



Sintesis Karbon Aktif dari Tongkol Jagung (*Zea mays* L.) dengan Metoda Dehidrasi sebagai Elektroda Superkapasitor

(*Synthesis of Activated Carbon From Corncob (*Zea mays* L.) by Dehydration Method for Supercapacitor Electrode*)

Olly Norita Tetra*, Raihan Hanif Aulia, Deswati Deswati

*Program Studi Kimia, FMIPA, Universitas Andalas
 Kampus Unand Limau Manis Kota Padang Sumatera Barat, 25163, Indonesia

*Corresponding author: ollynorita@sci.unand.ac.id

DOI: [10.20961/alchemy.21.2.96235.358-368](https://doi.org/10.20961/alchemy.21.2.96235.358-368)

Received 13 December 2024, Revised 11 March 2025, Accepted 5 September 2025, Published 30 September 2025

Kata kunci:

aktivasi;
 dehidrasi;
 kapasitansi;
 karbon aktif;
 tongkol jagung;
 superkapasitor.

ABSTRAK. Karbon aktif dari limbah tongkol jagung (*Zea mays* L.) telah disintesis dengan metoda dehidrasi untuk digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor. Bubuk tongkol jagung didehidrasi dengan H_2SO_4 1 M dan diaktivasi dengan KOH 5 M pada perbandingan massa karbon dan aktivator 1:2,5, dilanjutkan dengan karbonisasi pada 400 °C selama 1 jam. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan terjadinya pembentukan pori pada permukaan karbon aktif dan hasil EDX memberikan persentase karbon 76,99%. Berdasarkan metode isoterm adsorpsi-desorpsi menunjukkan tipe isoterm IV dan histerisis tipe H3 yang menunjukkan struktur karbon aktif adalah mesopori, dengan luas permukaan spesifik 43,176 m^2/g , volume pori 0,0855 cm^3/g , dan distribusi pori rata-rata adalah 3,96 nm. Pengukuran sifat elektrokimia dari karbon aktif memberikan kemampuan untuk menyimpan energi dengan nilai kapasitansi spesifik sebesar 247,53 F/g dan rapat energi adalah 123,03 Wh/kg. Hasil EIS didapatkan kurva setengah lingkaran dari plot Nyquist yang menunjukkan adanya tahanan kecil untuk transfer muatan. Sintesis karbon aktif dengan metoda dehidrasi dan aktivasi menawarkan keuntungan seperti biaya rendah, proses preparasi sederhana, dan waktu sintesis singkat dengan kinerja elektrokimia yang tinggi untuk superkapasitor.

Keywords:

activation;
 dehydration;
 capacitance;
 activated carbon;
 corn cob;
 supercapacitor.

ABSTRACT. Activated carbon from corn cob waste (*Zea mays* L.) has been synthesized using a dehydration method as a supercapacitor electrode material. Corn cob powder was dehydrated with 1 M H_2SO_4 and activated with 5 M KOH at a mass ratio of carbon and activator of 1:2.5, followed by carbonization at 400 °C for 1 hour. SEM characterization showed pore formation on the surface of activated carbon, and EDX results gave a carbon percentage of 76.99%. Based on the adsorption-desorption isotherm method, the isotherm type IV and hysteresis type H3 showed that the structure of activated carbon is mesoporous, with a specific surface area of 43.176 m^2/g , a pore volume of 0.0855 cm^3/g , and an average pore distribution of 3.96 nm. Measurement of the electrochemical properties of activated carbon provides the ability to store energy with a specific capacitance value of 247.53 F/g, and the energy density is 123.03 Wh/kg. EIS results obtained semicircular curves of Nyquist plots, indicating a slight resistance to charge transfer. The synthesis of activated carbon by the dehydration and activation method offers advantages such as low cost, simple preparation process, and short synthesis time with high electrochemical performance for supercapacitors.

PENDAHULUAN

Superkapasitor adalah teknologi yang dikembangkan dari kapasitor konvensional untuk menyimpan energi dengan berbagai kelebihan seperti waktu pengosongan dan pengisian yang singkat, daya simpan yang besar, ramah lingkungan dan dapat memanfaatkan sumber daya alam hayati. Superkapasitor merupakan terobosan baru di bidang penyimpanan energi, dimana superkapasitor memiliki rapat daya yang lebih tinggi dibandingkan baterai dan memiliki rapat energi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kapasitor konvensional. Keunggulan dari superkapasitor adalah energi dan daya pada perangkat superkapasitor ditentukan oleh pemilihan/jenis elektroda. Superkapasitor memiliki prospek aplikasi yang luas dalam perangkat elektronik, kendaraan listrik dan bidang lainnya karena tingginya kepadatan daya, tingkat pengisian daya yang cepat, dan siklus pengisian-pengosongan yang panjang (Tetra *et al.*, 2024a).

Cite this as: Tetra, O. N., Aulia, R. H., and Deswati, D. (2025). Sintesis Karbon Aktif dari Tongkol Jagung (*Zea mays* L.) dengan Metoda Dehidrasi sebagai Elektroda Superkapasitor. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 21(2), 358-368. doi: <http://dx.doi.org/10.20961/alchemy.21.2.96235.358-368>.

Berdasarkan mekanisme pengisian muatan dan material elektrodanya, superkapasitor dapat dibagi menjadi dua kelompok utama yaitu *Electrical double layer capacitor* (EDLC), dan pseudokapasitor. Dalam pembuatan superkapasitor hal yang harus diperhatikan adalah bahan elektroda yang digunakan haruslah memiliki kemampuan untuk menyimpan energi yang tinggi. Bahan elektroda yang umum digunakan adalah logam oksida, karbon aktif, nano karbon, serat nano karbon, dan graphene (Gunawan *et al.*, 2020). Selain itu, penggunaan karbon aktif saat ini sebagai bahan elektroda superkapasitor menjadi perhatian karena konduktivitas listriknya yang tinggi, relatif murah, performa yang stabil, polarisasi yang baik, mudah didapatkan dan preparasi yang tidak sulit (Prayogatama *et al.*, 2022).

Limbah tongkol jagung merupakan salah satu limbah biomassa yang melimpah di Indonesia khususnya daerah Sumatera Barat. Penumpukkan tongkol jagung dalam kurun waktu tertentu menimbulkan permasalahan lingkungan, mengingat bahan ini berpotensi mudah terbakar apabila dalam keadaan kering, mengotori lingkungan sekitar, menyita lahan yang cukup luas dalam penyimpanan dan merupakan limbah yang sering dijumpai karena masyarakat memanfaatkan tongkol jagung sebagai salah satu sumber makanan. Selain itu, tongkol jagung mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin (Wang *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pada penelitian ini, karbon aktif tongkol jagung dimanfaatkan sebagai bahan elektroda superkapasitor.

Sintesis karbon aktif dari biomassa umumnya menggunakan metoda karbonisasi dan aktivasi pada suhu tinggi, namun pada penelitian ini karbon aktif disintesis dari tongkol jagung dengan metoda dehidrasi menggunakan asam sulfat (H_2SO_4). Penggunaan metoda dehidrasi memiliki keunggulan karena dapat memperbaiki struktur pengembangan pori di dalam karbon dengan menarik molekul air dengan mudah, asam sulfat juga dapat melarutkan oksida-oksida logam yang terdapat di dalam pori-pori karbon. Dehidrasi asam juga menyebabkan sukrosa yang terkandung dalam tongkol jagung mengalami reaksi eksotermik yang menyebabkan air yang terkandung dalam tongkol jagung akan menguap dan mengembang serta memudahkan pembentukan struktur pori, selain itu dehidrasi menggantikan proses prekarbonisasi yang biasanya dilakukan dalam pembuatan karbon aktif sehingga lebih efisien dalam proses pemanasan dan ramah lingkungan (Wang *et al.*, 2019).

Peningkatan porositas pada karbon aktif dapat dilakukan dengan penambahan zat pengaktif yang diikuti dengan pirolisis. Beberapa aktivator kimia yang digunakan dalam pembuatan karbon aktif seperti $ZnCl_2$, KOH, dan H_2SO_4 , H_3PO_4 , dan $CaCl_2$. KOH dipilih karena merupakan aktivator yang paling kuat dalam mengaktifasi pori karbon pada suhu tinggi sehingga menghasilkan luas permukaan dan volume pori yang besar (Zhu *et al.*, 2023).

Dibandingkan dengan NaOH maka aktivasi dengan KOH lebih banyak menghasilkan distribusi ukuran mikropori, melalui peran gandanya dalam menghasilkan jaringan berpori dan juga bertindak sebagai agen pengelupasan dan melepas pengotor yang ada dipermukaan dan bagian dalam pori (Karakehya, 2023). Aktivasi KOH melibatkan etsa kimia, ablasi dan interkalasi, yang dapat secara efektif meningkatkan luas permukaan karbon aktif (Fu *et al.*, 2022). Pemilihan metode sintesis yang tepat dan aktivator KOH merupakan langkah penting untuk mengontrol struktur pori dan distribusi bahan karbon berbasis biomassa, yang akan menentukan kinerja superkapasitor (Wang *et al.*, 2019).

Metoda dehidrasi untuk sintesis karbon aktif dari limbah tongkol jagung belum pernah dilaporkan sebelumnya. Oleh karena itu tujuan penelitian ini adalah mengembangkan strategi yang hemat biaya dalam mensintesis karbon aktif berpori sebagai elektroda untuk meningkatkan kinerja superkapasitor sebagai solusi dalam memecahkan masalah lingkungan dan energi pada saat yang bersamaan.

METODE PENELITIAN

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *stirrer* (IKA'C-MAGHS4), *furnace* (Neytech D-550 Vulcan), lumpang dan alu, ayakan 45 μm , *hot plate* (IKA'C-MAGHS4), neraca analitik (Mettler PM4000), oven (Nabertherm), kertas saring (Whatman 42), kertas pH (Merck), aluminium foil, dan peralatan gelas laboratorium lainnya. Peralatan instrumen yang digunakan adalah SEM-EDX (HITACHI FLEXSEM 1000), FTIR (PerkinElmer Frontier C90704 Spectrum IR Version 10.6.1), BET Surface Area and Pore Size Analyzer (Quantachrome TouchWin v1.22), instrumen CV dan instrumen EIS (PARSTAT 3000A Ametek).

Bahan yang diperlukan pada penelitian ini adalah tongkol jagung, Kalium Hidroksida (KOH) (Smart lab), Asam klorida (HCl, Merck), Asam sulfat (H_2SO_4 , Merck), Akuades, Carbon Black, N-Methylpyrrolidone (NMP, Merck), polyvinylidene fluoride (PVDF, Bratachem), Nickel foam, dan Aluminium foil (Polyfoil).

Preparasi Sampel Limbah Tongkol Jagung

Limbah tongkol jagung diambil sebanyak 5 kg dan dikumpulkan dalam satu wadah, lalu dibersihkan dari sisa-sisa kotoran yang masih melekat. Tongkol jagung dipotong dengan ukuran yang kecil kemudian dikeringanginkan dan setelah kering dihaluskan dengan grinder. Bubuk tongkol jagung dipanaskan dengan oven pada suhu sekitar 110 °C sampai berat konstan, kemudian diayak dengan ayakan berukuran $\leq 45 \mu\text{m}$.

Preparasi Karbon Aktif dari Limbah Tongkol Jagung

Bubuk tongkol jagung sebanyak 50 g di tambahkan 100 mL H_2SO_4 1M, dan distirer selama 10 menit pada temperatur 80 °C. Setelah proses dehidrasi selesai maka campuran tersebut di cuci dengan akuadest dan dikeringkan selama 10 jam dalam oven pada temperatur 80 °C. Hasil dari dehidrasi selanjutnya diaktivasi dengan menambahkan KOH pada perbandingan masa antara bubuk tongkol jagung yang sudah di dehidrasi dengan aktivator KOH adalah 1:2,5 (b/b). Campuran tersebut diaduk sampai homogen dengan stirrer selama 5 jam dan didiamkan 24 jam selanjutnya dikeringkan dalam oven selama ± 5 jam. Kemudian campuran tongkol jagung dimasukkan ke dalam furnace dengan suhu karbonisasi 400 °C selama 1 jam. Karbon aktif tongkol jagung yang dihasilkan dicuci dengan HCl 2 M sampai pH netral, dibilas dengan akuades dan dipanaskan kembali dengan oven pada suhu ± 110 °C sampai berat konstan.

Karakterisasi Karbon Aktif

Karbon aktif dari tongkol jagung yang dihasilkan dikarakterisasi dengan *Scanning Electron Microscopy–Energi Dispersive X-Ray* (SEM-EDX), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), *Surface Area Analyzer* (SAA) untuk analisis isoterm adsorpsi desorpsi.

Pembuatan Elektroda Kerja

Elektroda kerja dibuat dengan mencampurkan karbon aktif, *Polyvinylidene fluoride* (PVDF) dan *carbon black* pada perbandingan massa 8:1:1 (karbon aktif : PVDF : *carbon black*). Campuran digerus selama 15 menit, lalu dipanaskan untuk mengurangi kadar air. Campuran kemudian dilarutkan dengan *N-methyl pyrrolidone* (NMP) sehingga akan menghasilkan pasta/ sluri, campuran dideposisikan di atas *nickel foam* berukuran $1 \times 1 \text{ cm}^2$ dengan metode *drop casting* dan dikeringkan dengan oven vakum pada suhu 100 °C selama 12 jam sehingga dihasilkan plat elektroda. Plat elektroda tersebut digunakan sebagai elektroda kerja pada pengukuran sifat elektrokimia elektroda karbon aktif tongkol jagung ([Gambar 1](#)).



Gambar 1. Elektroda kerja karbon aktif tongkol jagung.

Pengujian Sifat Elektrokimia

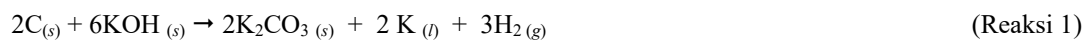
Pengukuran sifat elektrokimia dari elektroda karbon aktif tongkol jagung dengan menggunakan instrumen Cyclic Voltammetry (CV/PARSTAT 3000A Ametek) dengan sistem tiga elektroda. *Nickel foam* sebagai *current collector*. *Platinum mesh* digunakan sebagai elektroda pembantu, Ag/AgCl sebagai elektroda pembanding, dan dicelupkan didalam KOH 0,5 M sebagai larutan elektrolit. Pengukuran CV dilakukan pada rentang potensial -1V – 0V dimana didapatkan plot hubungan antara potensial dengan arus pada CV. Selain itu, dilakukan pengukuran sifat elektrokimia dari karbon aktif dengan menggunakan instrumen EIS (PARSTAT 3000A Ametek) sistem tiga elektroda. Pengukuran EIS dilakukan pada rentang frekuensi 0,01 Hz – 100.000 Hz dimana didapatkan kurva atau plot hubungan antara impedansi real dengan impedansi imajiner yang dikenal dengan plot Nyquist.

HASIL DAN PEMBAHASAN

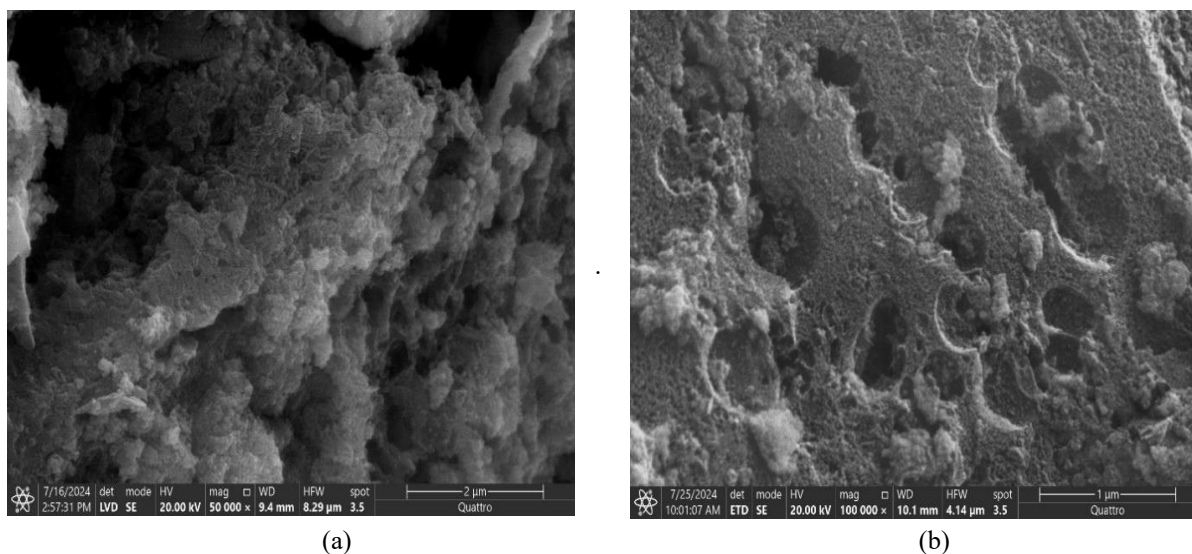
Karakterisasi Karbon Aktif Tongkol Jagung

Hasil karakterisasi Scanning Electron Microscopy (SEM)

Sintesis karbon aktif dari tongkol jagung dengan metode dehidrasi menghasilkan karbon aktif berupa bubuk halus berwarna hitam. Metode dehidrasi dilakukan dengan menggunakan larutan asam sulfat untuk memecah lignin, hemiselulosa, dan selulosa pada batang jagung, dan menghasilkan hidrochar. Hasil analisis SEM terhadap permukaan karbon aktif tongkol jagung ditunjukkan pada [Gambar 2](#), morfologi permukaan karbon aktif memperlihatkan telah terjadi pembentukan pori dengan cekungan yang lebar, hal ini disebabkan aktivator KOH hanya bekerja pada permukaan karbon. Walaupun suhu karbonisasi yang digunakan rendah tetapi degradasi rantai glukosa dipercepat oleh reaksi dehidrasi dari asam sulfat sehingga menghasilkan pori yang heterogen. Hal ini membuktikan bahwa proses dehidrasi dengan H_2SO_4 yang sangat eksotermik diikuti dengan aktivasi menggunakan KOH pada suhu $400\text{ }^\circ\text{C}$ pada tongkol jagung menghasilkan *hydrochar* dapat meningkatkan area aktif pada permukaan sampel melalui pembentukan pori yang cukup besar di permukaan karbon aktif tongkol jagung ([Ukkaikimapan et al., 2020](#)). Proses aktivasi dengan KOH pada suhu tinggi akan meningkatkan luas permukaan spesifik dan porositas dengan efek sinergis yaitu perluasan kisi karbon dan pembentukan pori. Struktur karbon berpori biasanya dihasilkan oleh aktivasi kimia (KOH) yang dapat bereaksi dengan atom C membentuk K_2CO_3 ([Reaksi 1](#)) ([Su et al., 2018](#)):



Selama proses aktivasi, KOH memainkan peran ganda yaitu membantu dalam menghasilkan jaringan berpori dan juga bertindak sebagai agen pengelupasan kulit dan melepas pengotor yang ada dipermukaan dan bagian dalam pori, dan membantu mengoksidasi karbon menjadi karbonat, yang mengarah pada pembentukan pori-pori pada kerangka karbon akibat pengetsaan ([Elanthamilan et al., 2021](#)).



Gambar 2. Hasil SEM karbon aktif tongkol jagung dengan perbesaran (a) $50.000\times$ dan (b) $100.000\times$.

Pada suhu pemanasan yang tinggi saat aktivasi karbon dengan KOH akan menghasilkan CO_2 dan H_2O . CO_2 yang terbentuk akan masuk ke dalam pori sehingga secara signifikan dapat mempengaruhi perubahan struktur pori dan pengembangan volume pori. Pori pada karbon aktif berfungsi sebagai penyimpan muatan saat, semakin besar volume pori maka semakin besar daya tampung menyimpan muatan saat digunakan sebagai elektroda superkapasitor ([Yin et al., 2023](#)).

Hasil Karakterisasi Analisis Energy Dispersive X-Ray (EDX)

[Tabel 1](#) menunjukkan komposisi unsur dari karbon aktif tongkol jagung, di mana komponen persentase unsur terbesar adalah unsur karbon dan oksigen yaitu 76,99% dan 14,84%. Kalium berasal dari sisa aktivator yang masih ada pada sampel sedangkan unsur klor (Cl) berasal dari sisa HCl yang berasal dari proses pembilasan untuk mencapai pH netral, unsur sulfur berasal dari H_2SO_4 yang bersisa pada saat proses dehidrasi dan unsur silikon (Si) berasal unsur hara tongkol jagung ([Daud et al., 2013](#)). Suhu karbonisasi diketahui sangat berpengaruh terhadap persentase karbon yang dihasilkan, dengan meningkatnya suhu karbonisasi, persentase karbon yang dihasilkan

akan meningkat, akan tetapi jika suhu karbonisasi lebih dari 800 °C maka karbon yang dihasilkan akan menurun. Hasil ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa jumlah aktivator yang berlebihan dengan suhu karbonisasi tinggi menyebabkan abrasi (pengikisan) yang kuat pada bahan karbon. Karbon aktif tongkol jagung yang disintesis pada suhu karbonisasi 650 °C dengan aliran gas nitrogen dilaporkan memberikan persentase C sebesar 86,94%. Selain itu dilaporkan juga bahwa sifat konduktivitas listrik karbon meningkat dengan meningkatnya suhu karbonisasi, dan nilai konduktivitas listrik tertinggi dicapai pada suhu karbonisasi tinggi yaitu 800 °C (Li *et al.*, 2020).

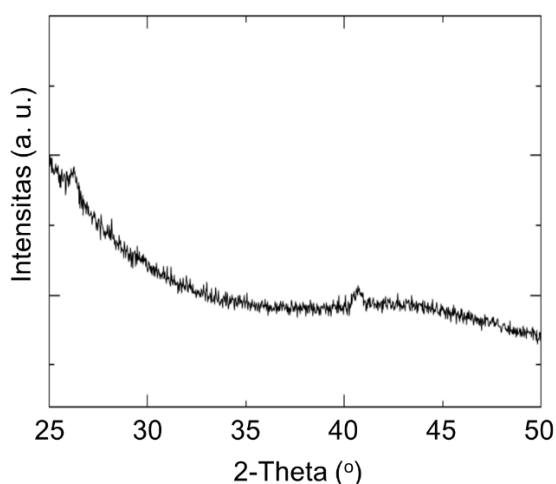
Tabel 1 Komposisi unsur karbon aktif dari tongkol jagung yang disintesis melalui metoda dehidrasi dan aktivasi.

Unsur	% Berat
C	76,99
O	14,84
K	3,87
Cl	3,02
S	0,68
Si	0,59

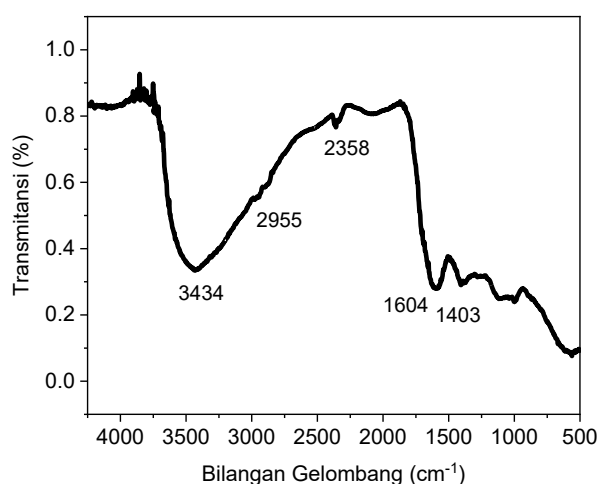
Menurut Marsh and Rodriguez-Reinoso, (2006), proses karbonisasi yang dilakukan pada suhu kecil dari 900 °C tidak akan mendapatkan kandungan karbon murni. Sebaliknya, pada suhu karbonisasi besar dari 900 °C dan dilakukan dalam kondisi vakum dapat menghasilkan kemurnian karbon yang lebih tinggi (Marsh and Rodriguez-Reinoso, 2006). Namun karakteristik karbon aktif yang digunakan sebagai elektroda superkapasitor tidak hanya ditentukan oleh jumlah karbon tapi juga berbagai variabel lain seperti luas permukaan spesifik, volume pori dan konduktivitas dari karbon tersebut yang berperan dalam kinerja superkapasitor.

Hasil Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD)

Struktur karbon dipelajari lebih lanjut dengan XRD untuk memeriksa struktur kristalografi karbon aktif (Gambar 3). Dua puncak difraksi yang melebar di sekitar 24 – 26° dan 41° dapat ditemukan dengan jelas, yang berada pada (002), menegaskan tingkat keteraturan dalam bahan berbasis biochar dan ini sesuai untuk tujuan penyimpanan energi untuk mekanisme adsorpsi dan bidang (100) adalah bidang kisi grafit, hal ini menunjukkan karakteristik amorf dari karbon aktif (Yu *et al.*, 2018). Puncak yang diamati pada 41° terkait dengan konduktivitas listrik dari bahan berbasis karbon yang berkontribusi untuk meningkatkan kinerja elektrokimia untuk aplikasi superkapasitor. Sudut-sudut tersebut menggambarkan posisi puncak yang sesuai dengan bidang (002) dan (100) pada struktur karbon. Pola XRD yang sama juga dilaporkan untuk karbon aktif dari batang jagung (Tetra *et al.*, 2024b).



Gambar 3. Pola XRD dari karbon aktif dari tongkol jagung.



Gambar 4. Spektrum FTIR karbon aktif dari tongkol jagung.

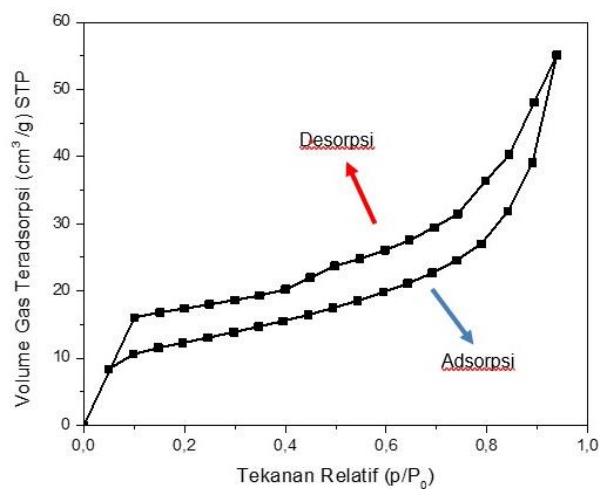
Hasil Analisis Spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR)

Spektrum Fourier Transform Infrared (FTIR) pada Gambar 4, menampilkan gambaran mode vibrasi stretching dari gugus fungsi O–H dari gugus hidroksil yang berasal dari senyawa selulosa dan hemiselulosa yaitu pada 3434 cm⁻¹. Pada bilangan gelombang 2955 cm⁻¹ menunjukkan adanya serapan gugus fungsi C jenuh dari

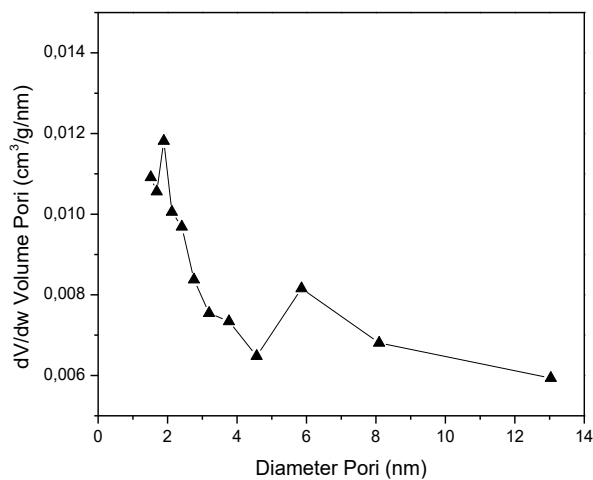
ikatan cincin aromatis. Hal ini juga ditunjukkan dengan bilangan gelombang 1604 cm^{-1} , dan 1403 cm^{-1} yang menunjukkan adanya vibrasi regangan gugus fungsi C=C dalam ikatan cincin aromatis dan pada bilangan gelombang 2358 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi regangan gugus fungsi C=O, dimana hal tersebut sesuai dengan hasil EDX karbon aktif yang menunjukkan adanya atom O. Gugus-gugus fungsi ini terdapat pada permukaan karbon aktif yang dapat meningkatkan konduktivitas dari karbon aktif sehingga meningkatkan proses penyimpanan muatan pada superkapasitor. Perlu diketahui bahwa karbon aktif yang dihasilkan tidak terdiri dari karbon saja karena sintesis tidak dilakukan dalam keadaan vakum pada suhu besar dari $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Marsh and Rodriguez-Reinoso, 2006). Menurut Barkauskas dan Dervinyte (2003), gugus fungsional pada karbon aktif berperan dalam kesetimbangan asam dan basa yang terjadi pada proses pembuatan superkapasitor yaitu interaksi kontak yang terjadi pada ion H^+ atau OH^- dengan permukaan karbon. Hal ini menggambarkan permukaan permukaan karbon aktif yang sangat kompleks.

Hasil Karakterisasi Surface Area Analyzer (SAA)

Uji isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen dilakukan untuk mempelajari tipe klasifikasi isoterm, struktur pori, dan distribusi ukuran pori karbon aktif. Gambar 5 menunjukkan kurva isoterm adsorpsi-desorpsi karbon aktif, dimana pada tekanan rendah ($<0,1$) volume gas yang teradsorpsi meningkat secara perlahan yang menunjukkan adanya sedikit struktur mikropori dan kemudian secara bertahap dengan bertambahnya tekanan akan mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi (hysteresis) yang menunjukkan banyaknya mesopori dalam karbon. Berdasarkan Klasifikasi IUPAC, kurva isoterm adsorpsi-desorpsi tongkol jagung mengikuti kurva adsorpsi isoterm tipe IV dan loop histeresis tipe H3 yang menunjukkan bahwa struktur dominan pada karbon aktif adalah mesopori, yang memiliki ukuran pori $2 - 50\text{ nm}$ (Thommes *et al.*, 2015). Adanya pori pada permukaan padatan akan memberikan efek pembatasan jumlah lapisan pada adsorbat dan terjadi fenomena kondensasi kapiler yang menutup pori sehingga struktur mesopori mengecil menjadi struktur mikropori yang menyebabkan terbentuknya histeresis. Struktur mikropori berperan untuk menyimpan muatan karena memiliki luas permukaan yang besar. Sementara itu, struktur mesopori membantu memperlancar pergerakan ion di dalam elektroda sehingga dengan kombinasi struktur mikropori dan mesopori akan meningkatkan kinerja superkapasitor baik dari sisi kapasitas maupun kecepatan pengisian dan pelepasan muatan.



Gambar 5. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi sampel karbon aktif dari tongkol jagung.



Gambar 6. Kurva distribusi ukuran pori dari karbon aktif tongkol jagung.

Gambar 6 menunjukkan distribusi ukuran pori karbon aktif yang berada pada kisaran $1,5 - 13\text{ nm}$ dengan diameter rata-rata $3,96\text{ nm}$, ini sesuai dengan kurva isoterm adsorpsi-desorpsi pada Gambar 5, bahwa karbon aktif yang dihasilkan terdiri dari sedikit mikropori dan dominan mesopori. Parameter struktur pori secara rinci ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan evaluasi BET, makropori (diameter pori $> 50\text{ nm}$) menghasilkan sumber ion yang cukup untuk adsorpsi ion elektrolit pada permukaan mikro-mesopori dengan bertindak sebagai reservoar ion. Selain itu, mesopori ($2\text{ nm} < \text{diameter pori} < 50\text{ nm}$) menyediakan migrasi dan difusi ion yang cepat dari ion-ion elektrolit, dengan menciptakan jalur transfer yang cepat. Peran mikropori (diameter pori $< 2\text{ nm}$) pada dasarnya berkontribusi pada pergerakan ion elektrolit yang cepat dan menyediakan lebih banyak situs aktif untuk kemampuan penyimpanan muatan yang tinggi (Liu *et al.*, 2024).

Hasil pengukuran luas permukaan spesifik, diameter dan volume pori karbon aktif dapat dilihat pada [Tabel 2](#). Berdasarkan [Tabel 2](#), distribusi ukuran pori sampel dihitung dengan metode DFT (*Density Functional Theory*), menunjukkan bahwa distribusi pori karbon aktif terkonsentrasi pada mesopore yaitu 3,960 nm dan luas permukaan spesifik karbon aktif yang diperoleh relative rendah yaitu 43,176 m²/g sedangkan volume pori total adalah 0,0855 cm³/g. Hal ini dikarenakan perbandingan masa KOH sebagai aktivator dan suhu karbonisasi yang rendah sehingga KOH tidak maksimal untuk mengikis/etsa dinding karbon sehingga menghasilkan luas permukaan spesifik yang kecil dan kondisi ini mempengaruhi dalam proses pembentukan lapisan ganda listrik pada superkapasitor. Dalam sintesis karbon aktif, metoda sintesis dan jumlah aktivator akan mempengaruhi kemampuan aktivasi untuk meningkatkan perluasan pori-pori pada sampel, dan peningkatan suhu akan memperluas ruang lapisan karbon ([Vinayagan et al., 2020](#); [Liu et al., 2024](#)). Pada sintesis karbon aktif dengan precursor batang jagung dengan metoda dehidrasi dan aktivasi dilaporkan perbandingan masa karbon dan KOH adalah 1:3 akan bermanfaat dalam membangun struktur jaringan berpori yang stabil untuk mempercepat difusi ion sehingga kinerja elektrokimia superkapasitor meningkat ([Tetra et al., 2024c](#)). Adanya struktur pori mikro/meso dalam karbon aktif menguntungkan untuk transportasi ion, menghasilkan kinerja yang lebih baik dalam elektroda superkapasitor. Efek sinergis dari pori-pori dengan distribusi pori yang luas meningkatkan sifat elektrokimia dari karbon aktif dibandingkan dengan karbon aktif yang hanya mempunyai distribusi pori-pori yang sempit/tunggal ([Song et al., 2019](#)).

Tabel 2. Hasil karakterisasi dengan *Surface Area Analyzer* (SAA).

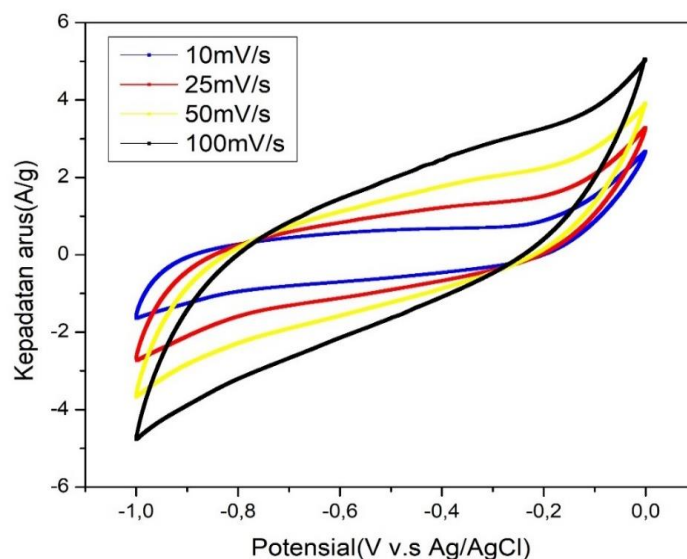
Hasil Karakterisasi SAA-BET	Nilai
Luas Permukaan Spesifik	43,176 m ² /g
Diameter pori rata-rata	3,960 nm
Volume pori total	0,0855 cm ³ /g

Pengukuran Sifat Elektrokimia Elektroda Karbon Aktif Tongkol Jagung

Hasil Cyclic Voltammetry (CV)

Analisis CV digunakan untuk mempelajari stabilitas dan reversibilitas superkapasitor. Besarnya arus *charge* dan arus *discharge* pada saat pengukuran mempengaruhi bentuk kurva yang dihasilkan. Arus *charge* merupakan arus yang terukur ketika superkapasitor mengalami proses pengisian muatan (*charge*) yang ditandai dengan daerah kurva bagian atas. Arus *discharge* merupakan arus yang terukur ketika superkapasitor mengalami proses pengosongan muatan (*discharge*) yang ditandai dengan daerah kurva bagian bawah. Analisis CV dilakukan dalam potensial window dari -1 hingga 0 V dalam elektrolit KOH 0,5 M. Pengukuran CV terhadap karbon aktif tongkol jagung dilakukan pada *scan rates* berkisar antara 10 hingga 100 mV/s ditunjukkan pada [Gambar 7](#). Hasil kurva CV berbentuk mirip belah ketupat dengan sedikit distorsi pada ujungnya. Secara umum, area di bawah kurva CV menentukan kinerja kapasitif bahan elektroda. Kurva CV yang diperoleh untuk elektroda karbon aktif tongkol jagung dengan meningkatkan *scan rates* sampai 100 mV/s memberikan area yang lebih besar. Dalam hal ini tidak ada perubahan bentuk dari kurva yang dihasilkan sampai *scan rates* 100 mV/s. Bentuk belah ketupat ini juga menandakan bahwa karbon aktif mempunyai struktur kombinasi antara mikropori dan dominan mesopori. Kondisi ini menunjukkan bahwa difusi ion dalam elektroda terjadi tanpa hambatan, yang memperlihatkan tingkat kestabilan dari elektroda superkapasitor dalam menyimpan muatan ([Tetra et al., 2024c](#)). Ini membuktikan bahwa karbon aktif yang disintesis dengan metode dehidrasi memiliki karakterisasi yang mendukung untuk memudahkan pembentukan lapisan rangkap listrik seperti luas permukaan spesifik, volume pori dan distribusi pori dari karbon aktif yang dihasilkan ([Shaku et al., 2023](#)).

Semakin besar *scan rate* maka akan semakin besar pula luas area kurva yang dihasilkan, hal ini dikarenakan ketika pengukuran menggunakan *scan rate* yang tinggi maka akan memberikan respon arus yang semakin besar dan memberikan pengaruh terhadap kecepatan transport dan pemisahan ion, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mengukur satu siklus akan cukup singkat. Sedangkan ketika menggunakan *scan rate* yang lebih rendah maka respon arus akan semakin kecil yang menyebabkan pengukuran satu siklus akan membutuhkan waktu yang cukup lama dibandingkan dengan *scan rate* yang tinggi. *Scan rate* mempengaruhi luas kurva yang dihasilkan, sehingga mempengaruhi nilai kapasitansinya.



Gambar 7. Kurva CV dari elektroda karbon aktif tongkol jagung pada *scan rate* yang berbeda.

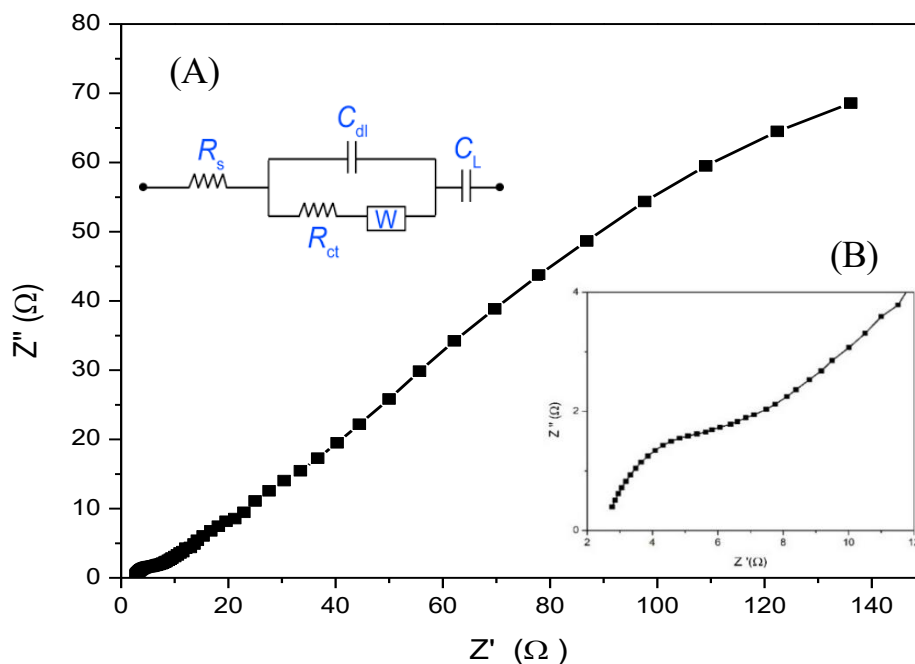
Besar kapasitansi spesifik berbanding lurus dengan besar kapasitansi sel superkapasitor (Taer *et al.*, 2018). Ini menunjukkan bahwa ion dan elektron memiliki laju transfer yang cepat dan resistansi polarisasi yang rendah selama proses pengisian/pengosongan. Selama proses pengisian, ion K^+ dalam larutan diadsorpsi secara elektrostatik ke permukaan elektroda negatif, dan sementara ion OH^- tertarik ke permukaan elektroda positif untuk membentuk perbedaan potensial selama pengisian, ion K^+ dan OH^- yang awalnya berkumpul di permukaan elektroda negatif/positif kemudian mulai melepaskan muatan secara terus menerus ke luar hingga potensialnya seimbang (Song *et al.*, 2019). Pada penelitian ini, pengukuran dilakukan pada laju pemindaian 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s, diperoleh nilai kapasitansi spesifik semakin kecil dengan semakin besarnya *scan rates* yaitu 247,53 F/g, 151,68 F/g, 103,75 F/g, 71,30 F/g. Hal ini dikarenakan saat kecepatan pemindaian rendah, elektron memasuki ruang dalam elektroda dengan waktu yang cukup besar. Namun, dengan meningkatnya kecepatan pemindaian dapat mempersingkat waktu sehingga elektron yang memasuki ruang ke dalam elektroda menjadi lebih sedikit untuk proses difusi dan adsorpsi ion. Perbedaan nilai kapasitansi spesifik disebabkan oleh pergerakan ion yang dipengaruhi oleh ukuran, konduktivitas dan mobilitas ion dari suatu elektrolit. Semakin tinggi konduktivitas dan mobilitas ion maka ukuran ion akan semakin kecil sehingga pergerakan ion pada permukaan elektroda semakin cepat yang dapat meningkatkan kapasitansi spesifik superkapasitor.

Hasil Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

Salah satu metode yang digunakan untuk pengukuran sifat tahanan dan kapasitansi spesifik ini adalah *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Pengukuran dilakukan pada rentang frekuensi 0,01–100.000 Hz, dengan hasil pengujian metode EIS yang ditampilkan berbentuk plot Nyquist yang menampilkan dari nilai impedansi riil (Z') yang menunjukkan nilai dari hambatan ohmik, dan nilai impedansi imajiner (Z'') yang menunjukkan adanya elemen non resistif. Plot *Nyquist* terdiri dari dua daerah, yaitu daerah frekuensi tinggi dan daerah frekuensi rendah. Daerah frekuensi tinggi mempunyai bentuk setengah lingkaran, biasa dinamakan *Warburg region*, menunjukkan proses redoks faradaik yang terjadi pada sistem, sedangkan pada frekuensi rendah, berupa garis lurus, tegak dengan sumbu Y. Semakin mendekati 90° , maka dapat disimpulkan bahwa sifat kapasitif dari material semakin baik. Selain itu, nilai yang tertera pada sumbu X, yang merupakan perpotongan dengan kurva, menunjukkan nilai dari *Equivalent Circuit Resistance* (ESR). ESR merupakan hasil dari kombinasi beberapa hal, yang pertama adalah hambatan akibat adanya transfer muatan ionik dan elektronik, hambatan transfer muatan intrinsik dari material, dan terakhir akibat adanya hambatan kontak antara material dengan *interface* dari *current collector* (Song *et al.*, 2019).

Berdasarkan plot Nyquist pada Gambar 8A, terdapat nilai impedansi imajiner atau Z'' meningkat secara eksponensial terhadap nilai impedansi riil atau Z' pada frekuensi tinggi ke frekuensi rendah. Daerah *semicircle* (setengah lingkaran) yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 8B, dimana diameter dari daerah *semicircle* tersebut sangat kecil yang menunjukkan proses transfer muatan pada permukaan elektroda karbon aktif tongkol jagung dan elektrolit KOH berlangsung cepat karena kecilnya tahanan transfer muatan (R_{ct}), lalu diikuti oleh garis

lurus pada daerah frekuensi rendah. Hal ini menentukan sifat kapasitif sel superkapasitor dengan elektroda karbon aktif tongkol jagung, dimana terjadi pembentukan antarmuka antara elektroda dan elektrolit, sehingga memberikan akses yang mudah pada ion elektrolit bergerak menuju elektroda. Pola garis lurus yang ditunjukkan pada plot Nyquist dari pengukuran sifat elektrokimia elektroda karbon aktif tongkol jagung hampir tegak lurus mendekati 90° , sehingga menunjukkan sifat kapasitif yang cukup tinggi dan juga mengindikasikan adanya resistansi difusi ion yang rendah dalam bulk elektroda. Hal ini dapat dipengaruhi oleh tahanan total (ESR) yang terjadi pada saat proses *charging* dan *discharging*, seperti tahanan elektrolit (R_s), tahanan transfer muatan (R_{ct}), dan tahanan pada permukaan elektroda karbon aktif tongkol jagung.



Gambar 8. Kurva Nyquist superkapasitor untuk elektroda karbon aktif tongkol jagung (a) model sirkuit EIS dan (b) pola *semicircle*.

KESIMPULAN

Sintesis karbon aktif dari tongkol jagung dengan metoda dehidrasi dapat digunakan sebagai elektroda superkapasitor. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan puncak pada 24° dan 41° yang merupakan ciri khas karbon dalam bentuk grafit. Morfologi permukaan karbon aktif dengan SEM-EDX memperlihatkan pembentukan pori yang terjadi pada permukaan karbon aktif dengan persentase atom C 76,99%. Metode isoterm adsorpsi-desorpsi menunjukkan tipe isoterm IV dan histerisis tipe H3 yang menunjukkan struktur karbon aktif adalah mesopori, dengan luas permukaan spesifik 43,1759 m^2/g , volume pori 0,085487 cm^3/g , dan distribusi pori rata-rata 3,9599 nm. Penentuan sifat elektrokimia karbon aktif dengan CV memberikan nilai kapasitansi spesifik 431,73 F/g. Hasil EIS memperlihatkan kurva setengah lingkaran dari plot Nyquist yang menunjukkan adanya tahanan transfer muatan. Preparasi sampel dengan metoda dehidrasi ini efektif dalam hal waktu dan proses preparasi karbon aktif untuk superkapasitor berkinerja tinggi.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

RHA: Konseptualisasi, Metodologi, Analisis Data, Penulisan Draf Manuskrip; ONT: Supervisi, Konseptualisasi, dan Penyuntingan Manuskrip; DD: Supervisi, dan Telaah.

DAFTAR PUSTAKA

Barkauskas, J. and Dervinyte, M., 2003. An Investigation of the Functional Groups on the Surface of Activated Carbons. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 69, 363–375.

- Daud, Z., Zainuri, M., Hatta, M., Sari, A., Kassim, M., Awang, H., and Aripin, A.M., 2013. Analysis the Chemical Composition and Fiber Morphology Structure of Corn Stalk. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7, 401–405.
- Elanthamilan, E., Catherin Meena, B., Renuka, N., Santhiya, M., George, J., Kanimozhi, E.P., Christy Ezhilarasi, J., and Princy Merlin, J., 2021. Walnut Shell Derived Mesoporous Activated Carbon for High Performance Electrical Double Layer Capacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 901, 115762. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115762>.
- Fu, F., Yang, D., Fan, Y., Qiu, X., Huang, J., Li, Z., and Zhang, W., 2022. Nitrogen-Rich Accordion-like Lignin Porous Carbon via Confined Self-Assembly Template and in-Situ Mild Activation Strategy for High-Performance Supercapacitors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 628, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.07.070>.
- Gunawan, S., Hasan, H., and Lubis, R.D.W., 2020. Pemanfaatan Adsorben dari Tongkol Jagung sebagai Karbon Aktif untuk Mengurangi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 3, 38–47. <https://doi.org/10.30596/rmme.v3i1.4527>.
- Karakehya, N., 2023. Effects of One-Step and Two-Step KOH Activation Method on the Properties and Supercapacitor Performance of Highly Porous Activated Carbons Prepared from Lycopodium Clavatum Spores. *Diamond and Related Materials*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109873>.
- Li, Y., Zhang, D., Zhang, Y., He, J., Wang, Yulin, Wang, K., Xu, Y., Li, H., and Wang, Yi, 2020. Biomass-Derived Microporous Carbon with Large Micropore Size for High-Performance Supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 448, 227396. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227396>.
- Liu, H., Yang, M., Li, J., Chen, Y., Liu, Q., and Gu, J., 2024. Polyacrylonitrile as a Binder Realizes High-Rate Activated-Carbon-Based Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 500, 144754. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144754>.
- Marsh, H., and Rodriguez-Reinoso, F., 2006. *Activated Carbon*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>.
- Nasser, R., Tiantian, J., and Song, J.-M., 2022. Hierarchical Porous Activated Carbon Derived from Olives: Preparation, (N, S) Co-Doping, and Its Application in Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 51, 104348. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104348>.
- Prayogatama, A., Nuryoto, N., and Kurniawan, T., 2022. Modifikasi Karbon Aktif dengan Aktivasi Kimia dan Fisika Menjadi Elektroda Superkapasitor. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 11, 47–58.
- Shaku, B., Mofokeng, T.P., Coville, N.J., Ozoemena, K.I., and Maubane-Nkadimeng, M.S., 2023. Biomass Valorisation of Marula Nutshell Waste into Nitrogen-Doped Activated Carbon for Use in High Performance Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 442, 141828. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.141828>.
- Song, M., Zhou, Y., Ren, X., Wan, J., Du, Y., Wu, G., and Ma, F., 2019. Biowaste-Based Porous Carbon for Supercapacitor: The Influence of Preparation Processes on Structure and Performance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 535, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.09.055>.
- Su, X.-L., Chen, J.-R., Zheng, G.-P., Yang, J.-H., Guan, X.-X., Liu, P., and Zheng, X.-C., 2018. Three-Dimensional Porous Activated Carbon Derived from Loofah Sponge Biomass for Supercapacitor Applications. *Applied Surface Science*, 436, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.249>.
- Taer, E., Taslim, R., Putri, A. W., Apriwandi, A., and Agustino, A., 2018. Activated Carbon Electrode made from Coconut Husk Waste for Supercapacitor Application. *International Journal of Electrochemical Science*, 13, 12072–12084. <https://doi.org/10.20964/2018.12.19>.
- Tetra, O.N., Aziz, H., Arifin, B., and Deswati, 2024a. Karbon Aktif Berpori dari Kulit Jeruk (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) Melalui Metoda Dehidrasi untuk Kapasitor Elektrokimia. *Jurnal Zarah*, 12, 25–32. <https://doi.org/10.31629/zarah.v12i1.6049>.
- Tetra, O.N., Emriadi, E., Sukari, S., Sontani, A., and Aziz, H., 2024b. Preparation of Activated Carbon from Corn Stalks by Dehydration Method as Supercapacitor Electrode Material. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 43, 4348–4359.
- Tetra, O.N., Syukri, S., Santoni, A., Deswati, D., Fajarandi, N., and Emriadi, E., 2024c. Sintesis Karbon Aktif dari Batang Jagung (*Zea mays* L.) dengan Metoda Dehidrasi Asam untuk Aplikasi Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Fisika Unand*, 13, 834–842. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.6.834-842.2024>.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., and Sing, K.S.W., 2015. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.

- Ukkakimapan, P., Sattayarut, V., Wanchaem, T., Yordsri, V., Phonyiem, M., Ichikawa, S., Obata, M., Fujishige, M., Takeuchi, K., Wongwiriyan, W., and Endo, M., 2020. Preparation of Activated Carbon via Acidic Dehydration of Durian Husk for Supercapacitor Applications. *Diamond and Related Materials*, 107, 107906. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107906>.
- Vinayagam, M., Suresh Babu, R., Sivasamy, A., and Ferreira de Barros, A.L., 2020. Biomass-Derived Porous Activated Carbon from Syzygium Cumini Fruit Shells and Chrysopogon Zizanioides Roots for High-Energy Density Symmetric Supercapacitors. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105838>.
- Wang, B., Li, L., Zhao, Chunhua, and Zhao, Chongjun, 2021. Microporous Active Carbon with Ultrahigh Surface Area from Metaplexis Japonica for High-Performance Supercapacitor. *Diamond and Related Materials*, 118, 108484. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108484>.
- Wang, H., Guo, W., Liu, B., Wu, Q., Luo, H., Zhao, Q., Si, Q., Sseguya, F., and Ren, N., 2019. Edge-Nitrogenated Biochar for Efficient Peroxydisulfate Activation: An Electron Transfer Mechanism. *Water Research*, 160, 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.059>.
- Yin, Q., Li, X., Yong, X., Sha, P., Zhang, Q., Dong, H., Sui, J., Yu, J., Yu, L., and Dong, L., 2023. An Environmentally Friendly Process to Derive N/O/S-Codoped Porous Carbon from Biomass Waste with High Yield for High Performance Supercapacitor. *Diamond and Related Materials*, 134, 109798. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109798>.
- Yu, K., Zhu, H., Qi, H., and Liang, C., 2018. High Surface Area Carbon Materials Derived from Corn Stalk Core as Electrode for Supercapacitor. *Diamond and Related Materials*, 88, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.06.018>.
- Zhu, W., Shen, D., and Xie, H., 2023. Combination of Chemical Activation and Nitrogen Doping toward Hierarchical Porous Carbon from Houttuynia Cordata for Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 60, 106595. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106595>.