

Sintesis dan Karakterisasi Karbon Aktif dari Daun Pisang Nangka (*Musa paradisiaca* L.) sebagai Material Elektroda Superkapasitor

Synthesis and Characterization of Activated Carbon from Jackfruit Banana (*Musa paradisiaca* L.) Leaves as Supercapacitor Electrode Material

Satria Ulia Uliana¹, Bidayatul Armynah^{1*}, Emar Mokiman Kala'Tagari¹

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar, Sulawesi - Selatan, Indonesia 90245

Email: satriauliana@gmail.com; *armynah63@gmail.com; emarmokiman703@gmail.com

Received: 18th September 2025; Revised: 24th October 2025; Accepted: 28th October 2025

Abstrak – Telah dilakukan penelitian mengenai penentuan suhu karbonisasi maksimum pada pembuatan karbon aktif menggunakan daun pisang nangka (*Musa paradisiaca* L.) sebagai material elektroda superkapasitor dengan aktivasi KOH. Karbon aktif di buat dengan metode kimia menggunakan KOH 0,5 M pada suhu 750, 800, dan 850 °C dalam atmosfer CO₂. Analisis Termogravimetri (TG) dan Turunan Termogravimetri (DTG) menunjukkan bahwa laju degradasi termal tertinggi pada 313,3 °C, yang menandakan rentang suhu terjadinya penurunan massa paling cepat. Analisis densitas menunjukkan nilai densitas karbon aktif menurun seiring dengan peningkatan suhu karbonisasi. Karakterisasi Fourier Transform Infrared (FTIR) menunjukkan adanya ikatan karbon, sedangkan pola X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan struktur campuran amorf semi kristalin. Hasil Scanning Electron Microscopy (SEM) memperlihatkan morfologi permukaan karbon aktif dengan distribusi pori yang lebih merata dan struktur yang terbuka, menandakan peningkatan perkembangan pori akibat kenaikan suhu karbonisasi. Analisis Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) menunjukkan dominasi unsur kalium dengan 73,77% berat dan 49,80% atom. Evaluasi elektrokimia menunjukkan nilai kapasitansi spesifik hanya mengalami sedikit perbedaan pada rentang suhu karbonisasi yang diuji, dengan nilai maksimum sebesar 209 F/g pada suhu 850 °C. Hasil ini mengindikasikan bahwa 850 °C merupakan suhu karbonisasi maksimum untuk memperoleh karbon aktif dengan kinerja elektrokimia terbaik, serta memperkuat potensinya sebagai material berkelanjutan untuk aplikasi superkapasitor.

Kata Kunci: Karbon aktif; daun pisang; superkapasitor; kapasitansi.

Abstract – A study was conducted to determine the maximum carbonization temperature for producing activated carbon derived from banana leaves (*Musa paradisiaca* L.) as electrode material for supercapacitors with KOH activation. Activated carbon was prepared using a chemical activation method with 0.5 M KOH at carbonization temperatures of 750, 800, and 850 °C under a CO₂ atmosphere. Thermogravimetric (TG) and Derivative Thermogravimetric (DTG) analyses revealed the highest thermal degradation rate at 313.3 °C, indicating the temperature range with the most rapid mass loss. Density analysis showed that the density of activated carbon decreased with increasing carbonization temperature. Fourier Transform Infrared (FTIR) characterization confirmed the presence of carbon bonds, while X-Ray Diffraction (XRD) patterns indicated a mixed amorphous–semi-crystalline structure. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis revealed a surface morphology with more uniformly distributed and open pores, indicating enhanced pore development with increasing carbonization temperature. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) confirmed the dominance of potassium, accounting for 73.77 wt% and 49.80 at%. Electrochemical evaluation showed that the specific capacitance exhibited only slight variations across the tested carbonization temperatures, with the highest value of 209 F/g obtained at 850 °C. These results indicate that 850 °C is the maximum carbonization temperature to produce high-performance activated carbon from banana leaves, reinforcing its potential as a sustainable material for supercapacitor applications.

Keywords: *Activated carbon; banana leaves; supercapacitor; capacitance.*

1. Pendahuluan

Pemanfaatan energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam tidak hanya menyebabkan penipisan sumber daya alam, akan tetapi juga berdampak buruk bagi lingkungan. Emisi karbondioksida dan gas rumah kaca lainnya dari energi fosil memperparah pemanasan global [1]. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi alternatif berupa sistem penyimpanan energi yang efisien dan ramah lingkungan. Sistem ini perlu mendukung energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin, sekaligus menjaga kestabilan suplai saat terjadi fluktuasi produksi [2].

Dalam sistem penyimpanan energi, superkapasitor menjadi salah satu solusi yang menjanjikan. Keunggulan tersebut antara lain daya tinggi, waktu pengisian cepat, umur pakai yang panjang, serta stabilitas kimia dan termal yang baik. Superkapasitor mampu mengisi dan mengosongkan energi dalam waktu singkat dengan efisiensi tinggi [3]. Aplikasinya kini mencakup kendaraan listrik, perangkat elektronik, penyimpanan energi rumah, hingga sistem energi berskala besar. Kinerja superkapasitor sangat dipengaruhi oleh material elektroda yang digunakan [4]. Elektroda adalah tempat penyimpanan muatan, sehingga sifat fisis dan kimianya sangat menentukan performa perangkat. Salah satu material yang paling banyak digunakan adalah karbon aktif. Karbon aktif memiliki luas permukaan tinggi, konduktivitas baik, stabil secara kimia, dan struktur pori yang mendukung difusi ion. Selain itu, karbon aktif tergolong murah dan mudah dimodifikasi, menjadikannya bahan ideal untuk elektroda superkapasitor [5].

Namun, sebagian besar karbon aktif yang digunakan secara komersial dibuat dari bahan sintesis seperti polimer berbasis minyak atau karbon mineral. Bahan-bahan tersebut mahal dan kurang ramah lingkungan [6]. Oleh karena itu, banyak penelitian mulai beralih menggunakan limbah biomassa sebagai alternatif bahan karbon. Biomassa berasal dari sumber terbarukan, murah, mudah diperoleh, dan kaya kandungan karbon. Salah satu limbah biomassa yang potensial adalah limbah pisang, seperti daun, kulit, bract, dan batang [7].

Pisang merupakan tanaman tropis yang banyak tumbuh di Indonesia dan negara berkembang lainnya. Limbah pisang seringkali dibuang atau dibakar, yang justru menimbulkan pencemaran. Padahal, daun dan kulit pisang mengandung lignoselulosa tinggi yang sangat baik untuk dijadikan karbon aktif [8]. Komponen ini sangat baik untuk dijadikan karbon aktif berpori melalui pirolisis, aktivasi secara kimiawi dan fisika. Beberapa studi menunjukkan bahwa aktivasi secara kimiawi menggunakan KOH atau $ZnCl_2$ mampu meningkatkan porositas dan luas permukaan karbon secara signifikan [5]. Hal ini penting untuk meningkatkan performa elektroda. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa karbon aktif dari kulit pisang memiliki nilai kapasitansi tinggi, bahkan mencapai 245 F/g dalam elektrolit asam. Sebagai perbandingan daun pisang kepok menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 142 F/g dengan penggunaan elektrolit 1 M KOH [9].

Berbagai penelitian dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa daun pisang dapat menjadi bahan baku karbon aktif yang sangat menjanjikan untuk superkapasitor [10]. Daun pisang diketahui mengandung berbagai ion logam seperti natrium, kalium, kalsium, magnesium, dan besi yang dapat membantu membentuk struktur pori selama proses aktivasi. Dengan aktivasi kimia menggunakan K_2CO_3 dan pirolisis pada suhu 750 °C, daun pisang dapat menghasilkan karbon aktif nanosheet dengan struktur pori hierarkis tiga dimensi. Luas permukaan spesifik yang dihasilkan mencapai sekitar 1459 m²/g dan kapasitansi spesifiknya hingga 190 F/g dalam elektrolit cairan ionik [11].

Limbah pisang, terutama daun dan kulitnya, merupakan sumber biomassa yang melimpah dan berpotensi tinggi sebagai bahan baku karbon aktif. Kandungan lignoselulosa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin menjadikan daun dan kulit pisang cocok untuk proses pirolisis yang menghasilkan karbon berpori [12]. Selain itu, karbon aktif dari biomassa seperti tempurung kelapa yang diaktivasi dengan KOH pada suhu 800 °C memiliki luas permukaan sangat tinggi dan kapasitansi spesifik mencapai 425 F/g. Meskipun berbeda bahan, pendekatan serupa dapat diterapkan pada daun pisang, karena kesamaan kandungan lignoselulosa. Karbon dari daun pisang yang dikarbonisasi pada suhu tinggi dan diaktivasi secara kimiawi juga menunjukkan kapasitansi yang stabil serta ketahanan terhadap siklus pengisian [13].

Penggunaan daun pisang sebagai bahan baku karbon untuk elektroda superkapasitor masih belum banyak diteliti. Sebagian besar studi sebelumnya lebih menekankan pada limbah keras seperti

tempurung atau serat batang. Efek spesifik dari aktivasi kimia menggunakan KOH terhadap sifat fisis (struktur pori dan luas permukaan) maupun sifat elektrokimia (kapasitansi dan resistansi) karbon dari daun pisang nangka belum banyak dikaji.

Oleh karena itu, penting untuk menganalisis hubungan antara konsentrasi KOH dengan performa elektroda yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemanfaatan daun pisang nangka sebagai sumber karbon aktif untuk elektroda superkapasitor, sebagai upaya mendukung pemanfaatan limbah biomassa lokal. Fokus penelitian ini adalah mengkaji pengaruh variasi yang dilakukan sebanyak tiga kali karbonisasi, yaitu pada suhu 750, 800, dan 850 °C.

2. Material dan Metoda

Bagian ini menjelaskan bahan baku, alat yang digunakan, serta tahapan proses pembuatan dan karakterisasi karbon aktif dari daun pisang nangka (*Musa paradisiaca L.*) sebagai material elektroda superkapasitor. Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah daun pisang nangka yang diperoleh dari limbah biomassa di sekitar. Daun dikeringkan, dibersihkan dari kotoran, dan dipotong kecil-kecil sebelum melalui proses karbonisasi.

2.1 Material dan peralatan

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah oven, penjepit loyang oven, blender, mortal, batang pengaduk, ayakan 100 mesh, ayakan 200 mesh, timbangan digital, erlenmeyer, gelas kimia, cawan petri, kertas saring, corong, *magnetic stirrer*, *magnetic bar*, *hydraulic press*, jangka sorong digital, mesin cetak pelet, spatula, wadah plastik, *ballmilling*, pinset, *furnace*, TG, DTG, FTIR, XRD, CV, SEM, dan EDS. Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu daun pisang nangka, *aquades*, aktivasi kalium hidroksida (KOH), dan larutan H_2SO_4 , membran telur itik, dan asam klorida (HCl).

2.2 Pembuatan karbon aktif

Proses pembuatan karbon aktif dari daun pisang nangka dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dari pra-karbonisasi, karbonisasi, hingga aktivasi kimia dan fisika. Daun pisang nangka yang telah dikeringkan dibersihkan menggunakan *aquades* dan dijemur hingga kering sempurna, kemudian menjalani proses pra-karbonisasi pada suhu 200 °C selama 1 jam untuk mengurangi kadar air dan zat volatil. Serbuk hasil pra-karbonisasi dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 100 dan 200 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Karbonisasi dilakukan dengan metode pirolisis menggunakan *furnace* pada suhu 600 °C selama 8 jam dalam atmosfer gas nitrogen (N_2) untuk menghilangkan senyawa non-karbon dan menghasilkan arang. Arang yang diperoleh kemudian diaktivasi secara kimia menggunakan larutan kalium hidroksida (KOH) 0,5 M. Proses aktivasi dilakukan dengan melarutkan KOH ke dalam *aquades*, memanaskannya hingga 80 °C sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 2 jam agar tercampur merata dengan serbuk karbon. Setelah proses pengadukan selesai, sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 7 jam hingga diperoleh karbon aktif berbentuk serbuk halus. Selanjutnya dilakukan aktivasi fisika menggunakan gas karbon dioksida (CO_2) pada suhu 750, 800, dan 850 °C selama 8 jam untuk memperluas pori dan meningkatkan luas permukaan karbon aktif. Proses ini dilakukan untuk menentukan pengaruh variasi suhu karbonisasi terhadap karakteristik dan kinerja elektrokimia karbon aktif.

2.3 Analisis dan karakterisasi

Pada penelitian ini digunakan beberapa metode analisis untuk memperoleh karakteristik material secara komprehensif. Analisis penyusutan massa dilakukan untuk mengetahui perubahan massa biomassa selama proses pemanasan, sedangkan analisis termogravimetri (TG) dan turunan termogravimetri (DTG) digunakan untuk mempelajari kestabilan termal serta tahap degradasi material. Analisis densitas dilakukan dengan cara menghitung perbandingan massa terhadap volume sampel pelet karbon aktif yang telah dikeringkan. Massa diukur menggunakan timbangan digital, sedangkan volume ditentukan dari dimensi pelet menggunakan jangka sorong digital. Nilai densitas kemudian diperoleh dari hasil pembagian massa terhadap volume pelet. Pengujian elektrokimia melalui metode *Cyclic Voltammetry* (CV) digunakan untuk mengevaluasi performa kapasitansi spesifik karbon aktif. Analisis morfologi permukaan dan komposisi unsur dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM–EDS). Selain itu, analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan untuk

mengidentifikasi gugus fungsi, dan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) diterapkan untuk mempelajari struktur kristal dari karbon aktif yang dihasilkan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Penyusutan massa pada daun pisang nangka setelah pra-karbonisasi

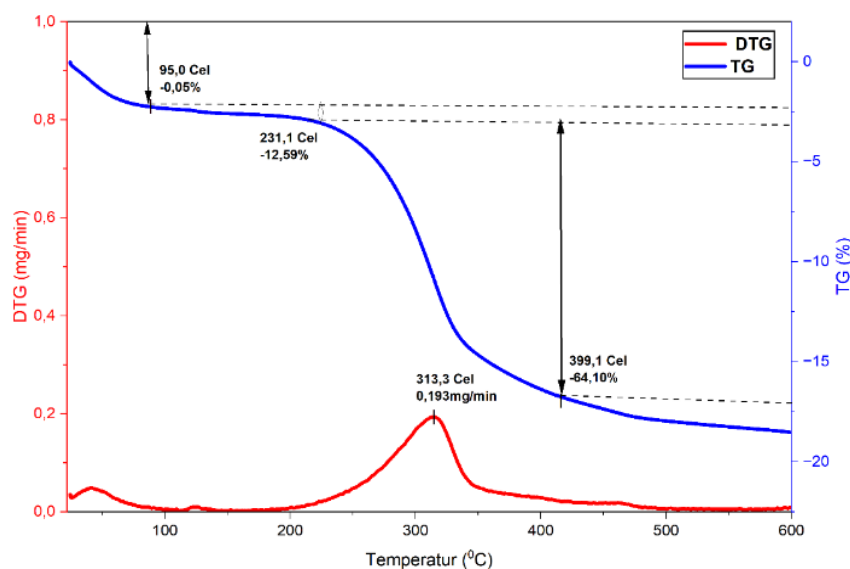
Hasil pengujian menunjukkan bahwa sampel mengalami penguapan sehingga terjadi penurunan massa rata-rata 15,73 % dari massa awal. Data penyusutan massa daun pisang nangka selama pra-karbonisasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Persentase surut massa daun pisang nangka.

No	Massa Awal (g)	Massa Akhir (g)	Susut Massa (%)
1.	40	33,7	15,75
2.	40	33,3	16,75
3.	40	33,4	16,50
4.	40	33,9	15,25
5.	40	33,5	16,25
6.	40	33,6	16,00
7.	40	33,7	15,75
9.	40	33,8	15,50
9.	40	34,0	15,00
10.	40	34,2	14,50
Rata rata			15,73

3.2 Hasil karakterisasi thermograviametry (TG) dan differential thermogravimetry (DTG)

Analisis TG-DTG dilakukan terhadap sampel daun pisang nangka hasil pra-karbonisasi sebelum proses aktivasi kimia menggunakan KOH. Tujuannya untuk mengetahui perilaku degradasi termal biomassa dan menentukan rentang suhu optimum untuk proses karbonisasi selanjutnya. Kurva TG dan DTG ditunjukkan pada Gambar 1, di mana kurva TG digambarkan dengan garis berwarna biru yang menunjukkan persentase penyusutan massa terhadap suhu, dan kurva DTG ditunjukkan dengan garis berwarna merah yang menunjukkan laju penyusutan massa (mg/menit) terhadap suhu [14].



Gambar 1. Kurva TG-DTG sampel daun pisang nangka.

Berdasarkan kurva DTG, puncak dekomposisi maksimum tercatat pada suhu 313,3 °C dengan laju penurunan massa tertinggi, yang mana menunjukkan titik suhu di mana laju degradasi termal berlangsung paling cepat. Hal ini mengindikasikan bahwa pada suhu 313,3 °C terjadi reaksi termal yang paling intensip, terutama akibat degradasi hemiselulosa dan selulosa. Kurva TG dan DTG dari daun pisang nangka setelah aktivasi ditunjukkan pada Gambar 1.

3.3 Pengujian densitas

Densitas dan porositas elektroda karbon memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja superkapasitor. Densitas yang tinggi dapat mengurangi volume pori dan luas permukaan spesifik, yang berpotensi menurunkan kapasitas spesifik dan kapasitansi volumetrik. Sebaliknya, struktur pori yang optimal dapat meningkatkan interaksi ion dengan permukaan elektroda, mempercepat laju transfer muatan, dan meningkatkan kapasitansi [15]. Analisis densitas pada elektroda karbon pada daun pisang nangka dilakukan dengan pengukuran massa, diameter, dan ketebalan pelet sebelum dan sesudah pirolisis dapat dilihat pada Tabel 2.

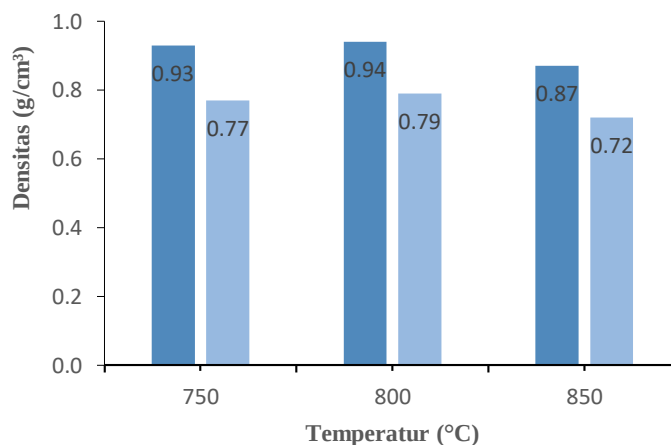
Tabel 2. Hasil rata-rata pengukuran massa, tebal dan diameter pelet.

Variasi Temperatur (°C)	Sebelum pirolisis			Sesudah pirolisis		
	Massa (g)	Tebal (cm)	Diameter (cm)	Massa (g)	Tebal (cm)	Diameter (cm)
750	0,70	0,23	2,04	0,23	0,23	1,29
800	0,72	0,26	2,01	0,21	0,21	1,30
850	0,69	0,25	2,01	0,21	0,22	1,30

Nilai densitas (ρ) dihitung berdasarkan perbandingan antara massa (m) dan volume (V) pelet karbon aktif, dengan satuan g/cm^3 . Volume pelet ditentukan dari hasil pengukuran diameter dan ketebalan menggunakan jangka sorong digital, kemudian dihitung menggunakan rumus $V = \pi r^2 t$, di mana r adalah jari-jari dan t adalah ketebalan pelet. Nilai densitas sesudah pirolisis mengalami penurunan seiring peningkatan suhu karbonisasi. Penurunan ini terjadi karena semakin tingginya suhu menyebabkan penguraian zat volatil dan terbentuknya pori yang meningkatkan volume namun menurunkan massa karbon. Nilai densitas sebelum dan sesudah pirolisis ditunjukkan pada Gambar 2.

3.4 Analisis cyclic voltammetry (CV)

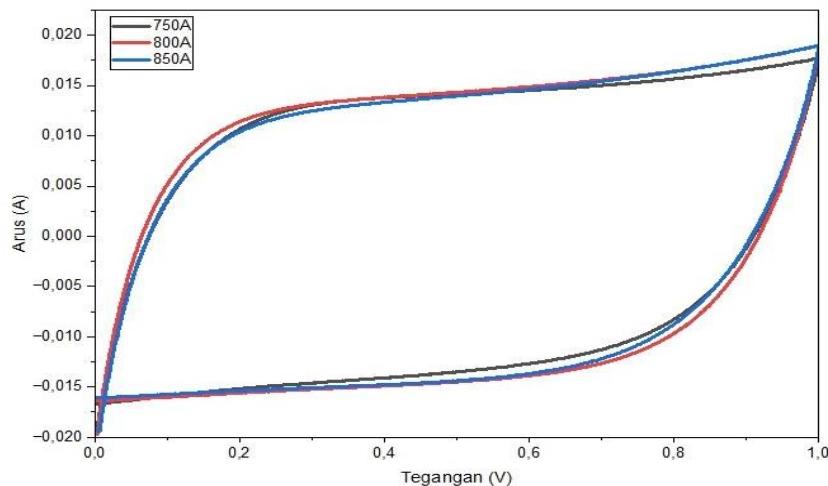
Cyclic voltammetry adalah metode yang digunakan untuk mengukur sifat elektrokimia elektroda superkapasitor. Tujuan penggunaan metode ini adalah untuk memberikan informasi tentang sifat-sifat sel elektrokimia, termasuk potensial, kapasitansi, dan masa pakai [16]. Kurva CV dari daun pisang nangka setelah pirolisis ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Densitas sebelum dan sesudah pirolisis.

Gambar 3 menunjukkan bahwa bentuk kurva CV yang diperoleh mendekati persegi panjang, yang menandakan bahwa mekanisme penyimpanan muatan yang dominan adalah kapasitansi lapisan ganda

listrik (EDLC). Dari kurva terlihat bahwa elektroda pada suhu karbonisasi 850 °C memiliki area paling luas dibandingkan dengan suhu 750 dan 800 °C. Luas area kurva tersebut diperoleh dari hasil pengujian CV menggunakan alat potentiostat, di mana luas area menggambarkan jumlah muatan yang tersimpan pada elektroda. Dari kurva terlihat bahwa elektroda pada suhu karbonisasi 850 °C memiliki area paling luas dibandingkan dengan 750 dan 800 °C, sehingga dapat disimpulkan bahwa suhu 850 °C menghasilkan elektroda dengan kapasitansi spesifik tertinggi [10]. Nilai kapasitansi spesifik elektroda sel superkapasitor dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) yang kemudian hasilnya diinterpretasikan pada Tabel 3.



Gambar 3. Kurva *cyclic voltametry* elektroda sel superkapasitor setelah pirolisis.

$$C_{sp} = \frac{2}{mv(V_b - V_a)} \int_{V_a}^{V_b} I dV \quad (1)$$

Dimana C_{sp} = kapasitansi spesifik (F/g), I = arus (A), $V_b - V_a$ = rentang tegangan (V), v = laju pemin-
daian (V/s), m = massa elektroda (g), dan $\int I dV$ = Luas area kurva *cyclic voltammetry*.

Tabel 3. Nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor karbon aktif dari daun pisang nangka.

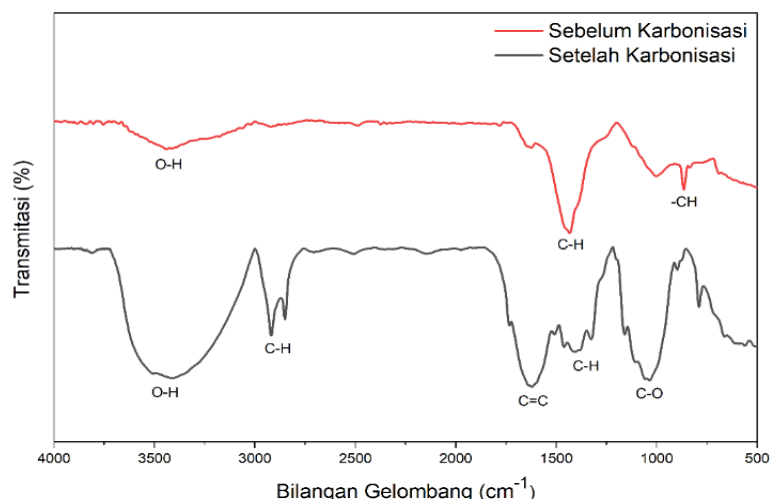
Temperatur (°C)	S (V/s)	m (g)	I_c (A)	I_d (A)	C_{sp} (F/g)
750	0,002	0,02	0,0009766	-0,00097	195
800	0,002	0,02	0,0010010	-0,00107	207
850	0,002	0,02	0,0010071	-0,00109	209

Perbedaan nilai kapasitansi antara 207 F/g dan 209 F/g tidak bersifat signifikan karena selisihnya sangat kecil, yaitu hanya sekitar 0,96%. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh faktor eksperimental seperti ketidakhomogenan massa material aktif pada elektroda, variasi kecil pada luas permukaan pori, atau ketidaktepatan saat proses pelapisan pasta karbon pada substrat. Kapasitor konvensional umumnya memiliki kapasitansi kurang dari 1 F/g (atau dalam orde mikrofaraad hingga milifarad per sentimeter persegi), sedangkan superkapasitor memiliki nilai kapasitansi yang jauh lebih tinggi, yaitu mulai dari 10 F/g hingga ribuan F/g, tergantung jenis material dan metode aktivasi yang digunakan. Batas nilai kapasitansi yang membedakan antara kapasitor konvensional dan superkapasitor terletak pada besarnya kemampuan penyimpanan muatan. Dengan demikian, nilai kapasitansi sebesar 207–209 F/g yang diperoleh pada penelitian ini termasuk dalam kategori superkapasitor, karena menunjukkan kemampuan penyimpanan muatan yang jauh lebih besar dibandingkan kapasitor konvensional.

3.5 Analisis Fourier Transform Infrared (FTIR)

Analisis FTIR merupakan salah satu metode karakterisasi material yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi atau ikatan kimia yang terdapat dalam suatu sampel berdasarkan serapan radiasi inframerah.

Analisis gugus fungsi dilakukan menggunakan FTIR dengan panjang gelombang 500-4000 cm^{-1} . Sampel yang dianalisis merupakan elektroda karbon sebelum dan sesudah pirolisis, spektrum FTIR gugus fungsi yang terbentuk ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Spektrum FTIR daun pisang nangka sebelum dan sesudah pirolisis.

Berdasarkan hasil analisis FTIR pada gambar terlihat adanya perbedaan yang jelas antara spektrum sebelum dan setelah karbonisasi daun pisang nangka. Sebelum proses karbonisasi (ditunjukkan oleh garis merah), pita serapan kuat muncul pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm^{-1} yang menunjukkan adanya vibrasi ulur (*stretching*) dari gugus hidroksil (O–H) yang berasal dari air, alkohol, dan senyawa fenolik. Pita serapan di sekitar 2900 cm^{-1} merupakan vibrasi ulur C–H dari senyawa alifatik seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang masih banyak terkandung dalam bahan organik daun pisang. Selain itu, muncul pula serapan di daerah 1700 cm^{-1} yang menandakan keberadaan gugus karbonil (C=O) dari senyawa aldehyd, keton, atau asam karboksilat, serta serapan di sekitar 1200–1000 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi ulur C–O dari gugus eter atau alkohol.

Keberadaan berbagai gugus fungsional tersebut menunjukkan bahwa material sebelum karbonisasi masih mengandung banyak senyawa organik kompleks yang bersifat volatil dan belum mengalami dekomposisi termal. Setelah melalui proses karbonisasi (garis hitam), terjadi perubahan signifikan pada pola spektrum. Intensitas pita O–H pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm^{-1} menurun tajam, menandakan berkurangnya gugus hidroksil akibat proses dehidrasi termal. Pita serapan C–H di sekitar 2900 cm^{-1} juga melemah secara drastis, menunjukkan bahwa sebagian besar gugus alifatik telah terurai dan mengindikasikan penghilangan komponen organik non-karbon seperti selulosa dan hemiselulosa. Munculnya pita baru di sekitar 1600 cm^{-1} menandakan vibrasi ulur C=C dari cincin aromatik yang merupakan ciri khas terbentuknya struktur karbon aromatik setelah proses karbonisasi [17]. Selain itu, serapan di daerah 1200–1000 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi ulur C–O masih terlihat tetapi dengan intensitas yang lebih rendah, mengindikasikan masih adanya sedikit gugus oksigen yang tertinggal pada permukaan karbon.

Perubahan spektrum FTIR sebelum dan sesudah karbonisasi menunjukkan bahwa proses karbonisasi telah berhasil mengubah struktur organik daun pisang nangka menjadi struktur karbon aromatik yang lebih stabil secara termal dan listrik. Hilangnya sebagian besar gugus O–H dan C–H serta munculnya C=C menandakan pembentukan kerangka karbon konduktif yang menjadi ciri khas material karbon aktif. Setelah dilakukan aktivasi kimia menggunakan KOH, beberapa gugus oksigen seperti O–H dan C–O dapat muncul kembali akibat reaksi antara KOH dengan permukaan karbon, yang menghasilkan pembentukan pori-pori baru serta meningkatkan kandungan gugus fungsional polar di permukaan. Hal ini berdampak positif terhadap peningkatan luas permukaan dan sifat elektrokimia karbon aktif, sehingga material menjadi lebih efektif digunakan sebagai elektroda pada superkapasitor.

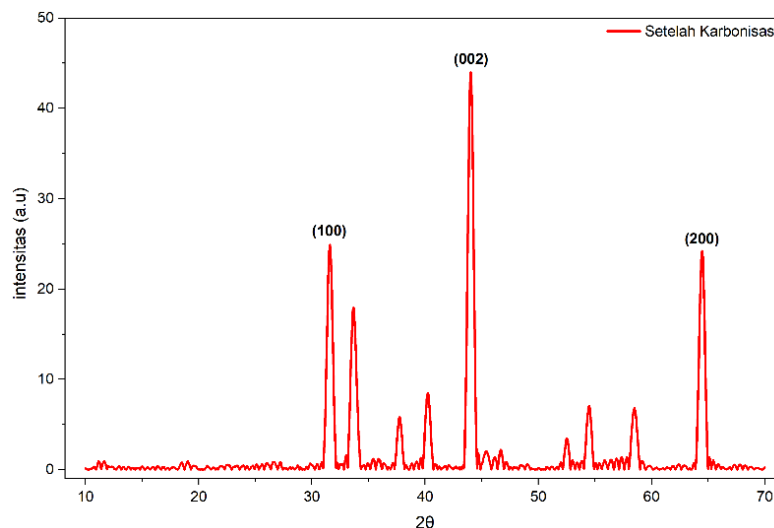
3.6 Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

X-ray Diffraction digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal, derajat amorfisitas, dan ukuran kristalit dari material elektroda pada sel superkapasitor. Keberadaan puncak-puncak tambahan dapat menunjukkan fase senyawa lain, seperti logam oksida atau hasil doping, yang dapat mempengaruhi konduktivitas listrik dan kapasitas penyimpanan muatan. Pola difraksi sinar-X (XRD) pada gambar menunjukkan hasil karakterisasi material karbon setelah proses karbonisasi. Terlihat tiga puncak utama yang masing-masing berada pada sekitar $2\theta = 31^\circ$, 44° , dan $64,5^\circ$ yang diindeks sebagai bidang (100), (002), dan (200).

Puncak (100) yang muncul pada sekitar $2\theta = 26\text{--}33^\circ$ mengindikasikan adanya struktur karbon amorf yang berasal dari susunan atom karbon yang tidak teratur, khas dari arang aktif hasil pirolisis. Puncak (002) yang tajam pada sekitar $2\theta = 44^\circ$ menunjukkan terbentuknya sebagian struktur grafitik, yaitu lapisan karbon dengan ikatan sp^2 yang mulai tersusun sejajar, menandakan peningkatan keteraturan struktur akibat proses karbonisasi pada suhu tinggi. Sementara itu, puncak (200) pada sekitar $2\theta = 64,5^\circ$ mengindikasikan adanya fase kristalin yang kemungkinan berasal dari sisa logam atau mineral seperti kalium (K), kalsium (Ca), atau besi (Fe) yang masih tertinggal setelah aktivasi menggunakan KOH. Kurva XRD dari daun pisang nangka hasil pirolisis ditunjukkan pada Gambar 5.

Selain puncak tajam tersebut masih terdapat beberapa puncak yang relatif lebar dan tidak rata pada pola XRD, yang menunjukkan bahwa material juga masih mengandung fase amorf [18]. Secara keseluruhan hasil karakterisasi ini menunjukkan bahwa karbon hasil karbonisasi memiliki sifat semi-kristalin, yaitu kombinasi antara struktur amorf dan kristalin, di mana fase grafitik mulai terbentuk namun masih disertai dengan bagian amorf yang signifikan.

Pola XRD memperlihatkan bahwa material karbon hasil karbonisasi dan aktivasi memiliki campuran antara struktur amorf dan semi-kristalin (turbostratic carbon). Struktur amorf ditunjukkan oleh puncak lebar di sekitar $20^\circ - 31^\circ$, sedangkan puncak tajam pada $64,5^\circ$ menandakan sebagian kecil struktur kristalin karbon. Setelah material ini dijadikan elektroda superkapasitor, struktur amorf yang dominan justru memberikan keuntungan karena menghasilkan luas permukaan yang besar dan pori-pori terbuka, sehingga ion elektrolit dapat lebih mudah berinteraksi dengan permukaan karbon. Oleh karena itu, kombinasi antara struktur amorf dan sedikit kristalin pada hasil karbonisasi dan aktivasi KOH sangat ideal untuk meningkatkan performa kapasitansi pada aplikasi superkapasitor.

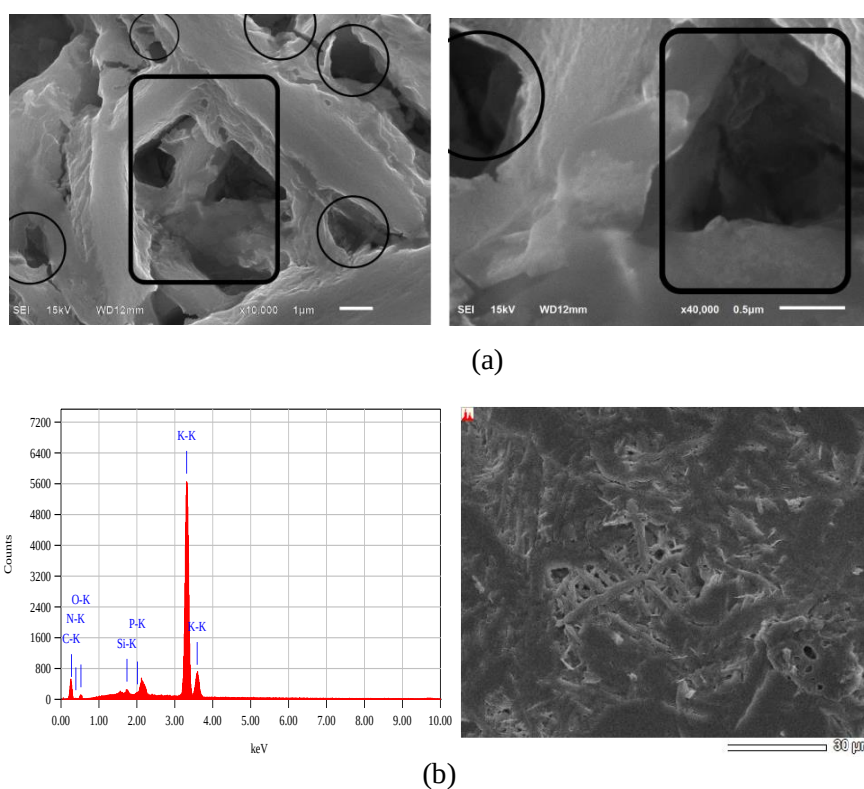


Gambar 5. Spektrum XRD pada daun pisang nangka sesudah karbonisasi.

3.7 Analisis SEM dan EDS

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik karakterisasi material yang menggunakan berkas elektron berenergi tinggi untuk memindai permukaan sampel, sehingga dapat menghasilkan citra dengan resolusi tinggi yang menggambarkan topografi dan morfologi sampel secara detail. Gambar *scanning* hasil penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 6.

Gambar 6 (a) memperlihatkan morfologi permukaan karbon aktif dari daun pisang nangka pada perbesaran 10.000x dan 40.000x. Berdasarkan gambar tersebut, dapat diamati bahwa proses aktivasi berhasil membentuk permukaan karbon dengan banyak pori yang terdistribusi merata. Pori-pori ini berperan penting dalam meningkatkan kinerja elektrokimia, karena menyediakan ruang bagi penyerapan ion elektrolit selama proses pengisian dan pelepasan muatan [19]. Kombinasi antara pori berukuran mikro, meso, dan makro menghasilkan struktur berpori bertingkat (hierarkis), yang tidak hanya memperluas total luas permukaan karbon, tetapi juga mempermudah pergerakan ion dan elektron di dalam material. Peningkatan luas permukaan spesifik ini memperbesar area kontak antara elektrolit dan elektroda, sehingga proses akumulasi ion dapat berlangsung lebih optimal. Selain itu, struktur hierarkis berpori juga membantu menstabilkan material dengan mengurangi tegangan mekanik akibat perubahan volume selama proses elektrokimia, serta menjaga kontak yang baik antara elektrolit dan material aktif. Dengan demikian, semakin besar luas permukaan spesifik karbon aktif, maka semakin tinggi pula kapasitas penyimpanan muatan yang dapat dicapai oleh perangkat superkapasitor [20].



Gambar 6. (a) Pori permukaan struktur daun pisang nangka dan (b) Spektrum EDS dan pori permukaan struktur daun pisang nangka.

Gambar 6 (b) menunjukkan hasil analisis EDS pada karbon aktif yang berasal dari daun pisang nangka. Spektrum menunjukkan bahwa unsur K (Kalium) memiliki puncak dengan intensitas tertinggi. Hal ini menandakan bahwa kalium merupakan unsur dominan yang tersisa pada sampel akibat proses aktivasi menggunakan KOH, dimana ion K berperan penting dalam membentuk struktur berpori melalui mekanisme *etching* dan pembukaan pori selama karbonisasi. Selain itu, unsur C (Karbon) juga terdeteksi dengan intensitas yang cukup tinggi, sesuai dengan hasil karbonisasi daun pisang nangka yang

menghasilkan kerangka karbon sebagai komponen utama material. Puncak lain yang muncul adalah unsur O (Oksigen) dan N (Nitrogen) dengan intensitas lebih rendah.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis CV, peningkatan suhu karbonisasi menunjukkan pengaruh signifikan terhadap kapasitas spesifik karbon aktif dari daun pisang nangka. Terjadi peningkatan yang nyata dari suhu 750°C ke 800°C, sehingga suhu 800°C ditetapkan sebagai kondisi optimum, sedangkan pada suhu 850°C kapasitas mencapai nilai tertinggi sebesar 209 F/g dan dinyatakan sebagai kondisi maksimum. Hasil karakterisasi memperlihatkan bahwa pada suhu 850°C terjadi degradasi gugus hidroksil dan oksigen sebagaimana ditunjukkan oleh hasil FTIR, serta pembentukan struktur semi-kristalin grafitik berdasarkan hasil XRD. Analisis SEM menunjukkan adanya kecenderungan pertumbuhan dan penyatuan partikel yang menutupi sebagian pori permukaan, sedangkan hasil EDS menegaskan dominasi unsur K sebesar 73,77% bersama unsur C, O, dan N yang berperan dalam mekanisme elektrokimia material karbon aktif tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan fasilitas dan izin dalam melakukan penelitian ini, serta seluruh dosen civitas akademik Departemen Fisika, FMIPA, Unhas yang telah membantu dan mengarahkan dengan sangat baik sehingga proses penelitian dan penulisan terselesaikan dengan baik dan lancar.

Daftar Pustaka

- [1] Halim Tjiwidjaja and Rianti Salima, 'Dampak Energi Fosil Terhadap Perubahan Iklim Dan Solusi Berbasis Energi Hijau', *Jurnal Wilayah, Kota Dan Lingkungan Berkelanjutan*, vol. 2, no. 2, pp. 166–172, Dec. 2023, doi: 10.58169/jwikal.v2i2.625.
- [2] K. Dissanayake and D. Kularatna-Abeywardana, 'A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications', Aug. 15, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2024.112563.
- [3] D. S. Priya, L. J. Kennedy, and G. T. Anand, 'Effective conversion of waste banana bract into porous carbon electrode for supercapacitor energy storage applications', *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 10, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.rsufi.2023.100096.
- [4] P. Forouzandeh, V. Kumaravel, and S. C. Pillai, 'Electrode materials for supercapacitors: A review of recent advances', Sep. 01, 2020, *MDPI*. doi: 10.3390/catal10090969.
- [5] A. Tripathy, S. Mohanty, S. K. Nayak, and A. Ramadoss, 'Renewable banana-peel-derived activated carbon as an inexpensive and efficient electrode material showing fascinating supercapacitive performance', *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 6, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.106398.
- [6] A. Apriwandi, E. Taer, and R. Farma, 'Analysis of Cyclic Voltammetry dan Galvanostatic Charge Discharge Electrode Supercapacitor based on activated carbon from Kepok Banana Leaf (*Musa balbisiana*)', *Journal of Aceh Physics Society*, vol. 10, no. 4, pp. 94–101, Oct. 2021, doi: 10.24815/jacps.v10i4.19491.
- [7] D. Sartika, D. Widhiyanuriyawan, A. Sugeng Widodo, Purnami, and I. N. G. Wardana, 'The role of graphene Oxide's aromatic rings in activated carbon made from banana leaves (ACBL) and Fe₃O₄ in hydrogen production', *Carbon Resources Conversion*, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.crcon.2024.100239.
- [8] M. Fatimura, R. Masriatini,) Fenny Putri,) Program, S. T. Kimia, and F. Teknik, 'Pemanfaatan Limbah Kulit Pisang Menjadi Karbon Aktif Dengan Variasi Konsentrasi Aktivator NaCl'.
- [9] A. Apriwandi, E. Taer, R. Farma, R. N. Setiadi, and E. Amiruddin, 'A facile approach of micro-mesopores structure binder-free coin/monolith solid design activated carbon for electrode supercapacitor', *J Energy Storage*, vol. 40, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102823.
- [10] A. A. Mohamad, 'Cyclic voltammetry of hybrid supercapacitors: A characterization review', Feb. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.inoche.2024.113677.

-
- [11] C. K. Roy *et al.*, 'Preparation of Hierarchical Porous Activated Carbon from Banana Leaves for High-performance Supercapacitor: Effect of Type of Electrolytes on Performance', *Chem Asian J*, vol. 16, no. 4, pp. 296–308, Feb. 2021, doi: 10.1002/asia.202001342.
 - [12] V. Molahalli *et al.*, 'Renewable Musa Sapientum derived porous nano spheres for efficient energy storage devices', *Nano Express*, vol. 5, no. 3, Sep. 2024, doi: 10.1088/2632-959X/ad64f0.
 - [13] Apriwandi, Agustino, E. Taer, and R. Taslim, 'A High Potential of Biomass Leaves Waste for Porous Activated Carbon Nanofiber/Nanosheet as Electrode Material of Supercapacitor', in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1655/1/012007.
 - [14] M. Zhong, S. Chen, T. Wang, J. Liu, M. Mei, and J. Li, 'Co-pyrolysis of polyester and cotton via thermogravimetric analysis and adsorption mechanism of Cr(VI) removal by carbon in aqueous solution', *J Mol Liq*, vol. 354, May 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2022.118902.
 - [15] H. Peng and W. Miao, 'Porous carbon-based materials for supercapacitors', in *Porous Carbon Materials for Clean Energy*, CRC Press, 2024, pp. 19–45. doi: 10.1201/9781003387831-2.
 - [16] S. Sharma and P. Chand, 'Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review', Jan. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rechem.2023.100885.
 - [17] H. Yang *et al.*, 'A new insight of lignin pyrolysis mechanism based on functional group evolutions of solid char', *Fuel*, vol. 288, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119719.
 - [18] N. Montoya-Escobar *et al.*, 'Use of Fourier Series in X-ray Diffraction (XRD) Analysis and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for Estimation of Crystallinity in Cellulose from Different Sources', *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/polym14235199.
 - [19] W. Zhao, J. Wen, Y. Zhao, Z. Wang, Y. Shi, and Y. Zhao, 'Hierarchically porous carbon derived from biomass reed flowers as highly stable li-ion battery anode', *Nanomaterials*, vol. 10, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/nano10020346.
 - [20] G. J. Tamara, J. Polii, F. R. Tumimomor, A. M. Rampengan, and S. W. Mongan, 'Karakteristik I-V Elektroda Superkapasitor Berbasis Karbon Aktif Kulit Kacang Batik Kawangkoan I-V Characteristics Of Supercapacitor Electrodes Based On Batik Kawangkoan Peanut Shell Activated Carbon'.