



Pengaruh Modifikasi Permukaan Karbon Aktif Sekam Padi Menggunakan HNO₃ terhadap Kapasitansi Spesifik dengan Elektrolit HCl, KOH, dan KCl

Nuritasari Azis^{1*}, Triana Febrianti², Widi Aprilia Ta'bi³

Politeknik Industri Logam Morowali, Indonesia¹

Universitas Muhammadiyah Bulukumba, Indonesia²

Universitas Kristen Indonesia Paulus, Indonesia³

Email: nuritasari@pilm.ac.id*

Abstrak

Karbon aktif berbasis biomassa memiliki potensi sebagai material elektroda pada sistem penyimpanan energi karena bersifat terbarukan dan ramah lingkungan, namun kinerjanya masih didominasi oleh mekanisme kapasitansi lapisan ganda listrik (Electric Double Layer Capacitance/EDLC). Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh modifikasi permukaan karbon aktif sekam padi menggunakan HNO₃ terhadap kapasitansi spesifik elektroda pasta karbon pada berbagai jenis elektrolit. Karbon aktif disintesis melalui tahapan karbonisasi, ekstraksi silika, aktivasi kimia menggunakan H₃PO₄, dan modifikasi permukaan menggunakan HNO₃. Karakterisasi material dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), Scanning Electron Microscope (SEM), Surface Area and Porosity dengan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET), Fourier Transform Infra-Red (FTIR), serta titrasi Boehm. Kinerja elektrokimia elektroda dievaluasi menggunakan metode voltametri siklik dengan elektrolit HCl, KOH, dan KCl pada konsentrasi 0,5 M. Hasil FTIR dan titrasi Boehm menunjukkan peningkatan jumlah gugus oksigen pada permukaan karbon aktif setelah modifikasi. Pengujian elektrokimia menunjukkan bahwa jenis elektrolit memengaruhi nilai kapasitansi spesifik, dengan elektrolit KOH menghasilkan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 31,5094 mF/g pada elektroda karbon aktif termodifikasi (KAEM). Peningkatan kapasitansi ini dikaitkan dengan kontribusi mekanisme pseudokapasitansi akibat interaksi gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif dengan ion OH⁻, sedangkan pada elektrolit HCl dan KCl mekanisme penyimpanan muatan lebih didominasi oleh kapasitansi lapisan ganda listrik.

Kata kunci: karbon aktif sekam padi; modifikasi permukaan HNO₃; kapasitansi spesifik; voltametri siklik; elektrolit KOH

Abstract

Biomass-based activated carbon has potential as an electrode material in energy storage systems because it is renewable and environmentally friendly, but its performance is still dominated by the Electric Double Layer Capacitance (EDLC) mechanism. This study aims to examine the effect of surface modification of rice husk activated carbon using HNO₃ on the specific capacitance of carbon paste electrodes in various types of electrolytes. Activated carbon was synthesized through the stages of carbonization, silica extraction, chemical activation using H₃PO₄, and surface modification using HNO₃. Material characterization was carried out using X-Ray Fluorescence (XRF), Scanning Electron Microscope (SEM), Surface Area and Porosity with the Brunauer-Emmett-Teller (BET) method, Fourier Transform Infra-Red (FTIR), and Boehm titration. The electrochemical performance of the electrode was evaluated using the cyclic voltammetry method with HCl, KOH, and KCl electrolytes at a concentration of 0.5 M. FTIR and Boehm titration results showed an increase in the number of oxygen groups on the surface of activated carbon after modification. Electrochemical testing showed that the type of electrolyte affected the specific capacitance value, with KOH electrolyte producing the highest specific capacitance of 31.5094 mF/g on the modified activated carbon electrode (KAEM). This increase in capacitance was attributed to the contribution of the pseudocapacitance mechanism due to the interaction of oxygen functional groups on the surface of activated carbon with OH⁻ ions, while in HCl and KCl electrolytes the charge storage mechanism was dominated by electric double layer capacitance.

Keywords: rice husk activated carbon; HNO₃ surface modification; specific capacitance; cyclic voltammetry; KOH electrolyte

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang efisien, stabil, dan ramah lingkungan terus meningkat seiring dengan berkembangnya perangkat elektronik portabel, kendaraan listrik, serta pemanfaatan energi terbarukan. Sistem penyimpanan energi dituntut mampu menyimpan dan melepaskan energi listrik dengan cepat, memiliki umur pakai yang panjang, serta tingkat keamanan yang baik. Dalam konteks tersebut, pengembangan material elektroda dengan kinerja elektrokimia yang baik menjadi salah satu fokus utama penelitian di bidang material dan energi (Du dkk., 2023; Patel dkk., 2024).

Salah satu perangkat penyimpanan energi yang banyak dikembangkan adalah superkapasitor, karena memiliki densitas daya yang tinggi serta stabilitas siklus yang baik dibandingkan baterai konvensional. Kinerja superkapasitor sangat dipengaruhi oleh material elektroda yang digunakan, dimana karbon aktif menjadi material yang paling umum diaplikasikan karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, serta proses sintesis yang relatif sederhana.

Selain itu, pemanfaatan biomassa sebagai sumber karbon aktif semakin mendapat perhatian karena bersifat terbarukan dan ramah lingkungan, dengan sekam padi sebagai salah satu limbah pertanian yang berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku karbon aktif (Lobato-Peralta dkk., 2024; Li dkk., 2026). Meskipun karbon aktif berbasis biomassa memiliki berbagai keunggulan, kinerja elektrokimianya masih dipengaruhi oleh mekanisme penyimpanan muatan yang dominan.

Pada umumnya, penyimpanan muatan pada karbon aktif didominasi oleh kapasitansi lapisan ganda listrik (Electric Double Layer Capacitance/EDLC), yang terjadi melalui adsorpsi ion pada permukaan karbon tanpa melibatkan reaksi redoks. Akibatnya, peningkatan kapasitansi spesifik sering kali hanya bergantung pada pengembangan luas permukaan dan struktur pori material karbon aktif (Kierzek dan Gryglewicz, 2020; Li dkk., 2022). Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk meningkatkan kinerja elektrokimia karbon aktif adalah modifikasi permukaan melalui oksidasi kimia, termasuk menggunakan HNO₃.

Perlakuan ini dilaporkan mampu meningkatkan jumlah gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan karbon, seperti karboksilat, fenol, dan kuinon, yang dapat meningkatkan sifat hidrofilik material serta berperan dalam interaksi elektrokimia antara elektroda dan elektrolit. Selain sifat permukaan elektroda, jenis elektrolit juga diketahui memengaruhi respon elektrokimia elektroda karbon melalui perbedaan karakteristik ion, seperti ukuran ion, mobilitas, dan sifat asam-basa lingkungan elektrokimia (Taer dkk., 2022; Guan dkk., 2025).

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji respon kapasitansi spesifik karbon aktif sekam padi yang dimodifikasi menggunakan HNO₃ pada berbagai jenis elektrolit, yaitu HCl, KOH, dan KCl. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh interaksi antara gugus fungsi permukaan karbon aktif dan karakteristik elektrolit terhadap mekanisme penyimpanan muatan pada elektroda karbon aktif berbasis biomassa.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sekam padi sebagai bahan baku, serta bahan kimia pro analisis (Merck) yang terdiri atas KOH, H₃PO₄ 85%, HNO₃ 65%,

NaHCO₃, Na₂CO₃, NaOH, HCl 37%, KCl, indikator fenolftalein, dan indikator methyl orange. Bahan pendukung yang digunakan antara lain aquades, elektroda Ag/AgCl dan Pt, kawat tembaga dan platina, aluminium foil, parafilm, lilin parafin, kertas pH universal, serta kertas saring Whatman No. 42.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas laboratorium, oven, tanur/muffle furnace, lumpang dan alu porselin, ayakan 100 mesh, neraca analitik, hotplate, pengaduk magnetik, corong Buchner dengan pompa vakum, desikator, shaker, serta statif dan klem. Karakterisasi material dilakukan menggunakan X-ray Fluorescence (Thermo Fisher XRF), Scanning Electron Microscope (EVO MA 10), Surface Area and Porosity (Micromeritics TriStar II), Fourier Transform Infra-Red (Shimadzu Prestige-21), sedangkan pengujian elektrokimia dilakukan menggunakan Potensiostat (EA161).

Sekam padi dicuci dengan air sampai bersih, dikeringkan di bawah sinar matahari, dilanjutkan dalam oven pada suhu 110°C selama 1 jam. Sekam padi yang sudah kering dimasukkan dalam cawan porselin, lalu dipanaskan dalam tanur pada suhu 350°C selama 1 jam. Setelah itu, karbon sekam padi didinginkan, dihaluskan, dan diayak dengan ukuran 100 mesh (Huda dkk., 2022).

Karbon hasil karbonisasi direaksikan dengan larutan KOH 4 M dengan perbandingan 1:10 (b/v) dan dipanaskan hingga mendidih disertai pengadukan selama 1 jam. Campuran kemudian disaring dan residunya dicuci dengan akuades hingga pH netral, serta dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 1 jam sehingga diperoleh karbon setelah ekstraksi (KE) (Mahyuda dkk., 2024). Selanjutnya, karbon sebelum dan setelah proses ekstraksi dikarakterisasi menggunakan XRF.

Karbon sekam padi setelah ekstraksi (KE) direaksikan dengan larutan aktivator H₃PO₄ 25% dengan perbandingan 1:5 (b/v) dan didiamkan selama 24 jam. Campuran kemudian disaring dan residunya dicuci dengan akuades hingga pH netral, serta dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 1 jam sehingga diperoleh karbon aktif setelah ekstraksi (KAE) (Dwityaningsih dkk., 2023). Selanjutnya, karbon sebelum dan setelah proses aktivasi dikarakterisasi menggunakan SEM dan Surface Area and Porosity dengan metode BET.

Karbon aktif hasil aktivasi (KAE) selanjutnya dimodifikasi menggunakan oksidator HNO₃ 65% dengan perbandingan 1:5 (b/v). Campuran dikocok dengan kecepatan 120 rpm selama 24 jam, kemudian disaring, dan residunya dicuci dengan akuades hingga pH netral, serta dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 1 jam sehingga diperoleh karbon aktif setelah ekstraksi-modifikasi (KAEM) (Zakir dkk., 2018). Selanjutnya, karbon aktif sebelum dan setelah modifikasi dikarakterisasi menggunakan FTIR dan titrasi Boehm.

Badan elektroda dibuat dengan cara menghubungkan kawat tembaga dan platina menggunakan solder uap. Kemudian dimasukkan ke dalam pipet dan direkatkan menggunakan parafilm. Karbon aktif dicampur dengan lilin parafin dengan perbandingan 1:1 (b/b) dan diaduk sampai homogen menggunakan spatula dalam cawan petri. Setelah itu, pasta karbon dimasukkan ke dalam badan elektroda dengan cara ditekan menggunakan spatula agar memadat dan merata (Odja dkk., 2024).

Pengujian dilakukan menggunakan alat Potensiostat dengan sistem tiga elektroda, yaitu elektroda pasta karbon sebagai elektroda kerja, elektroda Pt sebagai elektroda pembantu, dan elektroda Ag/AgCl sebagai elektroda pembanding. Pengujian dilakukan menggunakan metode

siklik voltametri dengan laju scan 0,1 V/s dalam larutan elektrolit 0,5 M, masing-masing HCl, KOH, dan KCl. Dari pengujian ini diperoleh voltamogram hubungan antara tegangan dan arus, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai kapasitansi spesifik elektroda (Zakir dkk., 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

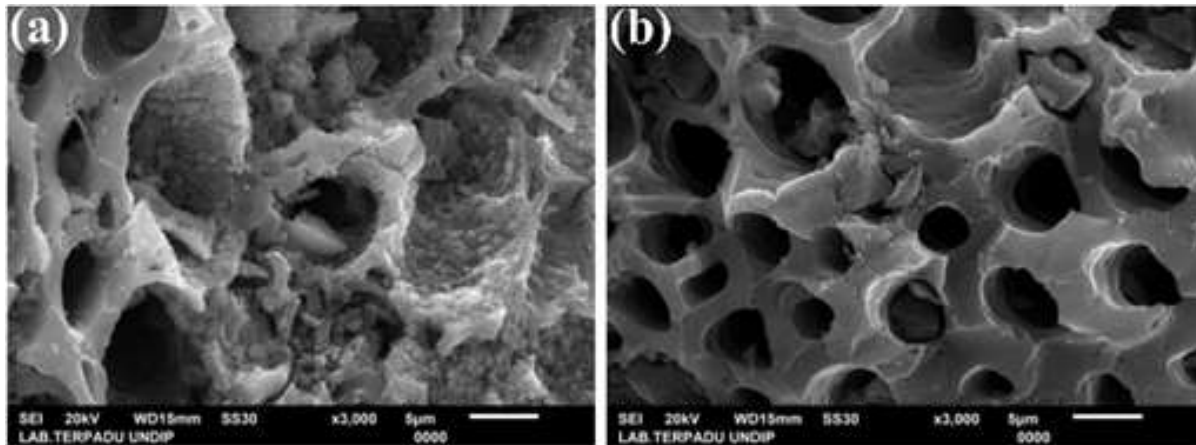
Sintesis Karbon Aktif dari Sekam Padi

Sintesis karbon aktif dari sekam padi dilakukan melalui tahapan karbonisasi, ekstraksi silika, dan aktivasi kimia. Proses karbonisasi pada suhu 350°C selama 1 jam bertujuan untuk menghilangkan komponen volatil dan mengonversi biomassa menjadi struktur karbon amorf yang masih mengandung komponen anorganik, terutama silika. Kandungan silika yang tinggi berpotensi menutupi pori-pori karbon sehingga dapat menghambat pengembangan luas permukaan dan porositas, sehingga diperlukan perlakuan lanjutan berupa ekstraksi silika untuk meningkatkan karakteristik pori karbon (Alam dkk., 2020; Sun dkk., 2025). Untuk mengevaluasi kandungan senyawa oksida pada karbon hasil karbonisasi serta efektivitas proses ekstraksi silika, dilakukan analisis XRF yang hasilnya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil XRF kandungan senyawa oksida dalam karbon sekam padi sebelum dan setelah ekstraksi

Senyawa oksida	Sebelum ekstraksi (%)	Setelah ekstraksi (%)
SiO₂	94,20	3,03
P₂O₅	2,15	-
K₂O	1,77	59,62
CaO	1,10	35,17
Fe₂O₃	0,305	0,83
MnO	0,220	1,13
ZnO	0,0326	0,161
Rb₂O	0,0158	-
Nb₂O₅	0,0102	0,0263
MoO₃	0,0078	0,0195
RuO₄	-	0,0074
Sb₂O₃	-	0,0057

Hasil analisis XRF pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kandungan SiO₂ pada karbon sebelum ekstraksi sangat dominan, yaitu sebesar 94,20%. Setelah proses ekstraksi menggunakan larutan KOH, kandungan SiO₂ menurun secara signifikan menjadi 3,03%, yang mengindikasikan bahwa proses ekstraksi silika berlangsung secara efektif. Penurunan kandungan silika ini menunjukkan terbukanya pori-pori karbon yang sebelumnya tertutup oleh senyawa anorganik, sehingga diharapkan dapat mendukung pengembangan struktur pori pada tahap aktivasi selanjutnya (Liu dkk., 2019; Sun dkk., 2025). Perubahan morfologi permukaan karbon setelah proses aktivasi dianalisis menggunakan SEM, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil SEM (a) karbon setelah ekstraksi (KE), (b) karbon aktif setelah ekstraksi (KAE)

Hasil SEM pada Gambar 1 memperlihatkan perbedaan morfologi yang jelas antara karbon setelah ekstraksi (KE) dan karbon aktif setelah ekstraksi (KAE). Permukaan KE masih tampak relatif padat dengan pori yang terbatas, sedangkan KAE menunjukkan struktur permukaan dengan pori-pori yang lebih berkembang dan terbuka. Perubahan morfologi ini mengindikasikan terbentuknya jaringan pori akibat proses aktivasi menggunakan H₃PO₄, yang berperan dalam memperbesar dan membuka pori karbon (Ma dkk., 2019; Riyanto dkk., 2021). Untuk mengonfirmasi perubahan morfologi tersebut secara kuantitatif, dilakukan analisis luas permukaan spesifik dan karakteristik pori menggunakan metode BET yang hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis BET karbon setelah ekstraksi (KE) dan karbon aktif setelah ekstraksi (KAE)

Sampel	S _{BET} (m ² /g)	V _{pori} (cm ³ /g)	d _{pori} (nm)
KE	143,695	0,124	3,4414
KAE	148,448	0,154	3,6376

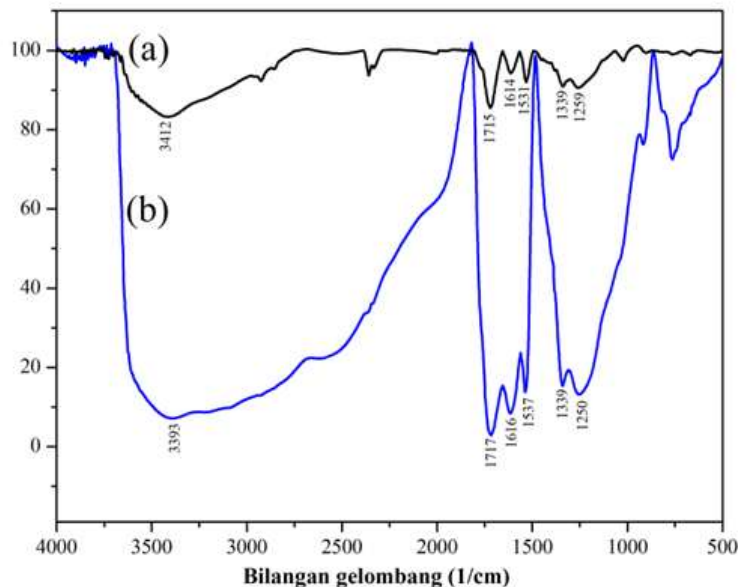
Hasil analisis BET pada Tabel 2 menunjukkan bahwa proses aktivasi menyebabkan peningkatan luas permukaan spesifik dan volume pori KAE dibandingkan KE. Karakteristik fisik ini sangat penting karena luas permukaan dan struktur pori merupakan faktor utama yang memengaruhi performa elektroda superkapasitor dari karbon aktif berbasis biomassa, termasuk sekam padi (Muflihatun, 2025).

Selain itu, ukuran pori yang berada pada rentang mesopori mendukung difusi ion elektrolit secara efisien saat aplikasi elektrokimia, yang secara signifikan dapat meningkatkan kapasitansi spesifik dan kinerja perangkat penyimpanan energi superkapasitor (Abimana dkk., 2024). Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi proses ekstraksi silika dan aktivasi kimia berhasil memperbaiki karakteristik fisik karbon berbasis sekam padi, sehingga berpotensi mendukung kinerja elektroda pada aplikasi superkapasitor.

Modifikasi Permukaan Karbon Aktif Sekam Padi Menggunakan HNO₃

Modifikasi permukaan karbon aktif menggunakan HNO₃ dilakukan untuk meningkatkan jumlah gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan karbon. Penambahan gugus fungsi oksigen dapat meningkatkan sifat hidrofilik karbon aktif, sehingga mempermudah penetrasi ion elektrolit ke dalam pori-pori karbon serta berpotensi memberikan

kontribusi terhadap mekanisme pseudokapasitansi melalui keterlibatan reaksi redoks permukaan (Li dkk., 2020; Wolak dan Orzechowska-Zięba, 2024). Keberadaan dan perubahan gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif dikonfirmasi melalui analisis FTIR dan titrasi Boehm, masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 3.



Gambar 2. Spektrum FTIR (a) karbon aktif setelah ekstraksi (KAE), (b) karbon aktif setelah ekstraksi-modifikasi (KAEM)

Spektrum FTIR pada Gambar 2 menunjukkan pita serapan pada daerah 3393-3412 cm⁻¹ yang berkaitan dengan gugus -OH, pita pada 1715-1717 cm⁻¹ yang mengindikasikan gugus C=O dari karboksilat atau lakton, pita pada 1531-1537 cm⁻¹ yang berkaitan dengan vibrasi ulur C=C aromatik, serta pita pada daerah 1250-1259 cm⁻¹ dan 1339 cm⁻¹ yang berhubungan dengan gugus C-O dari fenol dan lakton. Selain itu, pita serapan pada 1614-1616 cm⁻¹ menunjukkan keberadaan gugus C=O dari kuinon.

Secara umum, KAE dan KAEM memiliki jenis gugus fungsi yang relatif serupa, namun karbon aktif setelah modifikasi menunjukkan intensitas dan ketajaman pita serapan disertai pergeseran bilangan gelombang yang relatif kecil. Perubahan ini mengindikasikan peningkatan jumlah gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan karbon aktif akibat perlakuan HNO₃, sebagaimana juga dilaporkan pada penelitian terdahulu terkait modifikasi permukaan karbon aktif menggunakan oksidator asam kuat (Wolak dan Orzechowska-Zięba, 2024; Derylo-Marczewska dkk., 2025). Hasil FTIR tersebut diperkuat oleh karakterisasi kuantitatif menggunakan metode titrasi Boehm yang hasilnya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Gugus fungsi karbon aktif setelah ekstraksi (KAE) dan karbon aktif setelah ekstraksi-modifikasi (KAEM)

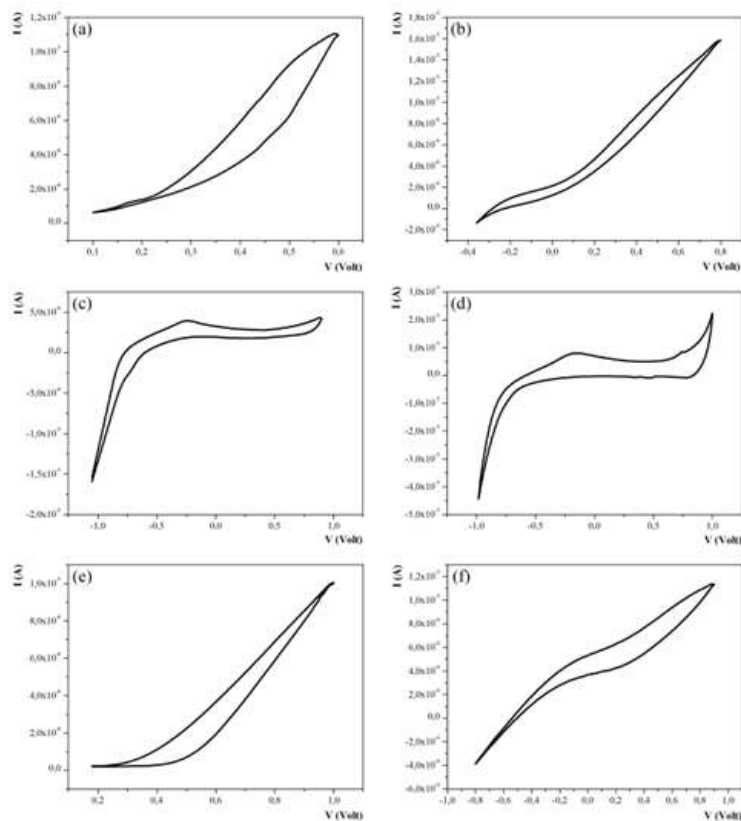
Sampel	Gugus asam (mek/g)				Gugus basa (mek/g)
	Karboksil	Lakton	Fenol	Total	
KAE	0,3784	0,3624	0,1812	0,9220	1,1020
KAEM	0,6802	0,6642	0,2818	1,6262	1,0002

Berdasarkan hasil titrasi Boehm pada Tabel 3, KAEM menunjukkan peningkatan jumlah gugus asam permukaan dibandingkan KAE. Jumlah gugus karboksil, lakton, dan fenol masing-masing meningkat, sehingga total gugus asam bertambah dari 0,9220 menjadi 1,6262 meq/g. Peningkatan ini sejalan dengan penguatan pita serapan gugus -OH, C=O, dan C-O pada spektrum FTIR setelah modifikasi, yang mengonfirmasi bertambahnya gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif. Sementara itu, jumlah gugus basa mengalami sedikit penurunan, yang menunjukkan bahwa perlakuan HNO₃ menyebabkan pergeseran sifat permukaan karbon aktif ke arah lebih asam. Perubahan sifat permukaan ini berpotensi meningkatkan interaksi elektrokimia antara elektroda karbon aktif dan elektrolit, serta mendukung kontribusi pseudokapasitansi pada pengujian elektrokimia selanjutnya (Qiu dkk., 2023).

Penentuan Kapasitansi Spesifik Menggunakan Elektrolit HCl, KOH, dan KCl

Penentuan kapasitansi spesifik elektroda pasta karbon berbasis karbon aktif sekam padi dilakukan menggunakan metode voltametri siklik dengan elektrolit HCl, KOH, dan KCl pada konsentrasi 0,5 M. Respon elektrokimia elektroda dianalisis berdasarkan voltamogram yang dihasilkan yang ditunjukkan pada Gambar 3, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan kapasitansi spesifik untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi permukaan karbon aktif terhadap kinerja penyimpanan muatan.

Berdasarkan Gambar 3, elektroda KAEM secara umum menunjukkan respon arus dan luas kurva voltamogram yang lebih besar dibandingkan KAE, terutama pada penggunaan elektrolit KOH. Pada elektrolit HCl dan KCl, perbedaan luas kurva voltamogram antara KAE dan KAEM relatif lebih kecil, namun masih menunjukkan adanya peningkatan respon elektrokimia setelah proses modifikasi. Perbedaan respon elektrokimia ini kemudian dianalisis secara kuantitatif melalui perhitungan kapasitansi spesifik yang disajikan pada Tabel 4.



Gambar 3. Voltamogram elektroda pasta karbon berbasis karbon aktif sekam padi menggunakan elektrolit 0,5 M (a) KAE-HCl, (b) KAEM-HCl, (c) KAE-KOH, (d) KAEM-KOH, (e) KAE-KCl, (f) KAEM-KCl

Tabel 4. Nilai kapasitansi spesifik karbon aktif setelah ekstraksi (KAE) dan karbon aktif setelah ekstraksi-modifikasi (KAEM) menggunakan elektrolit HCl, KOH, dan KCl dengan konsentrasi 0,5 M

Elektrolit 0,5 M	Cs (mF/g)	
	KAE	KAEM
HCl	4,2230	7,8807
KOH	8,4644	31,5094
KCl	3,6846	6,3182

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa jenis elektrolit memberikan pengaruh terhadap nilai kapasitansi spesifik elektroda pasta karbon, dengan urutan $\text{KOH} > \text{HCl} > \text{KCl}$ pada kedua sampel. Nilai kapasitansi spesifik tertinggi diperoleh pada elektroda KAEM menggunakan elektrolit KOH, yaitu sebesar 31,5094 mF/g, yang meningkat secara signifikan dibandingkan KAE sebesar 8,46 mF/g.

Secara umum, mekanisme penyimpanan muatan pada elektroda karbon aktif berlangsung melalui kapasitansi lapisan ganda listrik, yang dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik serta kemampuan ion elektrolit untuk berdifusi ke dalam pori karbon. Namun demikian, perbedaan nilai kapasitansi yang cukup signifikan pada penggunaan elektrolit KOH mengindikasikan bahwa karakteristik elektrolit turut berperan dalam meningkatkan respon elektrokimia elektroda (Rajasekaran dkk., 2023; Rajagukguk dkk., 2024).

Peningkatan kapasitansi spesifik pada elektrolit KOH diduga berkaitan dengan adanya kontribusi mekanisme pseudokapasitansi yang berasal dari interaksi gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif hasil modifikasi HNO₃ dengan ion OH⁻ dalam lingkungan basa. Gugus

fungsi oksigen seperti karboksilat, fenol, dan kuinon yang telah terkonfirmasi melalui analisis FTIR dan titrasi Boehm berpotensi terlibat dalam reaksi redoks cepat dan reversibel pada permukaan elektroda, sehingga meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan. Sebaliknya, pada elektrolit HCl dan KCl, mekanisme penyimpanan muatan cenderung lebih didominasi oleh kapasitansi lapisan ganda listrik, dengan kontribusi pseudokapasitansi yang relatif lebih kecil akibat keterbatasan interaksi redoks antara ion elektrolit dan gugus fungsi permukaan karbon aktif (Li dkk., 2020; Qiu dkk., 2023).

KESIMPULAN

Modifikasi permukaan karbon aktif sekam padi menggunakan HNO₃ terbukti memengaruhi sifat permukaan material dan meningkatkan kinerja elektrokimia elektroda pasta karbon. Hasil analisis FTIR dan titrasi Boehm menunjukkan adanya peningkatan jumlah gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif setelah modifikasi, yang ditandai dengan bertambahnya gugus asam seperti karboksilat, lakton, dan fenol.

Pengujian elektrokimia menggunakan metode voltametri siklik menunjukkan bahwa jenis elektrolit berpengaruh terhadap nilai kapasitansi spesifik, dengan elektrolit KOH menghasilkan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 31,5094 mF/g pada elektroda KAEM, dibandingkan elektrolit HCl dan KCl. Peningkatan kinerja pada elektrolit KOH dikaitkan dengan adanya kontribusi mekanisme pseudokapasitansi akibat interaksi gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif dengan ion OH⁻, sedangkan pada elektrolit HCl dan KCl mekanisme penyimpanan muatan lebih didominasi oleh kapasitansi lapisan ganda listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abimana, C., Bello, A., Machunda, R., & Jande, Y. A. C. (2024). Understanding the factors influencing the properties of biomass-derived porous carbon and their impacts on electrical double-layer capacitor electrodes: A comprehensive review. *Journal of Renewable Energy*, 2024, Article 1343256. <https://doi.org/10.1155/2024/1343256>
- Alam, M. M., Hossain, A. M., Hossain, D. M., Johir, M. A. H., Hossen, J., Rahman, S. M., Zhou, J. L., Hasan, K. A. T. M., Karmakar, A. K., & Ahmed, M. B. (2020). The potentiality of rice husk-derived activated carbon: From synthesis to application. *Processes*, 8(2), Article 203. <https://doi.org/10.3390/pr8020203>
- Derylo-Marczewska, A., Swiatkowski, A., Trykowski, G., & Biniak, S. (2025). The effect of oxidative modification of activated carbon on adsorption of aromatic compounds from aqueous solutions. *Molecules*, 30(18), Article 3810. <https://doi.org/10.3390/molecules30183810>
- Du, X., Lin, Z., Wang, X., Zhang, K., Hu, H., & Dai, S. (2023). Electrode materials, structural design, and storage mechanisms in hybrid supercapacitors. *Molecules*, 28(17), Article 6432. <https://doi.org/10.3390/molecules28176432>
- Dwityaningsih, R., Rahayu, T. E. P., Handayani, M., & Nurhilal, M. (2023). Pengaruh variasi konsentrasi H₃PO₄ sebagai zat aktivator terhadap karakteristik karbon aktif dari sekam padi. *Infotekmesin*, 14(1), 98–104. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v14i1.1641>
- Guan, L., Li, D., Ji, S., Wei, X., & Meng, F. (2025). Structural regulation and performance enhancement of carbon-based supercapacitors: Insights into electrode material engineering. *Materials*, 18(2), Article 456. <https://doi.org/10.3390/ma18020456>

- Huda, A. N., Lestari, I., & Hidayat, S. (2022). Pemanfaatan karbon aktif dari sekam padi sebagai elektroda superkapasitor. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 6(2), 102–113. <https://doi.org/10.24198/jiif.v6i2.39639>
- Kierzek, K., & Gryglewicz, G. (2020). Activated carbons and their evaluation in electric double-layer capacitors. *Molecules*, 25(18), Article 4255. <https://doi.org/10.3390/molecules25184255>
- Li, A., Xu, J., & Cheng, J. (2026). Recent progress of biomass-derived carbon for supercapacitors: A review. *Batteries*, 12(1), Article 18. <https://doi.org/10.3390/batteries12010018>
- Li, S., Tan, X., Li, H., Gao, Y., Wang, Q., Li, G., & Guo, M. (2022). Investigation on pore structure regulation of activated carbon derived from *Sargassum* and its application in supercapacitor. *Scientific Reports*, 12, Article 10106. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14214-w>
- Li, X., Jiang, Y., Wang, P., Mo, Y., Lai, W., Li, Z., Yu, R., Du, Y., Zhang, X., & Chen, Y. (2020). Effect of the oxygen functional groups of activated carbon on its electrochemical performance for supercapacitors. *New Carbon Materials*, 35(3), 232–243. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(20\)60487-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(20)60487-5)
- Liu, D., Zhang, W., & Huang, W. (2019). Effect of removing silica in rice husk for the preparation of activated carbon for supercapacitor applications. *Chinese Chemical Letters*, 30(6), 1315–1319. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2019.02.031>
- Lobato-Peralta, D. R., Okoye, P. U., & Alegre, C. (2024). A review on carbon materials for electrochemical energy storage applications: State of the art, implementation, and synergy with metallic compounds for supercapacitor and battery electrodes. *Journal of Power Sources*, 617, Article 235140. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235140>
- Ma, P., Wang, S., Wang, T., Wu, J., Xing, X., & Zhang, X. (2019). Effect of bifunctional acid on the porosity improvement of biomass-derived activated carbon for methylene blue adsorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 30119–30129. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06177-9>
- Mahyuda, M., Sirait, R., & Lubis, R. Y. (2024). Pengaruh konsentrasi KOH terhadap karakteristik dan kapasitansi elektroda karbon aktif superkapasitor. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur, dan Energi*, 7(2), 207–213. <https://doi.org/10.30596/rmme.v7i2.19467>
- Muflihatun. (2025). Pemanfaatan karbon aktif berbasis biomassa lokal sebagai material elektroda superkapasitor: Review. *Newton-Maxwell Journal of Physics*, 6(1), 22–29. <https://doi.org/10.33369/nmj.v6i1.40787>
- Odja, E. A., Raya, I., Zakir, M., Karim, A., & Basir, D. N. (2024). Characterization and electrochemical properties analysis of reduced graphene oxide from corncob carbon as an electrode candidate synthesized using modified Hummers method. *Communications in Science and Technology*, 9(1), 25–29. <https://doi.org/10.21924/cst.9.1.2024.1365>
- Patel, A., Kumar, S., & Singh, P. R. S. (2024). Review on recent advancements in the role of electrolytes and electrode materials on supercapacitor performances. *Discover Nano*, 19, Article 188. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04053-1>
- Qiu, C., Jiang, L., Gao, Y., & Sheng, L. (2023). Effects of oxygen-containing functional groups on carbon materials in supercapacitors: A review. *Materials & Design*, 230, Article

111952. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111952>
- Rajagukguk, E. P., Nasution, W. M., Muldarisnur, M., & Yetri, Y. (2024). Analisis pengaruh variasi elektrolit H₂SO₄, KOH, dan Na₂SO₄ terhadap kinerja elektrokimia superkapasitor berbasis biomassa kulit kakao. *Jurnal Fisika Unand*, 13(5), 610–616. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.5.610-616.2024>
- Rajasekaran, S. J., Grace, A. N., Jacob, G., Alodhayb, A., Pandiaraj, S., & Raghavan, V. (2023). Investigation of different aqueous electrolytes for biomass-derived activated carbon-based supercapacitors. *Catalysts*, 13(2), Article 286. <https://doi.org/10.3390/catal13020286>
- Riyanto, C. A., Kurniawan, E., & Aminu, N. R. (2021). Pengaruh NaOH dan suhu aktivasi terhadap karakteristik karbon aktif sekam padi teraktivasi H₃PO₄. *Rafflesia Journal of Natural and Applied Sciences*, 1(2), 59–68. <https://doi.org/10.33369/rjna.v1i2.16864>
- Sun, Y., Su, G., He, Z., Wei, Y., Hu, J., Liu, H., & Liu, G. (2022). Porous carbons derived from desiliconized rice husk char and their applications as an adsorbent in multivalent ions recycling for spent battery. *Journal of Chemistry*, 2022, Article 8225088. <https://doi.org/10.1155/2022/8225088>
- Taer, E., Harahap, E. W., Apriwandi, A., & Taslim, R. (2022). High-performance aqueous electrolyte symmetrical supercapacitor using porous carbon derived from cassava peel waste. *Applied Materials and Technology*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.31258/jamt.4.1.1-10>
- Wolak, E., & Orzechowska-Zięba, A. (2024). Change of the surface and structure of activated carbon as a result of HNO₃ modification. *Adsorption*, 30, 121–128. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00401-2>
- Zakir, M., Budi, P., Raya, I., Karim, A., Wulandari, R., & Sobrido, A. B. J. (2018). Determination of specific capacitance of modified candlenut shell based carbon as electrode material for supercapacitor. *Journal of Physics: Conference Series*, 979, Article 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/979/1/012024>
- Zakir, M., Kasim, H., Raya, I., Lamba, Y., Atisah, N., & Jorge, A. B. (2019). Performance of candlenut shell (*Aleurites moluccanus*) based supercapacitor electrode with acid electrolytes and their salts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 619, Article 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/619/1/012042>



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License