

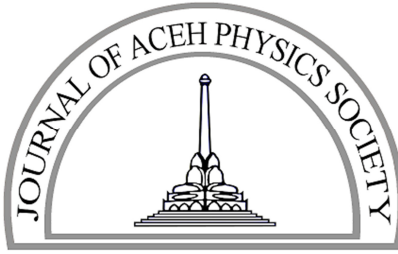
ISSN online : 2355-8229

JOURNAL OF ACEH PHYSICS SOCIETY

PHYSICS SOCIETY
JOURNAL OF ACEH

VOLUME 9 NUMBER 1
January, 2020

Journal Published by Aceh Physics Society
<http://jurnal.unsyiah.ac.id/JAcPS>



Journal of Aceh Physics Society

Chief Editor

Syahrur Nur

Managing Editor

Elin Yusibani

Associated Editors and Reviewers

Mitra Djamal	Nasrullah Idris
M. Danang Birowosuto	Rinda Hedwig
Nurhasan	Topan Setiadipura
Zulkarnain A Djalil	Abdul Halim
Edi Suharyadi	Adi Rahwanto

Index mainly by:



Volume 9, Number 1
January, 2020

List of Content

The Production and Characterization of Activated Carbon Electrodes from Pineapple Leaf Fibers for Supercapacitor Application <i>Agustino, Awitdrus, Rakhmawati Farma, Erman Taer</i>	1 - 8
Use of SiO₂ Rice Husk Ash and Ni in Materials Solid Hydrogen Storage Based on MgH₂ <i>Taufik, Zulkarnain, Mursal</i>	9 - 12
Effect of KOH Activator on the Performance of Activated Carbon from Oil Palm Kernel Shell as Supercapacitor Electrode Material <i>Yola Azli Perdana, Rahma Joni, Emriadi, Hermansyah Aziz</i>	13 -19
Study of Water Chemical Compounds at Geothermal Area: Case on Geothermal Weh Island, Jaboi <i>Evi Yufita, Muhammad Isa, Aztarina Ermy Vijaya</i>	20 - 25
Effect of Stripline Number on Resonant Frequency of Hexagonal Split Ring Resonator Metamaterial <i>Romi Fadli Syahputra, Yan Soerbakti, Riad Syech, Erman Taer, Saktioto</i>	26 - 30

Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda Karbon Aktif dari Serat Daun Nanas untuk Aplikasi Superkapasitor

The Production and Characterization of Activated Carbon Electrodes from Pineapple Leaf Fibers for Supercapacitor Application

Agustino, Awitdrus, Rakhmawati Farma dan Erman Taer*

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau

Received October, 2019, Accepted January, 2020

DOI: 10.24815/jacps.v9i1.14895

Elektroda karbon aktif berbasis serat daun nanas (SDN) telah berhasil diproduksi dengan proses tiga langkah berikut ini, yaitu: (i) aktivasi kimia, (ii) karbonisasi, dan (iii) aktivasi fisika. Aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan agen pengaktif KOH dengan konsentrasi 0,3 M. Karbonisasi dilakukan dalam lingkungan gas N_2 pada temperatur $600^\circ C$ dan diikuti oleh aktivasi fisika pada temperatur $850^\circ C$ menggunakan gas CO_2 selama 2,5 jam. Luas permukaan spesifik elektroda $512,211 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ dengan volume total pori sebesar $0,093 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, dan jari-jari pori rata-rata 1,199 nm. Morfologi permukaan elektroda karbon aktif menunjukkan adanya serat karbon dengan diameter serat dalam kisaran 101 - 185 nm dan memiliki kandungan karbon dengan massa atomik sebesar 84,33%. Elektroda karbon aktif memiliki struktur amorf, yang ditunjukkan oleh dua puncak difraksi yang lebar pada sudut hamburan $24,64$ dan $43,77^\circ$ yang bersesuaian dengan bidang (002) dan (100). Kapasitansi spesifik, energi spesifik dan daya spesifik sel superkapasitor yang dihasilkan masing-masing sebesar $110 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, $15,28 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ dan $36,69 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Pineapple leaf fiber (PALF) based activated carbon electrode has been successfully produced using three-step process, i.e. (i) chemical activation, (ii) carbonization, and (iii) physical activation. The chemical activation was carried out using KOH activating agent with a concentration of 0.3 M. The carbonization process is conducted out in N_2 gas environment at $600^\circ C$ and followed by physical activation at a temperature of $850^\circ C$ by using CO_2 gas for 2.5 h. The specific surface area of the electrode is $512.211 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ with a total pore volume of $0.093 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, and average pore radius of 1.199 nm. The surface morphology of the electrode shown the carbon fibers with diameter in the range of 101 - 185 nm and carbon content with 84.33% of atomic mass. The activated carbon electrode has an amorphous structure, which is shown by two wide diffraction peaks at scattering angles of 24.64 and 43.77° which correspond to the plane (002) and (100), respectively. The specific capacitance, energy and power of the electrode are $110 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, $15.28 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $36.69 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively.

Keywords: Serat daun nanas, Kalium hidroksida, Elektroda karbon aktif, Kapasitansi spesifik, Superkapasitor

Pendahuluan

Saat ini bahan bakar fosil sebagai energi tak terbarukan tidak hanya menghadapi krisis penipisan yang mendesak secara bertahap, akan tetapi menimbulkan masalah polusi yang serius (Yang *et al*, 2018). Oleh karena itu, para peneliti berusaha untuk mengembangkan energi yang bersih dan berkelanjutan sebagai pengganti bahan bakar fosil.

Fokus utama penelitian saat ini adalah tentang bagaimana cara menyimpan dan memanfaatkan energi secara efisien serta ramah lingkungan. Salah satu produk inovasi teknologi penyimpanan energi yang mampu menyimpan energi dalam jumlah yang besar, memiliki waktu hidup yang lebih lama dan ramah lingkungan adalah superkapasitor. Ada dua jenis bahan utama yang biasa digunakan sebagai

elektroda superkapasitor yaitu karbon dan oksida logam (Dai *et al*, 2018). Harga yang mahal serta konduktivitas listrik yang rendah dari oksida logam menjadikan karbon lebih banyak diminati para peneliti sebagai elektroda superkapasitor. Bahan karbon memiliki banyak keuntungan dan keunggulan seperti ringan, luas permukaan spesifik yang tinggi, konduktivitas listrik yang tinggi serta biaya produksi yang relatif murah (Niu *et al*, 2013; Qie *et al*, 2013; Meng *et al*, 2013; Sevilla and Fuertes, 2014).

Karbon aktif (Dai *et al*, 2017), Karbon *nanotube* (Hui *et al*, 2010; Wen *et al*, 2016), *graphene* (Luo *et al*, 2013; Raccichini *et al*, 2015), karbon *template* (Liang *et al*, 2015), karbon *aerogels* (Biener *et al*, 2011) dan karbon nanofiber (Xie and Feng, 2014) telah digunakan secara luas sebagai elektroda karbon superkapasitor. Karbon nanofiber dari selulosa, banyak dipelajari dan diterapkan pada piranti penyimpan energi dengan kinerja, luas permukaan yang tinggi, porositas yang tinggi, sifat mekanik yang sangat baik, fleksibilitas yang luar biasa (Yang and Li, 2015). Karbon nanofiber berbasis biomassa seperti mahkota nanas (Taslim *et al*, 2018a, Taer *et al*, 2019a), sabut kelapa (Taer *et al*, 2018a), batang pisang (Taer *et al*, 2018b), rumput purun tikus (Taer *et al*, 2018c) dan sabut buah pinang (Taer *et al*, 2019b) telah digunakan sebagai elektroda karbon superkapasitor dan menunjukkan potensi yang menjanjikan untuk diaplikasikan pada piranti superkapasitor.

Bahan asal yang digunakan pada penelitian ini adalah serat daun nanas. Pembuatan elektroda karbon dilakukan dengan menggunakan proses tiga langkah yaitu aktivasi kimia, karbonisasi dan aktivasi fisika. Aktivasi kimia dilakukan dengan agen aktivator Kalium Hidroksida (KOH) dengan konsentrasi 0,3 M. Penggunaan KOH sebagai agen pengaktif menghasilkan karbon dengan mikropori dalam jumlah yang besar, sehingga diperoleh karbon berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi (Dai *et al*, 2018). Proses karbonisasi dilakukan pada temperatur 600°C dalam lingkungan gas N₂ dan diikuti proses aktivasi fisika pada temperatur 850°C selama 2,5 jam menggunakan tanur dalam lingkungan gas CO₂. Proses karbonisasi dan aktivasi fisika dilakukan menggunakan sistem terintegrasi.

Metodologi

Serat daun nanas (SDN) diambil dari limbah daun nanas Bogor (*Ananas comosus* (L.) Merr.).

Limbah daun nanas diperoleh dari Kabupaten Kepulauan Meranti, Provinsi Riau dalam kurun waktu 2 minggu. Limbah daun nanas dikumpulkan kemudian dicuci untuk menghilangkan kotoran yang dilanjutkan dengan pemotongan daun nanas dengan ukuran ± 40 cm. Serat daun nanas diambil dengan cara menarik serat secara mekanik dan dilanjutkan dengan pengeringan. Serat daun nanas yang telah dikeringkan kemudian diprakarbonisasi menggunakan oven pada suhu 250°C selama 2,5 jam (Taer *et al*, 2018d; Taer *et al*, 2018e). Serbuk prakarbonisasi kemudian diaktivasi secara kimia menggunakan agen pengaktif KOH dengan konsentrasi 0,3 M dan dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 110°C selama 48 jam. Pencetakan pellet dengan tekanan 8 ton seperti yang telah dilaporkan sebelumnya (Taer *et al*, 2010; Taer *et al*, 2018e) dan dilanjutkan dengan proses karbonisasi-aktivasi fisika. Proses karbonisasi dilakukan menggunakan tanur pada temperatur 600°C dalam lingkungan gas N₂ dan diikuti dengan proses aktivasi fisika menggunakan gas CO₂ pada temperatur 850°C selama 2,5 jam (Taslim *et al*, 2018b). Setelah proses karbonisasi-aktivasi fisika, sampel dicuci menggunakan air suling hingga pH air cucian menjadi netral dan dikeringkan dalam oven pada temperatur 110°C selama 24 jam. Berdasarkan konsentrasi KOH yang digunakan pada penelitian ini yaitu 0,3 M, maka sampel diberi kode SDN-KA0,3.

Karakterisasi sifat fisis elektroda SDN-KA0,3 meliputi: (i) susut massa, diameter, tebal dan densitas, (ii) isothermal adsorpsi-desorpsi gas N₂, (iii) morfologi permukaan dan kandungan unsur, dan (iv) sifat kristalinitas elektroda. Struktur pori elektroda dipelajari menggunakan alat *Quantachrome TouchWin v1.2* pada temperatur 77 K. Luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori dihitung menggunakan metode *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) dan *Barrett-Joyner-Halenda* (BJH). Hasil yang diperoleh dari pengukuran ini yaitu (i) kurva hubungan antara volume adsorpsi pada STP ($T = 77$ K dan $P = 1$ atm) terhadap tekanan relatif (atm) dan (ii) perubahan volume terhadap jari-jari pori ($dV(r)$) terhadap jari-jari pori. Morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 dikarakterisasi menggunakan mikroskop pemindaian elektron dan kandungan unsur dikarakterisasi menggunakan energi dispersive sinar-X dengan menggunakan alat *JEOL-JSM 6510LA*. Sifat kristal elektroda SDN-KA0,3 dikarakterisasi dengan menggunakan difraksi

sinar-X dengan sumber CuK α dengan $\lambda = 0,154$ nm (XRD Shimadzu 7000).

Sifat elektrokimia elektroda dilakukan dengan menggunakan metode *Cyclic voltammetry* (CV). Pengukuran menggunakan metode CV dilakukan pada tegangan 0 - 1 V dengan laju pemindaian 1, 2, 5 dan 10 mV·s⁻¹. Kapasitansi spesifik, energi spesifik, dan daya spesifik elektroda berdasarkan metode CV dihitung dengan menggunakan persamaan (1), (2) dan (3).

$$C_s = \frac{2I}{Sm} \quad (1)$$

Dimana C_s adalah kapasitansi spesifik (F g⁻¹), I adalah arus, S adalah laju pemindaian (mV s⁻¹) dan m adalah massa elektroda (g). Energi spesifik dan daya spesifik elektroda berdasarkan metode CV dihitung dengan menggunakan persamaan (2) dan (3).

$$E_s = \frac{1}{2} C_s V^2 \quad (2)$$

$$P_s = \frac{E_s}{\Delta t} \quad (3)$$

Dimana E_s adalah energi spesifik (Wh·kg⁻¹), C_s adalah kapasitansi spesifik (F·g⁻¹), V adalah tegangan (V), P_s adalah daya spesifik (W·kg⁻¹), dan Δt adalah waktu pengosongan (s).

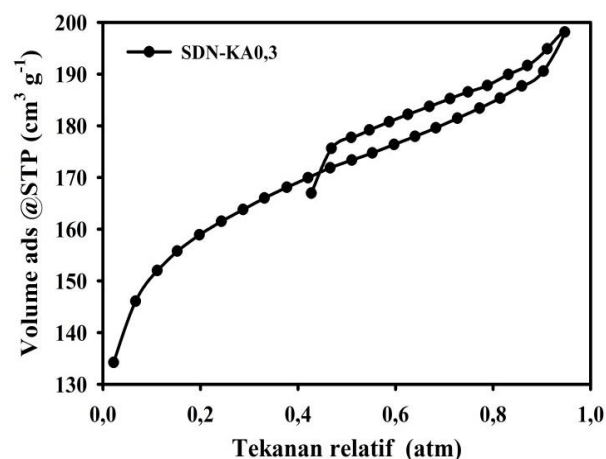
Hasil Penelitian

Hasil dari penelitian ini berupa karakterisasi sifat fisis elektroda SDN-KA0,3 seperti: (i) susut massa, diameter, tebal dan densitas, (ii) isothermal adsorpsi-desorpsi gas N₂, (iii) morfologi permukaan dan kandungan unsur, (iv) sifat kristalinitas elektroda dan hasil pengujian sifat elektrokimia menggunakan metode *Cyclic Voltammetry*. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran susut massa, diameter, ketebalan, dan densitas elektroda sebelum dan setelah proses karbonisasi-aktivasi.

Tabel 1. Parameter fisis elektroda SDN-KA0,3 sebelum dan setelah karbonisasi-aktivasi

Parameter fisis	Karbonisasi-aktivasi SDN-KA0,3	
	Sebelum	Setelah
Massa (g)	0,61	0,20
Diameter (cm)	1,94	1,42
Tebal (cm)	0,19	0,16
Densitas (g cm ⁻³)	1,11	0,80

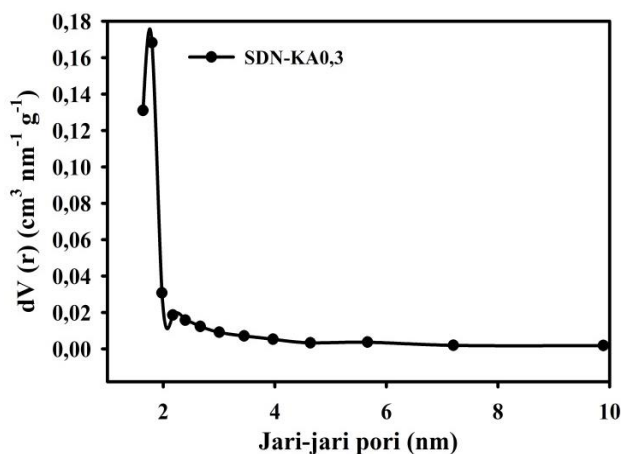
Berdasarkan data pada tabel terlihat bahwa massa, diameter, ketebalan, dan densitas elektroda SDN-KA0,3 setelah proses karbonisasi-aktivasi fisika mengalami penurunan. Persentase penurunan parameter fisis elektroda SDN-KA0,3 berturut-turut adalah 67,2% untuk susut massa, 26,8 % untuk susut diameter, 15,8 % untuk susut tebal, dan 28,2 % untuk susut densitas. Hasil yang sama juga diperoleh oleh Zulkifil et al (2018), dimana parameter sifat fisis sebelum dan setelah proses karbonisasi aktivasi mengalami penurunan. Penurunan parameter sifat fisis ini karena terjadinya pelepasan bahan-bahan non-karbon selama proses karbonisasi-aktivasi fisika berlangsung (Taslim et al, 2018; Farma et al, 2013). Gambar 1 menunjukkan kurva isothermal adsorpsi-desorpsi gas N₂ elektroda SDN-KA0,3 pada 77 K. Kurva tersebut menunjukkan hubungan antara volume adsorpsi pada STP (cm³·g⁻¹) terhadap tekanan relatif (atm). Berdasarkan klasifikasi IUPAC, kurva tersebut menunjukkan isotherm tipe IV, penegasan tipe IV ini ditunjukkan oleh munculnya *loop hysteresis* pada tekanan relatif (P/P₀) 0,43 - 0,99, yang bersesuaian dengan kondensasi kapiler di mesopori untuk bahan karbon (Biswal et al, 2013; Liu et al, 2005; Zhao et al, 2015). Peningkatan adsorpsi yang terjadi pada tekanan yang relatif rendah (P/P₀ <0,2) menunjukkan adanya mikropori pada sampel.



Gambar 1. Isothermal adsorpsi-desorpsi gas N₂ pada 77 K

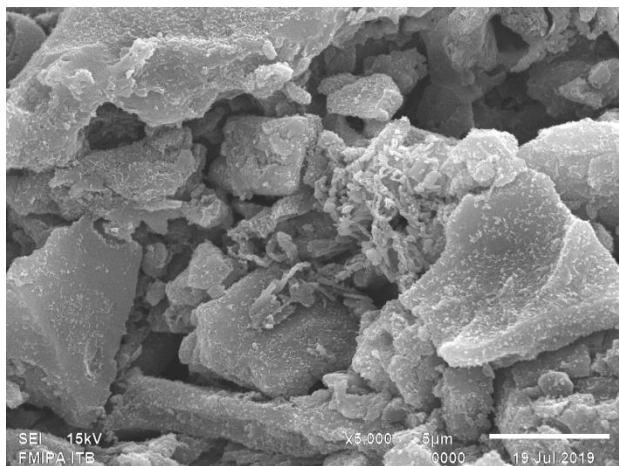
Gambar 2 menunjukkan kurva hubungan antara $dV(r)$ (cm³·nm⁻¹·g⁻¹) terhadap jari-jari pori (nm) berdasarkan metode BJH. Ukuran pori pada sampel didominasi oleh mesopori dan beberapa makropori. Berdasarkan data isothermal adsorpsi-desorpsi gas N₂ pada Gambar 1 dan distribusi ukuran pori BJH pada Gambar 2, elektroda SDN-KA0,3 memiliki luas permukaan spesifik (S_{BET})

sebesar $512,211 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ dengan total volume pori sebesar $0,093 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ dan diameter pori rata-rata sebesar $1,199 \text{ nm}$.



Gambar 2. Distribusi ukuran pori BJH elektroda SDN-KA0,3

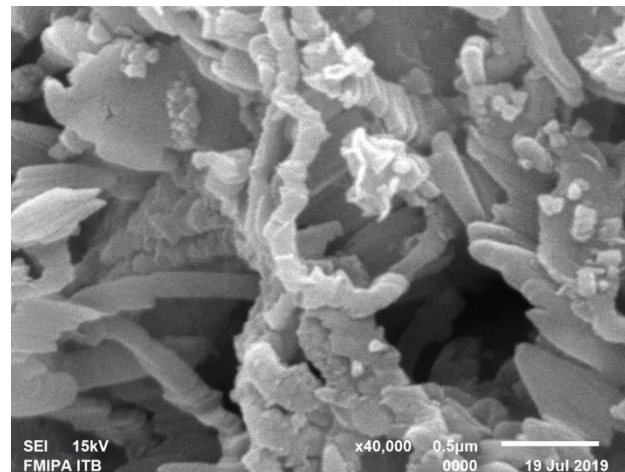
Gambar 3 menunjukkan morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 pada perbesaran 5.000x. Morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 pada perbesaran 5.000x didominasi oleh partikel karbon dan terlihat adanya partikel-partikel kecil yang menempel pada partikel yang besar, selain itu terlihat juga adanya serat yang muncul pada permukaan elektroda, namun serat ini cenderung menggumpal.



Gambar 3. Morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 pada perbesaran 5.000x

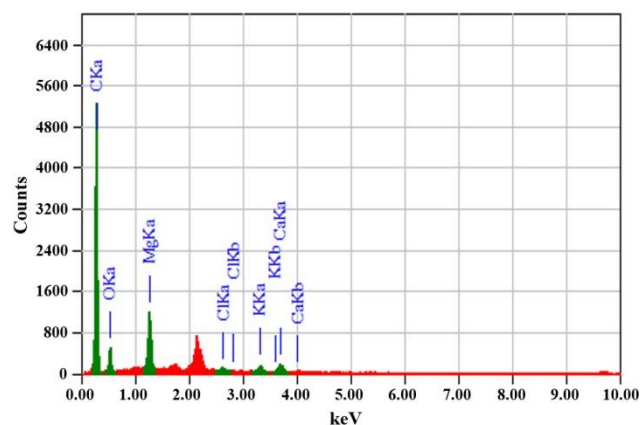
Morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 pada perbesaran 40.000x ditunjukkan pada Gambar 4. Morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 pada perbesaran 40.000x terlihat adanya serat nano dengan struktur yang menggumpal dan dengan diameter yang relatif besar. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 memiliki diameter fiber dalam kisaran $101 -$

185 nm . Diameter serat ini relatif lebih besar dibandingkan bahan lain seperti mahkota nanas dengan diameter serat sebesar $68 - 92 \text{ nm}$ (Taer *et al*, 2019a) dan rumput purun tikus (Taer *et al*, 2018c) dengan diameter serat sebesar $42 - 73 \text{ nm}$.



Gambar 4. Morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 pada perbesaran 40.000x

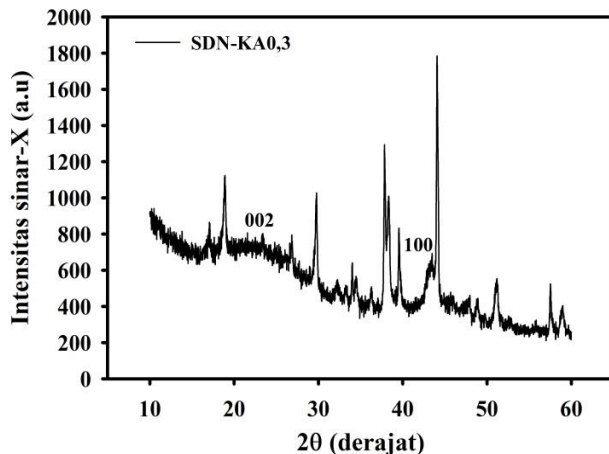
Gambar 5 menunjukkan spektrum hasil karakterisasi menggunakan energi dispersif sinar-X untuk elektroda SDN-KA0,3. Kandungan unsur elektroda SDN-KA0,3 terdiri dari Karbon (C), Oksigen (O), Magnesium (Mg), Klorin (Cl), Kalium (K) dan Kalsium (Ca). Elektroda SDN-KA0,3 didominasi oleh unsur Karbon dengan persentase atomik sebesar $84,33\%$ dan Oksigen $12,04\%$.



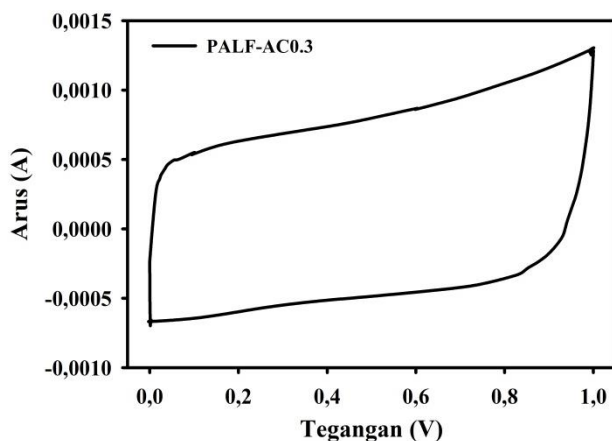
Gambar 5. Spektrum energi dispersif sinar-X dari elektroda SDN-KA0,3

Pola difraksi sinar-X elektroda SDN-KA0,3 ditunjukkan pada Gambar 6. Kurva difraksi sinar-X menunjukkan hubungan antara intensitas sinar-X (a.u) terhadap sudut hamburan 2θ (derajat). Pola difraksi sinar-X untuk elektroda SDN-KA0,3 menunjukkan bahwa adanya dua puncak yang lebar

dan landai pada sudut hamburan $24,64^\circ$ yang bersesuaian dengan bidang 002 dan $43,77^\circ$ yang bersesuaian dengan bidang 100. Puncak pada sudut hamburan $24,64^\circ$ mengidentifikasi bahwa elektroda SDN-KA0,3 memiliki struktur amorf, sedangkan puncak pada sudut $43,77^\circ$ mengindikasikan bahwa elektroda SDN-KA0,3 bersifat grafitik (Shu *et al*, 2020).



Gambar 6. Pola difraksi sinar-X elektroda SDN-KA0,3

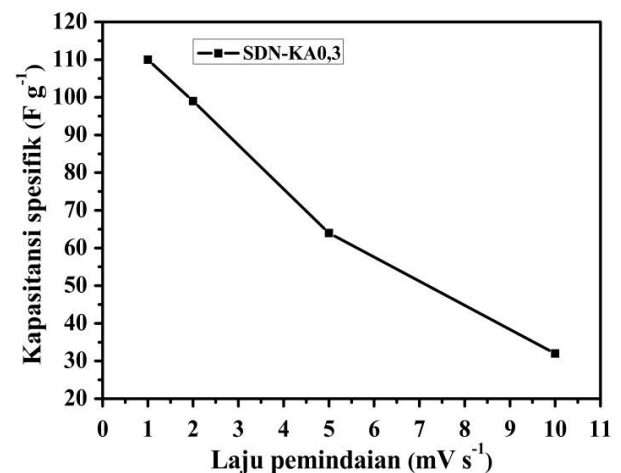


Gambar 7. Kurva *Cyclic voltammetry* elektroda SDN-KA0,3 pada laju pemindaian $1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$

Hasil pengukuran sifat elektrokimia elektroda SDN-KA0,3 menggunakan metode *Cyclic voltammetry* (CV) ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar menunjukkan hubungan antara arus (A) dengan potensial (V) yang memiliki bentuk menyerupai persegi panjang. Bentuk kurva CV ini merupakan bentuk ideal untuk elektroda superkapasitor dari bahan karbon (Gonzalez *et al*, 2016). Kapasitansi spesifik elektroda SDN-KA0,3 pada laju pemindaian $1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ sebesar $110 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$.

Gambar 8 menunjukkan kapasitansi spesifik elektroda SDN-KA0,3 berdasarkan variasi laju pemindaian. Kapasitansi spesifik (C_s) elektroda

SDN-KA0,3 berdasarkan variasi laju pemindaian berturut-turut adalah 110, 99, 64, dan $32 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$. Elektroda karbon dari serat daun nanas ini memiliki kapasitansi spesifik yang relatif lebih kecil dibandingkan bahan lain seperti batang pisang (Taer *et al*, 2018b) dan mahkota nanas (Taer *et al*, 2019a). dengan kapasitansi spesifik masing-masing sebesar 170 dan $150 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$. Kapasitansi spesifik elektroda SDN-KA0,3 mengalami penurunan seiring dengan peningkatan laju pemindaian, hal ini dikarenakan semakin tinggi laju pemindaian maka waktu ion untuk berdifusi sempurna ke dalam pori elektroda akan semakin sedikit waktu ion untuk dapat berdifusi sempurna ke dalam pori elektroda karbon. Sebaliknya semakin rendah laju pemindaian, maka ion memiliki banyak waktu untuk dapat berdifusi ke dalam pori elektroda (Awitdrus *et al*, 2016).



Gambar 8. Hubungan antara kapasitansi spesifik terhadap variasi laju pemindaian

Energi spesifik (E_s) dan daya spesifik (P_s) elektroda SDN-KA0,3 yang diperoleh berdasarkan persamaan (2) dan (3) masing-masing sebesar 15,28 dan $36,69 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, hasil ini sesuai dengan rentang energi spesifik dan daya spesifik untuk superkapasitor (Simon and Gogotsi, 2008). Sifat elektrokimia elektroda SDN-KA0,3 menunjukkan potensi yang baik untuk digunakan sebagai elektroda karbon pada piranti superkapasitor.

Kesimpulan

Pembuatan dan karakterisasi elektroda karbon superkapasitor dari serat daun nanas telah berhasil dilakukan. Parameter fisis seperti massa, diameter, tebal dan densitas elektroda SDN-KA0,3 mengalami penurunan setelah proses karbonisasi-aktivasi fisika. luas permukaan spesifik elektroda

SDN-KA0,3 yang diperoleh sebesar $512,211 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ dengan total volume pori sebesar $0.093 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Diameter fiber pada morfologi permukaan elektroda SDN-KA0,3 berada dalam kisaran 101 - 185 nm dan memiliki kandungan karbon dengan massa atomik sebesar 84,33%. Elektroda SDN-KA0,3 yang dihasilkan memiliki struktur amorf, yang ditunjukkan oleh adanya dua puncak difraksi yang lebar dan landai yang bersesuaian dengan bidang hkl 002 dan 100. Kapasitansi spesifik elektroda SDN-KA0,3 yang dihasilkan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan laju pemindaian. Kapasitansi, energi dan daya spesifik optimum elektroda SDN-KA0,3 berturut-turut sebesar 110, 15,28 dan $36,69 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ pada laju pemindaian $1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DRPM Kemenristek-Dikti melalui Projek Penelitian Dasar tahun pertama dengan judul “Mikro- dan nano karbon fiber dengan kerapatan tinggi berbasis bahan alam sebagai elektroda karbon superkapasitor” dengan nomor kontrak: 729/UN.19.5.1.3/PT.01.03/2019. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium SEM FMIPA Institut Teknologi Bandung untuk memperoleh data SEM dan EDS.

Referensi

- Awitdrus., Deraman, M., Talib, I.A., Farma, Rakhmawati., Nor, N.S.M., Ishak, M.M., Dolah, B.N.M. 2016. Cyclic Voltammetry of Binderless Activated Carbon Monoliths based supercapacitor from Mixtures of Pre-carbonized of Fibers of Empty Fruit Bunches and Green Petroleum Coke. *Knowledge Engineering*. Vol. 2016: 1-8.
- Biener, J., Stadermann, M., Suss, M., Worsley, M. A., Biener, M. M., Rose, K. A., and Baumann, T.F. 2011. Advanced Carbon Aerogels for Energy Applications. *Energy and Environmental Science*. Vol. 4: 656–667
- Biswal, M., Banerjee, A., Deo, M. and Ogale, S. 2013. From Dead Leaves to High Energy Density Supercapacitors. *Energy Environmental Science*, Vol. 6: 1249-1260
- Dai, C.C., Wan, J.F., Geng, W.D., Song, S.J., Ma, F.W., and Shao, J.Q. 2017. KOH Direct Treatment of Kombucha and in Situ Activation to Prepare Hierarchical Porous Carbon for High-Performance Supercapacitor Electrodes. *Journal of Solid State Electrochemistry*. Vol. 21: 2929-2938.
- Dai, C., Wan, J., Juan, Y., Qu, S., Jin, T., Ma, F., and Shao, J. 2018. H_3PO_4 Solution Hydrothermal Carbonization Combined with KOH Activation to Prepare Argy Wormwood-Based Porous Carbon for High-Performance Supercapacitors. *Applied Surface Science*. Vol. 444: 105-117
- Farma, R., Deraman, M., Awitdrus., Talib, I.A., Omar, R., Manjunatha, J.G., Ishak, M.M., Basri, N.H., and Dolah, B.N.M. 2013. Physical and Electrochemical Properties of Supercapacitor Electrodes Derived from Carbon Nanotube and Biomass Carbon. *International Journal Electrochemical Science*. Vol. 8: 257-273
- González, A., Goikolea, E., Barrena, J.A., and Mysyk, R. 2016. Review on Supercapacitors: Technologies and Materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 58: 1189–1206
- Hui, P., Li, J., and Feng, Y.P. 2010. Carbon Nanotubes for Supercapacitor, *Nanoscale Research Letter*. Vol. 5: 654-668
- Liang, Y., Cai, L., Chen, L., Lin, X., Fu, R., Zhang, M., and Wu, D. 2015. Silica Nanonetwork Confined in Nitrogen-Doped Ordered Mesoporous Carbon Framework for High-Performance Lithium-Ion Battery Anodes. *Nanoscale*. Vol. 7: 3971–3975
- Liu, H.Y., Wang, K.P. and Teng, H. 2005. A Simplified Preparation of Mesoporous Carbon and The Examination of The Carbon Accessibility for Electric Double Layer Formation. *Carbon*. Vol. 43: 55-566
- Luo, J., Jang, H. D., and Huang, J. 2013. Effect of Sheet Morphology on The Scalability of Graphene-Based Ultracapacitors. *ACS Nano*. Vol. 7: 1464–1471
- Mao N., Wang H., Sui Y., Cui Y., Pokrzywinski J., Shi J., Liu W., Chen S., Wang X., Mitlin D. 2017. Extremely High-Rate Aqueous Supercapacitor Fabricated Using Doped Carbon Nanoflakes with Large Surface Area and Mesopores at Near-Commercial Mass Loading. *Nano Research*. Vol. 10: 1767–1783
- Meng, Y., Wang, K., Zhang, Y., and Wei, Z. 2013. Hierarchical Porous Graphene/Polyaniline Composite Film with Superior Rate

- Performance for Flexible Supercapacitors. *Advanced Materials*. Vol. 25: 6985-6990
- Niu, Z., Dong, H., Zhu, B., Li, J., Hng, H.H., and Zhou, W. 2013. Highly Stretchable, Integrated Supercapacitors Based on Single-Walled Carbon Nanotube Films with Continuous Reticulate Architecture. *Advanced Materials*. Vol. 25: 1058-1064
- Qie, L., Chen, W.M., Xu, H.H., Xiong, X.Q., Jiang, Y. 2013. Synthesis of Functionalized 3D Hierarchical Porous Carbon for High-Performance Supercapacitors. *Energy and Environmental Science*. Vol. 6: 2497-2504
- Raccichini, R., Varzi, A., Passerini, S., and Scrosati, B. 2015. The Role of Graphene for Electrochemical Energy Storage. *Nature Materials*. Vol. 14: 271-279
- Sevilla, M., and Fuertes, A.B. 2014. Direct Synthesis of Highly Porous Interconnected Carbon Nanosheets and Their Application as High-Performance Supercapacitors. *ACS Nano*. Vol. 8: 5069-5078
- Shu, Y., Bai, Q., Fu, G., Xiong, Q., Li, C., Shen, Y., Uyama, H., and Ding, H. 2020. Hierarchical Porous Carbons from Polysaccharides Carboxymethyl Cellulose, Bacterial Cellulose, and Citric Acid for Supercapacitor. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 227: 115346
- Simon, P., and Gogotsi, Y. 2008. Material for Electrochemical Capacitors. *Nature Materials*. Vol. 7: 845-854
- Taer, E., Deraman, M., Talib, I.A., Umar, A.A., Oyama, M., and Yunus, R.M. 2010. Physical, Electrochemical and Supercapacitive Properties of Activated Carbon Pellets from Pre-Carbonized Rubber Wood Sawdust by CO₂ Activation. *Current Applied Physics*. Vol. 10: 1071-1075
- Taer, E., Taslim, R., Mustika, W.S., Kurniasih, B., Agustino, Afrianda, A., and Apriwandi. 2018b. Production of an Activated Carbon from A Banana Stem and its Application as Electrode Materials for Supercapacitors. *International Journal of Electrochemical Science*. Vol. 13: 8428-8439
- Taer, E., Zulkifli., Awitdrus., Taslim, R., Agustino, A., and Apriwandi. 2018c. Synthesis of Carbon Nanofibers from Cellulose Water Chestnut Biomass for Supercapacitor Applications. *Current Topics in Electrochemistry*. Vol. 20: 39-45
- Taer, E., Susanti, Y., Awitdrus., Sugianto., Taslim, R., Setiadi, R.N., Bahri, S., Agustino., Dewi, P., and Kurniasih, B. 2018d. The Effect of CO₂ Activation Temperature on the Physical and Electrochemical Properties of Activated Carbon Monolith from Banana Stem Waste. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1927: 030016-1 - 030016-5
- Taer, E., Dewi, P., Sugianto., Syech, R., Taslim, R., Salomo., Susanti, Y., Purnama, A., Apriwandi., Agustino., and Setiadi, R.N. 2018e. The Synthesis of Carbon Electrode Supercapacitor from Durian Shell Based on Variations in the Activation Time. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1927 030026-1 - 030026-6
- Taer, E., Apriwandi, A., Ningsih, Y.S., Taslim, R., and Agustino. 2019a. Preparation of Activated Carbon Electrode from Pineapple Crown Waste for Supercapacitor Application. *International Journal of Electrochemical Science*. Vol. 14: 2462-2475
- Taer, E., Handayani, R., Apriwandi., Taslim, R., Awitdrus., Amri, A., Agustino., and Iwantono, I. 2019b. The Synthesis of Bridging Carbon Particles with Carbon Nanotubes from *Areca catechu* Husk Waste as Supercapacitor Electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*. Vol. 14: 9436-9448
- Taslim, R., Dewi, T.R., Taer, E., Apriwandi, A., Agustino, A., and Setiadi, R.N. 2018a. Effect of Physical Activation Time on the Preparation of Carbon Electrodes from Pineapple Crown Waste for Supercapacitor Application. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1120: 012084-1 – 012084-7
- Taslim, R., Agustino, A., and Taer, E. 2018b. Natural carbon-metal Composite for Supercapacitor Application. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1120: 012008-1 – 012008-10
- Yang, C., and Li, D. 2015. Flexible and Foldable Supercapacitor Electrodes from the Porous 3D Network of Cellulose Nanofibers, Carbon Nanotubes and Polyaniline. *Materials Letters*. Vol. 155: 78-81.
- Wen, L., Li, F., and Cheng, H.-M. 2016. Review: Carbon Nanotubes and Graphene for Flexible Electrochemical Energy Storage: from Materials to Devices. *Advanced Materials*. Vol. 28: 4306-4337

- Xie, Y., and Feng, X. 2014. Electrochemical Flexible Supercapacitor Based on Manganese Dioxide-Titanium Nitride Nanotube Hybrid. *Electrochimica Acta*. Vol. 120: 273-283.
- Yang, Q.-Q., Gao, L.-F., Zhu, Z.-Y., Hu, C.-X., Huang, Z.-P., Liu, R.-T., Wang, Q., Gao, F., and Zhang, H.-L., 2018. Confinement Effect of Natural Hollow Fibers Enhances Flexible Supercapacitor Electrode Performance, *Electrochimica Acta*. Vol. 260: 204-211
- Zhao, Q., Wang, X. Y., Xia, H., Liu, J., Wang, H., Gao, J., Zhang, Y. W., Liu, J., Zhou, H. Y., Li, X. L., Zhang, S. Y. and Wang, X.Y. 2015. Design, Preparation and Performance of Novel Three-Dimensional Hierarchically Porous Carbon for Supercapacitors. *Electrochimica Acta*. Vol. 173: 566-574
- Zulkifli, Awitdrus, dan Taer, E. 2018. Studi Awal Pemanfaatan Purun Tikus sebagai Elektroda Superkapasitor Menggunakan Aktivasi Uap Air. *Journal of Aceh Physics Society*. Vol. 7, No. 1: 30-34

