



Studi Awal Perlakuan Termal Grafitisasi Tempurung Kelapa dan Pengaruhnya terhadap Tingkat Kristalinitas Karbon

Nurul Nadia^{1*}, Rahmat Hidayat², Leni Aziyus Fitri³, Fadhila Ulfa Jhora⁴

¹⁻⁴Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

E-mail: nurulnadia1602p3@gmail.com¹, r.hidayat@fmipa.unp.ac.id²

*Penulis Korespondensi: r.hidayat@fmipa.unp.ac.id

Abstract. Coconut shells are a type of biomass with a high fixed carbon content, making them a potential raw material for the production of graphitic carbon. However, the graphitization process generally requires very high temperatures, resulting in high energy consumption and production costs. This study aims to examine the effect of the graphitization process at 900 °C on the crystallinity of coconut shell carbon that has been activated using NaOH without the addition of a metal catalyst. The synthesis process consisted of four main stages: cleaning and drying the raw material; carbonization at 350 °C for 2 hours; chemical activation using a NaOH solution; and graphitization in a furnace at 900 °C for 3 hours. Crystal structure characterization was performed using X-ray diffraction (XRD) to analyze phase changes, degree of crystallinity, *d*-spacing values, and crystallite size. The results showed that the graphitization process increased the orderliness of the carbon structure, as indicated by the appearance of a (002) diffraction peak at an angle of 2θ equal to 25.91° , a decrease in the *d*-spacing value to 3.439 Å, and an increase in crystallite size to 31.07 nm. These results indicate a reorganization of carbon atoms toward a more graphitic structure compared to the carbon before and after activation. Thus, the combination of NaOH activation and graphitization at 900 °C is capable of increasing the crystallinity of the carbon tem.

Keywords: Coconut Shell; Crystallinity; Graphitic Carbon; Graphitization; XRD.

Abstrak. Tempurung kelapa merupakan biomassa yang memiliki kandungan karbon tetap tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan karbon grafitik. Namun, proses grafitisasi pada umumnya memerlukan suhu yang sangat tinggi sehingga menyebabkan konsumsi energi dan biaya produksi menjadi besar. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh proses grafitisasi pada suhu 900 °C terhadap tingkat kristalinitas karbon tempurung kelapa yang telah diaktivasi menggunakan NaOH tanpa penambahan katalis logam. Proses sintesis dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu pembersihan dan pengeringan bahan baku, karbonisasi pada suhu 350 °C selama 2 jam, aktivasi kimia menggunakan larutan NaOH, serta grafitisasi menggunakan furnace pada suhu 900 °C selama 3 jam. Karakterisasi struktur kristal dilakukan menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) untuk menganalisis perubahan fase, derajat kristalinitas, nilai *d*-spacing, dan ukuran kristalit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses grafitisasi meningkatkan keteraturan struktur karbon yang ditandai dengan munculnya puncak difraksi bidang (002) pada sudut 2θ sebesar $25,91^\circ$, penurunan nilai *d*-spacing menjadi 3,439 Å, serta peningkatan ukuran kristalit hingga 31,07 nm. Hasil tersebut mengindikasikan terjadinya reorganisasi atom karbon menuju struktur yang lebih grafitik dibandingkan karbon sebelum dan sesudah aktivasi. Dengan demikian, kombinasi aktivasi NaOH dan grafitisasi pada suhu 900 °C mampu meningkatkan kristalinitas karbon tempurung kelapa tanpa penggunaan katalis logam sehingga berpotensi menjadi metode yang lebih sederhana, hemat energi, dan ramah lingkungan dalam menghasilkan material karbon grafitik berbasis biomassa.

Kata Kunci: Grafitisasi; Karbon Grafitik; Kristalinitas; Tempurung Kelapa; XRD.

1. LATAR BELAKANG

Material karbon berbahan baku biomassa kini semakin banyak dikembangkan sebagai alternatif untuk bahan dasar karbon grafitik karena sifatnya yang dapat diperbarui, ramah lingkungan dan memiliki biaya produksi yang relatif rendah. Salah satu bahan biomassa yang bisa dimanfaatkan adalah tempurung kelapa, karena memiliki kadar karbon tetap yang tinggi, kadar abu yang rendah, serta lignoselulosa yang membantu menghasilkan material karbon berkualitas setelah menjalani proses karbonisasi (Manurung et al., 2025). Karbon yang diperoleh dari tempurung kelapa bisa digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor,

baterai, penyerap, serta bahan baku untuk membuat *reduced graphene oxide* (rGO), asalkan memiliki Tingkat kristalinitas yang cukup baik (Ramadhani et al., 2025).

Kristalinitas karbon bisa ditingkatkan dengan cara grafitisasi yaitu proses mengubah struktur karbon yang tidak teratur menjadi struktur yang lebih rapi seperti grafit, dengan cara memanaskan pada suhu yang sangat tinggi (Rengga et al., 2025). Peningkatan Tingkat kristalinitas dapat meningkatkan sifat Listrik, kestabilan termal serta ketertiban susunan atom karbon. Diantara berbagai parameter dalam proses tersebut, suhu grafitisasi merupakan faktor yang paling penting dalam membentuk domain grafitik karena menentukan energi yang dibutuhkan untuk mengatur ulang posisi atom karbon (Artsanti et al., 2010). Namun, cara menggambar grafitik secara konvensional biasanya dilakukan pada suhu yang lebih dari 1200 °C, bahkan bisa mencapai lebih dari 2500 °C, sehingga memerlukan penggunaan energi yang cukup besar dan biaya yang tinggi untuk produksinya (Muchlisha et al., 2023).

Beberapa penelitian sudah mencoba menurunkan suhu proses grafitisasi biomassa dengan menggunakan katalis berupa logam seperti Fe, Ni, atau Co, sehingga struktur grafitik bisa terbentuk pada suhu 900 hingga 1200 °C. Meskipun begitu, penggunaan katalis logam bisa menyisakan sisa logam diproduk karbon, sehingga diperlukan langkah pembersihan tambahan dan membuat proses pembuatan lebih rumit. Justru, penelitian tentang proses grafitisasi tanpa menggunakan katalis logam terutama pada suhu 900 °C, dengan memanfaatkan tahap aktivasi sebagai langkah awal untuk meningkatkan struktur karbon, masih terbatas jumlahnya (Khoerunnisa et al., 2026).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk meneliti pengaruh proses grafitisasi pada suhu 900 °C terhadap tingkat kristalinitas dari karbon tempurung kelapa yang sudah melewati tahap aktivasi. Hasil penelitian ini memberikan gambaran tentang seberapa baik suhu 900 °C dalam meningkatkan struktur karbon tanpa menggunakan katalis logam sehingga bisa menjadi pilihan metode pembuatan karbon grafitik yang lebih mudah, murah dan ramah lingkungan.

2. KAJIAN TEORITIS

Karbon merupakan salah satu unsur yang memiliki keragaman struktur dan sifat yang sangat luas sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti penyimpanan energi, adsorben, katalis, hingga material elektronik. Keunikan sifat karbon berasal dari kemampuannya membentuk berbagai jenis hibridisasi, yaitu sp , sp^2 , dan sp^3 . Salah satu bentuk alotrop karbon yang banyak dikembangkan adalah grafit, yang memiliki struktur kristal berlapis dengan atom-atom karbon tersusun dalam pola heksagonal dan saling terikat oleh

ikatan kovalen sp^2 yang kuat pada setiap lapisan. Antar lapisan grafit hanya dihubungkan oleh gaya van der Waals yang lemah, sehingga lapisan-lapisan tersebut relatif mudah bergeser satu sama lain. Struktur ini menyebabkan grafit memiliki konduktivitas listrik dan konduktivitas termal yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, serta ketahanan terhadap suhu tinggi. Pada struktur grafit ideal, jarak antaratom karbon dalam satu bidang sekitar 0,142 nm, sedangkan jarak antarbidang grafit sebesar 0,335 nm. Semakin teratur susunan atom karbon dalam suatu material, maka semakin tinggi pula tingkat kristalinitas dan kualitas struktur grafitik yang dihasilkan (Liu et al., 2020).

Salah satu sumber karbon yang berpotensi untuk menghasilkan material grafitik adalah biomassa tempurung kelapa. Tempurung kelapa memiliki kandungan karbon tetap yang tinggi serta kandungan lignin yang relatif besar sehingga mampu menghasilkan rendemen arang yang tinggi setelah proses karbonisasi. Selain mudah diperoleh dan tersedia dalam jumlah melimpah, pemanfaatan tempurung kelapa sebagai bahan baku karbon juga memberikan nilai tambah terhadap limbah biomassa yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal (Saleh et al., 2023). Namun karbon hasil karbonisasi umumnya masih didominasi oleh struktur amorf dengan tingkat keteraturan atom yang rendah. Oleh karena itu, diperlukan proses lanjutan berupa aktivasi dan grafitisasi untuk meningkatkan keteraturan struktur kristal karbon sehingga sifat fisik dan kimianya menjadi lebih baik.

Karbonisasi merupakan proses dekomposisi termal bahan organik pada kondisi minim oksigen untuk menghilangkan komponen volatil, seperti air, hemiselulosa, selulosa, dan sebagian lignin, sehingga menghasilkan material yang kaya karbon. Selama proses karbonisasi, atom karbon belum tersusun secara teratur sehingga struktur yang dihasilkan masih bersifat amorf. Struktur karbon amorf ditandai dengan susunan atom yang tidak beraturan serta masih banyak mengandung gugus fungsi dan pengotor yang dapat memengaruhi sifat material (Febriani et al., 2025). Oleh sebab itu, karbonisasi hanya menjadi tahap awal dalam pembentukan material karbon berkualitas tinggi dan perlu diikuti oleh proses aktivasi serta grafitisasi agar diperoleh struktur karbon yang lebih teratur.

Aktivasi kimia merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk meningkatkan kualitas material karbon. Pada penelitian ini, proses aktivasi dilakukan menggunakan natrium hidroksida (NaOH) yang berfungsi membuka pori-pori karbon, menghilangkan pengotor anorganik maupun senyawa non-karbon, serta meningkatkan luas permukaan spesifik material. Aktivasi menggunakan NaOH juga membantu mempercepat reorganisasi atom karbon pada tahap grafitisasi karena menghasilkan struktur karbon yang lebih homogen dan memiliki lebih banyak daerah aktif (Ramadhani et al., 2020). Dengan

demikian, proses aktivasi tidak hanya meningkatkan karakteristik pori material, tetapi juga berkontribusi terhadap pembentukan struktur grafitik yang lebih baik.

Grafitisasi merupakan proses perubahan struktur karbon amorf menjadi struktur karbon yang lebih teratur menyerupai grafit melalui perlakuan suhu tinggi. Selama proses ini, atom-atom karbon mengalami reorganisasi sehingga membentuk lapisan-lapisan grafitik dengan tingkat keteraturan yang semakin meningkat. Secara konvensional, grafitisasi dilakukan pada suhu di atas 2.000 °C untuk memperoleh kristalinitas yang tinggi. Namun, penggunaan suhu yang sangat tinggi menyebabkan kebutuhan energi yang besar dan biaya produksi yang tinggi. Oleh karena itu, berbagai penelitian berupaya mengembangkan metode grafitisasi pada suhu yang lebih rendah dengan memanfaatkan proses aktivasi kimia ataupun katalis logam. Pada penelitian ini, grafitisasi dilakukan pada suhu 900 °C tanpa menggunakan katalis logam untuk mengetahui sejauh mana peningkatan kristalinitas karbon dapat dicapai melalui kombinasi karbonisasi, aktivasi NaOH, dan perlakuan panas.

Keberhasilan proses grafitisasi dapat dianalisis menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) yang merupakan salah satu teknik karakterisasi paling umum untuk mengidentifikasi struktur kristal material karbon. Analisis XRD memberikan informasi mengenai fase kristal, derajat kristalinitas, ukuran kristalit, serta jarak antarbidang kristal (*d-spacing*). Pada material karbon grafitik, keberadaan puncak difraksi bidang (002) menjadi indikator utama terbentuknya struktur grafit. Peningkatan intensitas dan ketajaman puncak (002) menunjukkan bahwa atom karbon telah tersusun lebih teratur. Selain itu, nilai *d-spacing* yang semakin mendekati 0,335 nm mengindikasikan bahwa struktur karbon semakin menyerupai grafit ideal, sedangkan peningkatan ukuran kristalit menunjukkan pertumbuhan domain kristal akibat reorganisasi atom selama proses grafitisasi. Oleh karena itu, parameter-parameter hasil analisis XRD menjadi dasar yang penting dalam mengevaluasi keberhasilan pembentukan karbon grafitik dari biomassa tempurung kelapa.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan tiga jenis sampel karbon berbasis tempurung kelapa yang diperoleh melalui tahapan sintesis bertingkat. Sampel pertama adalah arang tempurung kelapa (ATK) yang diperoleh setelah proses karbonisasi pada suhu 350 °C selama 2 jam. Sampel kedua adalah arang aktif tempurung kelapa (AATK) yang diperoleh melalui aktivasi kimia menggunakan larutan NaOH terhadap ATK. Selanjutnya sampel arang tempurung kelapa yang telah diaktivasi dipanaskan kembali melalui proses grafitisasi menggunakan *furnace* pada suhu 900 °C selama 3 jam sehingga diperoleh sampel grafit.

Tahapan penelitian yang dilakukan adalah tahap pembersihan dan pengeringan limbah tempurung kelapa, tahap karbonisasi, tahap aktivasi karbon dan tahap perlakuan panas untuk menghasilkan fase karbon grafitik. Pada bagian ini, keempat proses tersebut diuraikan secara rinci. Bagian ini juga akan memaparkan bahan dan metode penelitian, termasuk peralatan yang digunakan.

Tahap sintesis

Pembersihan dan Pengeringan Tempurung Kelapa

Mengumpulkan dan membersihkan limbah tempurung kelapa dengan sikat baja. Kemudian mengeringkan TK selama 3 hari dibawah sinar matahari agar kadar air menurun (Putri et al., 2023).

Tahap Karbonisasi

Memasukkan TK kedalam oven untuk pengeringan, kemudian melakukan karbonisasi dengan menggunakan *furnace* pada suhu 350 °C selama 2 jam. Lalu hasil karbonisasi di tumbuk hingga halus dengan mortar alu untuk mendapatkan partikel yang lebih kecil sehingga dapat di saring dengan saringan ukuran 200 mesh (Putri & Supardi, 2023).

Tahap Aktivasi

Proses impragnansi dilakukan dengan melarutkan d melarutkan 10 gr padatan NaOH ke dalam akuades dengan volume 125 mL, kemudian diencerkan dalam labu ukur. Sebanyak 10gr bubuk ATK dimasukkan ke dalam beaker glass 250 mL, kemudian ditambahkan larutan NaOH hingga seluruh ATK terendam sempurna. Campuran tersebut diaduk dengan magnetic stirrer. Endapan hasil perendaman disaring/disentrifugasi untuk memisahkan padatan dari larutan, Lalu residu padat dikeringkan di dalam oven pada temperatur 90°C selama 1 jam hingga kadar airnya berkurang (Rengga et al., 2025).



Gambar 1. Tahap Aktivasi.

Tahap Grapitisasi dengan Metode Sintering (Destyorini et al., 2021)

Memasukkan sampel (*boat* keramik) ke *furnace* dan menutup rapat sampel AATK. Melakukan pemanasan; 5-10 °C/min sampai suhu target. Lalu tahan (*soak*) 3 jam disuhu 900 °C, kemudian melakukan pendinginan alami sampai suhu kamar sebelum membuka (Destyorini et al., 2021).



Gambar 2. Tahap Grapitisasi dengan Metode Sintering.

Tahap Karakterisasi

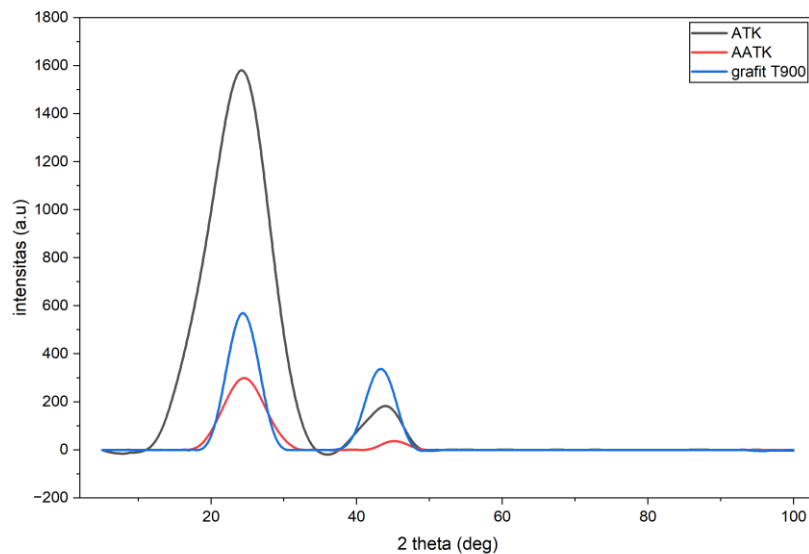
Sampel-sampel tersebut diperiksa lebih lanjut menggunakan difraksi sinar-x (XRD). Difraksi sinar-x (XRD) digunakan untuk menganalisis fase struktural, tingkat kristalinitas yang menentukan ketinggian tumpukan lapisan karbon (Barnakov et al., 2015). Ukuran kristalit dihitung menggunakan persamaan *Scherrer-Warren constant* (Fatimah et al., 2022).

$$L = \frac{1,84 \lambda}{\beta \cos \theta} \dots\dots\dots (i)$$

di mana λ adalah panjang gelombang radiasi sumber Cu K α , β adalah lebar penuh pada setengah maksimum (FWHM) dari puncak XRD pada 2θ , dan K adalah konstanta tak berdimensi yang bergantung pada bidang refleksi. Dalam hal ini, nilai K untuk bidang (002) adalah 0,89.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur kristal karbon TK sebelum dilakukan aktivasi dianalisis menggunakan XRD. Pada analisis ini dilakukan untuk mengamati puncak difraksi khas karbon amorf pada $2\theta \approx 23 - 26,5^\circ$ dan $40 - 45^\circ$ sebagai dasar perbandingan setelah aktivasi (Najati, 2023).



Gambar 3. Hasil XRD Sampel Arang Tempurung Kelapa (ATK), Arang Aktif Tempurung Kelapa (AATK) dan Grafit dengan Suhu 900 °C.

Difaktogram ATK menunjukkan puncak yang lebih lebar dan tidak setajam sampel karbon aktif maupun grafit. Pada puncak 2 theta sampel karbon terlihat di puncak 26,40° dan terlihat melebar secara signifikan dengan intensitas tertinggi (1560 a.u dalam skala relatif), didampingi oleh puncak yang lemah pada 2 theta 44,57°. Puncak yang membesar secara nyata ini menunjukkan bahwa karbon ATK memiliki struktur yang lebih tidak teratur (*turbostratis*) dengan tingkat kristalinitas yang rendah. Kondisi ini merupakan ciri khas dari bahan karbon yang belum melalui proses grafitisasi pada suhu tinggi. Pada puncak sudut yang lebar menunjukkan jarak antar bidang yang tidak merata, ukuran kristal yang kecil dan tingkat kepadatan cacat yang tinggi pada struktur karbon.

Difaktogram AATK menunjukkan puncak difraksi pada sudut 2θ yang sama seperti grafit yaitu 25,78 dan 44,63°, tetapi intensitasnya jauh lebih rendah (mencapai maksimum sekitar 267 a.u) serta lebar puncak lebih besar. Pelebaran puncak difraksi ini menunjukkan bahwa ukuran kristalit lebih kecil dan terdapat peningkatan cacat struktural dibandingkan dengan grafit. Fenomena ini sesuai dengan sifat bahan karbon amorf sebagian yang biasanya ditemukan pada karbon yang telah diaktifkan. Proses pengaktifan yang dilakukan menyebabkan terbukanya pori dan perubahan dalam susunan lapisan grafen, sehingga mengurangi tingkat kristalinitas material tersebut. Meskipun begitu, munculnya dua puncak tersebut menunjukkan bahwa karbon teraktivasi masih memiliki struktur kristal grafit dalam skalanometer, yaitu grafit nanokristal.

Difaktogram grafit menunjukkan dua puncak difraksi yang tajam dan kuat, yaitu puncak utama pada 2θ sekitar $25,90^\circ$ yang sesuai dengan bidang kristal (002), serta puncak kedua pada sudut $42,68^\circ$ yang sesuai dengan bidang (100). Kedua puncak tersebut adalah ciri khas dari material karbon yang memiliki struktur grafit yang teratur. Intensitas puncak (002) yang sangat tinggi (570 a.u) menunjukkan bahwa grafit memiliki struktur lapisan heksagonal yang sangat rapi dengan jarak antar lapisan (*d-spacing*) mendekati nilai ideal grafit, yaitu 3,354 Å. Ini menunjukkan bahwa grafit yang digunakan sebagai acuan memiliki tingkat kristalinitas yang sangat baik dan struktur karbon yang tergrafitisasi secara sempurna.

Tabel 1. Parameter Struktural Sampel yang Diperoleh dari XRD.

Parameter	Sampel					
	ATK		AATK		Grafit T900° C	
	002	100	002	100	002	100
2θ (°)	26,40791	44,57853	25,784510	44,63282	25,907370	42,68618
Lebar kisi	0,519552	0,2376	0,389664	0,324720	0,259776	0,2597
<i>d-spacing</i>	3,37511	2,03094	3,45528	2,03027	3,43918	2,11824
Ukuran kristal (nm)	15,53	77,68	20,68	56,78	31,07	68,89

Parameter struktur kristal yang diperoleh dari hasil uji XRD digunakan untuk mengevaluasi perubahan struktur karbon selama proses karbonisasi, aktivasi, dan grafitisasi pada suhu 900°C . Analisis menunjukkan bahwa karbon hasil karbonisasi memiliki puncak utama pada bidang (002) dengan sudut $26,40^\circ$ dan nilai jarak antar bidang (*d-spacing*) sebesar 3,375 Å, yang lebih besar dibandingkan dengan grafit acuan yang memiliki nilai 3,251 Å. Nilai *d-spacing* yang lebih besar menunjukkan bahwa struktur lapisan karbon masih memiliki bentuk turbostratik dengan jarak antar lapisan yang tidak terlalu rapat. Kondisi itu menunjukkan sifat dari karbon amorf yang masih memiliki banyak cacat struktur dan belum terjadi pengaturan ulang atom karbon secara sempurna (Najati, 2023).

Setelah aktivasi dengan menggunakan NaOH, puncak difraksi untuk bidang (002) bergeser ke sudut $25,78^\circ$, dan nilai jarak antar lapisan (*d-spacing*) meningkat menjadi 3,456 Å. Peningkatan jarak antar bidang menunjukkan bahwa aktivasi kimia tidak langsung meningkatkan kristalinitas, tetapi lebih berperan dalam membuka pori, menghilangkan pengotor, dan memperbesar luas permukaan karbon. Aktivasi menyebabkan beberapa ikatan karbon terputus, sehingga jumlah kerusakan struktur meningkat, yang terlihat dari perubahan nilai jarak *d* dan sifat puncak difraksi. Fenomena yang sama juga dilaporkan oleh Putri dan tim tahun 2023, mereka menyatakan bahwa proses aktivasi kimia menghasilkan karbon dengan porositas yang tinggi, namun struktur yang didominasi tetap merupakan struktur amorf.

Proses penggunaan grafitisasi pada suhu 900 derajat Celsius menyebabkan pergeseran posisi puncak (002) menjadi 25,90 yang menunjukkan adanya pengaturan ulang atom-atom karbon menuju struktur yang lebih rapi dan teratur. Pergeseran sudut difraksi ke nilai yang lebih besar disertai dengan penurunan jarak antar lapisan menjadi 3,43918 Å, menunjukkan bahwa jarak antar lapisan karbon semakin rapat karena adanya reorganisasi lapisan grafen saat pemanasan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Karbon yang berasal dari tempurung kelapa berhasil dibuat melalui proses karbonisasi, aktivasi kimia dengan menggunakan NaOH, serta grafitisasi pada suhu 900 derajat Celsius tanpa memakai katalis logam. Hasil pengujian dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa proses grafitisasi menyebabkan perubahan pada struktur kristal karbon. Hal ini terlihat dari nilai jarak antar bidang (*d-spacing*) sebesar 3,43918 Å, ukuran kristal (*L_c*) meningkat menjadi 31,07 nm, dan puncak difraksi pada bidang (002) muncul pada sudut 2θ sebesar 25,91°. Peningkatan ukuran kristal menunjukkan bahwa proses grafitisasi pada suhu 900 derajat Celsius berhasil mendorong pertumbuhan wilayah kristal karbon dan terjadi pengaturan ulang sebagian lapisan karbon menuju struktur yang lebih rapi. Oleh karena itu, aktivasi kimia menggunakan NaOH berfungsi sebagai tahap awal yang efektif dalam meningkatkan kemudahan akses ke struktur karbon, sehingga proses pengaturan ulang atom karbon selama proses grafitisasi dapat dimulai pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan cara grafitisasi yang biasa digunakan.

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggabungan proses aktivasi kimia dan grafitisasi pada suhu 900 derajat Celsius bisa menjadi cara yang lebih sederhana, menghemat energi, dan tidak mengandung logam yang mengotori untuk meningkatkan struktur karbon berbasis bahan organik. Namun, untuk mendapatkan karbon dengan tingkat kristalinitas dan derajat grafitisasi yang lebih baik, diperlukan penyesuaian lebih lanjut dengan mengubah suhu grafitisasi, lama waktu penahanan, atau menggunakan katalis logam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Fisika, Fakultas, Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, serta bapak dan ibu yang telah memberikan dukungan, fasilitas, dan bantuan selama penelitian hingga penyusunan artikel ini.

DAFTAR REFERENSI

- Artsanti, P., Arryanto, Y., & Kusnanto. (2010). Pengaruh Waktu Tinggal Grafitisasi Terhadap Daya Hantar Panas Grafit. *Indonesian Journal of Chemistry*.
- Barnakov, C. N., Khokhlova, G. P., Popova, A. N., Sozinov, S. A., & Ismagilov, Z. R. (2015). XRD characterization of the structure of graphites and carbon materials obtained by the low-temperature graphitization of coal tar pitch. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 17(2), 87-93.
- Destyorini, F., Irmawati, Y., Hardiansyah, A., Widodo, H., Yahya, I. N. D., Indayaningsih, N., Yudianti, R., Hsu, Y. I., & Uyama, H. (2021). Formation of nanostructured graphitic carbon from coconut waste via low-temperature catalytic graphitisation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(2), 514-523. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.06.011>
- Fatimah, S., Ragadhita, R., Al Husaeni, D. F., & Nandiyanto, A. B. D. (2022). How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 2(1), 65-76. <https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37647>
- Febriani, A. V., Hanum, F. F., Rahayu, A., Wardhana, B. S., & Chusna, F. M. A. (2025). The impact of carbonization temperature on the quality of empty fruit bunch charcoal and palm kernel charcoal for co-firing application. *Sains Natural: Journal of Biology and Chemistry*, 15(1), 28-39.
- Khoerunnisa, F., Maharani, B. S., Dzulummah, Z., & Sari, T. P. (2026). *Karbon Aktif: Sumber, Sintesis, Karakterisasi, dan Aplikasi*. PT. Nas Media Indonesia.
- Liu, S., Hu, K., Cerruti, M., & Barthelat, F. (2020). *Ultra-stiff graphene oxide paper prepared by directed-flow vacuum filtration*. 158, 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.11.007>
- Manurung, M., Ratnayani, O., & Ciawi, Y. (2025). Karbon dari Bahan Alam sebagai Adsorben Ramah Lingkungan: Potensi, Tantangan, dan Aplikasinya. *Nata Palembang: Journal of Environmental Engineering Innovations*, 2(1), 38-48. <https://doi.org/10.38043/natapalemahan.v2i1.6577>
- Muchlisha, N., Widjonarko, D. M., & Saraswati, T. E. (2023). Sintesis Carbon Nanofoam dan Karakteristiknya. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 19(1), 108. <https://doi.org/10.20961/alchemistry.19.1.64499.108-122>
- Najati, B. . (2023). Characteristics of Graphene Like Material Synthesized from Coconut Shell Charcoal Powder using Solid State Method. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 7(1), 30-40. <https://doi.org/10.24198/jiif.v7i1.40655>
- Putri, A., Arifin, Z., & Supardi, I. (2023). *SINTESIS DAN KARAKTERISASI GRAPHENE OXIDE (GO) DARI BAHAN ALAM*. 12, 47-55.
- Putri, N. A., & Supardi, Z. A. I. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Graphene Oxide (Go) Dari Bahan Alam Tempurung Kelapa: Kata Kunci: Graphene Oxide, Tempurung Kelapa, Metode Hummer. *Inovasi Fisika Indonesia*, 12(2), 47-55.
- Ramadhani, L. F., Nurjannah, I. M., Yulistiani, R., & Saputro, E. A. (2020). Teknologi aktivasi fisika pada pembuatan karbon aktif dari limbah tempurung kelapa. *Jurnal Teknik Kimia*, 26(2), 42-53.

- Ramadhani, L. F., Nurjannah, I. M., Yulistiani, R., & Saputro, E. A. (2025). *tempurung kelapa Review : teknologi aktivasi fisika pada pembuatan karbon aktif dari limbah tempurung kelapa*. July 2020. <https://doi.org/10.36706/jtk.v26i2.518>
- Rengga, W. D. P., Suwandi, L. A. C., & Khoirina, N. (2025). Grafena Oksida dari Biomassa: Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi Berkelanjutan. *Bookchapter Inovasi Sains dan Kesehatan*, 1.
- Saleh, M., Doi, J., & Pasae, Y. (2023). Pembuatan Arang Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit, Tempurung Kelapa, dan Cangkang Kakao dengan Proses Torefaksi. *Paulus Chem Engineering Journal*, 1(1).