

Pengaruh Delignifikasi Pada Karakteristik Karbon Aktif dan Biosorben dari Limbah Kulit Pisang Kepok

Effect of Delignification on the Characteristics of Activated Carbon and Biosorbent Derived from Kepok Banana Peel Waste

Ariany Zulkania*, Aliya Nurhasanah, Dwita Cahaya Pratiwi

Universitas Islam Indonesia, Jalan Kaliurang KM 14.5, Sleman, 55584, Indonesia

Artikel histori :

Diterima 6 Februari 2024
Diterima dalam revisi 22 April 2024
Diterima 23 April 2024
Online 6 Mei 2024

ABSTRAK: Jumlah kandungan selulosa dalam bahan alam berupa biomassa menunjukkan potensinya menjadi adsorben berdasarkan karbon yang dapat dihasilkan. Salah satu biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai adsorben adalah limbah kulit pisang kepok yang ketersediaannya banyak dan mengandung selulosa sebanyak 18,71%. Penelitian dilakukan dengan variasi perlakuan delignifikasi dan tanpa delignifikasi pada kulit pisang kepok untuk menjadi biosorben dan karbon aktif. Semua jenis adsorben kemudian diaktivasi menggunakan aktivator H₂SO₄. Hasil analisis karakteristik SEM – EDX, FTIR, dan BET menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan delignifikasi dan karbonasi (sampel A) dapat meningkatkan kadar karbon yang terkandung dalam sampel adsorben. Dari hasil EDX, sampel A terindikasi mengandung unsur karbon tertinggi yaitu 78,65% berat dan diperkuat dengan hasil analisis FTIR dimana sampel A memiliki rentang *peak* ikatan C=C dan C-H lebih luas (pertanda selulosa yang sudah terpisah terkarbonasi dengan baik sehingga menghasilkan unsur karbon). Selain itu, kombinasi perlakuan proses delignifikasi dan karbonasi juga meningkatkan luas permukaan pori keseluruhannya dibandingkan dengan perlakuan lainnya, yaitu sebesar 83,381 m²/g. Dari penelitian ini tampak bahwa *pretreatment* proses delignifikasi sebelum karbonasi berpotensi meningkatkan karakteristik adsorben dari limbah kulit pisang kepok dengan peningkatan kadar karbon terkandung dan luas permukaan.

Kata Kunci: adsorben; delignifikasi; karbonasi; kulit pisang kepok; selulosa

ABSTRACT: The amount of cellulose content in natural materials in the form of biomass shows its potential to be an adsorbent based on the carbon that can be produced. One of the biomasses that can be utilized as an adsorbent is the waste of kepok banana peel, which is widely available and contains as much as 18.71% cellulose. The research was conducted with variations of delignification treatment and without delignification on kepok banana peel to become biosorbent and activated carbon. All types of adsorbents were then activated using the H₂SO₄ activator. The results of SEM - EDX, FTIR, and BET characteristics analysis showed that the combination of delignification and carbonation treatment (sample A) could increase the carbon content in the adsorbent samples. From the EDX results, sample A indicated that it contained the highest carbon content of 78.65% by weight and was reinforced by the FTIR analysis results where sample A had a more comprehensive range of C=C and C-H bond *peaks* (a sign that the separated cellulose was well carbonated to produce carbon). In addition, the combination of delignification and carbonation process also increased the overall pore surface area compared to other treatments, which amounted to 83.381 m²/g. From this study, the pretreatment process of delignification before carbonation can potentially improve the adsorbent characteristics of kepok banana peel waste by increasing the carbon content and surface area.

Keywords: adsorbent; carbonation; cellulose; delignification; kepok banana peels

* Corresponding Author: +6282135708225
Email: ariany.zulkania@uii.ac.id

1. Pendahuluan

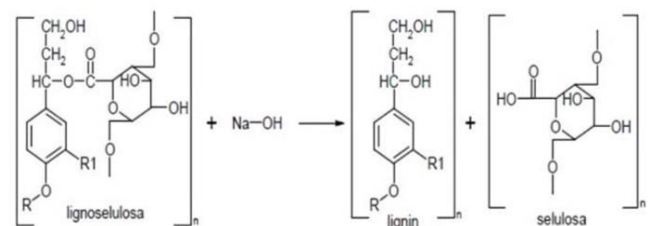
Data Badan Pusat Statistik Nasional mengenai produksi pisang di Indonesia menunjukkan jika terdapat peningkatan produksi pisang sebesar 16% sejak 2016 hingga 2020. Peningkatan konsumsi pisang di Indonesia menyebabkan meningkat juga limbah kulit pisang termasuk kulit pisang kepok. Di lain sisi, beberapa peneliti berhasil melakukan kajian terhadap limbah kulit pisang ini yang menunjukkan hasil yang positif. Ahmed *et al.* (2024) dalam kajiannya menunjukkan bahwa limbah pertanian, di mana salah satunya adalah kulit pisang, berpotensi sebagai bio-adsorben untuk penghilangan logam berat dari air limbah industri. Beberapa studi (Deeth, 2017; Mohammed & Chong, 2014) menunjukkan bahwa kulit pisang dapat mereduksi kandungan biologis pada limbah cair kelapa sawit sehingga memiliki kualitas yang sesuai dengan standar pembuangan limbah cair kelapa sawit. Dalam kajian lain, bio-adsorben dari limbah kulit pisang mampu secara efektif menghilangkan zat warna kationik dan anionik secara simultan.

Ciri karbon aktif yang baik ialah memiliki diameter pori yang kecil, ketahanan abrasi yang tinggi, dan luas permukaan yang cukup besar untuk digunakan dalam proses adsorpsi (Fadlilah *et al.*, 2023). Selain itu, semakin banyak kadar karbon dalam arang aktif, semakin baik pula suatu adsorben (Septiani *et al.*, 2023). Metode adsorpsi banyak digunakan untuk mengurangi kadar logam berat, dimana material yang digunakan juga berpengaruh terhadap kinerja adsorpsi (Himawana *et al.*, 2022). Adapun metode lain yang dapat digunakan untuk meminimalisir kandungan logam berat seperti filtrasi, oksidasi kimia, sedimentasi, presipitasi dan koagulasi. Tetapi penggunaan metode tersebut tidak cukup efektif dalam menjerap logam berat bahkan cenderung mengeluarkan biaya perawatan yang lebih banyak (Munira *et al.*, 2022).

Pengembangan adsorben berasal dari polimer alam sedang marak dilakukan karena relatif lebih murah dibandingkan adsorben sintetik kimia (Anggorowati & Lestari, 2022). Jumlah kandungan selulosa dalam bahan alam dapat menunjukkan salah satu potensinya menjadi adsorben berdasarkan karbon yang dapat dihasilkan. Salah satu bahan alam berupa biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai adsorben adalah kulit pisang kepok yang mengandung 18,71% selulosa. Selain itu, adsorben yang berasal dari kulit pisang kepok juga memiliki potensi sebagai adsorben mikropolutan (Al-sareji *et al.*, 2024; Jubilate *et al.*, 2016; Koni *et al.*, 2013). Peneliti lain (Pari, 2011) juga menyatakan bahwa kondisi adsorpsi yang baik dapat dilihat dari kadar kandungan selulosa dan terbentuknya adsorben saat proses karbonasi. Di lain sisi, selulosa dalam biomassa umumnya berbentuk sebagai

lignoselulosa. Lignin mengikat hemiselulosa dan selulosa dalam ikatan kovalen dan silang (Permata *et al.*, 2021; Schieppati *et al.*, 2023), dimana adanya lignin dapat menghambat pecahnya ikatan selulosa. Salah satu metode pelepasan selulosa dari lignin adalah dengan proses delignifikasi (Permata *et al.*, 2021). Pemisahan lignin dapat memaksimalkan hasil selulosa yang didapat. Lebih jauh, lignin dapat dipisahkan dengan beberapa proses, umumnya dapat menggunakan proses kimia ataupun kimia fisik.

Proses delignifikasi merupakan proses pembebasan selulosa dan hemiselulosa dari ikatan lignin (Novianti *et al.*, 2016). Proses delignifikasi kulit pisang paling optimum terjadi pada penggunaan proses kimia secara basa (Jacqueline & Velvizhi, 2024), dimana delignifikasi secara basa dapat menggunakan ammonia, dan natrium hidroksida. Adapun penambahan perlakuan fisik seperti radiasi ultrasonik didapatkan hasil yang lebih optimum (Dutta *et al.*, 2023), tetapi biaya yang dibutuhkan akan lebih tinggi. Gambaran proses delignifikasi sederhana dapat terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Reaksi dalam Proses Delignifikasi (Yannasandy *et al.*, 2017)

Penggunaan asam atau basa mempengaruhi hasil selulosa dan hemiselulosa yang didapat. Menurut Anukam *et al.* (2021) penggunaan basa untuk delignifikasi adalah baik karena lignin mudah larut dalam basa begitu pula dengan hemiselulosa. Hal ini dikarenakan mempunyai polimerisasi yang rendah yang menyebabkannya mudah larut dalam basa tetapi sukar larut dalam asam. Permata *et al.* (2021) dalam kajiannya menyatakan bahwa NaOH merupakan solven yang paling baik dalam proses delignifikasi biomassa.

Guna meningkatkan porositas dan luas permukaan dari adsorben, proses aktivasi dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa jenis agen aktivator. Gürses *et al.* (2006) menyatakan bahwa aktivasi secara kimia mempunyai beberapa keuntungan daripada aktivasi fisik karena menggunakan suhu yang lebih rendah dan memiliki hasil karbonisasi yang lebih tinggi. Salah satu agen aktivasi yang banyak digunakan untuk pembuatan adsorben karbon dari lignoselulosa adalah H_2SO_4 , dimana asam ini memberi kemungkinan untuk mengembangkan struktur berpori dengan mengurangi domain amorf bahan selulosa dari bahan tanaman dan aromatisasi kerangka karbon (Gerçel *et al.*, 2007). Lebih jauh, berdasar studi yang dilakukan

Heidarinejad *et al.* (2020), H_2SO_4 dapat memberi keuntungan antara lain dapat digunakan sebagai agen pembersih dan penghilang abu dari prekursor karbon aktif, dan biaya proses murah. Selain itu, sebuah hasil penelitian (Sumardiyono *et al.*, 2017) menunjukkan penggunaan aktivator H_2SO_4 2 N selama 30 menit pada karbon aktif kelapa muda dapat mereduksi kadar BOD dan COD berurut sebesar 64,14 % dan 72,19%.

Berdasarkan latar belakang tersebut dan belum banyaknya studi tentang pengaruh delignifikasi dalam penyediaan selulosa pada proses karbonasi, maka penelitian ini dilakukan dengan mengkombinasikan perlakuan delignifikasi kulit pisang kepok secara basa sebelum pembuatan karbon aktif dan biosorben kulit pisang. Hal ini diharapkan dapat menyediakan selulosa lebih banyak dan proses pemecahan selulosa lebih optimum. Sehingga setelah proses karbonasi dari sampel hasil delignifikasi diharapkan mendapatkan hasil karakteristik adsorben yang baik seperti penyediaan kadar karbon yang lebih banyak dan luas permukaan adsorben yang lebih besar.

2. Metode Penelitian

2.1. Preparasi Kulit Pisang Kepok

Persiapan kulit pisang kepok dilakukan dengan pencucian menggunakan air hingga bersih. Kemudian mengeringkannya di oven pada suhu $105\text{ }^\circ\text{C}$ selama 24 jam. Setelah itu, sampel dihancurkan menggunakan grinder.

2.2. Ekstraksi Selulosa (Delignifikasi)

Sampel kulit pisang kepok sebanyak 10 gram ditambahkan NaOH 1 M sebanyak 100 mL dan diaduk selama 30 menit pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$. Setelah itu, sampel difiltrasi dan dicuci hingga filtrat jernih. Pemilihan NaOH pada proses delignifikasi sebagai delignifikator dikarenakan lebih efektif dalam mendegradasi dan merusak struktur lignin, bagian kristalin dan amorf, serta melarutkan lignin dan hemiselulosa (Ayuni & Hastini, 2020). Selanjutnya proses *bleaching* dilakukan dengan 140 mL H_2O_2 selama 18 menit di suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$. Proses *bleaching* bertujuan untuk mendegradasi sisa-sisa lignin dengan cara memutus rantai pendek lignin sehingga lignin mudah larut saat *bleaching* (Lismeri *et al.*, 2019). Setelah *bleaching*, ekstrak dapat disaring dan dicuci lagi hingga bersih untuk dilanjutkan proses pencucian di *magnetic stirrer* selama 30 menit menggunakan HCl 2 N sebanyak 60 mL. Selulosa hasil ekstraksi disaring dan dicuci hingga pH nya netral. Kemudian bahan dikeringkan dalam oven di suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ selama 24 jam. Hasil pengeringan setelah proses delignifikasi terlihat pada Gambar 2. Tahapan pencucian

dengan HCl bertujuan untuk mereduksi ukuran serat selulosa yang dihasilkan dari proses sebelumnya.



Gambar 2. Ekstrak Kulit Pisang Kepok Hasil Proses Delignifikasi

Tiga jenis sampel yang digunakan dalam studi ini antara lain: Sampel A dibuat dari ekstrak kulit pisang kepok hasil proses delignifikasi yang dikarbonasi, sampel B adalah adsorben yang diperoleh dari karbonasi kulit pisang kepok yang tidak didelignifikasi, dan sample C adalah bio-adsorben dari ekstrak kulit pisang kepok hasil delignifikasi. Sedangkan sampel D adalah kulit pisang kepok awal.

2.2.1 Pembuatan Bio-adsorben Kulit Pisang Kepok

Dalam pembuatan sampel C, ekstrak dari kulit pisang kapok dihancurkan dan diayak untuk mendapatkan bahan berukuran (-100+125) Mesh. Kemudian, bahan diaktivasi dengan menggunakan larutan H_2SO_4 . Setelah itu, bahan dicuci menggunakan akuades hingga mencapai pH netral. Hasil aktivasi disiapkan sebagai bahan bio-adsorben.

2.2.2 Pembuatan Karbon Aktif

Kulit pisang kepok dan ekstrak kulit pisang kepok kering untuk sampel A dan B dihancurkan dan diayak agar mendapatkan sampel berukuran (-100+125) Mesh. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam cawan krusibel yang dilapisi aluminium foil agar terhindar dari kontak oksigen. Proses karbonasi terjadi dalam tungku perapian (*furnace*) pada suhu $500\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam (Hussain *et al.*, 2023). Karbon aktif dari ekstrak kulit pisang kepok hasil karbonasi didinginkan dalam desikator selama 20 menit.

2.3. Aktivasi Karbon Aktif

Karbon aktif dari hasil karbonasi ekstrak kulit pisang kepok diaktivasi menggunakan aktivator asam berupa H_2SO_4 (A. Astuti & Maiza, 2019). Dilakukannya perendaman karbon aktif kulit pisang kepok dengan H_2SO_4 2 N selama 30 menit. Kemudian karbon dicuci menggunakan akuades hingga

mencapai pH netral. Karbon aktif disaring menggunakan pompa vakum dan dikeringkan dalam oven dengan suhu 105°C selama 40 menit. Selanjutnya, karbon aktif didinginkan dalam desikator selama 30 menit dan ditimbang beratnya hingga diperoleh berat yang konstan. Karbon aktif diayak untuk didapatkan ukuran (-100+125) Mesh.

2.4. Uji FTIR

FTIR (*Fourier Transform Infrared*) merupakan metode identifikasi gugus fungsi pada padatan adsorben. Pada analisis FTIR (*Perkin Elmer Spectrum Two System L160000A*), digunakan pengujian dengan rentang panjang gelombang 400 – 4000 cm^{-1} . Hasil dari uji berupa panjang gelombang (koordinat sumbu x) dan intensitas cahaya (koordinat sumbu y). Analisis hasil gugus dapat dilihat dengan melihat puncak (*peak*) pada panjang gelombang.

2.5. Uji BET dan SEM-EDX

Analisis BET (*Brunauer Emmett Teller*) ini berfungsi untuk menentukan luas permukaan spesifik dan tekstur porositas dari katalis. Analisis BET (*Quantachrome Novatouch Lx4*) dilakukan dengan suhu dehidrasi sebesar 300°C.

Analisis SEM (*Scanning Electron Microscope, Phenom Desktop ProXL*) dilakukan dengan untuk mengetahui secara jelas tampak permukaan adsorben dengan gambar perbesaran. Sebanyak 2 gram sampel dengan ukuran mesh (-100+125) Mesh diuji menggunakan SEM untuk melihat permukaan yang dihasilkan dari sebelum dan setelah proses delignifikasi pada kulit pisang kepok. Analisis EDX (*Energy Dispersive X-Ray, Phenom Desktop ProXL*) juga dilakukan pada adsorben untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung di dalamnya.

3. Hasil dan Pembahasan

Proses delignifikasi bertujuan untuk memutus ikatan lignoselulosa sehingga selulosa yang terkandung dalam limbah kulit pisang akan lebih banyak jumlahnya. Hasil delignifikasi menunjukkan warna limbah kulit pisang berubah semakin gelap. Kemudian sampel di-bleaching menggunakan H_2O_2 selama 18 menit dan pencucian menggunakan HCl selama 30 menit yang bertujuan untuk menghilangkan lignin yang tersisa. Hasil kedua proses tersebut menunjukkan warna limbah kulit pisang berubah menjadi lebih terang (berwarna coklat kuning terang) seperti pada Gambar 3. Selanjutnya dilakukan proses karbonasi sampel A dan B pada suhu 500 °C selama 2 jam untuk dijadikan karbon aktif. Kemudian, sampel A, B, dan C diaktivasi menggunakan H_2SO_4 pada suhu ruangan selama 30 menit.



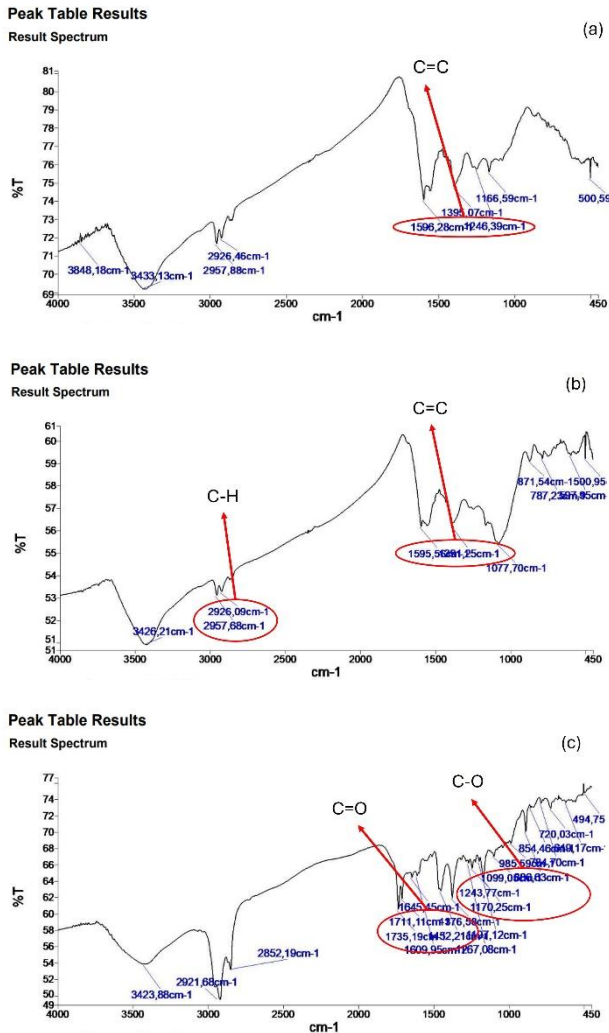
Gambar 3. Tahapan persiapan ekstrak kulit pisang kepok (a). Proses Delignifikasi, (b). *Bleaching*, (c) Pencucian.

Setelah ketiga sampel selesai diaktivasi, dilakukan uji karakteristik SEM untuk melihat secara jelas permukaan adsorben, pengujian BET untuk mengetahui luas permukaan spesifik dan tekstur porositas, dan FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada padatan adsorben. Pengujian karakteristik juga dilakukan pada limbah kulit pisang awal (sampel D) yang sudah dikeringkan pada suhu 105 °C selama 24 jam sebagai pembandingan dengan sampel lain.

Gambar 4 menunjukkan hasil uji FTIR dari ketiga sampel. Gambar 4(c) menunjukkan bahwa sampel C, yang terdelignifikasi tanpa dilakukan karbonasi, memiliki *peak* serapan C=O juga C-O yang menandakan putusnya ikatan selulosa dan lignin (disebabkan delignifikasi). Sedangkan Gambar 4(b) pada sampel B, yang tidak dilakukan delignifikasi hanya dilakukan karbonasi saja, tidak terindikasi *peak* C=O sama sekali yang menandakan tidak terindikasi keberadaan senyawa selulosa. Akan tetapi tampak serapan *peak* C=C dan C-H yang menandakan selulosa yang terkandung kemungkinan besar sudah terkarbonasi dengan sempurna. Sedangkan pada sampel A (Gambar 4(a)), yang diberi perlakuan delignifikasi dan karbonasi, tidak terindikasi adanya C=O tetapi terdapat ikatan C=C yang cukup besar daerah serapannya yang kemungkinan menandakan bahwa selulosa yang terbentuk sudah terkarbonasi. Hal ini ditandai juga oleh adanya *peak* serapan C-O yang terbentuk yang menunjukkan bahwa terjadi pembentukan lignin oleh -OH (delignifikasi). Ikatan C=O (selulosa) berada dalam rentang *peak* 1690-1760 cm^{-1} , ikatan C-O (lignin) pada rentang *peak* 1080-1300 cm^{-1} , ikatan C=C pada rentang *peak* 1500-1600 cm^{-1} , dan ikatan C-C pada

rentang *peak* 2850-3100 cm^{-1} . Dari hasil uji FTIR, tampak bahwa sampel A (sampel yang didelignifikasi dan dikarbonasi) memiliki kemungkinan tertinggi sebagai adsorben yang terbaik dibandingkan sampel lainnya.

yang hanya dilakukan karbonasi saja. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Pari, 2011) dan (Koni *et al.*, 2013) yang menyatakan bahwa terbentuknya adsorben ketika karbonasi dipengaruhi oleh kadar selulosa yang terkandung. Oleh karena itu adanya kombinasi proses delignifikasi dan karbonasi pada sample A menghasilkan kandungan karbon yang paling tinggi dibandingkan dengan sampel yang lain.



Gambar 4. (a) Adsorben Kulit Pisang yang di Karbonasi dan Delignifikasi; (b) Adsorben Kulit Pisang Dengan Karbonasi Tanpa Delignifikasi; dan (c) Bio-adsorben Kulit Pisang Dengan Delignifikasi Tanpa Karbonasi

Hasil pengujian SEM-EDX terlihat pada Tabel 1. Hasil pengujian sejalan dengan teori yang ada, bahwa perlakuan delignifikasi dapat meningkatkan kadar selulosa dengan memutus ikatan lignoselulosa. Hal ini dapat dilihat dari hasil kadar karbon sampel C lebih tinggi dibanding sampel D. Selain itu, proses karbonasi juga berpengaruh dalam meningkatkan kandungan karbon, dimana terlihat bahwa sampel B memiliki kandungan karbon lebih tinggi dari sampel D. Sampel A memiliki ikatan karbon terbesar yaitu sebesar 78,65 % berat, dengan perbedaan yang cukup signifikan dengan selisih sekitar 4,94 % berat dari sampel

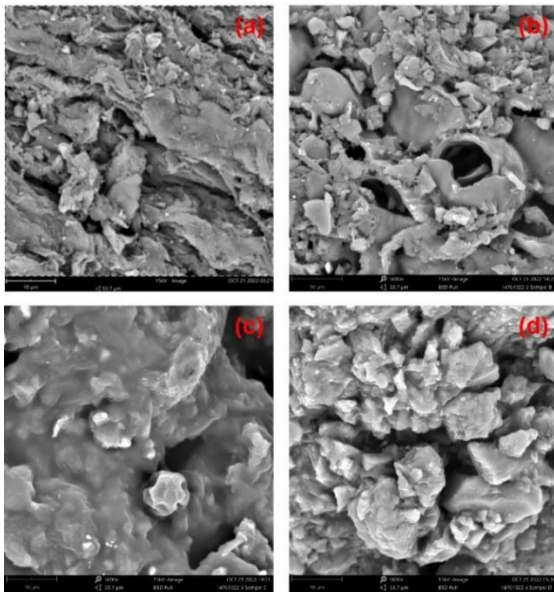
Tabel 1. Elemen yang Terkandung dalam Hasil Uji EDX (EN: Elemen Number; ES: Elemen Symbol; AC; Atomic Concentration; WC: Weight Concentration)

EN	ES	Sampel A		Sampel B		Sampel C		Sampel D	
		AC	WC	AC	WC	AC	WC	AC	WC
6	C	78,65	74,25	73,71	67,29	72,87	65,73	61,45	53,52
8	O	12,82	16,13	14,82	18,02	19,76	23,75	29,66	34,41
7	N	8,30	9,14	9,48	10,10	4,60	4,83	7,02	7,13
13	Al	0,14	0,30	-	-	2,52	5,11	-	-
14	Si	0,81	1,72	0,81	1,72	0,20	0,42	0,17	0,35
12	Mg	-	-	0,51	0,95	-	-	0,17	0,30
20	Ca	-	-	0,31	0,94	0,05	0,16	-	-
19	K	-	-	0,21	0,63	-	-	1,38	3,92
17	Cl	-	-	-	-	-	-	0,08	0,20
15	P	-	-	-	-	-	-	0,08	0,18

Gambar 5 memperlihatkan morfologi sampel hasil uji SEM. Pada Gambar 5(a) tampak bahwa sample A memiliki struktur selulosa yang lebih beraturan dan pori kecil dibandingkan dengan ketiga sampel yang lain, yang menandakan bahwa perlakuan delignifikasi dapat meningkatkan karakteristik adsorben. Berdasarkan karakteristik SEM dan jumlah karbon dari hasil uji EDX pada adsorben, dapat dikatakan jika kulit pisang yang diberi perlakuan karbonasi dan delignifikasi dapat berpotensi menjadi adsorben yang lebih baik.

Luas permukaan pori karbon aktif sebanding nilainya dengan kemampuan penyerapannya terhadap suatu senyawa (Subadra *et al.*, 2005). Hal itu dapat dilakukan dengan proses karbonasi suhu tinggi maupun penggunaan aktivator pada suatu material. Hasil uji BET disajikan pada Tabel 2. Dari hasil pengujian terlihat bahwa diameter rata-rata pori A sebesar 1,2719 nm dengan total volume pori sebesar 0,0530261 cc/g , serta luas permukaan pori sebesar 83,381 m^2/g . Sedangkan sampel B memiliki diameter rata-rata pori sebesar 1,9969 nm dengan total volume pori sebesar 0,0537108 cc/g , dengan luas permukaan penyerapan sebesar 53,794 m^2/g . Tampak bahwa sample A memiliki luas permukaan yang lebih besar daripada sampel B. Hal ini mengindikasikan bahwa daya tampung serapan sampel A lebih besar atau lebih baik dibandingkan sampel B. Sehingga hal ini dapat dikatakan bahwa sampel yang mengalami

kombinasi proses delignifikasi dan karbonasi akan memiliki potensi penyerapan yang lebih besar dibandingkan dengan sampel yang mengalami proses karbonasi saja.



Gambar 5. Gambar SEM: (a) Adsorben Kulit Pisang yang didelignifikasi dan Karbonasi; (b) Adsorben Kulit Pisang yang dikarbonasi; (c) Biosorben Kulit Pisang yang didelignifikasi; (d) Serbuk Kulit Pisang Awal

Di lain sisi, sampel C terlihat memiliki total volume pori sebesar $4,4075 \times 10^{-1}$ cc/g, akan diameter pori tidak terindikasi oleh analisis BET. Hal ini sejalan dengan Gambar 5(c) dimana permukaan sample tampak lebih rata halus dan tidak menampakkan adanya pori-pori kecil tersebar di permukaan seperti pada sampel yang lain. Hal ini kemungkinan yang mendorong luas permukaan serapan secara umum juga tidak teridentifikasi.

Tabel 2. Hasil Uji BET Setiap Sampel (Karb.: Karbonasi; Delig.: Delignifikasi)

Parameter	Sampel			
	A (Karb. dan Delig.)	B (Karb.)	C (Delig.)	D (Kulit Pisang)
Diameter Rata-Rata Pori (nm)	1,2719	1,9969	-	-
Volume Pori Total (cc/g)	0,05302	0,05371	0,4075	0,54518
Luas Permukaan Pori (m ² /g)	83,381	53,794	-	-

Dari hasil keempat sampel yang telah diuji BET terlihat bahwa sampel A berpotensi memiliki kemampuan penyerapan yang paling baik dibandingkan sampel lainnya. Selain itu, hasil analisis SEM-EDX dan BET juga mengindikasikan bahwa ada hubungan antara kadar karbon dengan luas serapan atau sebaran pori. Semakin banyak

kandungan karbon yang terdapat pada sampel maka luas serapannya juga akan semakin besar.

Tabel 3 menunjukkan perbandingan hasil penelitian yang dilakukan dengan beberapa penelitian yang memanfaatkan kulit pisang kepok sebagai bahan adsorben dengan perbedaan perlakuan. Proses kombinasi delignifikasi dan karbonasi kulit pisang kepok dapat menghasilkan luas permukaan yang lebih baik dibandingkan perlakuan lain, kecuali pada perlakuan dengan menggunakan gelombang mikro. Dengan luas permukaan yang lebih besar maka potensi penyerapan akan lebih optimal. Kulit pisang kepok teraktivasi H₂SO₄ 2 M (Sherly & Cahyaningrum, 2014) dapat diaplikasikan sebagai adsorben ion logam Cr(VI), kulit pisang kepok-polivinil alkohol sulfonasi dapat diaplikasikan sebagai adsorben ion tembaga (II) (Rahmawati, 2021), sedangkan kulit pisang kepok gelombang mikro dapat diaplikasikan sebagai adsorben zat warna kationik (W. Astuti & Hartanto, 2020).

Tabel 3. Perbandingan Luas Permukaan dari Sampel dengan Perlakuan yang Berbeda

Jenis perlakuan terhadap karbon aktif	Luas permukaan (m ² /g)	Sumber
Kulit pisang kepok teraktivasi H ₂ SO ₄ 2 M	16,53	(Sherly & Cahyaningrum, 2014)
Kulit pisang kepok-polivinil alkohol sulfonasi	5,887	(Rahmawati, 2021)
Kulit pisang kepok gelombang mikro	247,864	(W. Astuti & Hartanto, 2020)
Kulit pisang kepok	0,43 - 5,549	(Rahmawati, 2021; Sherly & Cahyaningrum, 2014)
Kulit pisang kepok delignifikasi dan karbonasi	83,381	Hasil penelitian ini

Di lain sisi, karbon aktif dari limbah kulit pisang yang diaktivasi dengan H₂SO₄ 6 M, dapat digunakan untuk mengurangi gas polutan dan bertindak sebagai adsorben yang sangat baik untuk kendaraan bermesin diesel (Devarajan & Lakshmaiya, 2022). Karbon aktif dari limbah pertanian, seperti kulit pisang, juga berpotensi sebagai alternatif adsorben peptisida (Hussain *et al.*, 2023). Berdasarkan beberapa manfaat adsorben teraktivasi dari kulit pisang tersebut, menunjukkan bahwa adsorbent hasil proses kombinasi delignifikasi dan karbonasi berpotensi menjadi adsorben yang baik.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa kombinasi perlakuan delignifikasi dan karbonasi dapat meningkatkan kadar karbon yang terkandung dalam sampel adsorben berdasarkan analisis SEM – EDX dan FTIR

(sampel A). Analisis SEM mengindikasikan adanya struktur selulosa yang lebih beraturan dan pori kecil (pertanda daya serap akan baik). Dari hasil EDX, sampel A terindikasi mengandung unsur karbon paling tinggi yaitu 78,65% berat, dan diperkuat dengan hasil analisis FTIR yang rentang *peak* ikatan C=C dan C-H lebih luas (pertanda selulosa yang sudah terpisah terkarbonasi dengan baik sehingga menghasilkan unsur karbon). Sedangkan hasil pengujian BET untuk mengetahui luas permukaan spesifik menunjukkan karakteristik yang paling baik terdapat pada sampel A dibandingkan sampel lainnya berdasarkan luas sebaran porinya yang lebih besar. Sehingga dapat disimpulkan jika pemberian perlakuan delignifikasi dan karbonasi dapat meningkatkan karakteristik pada adsorben kulit pisang kepok dengan peningkatan jumlah karbon terkandung.

Ucapan Terima kasih

Terima kasih kami ucapkan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DPPM) Universitas Islam Indonesia atas dukungan pendanaannya. Serta kepada seluruh pihak yang telah membantu proses penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ahmed, R. S., Abuarab, M. E., Baiomy, M. A., & Ibrahim, M. M. (2024). Heavy metals removal from industrial wastewater using bio-adsorbent materials based on agricultural solid wastes through batch and continuous flow mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104665–104682. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104665>
- Al-sareji, O. J., Grmasha, R. A., Meiczinger, M., Al-Juboori, R. A., Somogyi, V., & Hashim, K. S. (2024). A Sustainable Banana Peel Activated Carbon for Removing Pharmaceutical Pollutants from Different Waters: Production, Characterization, and Application. *Materials*, 17(5), 1032–1057. <https://doi.org/10.3390/ma17051032>
- Anggorowati, H., & Lestari, I. (2022). Manik Komposit Abu Layang Batu Bara-Alginat untuk Menghilangkan Rhodamine B. *Eksergi*, 19(3), 160–164.
- Anukam, A., Berghel, J., Henrikson, G., Frodeson, S., & Ståhl, M. (2021). A review of the mechanism of bonding in densified biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111249–111264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111249>
- Astuti, A., & Maiza, R. K. (2019). Pengaruh Aktivator H₂SO₄ terhadap Pori Karbon Aktif dan Aplikasinya sebagai Absorber Logam Berat. *JURNAL ILMU FISIKA | UNIVERSITAS ANDALAS*, 11(1), 25–30. <https://doi.org/10.25077/jif.11.1.30-36.2019>
- Astuti, W., & Hartanto, D. (2020). Metode pembuatan karbon aktif dari limbah kulit pisang kepok menggunakan gelombang mikro (Patent IDS000002863). In *Paten (IDS000002863)*. Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia. <https://lib.unnes.ac.id/43524/>
- Ayuni, N. P. S., & Hastini, P. N. (2020). Serat sabut kelapa sebagai bahan kajian pembuatan bioetanol dengan proses hidrolisis asam. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 9(2), 102–110. <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v9i2.29035>
- Deeth, H. (2017). Optimum thermal processing for extended shelf-life (Esl) milk. *Foods*, 6(11), 102–123. <https://doi.org/10.3390/foods6110102>
- Devarajan, Y., & Lakshmaiy, N. (2022). Effective utilization of waste banana peel extracts for generating activated carbon-based adsorbent for emission reduction. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03470-5>
- Fadlilah, I., Pramita, A., Triwuri, N. A., & Anggorowati, H. (2023). Pemanfaatan Karbon Aktif Kulit Pisang Kepok dan Karbon Aktif Tempurung Nipah sebagai Biosorben untuk Pengolahan Limbah Cair. *Eksergi*, 20(2), 118–123.
- Gerçel, Ö., Özcan, A., Özcan, A. S., & Gerçel, H. F. (2007). Preparation of activated carbon from a renewable bio-plant of *Euphorbia rigida* by H₂SO₄ activation and its adsorption behavior in aqueous solutions. *Applied Surface Science*, 253(11), 4843–4852. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.10.053>
- Gürses, A., Doğar, Ç., Karaca, S., Açıkyıldız, M., & Bayrak, R. (2006). Production of granular activated carbon from waste *Rosa canina* sp. seeds and its adsorption characteristics for dye. *Journal of Hazardous Materials*, 131(1–3), 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.09.014>
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. In *Environmental Chemistry Letters (Vol. 18, Issue 2, pp. 393–415)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Himawana, N. A., Darmokoesoemo, H., Adiarto, T., Prasetya, A. B., Tamam, B., & Ali, I. (2022). Pemanfaatan Nanokitosan Sebagai Adsorben Merkuri (Hg) pada Limbah Pengolahan Bijih Emas. *Eksergi*, 19(2), 82–90.
- Hussain, O. A., Hathout, A. S., Abdel-Mobdy, Y. E., Rashed, M. M., Abdel Rahim, E. A., & Fouzy, A. S. M. (2023). Preparation and characterization of activated carbon from agricultural wastes and their ability to remove chlorpyrifos from water. *Toxicology Reports*, 10, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.01.011>
- Jacqueline, P. J., & Velvizhi, G. (2024). Substantial physicochemical pretreatment and rapid delignification of lignocellulosic banana, pineapple

- and papaya fruit peels: A study on physical-chemical characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101347–101364. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101347>
- Jubilate, F., Anita Zaharah, T., Syahbanu, I., & Hadari Nawawi, J. H. (2016). PENGARUH AKTIVASI ARANG DARI LIMBAH KULIT PISANG KEPOK SEBAGAI ADSORBEN BESI (II) PADA AIR TANAH. *Jurnal Kimia Khatulistiwa (JKK)*, 5(4), 14–21.
- Koni, T. N. I., Bale-Therik, J., & Kale, P. R. (2013). Pemanfaatan Kulit Pisang Hasil Fermentasi *Rhizopus oligosporus* dalam Ransum Terhadap Pertumbuhan Ayam Pedaging. *Jurnal Veteriner*, 14(3), 365–370.
- Lismeri, L., Darni, Y., Sanjaya, M. D., & Immadudin, M. I. (2019). Pengaruh Suhu Dan Waktu Pretreatment Alkali Pada Isolasi Selulosa Limbah Batang Pisang. *Journal of Chemical Process Engineering*, 4(1), 18–22. <https://doi.org/10.33536/jcpe.v4i1.319>
- Mohammed, R. R., & Chong, M. F. (2014). Treatment and decolorization of biologically treated Palm Oil Mill Effluent (POME) using banana peel as novel biosorbent. *Journal of Environmental Management*, 132, 237–249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.031>
- Munira, M., Aladin, A., Aulia Hamza, N., & Umrah Tulzhaliza, S. (2022). Pemanfaatan Limbah Biji Pepaya sebagai Biosorben terhadap Penurunan Total Ion Besi (Fe) dalam Air Limbah. *Eksergi*, 19(3), 123–128.
- Novianti, P., Agustina, W., & Setyowati, E. (2016). Pemanfaatan Limbah Kulit Pisang Kepok Sebagai Bahan Baku Pembuatan Kertas Alami dengan Metode Pemisahan Alkalisasi. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Sains VI (SNPS) 2016*, 459–466.
- Pari, G. (2011). PENGARUH SELULOSA TERHADAP STRUKTUR KARBON ARANG BAGIAN I: PENGARUH SUHU KARBONISASI. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 29(1), 33–45. <https://doi.org/10.20886/jphh.2011.29.1.33-45>
- Permata, D. A., Kasim, A., Asben, A., & Yusniwati. (2021). Delignification of Lignocellulosic Biomass. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 12(2), 462–469. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.12.2.0618>
- Rahmawati, P. (2021). PEMANFAATAN KULIT PISANG KEPOK-POLIVINIL ALKOHOL (PVA) TERSULFONASI SEBAGAI ADSORBEN ION TEMBAGA (II) [Universitas Islam Negeri Walisongo]. <https://eprints.walisongo.ac.id/id/eprint/13752/>
- Schieppati, D., Patience, N. A., Galli, F., Dal, P., Seck, I., Patience, G. S., Fuoco, D., Banquy, X., & Boffito, D. C. (2023). Chemical and Biological Delignification of Biomass: A Review. In *Industrial and Engineering Chemistry Research* (Vol. 62, Issue 33, pp. 12757–12794). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01231>
- Septiani, M., Darajat, Z., Yunus, M. A., Ole, M. A. O., & Ilma, Z. F. (2023). Kajian Isoterm Adsorpsi Linear Alkilbenzena Sulfonate (LAS) dalam Limbah Cair Detergen Menggunakan Biosorben Ampas Kopi dan Ampas Kelapa. *Eksergi*, 20(2), 124–130.
- Sherly, A., & Cahyaningrum, S. E. (2014). AKTIVASI KULIT PISANG KEPOK (*Musa acuminata* L.) DENGAN H₂SO₄ DAN APLIKASINYA SEBAGAI ADSORBEN ION LOGAM Cr(VI). *UNESA Journal of Chemistry*, 3(1), 22–25.
- Subadra, I., Setiaji, B., & Tahir, I. (2005). Activated Carbon Production From Coconut Shell with (NH₄)HCO₃ Activator as An Adsorbent in Virgin Coconut Oil Purification. *Prosiding Seminar Nasional DIES Ke 50 FMIPA UGM*, 1–8.
- Sumardiyono, Herawati, D. A., & Supriyono. (2017). Pengaruh Konsentrasi Aktivator Asam Sulfat pada Arang Aktif Kulit Kelapa Muda untuk Menurunkan BOD dan COD. *BIOMEDIKA*, 10(2), 73–78. <https://doi.org/10.31001/biomedika.v10i2.278>
- Yannasandy, D., Hasyim, U. H., & Fitriyano, G. (2017). Pengaruh Waktu Delignifikasi Terhadap Pembentukan Alfa Selulosa dan Identifikasi Selulosa Asetat Hasil Asetilasi dari Limbah Kulit Pisang Kepok. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi-FT UMG*, 1–9.