakan LCR-meter HIOKI 3522-50 HITESTER. Sampel untuk proses pengukuran konduktivitas listrik berupa serbuk arang serabut kelapa berukuran 100 mesh. Dari alat LCR-meter ini didapatkan nilai resistansi (R) dengan satuan Ω , dan untuk mendapatkan nilai konduktivitas listriknya (σ) S/m digunakan persamaan [10]:

$$\sigma = \frac{L}{RA} \dots\dots\dots(1)$$

dimana L adalah jarak 2 elektroda dengan satuan m², dan A adalah luas penampang lintang dengan

satuan m [10].



Gambar 2. Diagram Alir Tahapan Eksperimen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

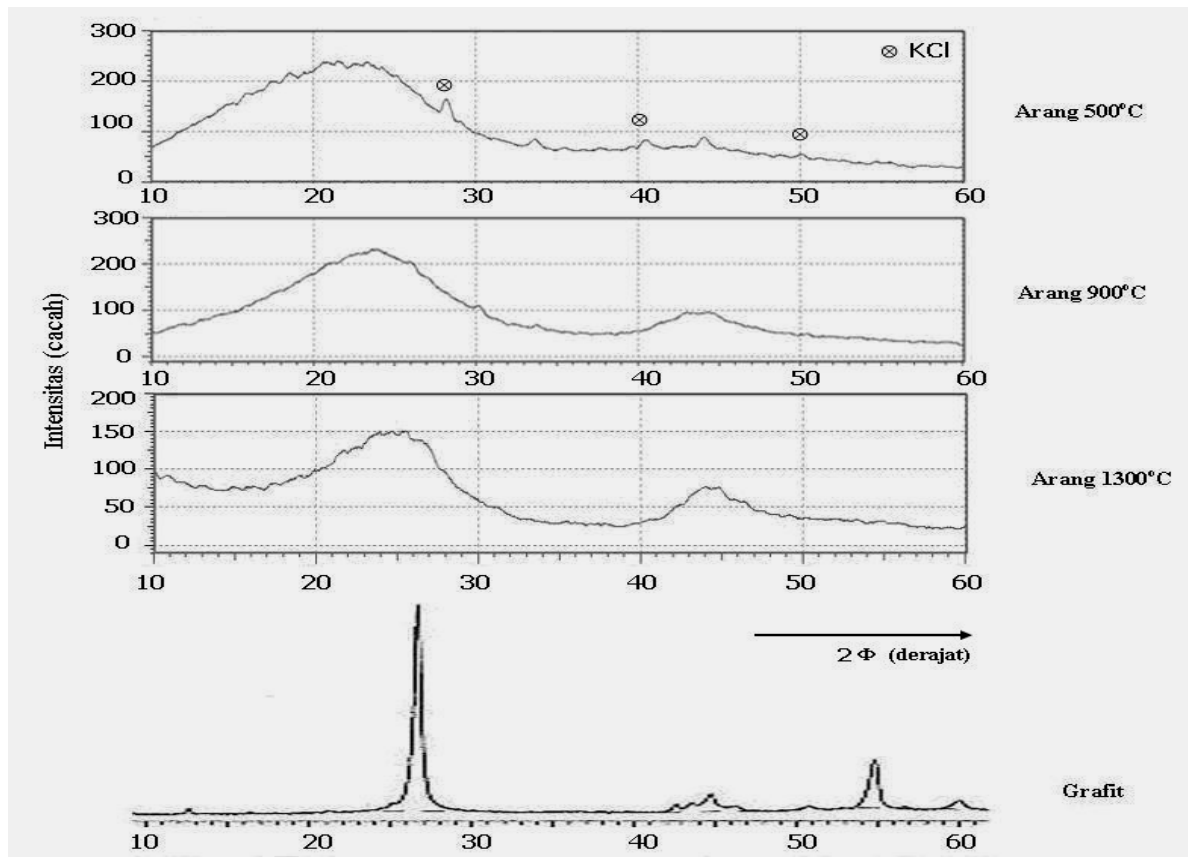
Analisis XRD

Analisis menggunakan difraksi sinar X bertujuan untuk memberikan informasi tentang perubahan struktur mikro yang terjadi pada serabut kelapa selama proses karbonisasi. Pola difraksi pada Gambar 3 menunjukkan adanya perubahan struktur kristal yang terjadi dari arang hasil karbonisasi pada suhu 500°C, 900°C, dan 1300°C. Pada serabut kelapa yang telah dikarbonisasi pada suhu 500°C mulai muncul puncak-puncak yang mengindikasikan terbentuknya komponen mineral dan karbon pada arang.

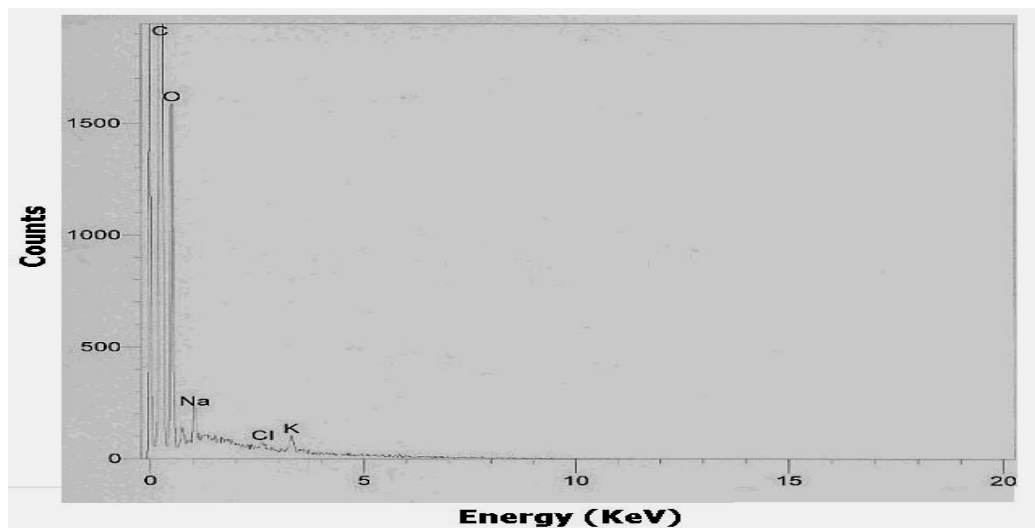
Hasil penelitian sebelumnya berhasil mengetahui bahwa arang hasil karbonisasi serabut kelapa sebagian besar terdiri dari unsur karbon dengan berat jenis mencapai 71% [11]. Hasil pencocokan dengan data JCPDS puncak-puncak yang muncul pada pola difraksi arang 500°C sesuai dengan puncak yang dimiliki oleh mineral jenis KCl (JCPDS No.22-714) [12].

Data EDS pada penelitian sebelumnya (Gambar 4) juga menunjukkan bahwa di dalam arang serabut kelapa selain terdapat unsur C, juga ditemukan unsur lain seperti K, Cl dan Na [13].

Komponen mineral ini merupakan mineral yang secara alami terdapat di dalam serabut kelapa.



Gambar 3. Pola difraksi sinar-X dari arang serabut kelapa, pada suhu karbonisasi berbeda, dibandingkan dengan pola difraksi sinar -X dari grafit.



Gambar 4. Kurva EDS pada arang serabut kelapa diproses di dalam inert gas pada suhu 500°C [13].

Sedangkan pada arang suhu 900°C puncak-puncak mineral tersebut intensitasnya menurun dan tidak terlihat lagi pada pola difraksi arang 1300°C. Hal ini dikarenakan senyawa KCl memiliki *melting point* sebesar 770°C sehingga akan meleleh pada suhu tersebut. Pola difraksi arang serabut kelapa terdiri dari 2 bukit dengan luas daerah yang besar dan ujung bukit yang tumpul, hal ini menunjukkan bahwa karbon dalam arang berkecenderungan berstruktur amorf (*amorphous carbon*). Dan posisi 2 θ puncak bukit arang tersebut mendekati dengan posisi struktur kristal karbon-grafit. Hal ini mengindikasikan bahwa karbon yang terbentuk dalam arang memiliki struktur kristal yang belum sempurna sehingga berkecenderungan bersifat amorf.

Pengamatan secara visual pada pola XRD arang 500°C, 900°C, dan 1300°C, menunjukkan bahwa luas daerah 2 bukit pada masing-masing pola XRD semakin menyempit seiring dengan kenaikan suhu karbonisasi. Kenaikan suhu karbonisasi juga meningkatkan derajat kristalinitasnya (Tabel 1).

Tabel 1. Derajat kristalinitas arang serabut kelapa.

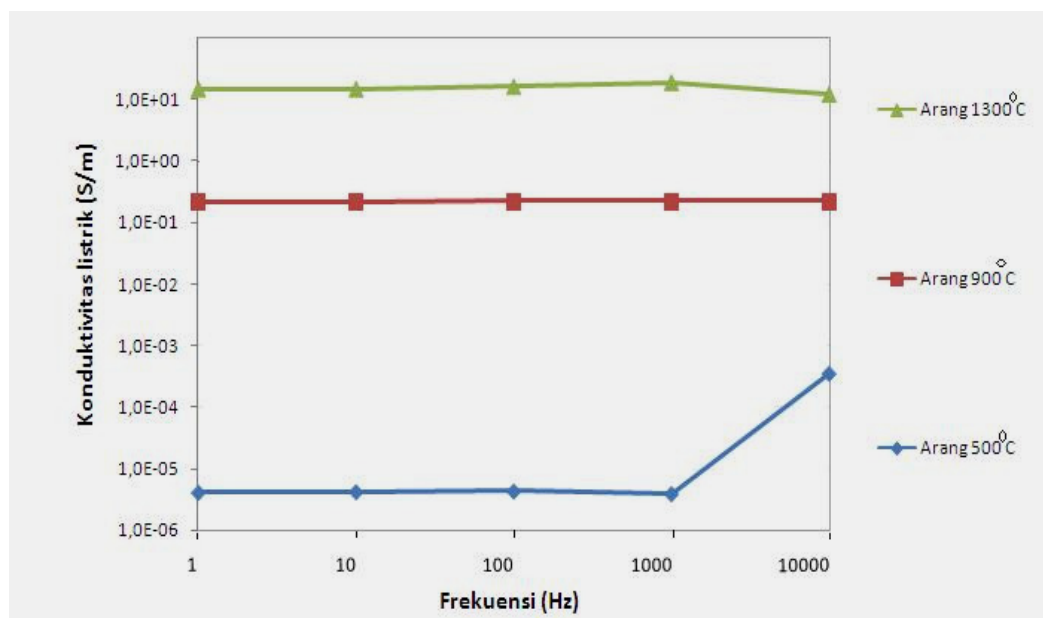
Suhu karbonisasi arang Serabut kelapa	Derajat kristalinitas
500°C	26,25 %
900°C	57,85 %
1300°C	60,48 %

Derajat kristalinitas merupakan tingkat keteraturan struktur suatu material [14]. Penetapan derajat kristalinitas dapat dilakukan dengan cara membagi luas daerah kristalin dan luas daerah seluruhnya (kristalin+amorf) [15]. Jadi peningkatan derajat kristalinitas pada arang 500°C, 900°C, dan 1300°C memperlihatkan bahwa struktur kristal karbon pada arang semakin teratur mendekati struktur grafit. Menurut Pari [16], struktur kristalin pada arang terbentuk dari senyawa karbon yang membentuk lapisan heksagonal. Grafit merupakan material berbasis karbon yang berstruktur kristal, bersifat tidak elastis, dan memiliki konduktivitas termal dan listrik yang baik. Atom-atom karbon dalam grafit tersusun membentuk heksagonal di sistem cincin planar terkondensasi. Masing-masing atom karbon berikatan kovalen dengan atom karbon tetangganya, sedangkan antar lapisan membentuk ikatan *van der Waals*. Perubahan suhu karbonisasi serabut kelapa selain berpengaruh pada struktur kristalnya juga dapat mempengaruhi sifat listriknya [17].

Sifat Listrik

Berdasarkan data nilai konduktivitas listrik pada Gambar 5 terlihat bahwa suhu karbonisasi arang

berpengaruh pada nilai konduktivitas listriknya. Arang hasil karbonisasi pada suhu 500°C, 900°C, dan 1300°C memiliki nilai konduktivitas listrik yang semakin meningkat seiring dengan peningkatan suhu karbonisasi.



Gambar 5. Nilai konduktivitas arang serabut kelapa

Nilai konduktivitas listrik arang hasil karbonisasi pada temperatur 500°C yang diukur pada frekuensi 1Hz - 10KHz berkisar antara $(0,39 \times 10^{-5})$ S/m - $(0,43 \times 10^{-5})$ S/m. Temperatur karbonisasi yang dinaikkan hingga 900°C mengakibatkan arang bersifat lebih konduktif dengan nilai konduktivitas listrik sebesar 0,21 S/m – 0,23 S/m. Saat suhu karbonisasi dinaikkan lagi menjadi 1300°C, nilai konduktivitas listriknya meningkat lagi hingga $(0,12 \times 10^2)$ S/m - $(0,18 \times 10^2)$ S/m. Nilai konduktivitas arang serabut kelapa ini terletak pada daerah nilai konduktivitas listrik yang dimiliki oleh material semikonduktor yaitu terletak pada nilai 10^{-8} S/m sampai 10^3 S/m. Nilai konduktivitas listrik ini mendekati konduktivitas serbuk grafit yang termasuk material konduktor. Nilai konduktivitas listrik serbuk grafit yang pernah terukur yaitu sebesar $0,34 \times 10^4$ S/m [10].

Seperti yang telah disebutkan di atas peningkatan suhu karbonisasi menyebabkan derajat kristalinitas arang menjadi semakin meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa susunan atom-atom karbon terbentuk semakin teratur. Berdasarkan analisis XRD, keteraturan susunan atom karbon ini diyakini semakin mendekati struktur kristal grafit, dimana ikatan-ikatan atom C nya membentuk struktur heksagonal. Setiap atom C memiliki 4 elektron valensi, dan untuk mencapai tingkat kestabilan atom sesuai dengan kaidah oktet maka masing-masing elektron valensi tersebut harus berpasangan dengan elektron dari luar. Tiga elektron digunakan untuk membentuk ikatan kovalen dengan atom C

tetangga terdekatnya, sedangkan elektron yang keempat merupakan elektron yang bebas bergerak melalui permukaan lapisan. Elektron bebas inilah yang menyebabkan material grafit bersifat konduktif atau mampu menghantarkan arus listrik [17].

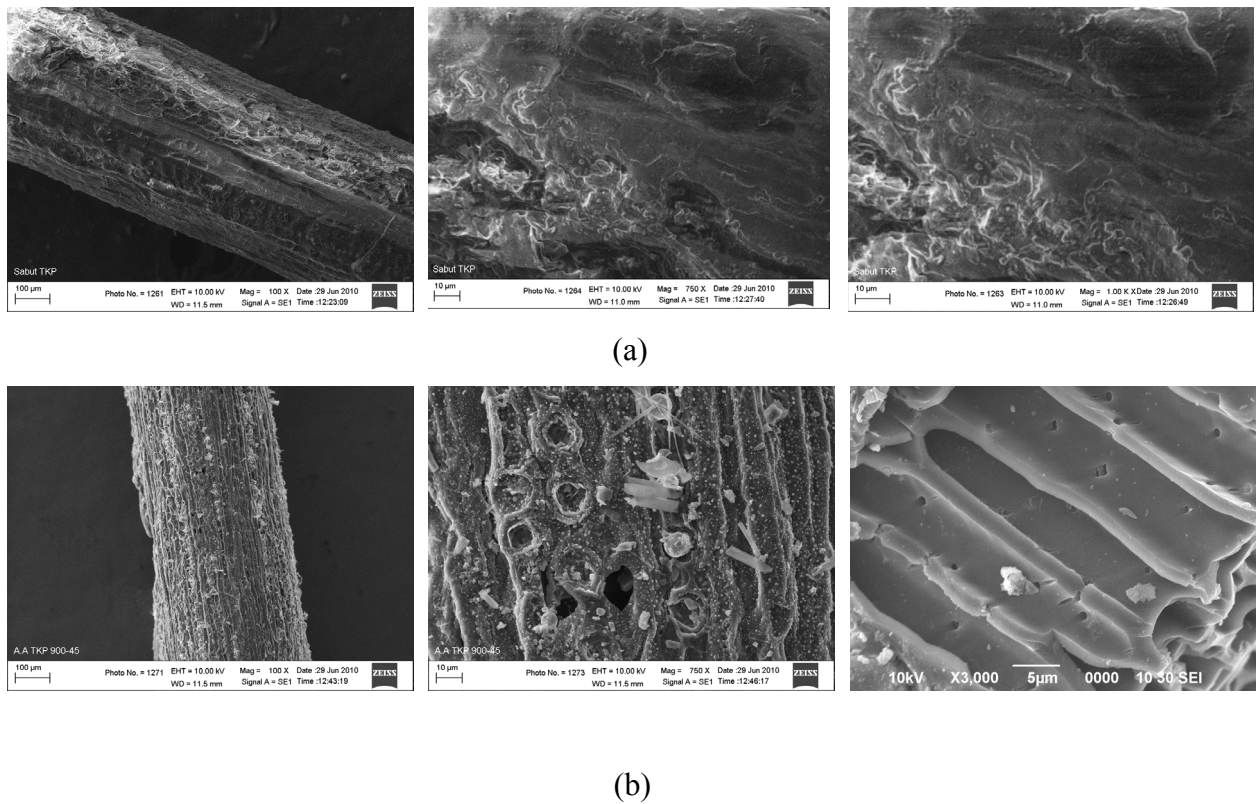
Selain itu suhu tinggi yang diberikan pada serat alam mampu menghilangkan komponen-komponen pengotor pada arang seperti kadar air, komponen volatile, dan mineral sehingga meningkatkan kadar karbon dan sekaligus menambah keteraturan strukturnya. Hal ini juga dapat menyebabkan konduktivitas listriknya pun semakin meningkat.

Morfologi Serabut Kelapa

Serabut kelapa merupakan material organik yang tersusun oleh senyawa utama berupa hemiselulosa, selulosa, dan lignin dalam jaringannya. Perlakuan panas yang dialami serabut kelapa pada proses karbonisasi menyebabkan senyawa-senyawa tersebut terurai dan menghasilkan 3 komponen utama yaitu karbon (arang), tar, dan gas (*volatile matter*). Komponen seperti tar dan gas pada bahan mentah atau serabut kelapa yang belum mengalami proses karbonisasi masih terikat dalam bentuk senyawa-senyawa dan menutup sebagian besar pori-pori pada permukaan serabut kelapa. Hal ini terlihat pada struktur mikro serabut kelapa yang belum terkarbonisasi (Gambar 6a). Pengamatan SEM pada bahan serabut kelapa mentah memperlihatkan bahwa serabut kelapa berbentuk serat memanjang dengan permukaan yang sebagian besar masih bebas dari terbentuknya pori-pori. Sementara itu, pada pengamatan arang serabut kelapa hasil karbonisasi (Gambar 6b) terlihat adanya rongga-rongga berbentuk silinder sejajar serat yang saling berhimpitan, serta pori-pori berdiameter $\pm 10 \mu\text{m}$ yang tersebar di permukaan dan dinding rongga arang serabut. Rongga dan pori-pori ini terbentuk karena pengaruh panas saat proses karbonisasi yang menyebabkan terjadinya proses penguraian senyawa organik pada serabut kelapa.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa makin tinggi suhu karbonisasi dapat meningkatkan derajat kristalinitas arang serabut kelapa, hal ini juga dapat diartikan bahwa terjadi peningkatan keteraturan susunan atom karbon dalam arang sehingga memperluas daerah kristalin arang serabut kelapa. Struktur yang terbentuk dalam arang mendekati struktur kristal karbon grafit. Peningkatan suhu karbonisasi juga memperbesar nilai konduktivitas listrik dari arang serabut kelapa, dan berdasarkan nilai tersebut arang serabut kelapa termasuk ke dalam material jenis semikonduktor. Arang serabut kelapa memiliki bentuk morfologi berupa serat berpori. Berdasarkan karakter-karakter yang dimiliki oleh arang serabut kelapa, maka material ini dapat berpotensi untuk diaplikasikan sebagai material dasar penyusun GDL.



Gambar 6. Pengamatan morfologi serabut kelapa dengan SEM (a) bahan mentah sebelum proses karbonisasi, (b) arang setelah proses karbonisasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Pusat Penelitian Fisika – LIPI yang berkenan mendanai penelitian ini melalui program DIPA 2010, juga kepada semua pihak yang telah membantu.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lister, S. and G. McLean. "PEM Fuel Cell Electodes." *Jurnal of Power Source* 130 (2003) pp : 61-76.
2. Nishimiya, K., T. Hata, S. Ishihara. "Mechanism and clarification of electrical conduction through wood charcoal." *Wood Research* 82 (1995): 34-36 .
3. Barbir, Frano. *PEM Fuel Cells Theory and Practice*. Elsevier Academic Press : USA, 2005.
4. Crawley, Gemma."Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells." *Fuel Cell Today* (March 2006), <http://www.fuelcelltoday.com> (diakses 8 Januari 2010).

5. Han, M., J.H. Xu, S.H. Chan, S.P. Jiang. "Characterization of gas diffusion layers for PEMFC." *Electrochimica Acta* 53 (2008) : 5361-5367.
6. Escribano, S., J.F. Blachot, J. Etheve, A. Morin, R. Mosdale. "Characterization of PEMFCs gas diffusion layers properties." *Journal of Power Sources* 156 (2006) : 8-13.
7. Kannan, A.M., P. Kanagala, V. Veedu. "Development of carbon nanotubes based gas diffusion layers by in situ chemical vapor deposition process for proton exchange membrane fuel cells." *Journal of Power Sources* 192 (2009) : 297-303.
8. Browne, F.L. *Theories of the Combustion of Wood and its Control*. No:2136, University of Wisconsin, 2000.
9. Subyakto, V. Castro, K. Ishimaru, K., G. Pari, T. Hata, Y. Imamura, S. Kawai. "Biomass carbons from oil-palm residues." Proceedings of 5th Int. Wood Science Symposium on Sustainable Production and Effective Utilization of Tropical Forest Resources. Research Ins.for Sustainable Humanosphere, Kyoto Univ-Japan, pp.301-306.
10. Mochidzuki, K. et al, "Electrical and Physical Properties of Carbonized Charcoals." *Ind. Eng. Chem. Res.* 42 (2003): 5140-5151.
11. Indayaningsih, N., D. Priadi, A. Zulfia, Suprapedi. "Analysis Of Coconut Carbon Fibers For Gas Diffusion Layer Material." *Key Engineering Materials Journals*, Vol. 462-463 (2011) Part I : 937-942.
12. Anonymous, *Powder Diffraction File*, Page: 482 and 576, Park Lane. Swarthmore, International Centre for Diffraction Data, 1990.
13. Destyorini, F., A. Suhandi, N. Indayaningsih, E. Suwandi. "Analisis dan Karakterisasi Karbon Serabut Kelapa pada Variasi Temperatur Pemanasan", Prosiding Seminar Material Metalurgi, 2009.
14. Hussain, R., R. Qadeer, M. Ahmad, M. Saleem. "X-Ray Diffraction Study of Heat-Treated Graphitized and Ungraphitized Carbon." *Turk J Chem* 24 (2000) : 177-183.
15. Kercher, AK., D.C. Negle. "Microstructural evolution during charcoal carbonization by X-ray diffraction analysis." *Carbon* 41 (2003) : 15-27.
16. Pari, G. "Kajian Struktur Arang Aktif dari Serbuk Kayu sebagai Absorben Formaldehida Kayu Lapis." Disertasi Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor, 2004.
17. Priyotomo, G. "Perubahan Struktur Kristal Material Berbasis Karbon terhadap Sifat Konduktifitas." *Jurnal Metalurgi*, vol. 22, No. 1 (Juni 2007).