

PENGARUH SUHU PEMANASAN DAN AGEN PENGIKAT DALAM PEMBUATAN KONDUKTOR LISTRIK BERBASIS ARANG

(EFFECTS OF HEATING TEMPERATURE AND BINDER IN THE PRODUCTION OF CHAR-BASED ELECTRICAL CONDUCTOR)

Teguh Endah Saraswati^{1*}, Achmad Bahrudin¹, and Miftahul Anwar²

¹Jurusan kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta, 57126, Jawa Tengah, Indonesia

*email: teguh@mipa.uns.ac.id

DOI : 10.20961/alchemy.v12i2.708

Received 12 March 2016, Accepted 12 March 2016, Published 01 September 2016

ABSTRAK

Grafrit sebagai salah satu alotrof karbon banyak digunakan sebagai material elektroda karena sifat konduktifitas listrik yang baik. Arang sebagai material sumber karbon ditemukan sangat melimpah di alam, berpotensi diaplikasikan pada bidang penyimpanan energi seperti dalam baterai atau supercapacitor. Untuk tujuan ini, struktur arang yang bersifat amorf perlu dikonversi menjadi struktur grafit sehingga akan memiliki sifat hantar listrik (konduktif listrik) yang lebih baik. Penelitian ini bertujuan untuk membuat material konduktor listrik yang berasal dari arang kayu yang berpotensi digunakan sebagai elektroda. Preparasi dilakukan dengan mencampur serbuk arang dengan agen pengikat aspal dengan rasio berat 3:1, 4:1, 5:1 dan diikuti dengan perlakuan pemanasan dibawah kondisi inert pada suhu 600°C, 800°C, dan 1000°C. Material arang yang semula bersifat isolator listrik telah berhasil dikonversi menjadi elektroda konduktor listrik. Capaian suhu optimum untuk menghasilkan elektroda dengan hambatan listrik terkecil kemudian diterapkan pada pembuatan elektroda karbon dengan pemanasan campuran arang dan fruktosa dengan rasio berat 1:1 (b/b). Hasil menunjukkan elektroda dengan campuran serbuk arang dan agen pengikat fruktosa dengan perlakuan pemanasan pada 1000°C memiliki karakter konduktifitas listrik yang lebih baik diantara variasi suhu lainnya.

Kata kunci: arang, karbon, elektroda, pemanasan, agen pengikat, hambatan listrik

ABSTRACT

Graphite as one allotrop carbon is widely used as an electrode material for a good electrical conductivity properties. Charcoal as a carbon source material is found very abundant in nature. Charcoal has the potential application for electrode material in energy storage such as in a battery or supercapacitor. For this purpose, amorphous structure of charcoal needs to be converted into a graphite structure so that it has better electrical conductivity property. This research aims to prepare the electrical conductor material derived from wood charcoal that could potentially be used as an electrode. Preparation was made by mixing charcoal powder with asphalt binder with a weight ratio of 3:1, 4:1, 5:1 and followed

by heat treatment under an inert atmosphere at temperature of 600°C, 800°C and 1000°C. Charcoal material which was originally to be an electrical insulator has been successfully converted into an electrical conductor. The achievement of the optimum temperature to produce electrodes with the smallest electrical resistance was then applied to the manufacture of carbon electrodes by heating the mixture of charcoal and fructose binder in a weight ratio of 1:1 (w/w). The results showed electrodes with a mixture of charcoal powder and fructose with heat treatment at 1000°C has the better electrical conductivity among other variations.

Keywords: char, carbon, electrode, heating, binder, electrical resistivity

PENDAHULUAN

Salah satu sumber karbon yang murah dan banyak tersedia adalah arang. Arang merupakan residu hitam yang sebagian besar terdiri dari karbon, dihasilkan dengan menghilangkan kandungan air dan residu volatil yang ada didalamnya. Pada umumnya arang didapatkan dengan memanaskan kayu, gula, tulang ataupun benda lain. Arang memiliki karakteristik berwarna hitam, ringan, mudah hancur, menyerupai batu bara, serta memiliki kandungan karbon antara 80-90% dan sisanya adalah abu ataupun benda kimia lainnya. Dari berbagai jenis arang, arang kayu merupakan yang paling banyak diproduksi. Arang kayu merupakan material amorf dan bersifat tidak konduktif sehingga tidak dapat digunakan sebagai elektroda. Disisi lain, grafit yang juga merupakan salah satu alotrop karbon tetapi memiliki perbedaan sifat kelistrikan dengan arang. Grafit bersifat konduktif sehingga telah banyak dimanfaatkan sebagai elektroda dalam bidang elektronik. Selain kelimpahan grafit murni dialam terbatas dan memerlukan purifikasi, secara ekonomis grafit lebih mahal dibanding dengan arang. Konversi arang menjadi grafit memungkinkan dilakukan dengan beberapa kondisi semisal perlakuan pemanasan (Austin *and* Hedden 1954; Okada *et al.*, 1961; Tanahashi *et al.*, 1991; Bourke *et al.*, 2007), perlakuan tekanan atau penambahan katalis (Marsh *and* Warburton 1970).

Proses grafitisasi arang dengan pemanasan telah dilaporkan oleh Austin dan Hedden (Austin *and* Hedden 1954). Mereka melakukan proses grafitisasi dengan perlakuan pemanasan pada suhu tinggi dari 1093,33 hingga 2565,55°C tanpa agen pengikat dalam sebuah drum yang diputar pada posisi horisontal saat pemanasan. Bourke *et al.*, menjelaskan saat pemanasan ikatan sp^3 karbon berubah menjadi sp^2 karena ketidakstabilan ikatan sp^3 pada suhu tinggi (Bourke *et al.*, 2007). Marsh dan Warburton melaporkan penggunaan katalis logam berpengaruh pada perubahan struktur amorf karbon menjadi struktur grafit. Selain itu, penambahan *pitch* atau *binder* yang mengandung karbon juga dapat menambah kelimpahan

karbon yang diperoleh dan kekuatan ikatan antar partikel karbon (Marsh *and* Warburton 1970).

Marsh melaporkan bahwa proses grafitisasi dapat dikatalisis menggunakan material anorganik, material organik dan pengkondisian proses grafitisasi semisal tekanan, gas ambien, dan *electric discharge*. Katalis material anorganik dalam proses grafitisasi semisal adalah logam Al, Ca, Cr, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pt, Ti, Si, W, dan lain-lain. Sedangkan katalis material organik yakni *fluorene* dan *carbazole* yang merupakan konstituen utama dalam *coal-tar pitch* (Marsh *and* Warburton 1970). Oleh karena itu, penggunaan agen pengikat berasal dari aspal atau material berbasis selulosa juga dapat berperan sebagai katalis proses grafitisasi.

Karbon yang telah digrafitisasi memiliki potensi untuk digunakan sebagai elektroda karena resistansi listrik yang rendah. Metode pembuatan elektroda karbon yang sebelumnya pernah dipatenkan (US Patent No 7405020 B2, 2008) adalah menggunakan serbuk karbon grafit yang dicetak dengan tekanan 10 MPa tanpa menggunakan agen pengikat (Antal, 2008).

Oleh karena itu, artikel ini mengkaji pembuatan elektroda karbon secara langsung dari arang kayu dengan pemanasan suhu yang lebih rendah dari yang umumnya diterapkan pada proses grafitisasi dengan menggunakan agen pengikat yang juga mengandung elemen karbon. Penggunaan agen pengikat ini dimaksudkan untuk membantu kerekatan antar partikel karbon sehingga proses grafitisasi lebih mudah dicapai meski tidak pada suhu tinggi. Hasil elektroda karbon diujicobakan sebagai elektroda penghubung dalam sirkuit elektronika sederhana untuk menyalakan lampu dengan tegangan 3 V menggunakan baterai dalam rangkaian seri.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah arang kayu keras non jati (Pasar Legi Surakarta), aspal keras pen 60 (Asphalt Cement, Ac), gula cair fruktosa (Rosebrand). Alat yang digunakan adalah *furnace*, *hot plate*, peralatan gelas (pyrex) dan XRD, multimeter digital Krisbow KW06-490, dan rangkaian elektronika sederhana untuk menghidupkan lampu menggunakan baterai 2 buah baterai 1,5 V dalam rangkaian seri.

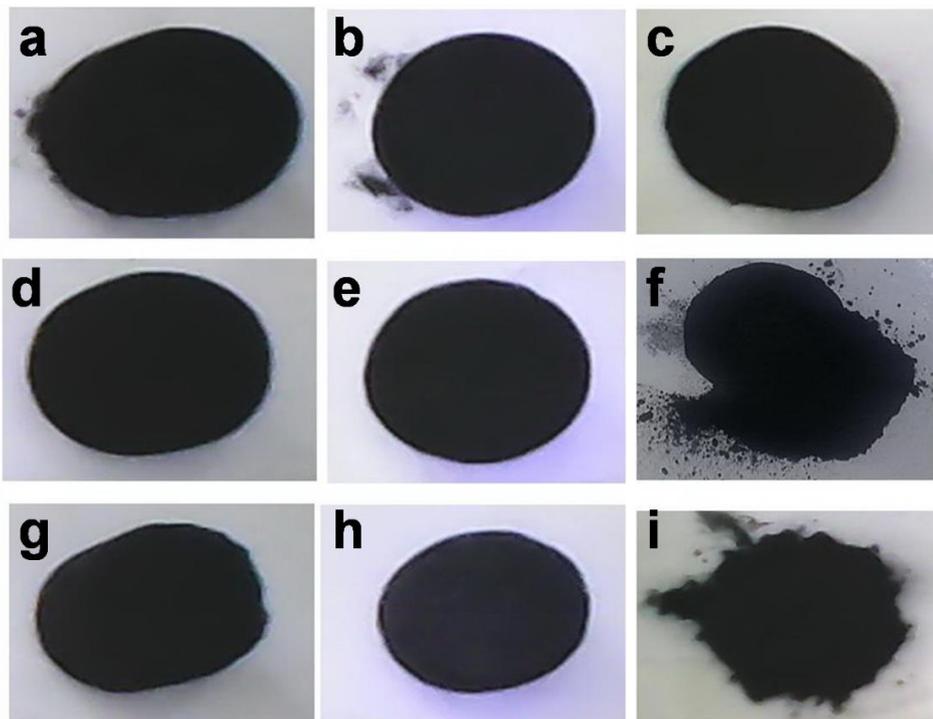
Proses pembuatan elektroda arang

Pembuatan elektroda dimulai dengan menyiapkan karbon arang kayu yang ditumbuk halus. Karbon hasil tumbukan disaring menggunakan penyaring berukuran 150 *mesh*. Karbon hasil saringan dicampur dengan agen pengikat aspal dengan komposisi berat arang berbanding agen pengikat 3:1; 4:1; 5:1 (b/b). Saat proses pembuatan campuran, aspal

dimasukkan ke dalam gelas beker kemudian dipanaskan pada *hotplate* suhu sekitar 60°C. Saat aspal mencair, arang dimasukkan dan diaduk hingga diperkirakan telah homogen, sampai mencair. Perlakuan awal aspal dengan pemanasan pada suhu 60°C bertujuan agar aspal terdistribusi secara merata sebagai agen pengikat arang. Sebagai uji awal untuk mendapatkan hasil optimum, campuran dicetak secara manual dengan ukuran panjang sekitar 2 cm dan diameter 2,3 cm. Hasil cetakan dipanaskan dengan furnace pada suhu 600°C, 800°C dan 1000°C selama 2 jam. Dari hasil tersebut, suhu terbaik digunakan untuk memanaskan elektroda dengan agen pengikat fruktosa dengan perbandingan arang dan agen pengikat 1:1 (b/b).

Karakterisasi fisik dan resistansi elektroda arang

Pengujian konduktivitas listrik dari elektroda yang telah terbentuk menggunakan multimeter digital Krisbow KW06-490 (pembacaan resistansi max 999.9 Ω ; akurasi $\pm 1.5\%$) serta diuji XRD Shimadzu 6000 pada range 2θ 10-80° untuk mengetahui kristalinitasnya. Dari pengukuran dengan menggunakan multimeter digital didapatkan data resistansi elektroda. Sedangkan untuk hasil XRD didapatkan difaktogram yang kemudian dicocokkan dengan database JCPDS untuk material karbon. Pengujian elektroda hasil untuk menghantarkan listrik juga dilakukan untuk menghidupkan lampu dalam rangkaian elektronika sederhana menggunakan dua baterai sel kering bertegangan 1,5 V dalam rangkaian seri.



Gambar 1. Performa elektroda arang yang diperoleh dengan rasio berat arang dengan agen pengikat berturut-turut dari kiri ke kanan 3:1; 4:1; dan 5:1 (b/b) pada pemanasan suhu (a-c) 600°C, (d-f) 800°C dan (g-i) 1000°C.

PEMBAHASAN

Elektroda dibuat dari partikel karbon berasal dari arang dengan ukuran $< 100 \mu\text{m}$ yang dengan penambahan agen pengikat dalam rasio berat yang bervariasi. Tiga variasi perbandingan berat arang:agen pengikat dilakukan pada rasio berat 3:1; 4:1; dan 5:1 (b/b). Elektroda ini dicetak dengan ukuran panjang sekitar 2 cm dan diameter 2,3 cm. Elektroda hasil pemanasan dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan tiga komponen elektroda yang dibuat dari partikel karbon arang dan agen pengikat aspal dengan tiga variasi temperatur pemanasan dan tiga variasi perbandingan berat arang:agen pengikat dengan rasio berat 3:1; 4:1; dan 5:1 (b/b) pada suhu pemanasan 600-1000°C. Proses pemanasan elektroda yang menggunakan agen pengikat aspal dilakukan secara bertahap untuk menghilangkan senyawa volatil yang mudah terbakar. Pada proses pemanasan dengan menggunakan agen pengikat aspal untuk komposisi 5:1 (b/b), menghasilkan elektroda yang rapuh atau tidak padat seperti halnya elektroda lain yang dibuat dengan komposisi arang:agen pengikat pada rasio 3:1 dan 4:1 (b/b). Hal ini diperkirakan karena porsi agen pengikat yang kurang.

Oleh karena itu, dari hasil yang didapatkan, elektroda yang memungkinkan untuk diuji konduktivitas listrik dengan multimeter adalah elektroda dengan komposisi agen pengikat berbanding arang 3:1 dan 4:1. Dari pengukuran tersebut didapatkan resistansi listrik elektroda. Pengukuran dilakukan secara acak pada elektroda yang ditampilkan pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Data resistansi elektroda arang dengan suhu pemanasan 800°C.

Perulangan sampel	Resistansi listrik (Ω)	
	Komposisi arang:agen pengikat 3:1 (b/b)	Komposisi arang:agen pengikat 4:1 (b/b)
1	12,2	13,8
2	12,3	14,0
3	12,0	13,7

Catatan: Resistansi listrik arang: OL

Tabel 2. Data resistansi elektroda arang dengan suhu pemanasan 1000°C.

Perulangan sampel	Resistansi listrik (Ω)	
	Komposisi berat arang:agen pengikat 3:1 (b/b)	Komposisi berat arang:agen pengikat 4:1(b/b)
1	3,4	4,0

2	3,6	4,0
3	3,4	3,8

Catatan: Resistansi listrik arang: OL

Resistansi listrik baik untuk arang dan elektroda arang yang dipanaskan pada suhu 600°C bernilai OL (*open loop*) atau dapat diartikan bahwa elektroda arang yang terbentuk pada suhu pemanasan tersebut tidak dapat mengantarkan listrik atau bersifat isolator listrik. Sedangkan untuk elektroda arang hasil pemanasan pada suhu 800°C dan 1000°C bersifat konduktor listrik dengan besaran nilai resistansi listrik seperti yang dipaparkan pada Tabel 1 dan 2 baik untuk komposisi 3:1 (b/b) dan 4:1 (b/b). Dari data pada Tabel 1 dan 2 tersebut dapat dinyatakan bahwa pada komposisi 3:1 memiliki konduktivitas listrik lebih baik dibanding komposisi 4:1. Elektroda arang hasil pemanasan pada suhu 1000°C memiliki konduktivitas listrik lebih baik dari elektroda arang hasil pemanasan pada suhu 800°C.

Data pengukuran diatas menunjukkan bahwa suhu dan komposisi dapat berpengaruh pada resistansi listrik elektroda karbon. Komposisi berat agen pengikat yang lebih banyak menghasilkan elektroda yang lebih bersifat konduktor listrik yang lebih baik dikarenakan agen pengikat membantu pelekatan lebih baik sehingga berpengaruh pada interaksi atau kontak material saat pemanasan berlangsung. Selain itu, agen pengikat yang berasal dari turunan material karbon seperti aspal, ikut terlibat dalam reaksi saat pemanasan saat rantai sp³ karbon putus dan menyusun ulang menjadi karbon sp² dalam struktur heksagonal. Penambahan agen pengikat ini juga berpengaruh pada penambahan kandungan elemen karbon. Pemanasan pada suhu yang lebih tinggi memungkinkan untuk terjadinya proses karbonisasi dan pra-grafitisasi lebih baik.

Kondisi pemanasan pada 1000°C diterapkan pada pembuatan elektroda karbon menggunakan agen pengikat lain yakni fruktosa. Elektroda ini dibuat dari campuran arang dan fruktosa dengan rasio berat 1:1 (b/b). Penggunaan fruktosa didasarkan pada penelitian Wen *et al.* yang menggunakan sukrosa sebagai agen pengikat campuran ZrO₂ dan grafit untuk pelapisan (Wen *et al.*, 2010). Hasil dari pengukuran resistansi listrik elektroda campuran arang dan fruktosa dibandingkan dengan konduktivitas elektroda campuran arang dan aspal pada suhu 1000°C berturut-turut disajikan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Elektroda campuran arang dan aspal dengan ratio berat 3:1 dengan pemanasan 1000°C.

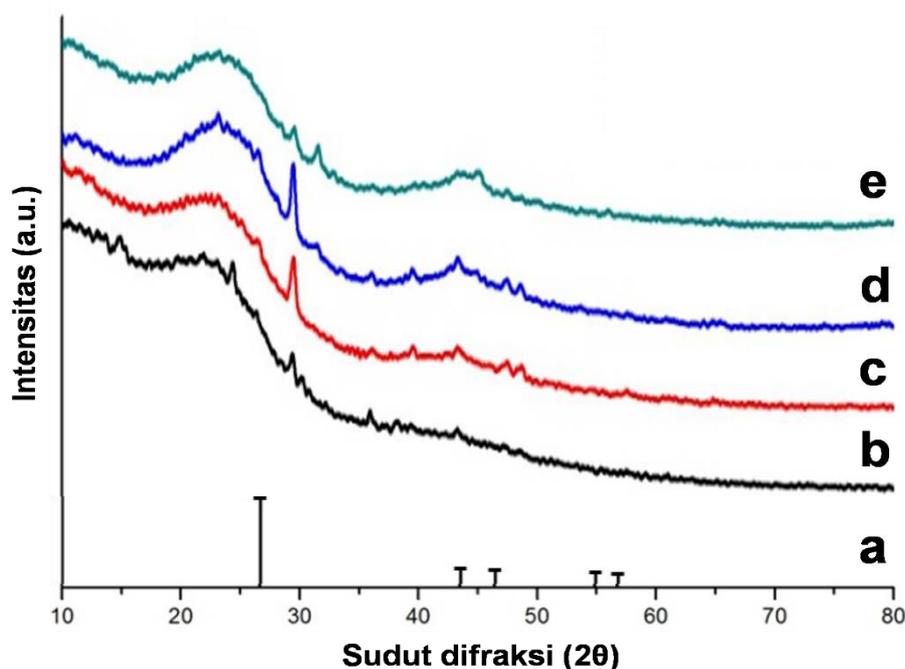
Jarak pengukuran	Resistansi (Ω)
1 cm	1,8
2 cm	1,9
3 cm	2,4

Tabel tersebut memberikan informasi bahwa penggunaan agen pengikat fruktosa memiliki konduktivitas listrik lebih baik daripada menggunakan aspal karena nilai resistansi listrik yang lebih kecil. Selain itu penggunaan agen pengikat fruktosa memiliki kelebihan tidak menimbulkan asap dan pemicu timbulnya api seperti pada agen pengikat aspal.

Tabel 4. Elektroda campuran arang dan fruktosa dengan ratio berat 1:1 dengan pemanasan 1000°C.

Jarak pengukuran	Resistansi (Ω)
1 cm	1,5
2 cm	1,7
3 cm	2,0

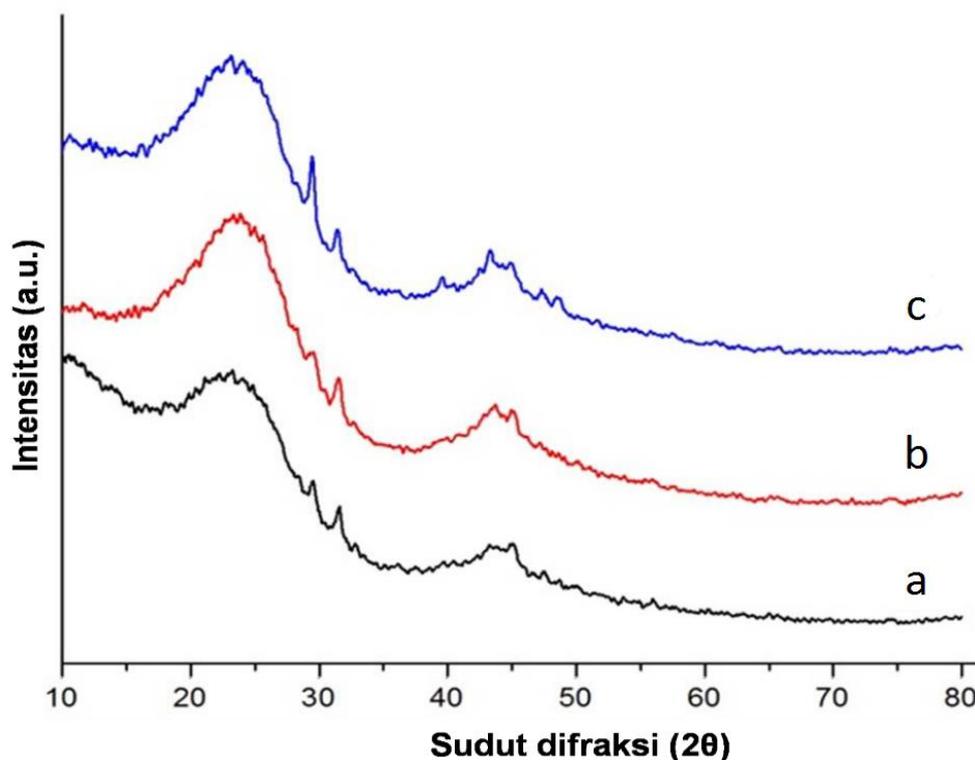
Untuk mengetahui perubahan struktur dan kristalinitas karbon, material sebelum dan sesudah perlakuan dikarakterisasi dengan *X-ray diffractometer* (XRD). Data XRD dari elektroda hasil perlakuan disajikan pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Profil XRD dari carbon berdasar dari data (a) JCPDS (75-0444); (b) arang dan elektroda dengan menggunakan agen pengikat aspal dengan rasio berat karbon:agen pengikat 3:1 dengan suhu pemanasan (c) 600°C, (d) 800°C dan (e) 1000°C.

Dalam Gambar 2 dan 3 dapat dilihat bahwa karakter dari grafit yang bersifat konduktif yang diharapkan terbentuk dengan intensitas tinggi di daerah $2\theta = 26,6^\circ$, muncul sebagai puncak yang melebar. Begitu juga dengan puncak grafit terlihat pada daerah 2θ sekitar $43,4^\circ$. Intensitas melebar pada daerah $2\theta = 20-30^\circ$ merupakan representasi dari pola karbon aktif (Coutinho *et al.*, 2000; Gang-Wei *et al.*, 2008; Jain and Tripathi 2014).

Sedangkan puncak pada daerah $2\theta = 29,5^\circ$ menurut JCPDS 72-2091 merupakan karakteristik dari C_8 (Das *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2015).

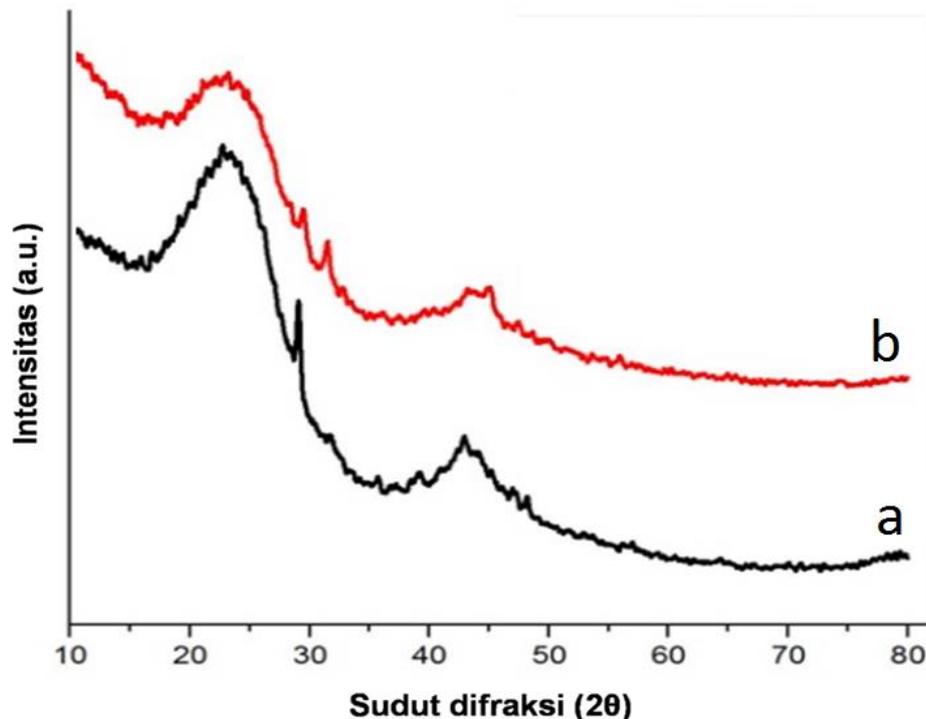


Gambar 3. Data XRD elektroda agen pengikat aspal berbagai komposisi rasio berat karbon:agen pengikat pada pemanasan 1000°C : (a) 3:1, (b) 4:1, (c) 5:1.

Hishiyama menyatakan bahwa karbon aktif dapat mengalami grafitisasi yang baik pada pemanasan di atas 2500°C (Hishiyama *et al.*, 1974). Gambar 3 menunjukkan elektroda yang dihasilkan dengan rasio yang mana kandungan karbonnya lebih banyak menghasilkan intensitas lebih tinggi untuk kedua puncak yang berada di 2θ antara $20\text{--}30^\circ$ dan $40\text{--}45^\circ$ yang mana merupakan representasi dari karbon grafit. Rasio dengan kandungan agen pengikat yang semakin meningkat berdampak pada penurunan intensitas puncak definitif karbon pada 27° karena berkurangnya kandungan karbon aktif. Akan tetapi, adanya agen pengikat membantu keterikatan kluster karbon aktif sehingga keteraturan struktur heksagonal dapat lebih mudah tercapai.

Oleh karena puncak XRD yang merepresentasikan karbon grafit melebar, dapat disimpulkan proses pemanasan pada penelitian ini menghasilkan elektroda yang bersifat konduktor listrik namun material yang terbentuk masih berstruktur sebagai grafit turbostratik atau belum memiliki struktur yang berorientasi grafit dengan kemurnian yang tinggi. Struktur grafit memiliki banyak layer berstruktur rantai heksagonal yang berorientasi teratur dalam

konfigurasi grafit ABABAB dengan jarak antar bidang (*d spacing*) berkisar 0,34 nm sebagai ciri khas grafit dari puncak 2θ $26,7^\circ$ yakni bidang (002). Sedangkan struktur dari grafit turbostratik ini memiliki beberapa layer berstruktur rantai heksagonal yang berorientasi random (Pierson, 1994).

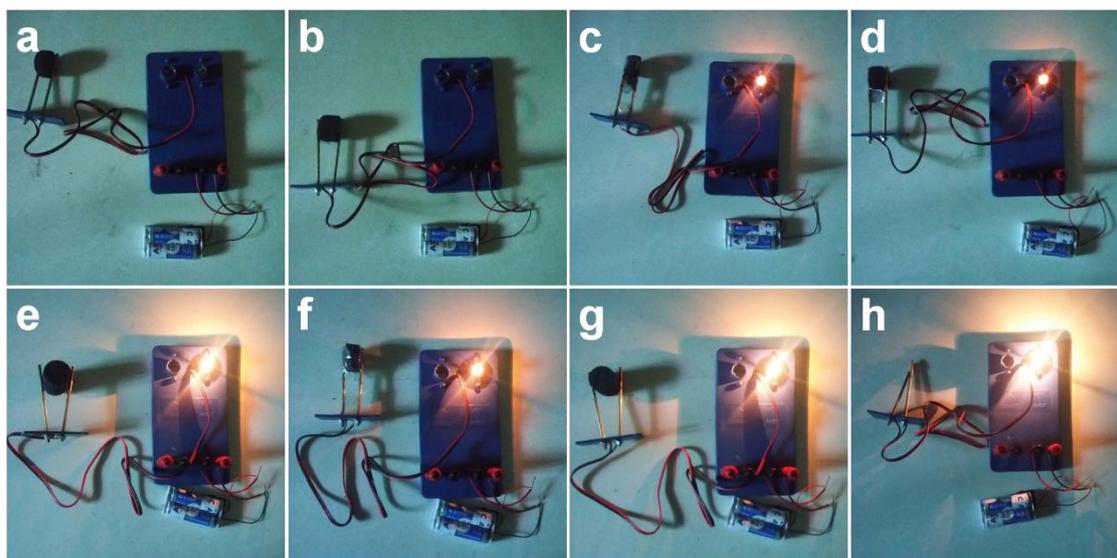


Gambar 4. Data perbandingan profil XRD dari elektroda hasil menggunakan agen pengikat (a) aspal dan (b) fruktosa.

Gambar 4 (a-b) menunjukkan pola yang tidak berbeda jauh. Puncak pada daerah sekitar $2\theta = 20-30$ dan $40-45^\circ$ yang merupakan penciri dari grafit. Tampak bahwa elektroda dengan agen pengikat aspal dan fruktosa memiliki pola yang mirip yakni keduanya memiliki puncak-puncak pada 2θ tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan agen pengikat yang berbeda (aspal dan fruktosa) tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kristalinitas elektroda karbon yang dihasilkan karena sama-sama berbasis elemen karbon.

Selain pengukuran hambatan listrik yang hasilnya ditampilkan dalam Tabel 3 dan 4, elektroda yang diperoleh juga diujicoba sebagai penghubung rangkaian elektronika sederhana untuk menyalakan lampu dengan tegangan 3 Volt yang ditampilkan dalam Gambar 5. Gambar 5a hingga 5h adalah uji coba penggunaan elektroda terpreparasi hasil pemanasan pada temperatur dan rasio berat karbon:agen pengikat aspal berturut-turut adalah 600°C (3:1), 600°C (4:1), 800°C (3:1), 800°C (4:1), 1000°C (3:1), 1000°C (4:1), 1000°C (1:1) dengan agen pengikat fruktosa, dan sirkuit langsung terkoneksi tanpa elektroda karbon.

Gambar 5 (a-b) menunjukkan bahwa elektroda tidak dapat digunakan sebagai konektor untuk menghidupkan lampu. Hal ini sesuai dengan hasil pengukuran hambatan listrik yang menunjukkan bahwa kedua elektroda tersebut memiliki hambatan listrik yang sangat besar (OL). Gambar 5 (c-g), menunjukkan bahwa elektroda berhasil digunakan sebagai konektor untuk menghidupkan lampu. Hal ini sesuai dengan hasil pengukuran hambatan listrik yang menunjukkan bahwa kelima elektroda tersebut memiliki hambatan listrik yang lebih kecil dari elektroda yang digunakan dalam Gambar 5 (a-b). Akan tetapi, tingkat intensitas lampu yang dihasilkan berbeda diantara Gambar 5 (c-g).



Gambar 5. Uji coba penggunaan elektroda karbon pada sirkuit untuk menyalakan lampu dengan tegangan 3 V. Elektroda yang dipakai adalah elektroda hasil pemanasan pada temperatur dan rasio berat karbon:agen pengikat aspal berturut-turut adalah (a) 600°C (3:1), (b) 600°C (4:1), (c) 800°C (3:1), (d) 800°C (4:1), (e) 1000°C (3:1), (f) 1000°C (4:1), (g) 1000°C (1:1) dengan agen pengikat fruktosa dan (h) sirkuit langsung terkoneksi tanpa elektroda karbon.

Jika dibandingkan dengan rangkaian tanpa elektroda karbon, urutan tingkat intensitas nyala lampu dalam Gambar 5 diperoleh sebagai berikut: elektroda pada Gambar 5c < 5d < 5e < 5f < 5g < 5h. Hal ini sesuai dengan nilai hambatan listrik yang dimiliki, dimana elektroda dalam Gambar 5 (c-d) memiliki nilai hambatan listrik lebih besar dibanding dengan elektroda dalam Gambar 5 (e-g). Lampu dalam Gambar 5g tampak lebih terang dibanding dalam Gambar 5 (e-f). Hal ini menunjukkan elektroda dalam Gambar 5g yang terpreparasi menggunakan agen fruktosa memiliki sifat konduktor listrik lebih baik dari elektroda lainnya. Hal ini diduga karena agen pengikat fruktosa tidak memiliki senyawa volatil sebagaimana dengan agen pengikat aspal, sehingga morfologi permukaan dan pori hasil elektroda yang diperoleh dengan agen pengikat aspal, berlubang-lubang karena adanya pelepasan senyawa

volatil yang terjadi selama pemanasan. Sedangkan morfologi permukaan dan pori hasil elektroda dengan agen pengikat fruktosa lebih rapat, dan hal ini diyakini menjadi salah satu faktor yang berperan pada sifat konduktivitas listriknya yang lebih baik dari elektroda lainnya.

KESIMPULAN

Arang kayu dapat dijadikan sebagai material awal dalam pembuatan elektroda yang bersifat konduktor listrik. Hasil elektroda karbon bersifat konduktor listrik namun material yang terbentuk masih berstruktur sebagai grafit turbostratik atau belum memiliki struktur yang berorientasi grafit dengan kemurnian yang tinggi. Pada penelitian ini perlakuan pemanasan pada suhu 1000°C memberikan nilai resistansi listrik yang lebih baik dibanding dengan elektroda hasil pemanasan pada suhu 600° dan 800°C. Penggunaan agen pengikat yang berbeda (asalkan masih berbasis elemen karbon) tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kristalinitas elektroda karbon yang dihasilkan. Elektroda hasil campuran arang dengan agen pengikat fruktosa yang dipreparasi pada suhu 1000°C dengan rasio berat 1:1 (b/b) memiliki karakter konduktor listrik lebih baik saat digunakan sebagai elektroda penghubung rangkaian elektronik. Dengan demikian, hasil elektroda karbon berasal dari arang dalam penelitian ini berpotensi untuk digunakan sebagai elektroda karena bersifat konduktor listrik meski tidak melalui proses grafitisasi pada suhu yang sangat tinggi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Indonesia atas dukungan Hibah Penelitian 339/UN27.11/PL/2015 dan 353/UN27.21/PN/2016.

DAFTAR PUSTAKA

- Austin, A. E. and Hedden, W. A., 1954. Graphitization Processes in Cokes and Carbon Blacks. *Industrial & Engineering Chemistry* 46 (7), 1520-1524.
- Bourke, J., Manley-Harris, M., Fushimi, C., Dowaki, K., Nunoura, T., and Antal, M. J., 2007. Do All Carbonized Charcoals Have the Same Chemical Structure 2. A Model of the Chemical Structure of Carbonized Charcoal. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46 (18), 5954-5967.
- Coutinho, A. R., Rocham J. D., and Luengo, C. A., 2000. Preparing and characterizing biocarbon electrodes. *Fuel Processing Technology* 67 (2), 93-102.

- Das, B., Dadhich, P., Pal, P., Srivas, P. K., Bankoti, K., and Dhara, S., 2014. Carbon nanodots from date molasses: new nanolights for the in vitro scavenging of reactive oxygen species. *Journal of Materials Chemistry B* 2 (39), 6839-6847.
- Gang-Wei, S., Can, W., Liang, Z., Wen-Ming, Q., Xiao-Yi, L., and Li-Cheng, L., 2008. Influence of high temperature treatment of activated carbon on performance of supercapacitors. *Journal of Materials Science & Engineering* 2 (12), 8.
- Hishiyama, Y., Inagaki, M., Kimura, S. and Yamada, S., 1974. Graphitization of carbon fibre/ glassy carbon composites. *Carbon* 12 (3), 249-258.
- Jain, A. and Tripathi, S. K., 2014. Fabrication and characterization of energy storing supercapacitor devices using coconut shell based activated charcoal electrode. *Materials Science and Engineering: B* 183, 54-60.
- Marsh, H. and Warburton, A. P., 1970. Catalysis of graphitisation. *Journal of Applied Chemistry* 20 (4), 133-142.
- Michael J. Antal, J., 2008. Carbonized charcoal electrode. *US Patent 7405020 B2*. US, University of Hawaii, Honolulu, HI
- Okada, J., Sekiguchi, A., and Ishii, T., 1961. *Effect of Rapid Heat Treatment on The Properties of Carbon*. The Fifth Conference on Carbon, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, Pergamon Press.
- Pierson, H. O., 1994. *Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes (Processing, Properties and Applications)*. Park Ridge, New Jersey, USA, Elsevier Inc.
- Tanahashi, I., Yoshida, A., and Nishino, A., 1991. The effect of heat-treatment on the properties of activated carbon fibre cloth polarizable electrodes. *Journal of Applied Electrochemistry* 21 (1), 28-31.
- Wen, G., Sui, S. H., Song, L., Wang, X. Y., and Xia, L., 2010. Formation of ZrC ablation protective coatings on carbon material by tungsten inert gas cladding technique. *Corrosion Science* 52 (9), 3018-3022.
- Yan, H., Zhao, T., Li, X., and Hun, C., 2015. Detonation Synthesis and Friction-Wear Test of Carbon-Encapsulated Copper Nanoparticles. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 25 (6), 1569-1575.