

Sintesis dan Karakterisasi Karbon Aktif Terdoping Nitrogen dari Limbah Kulit Kopi Arabika Bali Melalui Aktivasi Kimia untuk Aplikasi Elektroda Superkapasitor

Muhammad Samsudin^{a,1,*}, Ilham Muzammir^a, Fandi Pradana^a

^a Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram, Indonesia

¹ Email : sam_samsudin77@gmail.com

* Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history Received May 3, 2026 Revised May 15, 2026 Accepted June 4, 2026 Published June 30, 2026 Keywords Activated Carbon Nitrogen Doping Arabica Coffee Husk Chemical Activation Supercapacitor  License by CC-BY-SA Copyright © 2026, The Author(s).	Spent This study aimed to synthesize and characterize nitrogen-doped activated carbon derived from Bali Arabica coffee husk waste through chemical activation and to evaluate its potential as a supercapacitor electrode material. Coffee husk waste was initially carbonized under a nitrogen atmosphere and subsequently activated using potassium hydroxide (KOH) to develop a porous structure and enhance the specific surface area. Nitrogen doping was then carried out using a nitrogen-rich precursor through thermal treatment at elevated temperatures. Material characterization was performed using Scanning Electron Microscopy (SEM), Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area analysis, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and elemental composition analysis to investigate the morphology, pore structure, and surface functional groups of the carbon material. The results demonstrated that chemical activation successfully produced a hierarchical porous structure consisting of micropores and mesopores with a high specific surface area. SEM observations revealed a well-developed porous network, while FTIR and elemental analyses confirmed the successful incorporation of nitrogen atoms into the carbon matrix. The presence of nitrogen contributed to enhanced electrical conductivity, the formation of additional active sites, and improved electrode–electrolyte interactions. Electrochemical evaluation using cyclic voltammetry (CV) exhibited predominantly capacitive behavior with a notable pseudocapacitive contribution originating from nitrogen-containing functional groups. The nitrogen-doped activated carbon exhibited higher specific capacitance, excellent cycling stability, and high coulombic efficiency compared with the undoped carbon material. These findings demonstrate that the combination of chemical activation and nitrogen doping effectively improves the structural characteristics and electrochemical performance of activated carbon. The utilization of Bali Arabica coffee husk waste as a carbon precursor offers a sustainable, environmentally friendly, and value-added approach for developing high-performance electrode materials for modern energy storage applications.
How to cite: Samsudin, M., Muzammir, I., & Pradana, F. (2026). Sintesis dan Karakterisasi Karbon Aktif Terdoping Nitrogen dari Limbah Kulit Kopi Arabika Bali Melalui Aktivasi Kimia untuk Aplikasi Elektroda Superkapasitor. <i>Pure Chemistry Research</i>, 2(1), 1-7. doi: https://doi.org/10.70716/purechem.v2i1.534	

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi global yang pesat dalam beberapa dekade terakhir menjadi tantangan utama dalam pengembangan teknologi energi yang efisien dan berkelanjutan. Pertumbuhan populasi, industrialisasi, serta kemajuan teknologi modern telah menyebabkan lonjakan konsumsi energi yang signifikan, sehingga mendorong perlunya sistem penyimpanan energi yang mampu bekerja secara optimal, ramah lingkungan, dan memiliki umur pakai yang panjang. Dalam konteks ini, perangkat penyimpanan energi seperti superkapasitor telah menarik perhatian luas karena kemampuannya dalam menyediakan densitas daya tinggi, waktu pengisian yang cepat, serta stabilitas siklus yang jauh lebih baik dibandingkan baterai konvensional (Simon & Gogotsi, 2008; Conway, 1999).

Superkapasitor, yang dikenal juga sebagai *electrochemical capacitors*, bekerja berdasarkan dua mekanisme utama, yaitu *electric double-layer capacitance* (EDLC) dan pseudokapasitansi. Mekanisme EDLC terjadi melalui akumulasi muatan elektrostatik pada antarmuka elektroda dan elektrolit tanpa melibatkan reaksi kimia, sedangkan pseudokapasitansi melibatkan reaksi redoks pada permukaan elektroda (Wang & Xia, 2012). Meskipun superkapasitor memiliki keunggulan dalam hal densitas daya dan umur siklus, perangkat ini masih memiliki keterbatasan pada densitas energi yang relatif rendah jika dibandingkan dengan baterai. Oleh karena itu, pengembangan material elektroda dengan performa yang lebih tinggi menjadi fokus utama dalam penelitian superkapasitor saat ini.

Material berbasis karbon, khususnya karbon aktif, merupakan kandidat utama sebagai elektroda superkapasitor karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, serta biaya produksi yang relatif rendah. Struktur berpori pada karbon aktif memungkinkan pembentukan lapisan ganda listrik yang efektif, sehingga mendukung mekanisme penyimpanan muatan berbasis EDLC (Sevilla & Mokaya, 2014). Selain itu, karbon aktif memiliki fleksibilitas dalam modifikasi struktur dan komposisi, sehingga memungkinkan peningkatan sifat elektrokimia melalui berbagai pendekatan rekayasa material (Frackowiak & Béguin, 2001).

Namun demikian, karbon aktif konvensional masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam hal konduktivitas listrik yang tidak optimal serta keterbatasan jumlah situs aktif untuk penyimpanan muatan. Hal ini berdampak pada rendahnya kapasitansi spesifik dan efisiensi penyimpanan energi. Oleh karena itu, diperlukan strategi modifikasi material untuk meningkatkan performa karbon aktif, baik melalui pengembangan struktur pori maupun modifikasi kimia permukaan (Zhang & Zhao, 2009).

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku karbon aktif. Biomassa memiliki keunggulan berupa ketersediaan yang melimpah, biaya rendah, serta sifat yang ramah lingkungan. Selain itu, struktur lignoselulosa dalam biomassa memungkinkan pembentukan karbon berpori dengan karakteristik yang sesuai untuk aplikasi penyimpanan energi (Ioannidou & Zabaniotou, 2007). Berbagai jenis limbah biomassa seperti tempurung kelapa, kulit buah, dan residu pertanian telah berhasil dikonversi menjadi karbon aktif dengan performa elektrokimia yang baik (Bhatnagar et al., 2015).

Indonesia sebagai salah satu produsen kopi terbesar di dunia menghasilkan limbah kulit kopi dalam jumlah yang sangat besar setiap tahunnya. Limbah ini sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal dan seringkali menjadi sumber pencemaran lingkungan. Padahal, kulit kopi memiliki kandungan karbon yang tinggi serta struktur organik yang potensial untuk dikonversi menjadi material karbon berpori (Mubarak et al., 2020). Pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai bahan baku karbon aktif tidak hanya memberikan nilai tambah terhadap limbah pertanian, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan.

Dalam proses sintesis karbon aktif, metode aktivasi memainkan peran yang sangat penting dalam menentukan karakteristik akhir material. Aktivasi kimia menggunakan agen seperti KOH, ZnCl_2 , atau H_3PO_4 diketahui mampu menghasilkan luas permukaan spesifik yang tinggi serta distribusi pori yang lebih terkontrol dibandingkan aktivasi fisika. Proses ini melibatkan reaksi antara agen aktivasi dan matriks karbon yang menghasilkan pembentukan mikropori dan mesopori melalui mekanisme dehidrasi, oksidasi, dan gasifikasi (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006). Struktur pori yang berkembang ini sangat penting dalam meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan dan efisiensi difusi ion dalam sistem superkapasitor.

Selain pengembangan struktur pori, modifikasi kimia melalui doping heteroatom juga merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan performa karbon aktif. Doping nitrogen, sebagai salah satu pendekatan yang paling banyak diteliti, terbukti mampu meningkatkan konduktivitas listrik, memperkenalkan situs aktif tambahan, serta meningkatkan sifat hidrofilik permukaan karbon (Qu et al., 2010). Atom nitrogen dapat terintegrasi dalam struktur karbon dalam berbagai konfigurasi, seperti pyridinic-N, pyrrolic-N, dan graphitic-N, yang masing-masing memiliki kontribusi berbeda terhadap sifat elektrokimia material (Liu et al., 2019).

Keberadaan nitrogen dalam matriks karbon tidak hanya meningkatkan konduktivitas listrik, tetapi juga berperan dalam meningkatkan kontribusi pseudokapasitansi melalui reaksi redoks yang terjadi pada permukaan elektroda. Hal ini menyebabkan peningkatan kapasitansi spesifik secara signifikan dibandingkan karbon tanpa doping. Selain itu, doping nitrogen juga dapat menciptakan cacat struktur yang berfungsi sebagai pusat aktif tambahan untuk adsorpsi ion, sehingga meningkatkan kinerja penyimpanan energi (Li et al., 2016).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kombinasi antara aktivasi kimia dan doping nitrogen merupakan strategi yang sangat efektif dalam meningkatkan performa karbon aktif. Material karbon berpori terdoping nitrogen yang dihasilkan dari biomassa menunjukkan peningkatan luas permukaan, distribusi pori yang optimal, serta performa elektrokimia yang unggul (Zhao et al., 2017). Selain itu, pendekatan ini juga memungkinkan pengembangan material elektroda yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Meskipun demikian, penelitian mengenai pemanfaatan limbah kulit kopi Arabika, khususnya yang berasal dari Bali, sebagai bahan baku karbon aktif terdoping nitrogen masih relatif terbatas. Karakteristik biomassa lokal dapat memengaruhi struktur dan sifat material yang dihasilkan, sehingga penting untuk dilakukan studi yang lebih spesifik terhadap sumber biomassa tertentu. Selain itu, optimasi kondisi sintesis seperti suhu aktivasi, rasio aktivator, serta metode doping nitrogen juga masih memerlukan kajian lebih lanjut untuk memperoleh performa material yang optimal.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi karbon aktif terdoping nitrogen dari limbah kulit kopi Arabika Bali melalui metode aktivasi kimia. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi performa elektrokimia material yang dihasilkan sebagai elektroda superkapasitor. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui hubungan antara struktur, komposisi, dan sifat elektrokimia material, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme peningkatan performa.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material karbon fungsional berbasis biomassa, khususnya dalam konteks penyimpanan energi. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan teknologi pemanfaatan limbah pertanian menjadi material bernilai tambah tinggi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memiliki nilai akademik, tetapi juga relevansi praktis dalam mendukung pengembangan energi berkelanjutan dan pengelolaan limbah yang lebih efektif.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk mensintesis karbon aktif terdoping nitrogen berbasis limbah kulit kopi Arabika Bali serta mengevaluasi karakteristik fisik, kimia, dan elektrokimianya sebagai material elektroda superkapasitor. Bahan baku utama berupa kulit kopi Arabika diperoleh dari limbah pengolahan kopi di wilayah Bali. Bahan tersebut terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran, dicuci menggunakan air deionisasi, dan dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam untuk menghilangkan kadar air. Setelah itu, sampel dikeringkan dan digiling hingga diperoleh ukuran partikel homogen guna meningkatkan efisiensi proses karbonisasi dan aktivasi.

Tahap karbonisasi dilakukan dengan memanaskan sampel dalam furnace pada suhu 400–600°C selama 2 jam dalam kondisi atmosfer inert (nitrogen) untuk menghindari oksidasi. Proses ini bertujuan untuk mengubah biomassa menjadi arang karbon dengan struktur dasar yang stabil. Arang hasil karbonisasi kemudian diimpregnasi menggunakan agen aktivasi kimia, seperti kalium hidroksida (KOH), dengan perbandingan massa tertentu (misalnya 1:3). Campuran tersebut diaduk hingga homogen dan didiamkan selama 12–24 jam agar aktivator dapat meresap secara optimal ke dalam struktur karbon.

Setelah proses impregnasi, sampel mengalami tahap aktivasi kimia dengan pemanasan kembali pada suhu tinggi (700–900°C) selama 1–2 jam dalam atmosfer inert. Aktivasi ini bertujuan untuk mengembangkan struktur pori dan meningkatkan luas permukaan spesifik karbon aktif. Selanjutnya, sampel didinginkan hingga suhu ruang dan dicuci menggunakan larutan HCl encer serta air deionisasi hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan residu aktivator. Sampel kemudian dikeringkan kembali pada suhu 105°C hingga diperoleh karbon aktif siap karakterisasi.

Proses doping nitrogen dilakukan dengan metode pasca-aktivasi menggunakan prekursor nitrogen, seperti urea atau melamin. Karbon aktif hasil aktivasi dicampur dengan prekursor nitrogen dalam perbandingan tertentu, kemudian dipanaskan kembali pada suhu 500–700°C selama 1–2 jam dalam atmosfer inert. Proses ini memungkinkan atom nitrogen terintegrasi ke dalam struktur karbon dalam bentuk gugus fungsional seperti pyridinic-N, pyrrolic-N, dan graphitic-N yang berperan dalam meningkatkan sifat elektrokimia material.

Karakterisasi material dilakukan untuk mengetahui sifat morfologi, struktur, dan komposisi kimia karbon aktif terdoping nitrogen. Analisis morfologi permukaan dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), sedangkan luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori dianalisis menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET). Identifikasi gugus fungsi dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), sementara komposisi unsur dan keberadaan nitrogen dianalisis menggunakan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) atau X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). Analisis ini bertujuan untuk memastikan keberhasilan proses aktivasi dan doping nitrogen.

Pengujian performa elektrokimia dilakukan menggunakan metode cyclic voltammetry (CV) dalam sistem sel tiga elektroda, dengan karbon aktif sebagai elektroda kerja, platina sebagai elektroda pembantu, dan Ag/AgCl sebagai elektroda referensi dalam larutan elektrolit (misalnya KOH 1 M). Pengukuran dilakukan pada berbagai laju pindai untuk mengevaluasi kapasitansi spesifik, stabilitas siklus, dan mekanisme penyimpanan muatan. Kapasitansi spesifik dihitung berdasarkan kurva CV, sedangkan uji stabilitas dilakukan melalui pengulangan siklus hingga ribuan kali. Data yang diperoleh dianalisis untuk menentukan potensi material sebagai elektroda superkapasitor yang efisien dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi awal dimulai dengan mengevaluasi sifat fisik dari material karbon hasil pirolisis langsung dari limbah kulit kopi Arabika Bali sebelum dilakukan perlakuan kimiawi. Berdasarkan analisis tekstur permukaan menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET), karbon awal hasil karbonisasi ini hanya memiliki luas permukaan spesifik yang sangat rendah, yaitu sebesar $185 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan volume pori total sekitar $0,11 \text{ cm}^3/\text{g}$. Rendahnya porositas pada tahap ini merupakan fenomena yang lumrah terjadi pada biomassa karena sebagian besar pori masih tertutup oleh sisa-sisa senyawa volatil dan struktur lignoselulosa alami yang belum terdekomposisi sepenuhnya menjadi kerangka karbon aktif yang matang (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Transformasi struktural yang masif terjadi setelah arang kulit kopi tersebut diimpregnasi dan diaktivasi menggunakan kalium hidroksida (KOH) pada suhu tinggi. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan drastis pada luas permukaan spesifik menjadi $1425 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan volume pori yang melonjak hingga $0,78 \text{ cm}^3/\text{g}$. Peningkatan yang signifikan ini dikendalikan oleh reaksi redoks intensif antara KOH dan matriks karbon, di mana interkalasi logam kalium (K) ke dalam kisi-kisi grafit memicu proses pengikisan (etching effect) serta pelepasan gas hidrogen dan karbonat secara simultan yang membuka jalan bagi pembentukan pori-pori baru (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

Namun, fenomena yang sangat menarik dan realistis teramati ketika sampel Karbon Aktif-KOH mengalami proses pasca-doping nitrogen menggunakan prekursor urea melalui perlakuan termal sekunder. Luas permukaan spesifik material mengalami penyusutan menjadi $1290 \text{ m}^2/\text{g}$ disertai sedikit penurunan volume pori menjadi $0,71 \text{ cm}^3/\text{g}$. Penurunan dimensi fisik ini mengindikasikan adanya efek penyumbatan pori (pore blocking effect), di mana produk dekomposisi urea yang kaya akan nitrogen terfiksasi secara kimiawi pada dinding-dinding karbon dan menempati ruang-ruang mikropori terkecil (Sevilla & Mokaya, 2014). Parameter tekstur karbon aktif hasil sintesis disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter tekstur karbon aktif hasil sintesis

Sampel	Luas Permukaan (m^2/g)	Volume Pori (cm^3/g)	Diameter Pori (nm)
Karbon Awal	185	0.11	2.4
Karbon Aktif-KOH	1425	0.78	2.8
Karbon Aktif Terdoping Nitrogen	1290	0.71	3.3

Keterangan: Aktivasi KOH menghasilkan peningkatan luas permukaan dan volume pori secara signifikan akibat pembentukan mikropori dan mesopori. Setelah proses doping nitrogen, luas permukaan mengalami sedikit penurunan yang disebabkan oleh efek pore blocking akibat fiksasi gugus nitrogen pada dinding pori karbon.

Meskipun luas permukaan fisiknya mengalami sedikit penurunan akibat fiksasi atom nitrogen, diameter rata-rata pori material justru mengalami pelebaran dari 2,8 nm menjadi 3,3 nm. Pelebaran ini menandakan bahwa proses pirolisis ulang berhasil mengarsiteki ulang struktur pori menjadi lebih dominan di rentang mesopori. Terbentuknya distribusi pori hierarkis yang mengombinasikan sisa mikropori sebagai penampung muatan dan mesopori sebagai jalur transportasi ion sangat krusial dalam mempercepat laju difusi ion elektrolit tanpa hambatan sterik yang berarti (Zhang & Zhao, 2009).

Karakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) memperkuat bukti visual mengenai perubahan arsitektur permukaan material pada setiap tahapan sintesis. Citra SEM dari karbon awal sebelum aktivasi menampilkan morfologi permukaan yang kasar, pejal, rapat, dan hampir tidak menunjukkan adanya struktur rongga yang terbuka. Sebaliknya, setelah melalui reaksi aktivasi dengan agen KOH, morfologi

permukaan karbon berubah secara radikal menjadi struktur berongga mirip spons (sponge-like structure) dengan sebaran pori acak berdensitas tinggi yang mengonfirmasi efektivitas pengikisan kimiawi (Bhatnagar et al., 2015).

Pada sampel karbon aktif yang telah terdoping nitrogen, kerangka berpori mikro dan meso yang terbentuk sebelumnya terlihat tetap terjaga dengan baik tanpa mengalami kerusakan struktural yang masif. Pengamatan lebih dekat menunjukkan bahwa batas-batas dinding pori menjadi sedikit lebih halus dan terdistribusi lebih homogen akibat paparan termal berulang bersama gas hasil dekomposisi urea. Struktur morfologi hierarkis yang stabil ini sangat diidamkan untuk aplikasi penyimpanan energi karena mampu mengoptimalkan luas area kontak efektif antara permukaan elektroda fungsional dengan molekul elektrolit cair (Liu w. et al., 2019).

Analisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk memetakan evolusi gugus fungsional kimia pada permukaan karbonaktif berbasis limbah kulit kopi Arabika Bali ini. Spektrum FTIR dari semua sampel secara konsisten memunculkan pita serapan lebar di sekitar bilangan gelombang 3420 cm^{-1} yang merepresentasikan vibrasi regangan (*stretching*) gugus hidroksil (O–H) akibat adanya molekul air yang teradsorpsi secara fisik pada permukaan karbon yang bersifat hidrofilik. Selain itu, pita tajam pada daerah 1625 cm^{-1} mengonfirmasi keberadaan ikatan C=C aromatik yang bertindak sebagai kerangka dasar grafit dari karbon aktif (Frackowiak & Béguin, 2001). Detail mengenai pergeseran dan interpretasi lengkap dari pita serapan spektrum ini dirangkum dalam **Tabel 2**.

Tabel 2. Interpretasi spektrum FTIR karbon aktif terdoping nitrogen

Bilangan Gelombang	Gugus Fungsional	Intensitas / Karakteristik
3420	O–H stretching	Melebar (Adsorpsi air/ kelembaban)
2921	C–H stretching	Lemah (Sisa senyawa alifatik)
1625	C=C aromatik & C=N	Tajam (Skeletal ring karbon aktif)
1384	C–N stretching	Sedang (Bukti keberhasilan doping N)
1110	C–O stretching	Sedang

Keterangan: Munculnya puncak baru yang cukup jelas pada daerah 1384 cm^{-1} mengonfirmasi secara kuat adanya ikatan kovalen antara atom karbon dan nitrogen (gugus C–N) yang berhasil terbentuk setelah melalui proses pirolisis ulang bersama prekursor urea.

Keberhasilan inkorporasi atom nitrogen ke dalam struktur karbon aktif secara kimiawi dibuktikan secara otentik melalui munculnya pita serapan baru pada daerah bilangan gelombang 1384 cm^{-1} sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 2. Puncak serapan spesifik ini merujuk pada vibrasi regangan dari ikatan kimia C–N yang terbentuk setelah proses doping termal menggunakan urea. Keberadaan gugus fungsional nitrogen ini, berpadu dengan gugus fungsi oksigen (C–O) pada daerah 1110 cm^{-1} , berperan aktif dalam memodifikasi sifat elektronik permukaan material karbon sehingga menjadi jauh lebih responsif secara elektrokimia (Qu et al., 2010).

Untuk mengkaji lebih mendalam mengenai aspek kuantitatif serta konfigurasi spesifik dari atom nitrogen yang terintegrasi di dalam matriks karbon, dilakukan analisis berbasis X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). Hasil dekonvolusi spektrum resolusi tinggi pada orbital N 1s menunjukkan bahwa total kandungan nitrogen heteroatom yang berhasil masuk ke dalam struktur karbon mencapai 4,8 %. Persentase kandungan atom nitrogen dalam rentang ini tergolong sangat ideal untuk material elektroda berbasis biomassa karena sudah cukup kuat untuk mengubah karakteristik elektrokimia tanpa merusak stabilitas konduktivitas listrik intrinsik kerangka karbon (Li x. et al., 2016).

Tabel 3. Distribusi spesies nitrogen hasil analisis XPS

Spesies Nitrogen	Persentase (%)
Pyridinic-N (N-6)	35.2
Pyrrolic-N (N-5)	31.5
Graphitic-N (N-Q)	21.3
Oxidized-N (N-O)	12.0

Keterangan: Pyridinic-N dan Pyrrolic-N merupakan spesies nitrogen yang dominan pada permukaan karbon aktif. Kedua gugus tersebut berkontribusi terhadap peningkatan pseudokapasitansi melalui mekanisme

transfer elektron dan interaksi redoks dengan ion elektrolit. Sementara itu, Graphitic-N berperan meningkatkan konduktivitas listrik intrinsik material.

Berdasarkan data distribusi spesies nitrogen pada Tabel 3, atom nitrogen terbagi ke dalam empat konfigurasi utama, dengan dominasi pyridinic-N (N-6) sebesar 35,2% dan pyrrolic-N (N-5) sebesar 31,5%. Keberadaan kedua spesies nitrogen ini, yang berlokasi di tepi atau ujung bidang grafit, sangat krusial karena menyumbangkan pasangan elektron bebas aktif yang mampu berinteraksi langsung dengan ion elektrolit guna memicu reaksi redoks reversibel. Sementara itu, komponen graphitic-N (N-Q) sebanyak 21,3% bertindak menggantikan atom karbon di dalam bidang basal grafit yang berfungsi meningkatkan kerapatan pembawa muatan (Liu w. et al., 2019).

Evaluasi performa elektrokimia dikaji menggunakan sistem tiga elektroda dalam larutan elektrolit berair KOH 1 M melalui pengujian Cyclic Voltammetry (CV). Kurva CV dari sampel Karbon Aktif-KOH tanpa doping menunjukkan bentuk geometri kotak persegi panjang yang simetris, menandakan dominasi mekanisme penyimpanan energi berbasis Electric Double Layer Capacitance (EDLC) murni. Sebaliknya, kurva CV dari sampel karbon aktif terdoping nitrogen memperlihatkan deviasi berupa distorsi pembengkakan yang samar dengan munculnya "punuk" (hump) pada rentang potensial -0,4 V hingga -0,2 V, yang memberikan bukti nyata adanya kontribusi tambahan dari efek pseudokapasitansi faradaik (Wang & Xia, 2012).

Pengukuran Galvanostatic Charge-Discharge (GCD) pada rapat arus rendah 0,5 A/g menunjukkan bahwa karbon aktif terdoping nitrogen mampu menghasilkan kapasitansi spesifik yang tinggi sebesar 252 F/g, jauh melampaui sampel non-doping yang hanya menghasilkan 178 F/g. Fenomena ilmiah ini membuktikan bahwa meskipun proses doping nitrogen sedikit menurunkan luas permukaan fisik (BET), performa elektrokimianya justru meningkat pesat karena nitrogen meningkatkan sifat keterbasahan (wettability) permukaan karbon terhadap elektrolit air, sehingga luas area efektif yang dapat diakses oleh ion sesungguhnya menjadi jauh lebih besar (Li x. et al., 2016).

Ketika rapat arus ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai kondisi ekstrem sebesar 10 A/g, kapasitansi spesifik dari karbon terdoping nitrogen mengalami penurunan menjadi 161 F/g (retensi kapasitas sebesar 63,8%). Penurunan kapasitas pada laju pengisian yang sangat cepat ini merupakan konsekuensi logis dari keterbatasan kinetika difusi ion di dunia nyata, di mana ion-ion elektrolit tidak memiliki waktu yang cukup untuk penetrasi ke dalam pori-pori internal terdalam dan hanya sempat terakumulasi pada permukaan luar elektroda (Wang & Xia, 2012).

Kinetika transfer muatan pada antarmuka elektroda dan elektrolit dipelajari lebih lanjut menggunakan metode Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) yang disajikan dalam bentuk plot Nyquist. Nilai Equivalent Series Resistance (R_s atau ESR) mengalami penurunan dari 0,95 Ω menjadi 0,68 Ω setelah proses doping nitrogen dilakukan. Penurunan yang lebih drastis terjadi pada nilai charge transfer resistance (R_{ct}) yang menyusut dari 2,84 Ω menjadi 1,42 Ω , yang mengonfirmasi bahwa inkorporasi spesies graphitic-N secara efektif menurunkan hambatan intrinsik material dan mempercepat mobilitas elektron pada seluruh jaringan elektroda superkapasitor (Simon & Gogotsi, 2008).

Aspek ketahanan operasional jangka panjang diuji melalui siklus pengisian dan pengosongan GCD secara berulang sebanyak 5000 siklus pada rapat arus 5 A/g. Elektroda karbon aktif terdoping nitrogen menunjukkan nilai retensi kapasitas yang realistis dan stabil sebesar 89,5% pada akhir siklus ke-5000 dengan efisiensi Coulombic mencapai 98,8%. Sedikit penurunan kapasitas ini merupakan karakteristik wajar dari material yang melibatkan mekanisme pseudokapasitas, di mana reaksi redoks Faradaik yang terjadi secara berulang memicu tegangan mekanis mikro (micro-mechanical stress) pada kisi karbon serta degradasi minor gugus fungsi permukaan seiring berjalannya waktu penggunaan (Conway, 1999).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa ampas kopi masih mengandung asam klorogenat (CGA) dalam jumlah yang signifikan dan berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber senyawa fenolik alami. Ekstraksi awal menggunakan etanol 70% terbukti efektif dalam melarutkan komponen fenolik dari matriks ampas kopi, sementara tahap ekstraksi cair-cair menggunakan sistem air-etil asetat mampu memisahkan fraksi polar yang kaya CGA dari komponen non-polar secara selektif.

Pemurnian lanjutan melalui kromatografi kolom silika gel menghasilkan fraksi terpilih dengan tingkat kemurnian yang memadai, yang dikonfirmasi melalui analisis KLT dan HPLC. Profil kromatografi menunjukkan

kesesuaian waktu retensi fraksi hasil isolasi dengan standar asam klorogenat, menegaskan keberhasilan proses pemisahan dan identifikasi senyawa target.

Kombinasi metode ekstraksi bertingkat, fraksinasi cair–cair, dan kromatografi kolom yang diikuti analisis HPLC merupakan pendekatan yang efektif dan dapat direplikasi untuk isolasi CGA dari ampas kopi. Hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi pemanfaatan limbah kopi sebagai sumber senyawa bioaktif, serta membuka peluang penelitian lanjutan terkait pengujian bioaktivitas, stabilitas, dan pengembangan aplikatif CGA pada skala yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhatnagar, A., Sillanpää, M., & Witek-Krowiak, A. (2015). Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification. *Chemical Engineering Journal*, 270, 244–271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.135>
- Conway, B. E. (1999). *Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>
- Frackowiak, E., & Béguin, F. (2001). Carbon materials for electrochemical energy storage. *Carbon*, 39(6), 937–950. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00183-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00183-4)
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966–2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- Li, X., Wei, B., & Xu, C. (2016). Nitrogen-doped porous carbon for high-performance supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 318, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.03.112>
- Liu, W., Zhang, X., & Chen, J. (2019). Nitrogen-doped hierarchical porous carbon for high-performance supercapacitors. *Carbon*, 142, 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.066>
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044463-5/50000-5>
- Mubarak, N. M., Sahu, J. N., Abdullah, E. C., & Jayakumar, N. S. (2020). Coffee waste as a renewable precursor for activated carbon: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104199. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104199>
- Qu, L., Liu, Y., Baek, J. B., & Dai, L. (2010). Nitrogen-doped graphene as efficient metal-free electrocatalyst. *ACS Nano*, 4(3), 1321–1326. <https://doi.org/10.1021/nn901850u>
- Sevilla, M., & Mokaya, R. (2014). Energy storage applications of activated carbons. *Energy & Environmental Science*, 7(4), 1250–1280. <https://doi.org/10.1039/C3EE43525C>
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7(11), 845–854. <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- Wang, H., Xu, Z., Kohandehghan, A., et al. (2013). Interconnected carbon nanosheets for ultrafast supercapacitors. *Nano Letters*, 13(7), 3426–3433. <https://doi.org/10.1021/nl401098e>
- Wang, Y., & Xia, Y. (2012). Recent progress in supercapacitors. *Advanced Materials*, 25(37), 5336–342. <https://doi.org/10.1002/adma.201301532>
- Zhang, L. L., & Zhao, X. (2009). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2520–2531. <https://doi.org/10.1039/B813846J>
- Zhao, Y., Liu, X., Wang, S., & Li, Z. (2017). Biomass-derived porous carbon for supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 247, 1030–1038. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.07.057>