

Pemanfaatan Karbon Aktif Berbasis Biomassa Lokal sebagai Material Elektroda Superkapasitor: Review

Muflihatun

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jendral Soedirman, Indonesia

ARTICLE INFO

Riwayat Artikel:

Draft diterima: 15 Maret 2025

Revisi diterima: 12 April 2025

Diterima: 15 April 2025

Tersedia Online: 22 April 2025

Corresponding author: muflihatun@unsoed.ac.id

ABSTRAK

Pemanfaatan karbon aktif berbasis biomassa lokal sebagai bahan elektroda superkapasitor menawarkan alternatif berkelanjutan dalam teknologi penyimpanan energi. Artikel ini menyajikan tinjauan sistematis terhadap karakteristik fisik dan elektrokimia dari karbon aktif yang disintesis dari berbagai biomassa lokal, antara lain tandan kosong kelapa sawit (TKS), ampas biji kopi robusta, kulit durian, kulit pisang, sekam padi, dan batang jagung. Studi ini menganalisis data luas permukaan spesifik (BET), struktur pori, jenis aktivator kimia, serta performa kapasitansi dari masing-masing material. Hasil menunjukkan bahwa karbon dari ampas biji kopi dan TKS memiliki kinerja terbaik dengan kapasitansi spesifik masing-masing 130 F/g dan 107,83 F/g. Meskipun luas permukaan tinggi merupakan faktor penting, hasil juga menunjukkan bahwa distribusi pori, dominasi mikropori/mesopori, dan jenis aktivator kimia memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa elektroda. Oleh karena itu, pendekatan sintesis yang mempertimbangkan keseimbangan struktur pori dan aktivasi kimia menjadi strategi penting dalam optimalisasi material elektroda superkapasitor berbasis biomassa.

Kata kunci: superkapasitor, karbon aktif, biomassa lokal, elektroda, penyimpanan energi.

ABSTRACT

The use of biomass-based activated carbon as an electrode material for supercapacitors presents a sustainable alternative in energy storage technology. This article provides a systematic review of the physical and electrochemical characteristics of activated carbon synthesized from various local biomass sources, including oil palm empty fruit bunches, robusta coffee grounds, durian peel, banana peel, rice husk, and corn stalk. The study analyzes data on specific surface area (BET), pore structure, chemical activating agents, and specific capacitance performance of each material. Results show that activated carbon derived from coffee grounds and oil palm empty fruit bunches exhibits the highest performance, with specific capacitance values of 130 F/g and 107.83 F/g, respectively. Although a high surface area is an important factor, the findings highlight that pore distribution, micropore-to-mesopore balance, and the type of chemical activator significantly affect electrode performance. Therefore, a synthesis approach that optimizes both pore architecture and chemical activation is crucial in developing high-performance biomass-based electrode materials for sustainable supercapacitor applications.

Keywords: supercapacitor, activated carbon, local biomass, electrode, energy storage.

1. PENDAHULUAN

Selama beberapa abad terakhir, bahan bakar fosil telah menjadi sumber energi utama. Namun, selain semakin berkurang, penggunaannya juga menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan, yang pada akhirnya memengaruhi kesehatan masyarakat. Sebagai respon terhadap permasalahan ini, para peneliti telah banyak mengembangkan sumber energi terbarukan yang mampu menghasilkan energi tanpa menghasilkan emisi karbon dioksida [1]. Dengan keunggulan dalam kebersihan dan sifatnya sebagai energi terbarukan, tenaga surya dan angin menjadi komponen utama dalam struktur energi modern [2]. Namun, sifat pasokan yang tidak stabil dan berbagai kendala lainnya membatasi penggunaan optimal dari turbin tenaga surya dan angin. Untuk memenuhi kebutuhan energi manusia, diperlukan pengembangan perangkat penyimpanan dan konversi energi yang inovatif, hemat biaya, dan ramah lingkungan [3]. Superkapasitor, sebagai salah satu perangkat penyimpanan energi, telah menarik perhatian besar karena fitur-fitur unggulannya, seperti kerapatan daya yang tinggi, kemampuan pengisian/pengosongan

yang cepat, rentang suhu operasional yang luas, bebas perawatan, serta ramah lingkungan [4]. Material elektroda adalah bagian penting dari superkapasitor, di mana karbon aktif merupakan pilihan utama karena luas permukaannya yang besar, konduktivitas listrik dan stabilitas kimia yang sangat baik [5].

Karbon aktif berbasis biomassa memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan karbon alami seperti arang, grafit, dan berlian. Grafit dan berlian terbentuk dari karbon yang tersimpan secara alami di kerak bumi melalui proses metamorf atau pembekuan pada suhu dan tekanan tinggi. Sebaliknya, karbon dari biomassa dihasilkan dengan mengolah bahan alami seperti tanaman, mikroorganisme makanan, dan kotoran hewan menjadi material karbon berpori melalui proses buatan seperti karbonisasi termal dan aktivasi [6]. Pemanfaatan karbon aktif berbasis biomassa lokal sebagai bahan elektroda superkapasitor telah menjadi solusi menjanjikan untuk mengatasi tantangan penyimpanan energi berkelanjutan sekaligus mendukung kelestarian lingkungan. Karbon aktif dari biomassa menawarkan alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan karbon berbasis bahan bakar fosil, berkat ketersediaannya yang melimpah serta sifat elektrokimia unggul, seperti kapasitansi spesifik tinggi dan stabilitas siklus yang baik. Pembuatan karbon aktif berbasis biomassa lokal melibatkan konversi limbah pertanian dan industri menjadi karbon aktif berkinerja tinggi melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Proses ini meningkatkan luas permukaan, porositas, dan fungsionalitas elektrokimia material. Transformasi tersebut tidak hanya menyediakan solusi berkelanjutan untuk kebutuhan energi, tetapi juga mendukung pengelolaan limbah dengan memanfaatkan residu menjadi material bernilai tinggi [7], [8], [9].

Meskipun penelitian mengenai karbon aktif dari biomassa telah berkembang pesat, sebagian besar studi masih terbatas pada satu jenis biomassa dengan fokus pada karakterisasi dasar. Perbandingan sistematis antar berbagai jenis biomassa lokal berdasarkan luas permukaan, struktur pori, dan kapasitansi spesifik masih jarang ditemukan. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk menyajikan tinjauan komprehensif atas performa karbon aktif dari beberapa biomassa lokal sebagai elektroda superkapasitor.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode studi literatur yang bertujuan untuk mengkaji perkembangan terbaru dalam sintesis dan karakterisasi karbon aktif berbasis biomassa lokal sebagai material elektroda kapasitor. Sumber literatur dikumpulkan dari basis data ilmiah seperti Scopus, ScienceDirect dan Google Scholar dengan rentang publikasi 10 tahun terakhir untuk memastikan relevansi dengan perkembangan terkini dalam artikel ini. Kriteria pemilihan literatur mencakup penelitian yang berfokus pada karbon aktif dari biomassa lokal sebagai material elektroda superkapasitor, metode sintesis yang mencakup karbonisasi dan aktivasi, baik secara fisika maupun kimia, teknik karakterisasi yang meliputi analisis morfologi, luas permukaan, komposisi kimia, dan performa elektrokimia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode Sintesis Karbon Aktif

Metode pembuatan karbon aktif dari biomassa sangat penting untuk mengetahui seberapa baik material elektroda superkapasitor bekerja. Memilih prekursor yang tepat, metode karbonisasi yang tepat, dan strategi aktivasi yang tepat dapat menghasilkan karbon aktif yang memiliki sifat elektrokimia yang luar biasa. Metode ini tidak hanya membantu mengembangkan teknologi penyimpanan energi yang berkelanjutan, tetapi juga membantu memanfaatkan limbah biomassa dengan baik [10], [11].

Proses sintesis karbon aktif berbasis biomassa umumnya dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu karbonisasi dan aktivasi. Kedua tahap ini bertujuan untuk mengubah biomassa menjadi karbon aktif dengan karakteristik yang mendukung aplikasi seperti superkapasitor. Proses karbonisasi menentukan karakteristik struktur karbon aktif. Metode karbonisasi yang berbeda, seperti pirolisis dan karbonisasi hidrotermal, memungkinkan kontrol spesifik atas porositas dan luas permukaan. Karbonisasi hidrotermal telah terbukti meningkatkan porositas dan luas permukaan bahan karbon, dengan karakteristik yang mendukung aplikasi superkapasitor [12], [13]. Proses selanjutnya yaitu proses aktivasi yang bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dan membentuk pori-pori yang dapat menyimpan ion elektrolit dalam aplikasi superkapasitor. Terdapat tiga metode utama yaitu aktivasi kimia, aktivasi fisika dan doping heteroatom. Aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan agen seperti NaOH, KOH, ZnCl₂, atau H₃PO₄ untuk memperbesar pori dan meningkatkan konduktivitas. Aktivasi fisika dilakukan dengan menggunakan uap air (H₂O) atau CO₂ pada suhu tinggi (>800°C) untuk membuka struktur pori [14]. Struktur berpori yang dihasilkan dapat memfasilitasi difusi elektrolit yang lebih baik, meningkatkan kinerja superkapasitor secara keseluruhan [15]. Proses selanjutnya yaitu doping heteroatom, dilakukan dengan memberikan doping nitrogen (N), fosfor (P), atau sulfur (S) untuk meningkatkan kapasitansi spesifik dan sifat elektrokimia karbon aktif [16], [17], [18].

Biomassa Lokal untuk Karbon Aktif

1. Kulit Pisang Kepok

Sintesis karbon aktif dari kulit pisang kepok sebagai bahan elektroda kapasitor dilakukan melalui proses karbonisasi dan aktivasi dengan menggunakan berbagai jenis aktivator. Pada tahap awal, kulit pisang kepok yang telah dibersihkan dipotong

menjadi beberapa bagian dan dikeringkan di bawah sinar matahari, kemudian dikeringkan lebih lanjut dalam oven pada suhu yang bervariasi (250°C , 270°C , 290°C , dan 310°C) selama 30 menit. Setelah kering, kulit pisang dikarbonisasi dalam furnace untuk menghasilkan karbon aktif. Setelah karbonisasi, karbon aktif mengalami aktivasi kimia dengan perendaman dalam larutan aktivator NaOH, H_2SO_4 , H_3PO_4 , dan ZnCl_2 dengan perbandingan 10:1 (aktivator: karbon aktif) selama 24 jam. Selanjutnya, karbon aktif disaring menggunakan corong Buchner, kemudian dipanaskan dalam tanur pada suhu 600°C selama 30 menit untuk meningkatkan struktur porinya. Setelah proses pemanasan, karbon aktif dicuci menggunakan aquadest hingga mencapai pH netral, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam [19].

Karakterisasi karbon aktif dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk menganalisis morfologi pori karbon aktif; *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk melihat struktur kristalnya; dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk menemukan gugus fungsi yang berkontribusi terhadap sifat elektrokimia karbon aktif. Selain itu, nilai kapasitansi karbon aktif diukur dengan LCR meter untuk mengetahui seberapa baik kinerjanya sebagai elektroda superkapasitor [19].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitansi tertinggi sebesar $47,4 \mu\text{F}$ diperoleh dari karbon aktif yang diaktivasi menggunakan NaOH pada suhu karbonisasi 270°C . Sebaliknya, kapasitansi terendah sebesar $6,52 \mu\text{F}$ diperoleh dari karbon aktif yang diaktivasi dengan H_2SO_4 pada suhu karbonisasi 310°C . Karakterisasi SEM menunjukkan bahwa karbon aktif yang diaktivasi dengan NaOH memiliki porositas lebih kecil tetapi terdistribusi lebih merata, sedangkan hasil XRD menunjukkan bahwa karbon aktif bersifat amorf, dengan aktivator ZnCl_2 memberikan struktur yang lebih baik dibandingkan aktivator lain. Keberadaan gugus O-H dan C=O, yang berkontribusi pada sifat elektrokimia material, ditunjukkan oleh spektroskopi FTIR [19].

2. Kulit Durian

Sintesis karbon aktif dari limbah kulit durian sebagai bahan elektroda superkapasitor dilakukan melalui proses karbonisasi hidrotermal dan aktivasi kimia. Karbonisasi hidrotermal dilakukan pada suhu 275°C selama 1 jam. Setelah karbonisasi, fase cair dipisahkan, sedangkan fase padat dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 12 jam untuk menghasilkan karbon mentah. Proses selanjutnya yaitu aktivasi, memiliki tujuan untuk meningkatkan luas permukaan dan konstruksi pori karbon aktif. Selama dua jam, karbon mentah dipanaskan pada suhu 800°C dalam atmosfer nitrogen dengan aliran gas 50 mL/menit. Setelah aktivasi, karbon aktif dinetralkan dengan larutan HCl 0,5 M dan kemudian dicuci dengan air suling panas hingga pH mencapai 5,0–6,0. Setelah dicuci, sampel karbon aktif dikeringkan selama 12 jam dalam oven pada 105°C sebelum digunakan sebagai elektroda superkapasitor [20].

Hasil karakterisasi karbon aktif yang diperoleh dari kulit durian menunjukkan bahwa material ini memiliki struktur pori yang tidak seragam, namun tetap memiliki luas permukaan spesifik yang cukup besar, yaitu $1327 \text{ m}^2/\text{g}$, sebagaimana dikonfirmasi melalui analisis *Brunauer-Emmett-Teller* (BET). Pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan terbentuknya pori dan retakan pada permukaan serat, yang terbentuk akibat proses aktivasi dengan ZnCl_2 . Sementara itu, analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki struktur amorf, ditandai dengan keberadaan puncak lebar pada sudut $2\theta = 24^{\circ}$. Pengujian elektrokimia dilakukan menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dengan superkapasitor berbasis karbon aktif dalam larutan KOH 6M terlarut dalam etanol. Hasil pengujian CV menunjukkan bahwa kapasitansi spesifik yang diperoleh sebesar 18 mF/g [20].

3. Sekam Padi

Sintesis karbon aktif berbasis sekam padi [21] dilakukan melalui beberapa tahapan utama. Proses diawali dengan pencucian dan pengeringan sekam padi di bawah sinar matahari selama 24 jam, diikuti dengan pemanasan dalam oven pada suhu 100°C selama 3 jam. Selanjutnya, dilakukan karbonisasi dalam furnace pada suhu 400°C selama 2 jam untuk menghasilkan arang sekam padi. Proses selanjutnya yaitu arang sekam padi diaktivasi secara kimia menggunakan larutan KOH 30% dengan rasio 1:5 dan didiamkan selama 24 jam. Setelah aktivasi kimia, dilakukan aktivasi fisika dengan memanaskan karbon aktif dalam tube furnace pada suhu 800°C selama 1 jam dengan aliran gas argon. Terakhir, proses pembuatan elektroda superkapasitor dilakukan dengan menggunakan metode spray-coating, di mana campuran karbon aktif dan Carboxymethyl Cellulose (CMC) disemprotkan ke substrat Cu-foil yang dipanaskan pada suhu 90°C .

Karakterisasi karbon aktif dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), yang mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi C=C, C-O, dan C-H, menunjukkan bahwa proses karbonisasi telah berlangsung dengan baik. Hasil karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan dari sekam padi memiliki struktur berpori dengan distribusi ukuran pori yang cukup baik. Pengamatan pada perbesaran 1000x dan 2000x mengungkapkan bahwa permukaan karbon aktif mengandung pori-pori dalam jumlah yang signifikan, yang berkontribusi terhadap peningkatan luas permukaan spesifik material. Pori-pori ini juga memainkan peran penting dalam proses interkalasi ion-ion elektrolit ke dalam material karbon aktif, yang berdampak pada peningkatan kapasitas penyimpanan muatan superkapasitor [21]. Untuk mengevaluasi kemampuan elektroda dalam menyimpan energi, pengujian *Cyclical Voltammetry* (CV) dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan elektrolit KOH 2M menghasilkan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar $8,56 \text{ F/g}$ pada scan rate 25 mV/s [21].

4. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKS)

Sintesis karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit (TKS) [22] dilakukan dalam beberapa langkah. Pertama, sampel dibersihkan menggunakan akuades, dikeringkan, dipotong menjadi potongan kecil, dan dioven pada suhu 110°C. Setelah itu, prekarbonisasi dilakukan pada suhu 400°C selama empat jam, kemudian hasilnya dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan berukuran 400 mesh. Proses aktivasi dilakukan dengan mencampur karbon dengan larutan KOH dalam perbandingan 1:5, diaduk hingga homogen selama ± 12 jam, lalu disaring, kemudian dikeringkan dalam oven selama 1 jam pada suhu 110°C. Selanjutnya, karbon yang telah dikeringkan dipanaskan dalam atmosfer nitrogen dengan laju pemanasan 5°C/menit hingga mencapai suhu 800°C dan dipertahankan selama 2,5 jam. Setelah proses aktivasi selesai, karbon dicuci menggunakan larutan HCl 1M hingga mencapai pH netral, dan dikeringkan pada suhu 105°C [22].

Karakterisasi menggunakan EDX menunjukkan bahwa karbon aktif TKS memiliki kandungan karbon sebesar 88,93%, dengan unsur lain seperti kalium, oksigen, aluminium, dan silikon dalam jumlah kecil. Menurut analisis XRD, karbon aktif TKS memiliki struktur kristalit amorf dengan dua puncak lebar pada sudut $2\theta = 26,20^\circ$ dan $43,08^\circ$. Hasil karakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis TKS memiliki struktur berpori yang berkembang dengan baik setelah proses aktivasi kimia menggunakan KOH. Pengukuran luas permukaan menggunakan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET) menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki luas permukaan sebesar 898,229 m²/g, yang berkontribusi terhadap peningkatan kapasitansi spesifik elektroda. Nilai ini cukup besar untuk meningkatkan kinerja superkapasitor [22]. Sifat elektrokimia diukur menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dengan elektrolit H₂SO₄ 1M. Nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 107,83 F/g, yang menunjukkan bahwa karbon aktif TKS memiliki potensi sebagai material elektroda superkapasitor [22].

5. Batang Jagung

Sintesis karbon aktif dari batang jagung sebagai bahan elektroda superkapasitor dilakukan melalui proses dehidrasi asam. Tahapan sintesis diawali dengan preparasi bahan, di mana bubuk batang jagung sebanyak 50 g dicampurkan dengan 100 mL larutan H₂SO₄ 1M, kemudian diaduk selama 10 menit pada suhu 80°C. Setelah proses dehidrasi selesai, campuran dicuci dengan akuades dan dikeringkan dalam oven selama 10 jam pada suhu 80°C. Produk dehidrasi yang dihasilkan berupa *biochar* kemudian mengalami aktivasi kimia dengan NaOH 5M pada perbandingan 1:4 (karbon aktif: aktivator). Campuran ini didiamkan selama 24 jam, kemudian dipanaskan dalam tube furnace pada suhu 800°C selama 1 jam dengan laju pemanasan 10°C/menit dalam atmosfer nitrogen (N₂). Karbon aktif yang dihasilkan kemudian didinginkan pada suhu ruang dan dicuci dengan HCl 2M hingga mencapai pH 7, lalu dikeringkan kembali dalam oven pada suhu 110°C hingga mencapai berat konstan. Setelah sintesis karbon aktif, elektroda kerja dibuat dengan mencampurkan karbon aktif, *Polyvinylidene fluoride* (PVDF), dan *carbon black* dengan perbandingan 8:1:1. Campuran ini dilarutkan dalam N-methyl pyrrolidone (NMP) untuk membentuk pasta, kemudian dideposisikan pada *nickel foam* (1×1 cm²) menggunakan metode *drop casting*, dan dikeringkan dalam oven vakum pada 100°C selama 12 jam [23].

Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa karbon aktif batang jagung memiliki pori-pori dengan ukuran tidak seragam dan lubang yang dalam. Analisis EDX menunjukkan bahwa karbon aktif mengandung 54,82% karbon dan 34,56% oksigen, dengan sisa unsur lainnya seperti natrium (Na), nitrogen (N), dan aluminium (Al) dalam jumlah kecil. Hasil FTIR menunjukkan keberadaan gugus O–H, C–H aromatik, C=N, dan C=O, yang berkontribusi terhadap sifat elektrokimia karbon aktif. Dari hasil uji BET, karbon aktif batang jagung memiliki luas permukaan spesifik 117,973 m²/g, dengan diameter pori rata-rata 1,730 nm dan volume pori total 0,1021 cm³/g. Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen menunjukkan bahwa karbon aktif ini memiliki struktur mikropori dominan dengan sedikit mesopori, yang berperan dalam penyimpanan muatan listrik pada elektroda superkapasitor.

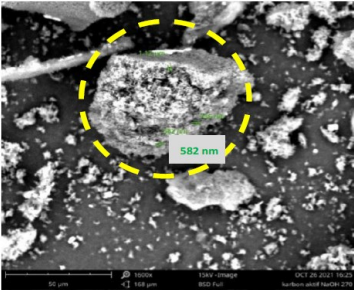
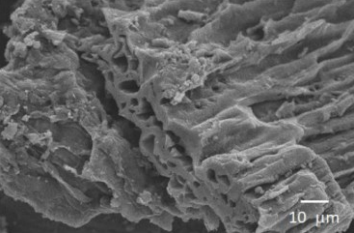
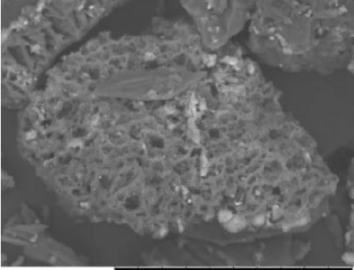
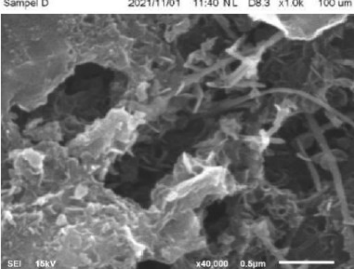
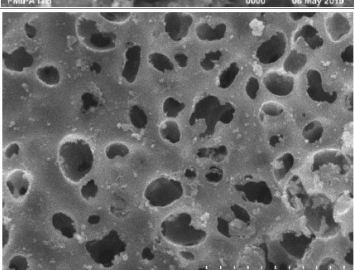
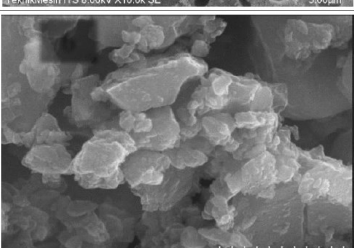
Pengujian sifat elektrokimia dilakukan menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV), *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD), dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dalam sistem tiga elektroda, dengan *nickel foam* sebagai *current collector*, platinum mesh sebagai elektroda pembantu, dan Ag/AgCl sebagai elektroda pembanding, serta larutan KOH 3M sebagai elektrolit. Hasil CV menunjukkan kurva persegi panjang yang stabil, yang menunjukkan karakteristik ideal untuk superkapasitor. Uji GCD menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 25,32 F/g pada rapat arus 1A/g, serta rapat daya 225,2 W/kg dan rapat energi 0,863 Wh/kg.

6. Ampas Biji Kopi Robusta

Karbon aktif dari ampas biji kopi robusta disintesis melalui proses karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan NaOH. Konsentrasi NaOH divariasikan pada 0,2 M, 0,3 M, dan 0,4 M untuk mengoptimalkan luas permukaan serta distribusi pori pada karbon aktif [24]. Proses sintesis diawali dengan pencucian dan pengeringan ampas biji kopi pada suhu ruang, diikuti dengan pemanasan dalam oven pada suhu 110°C selama 3 jam. Setelah dikeringkan, sampel digiling dan diayak menggunakan mesh 38 μ m. Aktivasi kimia dilakukan dengan merendam sampel dalam larutan NaOH selama 3 jam pada suhu 80°C, kemudian dikeringkan dalam oven pada 110°C selama 24 jam. Sampel karbon aktif yang telah dikeringkan kemudian ditekan menjadi pelet menggunakan *hydraulic press* dengan tekanan 8 ton selama 2 menit. Karbonisasi dilakukan dalam furnace dengan pemanasan bertahap: 400°C (1 jam), 600°C (1 jam), dan 800°C (1,5 jam) dengan laju pemanasan 5°C/menit. Setelah karbonisasi, karbon aktif diuji sifat elektrokimianya menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) [24].

Perbandingan hasil karakterisasi SEM dari keempat biomassa tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Hasil SEM Karbon Aktif dari Berbagai Biomassa

Biomassa	Citra SEM	Struktur Pori	Referensi
Kulit pisang kepok		Pori berkembang dengan baik tetapi masih ada struktur padat	[19]
Kulit durian		Struktur berpori, sebagian besar adalah mikropori dengan ukuran rata-rata 1,11 nm	[20]
Sekam padi		Terbentuk banyak pori	[21]
Tandan kosong kelapa sawit		Terbentuk banyak mikropori dan tersebar merata pada permukaan karbon	[22]
Batang jagung		Terbentuk banyak mikropori dan sedikit mesopori, dengan ukuran pori rata-rata 1,730 nm	[23]
Ampas biji kopi robusta		Terbentuk banyak pori, dengan ukuran pori rata-rata 4,433 nm	[24]

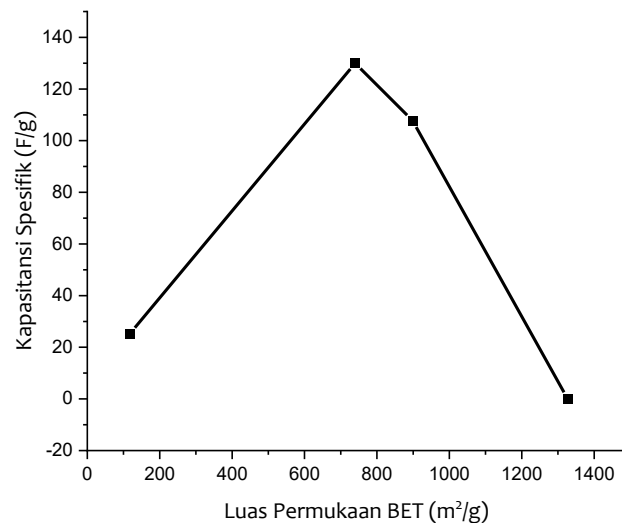
Hasil pengukuran menunjukkan bahwa karbon aktif dengan aktivasi NaOH 0,3 M memiliki luas permukaan spesifik tertinggi sebesar 739,911 m²/g, dengan struktur pori didominasi oleh mesopori, seperti yang ditunjukkan oleh kurva isoterm adsorpsi-desorpsi tipe IV. Kandungan unsur berdasarkan analisis EDX menunjukkan dominasi unsur karbon (49,37%), dengan unsur lainnya seperti oksigen (21,35%), natrium (5,38%), dan nitrogen (10,16%). Hasil pengujian sifat elektrokimia menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV) diperoleh bahwa karbon aktif dari ampas biji kopi memiliki kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 130 F/g pada konsentrasi NaOH 0,3 M [24].

Adapun perbandingan hasil karakterisasi karbon aktif dari keempat biomassa tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Karakterisasi Karbon Aktif dari Berbagai Biomassa

Biomassa	Metode Aktivasi	Luas Permukaan BET (m ² /g)	Kapasitansi Spesifik	Referensi
Kulit pisang kepok	NaOH	-	47,4 μ F	[19]
Kulit durian	ZnCl ₂	1327	18 mF/g	[20]
Sekam padi	KOH	-	8,56 F/g	[21]
Tandan kosong kelapa sawit	KOH	898,229	107,83 F/g	[22]
Batang jagung	NaOH	117,973	25,32 F/g	[23]
Ampas biji kopi robusta	NaOH	739,911	130 F/g	[24]

Grafik hubungan antara luas permukaan BET dan kapasitansi spesifik dari berbagai jenis karbon aktif biomassa ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik hubungan antara luas permukaan BET dan kapasitansi spesifik

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa terdapat korelasi antara luas permukaan spesifik dan kapasitansi spesifik karbon aktif berbasis biomassa, meskipun hubungan tersebut tidak sepenuhnya linier. Ampas biji kopi robusta menunjukkan kapasitansi spesifik tertinggi (130 F/g) dengan luas permukaan 739,911 m²/g, sedangkan tandan kosong kelapa sawit memiliki luas permukaan lebih besar (898,229 m²/g) dengan kapasitansi spesifik yang sedikit lebih rendah (107,83 F/g). Secara umum, tren yang diamati menunjukkan bahwa material dengan luas permukaan yang lebih tinggi cenderung memiliki kapasitansi spesifik yang lebih besar. Secara elektrokimia, karbon aktif dengan luas permukaan tinggi memungkinkan terbentuknya *electrical double layer* yang lebih luas pada antarmuka elektroda dan elektrolit. Hal ini meningkatkan jumlah ion elektrolit yang dapat terserap, sehingga memperbesar kemampuan penyimpanan muatan dan berkontribusi pada peningkatan kapasitansi spesifik [25], [26], [27].

Namun demikian, hasil yang diperoleh pada karbon dari kulit durian menunjukkan adanya penyimpangan dari tren tersebut. Meskipun memiliki luas permukaan tertinggi dalam studi ini (1327 m²/g), kapasitansi spesifiknya justru tergolong rendah (18 mF/g). Ketidaksesuaian ini dapat dijelaskan oleh dominasi mikropori berukuran sempit dan distribusi pori yang tidak merata, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1. Mikropori yang berukuran sempit dapat membatasi difusi ion ke dalam struktur internal

karbon. Untuk kinerja yang optimal, keseimbangan mikropori dan mesopori sangat penting, karena pori-pori yang lebih besar dapat memfasilitasi transpor ion sementara pori-pori yang lebih halus meningkatkan efisiensi penyimpanan muatan [26], [28]. Selain struktur pori, jenis aktivator kimia yang digunakan dalam proses sintesis karbon aktif juga berpengaruh signifikan terhadap karakteristik struktural dan performa elektrokimia material. Aktivator seperti KOH, NaOH, dan ZnCl_2 umumnya digunakan untuk meningkatkan porositas dan luas permukaan elektroda berbasis karbon, sehingga meningkatkan kinerja elektrokimia mereka. Tandan kosong kelapa sawit (TKS) yang diaktivasi menggunakan KOH, menghasilkan luas permukaan sebesar $898,229 \text{ m}^2/\text{g}$ dan kapasitansi spesifik yang tinggi yaitu $107,83 \text{ F/g}$. Kinerja yang unggul ini dapat dikaitkan dengan kecenderungan KOH yang lebih besar untuk menghasilkan struktur yang sangat berpori dengan luas permukaan yang lebih besar, memfasilitasi aksesibilitas ion dan penyimpanan muatan yang lebih baik [29].

Sementara itu, aktivasi dengan NaOH menunjukkan hasil yang bervariasi. Ampas biji kopi yang diaktivasi NaOH mampu mencapai kapasitansi spesifik tertinggi (130 F/g), meskipun luas permukaannya tidak sebesar TKS. Hasil ini mengindikasikan bahwa faktor lain seperti gugus fungsional permukaan dan konektivitas pori juga memainkan peran penting. Di sisi lain, karbon dari batang jagung yang juga menggunakan aktivator NaOH hanya menghasilkan kapasitansi sebesar $25,32 \text{ F/g}$, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh luas permukaan yang lebih rendah ($117,973 \text{ m}^2/\text{g}$) dan struktur pori yang kurang optimal. Perbedaan performa ini juga dapat dijelaskan dari sifat kimia masing-masing aktivator. KOH diketahui memiliki konduktivitas ionik yang lebih tinggi dibandingkan NaOH, sehingga lebih efektif dalam meningkatkan efisiensi pengangkutan muatan dalam struktur karbon [30]. Adapun ZnCl_2 , meskipun dapat menghasilkan luas permukaan tinggi seperti pada karbon dari kulit durian, hasilnya tidak selalu diikuti oleh peningkatan kapasitansi akibat distribusi pori yang kurang ideal. Dengan demikian, data dalam studi ini memperkuat bukti literatur bahwa jenis aktivator kimia memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik pori dan performa elektrokimia karbon aktif berbasis biomassa. Temuan dalam studi ini menunjukkan bahwa kinerja elektrokimia karbon aktif tidak hanya ditentukan oleh luas permukaan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh distribusi pori dan aktivator kimia yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan biomassa dan metode aktivasi menjadi faktor penting dalam optimasi material elektroda superkapasitor, dengan ampas biji kopi robusta dan tandan kosong kelapa sawit sebagai kandidat yang menjanjikan karena kombinasi luas permukaan tinggi dan kapasitansi spesifik yang baik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian terhadap karbon aktif dari berbagai sumber biomassa lokal seperti kulit pisang kepok, kulit durian, sekam padi, tandan kosong kelapa sawit, batang jagung dan ampas biji kopi robusta, diperoleh bahwa sifat fisik dan elektrokimia material sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa dan metode aktivasi yang digunakan. Karbon aktif dari ampas biji kopi robusta menunjukkan performa paling unggul dengan kapasitansi spesifik mencapai 130 F/g dan luas permukaan $739,911 \text{ m}^2/\text{g}$, disusul oleh karbon dari tandan kosong kelapa sawit. Sementara itu, kulit durian memiliki luas permukaan tertinggi ($1327 \text{ m}^2/\text{g}$), namun kapasitansinya rendah, menunjukkan bahwa luas permukaan saja tidak cukup tanpa struktur pori yang mendukung difusi ion. Hubungan antara luas permukaan, struktur pori, dan kapasitansi spesifik menjadi faktor kunci dalam menentukan performa superkapasitor. Aktivasi kimia, khususnya menggunakan NaOH atau KOH, terbukti efektif dalam meningkatkan porositas dan luas permukaan karbon aktif. Oleh karena itu, kombinasi antara jenis biomassa, metode aktivasi, dan rekayasa struktur pori perlu dioptimalkan untuk menghasilkan material elektroda dengan performa tinggi.

5. REFERENSI

- [1] Y. Yang, S. Xia, P. Huang, and J. Qian, "Energy transition: Connotations, mechanisms and effects," *Energy Strategy Reviews*, vol. 52, p. 101320, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101320.
- [2] H. J. Kan and L. N. Tan, "The Influence of Wind-Solar Hybrid Generation System on Transmission Service Rate," *AMR*, vol. 1070–1072, pp. 1472–1476, Dec. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1070-1072.1472.
- [3] M. Zhang and L. Peng, "Research progress of biomass-derived carbon for the supercapacitors," *Mater. Res. Express*, vol. 11, no. 1, p. 012004, Jan. 2024, doi: 10.1088/2053-1591/ad1013.
- [4] Z. Li, D. Guo, Y. Liu, H. Wang, and L. Wang, "Recent advances and challenges in biomass-derived porous carbon nanomaterials for supercapacitors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 397, p. 125418, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.125418.
- [5] Z. Zhai et al., "A review of carbon materials for supercapacitors," *Materials & Design*, vol. 221, p. 111017, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111017.
- [6] Y. Liu, J. Chen, B. Cui, P. Yin, and C. Zhang, "Design and Preparation of Biomass-Derived Carbon Materials for Supercapacitors: A Review," *C*, vol. 4, no. 4, p. 53, Sep. 2018, doi: 10.3390/c4040053.
- [7] Jiunn Boon Yong, Lian See Tan, and Jully Tan, "Comparative life cycle assessment of biomass-based and coal-based activated carbon production," *PROGEE*, vol. 20, no. 1, pp. 1–15, Aug. 2022, doi: 10.37934/progee.20.1.115.
- [8] E. Taer, R. Taslim, Z. Aini, S. D. Hartati, and W. S. Mustika, "Activated carbon electrode from banana-peel waste for supercapacitor applications," presented at the THE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THEORETICAL AND APPLIED PHYSICS (THE 6th ICTAP), Makassar, Indonesia, 2017, p. 040004. doi: 10.1063/1.4973093.

- [9] C. Quan, R. Su, and N. Gao, "Preparation of activated biomass carbon from pine sawdust for supercapacitor and CO₂ capture," *Int J Energy Res*, vol. 44, no. 6, pp. 4335–4351, May 2020, doi: 10.1002/er.5206.
- [10] R. Maniarasu, S. K. Rathore, and S. Murugan, "Biomass-based activated carbon for CO₂ adsorption—A review," *Energy & Environment*, vol. 34, no. 5, pp. 1674–1721, Aug. 2023, doi: 10.1177/0958305X221093465.
- [11] W. Liu, J. Mei, G. Liu, Q. Kou, T. Yi, and S. Xiao, "Nitrogen-Doped Hierarchical Porous Carbon from Wheat Straw for Supercapacitors," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 6, no. 9, pp. 11595–11605, Sep. 2018, doi: 10.1021/acssuschemeng.8b01798.
- [12] V. Goodwin, P. Jitreewas, T. Sesuk, P. Limthongkul, and S. Charojrochkul, "Development of Modified Mesoporous Carbon from Palm oil Biomass for Energy Storage Supercapacitor Application," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1199, no. 1, p. 012003, Jul. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1199/1/012003.
- [13] A. Jain, C. Xu, S. Jayaraman, R. Balasubramanian, J. Y. Lee, and M. P. Srinivasan, "Mesoporous activated carbons with enhanced porosity by optimal hydrothermal pre-treatment of biomass for supercapacitor applications," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 218, pp. 55–61, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.micromeso.2015.06.041.
- [14] J. Wang et al., "Biomass derived carbon for energy storage devices," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 6, pp. 2411–2428, 2017, doi: 10.1039/C6TA08742F.
- [15] G. Zhong et al., "Biomass-Derived Nitrogen-Doped Porous Carbons Activated by Magnesium Chloride as Ultrahigh-Performance Supercapacitors," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 50, pp. 21756–21767, Dec. 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c04173.
- [16] S. Ghosh et al., "Natural biomass derived hard carbon and activated carbons as electrochemical supercapacitor electrodes," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, p. 16315, Nov. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-52006-x.
- [17] Z. Li et al., "Carbonized Chicken Eggshell Membranes with 3D Architectures as High-Performance Electrode Materials for Supercapacitors," *Advanced Energy Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 431–437, Apr. 2012, doi: 10.1002/aenm.201100548.
- [18] A. B. Namazi, D. G. Allen, and C. Q. Jia, "Benefits of microwave heating method in production of activated carbon," *Can J Chem Eng*, vol. 94, no. 7, pp. 1262–1268, Jul. 2016, doi: 10.1002/cjce.22521.
- [19] M. Reza, L. Ernawati, M. D. Pusfitasari, N. Sylvia, A. H. Noor, and L. G. Ali, "KARAKTERISASI KARBON AKTIF DARI KULIT PISANG KEPOK SEBAGAI SUPERKAPASITOR," vol. 16, no. 2, 2022.
- [20] P. Febriyanto, J. Jerry, A. W. Satria, and H. Devianto, "PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI KARBON AKTIF BERBAHAN BAKU LIMBAH KULIT DURIAN SEBAGAI ELEKTRODA SUPERKAPASITOR," *JIP UNTIRTA*, vol. 8, no. 1, p. 19, Jun. 2019, doi: 10.36055/jip.v8i1.5439.
- [21] A. Nurul Huda, I. Lestari, and S. Hidayat, "Pemanfaatan Karbon Aktif dari Sekam Padi Sebagai Elektroda Superkapasitor," *JlIF*, vol. 6, no. 2, pp. 102–113, Aug. 2022, doi: 10.24198/jlif.v6i2.39639.
- [22] A. D. Hardi, R. Joni, S. Syukri, and H. Aziz, "Pembuatan Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Elektroda Superkapasitor," *JFU*, vol. 9, no. 4, pp. 479–486, Jan. 2021, doi: 10.25077/jfu.9.4.479-486.2020.
- [23] O. N. Tetra, S. Syukri, A. Santoni, D. Deswati, N. Fajarandi, and E. Emriadi, "Sintesis Karbon Aktif Dari Batang Jagung(Zea mays L.) dengan Metoda Dehidrasi Asam Untuk Aplikasi Elektroda Superkapasitor," *JFU*, vol. 13, no. 6, pp. 834–842, Nov. 2024, doi: 10.25077/jfu.13.6.834-842.2024.
- [24] R. Novitra, H. Aziz, and E. Taer, "Supercapactors based on active carbon from spent arabica coffee ground using NaOH activators," *J. Aceh Phys. Soc.*, vol. 11, no. 1, pp. 33–40, Jan. 2022, doi: 10.24815/jacps.v11i1.22227.
- [25] A. Jamaluddin, A. D. Nursanti, A. Nur'aini, R. R. M. Putri, and M. U. Arshad, "Graphene as an Active Material for Supercapacitors: A Machine Learning Approach," *Indonesian J Appl Phys*, vol. 13, no. 2, p. 305, Nov. 2023, doi: 10.13057/ijap.v13i2.76678.
- [26] H. J. Zhao, D. L. Zhao, J. M. Zhang, and D. D. Zhang, "Ordered Mesoporous Carbon Nano Spheres as Electrode Material for Supercapacitors," *AMM*, vol. 320, pp. 661–664, May 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.320.661.
- [27] G. G. Jang, B. Song, K. Moon, C.-P. Wong, J. K. Keum, and M. Z. Hu, "Particle size effect in porous film electrodes of ligand-modified graphene for enhanced supercapacitor performance," *Carbon*, vol. 119, pp. 296–304, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.carbon.2017.04.023.
- [28] Z. Chen et al., "High-Performance Supercapacitors Based on Hierarchically Porous Graphite Particles," *Advanced Energy Materials*, vol. 1, no. 4, pp. 551–556, Jul. 2011, doi: 10.1002/aenm.201100114.
- [29] L. B. Fantin, D. S. Yoshikawa, E. Galego, and R. N. Faria, "Effects of Electrolyte Substitution on the Specific Capacitance and Equivalent Series Resistance of Energy Storage Electrochemical Supercapacitors," *MSF*, vol. 1012, pp. 131–135, Oct. 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1012.131.
- [30] D. Jain, S. K. Tripathi, J. Kanungo, and B. L. Gupta, "Fabrication and characterization of supercapacitor comprising mango kernel derived electrode under different electrolyte systems," *Energy Storage*, vol. 5, no. 3, p. e465, Apr. 2023, doi: 10.1002/est2.465.