

ANALISA SIFAT ELEKTROKIMIA ELEKTRODA SUPERKAPASITOR BERBASIS KARBON AKTIF DARI KULIT SINGKONG

Eva Wahyuni Harahap, Erman Taer*, Ari Sulisty Rini

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau

*E-mail korespondensi: erman.taer@lecture.unri.ac.id

ABSTRACT

Another problem from technological developments and advancements is the increase in population which causes increasingly complex waste management problems. One type of urban waste is waste caused by industrial waste such as waste from processing cassava or cassava. The use of cassava peel as a precursor of activated carbon with a high specific capacitance value has been proven. The resulting carbon powder is converted in the form of pellets or monoliths using a hydraulic press without the addition of adhesives. The carbonization process is carried out from room temperature to 600°C in an N₂ gas environment, while the physical activation process is carried out from 600°C to a high temperature of 850°C in a CO₂ gas environment. Density analysis was reviewed as an initial evaluation of porous carbon electrodes. Furthermore, the electrochemical properties of the supercapacitor were evaluated through three different techniques including cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge discharge (GCD) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques in a two-electrode system in 1 M H₂SO₄ electrolyte. The results of the research have obtained carbon electrodes from cassava peel waste through chemical and physical activation processes. After testing the electrochemical properties of the supercapacitor electrode, the specific capacitance value of the supercapacitor cell on the chemical activator ZnCl₂ with a concentration of 0.3 M and 0.7 M, respectively, was 196 F/g, 176.7 F/g in the CV method of 183.62 F/g, 147.64 F/g on the GCD method and 135 F/g, 126.6 F/g on the EIS method. These results confirm that the cassava peel has the potential to be used as a porous activated carbon for the base material for supercapacitor electrodes.

Keywords: Cyclic Voltammetry, Galvanostatic Charge Discharge, Electrochemical Impedance Spectroscopy, Carbon Precursor, Specific Capacitance.

ABSTRAK

Permasalahan lain dari perkembangan dan kemajuan teknologi adalah peningkatan populasi penduduk yang menyebabkan masalah penanggulangan limbah yang semakin kompleks. Salah satu jenis limbah perkotaan adalah limbah yang disebabkan oleh limbah industri seperti limbah hasil pengolahan ubi kayu atau singkong. Pemanfaatan kulit singkong sebagai prekursor karbon aktif dengan nilai kapasitansi spesifik yang tinggi telah dibuktikan. Serbuk karbon yang dihasilkan dikonversi dalam bentuk pellet atau monolit dengan menggunakan hidraulik press tanpa adanya penambahan bahan perekat. Proses karbonisasi dilakukan dari suhu kamar hingga 600°C pada lingkungan gas N₂ sedangkan proses aktivasi fisika dilakukan dari suhu 600°C hingga pada suhu tinggi 850°C pada lingkungan gas CO₂. Analisis densitas ditinjau sebagai evaluasi awal elektroda karbon berpori. Lebih lanjut, sifat elektrokimia superkapasitor dievaluasi melalui tiga teknik yang berbeda meliputi teknik cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge discharge (GCD) dan electrochemical impedance spectroscopy (EIS) pada sistem dua elektroda dalam elektrolit 1 M H₂SO₄. Hasil penelitian telah didapatkan elektroda karbon dari limbah kulit singkong melalui proses aktivasi kimia dan fisika. Setelah dilakukan pengujian sifat elektrokimia elektroda superkapasitor diperoleh nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor pada aktivator kimia ZnCl₂ dengan konsentrasi 0,3 M dan 0,7 M berturut-turut sebesar 196 F/g, 176,7 F/g pada metode CV, 183,62 F/g, dan 147,64 F/g pada metode GCD dan sebesar 135 F/g, 126,6 F/g pada metode EIS. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa kulit singkong berpotensi dijadikan sebagai karbon aktif berpori untuk material dasar elektroda superkapasitor.

Kata kunci: Cyclic Voltammetry, Galvanostatic Charge Discharge, Electrochemical Impedance Spectroscopy, Prekursor Karbon, Kapasitansi Spesifik.

Diterima 09-08-2022 | Disetujui 22-01-2023 | Dipublikasi 27-06-2023

PENDAHULUAN

Permasalahan lain dari perkembangan dan kemajuan teknologi adalah peningkatan populasi penduduk yang menyebabkan masalah penanggulangan limbah yang semakin kompleks. Salah satu jenis limbah perkotaan adalah limbah yang disebabkan oleh limbah industri seperti limbah hasil pengolahan ubi kayu atau singkong [1]. Ubi kayu atau singkong dikenal sebagai salah satu komoditas pertanian terpenting di Indonesia. Singkong digunakan sebagai bahan baku untuk produksi makanan serta kue tradisional. Daunnya dapat dimanfaatkan sebagai sayuran atau obat alami karena mengandung protein dan senyawa bioaktif lainnya dalam jumlah tinggi, dan kayunya sering digunakan sebagai kayu bakar untuk memasak. Pengolahan singkong menghasilkan limbah padat (kulit singkong) dalam jumlah besar, dan pembuangan limbah padat tersebut secara langsung menimbulkan masalah lingkungan [1].

Pemanfaatan kulit singkong sebagai prekursor karbon aktif dengan luas permukaan yang tinggi telah dibuktikan pada beberapa penelitian sebelumnya. Beberapa hasil penelitian tersebut telah didapatkan elektroda karbon dari limbah kulit singkong melalui proses aktivasi kimia dan fisika.

Namun beberapa penelitian tersebut tidak menunjukkan secara detail perbandingan analisis kinerja elektrokimia pada elektroda karbon untuk superkapasitor. Selain itu juga dilakukan dengan penambahan bahan perekat pada karbon aktif, sehingga potensi yang dihasilkan tidak murni berasal dari bahan biomassa tersebut.

Oleh karena itu berdasarkan pertimbangan pemikiran tersebut, proposal penelitian ini difokuskan pada identifikasi sifat elektrokimia berbasis elektroda karbon dari limbah kulit singkong yang bertujuan untuk mendapatkan informasi terbaru pada analisis kinerja elektrokimia dari superkapasitor. Dari analisis tersebut didapatkan nilai kapasitansi yang digunakan untuk menghitung kandungan energi listrik yang dapat disimpan dari sebuah sel

superkapasitor dari bahan asal limbah kulit singkong. Sifat kapasitif karbon aktif dari bahan limbah padat ini akan diuji menggunakan metode *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), *cyclic voltammetry* (CV), dan *galvanostatic charge discharge* (GCD). Selain itu, penelitian ini juga dilakukan atas pertimbangan ramah lingkungan, artinya kinerja yang dihasilkan dari pengujian adalah nilai murni atas kinerja bahan biomassa yang digunakan tanpa penambahan bahan sintetik seperti metal oksida, polimer konduktif, proses pencetakan, pemberian kerangka metal, atau PVDF. Pengujian sifat fisika elektroda karbon yang dihasilkan juga dilakukan pada pengujian densitas atau susut massa dari elektroda karbon.

TINJAUAN PUSTAKA

Superkapasitor

Superkapasitor, juga disebut kapasitor elektrokimia atau ultrakapasitor, telah menjadi daya tarik intensif sebagai perangkat penyimpanan energi, yang menjembatani kesenjangan antara kapasitor dielektrik konvensional dan baterai ion litium [2,3]. Karena kapasitas dayanya yang lebih tinggi, stabilitas siklus yang lebih lama dibandingkan dengan LIB (*lithium ion battery*), dan kepadatan energi yang lebih baik daripada kapasitor dielektrik. Superkapasitor dengan keamanan lebih tinggi dianggap sebagai alternatif untuk baterai yang membutuhkan aplikasi pengiriman daya tinggi [4,5].

Berdasarkan mekanisme penyimpanan atau konfigurasi sel, superkapasitor dapat dibedakan menjadi beberapa jenis seperti kapasitor, elektrokimia lapisan ganda listrik EDLC dan pseudo-kapasitor PC. EDLC didasarkan pada luas permukaan spesifik material nanopori sebagai bahan elektroda aktif, yang mengarah ke kapasitansi yang sangat besar dibandingkan dengan kapasitor elektrostatis. Elektroda biasanya terbuat dari bahan karbon nanopori dengan ketersediaannya relative melimpah, produksi industri yang ada, dan biaya yang relatif rendah [6].

Analisi Elektrokimia

Cyclic Voltammetry (CV)

Pengukuran menggunakan metode voltametri siklis dilakukan untuk memberikan informasi tentang sifat kapasitif sel elektrokimia seperti jendela potensial, kapasitansi dan batas waktu hidup (*cycle life*) [7]. Kapasitansi spesifik C_{sp} pada superkapasitor adalah refleksi dari muatan listrik Q disimpan pada perubahan tegangan V , dimana mengacu pada massa, luas permukaan atau volume bahan elektroda. Oleh karena itu, C_{sp} sering sesuai dengan kapasitansi gravimetri (Fg^{-1}), luas kapasitansi (Fcm^{-2}), dan kapasitansi volume (Fcm^{-3}). Selain itu, C_{sp} dapat digunakan untuk menilai kinerja perangkat, ketika dinormalisasi oleh berat atau volume seluruh perangkat [8]:

$$C_{sp} = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{\epsilon}} = \frac{I \Delta t}{\Delta V_{\epsilon}} \quad (1)$$

Galvanostatic Charge Discharge (GCD)

Lebih lanjut, sifat elektrokimia sampel karbon juga dievaluasi dengan metode GCD pada rapat arus yang konstan 2 A/g. Berdasarkan data GCD, kapasitansi spesifik (C_{sp}), dan resistansi (R) dari masing-masing elektroda superkapasitor dapat dihitung dengan persamaan standar [9]:

$$C_{sp} = \frac{I \Delta t}{m \Delta V} \quad (2)$$

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

I adalah rapat arus saat gcd (A/g), ΔV adalah tegangan saat pengosongan (V), Δt adalah waktu saat pengosongan (s), dan R adalah resistansi elektroda (Ω).

Profil GCD menunjukkan bentuk segitiga simetris yang tidak sempurna dengan karakteristik non-linier yang mengindikasikan adanya sifat kapasitor elektrokimia lapis ganda

listrik yang menjanjikan pada sampel dan diikuti oleh reaksi faradaic akibat distribusi unsur sampel yang mengandung heteroatom yang mengindikasikan adanya sifat pseudo-kapasitansi pada tiap sampel [10].

Elektrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

EIS merupakan parameter penting untuk menyelidiki konduktivitas listrik elektroda dengan Plot Nyquist, yang memberikan informasi tentang perilaku resistif elektroda [11]. Kurva Nyquist yang dihasilkan dari data EIS merepresentasikan 3 bagian frekuensi: bagian setengah lingkaran berhubungan dengan tahanan pemindahan muatan atau tahanan polarisasi, R_p . Perpotongan setengah lingkaran pada bagian kiri dari sumbu real adalah tahanan larutan, R_s . Diameter dari setengah lingkaran adalah menunjukkan polarisasi tahanan, R_p . Garis lurus dengan kemiringan 45 berkaitan dengan impedan Warburg yang dihasilkan oleh difusi ion elektrolit pada poros elektroda. Garis vertikal pada sumbu real disebabkan oleh sifat kapasitif murni. Kapasitan spesifik dapat dihitung dengan menggunakan impedan plot berdasarkan rumus [12]:

$$C_{sp} = \frac{-2}{2\pi f z'' m_{rata-rata}} \quad (4)$$

Biomassa Ubi Kayu

Singkong menghasilkan karbohidrat sekitar 40% lebih tinggi dari beras dan 25% lebih banyak dari jagung. Kulit singkong juga mengandung karbohidrat sebanyak 16,72% yang dapat membentuk asam asetat (CH_3COOH), selain asam asetat terdapat juga asam sianida (HCN). HCN merupakan salah satu elektrolit yang dapat menghasilkan arus listrik, sehingga sangat memungkinkan bahwa kulit singkong dapat menghasilkan arus listrik [13]. Hasil riset mengungkapkan bahwa rata-rata kulit singkong memiliki kadar air berkisar antara 9,93% – 11,46%, volatile berkisar antara 77,93% – 81,93%, kadar abu berkisar 1,93% –

4,36% menunjukkan rendahnya kandungan mineral pada kulit singkong [14]. Pemanfaatan limbah kulit singkong selama ini masih belum optimal, umumnya sebagai pakan ternak, pupuk organik, dan bahan makanan olahan. Kulit singkong mengandung 59,31% C; 9,78% H; 28,74% O; 2,06 % N; 0,11% S; 0,3% Ash; dan 11,4% H₂O [15].

METODE PENELITIAN

Preparasi Karbon Berpori dari Kulit Singkong

Limbah kulit singkong diperoleh dari ladang pertanian tradisional di provinsi Riau, yang kemudian dicuci, dipotong (4 cm × 5 cm) dan dikeringkan pada sinar matahari selama 2 hari. Selanjutnya dilakukan pra karbonisasi dalam oven pada suhu 250°C selama 2,5 jam, dilanjutkan dengan penggilingan dan penghalusan untuk menghasilkan serbuk prakarbonisasi yang homogen dengan ukuran partikel < 53 μm. Sampel ini kemudian diaktivasi secara kimia melalui ZnCl₂ dengan variasi konsentrasi 0,3 M dan 0,7 M. dengan menggunakan instrumen hotplate pada suhu 80°C dan kecepatan putar 300 rpm, dan setelahnya dikeringkan pada oven pengering suhu 110°C.



Gambar 1. Konversi serbuk menjadi monolit.

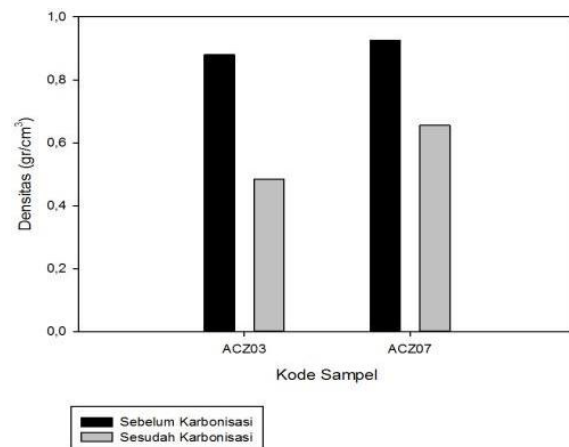
Lebih lanjut, serbuk karbon aktif dikonversi menjadi bentuk monolit dengan menggunakan hidrolik press pada beban yang setara ± 8 ton. Semua sampel dipirolysis terintegrasi satu tahap meliputi karbonisasi pada suhu 600°C di lingkungan gas N₂, dan aktivasi fisika pada lingkungan gas CO₂ selama 2,5 jam pada suhu 850°C. Tahap terakhir adalah preparasi sel superkapasitor dalam bentuk susunan koin yang terdiri dari dua elektroda karbon dari limbah

kulit singkong, elektrolit 1 M H₂SO₄, pengumpul arus berbahan stainless steel, dan separator dari membran kulit telur itik [16].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Densitas

Perubahan densitas monolit merupakan karakteristik yang penting sebagai analisa awal untuk mengevaluasi sifat fisis karbon aktif monolit yang dapat menunjang sifat elektrokimia yang baik. Perubahan densitas dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain aktivasi kimia, karbonisasi, dan aktivasi fisika [9]. Aktivator kimia yang digunakan diketahui bereaksi langsung dengan serbuk karbon, sedangkan aktivasi fisika berinteraksi dengan permukaan elektroda, yang selanjutnya menyebabkan penurunan densitas semua variasi sampel. Pada proses pirolisis yang mencakup karbonisasi maupun aktivasi fisika menyebabkan penguapan senyawa non- karbon, volatil, dan kandungan air dalam bahan baku dan otomatis mengurangi dimensi monolit termasuk massa, volume, dan densitas [17].



Gambar 2. Perubahan densitas monolit karbon.

Semua sampel menunjukkan penurunan densitas setelah proses pirolisis satu tahap dari karbonisasi dan aktivasi fisika. Penurunan densitas ini jelas disebabkan karena proses karbonisasi dan aktivasi fisika yang dilakukan pada suhu tinggi. Proses karbonisasi dari 30°C hingga 600°C mengurangi dan menguraikan air,

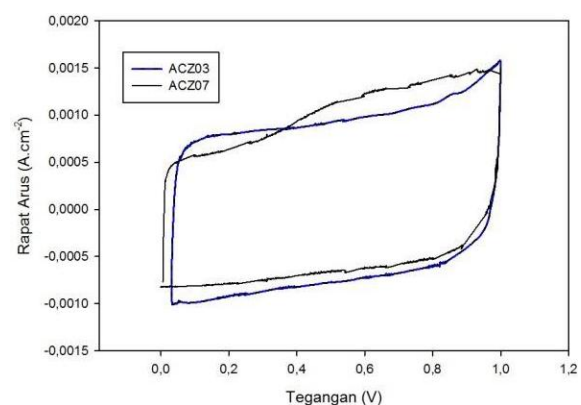
mineral, dan kelembapan, dan semua senyawa kompleks termasuk hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Proses ini mengubah bahan dasar menjadi karbon murni dan dapat meningkatkan kandungan karbon [18]. Akan tetapi, produk sampingan karbonisasi berupa tar padat menutupi pori-pori yang telah terbentuk sehingga perlu dilakukan aktivasi secara fisika pada suhu tinggi pada atmosfer gas CO_2 . Aktivasi fisika dari suhu 600°C ke suhu yang lebih tinggi dapat menghilangkan produk sampingan dari proses karbonisasi yang menutupi pori dan dapat mengekspansikan struktur pori ke arah yang relatif lebih baik [9]. Akibatnya, semua sampel karbon monolit mengalami penurunan densitas. Lebih lanjut, Gambar 2 menunjukkan sampel yang telah teraktivasi kimia dengan Zink Klorida secara dramatis menurunkan densitas rata-rata 27%. Hal ini mengkonfirmasi bahwa aktivasi kimia dengan senyawa zink klorida berpengaruh dalam memberikan sifat porositas pada sampel. Densitas sampel monolit setelah pirolisis masing-masing sebesar $0,655 \text{ g/cm}^3$, $0,484 \text{ g/cm}^3$ dengan penurunan yang signifikan sebesar 27%.

Analisis sifat elektrokimia

Analisis tentang sifat elektrokimia karbon aktif monolit yang dipersiapkan dari bahan asal limbah kulit singkong diperlukan untuk optimalisasi aplikasi elektrokimia superkapasitor. Sifat kapasitif meliputi kapasitansi spesifik, energy spesifik dan daya spesifik dari monolit yang dievaluasi menggunakan teknik cyclic voltammetry, teknik galvanostatic charge-discharge, dan teknik electrochemical impedance spectroscopy.

Gambar 3 menunjukkan kurva cyclic voltammetry (CV) dari sampel karbon aktif monolit berbahan asal kulit singkong yang diaktivasi kimia dan diaktivasi fisika pada dalam elektrolit $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Kurva CV jelas menunjukkan area loop persegiempat terdistorsi dan beberapa kurva menunjukkan adanya kenaikan arus yang sedikit melonjak. Ini

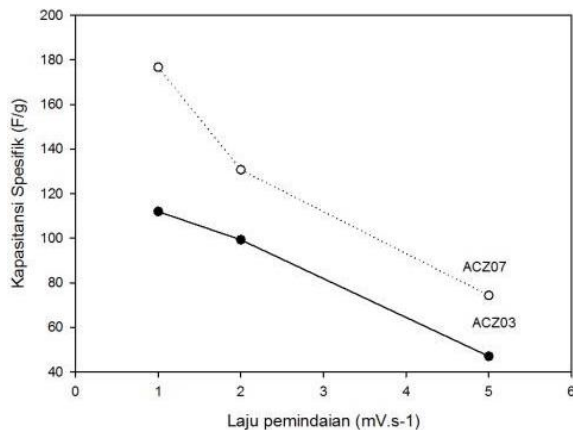
menunjukkan bahwa kinerja kapasitif yang ideal untuk tipe normal kapasitor elektrokimia lapis ganda listrik dan disertai dengan karakteristik pseudo-kapasitansi. Lebih lanjut, sampel precursor menunjukkan kurva CV yang relatif segiempat yang baik mengindikasikan sifat normal kapasitor lapis ganda [8]. Sampel ACZ03 menghasilkan kurva segiempat dengan kenaikan arus pada rentang tegangan $0.5 - 0.9 \text{ V}$ yang luas mengkonfirmasi pseudokapasitansi faradaic yang dikaitkan dengan keberadaan kelompok fungsional yang beragam atau heteroatom pada distribusi unsur sampel. Beberapa jenis heteroatom yang berkontribusi pada sifat pseudo-kapasitansi ini antara lain seperti N, O, S, dan P. Unsur-unsur ini hadir sebagian kecil disumbangkan dari unsur dasar penyusun limbah biomassa.



Gambar 3. Kurva CV dari elektroda karbon aktif monolit berbahan asal kulit singkong.

Kapasitansi spesifik dapat dievaluasi berdasarkan kurva CV melalui persamaan standar yang telah disampaikan sebelumnya. Berdasarkan persamaan ini didapatkan kapasitansi spesifik sebesar 196 F/g , dan $176,7 \text{ F/g}$ pada masing-masing sampel yang diaktivasi melalui ZnCl_2 dengan konsentrasi $0,3 \text{ M}$ dan $0,7 \text{ M}$. Hasil ini dikarenakan sifat fisis sampel yang berubah akibat impregnasi Zink Klorida dan perbedaan konsentrasi yang diterapkan. Impregnasi Zink Klorida dapat mengubah struktur morfologi permukaan menjadi berpori dan meningkatkan status elemen karbon serta dekomposisi heteroatom. Karakteristik-karakteristik ini membantu menyediakan bidang kontak ion dan elektroda semakin

banyak sehingga meningkatkan kinerja material elektroda.



Gambar 4. Kurva kapasitansi spesifik versus laju pemindaian dari elektroda karbon aktif monolit berbahan asal kulit singkong.

Kedua sampel elektroda karbon monolit ini juga dievaluasi pada tingkat pemindaian yang berbeda yaitu 1 mV/s, 2 mV/s, dan 5 mV/s. Kapasitansi spesifik yang dihasilkan terhadap penerapan laju pemindaian pada masing-masing sampel ini dapat ditinjau pada Gambar 4. Lebih lanjut, ternyata, laju pemindaian mempengaruhi kapasitansi spesifik elektroda karbon, dimana peningkatan laju pemindaian lebih tinggi dari 1 mV/s hingga 5 mV/s mereduksi kapasitansi spesifik semua sampel. Hal ini mengkonfirmasi bahwa sampel memiliki daya tahan elektrokimia yang lebih cukup baik.

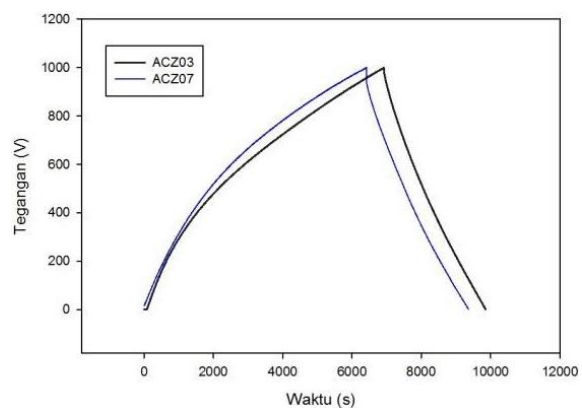
Tabel 1. kapasitansi spesifik (C_{sp}), rapat energi (E_{sp}), dan rapat daya (P_{sp}) yang dihasilkan dengan metode pengujian CV.

Kode sampel	C_{sp} (F/g)	E_{sp} (Wh/kg)	P_{sp} (W/kg)
ACZ03	196	26,46	95,35
ACZ07	176,7	23,85	85,96

Rapat energi dan rapat daya juga dievaluasi untuk tiga variasi melalui persamaan standar. Hasil kapasitansi spesifik, rapat energi, dan rapat daya yang dihasilkan dengan metode pengujian CV secara rinci dirangkum pada Tabel 1. Hasil ini serupa dengan yang dilaporkan sebelumnya yang menunjukkan karbon aktif berpori dari bambu dengan energi

spesifik dan daya spesifik 10,9 Wh/kg dan 63 W/kg.

Lebih lanjut, sifat elektrokimia dari elektroda superkapasitor dari kulit singkong dievaluasi dengan metode galvanostatic charge discharge (GCD). Gambar 5 menampilkan profil galvanostatic charge discharge (GCD) pada rapat arus 1 A/g dengan laju pemindaian 1 mV/s. Profil GCD menunjukkan bentuk segitiga simetris yang tidak sempurna dengan karakteristik non-linier yang mengindikasikan adanya sifat kapasitor elektrokimia lapis ganda listrik yang menjanjikan pada sampel dan diikuti oleh reaksi faradaic akibat distribusi unsur sampel yang mengandung heteroatom yang mengindikasikan adanya sifat pseudo-kapasitansi pada tiap sampel.



Gambar 5. Kurva CV dari elektroda karbon aktif monolit berbahan asal kulit singkong.

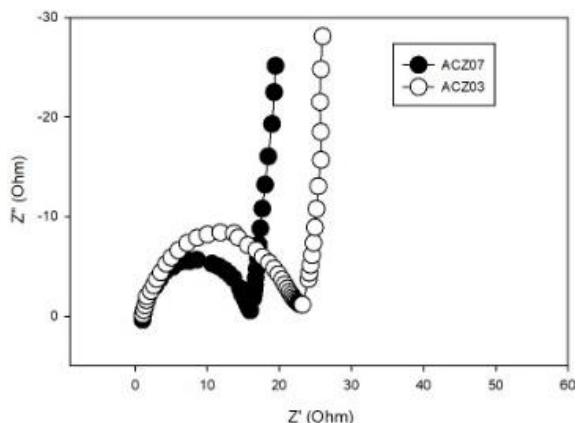
Tabel 2. kapasitansi spesifik (C_{sp}), rapat energi (E_{sp}), dan rapat daya (P_{sp}) yang dihasilkan dengan metode pengujian GCD.

Kode sampel	C_{sp} (F/g)	E_{sp} (Wh/kg)	P_{sp} (W/kg)
ACZ03	183,62	24,78	89,41
ACZ07	147,64	19,93	71,89

Kurva menunjukkan kelengkungan terbesar terjadi pada sampel ACZ03 yang mengkonfirmasi tipe pseudokapasitan karena adanya senyawa heteroatom pada elemen sampel. Selanjutnya juga dikonfirmasi dengan nilai kapasitansi spesifik, rapat energi dan rapat daya pada sampel ACZ03 lebih tinggi dibanding sampel lainnya. Dengan nilai kapasitansi spesifik setiap sampel berturut-turut

ACZ03, dan ACZ07 adalah 183,62 F/g, dan 147,6 F/g. Tren data ini juga sama dengan rapat daya dan rapat energi yang dihasilkan dan dapat terlihat pada Tabel 2.

Perbedaan agen aktivator kimia berperan dalam mempengaruhi setiap parameter pada pengujian GCD ini. Lebih lanjut sifat elektrokimia dari elektroda superkapasitor berbasis karbon aktif berbahan limbah kulit singkong dievaluasi dengan teknik Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Metode ini dianalisa untuk mengkonfirmasi proses elektrokimia yang terjadi pada antarmuka elektroda/elektrolit. Hasil dari analisa ini berupa plot nyquist yang mengkonfirmasi tahanan pemindahan muatan atau tahanan polarisasi, R_p , tahanan larutan, R_s , dan sifat kapasitif murni dari elektroda. Perbedaan konsentrasi dari agen aktivator kimia mempengaruhi sifat elektrokimia pada elektroda. Perbedaan tersebut dapat terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva EIS dari elektroda karbon aktif monolit berbahan asal kulit singkong.

Tabel 3. Nilai kapasitansi spesifik, resistansi polarisasi, dan resistansi elektrolit pada pengujian EIS.

Kode sampel	C_{sp} (F/g)	R_s (Ω/cm^2)	R_p (Ω/cm^2)	R_{ct} (Ω/cm^2)
ACZ03	113	1,24	16,63	15,39
ACZ07	126,6	1,61	13,63	12,02

Kinerja terbaik ditunjukkan pada sampel ACZ07 yang ditandai dengan setengah lingkaran yang menunjukkan tahanan transfer muatan terkecil pada sampel ACZ07. Hal ini

mengartikan bahwa tahanan transfer muatan terkecil ada di sampel ACZ07 sehingga meningkatkan nilai kapasitif dari elektroda. Lebih lanjut hal ini dikonfirmasi dengan nilai yang diperoleh pada persamaan standar yang terlihat pada Tabel 3.

Dari hasil yang didapatkan, setiap parameter mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik setiap sampel. Nilai tahanan terbesar didapatkan pada sampel AC003 dengan nilai $15,39 \Omega/cm^2$ sehingga memiliki nilai kapasitansi terkecil sebesar 113 F/g. Dan kinerja terbaik dihasilkan pada sampel ACZ07 dengan nilai tahanan $12,02 \Omega/cm^2$ dan kapasitansi spesifik sebesar 126,6 F/g. Tahanan elektrolit (R_s) menunjukkan data yang hampir sama, hal ini disebabkan elektrolit yang digunakan untuk semua sampel dalam penelitian ini sama yaitu H_2SO_4 1 M.

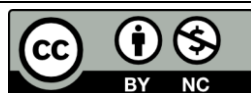
KESIMPULAN

Penerapan konsentrasi aktivator $ZnCl_2$ juga mempengaruhi sifat fisis dan sifat elektrokimia sampel karbon aktif kulit singkong. Konsentrasi 0,3 M menghasilkan sifat fisis dan sifat elektrokimia karbon terbaik. Hal ini dikonfirmasi dengan nilai kapasitansi spesifik yang lebih baik dari metode CV dan GCD yang diterapkan. Analisa sifat elektrokimia yang telah dilakukan dengan tiga metode yang diterapkan menunjukkan hasil yang relatif sama pada nilai kapasitansi spesifik sampel dengan nilai terbaik ada pada sampel ACZ03. Dari ketiga metode tersebut parameter pengukuran yang lengkap dapat dilihat pada metode EIS yang memperlihatkan juga beberapa nilai resistansi.

REFERENSI

1. Ismanto, A. E., Wang, S., Soetaredjo, F. E., & Ismadji, S. (2010). Preparation of capacitor's electrode from cassava peel waste. *Bioresource Technology*, **101**(10), 3534–3540.
2. Burke, A. (2000). Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of power sources*, **91**(1), 37–50.

3. Liu, C., Li, F., Ma, L. P., & Cheng, H. M. (2010). Advanced materials for energy storage. *Advanced materials*, **22**(8), E28–E62.
4. Augustyn, V., Simon, P., & Dunn, B. (2014). Pseudocapacitive oxide materials for high-rate electrochemical energy storage. *Energy & Environmental Science*, **7**(5), 1597–1614.
5. Zhang, S., & Pan, N. (2015). Supercapacitors performance evaluation. *Advanced Energy Materials*, **5**(6), 1401401.
6. Thomas, P., Lai, C. W., & Johan, M. R. B. (2019). Recent developments in biomass-derived carbon as a potential sustainable material for super-capacitor-based energy storage and environmental applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **140**, 54–85.
7. Kalpana, D., Cho, S. H., Lee, S. B., Lee, Y. S., Misra, R., & Renganathan, N. G. (2009). Recycled waste paper—A new source of raw material for electric double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*, **190**(2), 587–591.
8. Wang, Y., Qu, Q., Gao, S., Tang, G., Liu, K., He, S., & Huang, C. (2019). Biomass derived carbon as binder-free electrode materials for supercapacitors. *Carbon*, **155**, 706–726.
9. Miller, E. E., Hua, Y., & Tezel, F. H. (2018). Materials for energy storage: Review of electrode materials and methods of increasing capacitance for supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, **20**, 30–40.
10. Wei, H., Wang, H., Li, A., Li, H., Cui, D., Dong, M., ... & Guo, Z. (2020). Advanced porous hierarchical activated carbon derived from agricultural wastes toward high performance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, **820**, 153111.
11. Amakoromo, T. E., Abumere, O. E., Amusan, J. A., Anye, V., & Bello, A. (2021). Porous carbon from Manihot Esculenta (cassava) peels waste for charge storage applications. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, **4**.
12. Barmawi, I., Taer, E., & Umar, A. A. (2011). Efek Penumbuhan Nanopartikel Platinum Pada Elektroda Karbon Terhadap Prestasi Superkapasitor. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*, **11**(1), 1–5.
13. Winarno, F. (1990). Singkong dan Pengolahannya. *Aksara Baru*.
14. Kayiwa, R., Kasedde, H., Lubwama, M., & Kirabira, J. B. (2021). The potential for commercial scale production and application of activated carbon from cassava peels in Africa: A review. *Bioresource Technology Reports*, **15**, 100772.
15. Ikawati, I., & Melati, M. (2010). *Pembuatan Karbon Aktif dari Limbah Kulit Singkong UKM Tapioka Kabupaten Pati*. Semkarbon: Universitas Diponegoro.
16. Taer, E., Yanti, N., Mustika, W. S., Apriwandi, A., Taslim, R., & Agustino, A. (2020). Porous activated carbon monolith with nanosheet/nanofiber structure derived from the green stem of cassava for supercapacitor application. *International Journal of Energy Research*, **44**(13), 10192–10205.
17. Taer, E., Handayani, R., Apriwandi., Taslim, R., Awitdrus, Amri, A., Agustino, & Iwantono, I. (2019). The synthesis of bridging carbon particles with carbon nanotubes from Areca catechu Husk Waste as supercapacitor electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, **14**, 9436–9448.
18. González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., & Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and sustainable energy reviews*, **58**, 1189–1206.



Artikel ini menggunakan lisensi
[Creative Commons Attribution
 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)