

Pengaruh Ketebalan Elektroda Karbon Aktif dari Kulit Buah Kakao terhadap Kinerja Elektrokimia Superkapasitor

Irsya Dunnas¹, Widi Mulia Nasution², Mulda Muldarisnur^{1*}, Yuli Yetri³

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas

²Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau

³Prodi Rekayasa Perancangan Mekanik, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Padang

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 27 Mei 2024

Direvisi: 10 Juli 2024

Diterima: 13 Juli 2024

Kata kunci:

Biomassa

Elektroda Karbon

Karbon Aktif

Kulit Kakao

Superkapasitor

ABSTRAK

Sintesis karbon aktif dari kulit kakao dengan variasi ketebalan elektroda 0,4; 0,5; dan 0,6 mm bertujuan untuk melihat pengaruhnya terhadap kinerja superkapasitor. Tebal elektroda yang berbeda diberi kode sampel yaitu tebal 0,4 mm dengan kode CC-0,4; tebal 0,5 dengan kode CC-0,5 mm dan tebal 0,6 mm dengan kode CC-0,6. Pembuatan elektroda karbon dari kulit kakao dilakukan dalam beberapa tahap yaitu pengeringan organik, prakarbonasi, aktivasi kimia menggunakan aktivator KOH 0,4 M dan pencetakan pelet menggunakan press hidrolik dengan tekanan 8 ton. Pelet yang telah dicetak dikarbonasi menggunakan gas N₂ pada suhu 600 °C dan aktivasi fisika menggunakan gas CO₂ pada suhu 700 °C. Sifat elektrokimia dari sel superkapasitor ditinjau melalui sistem dua elektroda dalam elektrolit 1 M KOH. elektroda karbon aktif optimum yang diperoleh pada sampel CC-0,5 dengan kapasitansi spesifik yang tinggi mencapai 366,67 F/g pada rapat arus 1,0 A/g. Rapat energi maksimum yang didapatkan sebesar 660 Wh/kg pada rapat daya optimum 2378,39 W/kg. Potensi kulit kakao sebagai sumber karbon aktif dengan ketebalan 0,5 mm menunjukkan kinerja perangkat penyimpanan energi elektrokimia superkapasitor yang tinggi dan stabil.

Keywords:

Biomass

Carbon Electrode

Activated Carbon

Cacao Husk

Supercapacitor

Penulis Korespondensi:

Muldarisnur

Email: muldarisnur@sci.unand.ac.id

The synthesis of activated carbon from cocoa husk with varying electrode thickness of 0.4, 0.5, and 0.6 mm has been conducted to see its effect on the capacitance of the supercapacitor. The different electrode thicknesses were coded as CC-0.4 (electrode with 0.4 mm thickness), CC-0.5 mm (electrode with 0.5 mm thickness), and CC-0.6 (electrode with 0.6 mm thickness). Preparation of carbon electrodes from cocoa husk was carried out in several stages, namely organic drying, precarbonation, chemical activation using 0.4 M KOH activator and pellet moulding using a hydraulic press with a pressure of 8 tonnes. The moulded pellets were carbonated using N₂ gas at 600 °C and physically activated using CO₂ gas at 700 °C. The electrochemical properties of the supercapacitor cell were investigated through a two-electrode system in 1 M KOH electrolyte. The optimum activated carbon electrode was obtained in sample CC-0.5 with a high specific capacitance reaching 366.67 F/g at a current density of 1.0 A/g. The maximum energy density obtained was 660 Wh/kg at an optimum power density of 2378.39 W/kg. The potential of cocoa husk as a source of activated carbon with a thickness of 0.5 mm shows high and stable performance of supercapacitor electrochemical energy storage devices.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi. Penggunaan energi fosil yang terus meningkat berdampak pada lingkungan dan ketersediaan sumber daya alam yang semakin menipis (Prayogatama & Kurniawan, 2022). Peningkatan kebutuhan dan terbatasnya cadangan bahan bakar fosil, mendorong dikembangkannya energi terbarukan yang ramah lingkungan. Sumber energi yang banyak dikembangkan adalah energi air, *biofuel*, biomassa, panas bumi (*geothermal*), energi surya, energi pasang surut dan energi angin (Marchanda, 2022). Ketersediaan sumber energi terbarukan ini seringkali tidak kontinu melainkan berubah secara periodik, oleh karena itu dalam pemanfaatannya dibutuhkan media penyimpanan energi yang efisien.

Media yang umum untuk menyimpan energi adalah baterai, kapasitor, dan superkapasitor. Baterai dan superkapasitor memiliki efisiensi tinggi dalam penyimpanan energi listrik. Namun, baterai memiliki beberapa kelemahan dalam hal efisiensi baterai yang cenderung menurun seiring waktu penggunaan, kapasitas energi yang terbatas, dan waktu pengisian (*charging time*) yang lama (Yetri dkk., 2020). Disisi lain superkapasitor dapat diisi ulang dengan cepat dalam hitungan detik atau menit, memiliki kerapatan energi yang lebih tinggi dibanding kapasitor konvensional, dan lebih ramah lingkungan. Superkapasitor tidak mengandung bahan kimia beracun seperti baterai dan tidak memerlukan pengisian daya secara konstan seperti kapasitor konvensional (Saikia dkk., 2020).

Efisiensi superkapasitor sangat dipengaruhi oleh material elektroda. Hal ini dikarenakan material elektroda menentukan kapasitansi, energi spesifik, dan daya spesifik superkapasitor. Superkapasitor dari karbon aktif mudah didapat dan ramah lingkungan. Kulit kakao merupakan salah satu karbon aktif organik yang dapat dijadikan elektroda superkapasitor. Produksi kakao di Indonesia pada tahun 2020 mencapai 720.660 ton (Badan Pusat Statistik, 2021). Limbah kulit kakao dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk pembuatan superkapasitor sebagai produk bioenergy, hal ini dikarenakan kulit buah kakao memiliki kandungan hemiselulosa 18,90%, selulosa 36,47% dan lignin 60,67%.

Pemilihan bahan organik karbon aktif untuk pembuatan superkapasitor sangat penting karena menentukan kapasitas penyimpanan energi superkapasitor. Kapasitansi pada superkapasitor dipengaruhi oleh ketebalan elektroda. Desain ketebalan elektroda superkapasitor ini dapat mempengaruhi struktur pori dan permukaan pada elektroda. Material elektroda yang memiliki struktur pori hierarkis dan permukaan yang besar dapat meningkatkan luas permukaan elektroda yang berkorelasi pada peningkatan kapasitansi superkapasitor (Lu dkk., 2017).

Penelitian desain ketebalan elektroda superkapasitor ini dilakukan dengan menggunakan karbon aktif berpori dari limbah biomassa kulit buah kakao yang dibuat dalam bentuk pelet koin dalam sistem dua elektroda. Karbon kulit buah kakao dioptimalkan dengan aktivasi kimia menggunakan aktivator 0,4 M KOH. Proses ini akan mengubah struktur karbon dan membentuk pori-pori baru serta menghasilkan porositas yang lebih besar. Kinerja elektrokimia dari elektroda karbon aktif kulit buah kakao ini diuji dalam larutan 1 M KOH melalui metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD). Penelitian ini menawarkan elektroda superkapasitor yang memiliki luas permukaan spesifik tinggi, stuktur morfologi unik dan stabilitas kimia yang baik.

II. METODE

2.1 Pembuatan Karbon Aktif dari Kulit Buah Kakao

Kulit buah kakao yang digunakan sebagai bahan karbon aktif adalah kulit kakao dari buah kakao yang telah matang. Kulit buah kakao dibersihkan dengan *aquades* dan kemudian di potong tipis-tipis dengan ukuran kurang lebih 5 cm × 1 cm (Nuradi dkk., 2022). Kulit buah kakao yang dipotong dikeringkan dalam ruangan sampai kadar airnya berkurang sekitar 85%. Selanjutnya dilakukan prakarbonisasi menggunakan oven pada suhu 250 °C selama 2 jam 30 menit dalam tabung yang terbuat dari *stainless steel* dalam keadaan vakum. Proses pra-karbonasi dengan suhu 250 °C mengakibatkan kulit buah kakao mengalami perubahan menjadi karbon. Kemudian dilakukan penghalusan karbon kulit buah kakao dengan menggunakan *mortar grinding*. Kulit buah kakao yang telah di *mortar* ditimbang sebanyak 30 g kemudian digiling menggunakan *ball mill* selama kurang lebih 20 jam dengan setiap 4 jam sekali *ball milling* diistirahatkan selama 1 jam. Setelah proses penghalusan, dilakukan proses pengayakan dengan ayakan 60 µm sehingga diperoleh hasil butiran serbuk yang seragam.

Lebih lanjut, aktivasi kimia dilakukan untuk membentuk pori-pori dalam karbon aktif dengan memutuskan rantai karbon dari senyawa organik (Afza dkk., 2021; Rahmi dkk., 2021). Pori-pori ini kemudian membentuk struktur pori-pori kompleks yang memberikan sifat konduktif pada karbon aktif. Aktivasi kimia ini menggunakan aktivator KOH 0,4 M. Gelas beker yang berisi larutan KOH 0,4 M diletakkan di atas *hot plate* menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 80 °C selama satu jam, setelah itu masukkan serbuk kulit buah kakao sebanyak 30 g dan aduk sampel hingga tercampur rata lalu biarkan selama 2 jam dengan suhu dipertahankan konstan 80 °C. Selanjutnya sampel dikeringkan menggunakan oven selama 24 jam dengan suhu 105 °C. Selanjutnya sampel dihaluskan dengan menggunakan *mortar grinding* agar sampel yang menggumpal pada saat aktivasi kimia kembali terpisah. Setelah melakukan aktivasi kimia, serbuk kulit buah kakao sebanyak 0,7 gram ditimbang dan dimasukkan ke dalam cetakan. Pencetakan dilakukan dengan memberikan tekanan 8 ton menggunakan alat *hydraulic press*. Tahapan selanjutnya dilakukan karbonisasi, pelet koin dikarbonisasi pada suhu 600 °C menggunakan tabung *furnance*, dimana lingkungan gas nitrogen (N₂) dialirkan untuk mencegah pelet terurai menjadi abu. Proses karbonisasi membutuhkan waktu sekitar 8-9 jam. Pelet karbon yang dihasilkan dari proses karbonisasi kemudian dilanjutkan dengan aktivasi fisika menggunakan gas CO₂ pada suhu 700 °C selama 2 jam 30 menit. Selanjutnya, pencucian menggunakan air suling untuk meningkatkan kemurnian kandungan karbon hingga dicapai pH netral.

Desain ketebalan pada elektroda pelet karbon, dilakukan dengan proses pemolesan ketebalan menggunakan kertas pasir P 1200 CW untuk menghasilkan permukaan yang rata. Ketebalan pada elektroda didesain pada 0,4; 0,5; dan 0,6 mm untuk melihat pengaruhnya terhadap performa kapasitansi superkapasitor. Tebal elektroda yang berbeda diberi kode sampel yaitu tebal 0,4 mm dengan kode CC-0,4; tebal 0,5 dengan kode CC-0,5 dan tebal 0,6 mm dengan kode CC-0,6.

2.2 Karakterisasi Sifat Fisis Elektroda Karbon Kulit Kakao

Karakterisasi sifat fisis pada elektroda karbon kulit buah kakao dilakukan untuk mengungkapkan morfologi, porositas, dan struktur kristalnya melalui pengukuran densitas, *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan Difraksi Sinar-X (XRD). Densitas sebelum dan sesudah karbonisasi-aktivasi dapat dihitung berdasarkan data massa, diameter, dan tebal dari sampel elektroda yang dicatat sebelum dan setelah proses karbonisasi-aktivasi. Pengukuran diameter dan tebal elektroda karbon dilakukan menggunakan jangka sorong, sementara massa elektroda diukur dengan timbangan digital. Karakterisasi difraksi Sinar-X (XRD) dilakukan untuk mengetahui derajat kristalinitas, tinggi lapisan mikrokristalin, lebar lapisan mikrokristalin, dan jarak antar bidang kristal dari sampel menggunakan Persamaan 1.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

dimana n adalah orde difraksi, λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang kristal, dan θ adalah sudut difraksi.

2.3 Karakterisasi Sifat Elektrokimia Elektroda Karbon Kulit Kakao

Sifat elektrokimia elektroda karbon kakao dievaluasi melalui teknik *Cyclic Voltammetry* (CV), dan *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD). Evaluasi dilakukan pada sistem dua elektroda dengan menyusun sel superkapasitor dalam model lapisan sandwich. Pengukuran CV menggunakan *Physics CV UR Rad-Er 5841* yang dikontrol dengan *Software Cyclic Voltammetry CV V6* pada potensial 0-1000 mV dengan laju pemindaian 1, 2, 5 dan 10 mV/s. Kapasitansi spesifik dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$C_{sp} = \frac{I_c - I_d}{s \times m} \quad (2)$$

dimana C_{sp} merupakan kapasitansi spesifik (F/g), I_c merupakan arus charge dan I_d merupakan arus discharge (A), s merupakan laju pemindaian (mV/s) dan m merupakan massa elektroda (g).

Pengukuran sifat elektrokimia menggunakan metode GCD pada rapat arus 1, 2 dan 5 A/g. Pengukuran GCD ini dilakukan dengan alat *CD UR Rad-ER 2018* pada tegangan antara 0-1 V dengan densitas arus konstan sebesar 0,01 mA/s. Selanjutnya, nilai kapasitansi spesifik dievaluasi menggunakan Persamaan 3.

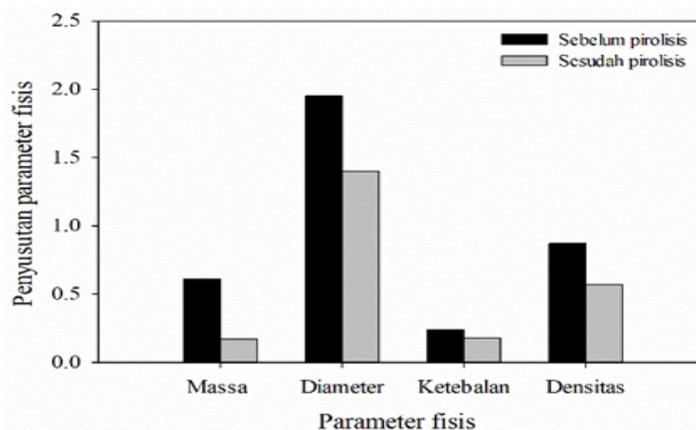
$$C_{sp} = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta V} \quad (3)$$

dimana C_{sp} merupakan kapasitansi spesifik, I merupakan arus, Δt merupakan waktu pengosongan, m merupakan massa kerja, ΔV merupakan jendela potensial.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Karakterisasi Densitas

Analisa awal karakterisasi sifat fisis dari bahan elektroda karbon kulit kakao dimulai dengan menganalisa densitas. Data diperoleh dari perhitungan densitas elektroda karbon melalui pengukuran massa, diameter, dan ketebalan pelet elektroda karbon. Pengikisan sampel menunjukkan adanya pengurangan massa dan volume elektroda (Taer dkk., 2021). Perubahan densitas sebelum dan sesudah karbonisasi dan aktivasi fisika dapat dilihat pada Gambar 1.



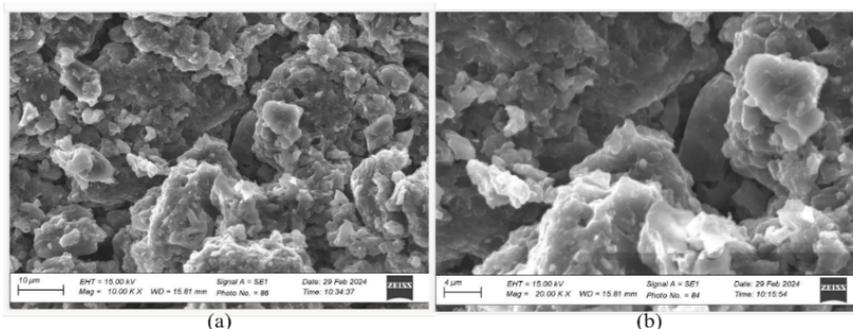
Gambar 1 Perubahan densitas sebelum dan sesudah karbonisasi dan aktivasi fisika

Pada proses karbonasi pada suhu 30 °C hingga 600 °C terjadi penguapan zat volatil, selulosa, hemiselulosa dan menghasilkan karbon yang lebih murni serta menguapkan bahan non karbon. Penguapan bahan nonkarbon yang terjadi mengakibatkan pembentukan pori baru dan pelebaran pori pada elektroda (Senneca dkk., 2020). Proses aktivasi fisika menggunakan suhu yang lebih tinggi dibanding proses karbonisasi yaitu pada suhu 700 °C dapat menghilangkan tar dan abu. Proses aktivasi fisika juga membantu pelebaran pori dan menghasilkan pori yang banyak, sehingga mengurangi densitas elektroda.

Parameter fisis yang mengalami penurunan setelah proses karbonasi dan aktivasi fisika menghasilkan densitas yang rendah. Densitas koin karbon serat kulit kakao sebelum pirolisis adalah 0,87 g/cm³ dan setelah mengalami karbonisasi dan aktivasi fisika mengalami penurunan menjadi 0,57 g/cm³, atau menyusut 35%. Penurunan densitas ini juga dipengaruhi aktivator yang digunakan saat aktivasi kimia. Aktivator yang digunakan untuk aktivasi kimia adalah kalium hidroksida dengan konsentrasi 0,4 M (Farma & Hasibuan, 2017).

3.2 Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Morfologi elektroda karbon kulit kakao dianalisis menggunakan pemindaian mikroskop elektron (SEM) pada perbesaran 10.000x dan 20.000x, untuk melihat struktur morfologi dari karbon aktif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Bentuk morfologi menunjukkan adanya pori hierarkis berupa gabungan mikro, meso dan makropori. Struktur pori hierarkis yang terbentuk dipengaruhi oleh pemberian aktivasi kimia. Agen pengaktif KOH dapat menggetsa rantai karbon pada komponen lignoselulosa yang mendorong terciptanya ukuran pori beragam (Li dkk., 2021).

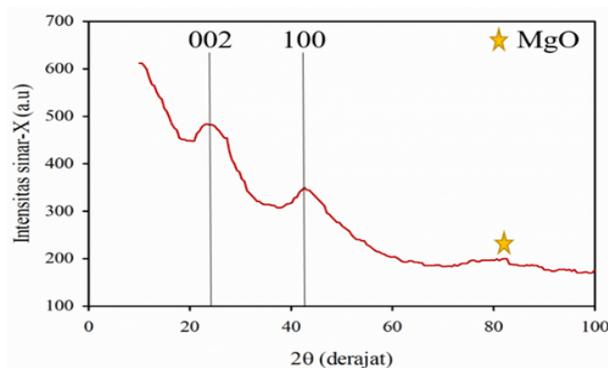


Gambar 2 Hasil mikroskop pemindai elektron (a) Perbesaran 10.000x (b) Perbesaran 20.000x

Gambar 2a menunjukkan morfologi SEM yang didominasi agregat yang relatif besar. Hal ini menyebabkan pertumbuhan pori yang sempit yang membatasi adsorpsi ion pada antarmuka elektroda/elektrolit superkapsitor (Pokharel dkk., 2021). Gambar 2b memperlihatkan morfologi pori yang relatif lebih jelas. Impregnasi kimia Struktur ini memperlihatkan porositas tinggi dan peningkatan luas permukaan spesifik (Han dkk., 2020). Akibatnya, aliran ion bebas mengalir ke permukaan material sehingga meningkatkan kinerja superkapasitor (Fang dkk., 2021).

3.3 Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD)

Struktur mikrokristalin elektroda karbon kulit kakao diamati melalui analisa difraksi sinar-X. Pola difraksi sinar-X elektroda karbon kulit kakao dengan sudut 2θ pada rentang 10° sampai 60° ditampilkan pada Gambar 3. Karbon aktif berbasis biomassa menampilkan pola XRD dengan gambaran dua puncak landai dan beberapa puncak tajam pada sudut 2θ dengan rentang 10° sampai 60° (Yetri dkk., 2020). Puncak yang lebar pada bidang difraksi (d_{002}) dan (d_{100}) pada sudut $23,3511^\circ$ dan $42,6171^\circ$ menandakan adanya susunan atom yang acak yang mengakibatkan puncak yang tidak tajam. Hal ini menandakan bahwa elektroda karbon aktif bersifat *amorf* (Sajjad dkk., 2021). Pola XRD juga menunjukkan adanya puncak kecil yang terbentuk pada sudut 82° yang menunjukkan adanya kristal MgO dalam jumlah kecil.



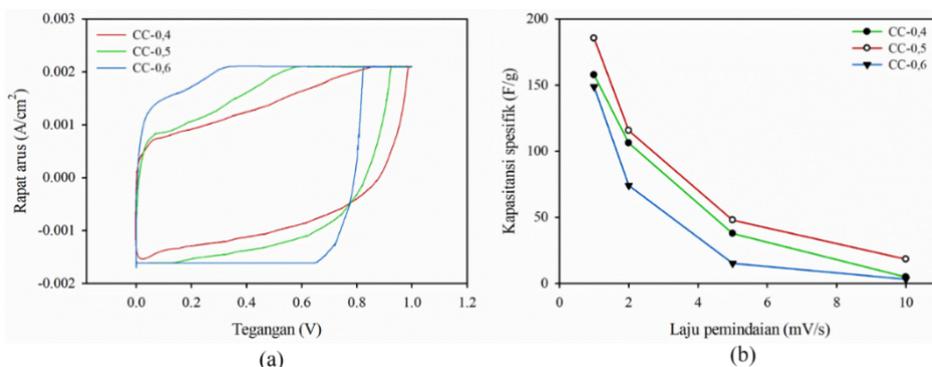
Gambar 3 Pola karakterisasi difraksi sinar-X sampel CC-0,5.

Tabel 1 menunjukkan data parameter kisi elektroda karbon aktif kulit kakao yang meliputi sudut hambur difraksi sinar-X (θ dan 2θ), jarak antar bidang (d_{002}) dan (d_{100}), serta tinggi dan lebar lapisan mikrokristalin (L_c dan L_a). Nilai jarak antar lapisan d_{002} yang diperoleh yaitu $3,806 \text{ \AA}$ yang lebih besar dari d_{002} grafit $3,354 \text{ \AA}$. Hal ini menandakan karbon aktif memiliki struktur *amorf*. Sedangkan nilai d_{100} untuk sampel $2,120 \text{ \AA}$ menandakan sifat normal untuk karbon dari biomassa (Lu dkk., 2017). Nilai L_c sebesar $6,478 \text{ \AA}$ dapat mengkonfirmasi luas permukaan spesifik material karbon. Semakin kecil nilai L_c , semakin tinggi luas permukaan spesifik sehingga meningkatkan kinerja superkasitor (Tsay dkk., 2012). Luas permukaan karbon aktif yang diperoleh adalah $35.234 \text{ m}^2/\text{g}$.

3.4 Pengukuran Cyclic Voltammetry (CV)

Sifat elektrokimia sel superkapasitor elektroda karbon kulit kakao diukur menggunakan CV dan hasil pengukuran dapat dilihat pada Gambar 4a. Tampak jelas semua sampel elektroda menunjukkan bentuk kurva CV hampir persegi panjang dengan puncak redoks faradaik kecil pada kecepatan pemindaian 1 mV/s . Bentuk persegi panjang hampir sempurna ini mengindikasikan sifat elektrokimia

lapis ganda elektrik dari difusi ion pada antarmuka elektroda/elektrolit (Khajonrit dkk., 2022). Puncak redoks faradaik mencirikan adanya pseudokapasitan, yang dihasilkan dari *self-doping* heteroatom oksigen.

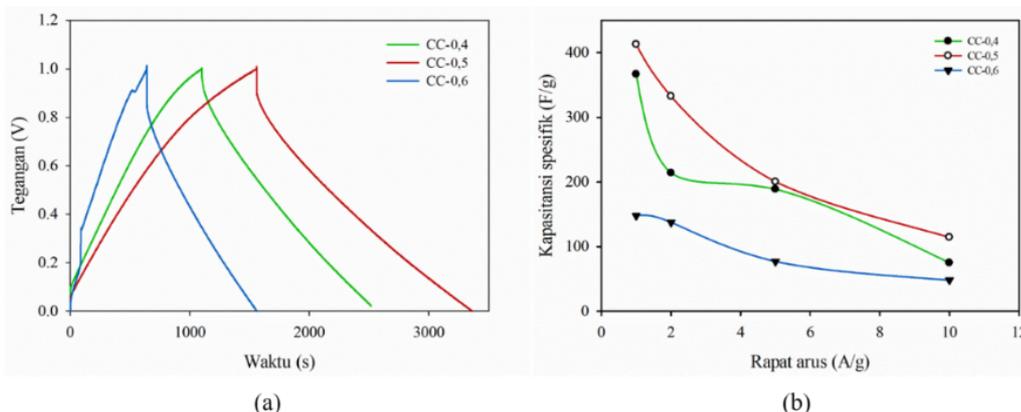


Gambar 4 (a) Hasil pengukuran CV pada laju pemindaian 1 mV/s (b) Hubungan antara laju pemindaian dengan nilai kapasitansi spesifik

Sampel CC-0,5 menunjukkan luas kurva yang paling besar, hal ini menunjukkan sampel CC-0,5 memiliki kapasitansi yang besar. Kapasitansi spesifik sampel CC-0,4, CC-0,5, CC-0,6 berturut-turut sebesar 157,74 F/g, 185,49 F/g, 148,76 F/g. Rapat energi paling tinggi ditemukan pada sampel CC-0,5 sebesar 333,87 Wh/Kg diikuti dengan sampel CC-0,4 dan CC-0,6 sebesar 283,94 Wh/kg dan 267,77 Wh/kg. Rapat daya tertinggi juga ditemukan pada sampel CC-0,5 yaitu sebesar 1203,15 W/Kg, diikuti sampel CC-0,4 dan CC-0,6 yaitu sebesar 1023,19 W/kg dan 964,93 W/kg. Kapasitansi spesifik pada laju pemindaian 1, 2, 5, 10 mV/s menurun dengan meningkatnya laju pemindaian. Penurunan kapasitansi spesifik ini disebabkan pada laju pemindaian yang besar ion-ion elektrolit tidak mempunyai waktu yang cukup untuk berdifusi secara merata untuk mengisi pori-pori elektroda karbon (Yusriwandi dkk., 2017).

3.5 Pengukuran *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD)

Sifat elektrokimia dari karbon aktif kulit kakao lebih lanjut dievaluasi menggunakan GCD. Kurva GCD (Gambar 5.a) menampilkan hubungan antara tegangan dan waktu selama proses pengisian-pengosongan berlangsung, dimana kurva yang naik merupakan pengisian dan kurva yang turun merupakan pengosongan. Kurva membentuk segitiga yang mengidentifikasi sifat lapis ganda, dimana segitiga sama kaki yang terdistorsi menunjukkan pengisian dan pengosongan ion pada waktu berbeda untuk semua sampel (Yusriwandi dkk., 2017). Sampel CC-0,5 memiliki waktu pengisian dan pengosongan terlama mengidentifikasi bahwa sampel memiliki sifat elektrokimia yang sangat baik.



Gambar 5 (a) Tampilan hasil dari kurva GCD pada rapat arus 1 A/g (b) Hubungan kapasitansi spesifik terhadap rapat arus

Kapasitansi spesifik pada sampel CC-0,5 lebih tinggi dibanding dengan sampel CC-0,4 dan CC-0,6 dengan nilai berturut-turut dari CC-0,4, CC-0,5, CC-0,6 yaitu 366,67 F/g, 412,94 F/g, 147,82 F/g. sampel CC-0,5 memiliki energi dan daya spesifik sebesar 743,29 Wh/kg dan 2678,53 W/kg. Performa tinggi elektrokimia pada sampel CC-0,5 diperoleh dari struktur pori yang beragam dan saling terhubung

sehingga memfasilitasi pembentukan lapisan listrik dan memperlancar jalur transportasi ion antar permukaan elektroda. Selain itu, sampel CC-0,5 yang memiliki ketebalan 0,5 mm mampu mempertahankan daya rekat sehingga sedikitnya rongga yang terbentuk sehingga menghasilkan kapasitansi spesifik tinggi.

IV. KESIMPULAN

Pembuatan elektroda karbon aktif untuk aplikasi superkapasitor berbasis kulit kakao telah berhasil dibuat dengan menggunakan variasi ketebalan elektroda yaitu 0,4, 0,5, dan 0,6 mm. Hasil optimal pada sampel dengan ketebalan 0,5 mm. Karakterisasi sifat fisika menunjukkan densitas pada sampel elektroda karbon aktif mengalami penurunan setelah dilakukan proses karbonisasi dan aktivasi fisika. Sampel memiliki dua puncak lebar, yang mengidentifikasi sifat *amorf*. Karakterisasi sifat elektrokimia menunjukkan bahwa sampel CC-0,5 memiliki kapasitansi spesifik tertinggi yaitu sebesar 366,67 F/g, dengan rapat energi 660 Wh/kg dan rapat daya yaitu 2378,39 W/kg yang dikonfirmasi dari pengujian GCD.

DAFTAR PUSTAKA

- Afza, V. Y. Y., Muldarisnur, M., & Yetri, Y. (2021). Analisis Pengaruh Konsentrasi Elektrolit NaCl terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Kulit Buah Kakao. *Jurnal Fisika Unand*, 10(4), 486–492. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.4.486-492.2021>
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Statistik Kakao Indonesia 2020*. Badan Pusat Statistik.
- Fang, C., Hu, P., Dong, S., Cheng, Y., Zhang, D., & Zhang, X. (2021). Construction of carbon nanorods supported hydrothermal carbon and carbon fiber from waste biomass straw for high strength supercapacitor. *Journal of Colloid and Interface Science*, 582, 552–560. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.139>
- Farma, R., & Hasibuan, R. R. (2017). Karakterisasi Sifat Fisis dan Elektrokimia Sel Superkapasitor dengan Penumbuhan Nanopartikel Platinum di Atas Pengumpul Arus. *Jurnal Komunikasi Fisika Indonesia*, 14(2), 1067–1072.
- Han, P., Cheng, M., Luo, D., Cui, W., Liu, H., Du, J., Wang, M., Zhao, Y., Chen, L., Zhu, C., & Xu, J. (2020). Selective etching of C-N bonds for preparation of porous carbon with ultrahigh specific surface area and superior capacitive performance. *Energy Storage Materials*, 24, 486–494. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.009>
- Khajonrit, J., Sichumsaeng, T., Kalawa, O., Chaisit, S., Chinnakorn, A., Chanlek, N., & Maensiri, S. (2022). Mangosteen peel-derived activated carbon for supercapacitors. *Progress in Natural Science: Materials International*, 32(5), 570–578. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2022.09.004>
- Li, T., Ma, R., Xu, X., Sun, S., & Lin, J. (2021). Microwave-induced preparation of porous graphene nanosheets derived from biomass for supercapacitors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 324(July), 111277. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111277>
- Lu, Y., Zhang, S., Yin, J., Bai, C., Zhang, J., Li, Y., Yang, Y., Ge, Z., Zhang, M., Wei, L., Ma, M., Ma, Y., & Chen, Y. (2017). Mesoporous activated carbon materials with ultrahigh mesopore volume and effective specific surface area for high performance supercapacitors. *Carbon*, 124, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.08.044>
- Marchanda, H. (2022). Power Sector: Stumbling block in India's net-zero journey. Observer Research Forum.
- Nuradi, R. F., Muldarisnur, M., & Yetri, Y. (2022). Synthesis of Supercapacitor from Cocoa Fruit Peel Activated Carbon for Energy Storage. *Jurnal Ilmu Fisika | Universitas Andalas*, 14(2), 86–94. <https://doi.org/10.25077/jif.14.2.86-94.2022>
- Pokharel, J., Gurung, A., Baniya, A., He, W., Chen, K., Pathak, R., Lamsal, B. S., Ghimire, N., & Zhou, Y. (2021). MOF-derived hierarchical carbon network as an extremely-high-performance supercapacitor electrode. *Electrochimica Acta*, 394, 139058. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139058>
- Prayogatama, A., & Kurniawan, T. (2022). Modifikasi Karbon Aktif dengan Aktivasi Kimia dan Fisika Menjadi Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 11(1), 47–58. <https://dx.doi.org/10.23887/jst-undiksha.v11i1>

- Rahmi, F., Muldarisnur, M., & Yetri, Y. (2021). Variasi Konsentrasi Elektrolit H₂SO₄ untuk Pembuatan Karbon Aktif Kulit Buah Kakao sebagai Elektroda Superkapasitor dengan Aktivator ZnCl₂. *Jurnal Fisika Unand*, 10(4), 467–472. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.4.467-472.2021>
- Saikia, B. K., Benoy, S. M., Bora, M., Tamuly, J., Pandey, M., & Bhattacharya, D. (2020). A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials. *Fuel*, 282(July), 118796. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118796>
- Sajjad, M., Khan, Y., & Lu, W. (2021). One-pot Synthesis of 2D SnS₂ Nanorods with High Energy Density and Long Term Stability for High-Performance Hybrid Supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 35(January), 102336. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102336>
- Senneca, O., Cerciello, F., Russo, C., Wütscher, A., Muhler, M., & Apicella, B. (2020). Thermal treatment of lignin, cellulose and hemicellulose in nitrogen and carbon dioxide. *Fuel*, 271(March), 117656. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117656>
- Taer, E., Febriyanti, F., Mustika, W. S., Taslim, R., Agustino, A., & Apriwandi, A. (2021). Enhancing the performance of supercapacitor electrode from chemical activation of carbon nanofibers derived Areca catechu husk via one-stage integrated pyrolysis. *Carbon Letters*, 31(4), 601–612. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00191-5>
- Tsay, K. C., Zhang, L., & Zhang, J. (2012). Effects of electrode layer composition/thickness and electrolyte concentration on both specific capacitance and energy density of supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 60, 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.11.087>
- Yetri, Y., Mursida, Dahlan, D., Taer, E., Agustino, & Muldarisnur. (2020). Identification of cacao peels potential as a basic of electrodes environmental friendly supercapacitors. *Key Engineering Materials*, 846 KEM, 274–281. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.846.274>
- Yusriwandi, Y., Taer, E., & Farma, R. (2017). Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda Karbon Aktif dengan Karbonisasi dan Aktivasi Bertingkat Menggunakan Gas CO₂ dan Uap Air. *Edu Research*, 6(1), 21–26.