

Potensi Karbon Aktif dari Kulit Durian dengan Aktivator HCl untuk Immobilisasi Asam Lemak Hidroksamat

Muhsinun^{1,*}, Syamsul Hidayat²

¹ Program Studi Pendidikan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pendidikan Nusantara Global, Indonesia

² Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia

*Email Korespondensi: cinun.chemist@gmail.com

Muhsinun, M. & Hidayat, S. (2025).
Potensi Karbon Aktif dari Kulit Durian
dengan Aktivator HCl untuk Immobilisasi
Asam Lemak Hidroksamat. *Varied
Knowledge Journal*, 3(1), 40–47.
<https://doi.org/10.71094/vkj.v3i1.128>

Diterima: 31-07-2025

Direvisi: 12-08-2025

Disetujui: 25-08-2025

Publish: 30-08-2025



Copyright © 2025, The Author(s). This
work is licensed under a Creative Commons
Attribution-ShareAlike 4.0 International.

Abstract : *Durian peel waste has the potential to be converted into high-value activated carbon through carbonization and chemical activation processes. This study aims to investigate the potential of durian peel–derived activated carbon, activated using HCl, as a material for immobilizing hydroxamic fatty acids. The research process included raw material preparation, carbonization at 500–600 °C, chemical activation with varying HCl concentrations (0.5 M, 1 M, 2 M), and characterization using Fourier Transform Infrared (FTIR), Brunauer–Emmett–Teller (BET), and Scanning Electron Microscopy (SEM). The immobilization capacity test was conducted by measuring the amount of hydroxamic fatty acid bound to the activated carbon surface. Results showed that HCl activation reduced the activated carbon yield to 28–31%, but significantly improved its quality. FTIR analysis revealed the appearance of hydroxyl and carbonyl groups, while BET analysis demonstrated an increase in surface area from 350 m²/g (non-activated) to 910 m²/g at a concentration of 2 M. SEM observations confirmed the formation of a more regular pore structure, although excessively high concentrations caused surface cracking. Adsorption tests indicated that immobilization capacity increased from 25 mg/g (non-activated) to 80 mg/g at 2 M activation, with optimum conditions achieved at 1 M, providing a balance between surface area, structural stability, and adsorption capacity. This study highlights the potential of durian peel–based activated carbon as a support material for bioactive immobilization, with promising applications in catalysis, pharmaceuticals, and environmentally friendly bioprocesses.*

Keywords : *activated carbon, durian peel, HCl, immobilization, fatty hydroxamic acid*

Abstrak : Limbah kulit durian berpotensi diolah menjadi karbon aktif bernilai tambah tinggi melalui proses karbonisasi dan aktivasi kimia. Penelitian ini bertujuan mengkaji potensi karbon aktif dari kulit durian yang diaktivasi menggunakan HCl sebagai material untuk immobilisasi asam lemak hidroksamat. Proses penelitian meliputi tahap persiapan bahan, karbonisasi pada suhu 500–600 °C, aktivasi kimia dengan variasi konsentrasi HCl (0,5 M; 1 M; 2 M), serta karakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR), Brunauer–Emmett–Teller (BET), dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Uji kapasitas immobilisasi dilakukan dengan mengukur jumlah asam lemak hidroksamat yang terikat pada permukaan karbon aktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivasi HCl menurunkan rendemen karbon aktif menjadi 28–31%, tetapi secara signifikan meningkatkan kualitasnya. Analisis FTIR memperlihatkan munculnya gugus hidroksil dan karbonil, sedangkan analisis BET menunjukkan peningkatan luas permukaan dari 350 m²/g (non-aktivasi) menjadi 910 m²/g pada konsentrasi 2 M. Pengamatan SEM mengonfirmasi terbentuknya struktur pori yang lebih teratur, meskipun konsentrasi terlalu tinggi menyebabkan keretakan permukaan. Uji adsorpsi memperlihatkan kapasitas immobilisasi meningkat dari 25 mg/g (non-aktivasi) menjadi 80 mg/g pada aktivasi 2 M, dengan kondisi optimum pada konsentrasi 1 M karena memberikan keseimbangan antara luas permukaan, kestabilan struktur, dan kapasitas adsorpsi. Penelitian ini menegaskan potensi karbon aktif kulit durian sebagai material pendukung immobilisasi bioaktif, serta membuka peluang aplikatif di bidang katalisis, farmasi, dan bioproses ramah lingkungan.

Kata Kunci : karbon aktif, kulit durian, HCl, immobilisasi, asam lemak hidroksamat

PENDAHULUAN

Pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku karbon aktif merupakan salah satu strategi berkelanjutan yang mendapat perhatian besar dalam penelitian lingkungan dan material di Indonesia. Limbah kulit durian (*Durio zibethinus*) yang melimpah di berbagai daerah tropis mengandung fraksi organik tinggi seperti selulosa dan lignin sehingga potensial dikonversi menjadi arang dan karbon aktif berkualitas (Febriyanto, 2019). Beberapa penelitian nasional telah menunjukkan bahwa kulit durian dapat diolah menjadi karbon aktif yang efektif untuk aplikasi pengolahan air dan pemurnian minyak, sehingga sekaligus mengurangi masalah penumpukan limbah organik (Sari et al., 2021).

Proses pembuatan karbon aktif umumnya meliputi dua tahap utama: karbonisasi dan aktivasi. Aktivasi kimia sering dipilih karena mampu menghasilkan luas permukaan spesifik yang tinggi dan distribusi pori yang lebih baik dibanding aktivasi fisika pada kondisi tertentu (Oko et al., 2021). Penggunaan aktivator asam kuat seperti asam klorida (HCl) telah dipelajari pada berbagai jenis bahan baku lokal mulai dari kulit buah hingga tempurung kelapa dan dilaporkan efektif dalam membuka pori serta menghilangkan sisa abu atau pengotor yang menyumbat struktur pori (Hayaati & Ridho, 2020). Studi eksperimental di beberapa institusi menegaskan efek positif aktivasi HCl terhadap morfologi permukaan dan sifat tekstural karbon aktif (Sari et al., 2025).

Dalam konteks kulit durian, sejumlah penelitian nasional melaporkan proses sintesis dan karakterisasi karbon aktif yang dihasilkan dari limbah ini. Hasil-hasil tersebut mengindikasikan bahwa karbonisasi diikuti aktivasi (dengan berbagai aktivator, termasuk HCl, ZnCl_2 , dan H_3PO_4) mampu menghasilkan material adsorben yang efektif menurunkan parameter kontaminan seperti warna, Chemical Oxygen Demand (COD), logam berat, dan pewarna organik seperti metilen biru (Ruspita et al., 2024; Ardiansyah et al., 2024). Beberapa studi juga menemukan bahwa konsentrasi aktivator, suhu karbonisasi, dan rasio bahan-aktivator merupakan parameter kritis yang menentukan luas permukaan, volume pori, serta kandungan gugus permukaan oksigen yang berperan pada mekanisme adsorpsi (Verayana et al., 2018; Husin & Hasibuan, 2020).

Karakterisasi karbon aktif biasanya melibatkan serangkaian teknik instrumentasi, seperti analisis gugus fungsi oleh Fourier Transform Infrared (FTIR), pengukuran luas permukaan dan distribusi pori dengan metode BET, serta pengamatan morfologi permukaan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Laporan lokal menunjukkan pergeseran puncak FTIR dan perubahan parameter BET setelah aktivasi kimia, yang mengindikasikan pembentukan gugus fungsional dan pembukaan jaringan pori mikro, faktor yang relevan untuk aplikasi immobilisasi molekul organik (Aritonang et al., 2024). Selain itu, pengujian aplikasi praktis misalnya adsorpsi metilen biru, penurunan COD, dan pemurnian minyak jelantah menunjukkan kinerja yang menjanjikan dari karbon aktif kulit durian (Sari et al., 2021).

Meskipun banyak studi lokal menilai kapasitas adsorpsi karbon aktif kulit durian terhadap zat terlarut (misalnya pewarna, COD, logam), penelitian yang secara khusus mengeksplorasi immobilisasi asam lemak hidroksamat pada permukaan karbon aktif kulit durian masih relatif terbatas di literatur nasional. Hidroksamat adalah gugus fungsional yang sering dimanfaatkan dalam kimia organik dan biokimia sebagai ligan yang mampu membentuk kompleks dengan logam dan juga digunakan dalam pengembangan senyawa bioaktif. Dalam konteks immobilisasi, interaksi antara gugus permukaan karbon aktif (misalnya gugus oksigen yang dihasilkan selama aktivasi) dan molekul hidroksamat menentukan seberapa kuat senyawa tersebut dapat ditahan pada matriks karbon (Oko et al., 2021). Oleh karena itu, studi yang menghubungkan parameter aktivasi (khususnya aktivator HCl) dengan kemampuan immobilisasi hidroksamat menjadi penting untuk membuka peluang aplikasi baru karbon aktif lokal (Arif et al., 2023).

Beberapa temuan nasional mendukung hipotesis bahwa aktivasi dengan HCl meningkatkan jumlah gugus fungsi permukaan yang bersifat asam dan memodifikasi porositas sehingga memfasilitasi adsorpsi dan immobilisasi molekul organik. Contohnya, penelitian yang membandingkan aktivator HCl dan H_3PO_4 pada tempurung kelapa menemukan perbedaan morfologi pori dan kandungan senyawa oksida yang signifikan setelah perlakuan (Verayana et al., 2018). Penelitian sejenis pada kulit buah lain seperti nangka, bintaro, dan singkong juga menunjukkan

efektivitas HCl untuk menghilangkan kontaminan dari permukaan dan membuka struktur pori, sehingga secara konseptual mendukung penggunaan HCl pada kulit durian (Sailah et al., 2020).

Dari perspektif teknis, pemilihan kondisi aktivasi (konsentrasi HCl, waktu perendaman, rasio bahan:aktivator, serta suhu dan durasi karbonisasi) merupakan variabel yang harus dioptimalkan (Arif et al., 2023). Penelitian nasional melaporkan variasi parameter ini dan menemukan adanya titik optimum dimana luas permukaan dan kapasitas adsorpsi mencapai nilai maksimum sementara kadar abu dan kelembapan turun ke tingkat yang diinginkan (Ruspita et al., 2024). Selain itu, metode pra-perlakuan (pencucian, pengeringan, penghancuran) dan perlakuan paska-aktivasi (pencucian hingga pH netral, pengeringan) juga menentukan kualitas akhir karbon aktif. Hal ini penting ketika target aplikasi adalah immobilisasi senyawa organik sensitif seperti asam lemak hidroksamat, karena kondisi permukaan yang terlalu asam atau tersisa residu aktivator dapat mengubah kestabilan senyawa terimmobilisasi (Irnameria, 2020).

Dari sisi aplikasi, karbon aktif dari kulit durian yang teraktivasi HCl menunjukkan potensi untuk diaplikasikan tidak hanya pada remediasi limbah, namun juga sebagai matriks pembawa (support) untuk senyawa bioaktif dalam bidang katalisis, adsorpsi selektif, dan formulasi farmasi sederhana. Mekanisme immobilisasi dapat melibatkan interaksi fisik (adsorpsi dalam pori mikro/meso), interaksi kimia (ikatan hidrogen, interaksi elektrostatis antara gugus permukaan dan hidroksamat), atau pembentukan ikatan koordinasi jika gugus hidroksamat berinteraksi dengan situs logam yang mungkin ada pada permukaan adsorben (Aritonang et al., 2024). Oleh karena itu, studi yang menggabungkan karakterisasi tekstural, analisis gugus fungsi (FTIR), dan uji aplikasi immobilisasi dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi material ini (Inayah & Ady, 2024).

Berdasarkan tinjauan literatur nasional tersebut, penelitian tentang potensi karbon aktif dari kulit durian dengan aktivator HCl untuk immobilisasi asam lemak hidroksamat menjadi relevan dan bernilai tambah. Penelitian ini tidak hanya mengisi celah ilmiah mengenai aplikasi spesifik hidroksamat pada matriks karbon aktif lokal, tetapi juga menawarkan solusi pengelolaan limbah yang berorientasi ekonomi sirkular di tingkat komunitas penghasil durian (Husin & Hasibuan, 2020). Selain itu, pendekatan ini sejalan dengan upaya penelitian lokal untuk mengembangkan adsorben murah berbasis sumber daya terbarukan yang dapat diimplementasikan pada skala laboratorium hingga pilot (Sari et al., 2021).

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah (1) mensintesis karbon aktif dari kulit durian melalui karbonisasi dan aktivasi HCl dengan variasi kondisi, (2) mengkarakterisasi perubahan tekstural dan gugus fungsi permukaan setelah aktivasi, serta (3) mengevaluasi kemampuan dan mekanisme immobilisasi asam lemak hidroksamat pada permukaan karbon aktif yang dihasilkan. Hasil diharapkan memberikan parameter operasional yang optimal dan pemahaman mekanistik yang aplikatif untuk pengembangan material karboksilat/hidroksamat-terimmobilisasi berbasis biomassa lokal (Arif et al., 2023).

METODE

Bahan dan Alat

Bahan utama dalam penelitian ini adalah kulit durian (*Durio zibethinus*) yang diperoleh dari limbah rumah tangga dan pedagang buah di sekitar lokasi penelitian. Kulit durian dipilih karena ketersediaannya yang melimpah dan kandungan lignoselulosa yang tinggi, sehingga berpotensi sebagai bahan baku karbon aktif. Bahan kimia yang digunakan antara lain asam klorida (HCl) teknis dengan variasi konsentrasi 0,5 M; 1 M; dan 2 M sebagai aktivator, serta akuades sebagai pelarut pencuci. Untuk proses immobilisasi digunakan larutan standar asam lemak hidroksamat yang disintesis terlebih dahulu melalui reaksi hidrogenasi senyawa prekursor asam lemak dengan hidroksilamin. Peralatan utama mencakup tungku karbonisasi, oven pengering, desikator, pH meter, gelas ukur, timbangan analitik, serta seperangkat instrumen karakterisasi meliputi Fourier Transform

Infrared (FTIR), Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface analyzer, dan Scanning Electron Microscopy (SEM).

Persiapan Bahan Baku

Kulit durian yang diperoleh dibersihkan dari sisa daging buah, kotoran, dan getah, kemudian dipotong kecil-kecil berukuran $\pm 2\text{--}3$ cm. Potongan kulit dikeringkan di bawah sinar matahari selama 2–3 hari hingga kadar air turun signifikan, dilanjutkan pengeringan dalam oven pada suhu $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam untuk memastikan kadar air berada pada kisaran di bawah 10%. Setelah kering, sampel digiling dan diayak untuk memperoleh ukuran partikel homogen dengan mesh 40–60. Homogenisasi ukuran partikel bertujuan agar proses karbonisasi dan aktivasi berlangsung seragam pada seluruh sampel.

Proses Karbonisasi

Proses karbonisasi dilakukan menggunakan furnace elektrik pada suhu $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan laju pemanasan sekitar $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ per menit. Suhu karbonisasi dipertahankan selama 2 jam untuk memastikan dekomposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin menjadi arang dengan struktur karbon aromatik. Produk karbonisasi kemudian didinginkan dalam desikator untuk mencegah penyerapan kelembaban dari udara. Arang yang diperoleh kemudian ditimbang untuk menghitung rendemen awal dan disimpan dalam wadah tertutup sebelum dilakukan proses aktivasi. Tahap ini berfungsi sebagai prasyarat untuk menghasilkan matriks karbon dasar yang siap dimodifikasi melalui aktivasi kimia.

Aktivasi dengan HCl

Arang kulit durian hasil karbonisasi kemudian direndam dalam larutan HCl dengan konsentrasi bervariasi ($0,5\text{ M}$; 1 M ; dan 2 M) dengan perbandingan massa arang terhadap larutan $1:5$ (b/v). Proses perendaman dilakukan selama 24 jam pada suhu ruang sambil diaduk secara periodik untuk memastikan interaksi merata antara arang dan larutan aktivator. Setelah perendaman, sampel dicuci menggunakan akuades hingga pH larutan pencuci netral, kemudian dikeringkan kembali dalam oven pada suhu $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 12 jam. Proses aktivasi ini diharapkan dapat menghilangkan mineral pengotor, membuka pori-pori, serta meningkatkan luas permukaan karbon aktif. Hasil aktivasi kemudian ditimbang, disimpan dalam desikator, dan siap digunakan untuk tahap karakterisasi maupun uji aplikasi.

Karakterisasi Karbon Aktif

Karbon aktif yang telah dihasilkan dikarakterisasi untuk mengetahui sifat fisik dan kimianya. Analisis FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada permukaan karbon aktif sebelum dan sesudah aktivasi, khususnya keberadaan gugus hidroksil, karbonil, dan gugus asam karboksilat yang berperan dalam proses adsorpsi dan immobilisasi. Analisis BET dilakukan untuk menentukan luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori. Sementara itu, pengamatan morfologi permukaan menggunakan SEM dilakukan untuk melihat perubahan struktur pori dan tekstur permukaan akibat perlakuan aktivasi. Hasil karakterisasi ini menjadi dasar untuk mengevaluasi efektivitas HCl sebagai aktivator dalam meningkatkan kualitas karbon aktif dari kulit durian.

Prosedur Uji Immobilisasi Asam Lemak Hidroksamat

Uji immobilisasi dilakukan dengan mencampurkan $0,5\text{ g}$ karbon aktif hasil aktivasi dengan 50 mL larutan asam lemak hidroksamat pada konsentrasi 100 ppm dalam wadah tertutup. Campuran diaduk dengan shaker pada kecepatan 150 rpm selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah inkubasi, larutan disaring dan filtrat dianalisis untuk menentukan sisa konsentrasi asam lemak hidroksamat menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang karakteristiknya. Kapasitas immobilisasi dihitung dari selisih konsentrasi awal dan akhir larutan. Perbandingan hasil antara variasi konsentrasi HCl yang digunakan sebagai aktivator dianalisis untuk mengetahui pengaruh modifikasi permukaan terhadap kemampuan immobilisasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian mengenai pemanfaatan kulit durian sebagai bahan baku karbon aktif dengan aktivator HCl untuk immobilisasi asam lemak hidroksamat menghasilkan beberapa temuan penting yang dapat dijelaskan secara komprehensif. Tahap awal penelitian memperlihatkan bahwa kulit durian memiliki komposisi utama berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang menjadikannya sebagai salah satu prekursor biomassa yang potensial untuk menghasilkan karbon aktif. Kandungan lignoselulosa inilah yang berperan penting dalam pembentukan struktur karbon yang kokoh setelah melalui proses karbonisasi. Temuan ini sejalan dengan laporan Febriyanto (2019) yang menyatakan bahwa kulit durian memiliki kadar selulosa yang cukup tinggi, sehingga efektif digunakan sebagai bahan dasar arang aktif. Selain itu, kadar abu dan kadar air pada kulit durian relatif tinggi, sehingga tahapan pengeringan dan karbonisasi berfungsi untuk mengurangi pengotor dan meningkatkan kualitas bahan dasar karbon. Penelitian lain menambahkan bahwa persiapan awal sangat menentukan kualitas porositas karbon aktif yang akan terbentuk (Sari et al., 2021). Oleh sebab itu, penggunaan kulit durian sebagai bahan baku tidak hanya didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah sebagai limbah pertanian, tetapi juga karena karakter kimianya yang mendukung proses aktivasi lebih lanjut.

Proses karbonisasi yang dilakukan pada suhu 500–600 °C menghasilkan rendemen arang sebesar 32–36%, angka yang sejalan dengan laporan Budiman et al. (2019) yang menemukan bahwa rendemen arang kulit durian berada pada kisaran 30–35%. Setelah dilakukan aktivasi dengan HCl pada variasi konsentrasi 0,5 M, 1 M, dan 2 M, rendemen menurun menjadi 28–31%. Penurunan ini dapat dipahami karena aktivasi kimia dengan asam menyebabkan pelarutan mineral dan zat pengotor dalam matriks karbon, sehingga massa berkurang. Fenomena ini juga dicatat oleh Ruspita et al. (2024) yang melaporkan bahwa semakin tinggi konsentrasi HCl yang digunakan, semakin banyak zat pengotor yang terlepas dari matriks karbon. Meskipun demikian, kualitas karbon aktif yang dihasilkan justru meningkat karena luas permukaan dan jumlah pori menjadi lebih besar setelah aktivasi. Dengan kata lain, meskipun terjadi kehilangan massa, keuntungan dalam hal peningkatan karakteristik adsorptif karbon aktif jauh lebih signifikan.

Analisis menggunakan FTIR memperlihatkan adanya perubahan gugus fungsi permukaan setelah aktivasi dengan HCl. Spektrum FTIR menunjukkan peningkatan intensitas pada bilangan gelombang 3400 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus hidroksil (–OH), serta pada 1700 cm^{-1} yang berhubungan dengan gugus karbonil (C=O). Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi HCl memperkaya permukaan karbon dengan gugus fungsional oksigen. Temuan ini sangat penting karena gugus polar tersebut dapat meningkatkan kemampuan karbon aktif dalam berinteraksi dengan molekul asam lemak hidroksamat yang juga bersifat polar. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Arif et al. (2023) yang menemukan bahwa karbon aktif teraktivasi HCl memiliki intensitas puncak yang lebih tinggi pada gugus oksigen, menandakan peningkatan reaktivitas permukaan. Dengan demikian, keberadaan gugus hidroksil dan karbonil setelah aktivasi menjadi faktor penting dalam meningkatkan kapasitas immobilisasi.

Selain analisis gugus fungsi, pengujian luas permukaan dengan metode BET memberikan hasil yang signifikan. Karbon aktif tanpa aktivasi memiliki luas permukaan sekitar 350 m^2/g , sedangkan karbon aktif dengan aktivasi 0,5 M, 1 M, dan 2 M menunjukkan luas permukaan masing-masing 600 m^2/g , 850 m^2/g , dan 910 m^2/g . Volume pori juga meningkat dengan pola yang serupa. Distribusi pori menunjukkan dominasi pori meso berukuran 2–50 nm, yang sangat sesuai untuk proses adsorpsi molekul organik berukuran menengah seperti asam lemak hidroksamat. Tren ini konsisten dengan penelitian Imameria (2019) yang juga menemukan bahwa aktivasi menggunakan HCl mampu membuka jaringan pori mikro–meso serta menurunkan kandungan abu dalam karbon aktif. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi konsentrasi HCl yang digunakan, semakin besar luas permukaan dan volume pori yang terbentuk, meskipun harus diimbangi dengan risiko kerusakan struktur pada konsentrasi yang terlalu tinggi.

Hasil pengamatan morfologi menggunakan SEM memperkuat temuan sebelumnya. Karbon aktif tanpa aktivasi memperlihatkan permukaan padat dengan sedikit rongga, sedangkan karbon aktif setelah aktivasi menunjukkan permukaan yang lebih berpori dengan distribusi pori lebih merata.

Aktivasi dengan HCl konsentrasi 1 M menghasilkan pori-pori yang terbuka secara optimal tanpa menyebabkan kerusakan berarti pada struktur karbon. Namun, pada konsentrasi 2 M terlihat adanya keretakan kecil pada permukaan akibat proses demineralisasi yang terlalu kuat. Hal ini sesuai dengan temuan Sari et al. (2025) yang menegaskan bahwa konsentrasi HCl yang terlalu tinggi dapat menyebabkan erosi berlebihan pada permukaan karbon. Oleh sebab itu, konsentrasi 1 M dapat dianggap sebagai kondisi optimum karena menghasilkan keseimbangan antara luas permukaan yang tinggi dan stabilitas struktur yang baik.

Pengujian immobilisasi asam lemak hidroksamat menunjukkan hasil yang sangat positif. Karbon aktif non-aktivasi hanya mampu mengikat sekitar 25 mg/g, sementara karbon aktif teraktivasi 0,5 M, 1 M, dan 2 M masing-masing memiliki kapasitas adsorpsi sebesar 45 mg/g, 72 mg/g, dan 80 mg/g. Peningkatan ini dapat dijelaskan melalui dua faktor utama, yaitu meningkatnya luas permukaan dan terbentuknya gugus fungsional polar pada permukaan karbon aktif. Namun, meskipun karbon aktif dengan aktivasi 2 M memiliki kapasitas lebih tinggi dibandingkan 1 M, selisihnya tidak signifikan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh keretakan struktur pada konsentrasi tinggi yang menyebabkan sebagian situs aktif hilang. Kondisi serupa juga dicatat oleh Ardiansyah et al. (2024) yang menemukan bahwa peningkatan konsentrasi aktivator tidak selalu menghasilkan peningkatan kapasitas adsorpsi secara linier. Oleh karena itu, konsentrasi 1 M dinilai lebih efisien karena memberikan keseimbangan antara kinerja adsorpsi dan stabilitas struktur.

Mekanisme interaksi antara karbon aktif teraktivasi dan asam lemak hidroksamat terjadi melalui mekanisme fisik dan kimia. Secara fisik, molekul hidroksamat masuk ke dalam pori mikro-meso karbon aktif, sementara secara kimia, terjadi interaksi antara gugus $-OH$ dan $C=O$ pada permukaan karbon aktif dengan gugus hidroksamat melalui ikatan hidrogen dan gaya elektrostatis. Keberadaan situs asam lemah pada permukaan karbon aktif akibat aktivasi dengan HCl juga menambah afinitas terhadap molekul hidroksamat. Mekanisme ini sesuai dengan laporan Oko et al. (2021) yang menegaskan bahwa aktivasi HCl meningkatkan jumlah situs aktif pada permukaan karbon aktif sehingga interaksi dengan senyawa organik polar menjadi lebih kuat. Penelitian lain pada karbon aktif dari kulit singkong dan tempurung kelapa juga menunjukkan interaksi kuat serupa dengan molekul polar (Sailah et al., 2020), sehingga memperkuat temuan penelitian ini.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, hasil penelitian ini konsisten dengan literatur yang ada. Budiman et al. (2019) dan Inameria (2020) melaporkan bahwa peningkatan luas permukaan dan porositas karbon aktif berdampak signifikan terhadap kemampuan adsorpsi zat organik, sedangkan penelitian oleh Ruspita et al. (2024) dan Sari et al. (2025) menekankan pentingnya optimasi konsentrasi HCl agar struktur karbon tidak rusak. Penelitian ini memperluas cakupan fungsi karbon aktif kulit durian, yang sebelumnya banyak digunakan hanya untuk penurunan COD, penghilangan warna, atau pemurnian minyak, menjadi material yang berfungsi dalam immobilisasi senyawa bioaktif. Hal ini menandakan adanya peluang besar untuk pengembangan aplikasi karbon aktif kulit durian pada bidang katalisis, farmasi, dan teknologi bioproses.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa kulit durian dapat diolah menjadi karbon aktif dengan sifat unggul apabila diaktivasi menggunakan HCl. Aktivasi dengan konsentrasi 1 M terbukti menghasilkan karbon aktif dengan keseimbangan terbaik antara luas permukaan, distribusi pori, dan stabilitas struktur, sekaligus memiliki kapasitas immobilisasi asam lemak hidroksamat yang tinggi. Implikasi praktis dari hasil ini adalah adanya peluang pemanfaatan limbah pertanian menjadi material bernilai tambah tinggi yang ramah lingkungan serta mendukung pengembangan ekonomi sirkular. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan kajian regenerasi karbon aktif setelah digunakan, studi kinetika adsorpsi, serta eksplorasi jenis senyawa bioaktif lain yang dapat diimmobilisasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi akademis, tetapi juga menawarkan solusi praktis untuk pengelolaan limbah dan pengembangan material fungsional.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kulit durian dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif yang efektif dengan aktivasi menggunakan larutan HCl. Proses karbonisasi pada suhu 500–600

°C menghasilkan arang dengan rendemen yang cukup baik, meskipun terjadi penurunan rendemen setelah aktivasi kimia akibat pelarutan pengotor. Penurunan rendemen ini justru berbanding lurus dengan peningkatan kualitas karbon aktif, yang ditunjukkan melalui peningkatan luas permukaan, volume pori, serta terbentuknya gugus fungsional polar pada permukaan karbon. Hasil FTIR menegaskan adanya penambahan gugus hidroksil dan karbonil, sementara analisis BET dan SEM memperlihatkan bahwa aktivasi HCl mampu menghasilkan struktur pori yang lebih teratur dan luas permukaan yang signifikan.

Uji immobilisasi asam lemak hidroksamat mengindikasikan peningkatan kapasitas adsorpsi seiring dengan bertambahnya konsentrasi HCl, dengan hasil tertinggi pada aktivasi 2 M sebesar 80 mg/g. Namun, karbon aktif dengan aktivasi 1 M dianggap paling optimal karena memberikan keseimbangan antara luas permukaan yang tinggi, distribusi pori yang baik, stabilitas struktur, serta kapasitas immobilisasi yang mendekati maksimum. Temuan ini konsisten dengan sejumlah penelitian terdahulu dan mempertegas bahwa konsentrasi aktivator harus dioptimalkan untuk mencegah kerusakan struktur karbon yang dapat menurunkan kinerja jangka panjang.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil membuktikan potensi kulit durian sebagai sumber karbon aktif bernilai tambah tinggi dengan aplikasi pada immobilisasi senyawa bioaktif. Implikasi praktis dari penelitian ini terletak pada pemanfaatan limbah biomassa untuk mendukung pengembangan material ramah lingkungan, sekaligus membuka peluang baru dalam bidang katalisis, farmasi, dan teknologi bioproses. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk meninjau regenerasi karbon aktif setelah digunakan, mempelajari kinetika adsorpsi lebih mendetail, serta mengeksplorasi jenis senyawa bioaktif lain yang dapat diimmobilisasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada ilmu pengetahuan, tetapi juga pada praktik pengelolaan limbah dan inovasi material fungsional berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, W. Z., Ibrahim, I., Jalaluddin, J., Kurniawan, E., & Ginting, Z. (2024). Pemanfaatan Kulit Durian Sebagai Karbon Aktif Untuk Permurnian Minyak Jelantah Dengan Variasi Zat Aktivator. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Universitas Malikussaleh*, 3(1), 00011.
- Arif, M., Fitriyana, H., Rosa Febrianingtyas, Z. A., & Marbelia, S.T., M.Sc., Ph.D, L. (2023). PEMANFAATAN KARBON AKTIF DENGAN AKTIVATOR ASAM KLOORIDA (HCL) DARI CAMPURAN LIMBAH LOW- DENSITY POLYETHYLENE (LDPE) DAN POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) DALAM MENGATASI PERMASALAHAN LIMBAH PABRIK GULA MADUKISMO DI SUNGAI BEDOG, BANTUL. *Lomba Karya Tulis Ilmiah*, 4(1), 53–67.
- Aritonang, B., Ritonga, A. H., Harefa, K., Wiratma, D. Y., & Herlina, H. (2024). Purification of used Cooking Oil using a Combination of Activated Carbon and Bentonite Adsorbents. *JURNAL FARMASIMED (JFM)*, 7(1), 31-40. <https://doi.org/10.35451/jfm.v7i1.2331>
- Budiman, J. A. P., Yulianti, I. M., & Jati, W. N. (2019). Potensi Arang Aktif dari Kulit Buah Durian (Durio Zibethinus Murr.) dengan Aktivator NaOH sebagai Penjernih Air Sumur. *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 3(3), 117-124. <https://doi.org/10.24002/biota.v3i3.1901>
- Febriyanto, P. (2019). Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif dari limbah kulit durian melalui metode hidrotermal dan aktivasi ZnCl₂. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 11(2), 97–105.
- Hayaati, R. S. R., & Ridho, R. (2020). Pengaruh Massa Arang Aktif Kulit Durian Terhadap Pengolahan Limbah Minyak Jelantah dengan Menggunakan Membran Komposit Poliamida-Arang Kulit Durian. *Jurnal Crystal: Publikasi Penelitian Kimia dan Terapannya*, 2(2), 14-27.
- Husin, A., & Hasibuan, A. (2020). Studi pengaruh variasi konsentrasi asam posfat (H₃PO₄) dan waktu perendaman karbon terhadap karakteristik karbon aktif dari kulit durian. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 9(2), 80-86.
- Inayah, I., & Ady, P. I. (2024). Kemampuan Karbon Aktif Kulit Durian (Durio Zibethinus Murray) Sebagai Media Filter Terhadap Bau Dan Zat Organik Pada Air Sumur Gali. *Sulolipu: Media*

- Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat*, 24(1), 105-109.
<https://doi.org/10.32382/sulo.v24i1.468>
- Irnameria, D. (2020). KARAKTERISASI KARBON AKTIF DARI LIMBAH KULIT DURIAN PADA SUHU KARBONISASI 300 °C MENGGUNAKAN ZAT AKTIVATOR NATRIUM HIDROKSIDA DAN ASAM SULFAT. *Journal of Nursing and Public Health*, 8(1), 23-28.
<https://doi.org/10.37676/jnph.v8i1.1009>
- Oko, S., Mustafa, M., Kurniawan, A., & Palulun, E. S. B. (2021). Pengaruh Suhu dan Konsentrasi Aktivator HCl terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Ampas Kopi. *METANA*, 17(1), 15-21. <https://doi.org/10.14710/metana.v17i1.37702>
- Ruspita, R., Agipa, A., & Kurnia, S. (2024). Activated Carbon Adsorbent from Durian Peel to Reduce COD Levels in Science Laboratory Wastewater. *Jurnal Kartika Kimia*, 7(1), 25-32.
<https://doi.org/10.26874/jkk.v7i1.226>
- Sailah, I., Mulyaningsih, F., Ismayana, A., Puspaningrum, T., Adnan, A. A., & Indrasti, N. S. (2020). KINERJA KARBON AKTIF DARI KULIT SINGKONG DALAM MENURUNKAN KONSENTRASI FOSFAT PADA AIR LIMBAH LAUNDRY. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 30(2), 180-189. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.2.180>
- Sari, A. M., Pandit, A. W., & Abdullah, S. (2021). PENGARUH VARIASI MASSA KARBON AKTIF DARI LIMBAH KULIT DURIAN (DURIO ZIBETHINUS) SEBAGAI ADSORBEN DALAM MENURUNKAN BILANGAN PEROKSIDA DAN BILANGAN ASAM PADA MINYAK GORENG BEKAS. *Jurnal Konversi*, 10(1), 1-7.
<https://doi.org/10.24853/konversi.10.1.7>
- Sari, D. K., Anwar, H., & Sumanjaya, E. (2025). Efektivitas Karbon Aktif Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) dalam Menurunkan Kandungan COD dan Detergen pada Limbah Laundry. *Agroteknika*, 8(1), 153-163. <https://doi.org/10.55043/agroteknika.v8i1.392>
- Verayana, V., Paputungan, M., & Iyabu, H. (2018). Pengaruh Aktivator HCl dan H₃PO₄ terhadap Karakteristik (Morfologi Pori) Arang Aktif Tempurung Kelapa serta Uji Adsorpsi pada Logam Timbal (Pb). *Jurnal Entropi*, 13(1), 67-75.