GreenTech
Revolutionizing Agro-Industrial
Engineering for Sustainable Agriculture

https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74

Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

Potensi Cangkang Kemiri (*Aleurites moluccana* (L.) *Willd*) sebagai Prekursor Karbon Aktif dengan Variasi Aktivator: Review

Rozalia[1*], Ayulian Sara[1]

[1] Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas, Indonesia

ABSTRAK

Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang banyak dimanfaatkan dalam pengolahan air karena memiliki luas permukaan tinggi dan struktur pori yang berkembang. Produksi karbon aktif masih bergantung pada bahan baku tak terbarukan dan berbiaya tinggi. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah biomassa sebagai prekursor karbon aktif menjadi pendekatan yang semakin relevan dalam kerangka ekonomi sirkular. Salah satu biomassa yang berpotensi dikembangkan menjadi karbon aktif yaitu cangkang kemiri (Aleurites moluccana (L.) Willd). Artikel review ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif potensi cangkang kemiri sebagai bahan baku karbon aktif dengan fokus pada pengaruh variasi aktivator terhadap karakteristik dan kinerja absorpsi karbon aktif yang dihasilkan. Kajian dilakukan melalui analisis kritis literatur terkait potensi tempurung kemiri sebagai bahan baku, proses produksi karbon aktif, jenis aktivator dan pengaruhnya terhadap arang aktif serta analisis kritis mengenai karbon aktif cangkang kemiri. Hasil kajian menunjukkan bahwa jenis aktivator (asam maupun basa) berperan signifikan dalam menentukan struktur pori, luas permukaan dan kapasitas adsorpsi karbon aktif. Aktivator asam cenderung menghasilkan karbon aktif dengan gugus fungsi permukaan yang kaya, sedangkan aktivator basa efektif dalam pembentukan mikropori. Cangkang kemiri memiliki potensi besar sebagai prekursor karbon aktif. Namun, tantangan mengenai keberlanjutan proses, konsumsi energi dan limbah kimia masih perlu diatasi. Review ini diharapkan menjadi dasar pengembangan riset lebih lanjut dan penerapan teknologi karbon aktif yang efisien, ramah lingkungan dan berkelanjutan.

KATA KUNCI

Aktivasi kimia; biomassa; cangkang kemiri; ekonomi sirkular; karbon aktif

PENULIS KORESPONDEN

Alamat e-mail penulis koresponden: rozalia@ae.unand.ac.id

1. Pendahuluan

Aktivitas industri merupakan sumber utama pencemaran air limbah, yang umumnya mengandung kontaminan seperti logam berat, pewarna organik, pelarut dan sebagainya serta adanya residu farmasi. Berbagai metode pengurangan kontaminan telah dikembangkan namun masih seringkali mengalami kesulitan untuk menghilangkan polutan kompleks dari limbah, sehingga strategi pengolahan lanjutan semakin diperlukan. Hal ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan agen absorben untuk menghilangkan kontaminasi tersebut. Absorben tersebut harus memiliki sifat-sifat, seperti selektivitas tinggi dan kapasitas absorpsi terhadap limbah juga tinggi [1].

Karbon aktif merupakan salah satu agen absorben yang banyak diaplikasikan pada industri untuk mengurangi kontaminasi logam berat pada limbah cair. Karbon aktif adalah padatan berkarbon dari batubara atau biomassa yang diperoleh melalui proses pembakaran pada suhu tinggi . Umumnya karbon aktif dimanfaatkan dalam pengolahan air limbah, adsorpsi gas, dan penjernihan air. Absorben dengan karbon aktif banyak diaplikasikan karena memiliki luas permukaan yang tinggi yang dapat menghilangkan berbagai macam polutan seperti zat warna, logam berat, pestisida dan gas. Proses produksi karbon aktif dilakukan dengan mengarangkan biomassa kemudian diaktivasi dengan aktivator tertentu. Sehingga produksi karbon aktif dianggap memiliki biaya produksi yang lebih murah karena memanfaatkan bahan-bahan yang tidak digunakan kembali seperti penggunaan limbah pertanian [2], [3].

Limbah pertanian yang memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi dapat dijadikan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif. Pendekatan ini sejalan dengan konsep ekonomi sirkular, yaitu memaksimalkan pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai tambah tinggi, sekaligus mengurangi beban lingkungan [4], [5]. Indonesia merupakan negara agraris yang

GreenTech
Revolutionizing Agro-Industrial
Engineering for Sustainable Agriculture
https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74
Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

memiliki limbah pertanian melimpah yang masih belum termanfaatkan secara optimal. Berbagai penelitian telah dilakukan dengan memanfaatkan limbah pertanian sebagai prekursor karbon aktif, seperti tempurung kelapa, sekam padi, tandan kosong kelapa sawit, dan beberapa limbah biomasa lainnya. Penelitian mengenai pemanfaatan cangkang kemiri sebagai karbon aktif telah banyak dilakukan dengan berbagai perlakuan, namun masih terbilang kurang optimal. Kemiri merupakan tanaman tropis yang banyak dibudidayakan di Indonesia dan negara-negara Asia Tenggara lainnya. Proses pengolahan kemiri menghasilkan limbah berupa cangkang dalam jumlah besar, yang umumnya dibuang atau dibakar [6], [7], [8]. Padahal, cangkang kemiri memiliki struktur yang keras, kandungan karbon tinggi, serta komposisi lignoselulosa yang mendukung pembentukan karbon aktif berkualitas tinggi. Kualitas karbon aktif dihasilkan dari biomassa sangat dipengaruhi oleh metode dan jenis aktivasi yang digunakan. Aktivasi kimia menggunakan aktivator asam atau basa diketahui mampu meningkatkan luas permukaan dan porositas karbon aktif secara signifikan dibandingkan aktivasi fisika. Namun, setiap jenis aktivator memberikan karakteristik yang berbeda terhadap struktur pori, gugus fungsi permukaan, dan kinerja adsorpsi karbon aktif. Artikel review ini disusun untuk mengkaji potensi cangkang kemiri sebagai bahan baku karbon aktif, dengan fokus utama pada pengaruh variasi aktivator terhadap sifat dan kinerja karbon aktif [9].

Selain aspek luas permukaan dan porositas, keberhasilan karbon aktif sebagai absorben juga ditentukan oleh karakter kimia permukaannya. Keberadaan gugus fungsi oksigen seperti hidroksil, karboksil, dan karbonil berperan penting dalam mekanisme interaksi antara karbon aktif dan polutan, khususnya melalui ikatan elektrostatik, pertukaran ion, dan pembentukan kompleks. Dengan demikian, modifikasi permukaan karbon aktif melalui pemilihan aktivator yang tepat menjadi strategi penting untuk meningkatkan selektivitas adsorpsi terhadap kontaminan tertentu, termasuk logam berat dan senyawa organik beracun yang bersifat persisten.

Dalam konteks pengolahan limbah cair industri, tantangan utama tidak hanya terletak pada kemampuan adsorpsi, tetapi juga pada stabilitas material, kemudahan regenerasi, dan keberlanjutan proses produksi. Karbon aktif berbasis biomassa, seperti cangkang kemiri, menawarkan keunggulan dari sisi keberlanjutan karena berasal dari sumber terbarukan serta berpotensi menurunkan jejak karbon dibandingkan karbon aktif berbasis batubara. Selain itu, pemanfaatan limbah cangkang kemiri dapat memberikan nilai ekonomi tambahan bagi sektor pertanian dan agroindustri, sekaligus mengurangi praktik pembuangan limbah yang berdampak negatif terhadap lingkungan.

Pengembangan karbon aktif dari cangkang kemiri juga membuka peluang untuk diaplikasikan pada pengolahan limbah yang lebih spesifik, seperti limbah tekstil, limbah farmasi, dan limbah pertambangan yang memiliki karakteristik polutan kompleks. Dengan pengaturan kondisi aktivasi—meliputi konsentrasi aktivator, rasio impregnasi, suhu, dan waktu aktivasi—dimungkinkan untuk menghasilkan karbon aktif dengan distribusi ukuran pori yang sesuai dengan target adsorbat. Hal ini menjadi penting mengingat perbedaan ukuran molekul dan sifat kimia polutan akan memengaruhi efisiensi proses adsorpsi.

Kajian komparatif terhadap berbagai jenis aktivator pada cangkang kemiri diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai hubungan antara metode aktivasi, karakteristik fisikokimia karbon aktif, dan performa aplikatifnya. Informasi ini tidak hanya relevan untuk pengembangan material adsorben skala laboratorium, tetapi juga menjadi dasar dalam perancangan proses produksi karbon aktif skala industri yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan. Dengan demikian, pengembangan karbon aktif berbasis cangkang kemiri berpotensi menjadi solusi inovatif dalam mendukung pengolahan limbah cair berkelanjutan di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode studi literatur yang bertujuan untuk mengetahui potensi dari tempurung kemiri sebagai bahan baku pembuatan arang aktif. Penelitian dimulai dari mengumpulkan artikel-artikel terkait melalui basis data ilmiah seperti *Scopus, ScienceDirect* dan *Google Scholar* dengan rentang waktu publikasi 10 tahun terakhir.

GreenTech
Revolutionizing Agro-Industrial
Engineering for Sustainable Agriculture

https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74

Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

Pemilihan artikel berfokus pada karbon aktif, tempurung kemiri, sifat fisik dan kimia dari kulit kemiri, teknik karbonisasi dan teknik aktivasi dari arang aktif. Literatur yang dikaji mencakup potensi tempurung kemiri sebagai bahan baku, proses produksi karbon aktif, jenis aktivator dan pengaruhnya terhadap arang aktif serta analisis kritis mengenai karbon aktif cangkang kemiri. Data dari berbagai studi dianalisis secara kritis dan disintesis untuk mengidentifikasi pola umum, keunggulan, keterbatasan serta peluang pengembangan lebih lanjut.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Potensi Tempurung Kemiri Sebagai Bahan Baku

Arang aktif dapat dihasilkan dari prekursor limbah pertanian. Pengembangan karbon aktif dari limbah dan bahan biomassa memiliki keuntungan dari segi ekonomi dan perspektif terhadap lingkungan. Tempurung kemiri merupakan limbah padat dari industri pengolahan kemiri yang mempunyai potensi tinggi sebagai bahan baku pembuatan arang aktif. Limbah biomassa ini mudah didapat, lebih murah dan merupakan pilihan ekonomis dan berkelanjutan sebagai bahan baku. Tempurung kemiri memiliki kandungan hemiselulosa sebesar 49,22% dan lignin sebesar 54,46% [10]. Kandungan lignoselulosa yang tinggi ini menjadikan tempurung kemiri berpotensi dimanfaatkan sebagai prekursor arang aktif. Lignin berperan penting dalam proses pembentukan karbon terikat selama proses karbonisasi dilakukan karena lignin lebih tahan terhadap degradasi termal dibandingkan dengan selulosa dan hemiselulosa. Tingginya karbon terikat menjadi faktor utama untuk membentuk kerangka karbon yang stabil dan berpori setelah proses aktivasi dilakukan. Struktur tempurung kemiri yang keras dan padat memberikan keuntungan dalam menghasilkan karbon aktif yang baik [11], [12].

Komposisi kimia tempurung kemiri umumnya memiliki mineral anorganik yang relatif rendah. Kondisi ini menguntungkan untuk produksi karbon aktif karena karakteristik yang dihasilkan memiliki kadar abu yang lebih rendah. Namun tetap harus diperhatikan proses karbonisasi dan pencucian pasca aktivasi dilakukan secara optimal. Kadar abu yang rendah sangat diharapkan pada karbon aktif karena abu dapat menutupi pori dan menurunkan kapasitas absorpsi karbon aktif. Karakteristik terhadap arang dari tempurung kemiri relatif memenuhi standar SNI yaitu karbon aktif menghasilkan kadar air sebesar 5,32%, kadar abu 9.40%, kadar zat terbang 12,76% dan kadar karbon terikat 72,52%. Kadar abu yang rendah pada bahan baku sangat penting, karena kadar abu pada arang aktif akan mempengaruhi kemampuan adsorpsi dan kemurnian pada arang aktif [13].

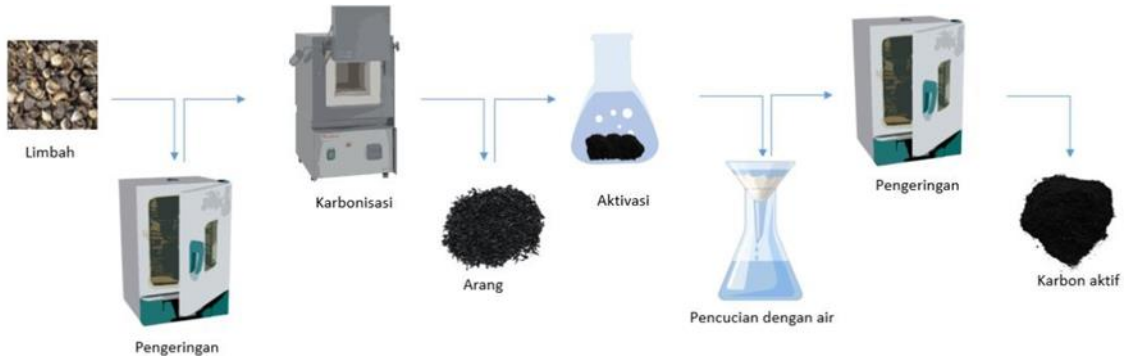
Karbon aktif dari cangkang kemiri jika dibandingkan dengan biomassa lain seperti sekam padi atau tongkol jagung, tempurung kemiri memiliki densitas dan kekerasan yang lebih tinggi. Beberapa penelitian mengenai pemanfaatan tempurung kemiri telah dilakukan. Karbon aktif yang diaktivasi menggunakan H_3PO_4 dengan konsentrasi 7 M mempunyai kandungan karbon tetap sebesar 88.59%. Karbon aktif yang diaktivasi dengan H_3PO_4 konsentrasi 7.5% menghasilkan daya serap terhadap ion sebesar 602.91 mg/g. Karbon aktif diaktivasi menggunakan NaOH 15% memiliki daya serap terhadap iod sebesar 663.82 mg/g. Secara keseluruhan, tempurung kemiri berpotensi menjadi bahan baku karbon aktif berbasis biomassa terbarukan. Kombinasi antara ketersediaan yang melimpah, kandungan karbon yang tinggi, struktur fisik yang keras, serta kesesuaian dengan konsep ekonomi sirkular menjadikan tempurung kemiri sebagai kandidat prekursor karbon aktif yang menjanjikan untuk aplikasi pada lingkungan sebagaimana tujuan pembangunan berkelanjutan pada SDG 6 mengenai pengolahan air, pengurangan limbah biomassa dan potensi penurunan emisi sejalan dengan SDG 13. Serta meningkatkan nilai ekonomi dan membuka peluang usaha baru yang berkontribusi terhadap SDG 8 [14], [15], [16].

3.2. Proses Produksi Karbon aktif dari cangkang kemiri

Proses produksi karbon aktif biasanya dilakukan melalui tiga tahap yaitu karbonisasi, aktivasi, dan pencucian. Proses karbonisasi dilakukan melalui proses pemanasan pada suhu 300 – 700 ^oC selama 1- 3 jam tergantung jenis perlakukan

GreenTech
Revolutionizing Agro-Industrial
Engineering for Sustainable Agriculture
https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74
Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

yang diberikan. Proses karbonisasi dilakukan untuk menghilangkan komponen volatil dan menghasilkan arang dengan kandungan karbon tinggi. Selanjutnya tahap kedua yaitu proses aktivasi baik aktivasi fisik maupun secara kimia. Metode fisik dilakukan dengan konversi prekursor menjadi karbon menggunakan gas inert seperti uap, karbon dioksida atau campuran gas selama pirolisis. Sedangkan aktivasi secara kimia dilakukan dengan penggunaan bahan kimia tertentu untuk meningkatkan pori pada arang aktif seperti penggunaan asam atau basa yang dijelaskan pada bab selanjutnya. Setelah proses aktivasi, karbon aktif yang dihasilkan tersebut dicuci dengan aquades hingga pH netral, kemudian sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 110 ^{o}C selama 6 jam [17], [18]. Gambar 1 menunjukkan proses produksi karbon aktif secara sederhana.



Gambar 1. Alur proses produksi karbon aktif

Jenis Aktivator dan Pengaruhnya terhadap Arang Aktif

Karbon aktif dapat di aktivasi menggunakan 2 metode yaitu secara fisik dan kimia. Aktivasi fisika dilakukan dengan menggunakan uap air (H_2O) atau CO_2 pada suhu tinggi (>800 ^{0}C) untuk membuka struktur pori. Struktur berpori yang dihasilkan dapat memfasilitasi difusi elektrolit yang baik. Proses aktivasi kimia melibatkan prekursor berupa bahan pengaktif baik yang berasal dari basa maupun asam. Proses impregnasi menggunakan agen-agen aktivasi kimia tersebut menghasilkan pembentukan gugus fungsional baru pada permukaan material dan pengembangan struktur pada pori-porinya. Sehingga aktivasi secara kimia lebih diminati untuk dilakukan. Proses pasca aktivasi perlu dilakukan penghilangan reaktan dan residu anorganik (abu) yang berasal dari prekursor dengan cara pencucian yang dilakukan berulang kali hingga diperoleh pH netral [19], [20]. Hal ini menjadikan proses ini membutuhkan waktu yang lama dan mahal. Secara umum, aktivator yang digunakan dapat diklasifikasikan menjadi aktivator asam dan basa.

3.3. Aktivator Asam

Aktivator asam yang paling umum digunakan dalam produksi karbon aktif adalah asam fosfat (H_3PO_4), diikuti oleh asam sulfat (H2SO4) dan asam klorida (HCl). Aktivator asam bekerja melalui mekanisme dehidrasi dan pembentukan ikatan silang pada struktur biomassa yang mendorong pembentukan pori dan gugus fungsi permukaan bersifat asam. Mekanisme ini dapat menyebabkan pembentukan pori pada permukaan menjadi lebih stabil. Pada karbon aktif tempurung kemiri, penggunaan H_3PO_4 cenderung menghasilkan struktur pori yang berkembang dengan dominasi mesopori, serta meningkatkan keberadaan gugus fungsi permukaan seperti –OH, -COOH, dan –PO_4 [21], [22].

Gugus ini berperan dalam meningkatkan efektivitas adsorpsi terhadap senyawa polar dan logam berat. Selain itu, aktivasi asam, biasanya dilakukan pada suhu relatif lebih rendah dibandingkan aktivasi basa, sehingga berpotensi menurunkan konsumsi energi. Penggunaan H_3PO_4 dilaporkan menghasilkan karbon aktif dengan distribusi pori mikro dan meso yang seimbang dan stabil [23], [24].

GreenTech
Revolutionizing Agro-Industrial
Engineering for Sustainable Agriculture

https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74

Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

3.4. Aktivator Basa

Aktivator basa yang umum digunakan yaitu natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH). Aktivasi basa berinteraksi melalui reaksi redoks antara senyawa alkali dan matriks karbon, yang menghasilkan pembukaan mikropori yang intensif. Proses menggunakan aktivator ini biasanya dilakukan pada suhu tinggi, sehingga mampu menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan spesifik yang sangat besar. Pada karbon aktif dari tempurung kemiri, penggunaan basa dilaporkan mampu meningkatkan luas permukaan dan volume pori secara signifikan. Dominasi mikropori yang dihasilkan sangat menguntungkan untuk adsorpsi molekul berukuran kecil, seperti ion logam berat dan senyawa organik sederhana. Hal ini menjadikan karbon aktif hasil aktivasi basa sangat baik untuk aplikasi pengolahan air. Kelemahan penggunaan basa kuat dapat meningkatkan kadar abu akibat pembentukan senyawa anorganik sisa reaksi. Tetapi untuk beberapa kasus dengan biomassa silika tinggi seperti sekam padi, dapat menurunkan kadar abu sekam padi tersebut karena adanya ikatan Na_2SiO_3 yang terbentuk dalam air, dan mudah dihilangkan dengan pencucian air [25], [26], [27].

Tabel 1. Perbandingan variasi aktivator pada arang aktif dari berbagai biomassa

Biomassa	Aktivator	Rasio aktivasi : karbon aktif	Luas permukaan (m^2/g)	Daya serap iod (mg/g)	Referensi
Cangkang kemiri	H3PO4	6 : 1	1669.5 m^2/g	-	[11]
Cangkang kemiri	NaOH	15%	-	663.82	[13]
Cangkang kemiri	H_3PO_4	7.5%	-	602.91	[12]
Tempurung kelapa	NaOH	4 : 1	516	-	[7]
Sekam padi	HCl	10 : 1	141.369	-	[24]
Bambu	NaOH	5 mol/L	-	1225.7	[28]
Tunas Anggur	$ZnCl_2$	4 : 3	1689	1276	[30]
Kulit Durian	KOH	2 : 1	979	-	[31]
Cangkang kosong kelapa sawit	H_3PO_4	1.75 : 1	1109	-	[32]

Tabel 1 menunjukkan perbandingan dari berbagai jenis biomassa dan jenis aktivator yang mempengaruhi daya serap iod serta luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan. Selain jenis aktivator, parameter proses seperti rasio impregnasi, suhu aktivasi, dan waktu aktivasi juga sangat mempengaruhi kualitas karbon aktif yang dihasilkan. Peningkatan suhu aktivasi mengurangi hasil karbon aktif karena pembakaran lignin pada biomassa dan pelepasan senyawa yang lebih mudah menguap. Semakin meningkat suhu aktivasi akan menurunkan luas permukaan mikropori arang aktif tersebut [28], [29]. Waktu aktivasi karbon aktif berpengaruh pada struktur karbon aktif yang dihasilkan. Hasil karbon aktif menurun secara signifikan seiring waktu aktivasi yang meningkat. Reaksi yang lama antara agen aktivasi dan biomassa akan menyebabkan luas permukaan dan porositas menjadi mesopori dan makropori karena hilangnya karbon selama waktu aktivasi yang semakin lama [34].

3.5. Aktivasi fisika dan kombinasi metode

Aktivasi fisika biasanya dilakukan menggunakan uap air atau CO_2 pada suhu tinggi (800 – 1000 °C). Metode ini relatif lebih ramah lingkungan karena tidak memerlukan bahan kimia, namun membutuhkan energi yang besar. Pada cangkang kemiri, aktivasi fisika cenderung menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan yang lebih rendah dibandingkan aktivasi kimia, tetapi dengan struktur pori yang lebih stabil dan residu kimia yang minimal. Beberapa penelitian melaporkan bahwa kombinasi aktivasi kimia dan fisika dapat menghasilkan karbon aktif dengan karakteristik yang lebih

GreenTech
Revolutionizing Agro-Industrial
Engineering for Sustainable Agriculture
https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74
Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

unggul [30], [31]. Pendekatan ini menunjukkan potensi besar untuk dioptimalkan lebih lanjut pada biomassa cangkang kemiri.

3.6. Analisis Kritis dan keberlanjutan

Arang aktif mempunyai struktur berpori kompleks dengan luas permukaan yang tinggi dan memiliki berbagai gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan, serta berperan sebagai agen absorpsi. Kondisi pemrosesan arang aktif menjadi faktor penting dalam menghasilkan arang aktif yang memiliki struktur dan sifat produk akhir yang dihasilkan. Faktor lain yang juga penting yaitu pada penggunaan prekursor. Prekursor yang digunakan harus memiliki produktivitas dan kemudahan aktivasi. Biasanya prekursor karbon yang digunakan dalam produksi arang aktif adalah bahan organik yang kaya akan karbon. Limbah pertanian dianggap sebagai input yang sangat penting untuk pembuatan karbon aktif karena memiliki sifat terbarukan dan bahan berbiaya lebih rendah [32], [33]. Hal ini disebabkan residu dalam kegiatan pertanian lebih melimpah.

Berdasarkan kajian literatur, karbon aktif tempurung kemiri tidak hanya terfokus pada satu jenis aktivator yang unggul saja, namun juga perlu diperhatikan kondisi proses produksi karbon aktif tersebut. Aktivator asam cenderung unggul dalam menghasilkan karbon aktif dengan gugus fungsi permukaan yang kaya dan stabilitas struktur yang baik, sehingga cocok untuk adsorpsi senyawa polar dan aplikasi tertentu di bidang lingkungan. Sebaliknya, aktivator basa lebih efektif dalam memproduksi karbon aktif dengan luas permukaan dan mikroporositas tinggi, yang sangat menguntungkan untuk adsorpsi molekul kecil. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi parameter teknik tanpa mempertimbangkan aspek keberlanjutan secara menyeluruh. Penggunaan bahan kimia kuat, konsumsi energi tinggi, serta limbah cair hasil pencucian belum dianalisis secara komprehensif. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian terkait pengembangan proses aktivasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Secara kritis, pengembangan karbon aktif dari tempurung kemiri di masa depan perlu mengarah pada keseimbangan antara kinerja adsorpsi, efisiensi proses dan keberlanjutan lingkungan. Integrasi antar konsep ekonomi sirkular seperti pemanfaatan kembali limbah proses dan penggunaan aktivator ramah lingkungan menjadi aspek penting yang perlu diprioritaskan. Dengan pendekatan tersebut, tempurung kemiri berpotensi menjadi prekursor karbon aktif yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga berkelanjutan secara ekonomi dan lingkungan.

4. Kesimpulan

Cangkang kemiri memiliki potensi yang sangat menjanjikan sebagai bahan baku karbon aktif berbasis biomassa terbarukan. Variasi jenis aktivator memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik dan kinerja karbon aktif yang dihasilkan. Aktivator asam unggul dalam pembentukan gugus fungsi permukaan, sedangkan aktivator basa lebih efektif meningkatkan luas permukaan dan mikroporositas. Meskipun demikian, pengembangan karbon aktif cangkang kemiri masih menghadapi tantangan terkait keberlanjutan proses dan standarisasi metode. Dengan pendekatan yang lebih terintegrasi antara aspek teknis, ekonomi dan lingkungan, cangkang kemiri berpotensi menjadi prekursor karbon aktif yang kompetitif dan berkelanjutan di masa depan.

5. Referensi

[1] R. F. Cahyani, N. Nasution, and R. Y. Lubis, “Karakterisasi dan Kapasitansi Elektroda Karbon Aktif Tempurung Kemiri dengan Variasi Aktivator Asam Fosfat (H3po4),” *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 8, no. 1, pp. 32–39, Jan. 2025, doi: 10.30596/RMME.V8I1.19474.

https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74
Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

[2] Y. A. Kurniawan and A. Supriyanto, "Komposisi Arang Cangkang Kemiri dan Natrium Karbonat Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro pada Baja Mild Stell," *Jejak digital: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, vol. 1, no. 5b, pp. 4040–4050, Sep. 2025, doi: 10.63822/NH9BCJ35.
[3] P. D. Ola, "Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Kemiri (Aleurites Moluccana) dengan Variasi Konsentrasi Zat Pengaktivasi," *Chemistry Notes*, vol. 7, no. 1, pp. 14–24, Jun. 2025, doi: 10.35508/cn.v7i1.22590.
[4] Z. Nabila, S. Bahri, L. Maulinda, Wusnah, and F. Hasfita, "Pemanfaatan Asam dari Belimbing Wuluh (Averrhoa Bilimbi l.) untuk Aktivator Karbon Kulit Jagung Hasil Samping Pirolisis sebagai Adsorben Minyak Jelantah," *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, vol. 5, no. 05, pp. 972–980, Oct. 2025, doi: 10.29103/cejs.v5i05.22659.
[5] I. A. Adlin, R. Ismet, S. Amalia, A. Putri, and J. Jufrinaldi, "Optimasi Suhu Pembuatan Arang Aktif dari Ampas Kopi terhadap Penurunan Kadar COD dan BOD pada Air Limbah Tahu," *Jurnal Riset, Inovasi, Teknologi & Terapan*, vol. 3, no. 2, p. 42, Jul. 2025, doi: 10.30811/ristera.v3i2.7444.
[6] M. Hamid, N. Haida Mohd Kaus, S. Humaidi, I. Isnaeni, A. Daulay, and I. Revita Saragi, "Activated Carbon from Biomass Waste Candlenut Shells (Aleurites Moluccana) Doped ZIF-67/Fe3O4 as Advanced Materials for Supercapacitor," *Mater Sci Energy Technol*, vol. 7, pp. 381–390, 2024, doi: 10.1016/j.mset.2024.07.004.
[7] F. T. Wulandari and D. M. Prasetyo, "Pemanfaatan Limbah Biomassa Cangkang Kemiri dan Tempurung Kelapa Sebagai Biobriket Ramah Lingkungan," *Jurnal Celebica : Jurnal Kehutanan Indonesia*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, Jun. 2025, Accessed: Jan. 05, 2026. [Online]. Available: https://celebica.uho.ac.id/index.php/journal/article/view/91
[8] K. Kawulur, H. Taunaumang, S. I. Umboh, C. A. N. Bujung, and Kamaruddin, "Pemanfaatan Karbon Aktif dari Cangkang Kemiri sebagai Elektroda Superkapasitor," *Jurnal FisTa : Fisika dan Terapannya*, vol. 6, no. 2, pp. 68–74, Oct. 2025, doi: 10.53682/FISTA.V6I2.475.
[9] A. S. Rezki, Y. R. Wulandari, S. Shintawati, L. Hamam, and E. P. Suryaningtyas, "Analisis Karakteristik Briket dari Limbah Biomassa Mesocarp Fiber dan Cangkang Kemiri Sebagai Bahan Bakar Alternatif," *JURNAL TEKNOLOGI KIMIA MINERAL*, vol. 4, no. 2, pp. 79–86, Dec. 2025, doi: 10.61844/jtkm.v4i2.1103.
[10] H. C. Sevindir and M. Doğanay, "Treatment of Paper Wastewater by Palm Kernel Shell-Based Activated Carbon Adsorption," *Advanced Engineering Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, Jul. 2025, Accessed: Jan. 05, 2026. [Online]. Available: https://adejournal.org/index.php/adejournal/article/view/11
[11] S. S. Bamerdhah, N. S. Kumar, E. H. Al-Ghurabi, M. Boumaza, and M. Asif, "Optimized Synthesis of Activated Carbon from Date Palm Seeds for Efficient Crude Oil Adsorption in Wastewater Treatment," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 31122, Aug. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-16831-7.
[12] S. H. Tang, N. A. Rashidi, and H. Y. Lim, "Advancing Biomass-Based Activated Carbon Production: Challenges, Techniques, and Opportunities With Focus oOn Malaysia," *Environ Dev Sustain*, Jan. 2025, doi: 10.1007/s10668-025-05998-8.
[13] R. Paredes, E. Garcia-Franco, B. Castells, M.-P. Martínez-Hernando, P. M. Peris, and M. F. Ortega, "Thermodynamic-Based Prediction of Gaseous Species Evolution in Thermogravimetric Analysis," *Thermochim Acta*, vol. 754, p. 180180, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.tca.2025.180180.
[14] X. Yin, J. Tao, J. Wang, B. Yan, G. Chen, and Z. Cheng, "Prediction of Activation Energy Of Lignocellulosic Biomass Pyrolysis Through Thermogravimetry-Assisted Machine Learning," *Biomass Bioenergy*, vol. 194, p. 107644, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.107644.
[15] J. Fu, S. Weber, and S. Q. Turn, "Comprehensive Characterization of Kukui Nuts as Feedstock for Energy Production in Hawaii," *ACS Omega*, vol. 8, no. 25, pp. 22567–22574, Jun. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c00860.
[16] M. R. Fiqriawan, M. Anas, and Erniwati, "Efek Variasi Konsentrasi H3PO4 Terhadap Kualitas Karbon Aktif Cangkang Kemiri Berdasarkan Analisis Proksimat," *Einstein's: Research Journal of Applied Physics*, vol. 1, no. 2, pp. 42–47, Apr. 2023, doi: 10.33772/einsteins.v1i2.155.

https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74
Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

[17] I. Mechnou *et al.*, "Activated Carbons for Effective Pharmaceutical Adsorption: Impact of Feedstock Origin, Activation Agents, Adsorption Conditions, and Cost Analysis," *Results in Engineering*, vol. 27, p. 105966, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105966.
[18] E. Menya, P. W. Olupot, H. Storz, M. Lubwama, and Y. Kiros, "Production and Performance of Activated Carbon From Rice Husks for Removal of Natural Organic Matter from Water: A Review," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 129, pp. 271–296, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2017.11.008.
[19] M. C. Silva *et al.*, "H3PO4–Activated Carbon Fibers of High Surface Area from Banana Tree Pseudo-Stem Fibers: Adsorption Studies of Methylene Blue Dye in Batch and Fixed Bed Systems," *J Mol Liq*, vol. 324, p. 114771, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114771.
[20] S. Khaleel, "Synthesis and Characterization of Activated Carbon Produced from Hazelnut Peels by Chemical Activation," *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 32, no. 1, pp. 1–5, 2025, doi: 10.2298/CICEQ240807005K.
[21] A. H. Jawad, R. A. Rashid, M. A. M. Ishak, and L. D. Wilson, "Adsorption of Methylene Blue onto Activated Carbon Developed from Biomass Waste by H2SO4 Activation: Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic Studies," *Desalination Water Treat*, vol. 57, no. 52, pp. 25194–25206, Nov. 2016, doi: 10.1080/19443994.2016.1144534.
[22] R. F. T. Tagne, J. A. K. Atangana, N. G. Kounou, S. Narra, and I. Ionel, "A Strategy for Mitigating Inhibitors in Hazelnut Shells Through Combined Alkaline and Activated Carbon Treatment to Optimize Cellulosic Ethanol Production," *Fuel*, vol. 411, p. 138028, May 2026, doi: 10.1016/j.fuel.2025.138028.
[23] Y. Chen *et al.*, "Study on The Properties of Activated Carbon Based on Activation Process and NaOH Modification," *Advances in Bamboo Science*, vol. 12, p. 100186, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.bamboo.2025.100186.
[24] K. Ukanwa, K. Patchigolla, R. Sakrabani, E. Anthony, and S. Mandavgane, "A Review of Chemicals to Produce Activated Carbon from Agricultural Waste Biomass," *Sustainability*, vol. 11, no. 22, p. 6204, Nov. 2019, doi: 10.3390/su11226204.
[25] T. C. Chandra, M. M. Mirna, J. Sunarso, Y. Sudaryanto, and S. Ismadji, "Activated Carbon from Durian Shell: Preparation and Characterization," *J Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 40, no. 4, pp. 457–462, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.jtice.2008.10.002.
[26] M. A. F. Mazlan *et al.*, "Activated Carbon from Rubber Wood Sawdust by Carbon Dioxide Activation," *Procedia Eng*, vol. 148, pp. 530–537, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.549.
[27] R. G. Pereira *et al.*, "Preparation of Activated Carbons from Cocoa Shells and Siriguela Seeds using H3PO4 and ZnCL2 as Activating Agents for BSA and α-Lactalbumin Adsorption," *Fuel Processing Technology*, vol. 126, pp. 476–486, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.06.001.
[28] Y. Zhao, R. Fan, and L. Feng, "Preparation and Application of Straw Activated Carbon," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 330, p. 042035, Nov. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/330/4/042035.
[29] I. D. O. Kurniawan, R. Y. Kurniawan, N. Widiastuti, L. Atmaja, and A. Shofiyani, "Development of Activated Carbon Material from Oil Palm Empty Fruit Bunch for CO2 Adsorption," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 8, no. 2, Nov. 2019, doi: 10.12962/j23373539.v8i2.49700.
[30] Z. Zhong, X. Peng, H. Gao, I. Hussain, X. Wang, and B. Tan, "Preparation of Hierarchical Porous Monoliths With High Surface Areas by a Solvent Knitting Strategy," *Macromol Rapid Commun*, vol. 46, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2025, doi: 10.1002/marc.202400494.
[31] Q. Tian *et al.*, "Preparation of Red Mud Derived Eggshell Coupling Adsorbent and Study on Carbon Dioxide Capture Performance Based on Experiment and Density Functional Theory Simulation," *Sep Purif Technol*, vol. 355, p. 129728, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2024.129728.

https://doi.org/10.25077/greentech.v2i2.74
Vol. 2, No. 2, 2025, Hal. 279-287

[32] K. Kishibayev *et al.*, “Production of Activated Carbons from Corn Cobs Waste by Steam or H3PO4 Activation for Effective CO2 Capture and Industrial Gas Selectivity Towards CO2/CH4/N2,” *Fuel*, vol. 404, p. 136266, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.fuel.2025.136266.
[33] A. S. Ahmed, M. Alsultan, A. A. Sabah, and G. F. Swiegers, “Carbon Dioxide Adsorption by a High-Surface-Area Activated Charcoal,” *Journal of Composites Science*, vol. 7, no. 5, p. 179, May 2023, doi: 10.3390/jcs7050179.