

Karakterisasi Arang Karbon Hasil Pirolisis Limbah Kulit Pinang Dengan Dan Tanpa Ethanol Sebagai Aktivator

Harold T. N. Peday^{1*}, Jufri Sialana², Marthina Mini³, Hendry Y. Nanlohy⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Sains dan Teknologi Jayapura, 99351, Indonesia

Email: haroldpeday14@gmail.com

ABSTRACT

Activated carbon is a crucial material widely used in various applications, including water purification and waste treatment. Areca nut husk, often regarded as waste, shows great potential as an alternative raw material for activated carbon. This study aims to characterize the structure and chemical properties of activated carbon derived from areca husk waste through an ethanol activation process. The activation process was conducted to enhance the porosity and surface area of the activated carbon, thereby increasing its adsorption capacity. Microstructure observations, XRD, TGA, and FTIR analyses were conducted to evaluate the quality of the activated carbon. The results showed that activated carbon with activation has a more complex pore structure, higher crystallinity, and additional functional group such as hydroxyl, which improve adsorption capacity and thermal stability. This study demonstrates that ethanol-activated areca husk has significant potential for various environmental and industrial applications.

Keywords: Areca Nut Shell, Carbon Charcoal, SEM, XRD, TGA

PENDAHULUAN

Karbon aktif merupakan material penting dengan luas permukaan tinggi dan kapasitas adsorpsi yang besar, digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi industri dan lingkungan, termasuk pemurnian air dan pengolahan limbah. Biasanya, karbon aktif diproduksi melalui pirolisis biomassa seperti sabut kelapa atau kayu. Namun, kulit pinang (*Areca Nut Shell*), yang tak jarang dianggap sebagai limbah pertanian, menunjukkan potensi besar sebagai bahan baku alternatif untuk pembuatan karbon aktif. Di Papua, kulit pinang umumnya dibuang setelah konsumsi buahnya, menawarkan solusi berkelanjutan untuk pengelolaan limbah, sekaligus menghasilkan karbon aktif dengan porositas tinggi dan permukaan yang luas [1]. Kulit pinang sebagai produk sampingan dari pengolahan kulit pinang belum bisa dimaksimalkan. Bahan ini dapat diolah menjadi arang sebagai bahan dasar pembuatan karbon aktif. Namun teknologi untuk mengaktivasi karbon agar menghasilkan karbon aktif dengan karakteristik struktur yang sesuai dengan standar masih menghadapi banyak hambatan [2]. Untuk itu dalam memahami karakteristik karbon aktif, khususnya yang dihasilkan dengan menggunakan ethanol, dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas penggunaannya dalam berbagai industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi struktur arang aktif (termasuk gugus fungsi, porositas, kristalinitas, dan senyawa kimia) yang dibuat menggunakan proses aktivasi fisika dengan berbagai perlakuan [3].

Kulit buah pinang memuat beragam senyawa seperti flavonoid, alkaloid, hemiselulosa, selulosa, dan pektin [4]. Tingginya kandungan selulosa, sekitar 70,2% membuat kulit buah pinang memiliki potensi sebagai bahan dasar pembuatan karbon aktif untuk bio adsorben dalam mengatasi pencemaran lingkungan akibat limbah industri. Arang aktif merupakan adsorben yang sering kali digunakan untuk mengadsorpsi berbagai jenis limbah organik dan anorganik, termasuk ion Pb^{2+} , yaitu salah satu logam berat pencemar lingkungan [5].

Dalam penelitian ini, proses aktivasi kimia menggunakan ethanol bertujuan untuk membuka pori-pori dan meningkatkan luas permukaan karbon aktif [6]. Penggunaan jenis aktivator yang tepat sangat mempengaruhi karakteristik fisik dan kimia karbon aktif, termasuk kekerasan dan porositasnya [7]. Uji karakteristik seperti pengamatan struktur mikro, XRD, TGA, dan FTIR sangat penting untuk memahami kualitas dan performa material yang dihasilkan [8].

Berdasarkan studi sebelumnya, diketahui bahwa suhu karbonisasi mempengaruhi karakteristik arang dari sabut buah pinang secara signifikan. Suhu ideal untuk memproduksi arang berkualitas sesuai standar SNI 06-3730-1995 adalah 500°C. Meningkatkan suhu karbonisasi juga berkontribusi pada peningkatan kapasitas serap arang terhadap iodin serta metilen biru, dengan tiap nilai optimal hingga 418,77 mg/g dan 254,10 mg/g pada suhu 500°C. Selain itu, penggunaan H_3PO_4 sebagai bahan aktivator dapat meningkatkan kadar keasaman dan luas permukaan adsorben, yang pada

gilirannya meningkatkan kapasitas adsorpsi. pH optimum untuk adsorpsi Cu^{2+} ialah 7 dengan durasi kontak 1 jam, dan kapasitas adsorpsi tertinggi untuk ion Cu^{2+} awal diperoleh pada karbon aktif yang diaktivasi dengan H_3PO_4 menggunakan konsentrasi awal 250 ppm [9].

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara eksperimental seperti gambar 1 (kiri) proses pirolisis dan aktivasi karbon kulit pinang menggunakan etanol (kanan). Karbon aktif dibuat menggunakan limbah kulit pinang yang diambil dari beberapa tempat sekitaran pasar Youtefa, Kota Jayapura secara acak sederhana (*simple random sampling*). Proses ini diawali dengan memisahkan kulit pinang dipisahkan dari bijinya, dicuci hingga bersih, dan dijemur menggunakan sinar matahari selama 6-7 hari. Kulit pinang dipirolisis pada suhu rata-rata 150°C selama 5 jam, menghasilkan 389 gram karbon aktif dari 1.170 gram kulit pinang. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kontrol suhu yang tepat selama karbonisasi dapat meningkatkan kualitas karbon aktif, terutama distribusi pori [10]. Karbon kulit pinang hasil pirolisis dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh, proses aktivasi dilakukan dengan merendam karbon kulit pinang dalam larutan ethanol selama 15 menit. Karbon aktif kemudian disaring untuk menghilangkan larutan ethanol, dan karbon aktif dikeringkan di sinar matahari selama 3 hari untuk menghilangkan kadar air [11].



Gambar 1. Proses pirolisis (kiri) dan aktivasi limbah kulit pinang (kanan)



Gambar 2. Skema penelitian

Karbon yang dihasilkan selanjutnya diaktivasi menggunakan aktivator ethanol, upaya ini dilakukan untuk meningkatkan porositas dan luas permukaan karbon aktif, sehingga meningkatkan

kemampuan adsorpsi. Selanjutnya karakterisasi dimulai dengan pengamatan yang meliputi uji SEM, XRD, FTIR dan TGA sesuai dengan gambar 2. Struktur mikro dari karbon aktif diamati menggunakan mikroskop elektron, pengamatan ini bertujuan untuk mengevaluasi distribusi dan ukuran pori-pori yang terbentuk setelah proses aktivasi dan karbonisasi serta menekankan pentingnya distribusi pori yang seragam dalam meningkatkan kemampuan adsorpsi karbon aktif [12].

Uji XRD (*X-ray Diffraction*) adalah metode analisis material yang memanfaatkan sinar X untuk memahami struktur kristal suatu bahan. Pada arang aktif, uji ini membantu menentukan derajat kristalinitas, jarak antar lapisan atomik, ukuran tinggi dan lebar kristal, serta jenis gugus fungsi yang terkandung. Proses uji XRD pada arang aktif dimulai dengan menyiapkan sekitar 1 gram serbuk arang didalam kuvet aluminium. Serbuk ini dibuat menjadi padat dan diratakan menggunakan kaca untuk memastikan permukaan sejajar dengan sinar X. Setelahnya, sampel dipaparkan pada sinar X, menghasilkan pola difraksi yang dapat dianalisis [13].

Uji TGA (*Thermogravimetric Analysis*) adalah metode analisa termal yang diperuntukan sebagai alat ukur perubahan massa suatu material seiring kenaikan suhu, memberikan wawasan penting terkait sifat termal dan stabilitas bahan seperti arang aktif. Dalam pelaksanaannya, arang aktif dimasukkan ke dalam sampel holder TGA, kemudian dipanaskan dengan laju kenaikan suhu yang terkendali dalam ruang TGA. Selama proses pemanasan, perubahan massa dicatat secara kontinu, memungkinkan identifikasi komponen arang aktif seperti kadar air, abu, dan zat organik volatil yang terdekomposisi pada berbagai rentang suhu. Data ini kemudian dianalisis untuk memahami karakteristik termal dan komposisi kimia arang aktif, yang relevan dalam aplikasi pengolahan material berpori [14].

Uji FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dengan spektrum inframerah. Sampel disinari dan spektrum yang dihasilkan dianalisis berdasarkan puncak-puncak yang mengindikasikan jenis gugus fungsi pada arang aktif, membantu memahami perubahan kimia akibat aktivasi [15].

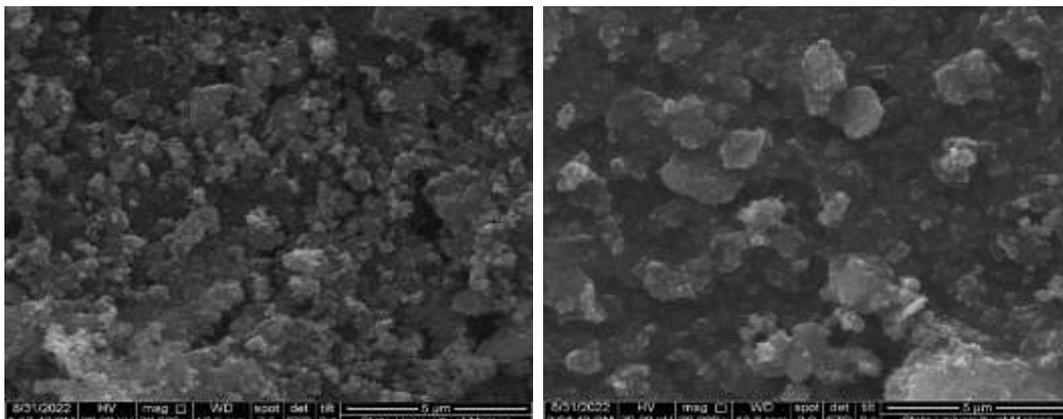
Tabel 1. Parameter hasil uji TGA karbon aktif kulit pinang dengan dan tanpa aktivasi

Parameter	Karbon dengan ethanol	Karbon tanpa ethanol
Kadar Air	1 mg	0,5 mg
Kadar Zat Mudah Menguap	6 mg	2 mg
Kadar Abu	1 mg	0,5 mg
Kadar Karbon Terikat	4 mg	1 mg

HASIL DAN PEMBAHASAN

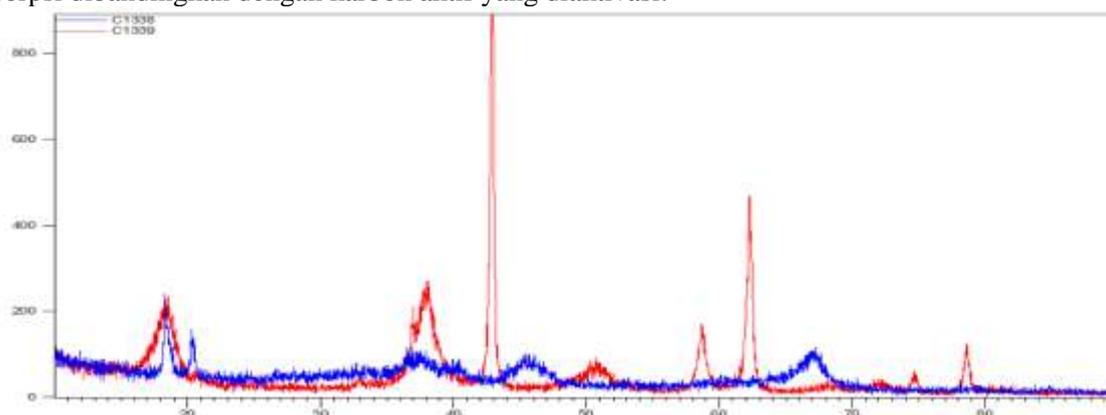
Hasil pengamatan struktur permukaan arang karbon pada pembesaran 20.000 kali, menunjukkan perbedaan signifikan antara struktur permukaan karbon aktif yang telah diaktivasi dengan yang tidak diaktivasi. Pada sampel karbon aktif dengan aktivasi (gambar 3 kiri), terlihat bahwa permukaannya lebih padat, dengan struktur yang kompleks dan terbuka. Struktur ini disertai oleh keberadaan banyak partikel kecil yang tersebar merata di seluruh permukaan, menciptakan peningkatan signifikan pada luas permukaan total karbon aktif. Kondisi ini meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif, sehingga menjadikannya lebih efektif dalam menyerap molekul zat tertentu dari lingkungan sekitarnya, misalnya untuk aplikasi dalam filtrasi, pemurnian air dan memiliki potensi sebagai biokomposit terletak pada kemampuannya untuk meningkatkan kekuatan tarik, serta memberikan isolasi termal dan akustik yang baik. Ini menjadikannya bahan ramah lingkungan yang ideal untuk aplikasi struktural. Sementara itu, sebagai katalis bahan bakar, karbon aktif memanfaatkan luas permukaannya yang besar dan juga stabilitas termal yang tinggi untuk meningkatkan kecepatan reaksi kimia, sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran dan konversi energi dalam sistem bahan bakar. Disisi lain, tabel 1 menunjukan karbon aktif dengan aktivasi ethanol memiliki kadar air yang lebih tinggi (1 mg) dibandingkan dengan karbon aktif tanpa aktivasi (0,5 mg). Hal ini menyatakan jika proses aktivasi meningkatkan kemampuan karbon aktif untuk menyerap air. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa aktivasi kimia, seperti dengan etanol, dapat memperluas struktur pori karbon melalui oksidasi dan degradasi selektif material organik pada permukaan karbon, yang berkontribusi pada peningkatan luas permukaan

[16]. Gambar 3 menunjukkan Struktur permukaan arang karbon dengan aktivasi (kiri) dan tanpa aktivasi (kanan) pada pembesaran 20000 kali.



Gambar 3. Struktur permukaan arang karbon dengan aktivasi (kiri) dan tanpa aktivasi (kanan) pada pembesaran 20000 kali.

Sebaliknya, pada sampel karbon aktif tanpa aktivasi (gambar kanan), permukaan tampak lebih besar. Struktur permukaannya lebih halus, dengan partikel-partikel yang tampak lebih besar dan cenderung tidak tersebar merata, sehingga luas permukaannya lebih kecil. Karakteristik ini membatasi kapasitas adsorpsi karbon, menjadikannya kurang optimal untuk keperluan aplikasi adsorpsi dibandingkan dengan karbon aktif yang diaktivasi.



Gambar 4. Hasil XRD arang karbon dengan (merah) dan tanpa aktivasi (biru).

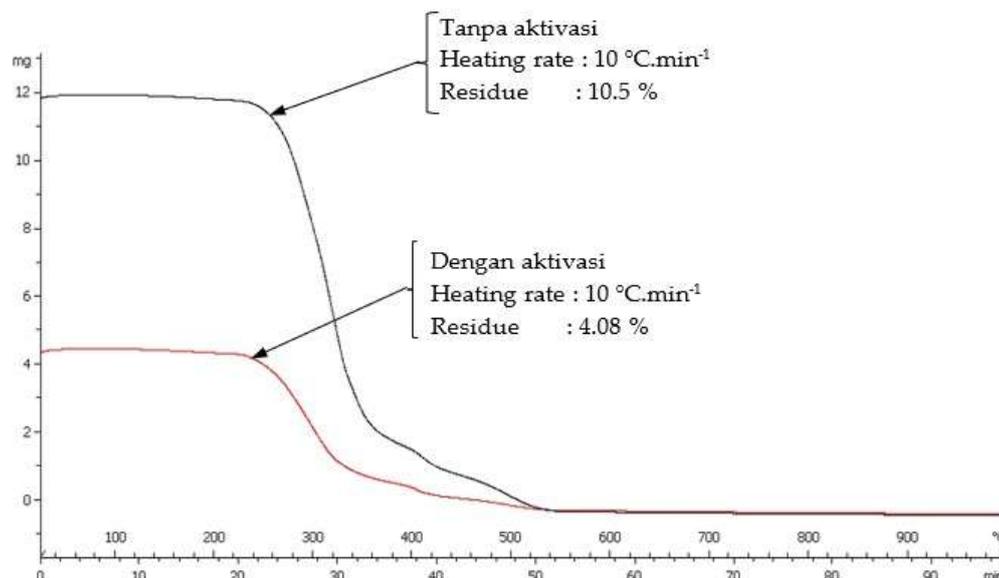
Analisis difraksi sinar-X (XRD) menunjukkan perbedaan intensitas puncak signifikan antara arang karbon yang diaktivasi dan yang tidak diaktivasi. Pada sampel karbon dengan aktivasi (digambarkan dengan garis merah), terdapat puncak intensitas tinggi di sekitar sudut 2θ derajat sebesar 40 derajat, menunjukkan tingkat kristalinitas yang lebih tinggi dan pola pengaturan atom yang lebih teratur. Puncak tambahan pada sekitar 20, 30, 50, dan 60 derajat 2θ menunjukkan bahwa aktivasi menghasilkan struktur kristal lebih kompleks dan terbentuk dalam jumlah yang lebih banyak [17]. Aktivasi arang karbon meningkatkan kristalinitas, situs aktif, dan struktur atomik material melalui perlakuan kimia seperti dengan asam atau basa kuat dan fisik suhu tinggi, yang menciptakan lebih banyak pori dan gugus fungsional seperti hidroksil atau karbonil. Hasilnya, struktur kristal yang lebih kompleks memperkuat stabilitas fisik dan reaktivitas kimia arang karbon, sehingga lebih optimal untuk diaplikasikan. Kondisi ini diperkuat dengan data dari tabel 1 yaitu kadar air 1 mg, kadar zat mudah menguap 6 mg, kadar abu 1 mg, dan kadar karbon terikat 4 mg. Berbagai aplikasi karbon aktif mencakup penyaringan air, pemurnian gas, pengolahan limbah, biomedis, dan penyimpanan energi. Selain itu, karbon aktif memiliki potensi yang signifikan dalam pembuatan biokomposit. Penggunaannya sebagai bahan pengisi dapat meningkatkan kekuatan tarik, memberikan isolasi termal dan akustik, serta menjadi solusi ramah lingkungan. Di bidang energi, karbon aktif juga berperan penting sebagai katalis bahan bakar, karena luas permukaannya

yang besar, kemampuan adsorpsi yang unggul, dan stabilitas termal yang tinggi, yang semuanya berkontribusi pada percepatan reaksi kimia dan efisiensi pembakaran yang lebih baik [18].

Sementara itu, pada sampel karbon tanpa aktivasi (digambarkan dengan garis biru), terlihat bahwa intensitas puncak pada sekitar $40^\circ 2\theta$ jauh lebih rendah dibandingkan dengan karbon yang diaktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa karbon tanpa aktivasi memiliki kristalinitas yang lebih rendah, yang berimplikasi pada pola pengaturan atom yang kurang teratur karena karbon tanpa aktivasi memiliki kristalinitas lebih rendah karena kurangnya energi yang cukup untuk mengubah susunan atomiknya. Aktivasi menggunakan suhu tinggi atau perlakuan kimia memberikan energi tambahan yang memungkinkan elektron dan atom tersusun lebih stabil dalam bentuk kristal yang teratur. Tanpa aktivasi, distribusi elektron dalam karbon lebih acak, yang menghasilkan ikatan yang lebih lemah dan struktur yang kurang teratur. Struktur kristal yang lebih kompleks hanya terbentuk dengan energi tambahan yang diberikan oleh aktivasi. Selain itu, puncak-puncak lainnya di sekitar 20° , 30° , 50° , dan $60^\circ 2\theta$ juga tampak lebih lemah, yang mengindikasikan struktur kristal yang lebih sederhana dan lebih sedikit dibandingkan dengan karbon aktif yang diaktivasi (lihat tabel 1) [19].

Secara keseluruhan, proses aktivasi pada arang karbon menghasilkan struktur yang lebih kristalin dan kompleks, yang meningkatkan kualitas fisik dan kimiawi arang karbon tersebut. Kristalinitas yang lebih tinggi dapat berkontribusi pada peningkatan kapasitas penyerapan, luas permukaan, dan stabilitas struktural, sehingga arang karbon lebih efektif untuk berbagai aplikasi adsorpsi dan katalisis. Hasil tersebut sesuai penelitian yang menjelaskan bahwa aktivasi dapat memperbaiki struktur mikrokristalin karbon, meningkatkan kristalinitas dan porositas melalui reaksi oksidasi terkontrol pada permukaan karbon.

Perbedaan intensitas puncak pada analisis XRD menunjukkan bahwa aktivasi arang karbon meningkatkan kristalinitas dan keteraturan atomik material, sehingga membentuk struktur kristal lebih kompleks dan berpori. Kondisi ini memperbesar luas permukaan dan menambah gugus fungsional seperti hidroksil dan karbonil [20]. Struktur yang lebih teratur ini tidak hanya memperkuat stabilitas termal, tetapi juga meningkatkan kemampuan pembakaran arang. Dalam aplikasi bahan bakar, arang karbon yang diaktivasi dapat menghasilkan pembakaran lebih efisien karena luas permukaan yang besar memfasilitasi kontak dengan oksigen, mempercepat reaksi pembakaran, dan meningkatkan efisiensi energi [21].



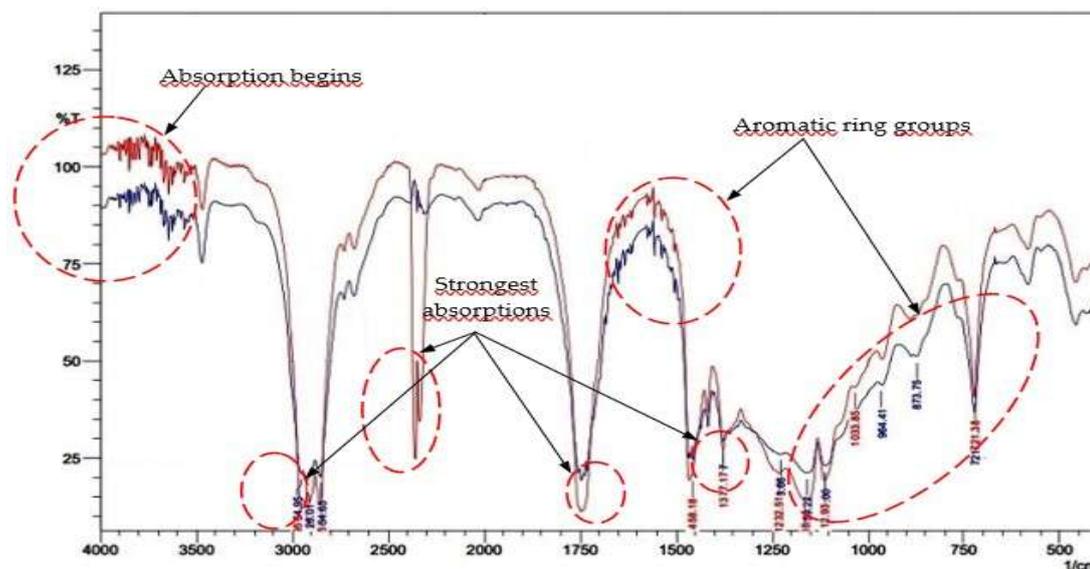
Gambar 5. Hasil uji TGA arang karbon dengan (merah) dan tanpa aktivasi (hitam).

Analisis termogravimetri (TGA) adalah teknik penting untuk mengamati perubahan massa material ketika dipanaskan, sehingga dapat digunakan untuk memahami stabilitas termal serta komposisi volatil dan non-volatil pada material. Pada penelitian ini, TGA digunakan untuk membandingkan sifat termal arang karbon dengan aktivasi dan tanpa aktivasi. Sampel arang karbon tanpa aktivasi dimulai dengan massa awal sekitar 12 mg, dipanaskan dengan laju pemanasan

10°C/menit. Sampel ini menunjukkan residu sisa sekitar 10,5% setelah proses pemanasan, yang mengindikasikan komponen non-volatil yang masih tersisa di dalam karbon. Degradasi termal utama terjadi dalam rentang suhu 300°C hingga 500°C, yang kemungkinan mencerminkan dekomposisi termal atau volatilitas komponen organik yang tersisa [22]. Penurunan massa yang signifikan dalam rentang suhu ini menunjukkan adanya komponen volatil yang hilang akibat pemanasan pada suhu tinggi [23]. Struktur arang tanpa aktivasi cenderung lebih acak dan kurang berpori, menyebabkan pelepasan massa lebih cepat dalam rentang suhu tertentu, sehingga stabilitas termalnya relatif rendah. Karena struktur yang kurang stabil dan degradasi yang cepat pada rentang suhu tinggi, arang tanpa aktivasi cenderung memiliki penyalaan yang lebih cepat namun pembakaran yang kurang efisien. Komponen volatil yang lebih tinggi dapat mempercepat pembakaran awal, tetapi ketahanan panasnya lebih rendah sehingga cenderung habis lebih cepat.

Sementara sampel arang karbon yang telah diaktivasi memiliki massa awal lebih rendah, yaitu sekitar 4 mg, dengan laju pemanasan yang sama (10°C/menit). Sisa massa setelah pemanasan adalah sekitar 4,08%, yang menunjukkan residu non-volatil yang lebih sedikit dibandingkan dengan sampel tanpa aktivasi. Penurunan massa pada sampel ini terjadi secara bertahap dalam rentang suhu yang lebih luas, antara 200°C hingga 500°C. Penurunan massa yang bertahap ini mengindikasikan bahwa aktivasi mungkin menghasilkan struktur arang karbon yang lebih stabil secara termal, karena penguapan terjadi lebih merata dalam rentang suhu yang lebih panjang. Struktur berpori yang dihasilkan dari proses aktivasi meningkatkan stabilitas termal dan memungkinkan pembakaran yang lebih bertahap dan efisien. Kinerja pembakaran yang lebih stabil ini bermanfaat dalam aplikasi yang membutuhkan sumber panas lebih konsisten dan tahan lama, misalnya pada sistem pemurnian atau pemanas yang berkelanjutan [24].

Jadi berdasarkan perbandingan kedua sampel, sampel arang karbon tanpa aktivasi memiliki residu non-volatil lebih tinggi dan struktur yang kurang stabil, sehingga mengalami penurunan massa cepat pada suhu 300°C–500°C, yang menyebabkan pembakaran cepat namun kurang efisien. Sebaliknya, sampel arang yang diaktivasi memiliki residu lebih sedikit, dengan struktur berpori yang lebih stabil secara termal. Penurunan massanya terjadi lebih bertahap dalam rentang suhu 200°C–500°C, memungkinkan pembakaran yang lebih efisien dan konsisten, sehingga cocok untuk aplikasi yang memerlukan stabilitas panas lebih tinggi dan pembakaran bertahan lama [25].



Gambar 6. Hasil uji FTIR arang karbon dengan (biru) dan tanpa aktivasi (merah)

Spektrum FTIR (*Fourier Transform Infrared*) pada arang karbon memberikan gambaran tentang gugus fungsi dan struktur kimia yang ada dalam material tersebut. Dalam penelitian ini, spektrum FTIR digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan kimia antara arang karbon yang diaktivasi (digambarkan dengan garis biru) dan tanpa aktivasi (digambarkan dengan garis merah). Absorbansi yang tampak pada sekitar 3500 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus hidroksil (-OH) [26]. Pada arang karbon yang diaktivasi, puncak ini lebih jelas dan intensitasnya lebih tinggi dibandingkan dengan sampel tanpa aktivasi, yang menunjukkan bahwa proses aktivasi

meningkatkan kandungan gugus hidroksil. Gugus hidroksil ini penting karena dapat meningkatkan sifat hidrofobik karbon dan mempengaruhi interaksi kimia pada permukaan karbon, khususnya untuk aplikasi yang melibatkan interaksi dengan molekul polar. Terutama menggunakan aktivator kimia seperti etanol, mampu menginduksi pembentukan gugus hidroksil melalui oksidasi ringan pada permukaan karbon [27]. Jadi peningkatan gugus hidroksil (-OH) pada arang karbon yang diaktivasi memperkuat interaksi dengan molekul polar dan memperbaiki kapasitas adsorpsi. Dalam pembakaran, gugus hidroksil yang reaktif ini dapat mempercepat penyalaan dan membuat pembakaran lebih stabil, yang bermanfaat untuk aplikasi dengan kebutuhan panas konsisten, seperti pemanas industri.

Puncak kuat pada sekitar 1500 cm^{-1} merupakan ciri khas dari ikatan karbon-karbon (C=C) dalam struktur aromatik. Puncak ini lebih menonjol pada arang tanpa aktivasi, menunjukkan bahwa aktivasi dapat mengurangi keutuhan struktur aromatik [28]. Aktivasi diketahui dapat mempengaruhi struktur aromatik ini melalui reaksi oksidasi selektif, yang menghasilkan porositas lebih tinggi namun dapat mengurangi jumlah ikatan C=C aromatik. Penurunan intensitas ini menunjukkan bahwa struktur aromatik pada sampel yang diaktivasi telah terpengaruh, yang mungkin juga berkontribusi pada perubahan sifat fisik dan kimia, seperti peningkatan kapasitas adsorpsi [29]. Absorbansi di sekitar 750 cm^{-1} menunjukkan kehadiran grup cincin aromatik, yang lebih terlihat pada sampel tanpa aktivasi. Ini menunjukkan bahwa struktur cincin aromatik pada sampel tanpa aktivasi tetap lebih utuh. Pada sampel yang diaktivasi, intensitas puncak ini lebih rendah, yang bisa menandakan terjadinya modifikasi pada struktur cincin aromatik selama proses aktivasi. Aktivasi arang karbon yang mengurangi keutuhan struktur aromatik (seperti penurunan intensitas C=C dan cincin aromatik) meningkatkan porositas dan luas permukaan, yang memfasilitasi difusi oksigen selama pembakaran. Ini membuat arang aktif lebih efisien untuk penyalaan yang stabil dan pembakaran tahan lama. Sementara itu, arang tanpa aktivasi, dengan struktur aromatik lebih utuh dan kurang berpori, cenderung terbakar lebih cepat tetapi kurang efisien untuk pembakaran yang berkepanjangan [30].

Secara keseluruhan, perbedaan antara spektrum FTIR pada arang karbon dengan dan tanpa aktivasi menunjukkan adanya perubahan signifikan dalam struktur kimia material akibat proses aktivasi. Meningkatnya gugus hidroksil pada arang yang diaktivasi dapat meningkatkan interaksi permukaan dengan senyawa polar, yang berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsi dan reaktivitas kimia. Peningkatan gugus hidroksil pada arang aktif menciptakan lebih banyak situs aktif yang dapat membentuk ikatan hidrogen dengan senyawa polar, yang meningkatkan kapasitas adsorpsi dan reaktivitas kimia arang [31]. Dalam proses pembakaran, gugus ini mempercepat efisiensi pembakaran dengan meningkatkan interaksi dengan molekul bahan bakar, serta mendukung stabilitas termal arang, sehingga lebih tahan terhadap suhu tinggi. Penelitian oleh menunjukkan bahwa aktivasi meningkatkan sifat adsorpsi dan kestabilan termal karbon aktif. Sementara itu, penurunan intensitas puncak C=C dan cincin aromatik pada sampel yang diaktivasi menunjukkan kemungkinan perubahan dalam keutuhan struktur aromatik, yang berkaitan dengan peningkatan porositas dan luas permukaan karbon yang teraktivasi. Sehingga memungkinkan interaksi yang lebih baik dengan molekul polar, meningkatkan kapasitas adsorpsi, dan menciptakan kondisi pembakaran yang lebih efisien dan tahan lama [32].

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa aktivasi karbon menggunakan etanol secara signifikan meningkatkan kualitas karbon aktif dari limbah kulit pinang, ditandai oleh peningkatan porositas, luas permukaan, kristalinitas, stabilitas termal, dan sifat adsorpsi. Hasil uji SEM menunjukkan distribusi pori yang lebih merata, sementara analisis XRD mengindikasikan peningkatan kristalinitas yang memperkuat kestabilan fisik dan kimia. Uji FTIR mengungkap penambahan gugus hidroksil (-OH) yang memperbaiki interaksi dengan molekul polar, sedangkan analisis TGA menunjukkan stabilitas termal yang lebih baik dengan pola degradasi massa bertahap. Karbon aktif hasil aktivasi ini lebih optimal untuk aplikasi lingkungan seperti penyaringan air serta untuk energi sebagai katalis bahan bakar, menegaskan pentingnya proses aktivasi dalam meningkatkan performa material.

SARAN

Saran penelitian ini mencakup beberapa aspek penting untuk pengembangan di masa depan. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi potensi karbon aktif yang diaktivasi dengan etanol dalam aplikasi spesifik, seperti pemurnian air atau katalis dalam sistem energi. Optimasi parameter proses aktivasi, termasuk suhu dan konsentrasi etanol, perlu dikaji lebih dalam untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja karbon aktif. Selain itu, penggunaan teknik karakterisasi tambahan, seperti BET, direkomendasikan untuk memahami distribusi pori dan luas permukaan spesifik material. Uji kinerja karbon aktif dalam kondisi operasional nyata juga perlu dilakukan agar efektivitasnya dalam skala industri dapat dipahami secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Dewi, A. Azhari, dan I. Nofriadi, "Aktivasi karbon dari kulit pinang dengan menggunakan aktivator kimia KOH," *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, vol. 9, no. 2, hlm. 12–22, 2021.
- [2] E. Taer, A. Apriwandi, R. Taslim, A. Agutino, dan D. A. Yusra, "Conversion Syzygium oleana leaves biomass waste to porous activated carbon nanosheet for boosting supercapacitor performances," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, hlm. 13332–13340, 2020.
- [3] I. Pet *dkk.*, "Recent Developments in the Implementation of Activated Carbon as Heavy Metal Removal Management," *Water Conservation Science and Engineering*, vol. 9, no. 2, hlm. 62, 2024.
- [4] P. Joshi dan S. Joshi, "Fabrication of Activated Carbon from Areca Nuts and Its Application for Methylene Blue Dye Removal," *ICT-Convergence 2022 (ICAEIC-2022)*, 2022.
- [5] F. S. J. Yong *dkk.*, "Areca catechu husk oriented activated carbon in application for Bisphenol A removal through adsorption method," *International Journal of Environmental Science and Technology*, hlm. 1–10, 2024.
- [6] T. R. Sari, S. Suharwanto, dan R. D. Asrifah, "Pengolahan Air Tanah Payau Menggunakan Karbon Aktif Granular di Desa Jambakan Kecamatan Bayat Kabupaten Klaten, Jawa Tengah," dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan SATU BUMI*, 2023.
- [7] H. Y. Nanlohy, H. Riupassa, dan M. Setiyo, "Characterizing of Nano Activated Bio-Carbon of Sago Waste as a Homogeneous Combustion Catalyst," *Automotive Experiences*, vol. 7, no. 1, hlm. 77–85, 2024.
- [8] Z. Heidarinejad, M. H. Dehghani, M. Heidari, G. Javedan, I. Ali, dan M. Sillanpää, "Methods for preparation and activation of activated carbon: a review," *Environ Chem Lett*, vol. 18, hlm. 393–415, 2020.
- [9] Y. Komaril dan S. Sudarman, "Peran Kaolin Clay dan Karbon Aktif dalam Produksi Gas Hidrogen dengan Metode Fotokatalisis," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, hlm. 46–55, 2022.
- [10] F. G. Al Ghifari dan S. S. Harsono, "ANALISIS PEMBERIAN VARIASI KONSENTRASI MOLASES TERHADAP KUALITAS BIOPELLET ARANG TEMPURUNG KELAPA," *Agrotechnology Innovation (Agrinova)*, vol. 4, no. 1, hlm. 22–29, 2021.
- [11] K. Sa'diyah, P. H. Suharti, N. Hendrawati, F. A. Pratamasari, dan O. M. Rahayu, "Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu sebagai Karbon Aktif melalui Proses Pirolisis dan Aktivasi Kimia," *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, vol. 4, no. 2, hlm. 91–99, 2021.
- [12] Z. Zhang *dkk.*, "Insights into the microstructure evolution and CO₂ adsorption of activated carbon derived from spent coffee grounds and sewage sludge," *Biomass Convers Biorefin*, hlm. 1–12, 2023.
- [13] W. Liu, B. Wang, dan M. Zhang, "Effect of process parameters on the microstructure and performance of TiO₂-loaded activated carbon," *ACS Omega*, vol. 6, no. 50, hlm. 35076–35092, 2021.
- [14] D. Liang, B. Ji, Y. Wang, X. Li, dan W.-Y. Gao, "Effect of activated carbon microstructure and adsorption mechanism on the efficient removal of chlorophyll a and chlorophyll b from *Andrographis paniculata* extract," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, hlm. 21930, 2023.
- [15] J. Wang, Z. Li, S. Yan, X. Yu, Y. Ma, dan L. Ma, "Modifying the microstructure of algae-based active carbon and modelling supercapacitors using artificial neural networks," *RSC*

- Adv, vol. 9, no. 26, hlm. 14797–14808, 2019.
- [16] A. Husin dan A. Hasibuan, “Studi pengaruh variasi konsentrasi asam posfat (H₃PO₄) dan waktu perendaman karbon terhadap karakteristik karbon aktif dari kulit durian,” *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 9, no. 2, hlm. 80–86, 2020.
- [17] S. Kundu *dkk.*, “A comprehensive review of enhanced CO₂ capture using activated carbon derived from biomass feedstock,” *RSC Adv*, vol. 14, no. 40, hlm. 29693–29736, 2024.
- [18] M. N. L. Atok, I. W. B. Suyasa, dan J. Sibaran, “Peningkatan Performance Arang Aktif Sabut Buah Pinang (*Areca Catechu L*) sebagai Adsorben Kation,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 5, no. 6, hlm. 2182–2195, 2024.
- [19] Y. Gao, Q. Yue, B. Gao, dan A. Li, “Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review,” *Science of the Total Environment*, vol. 746, hlm. 141094, 2020.
- [20] A. L. Patmawati, K. Karyati, dan P. Matius, “Potensi Cadangan Karbon di Lembo Durian dan Hutan Sekunder Berbeda Umur di Kampung Intu Lingau Kecamatan Nyuatan Kabupaten Kutai Barat Kalimantan Timur,” *ULIN: Jurnal Hutan Tropis*, vol. 8, no. 2, hlm. 311–321, 2024.
- [21] S.-M. Lee, S.-H. Lee, dan J.-S. Roh, “Analysis of activation process of carbon black based on structural parameters obtained by XRD analysis,” *Crystals (Basel)*, vol. 11, no. 2, hlm. 153, 2021.
- [22] S. Suherman, M. Hasanah, R. Ariandi, dan I. Ilmi, “Pengaruh Suhu Pemanasan Terhadap Karakteristik Dan Mikrostruktur Karbon Aktif Pelepah Kelapa Sawit,” *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, vol. 16, no. 1, hlm. 1–9, 2021.
- [23] L. K. Mangalla, R. R. Sisworo, dan L. Pagiling, “Perbaikan Kualitas Energi Biomassa Kayu Jati Menggunakan Torefaksi Microwave Untuk Produksi Bioarang,” *TEKNIK*, vol. 44, no. 1, hlm. 15–22, 2023.
- [24] Y. Guo dan Q. Wang, “Fabrication and characterization of activated carbon from *Phyllostachys edulis* using single-step KOH activation with different temperatures,” *Processes*, vol. 10, no. 9, hlm. 1712, 2022.
- [25] C. Y. Chuah dan A. M. Laziz, “Recent progress in synthesis and application of activated carbon for CO₂ capture,” *C (Basel)*, vol. 8, no. 2, hlm. 29, 2022.
- [26] D. Dittmann *dkk.*, “Characterization of activated carbons for water treatment using TGA-FTIR for analysis of oxygen-containing functional groups,” *Appl Water Sci*, vol. 12, no. 8, hlm. 203, 2022.
- [27] J. Wang, W. Cao, W. Wei, dan H. Jin, “Adsorption characteristic analysis of PAHs on activated carbon with different functional groups by molecular simulation,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 12, hlm. 32452–32463, 2023.
- [28] Z. Heidarnejad, M. H. Dehghani, M. Heidari, G. Javedan, I. Ali, dan M. Sillanpää, “Methods for preparation and activation of activated carbon: a review,” *Environ Chem Lett*, vol. 18, hlm. 393–415, 2020.
- [29] J. Yang, L. Fu, F. Wu, X. Chen, C. Wu, dan Q. Wang, “Recent developments in activated carbon catalysts based on pore size regulation in the application of catalytic ozonation,” *Catalysts*, vol. 12, no. 10, hlm. 1085, 2022.
- [30] Z. Teimouri, S. Nanda, N. Abatzoglou, dan A. K. Dalai, “Application of activated carbon in renewable energy conversion and storage systems: a review,” *Environ Chem Lett*, vol. 22, no. 3, hlm. 1073–1092, 2024.
- [31] B. Aritonang, N. F. Ambarwati, E. M. Sinaga, dan A. H. Ritonga, “Sintesis dan Karakterisasi Arang Aktif Dari Kulit Salak Sebagai Adsorben Terhadap Kadar BOD, COD dan TSS Pada Limbah Cair Industri Tekstil,” *Jurnal Multidisiplin Madani*, vol. 2, no. 6, hlm. 2611–2626, 2022.
- [32] J. Serafin dan B. Dziejarski, “Activated carbons—Preparation, characterization and their application in CO₂ capture: A review,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 28, hlm. 40008–40062, 2024.