

Karakterisasi Sifat Fisis, Morfologi, dan Komposisi Permukaan Arang Tempurung Lontar (*Borassus flabellifer* L.) Hasil Karbonisasi dan Aktivasi Kimia

Madalena Da Costa ^{1, a} Oktavina G.LP Manulangga ^{1, b} Yohanes Yagi Leli ^{1, c}
Martinho Dos Santos Martins ^{2, d}

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas San Pedro
Jalan Ir. Soekarno, Kupang 85112, Indonesia

² Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Katolik Widya Mandira
Jalan A. Yani, Kupang 85211, Indonesia

e-mail: ^{a*} madalnadacosta042@gmail.com, ^b gemanulangga@gmail.com, ^c yohanleli@gmail.com
dan ^d martinhodosantosmartins92@gmail.com

Diajukan: 15 Agustus 2026; Diterima: 31 Agustus 2026; Diterbitkan: 7 September 2026

Abstrak

Tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.) merupakan biomassa lokal yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku arang untuk aplikasi adsorben. Karakteristik arang dipengaruhi oleh proses karbonisasi dan aktivasi, sehingga diperlukan kajian terhadap perubahan sifat fisis, morfologi, dan komposisi permukaannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan membandingkan sifat fisis, morfologi permukaan, dan komposisi unsur arang tempurung lontar sebelum dan sesudah aktivasi kimia menggunakan KOH. Tempurung lontar dikarbonisasi pada suhu 400 °C selama 120 menit menggunakan kiln drum modifikasi, kemudian arang diaktivasi menggunakan KOH 0,1 M selama 24 jam. Karakteristik fisis ditentukan berdasarkan rendemen, kadar air, dan kadar abu, sedangkan morfologi permukaan dan komposisi unsur dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray* (EDX). Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses karbonisasi menghasilkan rendemen sebesar 66,00%. Setelah aktivasi, kadar air menurun dari 5,61% menjadi 3,75% dan kadar abu dari 6,43% menjadi 2,59%. Citra SEM menunjukkan bahwa permukaan arang setelah aktivasi menjadi lebih terbuka dan berongga dibandingkan sebelum aktivasi. Analisis EDX menunjukkan penurunan kandungan Ca dari 15,48 wt% menjadi 3,30 wt% dan Mg dari 6,84 wt% menjadi 1,40 wt%, sedangkan kandungan O meningkat dari 48,26 wt% menjadi 59,34 wt% dan unsur K sebesar 5,56 wt% terdeteksi setelah aktivasi. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa aktivasi KOH mengubah sifat fisis, morfologi permukaan, dan komposisi unsur arang tempurung lontar, serta menghasilkan karakteristik permukaan yang berpotensi dikembangkan sebagai adsorben berbasis biomassa lokal.

Kata kunci: Tempurung lontar; Karbonisasi; Aktivasi KOH; SEM-EDX; Morfologi permukaan

Abstract

Lontar palm shells (*Borassus flabellifer* L.) are a local biomass source with potential for use as a raw material for charcoal in adsorbent applications. The characteristics of the charcoal are influenced by the carbonization and activation processes; therefore, research is needed on changes in its physical properties, morphology, and surface composition. This study aims to determine and compare the physical properties, surface morphology, and elemental composition of lontar palm shell charcoal before and after chemical activation using KOH. The lontar shells were carbonized at a temperature of 400 °C for 120 minutes using a modified drum kiln; the charcoal was then activated using 0.1 M KOH for 24 hours. Physical characteristics were determined based on yield, moisture content, and ash content, while surface morphology and elemental composition were analyzed using *Scanning Electron Microscopy* (SEM) and *Energy Dispersive X-ray* (EDX). The results showed that the carbonization process yielded a recovery rate of 66.00%. After activation, the moisture content decreased from 5.61% to 3.75% and the ash content from 6.43% to 2.59%. SEM images showed that the surface of the charcoal after activation became more open and porous compared to before activation. EDX analysis showed a decrease in Ca content from 15.48 wt% to 3.30 wt% and Mg from 6.84 wt% to 1.40 wt%, while O content increased from 48.26 wt% to 59.34 wt%, and K was detected at 5.56 wt% after activation. The characterization results show that KOH activation alters the physical properties, surface morphology, and elemental composition of lontar palm shell

charcoal, and produces surface characteristics that have the potential to be developed as a locally sourced biomass-based adsorbent.

Keywords: Lontar shell; Carbonization; KOH activation; SEM-EDX; Surface morphology

PENDAHULUAN

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku material karbon terus dikembangkan karena ketersediaannya yang melimpah dan bersifat terbarukan [1]. Biomassa lignoselulosa dapat dikonversi melalui proses karbonisasi menjadi material kaya karbon yang karakteristiknya dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan kondisi proses pengolahan [2]. Material karbon berbasis biomassa banyak dikembangkan untuk berbagai aplikasi, termasuk adsorben, karena karakteristik permukaan dan struktur porinya dapat dimodifikasi melalui perlakuan termal maupun kimia [3]. Karakteristik arang yang dihasilkan tidak hanya ditentukan oleh bahan baku, tetapi juga oleh suhu karbonisasi, waktu pemanasan, serta kondisi aktivasi yang digunakan [4]. Perbedaan kondisi tersebut dapat menyebabkan perubahan pada rendemen, kadar air, kadar abu, morfologi permukaan, komposisi unsur, dan karakteristik pori material [5]. Oleh karena itu, pengkajian perubahan karakteristik material selama proses karbonisasi dan aktivasi diperlukan untuk memahami hubungan antara perlakuan yang diberikan dengan sifat permukaan arang yang dihasilkan.

Salah satu biomassa lokal yang berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku material karbon adalah tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.). Tanaman lontar banyak ditemukan di wilayah Nusa Tenggara Timur, sementara pemanfaatan bagian tempurungnya masih belum optimal. Penelitian M. Nitsae dkk. (2020) menunjukkan bahwa tempurung siwalan (*Borassus flabellifer* L.) dapat diolah melalui karbonisasi dan aktivasi KOH untuk menghasilkan arang aktif dengan karakteristik yang memenuhi beberapa parameter mutu arang aktif [6]. Penelitian lain pada tempurung lontar juga menunjukkan bahwa biomassa *B. flabellifer* dapat dikonversi menjadi karbon aktif dan dimanfaatkan sebagai media filter untuk pengolahan limbah cair tenun ikat [7] dan pengolahan limbah cair tahu [4]. Hasil penelitian tersebut memperkuat potensi tempurung lontar sebagai sumber material karbon, tetapi karakteristik arang yang dihasilkan tetap bergantung pada kondisi karbonisasi dan metode aktivasi yang diterapkan.

Karbonisasi merupakan tahap penting karena menyebabkan dekomposisi komponen organik dan pelepasan sebagian senyawa volatil sehingga terbentuk residu padat yang lebih kaya karbon [1]. Namun, arang hasil karbonisasi dapat memiliki struktur pori yang belum berkembang secara optimal dan masih mengandung komponen mineral yang berasal dari bahan baku [8]. Keberadaan komponen mineral dapat memengaruhi karakteristik permukaan dan tercermin melalui kadar abu serta komposisi unsur yang terdeteksi pada permukaan arang. Oleh sebab itu, karakterisasi sifat fisis dan komposisi unsur menjadi penting untuk memberikan informasi awal mengenai kondisi material setelah karbonisasi. Informasi tersebut selanjutnya diperlukan sebagai dasar untuk mengevaluasi perubahan yang terjadi ketika arang diberikan perlakuan aktivasi.

Aktivasi kimia merupakan salah satu metode yang digunakan untuk memodifikasi permukaan dan struktur pori material karbon. KOH banyak digunakan sebagai aktivator karena perlakuannya dapat menghasilkan perubahan struktur pori dan meningkatkan perkembangan mikropori pada berbagai jenis biomassa [9]. Penelitian Jedynek dan Charnas menunjukkan bahwa aktivasi KOH pada beberapa jenis *biochar* menghasilkan material dengan luas permukaan 672–912 m²/g dan struktur mikropori yang dominan [3]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa aktivasi KOH dapat menghasilkan perubahan morfologi permukaan yang lebih kasar dan berpori serta meningkatkan karakteristik permukaan dibandingkan *biochar* tanpa aktivasi [3]. Namun, besarnya perubahan tersebut tidak bersifat seragam karena dipengaruhi oleh jenis biomassa, rasio KOH terhadap bahan, suhu, dan waktu aktivasi [9]. Dengan demikian, keberhasilan aktivasi tidak dapat hanya diasumsikan berdasarkan penggunaan KOH, tetapi perlu dibuktikan melalui perbandingan karakteristik material sebelum dan sesudah aktivasi.

Perubahan karakteristik akibat aktivasi dapat dikaji melalui pendekatan morfologi dan komposisi permukaan. Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dapat memberikan gambaran mengenai perubahan bentuk permukaan, kekasaran, rongga, dan perkembangan pori, sedangkan *Energy Dispersive X-ray* (EDX) dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur yang terdeteksi pada area permukaan yang dianalisis [10]. Penelitian mengenai *biochar* teraktivasi KOH menunjukkan bahwa perubahan struktur permukaan dapat disertai perubahan komposisi dan kandungan unsur setelah aktivasi [9]. Selain itu, aktivasi KOH dapat menyebabkan berkurangnya komponen anorganik tertentu pada bahan karbon, sehingga karakterisasi kadar abu dan EDX dapat digunakan secara saling melengkapi untuk mengevaluasi perubahan tersebut [10]. Kombinasi karakterisasi sifat fisis, SEM, dan EDX dengan demikian dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai perubahan karakteristik arang akibat aktivasi KOH.

Meskipun penelitian mengenai material karbon berbasis *Borassus flabellifer* telah dilakukan, sebagian penelitian lebih menekankan pemanfaatan material hasil aktivasi untuk aplikasi tertentu, seperti adsorpsi atau penyimpanan energi [11]. Penelitian terhadap tempurung siwalan yang diaktivasi KOH juga telah dilakukan oleh

M. Nitsae dkk. [6], dengan fokus pada pembuatan arang aktif dan evaluasi karakteristiknya berdasarkan parameter mutu arang aktif. Berbeda dengan penelitian tersebut, penelitian ini memfokuskan kajian pada perbandingan karakteristik arang tempurung lontar sebelum dan sesudah aktivasi KOH melalui analisis sifat fisis, morfologi permukaan, dan komposisi unsur secara terpadu. Pendekatan perbandingan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik material yang terjadi akibat aktivasi KOH, sehingga dapat memberikan informasi yang lebih spesifik mengenai respons arang tempurung lontar terhadap perlakuan aktivasi. Dengan demikian, kajian yang secara khusus membandingkan arang tempurung lontar sebelum dan sesudah aktivasi KOH berdasarkan sifat fisis, morfologi permukaan, dan komposisi unsur secara terpadu masih terbatas. Kesenjangan tersebut penting dikaji karena perubahan sifat fisis dan karakteristik permukaan dapat memberikan informasi dasar mengenai respons material terhadap proses aktivasi sebelum dilakukan pengujian lebih lanjut terhadap kinerja adsorpsinya.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, karakterisasi kadar air dan kadar abu dapat digunakan untuk memberikan informasi mengenai sifat fisis dan kandungan komponen mineral, sedangkan SEM dan EDX memberikan informasi mengenai perubahan morfologi dan komposisi unsur pada permukaan arang. Pendekatan tersebut memungkinkan pengaruh aktivasi KOH terhadap karakteristik arang dikaji secara langsung melalui perbandingan sebelum dan sesudah perlakuan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan membandingkan sifat fisis, morfologi permukaan, dan komposisi unsur arang tempurung lontar sebelum dan sesudah aktivasi KOH. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai perubahan karakteristik material akibat aktivasi KOH serta menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut arang tempurung lontar sebagai material karbon yang berpotensi digunakan sebagai adsorben berbasis biomassa lokal.

METODE

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam pembuatan material adsorben meliputi gelas beaker, corong pisah, oven, ayakan mesh 12, lesung dan alu, neraca analitik, pH meter, serta desikator. Selain itu, digunakan pula kertas saring, tissue, dan aluminium foil sebagai bahan pendukung selama proses preparasi dan pengolahan material adsorben. Sementara bahan yang digunakan dalam pembuatan material adsorben terdiri atas tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.) sebagai bahan utama, kalium hidroksida (KOH) 0,1 M sebagai bahan aktivasi, serta aquades yang digunakan dalam proses pencucian dan preparasi material.

Persiapan Karbonisasi dan Aktivasi Tempurung Lontar

Penelitian diawali dengan proses pengumpulan bahan baku berupa tempurung buah lontar (*Borassus flabellifer* L.) dari lingkungan sekitar Pantai Oesapa Nusa Tenggara Timur. Tempurung lontar yang telah dikumpulkan kemudian dibersihkan dari kotoran dan debu, dicuci dengan air bersih, dan dijemur di bawah sinar matahari hingga kadar airnya menurun. Setelah kering, tempurung lontar dikarbonisasi dengan metode kiln drum modifikasi pada suhu 400°C selama 120 menit dalam kondisi terbatas oksigen hingga berubah menjadi arang namun tidak sampai menjadi abu, sehingga tetap mempertahankan struktur karbon yang diperlukan sebagai material adsorben. Arang yang dihasilkan selanjutnya digerus menggunakan lesung dan alu hingga menjadi granular yang homogen lalu diayak menggunakan ayakan mesh 12 untuk memperoleh ukuran karbon yang seragam [1]. Arang tersebut kemudian diaktivasi secara kimia dengan cara direndam dalam larutan kalium hidroksida 0,1 M selama 24 jam untuk meningkatkan luas permukaan dan porositas. Setelah proses aktivasi, arang dicuci dengan aquades hingga pH netral ($\text{pH} \approx 7$) dan dikeringkan kembali dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam [6].

Selanjutnya tahapan pengambilan data sifat fisis karbon meliputi pengujian kadar air dan kadar abu untuk mengidentifikasi apakah karbon yang dihasilkan berkualitas baik dan sesuai dengan standar mutu arang aktif berdasarkan SNI 06-3730-1995. Langkah-langkah pengujian yang dilakukan meliputi:

Kadar Air

Sebanyak 5 g arang tempurung lontar hasil karbonisasi dan hasil aktivasi basa, masing-masing ditimbang, kemudian ditempatkan ke dalam cawan porselin yang telah diketahui beratnya. Cawan berisi sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 3 jam, didinginkan dalam desikator, lalu ditimbang. Proses pengeringan dan penimbangan diulang hingga diperoleh berat sampel yang konstan [5]. Kadar air karbon sebelum dan sesudah aktivasi dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{W_{awal} - W_{akhir}}{W_{awal}} \times 100\% \quad (1)$$

W awal = berat sampel awal sebelum pengeringan (g)

W akhir = berat sampel setelah pengeringan hingga bobot konstan (g)

Kadar Abu

Sebanyak 5 g arang hasil karbonisasi dan arang aktif tempurung lontar hasil aktivasi basa, masing-masing ditimbang, kemudian ditempatkan ke dalam cawan porselin yang telah dikeringkan dalam oven dan diketahui bobot keringnya. Cawan berisi sampel dimasukkan ke dalam tanur, kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu 550°C dan dipertahankan selama 15 menit hingga seluruh bahan organik teroksidasi dan tersisa hanya abu anorganik. Setelah itu, cawan didinginkan dalam desikator lalu ditimbang. Proses pemanasan dan penimbangan diulang hingga diperoleh bobot yang konstan. Kadar abu karbon sebelum dan sesudah aktivasi dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$\text{Kadar Abu (\%)} = \frac{W(\text{cawan} + \text{abu}) - W \text{ cawan}}{W \text{ sampel}} \times 100\% \quad (2)$$

W cawan = bobot cawan kosong (g)

W cawan + abu = cawan cawan + abu setelah pengabuan (g)

W sampel = bobot sampel karbon awal (g)

Rendemen

Rendemen karbonisasi menunjukkan persentase massa arang yang diperoleh setelah proses karbonisasi terhadap massa awal tempurung lontar. Kemudian dilakukan perhitungan rendemen untuk karbon aktif hasil aktivasi menggunakan persamaan 3.

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{m_k}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

m_0 = massa awal tempurung lontar sebelum karbonisasi (g)

m_k = massa arang setelah karbonisasi (g).

Dalam pembuatan karbon aktif, kualitas produk perlu mengacu pada standar mutu agar diperoleh material adsorben yang baik. Standar yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini adalah SNI 06-3730-1995 tentang arang aktif teknis yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Standar Mutu Arang Aktif Teknis

No	Parameter	Satuan	Persyaratan SNI
1	Kadar Air	%	4,5
2	Kadar Abu	%	2,5
3	Rendemen	-	Tidak dipersyaratkan

Sumber: SNI 06-3730-1995.

Tabel 1. digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi kualitas karbon aktif tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.). Berdasarkan SNI, kadar air maksimum yang diperbolehkan adalah 4,5%. Karbon aktif dengan kadar air $\leq 4,5\%$ memenuhi persyaratan, sedangkan kadar air $> 4,5\%$ menunjukkan kualitas yang belum memenuhi standar. Kadar air yang rendah menunjukkan kandungan air yang lebih sedikit sehingga ruang pori karbon lebih tersedia untuk proses adsorpsi. Selain itu, kadar abu maksimum yang diperbolehkan adalah 2,5%. Karbon aktif dengan kadar abu $\leq 2,5\%$ memenuhi standar, sedangkan kadar abu $> 2,5\%$ tidak memenuhi persyaratan. Kadar abu yang rendah menunjukkan kandungan mineral anorganik yang lebih sedikit sehingga lebih mendukung ketersediaan permukaan karbon untuk adsorpsi. Sementara itu, rendemen tidak memiliki batas standar dalam SNI dan digunakan untuk mengetahui efisiensi proses karbonisasi berdasarkan perbandingan massa karbon yang dihasilkan terhadap massa awal bahan baku.

Analisis SEM-EDX

Arang hasil karbonisasi sebelum dan sesudah aktivasi KOH dianalisis untuk mengetahui morfologi permukaan dan komposisi unsur menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX). Analisis SEM digunakan untuk mengamati karakteristik morfologi permukaan arang, seperti bentuk permukaan, rongga, dan perubahan struktur permukaan, sedangkan EDX digunakan untuk mengidentifikasi komposisi unsur yang terdeteksi pada permukaan sampel. Analisis dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) Universitas

Gadjah Mada (UGM) menggunakan instrumen SEM Tipe JEOL JXA-iSP100 yang dilengkapi detektor EDX tipe JEOL JED - 2300. Pengamatan SEM dilakukan pada perbesaran 200x – 500x dengan tegangan percepatan sebesar 30 kV pada kondisi vakum. Analisis EDX dilakukan pada area permukaan sampel yang sama/representatif dengan area pengamatan SEM untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terdapat pada permukaan arang. Data SEM-EDX dari arang sebelum dan sesudah aktivasi KOH kemudian dibandingkan untuk menginterpretasi perubahan morfologi dan komposisi unsur permukaan akibat proses aktivasi KOH.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisik Arang Sebelum dan Sesudah Karbonisasi

Karakterisasi fisis arang tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.) dilakukan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik material akibat proses karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan KOH. Gambar 1a menunjukkan proses pembuatan arang tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.) melalui proses karbonisasi menggunakan kiln drum modifikasi pada suhu 400 °C selama 120 menit menghasilkan material berwarna hitam dengan struktur yang lebih rapuh dibandingkan bahan awal (Gambar 1(b)). Hal ini menunjukkan terjadinya dekomposisi komponen volatil selama pemanasan. Arang hasil karbonisasi selanjutnya digerus (Gambar 1(c)) dan diayak menggunakan ayakan mesh 12 untuk memperoleh ukuran partikel yang lebih seragam sehingga proses aktivasi dapat berlangsung lebih homogen [5].



Gambar 1. (a) Karbonisasi, (b) Arang Hasil Karbonisasi, (c) Penggerusan Arang, (d) Aktivasi

Arang hasil karbonisasi diaktivasi dengan KOH 0,1 M selama 24 jam (Gambar 1(d)). Aktivasi kimia ini bertujuan memodifikasi struktur permukaan arang, khususnya melalui pembentukan atau pengembangan pori, sehingga memengaruhi karakteristik fisik dan kimia material. Perubahan karakteristik tersebut selanjutnya dianalisis berdasarkan hasil pengujian rendemen karbonisasi, rendemen aktivasi, kadar air, dan kadar abu sebelum dan setelah aktivasi KOH. Hasil pengujian karakteristik fisis sebelum dan sesudah aktivasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Fisis Arang Tempurung Lontar Sebelum dan Sesudah Aktivasi

Parameter	Arang Hasil Karbonisasi	Arang setelah aktivasi	Standar Persyaratan
Rendemen karbonisasi	66%	-	-
Rendemen aktivasi	-	51,34%	-
Kadar air	5,61%	3,75%	4,5
Kadar abu	6,43 %	2,59 %	2,5

Sumber: Peneliti

Analisis Rendemen

Berdasarkan Tabel 2, proses karbonisasi tempurung lontar pada suhu 400 °C selama 120 menit menghasilkan rendemen arang sebesar **66,00%**. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sekitar dua pertiga massa awal tempurung lontar masih diperoleh sebagai residu padat setelah karbonisasi, sedangkan sebagian massa lainnya hilang selama proses termal dalam bentuk air dan senyawa volatil. Kehilangan massa tersebut berkaitan dengan dekomposisi komponen penyusun biomassa, terutama hemiselulosa, selulosa, dan lignin, yang mengalami degradasi termal pada rentang suhu yang berbeda [6].

Pada tahap karbonisasi, komponen biomassa yang relatif mudah terdekomposisi mengalami pelepasan senyawa volatil, sedangkan fraksi karbon yang lebih stabil tertinggal sebagai residu padat. Proses tersebut menyebabkan penurunan massa bahan sekaligus mengubah karakteristik fisik dan struktur permukaan arang [2], [8]. Nilai

rendemen yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dibandingkan dengan penelitian Chaitammachok *dkk.* (2021) yang menggunakan tempurung *Borassus flabellifer* sebagai bahan baku karbon dan melaporkan rendemen arang sebesar 27,58–28,52% setelah karbonisasi pada suhu 400 °C selama 1 jam [12]. Perbedaan rendemen tersebut menunjukkan bahwa kondisi karbonisasi dan karakteristik bahan baku dapat memengaruhi jumlah residu padat yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, waktu karbonisasi yang lebih lama, yaitu 120 menit, tidak menghasilkan rendemen yang lebih rendah dibandingkan penelitian tersebut, yang dapat berkaitan dengan perbedaan kondisi proses, karakteristik bahan baku, serta sistem karbonisasi yang digunakan. Dengan demikian, rendemen sebesar 66,00% menunjukkan bahwa proses karbonisasi pada kondisi yang digunakan masih menghasilkan fraksi padat dalam jumlah relatif besar. Namun, rendemen tidak dapat digunakan secara tunggal untuk menentukan kualitas karbon aktif karena karakteristik akhir material juga dipengaruhi oleh kadar air, kadar abu, struktur pori, morfologi permukaan, dan komposisi unsur [1].

Setelah karbonisasi, arang diaktivasi secara kimia menggunakan KOH selama 24 jam dan menghasilkan rendemen aktivasi sebesar 51,34%. Penurunan massa setelah aktivasi menunjukkan bahwa sebagian material mengalami perubahan dan/atau terlepas selama proses aktivasi dan tahap pencucian. Aktivator KOH dapat berinteraksi dengan struktur karbon dan menyebabkan pengurangan sebagian komponen karbon maupun nonkarbon, sekaligus mendorong perkembangan struktur pori pada material [1]. Selain itu, proses pencucian setelah aktivasi dapat menyebabkan sebagian senyawa atau residu yang terbentuk selama aktivasi terlarut dan terpisah dari material. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa aktivasi tidak hanya memengaruhi massa arang, tetapi juga dapat mengubah karakteristik permukaan dan struktur porinya.

Rendemen aktivasi yang lebih rendah dibandingkan rendemen karbonisasi merupakan konsekuensi yang dapat terjadi pada proses aktivasi kimia. Selama aktivasi, interaksi antara KOH dan material karbon dapat menyebabkan sebagian komponen mengalami pengikisan atau perubahan kimia, sedangkan komponen yang mudah terlarut dapat terlepas pada tahap pencucian [13]. Hasil penelitian Chaitammachok *dkk.* (2021) pada tempurung *B. flabellifer* menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan KOH menghasilkan rendemen karbon aktif sebesar 16,88–21,27%, bergantung pada rasio KOH terhadap bahan dan kondisi aktivasi [14]. Penelitian tersebut menggunakan rasio KOH:bahan yang lebih tinggi dan suhu aktivasi 900 °C, sehingga kondisi aktivasi yang digunakan lebih intensif dibandingkan penelitian ini. Perbedaan rendemen tersebut menunjukkan bahwa kehilangan massa selama aktivasi KOH sangat dipengaruhi oleh kondisi aktivasi, terutama rasio aktivator dan suhu, selain karakteristik bahan baku. Oleh karena itu, penurunan rendemen dari 66,00% menjadi 51,34% pada penelitian ini tidak secara langsung menunjukkan penurunan kualitas material, tetapi menunjukkan adanya perubahan dan kehilangan sebagian massa selama proses aktivasi dan pencucian. Penilaian terhadap pengaruh aktivasi selanjutnya perlu dikaitkan dengan perubahan kadar air, kadar abu, morfologi permukaan, dan komposisi unsur. Pendekatan tersebut diperlukan karena perubahan rendemen saja belum dapat menjelaskan secara menyeluruh perubahan karakteristik arang setelah aktivasi [1].

Analisis Kadar Air

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar air arang mengalami penurunan dari 5,61% sebelum aktivasi menjadi 3,75% setelah aktivasi KOH, sehingga terjadi penurunan sebesar 1,86%. Penurunan tersebut dapat berkaitan dengan tahapan perlakuan setelah aktivasi, terutama proses pencucian menggunakan aquades hingga pH mendekati netral dan pengeringan pada suhu 105 °C selama 24 jam. Pengeringan menyebabkan air bebas dan air yang terikat secara lemah pada permukaan arang terlepas, sehingga kandungan air dalam material menjadi lebih rendah. Selain itu, aktivasi KOH dapat menyebabkan perubahan karakteristik permukaan dan struktur pori arang yang selanjutnya dapat memengaruhi interaksi permukaan karbon dengan molekul air [10].

Kadar air sebesar 5,61% pada arang hasil karbonisasi masih lebih tinggi dibandingkan nilai acuan maksimum 4,5% yang digunakan dalam penelitian ini. Setelah aktivasi, kadar air turun menjadi 3,75%, sehingga nilainya telah berada di bawah batas tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi proses aktivasi, pencucian, dan pengeringan berkontribusi terhadap penurunan kadar air arang. Penurunan kadar air setelah aktivasi menunjukkan adanya perubahan pada salah satu sifat fisis material dibandingkan dengan arang hasil karbonisasi. Dalam konteks mutu arang aktif, kadar air merupakan salah satu parameter yang perlu diperhatikan karena keberadaan air dapat memengaruhi kondisi permukaan dan ruang pori material [6].

Kadar air yang lebih rendah menunjukkan bahwa jumlah air yang tersisa dalam material setelah proses pengeringan lebih sedikit. Kondisi tersebut secara teoritis dapat mengurangi keberadaan air yang berpotensi menempati sebagian permukaan atau ruang pori dan berinteraksi dengan molekul adsorbat. Namun, Penurunan kadar air tidak dapat secara langsung merepresentasikan peningkatan kinerja adsorpsi material, karena kemampuan adsorpsi ditentukan oleh karakteristik permukaan dan struktur pori material. Karena kinerja adsorpsi dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain luas permukaan spesifik, struktur dan distribusi ukuran pori, serta karakteristik

kimia permukaan[1], [6]. Oleh karena itu, penurunan kadar air dari 5,61% menjadi 3,75% menunjukkan adanya perubahan dan perbaikan pada salah satu sifat fisis arang setelah aktivasi serta telah memenuhi nilai acuan yang digunakan, tetapi belum dapat dijadikan sebagai dasar dalam peningkatan kemampuan adsorpsi. Potensi pemanfaatan material sebagai adsorben perlu didukung oleh karakterisasi morfologi dan komposisi permukaan serta, untuk memastikan kinerja adsorpsinya, melalui pengujian adsorpsi secara langsung.

Analisis Kadar Abu

Kadar abu merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi karakteristik arang karena menunjukkan jumlah residu anorganik yang tersisa setelah komponen karbon dan bahan organik mengalami pembakaran sempurna. Berdasarkan hasil pengujian, kadar abu mengalami penurunan dari 6,43% pada arang hasil karbonisasi menjadi 2,59% setelah aktivasi KOH. Penurunan tersebut sebesar 3,84%, atau sekitar 59,72% relatif terhadap kadar abu awal. Perubahan kadar abu setelah aktivasi menunjukkan bahwa perlakuan kimia dan tahapan pencucian dapat memengaruhi kandungan komponen anorganik yang terdapat pada arang [6]

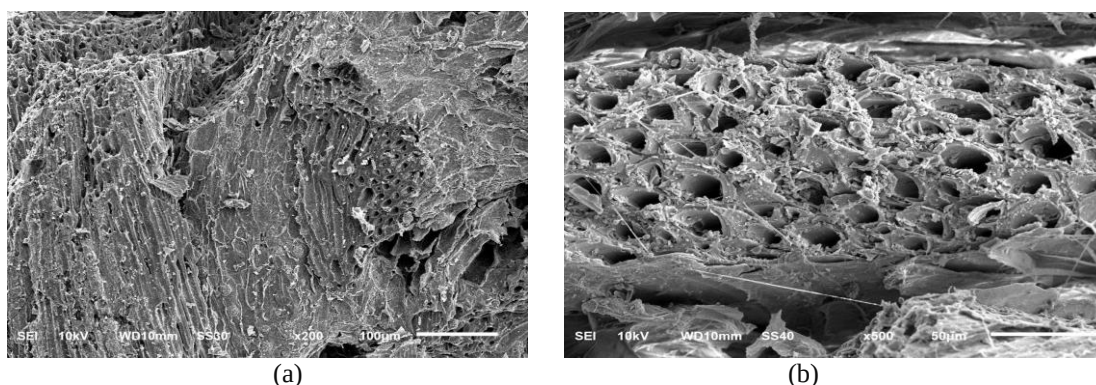
Penurunan kadar abu menunjukkan bahwa proses aktivasi yang dilanjutkan dengan pencucian menggunakan aquades memberikan pengaruh terhadap berkurangnya sebagian komponen anorganik dalam arang. Mineral atau senyawa anorganik yang terdapat pada permukaan maupun di dalam pori dapat terlepas selama proses pencucian, terutama setelah mengalami perubahan selama aktivasi KOH [13]. Penggunaan KOH juga dapat memengaruhi kondisi permukaan dan struktur pori arang sehingga sebagian komponen anorganik menjadi lebih mudah terpisahkan pada tahap pencucian [1]. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa aktivasi KOH yang disertai dengan proses pencucian tidak hanya dapat menyebabkan perubahan pada struktur permukaan karbon, tetapi juga dapat memengaruhi keberadaan komponen anorganik dalam material. Penurunan kadar abu dari 6,43% menjadi 2,59% dengan demikian menunjukkan berkurangnya fraksi anorganik yang terdeteksi pada material setelah tahapan aktivasi dan pencucian [6].

Berdasarkan nilai acuan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu kadar abu maksimum 2,5%, kadar abu arang hasil karbonisasi sebesar 6,43% belum memenuhi nilai tersebut. Setelah aktivasi, kadar abu turun menjadi 2,59%, tetapi masih 0,09% di atas batas 2,5%. Dengan demikian, berdasarkan parameter kadar abu, arang hasil aktivasi belum sepenuhnya memenuhi nilai acuan SNI yang digunakan, meskipun telah mengalami penurunan kadar abu yang cukup besar dibandingkan dengan arang sebelum aktivasi. Hasil ini menunjukkan bahwa aktivasi KOH pada kondisi yang digunakan berkontribusi terhadap penurunan kandungan abu, tetapi belum menghasilkan kadar abu di bawah nilai batas yang ditetapkan. Masih tersisanya kadar abu menunjukkan bahwa sebagian komponen mineral belum sepenuhnya terpisahkan selama proses aktivasi dan pencucian. Keberadaan unsur anorganik tersebut selanjutnya dapat diperiksa melalui analisis EDX untuk mengetahui jenis unsur yang masih terdeteksi pada permukaan arang.

Karakteristik Morfologi Permukaan Arang Sebelum dan Sesudah Aktivasi

Karakteristik morfologi permukaan arang tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.) dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati perubahan struktur permukaan akibat proses karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan KOH. Analisis SEM dapat menunjukkan bentuk permukaan, kekasaran, rongga, serta perkembangan pori pada material karbon. Hasil citra SEM arang tempurung lontar sebelum dan sesudah aktivasi ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2(a), permukaan arang hasil karbonisasi menunjukkan struktur yang relatif padat dan terdapat pori yang cenderung tidak beraturan. Struktur tersebut terbentuk akibat terjadinya dekomposisi komponen lignoselulosa selama proses karbonisasi pada suhu 400°C. Pemanasan menyebabkan sebagian komponen volatil terlepas dari matriks biomassa sehingga meninggalkan rongga pada struktur karbon. Namun, pada tahap karbonisasi, struktur pori yang terbentuk masih dapat tertutup oleh residu karbon, tar, maupun senyawa volatil yang belum sepenuhnya terdekomposisi[4].



Gambar 2. Morfologi Permukaan Arang Tempurung Lontar Sebelum dan Sesudah Aktivasi: (a) Sebelum Aktivasi pada Perbesaran 200x dan (b) Setelah Aktivasi KOH pada Perbesaran 500x

Setelah proses aktivasi KOH, morfologi permukaan mengalami perubahan seperti ditunjukkan pada Gambar 2(b). Aktivasi kimia dilakukan untuk memodifikasi struktur permukaan arang melalui interaksi antara KOH dan matriks karbon, sehingga dapat mendorong pembentukan dan pengembangan pori serta mengubah karakteristik fisik dan kimia material. KOH merupakan salah satu aktivator basa yang banyak digunakan dalam pembuatan karbon aktif karena mampu bereaksi dengan gugus yang mengandung oksigen pada material karbon dan menyebabkan terbentuknya rongga atau cacat pada struktur karbon. Pada kondisi aktivasi yang sesuai, reaksi tersebut selanjutnya dapat meningkatkan perkembangan mikropori dan luas permukaan material.

Penggunaan KOH pada konsentrasi 0,1 M dalam penelitian ini tergolong relatif encer, tetapi tetap memberikan lingkungan basa yang cukup untuk berinteraksi dengan komponen organik dan sebagian komponen anorganik pada arang. Perlakuan basa dapat membantu melepaskan sebagian mineral yang terdapat pada biomassa, termasuk Ca dan Mg, meskipun tingkat penghilangannya bergantung pada bentuk kimia mineral dan kondisi perlakuan. Studi mengenai perlakuan alkali pada biomassa menunjukkan adanya penurunan kandungan Ca dan Mg setelah perlakuan dalam medium basa, sedangkan penghilangan mineral multivalen seperti Ca dan Mg umumnya lebih terbatas dibandingkan mineral yang lebih mudah larut [14]. Dengan demikian, penggunaan KOH 0,1 M dapat dipandang sebagai kondisi aktivasi yang relatif ringan untuk membantu modifikasi matriks karbon sekaligus memungkinkan pelepasan sebagian komponen mineral tanpa menggunakan konsentrasi basa yang terlalu tinggi.

Perubahan karakteristik material akibat proses aktivasi selanjutnya dievaluasi berdasarkan rendemen karbonisasi, rendemen aktivasi, kadar air, dan kadar abu sebelum dan sesudah aktivasi KOH. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengetahui perubahan massa dan komposisi material akibat proses karbonisasi dan aktivasi. Hasil pengujian karakteristik fisik arang sebelum dan sesudah aktivasi disajikan pada Tabel 2.

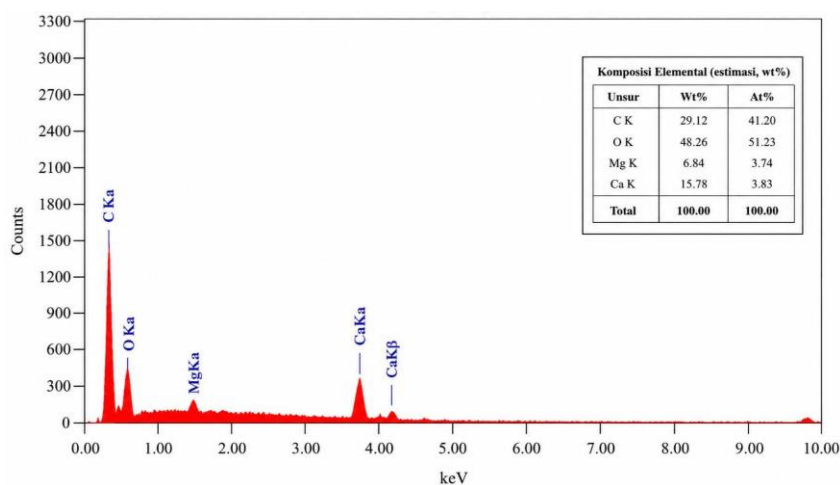
Komposisi Permukaan Berdasarkan Analisis EDX

Analisis *Energy Dispersive X-ray* (EDX) dalam penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi unsur pada permukaan arang tempurung lontar setelah proses karbonisasi dan aktivasi KOH. Analisis ini dilakukan secara bersamaan dengan SEM sehingga informasi mengenai morfologi permukaan dapat dikaitkan dengan komposisi unsur penyusunnya. Hasil analisis EDX disajikan dalam bentuk spektrum dan persentase massa (*weight percent*, wt%) masing-masing unsur pada Gambar 3 dan Gambar 4 serta Tabel 3 berikut;

Unsur	Sebelum aktivasi (wt%)	Setelah aktivasi KOH (wt%)	Perubahan
C	29,12	30,41	+1,29
O	48,26	59,34	+11,08
Mg	6,84	1,40	-5,44
Ca	15,48	3,30	-12,18
K	Tidak terdeteksi	5,56	+5,56

Hasil analisis menunjukkan bahwa arang sebelum aktivasi mengandung C sebesar 29,12 wt%, O sebesar 48,26 wt%, Mg sebesar 6,84 wt%, dan Ca sebesar 15,48 wt%. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa permukaan arang masih mengandung unsur karbon dan oksigen serta komponen mineral berupa Mg dan Ca. Kandungan Ca dan Mg yang cukup tinggi menunjukkan bahwa sebagian komponen mineral dari tempurung lontar masih tertinggal setelah

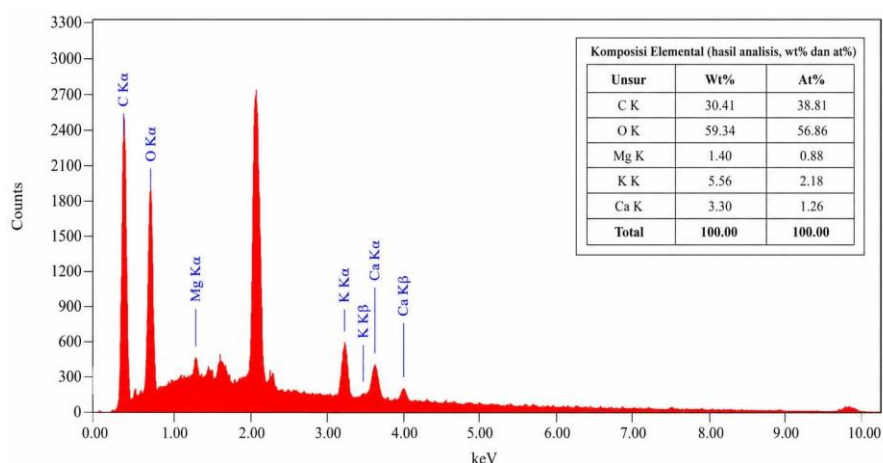
karbonisasi. Kondisi tersebut sejalan dengan kadar abu sebelum aktivasi sebesar 6,43%, yang menunjukkan bahwa arang hasil karbonisasi masih mengandung komponen anorganik dalam jumlah tertentu.



Gambar 3. Spektrum EDX Arang Tempurung Lontar Sebelum Aktivasi

Setelah aktivasi KOH, terjadi perubahan komposisi unsur pada permukaan arang. Kandungan C meningkat dari 29,12 wt% menjadi 30,41 wt%, sedangkan O meningkat dari 48,26 wt% menjadi 59,34 wt%. Sebaliknya, kandungan Mg menurun dari 6,84 wt% menjadi 1,40 wt% dan Ca menurun dari 15,48 wt% menjadi 3,30 wt%. Penurunan Ca dan Mg menunjukkan bahwa proses aktivasi yang dilanjutkan dengan pencucian menyebabkan sebagian komponen mineral terlepas dari permukaan arang. Ca mengalami penurunan sekitar 78,68%, sedangkan Mg menurun sekitar 79,53% dibandingkan kondisi sebelum aktivasi. Perubahan tersebut sejalan dengan penurunan kadar abu dari 6,43% menjadi 2,59%, sehingga hasil EDX memperkuat bahwa aktivasi dan pencucian berperan dalam mengurangi komponen mineral yang masih terdapat pada arang setelah karbonisasi.

Selain penurunan Ca dan Mg, hasil EDX setelah aktivasi menunjukkan munculnya unsur K sebesar 5,56 wt%, sedangkan unsur tersebut tidak terdeteksi sebelum aktivasi. Keberadaan K berkaitan dengan penggunaan KOH sebagai aktivator. Meskipun arang telah dicuci hingga pH mendekati netral, sebagian unsur K masih terdeteksi pada permukaan. Hasil ini menunjukkan bahwa proses aktivasi menyebabkan perubahan komposisi unsur pada permukaan arang. Namun, keberadaan K berdasarkan EDX tidak dapat digunakan untuk menentukan bentuk senyawa K yang terdapat pada permukaan karena EDX hanya memberikan informasi mengenai unsur yang terdeteksi.



Gambar 4. Spektrum EDX Arang Tempurung Lontar Setelah Aktivasi KOH

Peningkatan kandungan O dari 48,26 wt% menjadi 59,34 wt% menunjukkan bahwa proporsi oksigen yang terdeteksi pada permukaan arang meningkat setelah aktivasi. Perubahan tersebut dapat berkaitan dengan perubahan

karakter permukaan selama perlakuan KOH. Akan tetapi, hasil EDX tidak dapat digunakan untuk menentukan jenis gugus fungsi yang mengandung oksigen. Oleh karena itu, keberadaan gugus seperti hidroksil, karbonil, atau karboksil perlu dikonfirmasi melalui analisis FTIR. Dalam penelitian ini, peningkatan kandungan O berdasarkan EDX lebih tepat digunakan sebagai indikasi adanya perubahan komposisi unsur pada permukaan setelah aktivasi.

Perubahan komposisi unsur tersebut selanjutnya dapat dikaitkan dengan hasil pengamatan morfologi menggunakan SEM. Permukaan arang setelah aktivasi terlihat lebih terbuka dibandingkan sebelum aktivasi, sementara kandungan Ca dan Mg mengalami penurunan yang cukup besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivasi dan pencucian tidak hanya mengubah komposisi unsur, tetapi juga memengaruhi kondisi permukaan arang. Pelepasan sebagian komponen mineral dan perubahan pada struktur karbon selama aktivasi dapat menyebabkan bagian permukaan yang sebelumnya tertutup menjadi lebih terbuka. Perubahan tersebut mendukung hasil pengamatan SEM, tetapi belum dapat digunakan untuk menentukan peningkatan luas permukaan secara kuantitatif.

Secara keseluruhan, hasil EDX menunjukkan bahwa aktivasi KOH menyebabkan perubahan komposisi permukaan arang tempurung lontar yang ditandai dengan penurunan Ca dan Mg, peningkatan kandungan O, serta munculnya K setelah aktivasi. Perubahan tersebut sejalan dengan penurunan kadar abu dan perubahan morfologi permukaan yang telah diperoleh sebelumnya. Dengan demikian, hasil karakterisasi kadar abu, SEM, dan EDX secara bersama-sama menunjukkan bahwa proses aktivasi KOH telah mengubah karakteristik permukaan arang, terutama melalui pengurangan komponen mineral dan perubahan struktur permukaan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, karbonisasi tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.) pada suhu 400 °C selama 120 menit menghasilkan rendemen sebesar 66,00%. Aktivasi menggunakan KOH 0,1 M menyebabkan perubahan sifat fisis yang ditunjukkan oleh penurunan kadar air dari 5,61% menjadi 3,75% dan kadar abu dari 6,43% menjadi 2,59%. Pengamatan SEM menunjukkan bahwa permukaan arang setelah aktivasi menjadi lebih terbuka dan berongga dibandingkan sebelum aktivasi. Analisis EDX menunjukkan penurunan kandungan Ca dari 15,48 wt% menjadi 3,30 wt% dan Mg dari 6,84 wt% menjadi 1,40 wt%, disertai munculnya unsur K sebesar 5,56 wt% setelah aktivasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aktivasi KOH menyebabkan perubahan pada sifat fisis, morfologi, dan komposisi unsur permukaan arang tempurung lontar. Karakteristik yang diperoleh menunjukkan bahwa arang hasil aktivasi KOH berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai material karbon untuk aplikasi adsorben berbasis biomassa lokal. Namun, kemampuan adsorpsi dan karakteristik pori belum ditentukan secara kuantitatif dalam penelitian ini, sehingga penelitian selanjutnya perlu mencakup analisis luas permukaan spesifik dan karakteristik pori menggunakan metode BET serta pengujian kinerja adsorpsi secara langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Jedynek and B. Charnas, "Adsorption properties of biochars obtained by KOH activation," *Adsorption*, vol. 30, no. 2, pp. 167–183, 2024, doi: 10.1007/s10450-023-00399-7.
- [2] S. Saha, D. Potphode, and C. S. Sharma, "Borassus flabellifer Fruit Flesh Derived Hierarchical Porous Partly Graphitic Carbon as a Sustainable Electrode for Supercapacitors," *Energy and Fuels*, vol. 36, no. 1, pp. 638–654, 2022, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c03235.
- [3] Q. Ge *et al.*, "Removal of methylene blue by porous biochar obtained by KOH activation from bamboo biochar," *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s40643-023-00671-2.
- [4] M. Da Costa and L. Lewa Leko, "Pemanfaatan Tempurung Lontar Dan Zeolit Alam Sebagai Media Vertical Roughing Filter Pada Pengolahan Limbah Cair Tahu," *J. Tek. Lingkung.*, vol. 10, no. 2, pp. 100–109, 2025, [Online].
- [5] D. S. G. D. Senewirathna, S. Thuraisingam, S. Prabagar, and J. Prabagar, "Fluoride removal in drinking water using activated carbon prepared from palmyrah (*Borassus flabellifer*) nut shells," *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 5, no. December 2021, p. 100304, 2022, doi: 10.1016/j.crgsc.2022.100304.
- [6] M. Nitsae, L. A. Lano, and M. E. Ledo, "Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Siwalan (*Borassus flabellifer* L.) yang Diaktivasi dengan Kalium Hidroksida (KOH)," *Biota J. Ilm. Ilmu-Ilmu Hayati*, vol. 5, no. 1, pp. 8–15, 2020, doi: 10.24002/biota.v5i1.2948.
- [7] L. Kadang, R. I. Lerrick, and M. A. Rika, "Pemanfaatan Arang Bunga Lontar (*Borassus Flabellifer* Linn.) Sebagai Bioadsorben Pada Limbah Tenun Ikat," *Chem. Notes*, vol. 6, no. 1, pp. 13–23, 2025, doi: 10.35508/cn.v6i1.15476.
- [8] N. Sumangala Devi and S. Vivekanandhan, "Palmyra (*Borassus flabellifer*) fruit fiber-derived activated biocarbon for supercapacitor applications: A comparative study on the effects of activating agents," *Next Energy*, vol. 12, no. May, p. 100727, 2026, doi: 10.1016/j.nxener.2026.100727.
- [9] L. P. Lingamdinne *et al.*, "Insights into kinetics, thermodynamics, and mechanisms of chemically activated

- sunflower stem biochar for removal of phenol and bisphenol-A from wastewater,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-54907-y.
- [10] J. Zhang *et al.*, “Prediction of CO₂ adsorption of biochar under KOH activation via machine learning,” *Carbon Capture Sci. Technol.*, vol. 13, no. August, p. 100309, 2024, doi: 10.1016/j.ccst.2024.100309.
- [11] Z. S. Iro, C. Subramani, J. Rajendran, and A. K. Sundramoorthy, “Promising nature-based activated carbon derived from flowers of *Borassus flabellifer* for supercapacitor applications,” *Carbon Lett.*, vol. 31, no. 6, pp. 1145–1153, 2021, doi: 10.1007/s42823-021-00237-2.
- [12] C. Chaitammachok, J. Taweekun, K. Maliwan, and T. Theppaya, “A study on activated carbon from *Borassus flabellifer* shell by chemical activation with potassium hydroxide for supercapacitor,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1163, no. 1, p. 012024, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1163/1/012024.
- [13] C. Goel, S. Mohan, P. Dinesha, and M. A. Rosen, “CO₂ adsorption by KOH-activated hydrochar derived from banana peel waste,” *Chem. Pap.*, vol. 78, no. 6, pp. 3845–3856, 2024, doi: 10.1007/s11696-024-03355-z.
- [14] A. A. Awoyale, D. Lokhat, and P. Okete, “Investigation of the effects of pretreatment on the elemental composition of ash derived from selected Nigerian lignocellulosic biomass,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-00672-1.