

ISSN (ONLINE) 2598-9936



INDONESIAN JOURNAL OF INNOVATION STUDIES
PUBLISHED BY
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SIDOARJO

Table Of Contents

Journal Cover	1
Author[s] Statement	3
Editorial Team	4
Article information	5
Check this article update (crossmark).....	5
Check this article impact	5
Cite this article	5
Title page	6
Article Title.....	6
Author information	6
Abstract	6
Article content	8

Originality Statement

The author[s] declare that this article is their own work and to the best of their knowledge it contains no materials previously published or written by another person, or substantial proportions of material which have been accepted for the published of any other published materials, except where due acknowledgement is made in the article. Any contribution made to the research by others, with whom author[s] have work, is explicitly acknowledged in the article.

Conflict of Interest Statement

The author[s] declare that this article was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright Statement

Copyright © Author(s). This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors. The full terms of this licence may be seen at <http://creativecommons.org/licences/by/4.0/legalcode>

Indonesian Journal of Innovation Studies

Vol. 27 No. 4 (2026): October
DOI: 10.21070/ijins.v27i4.2398

EDITORIAL TEAM

Editor in Chief

Dr. Hindarto, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Managing Editor

Mochammad Tanzil Multazam, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Editors

Fika Megawati, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Wiwit Wahyu Wijayanti, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Farkhod Abdurakhmonov, Silk Road International Tourism University, Uzbekistan

Bobur Sobirov, Samarkand Institute of Economics and Service, Uzbekistan

Evi Rinata, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

M Faisal Amir, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Dr. Hana Catur Wahyuni, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

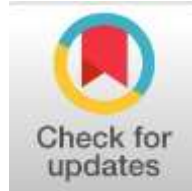
Complete list of editorial team ([link](#))

Complete list of indexing services for this journal ([link](#))

How to submit to this journal ([link](#))

Article information

Check this article update (crossmark)



Check this article impact (*)



Save this article to Mendeley



(*) Time for indexing process is various, depends on indexing database platform

Innovation of Durian Husk Biocomposite Hydrogel for Organic Pollutant Adsorption: Inovasi Hidrogel Biokomposit Kulit Durian untuk Adsorpsi Polutan Organik Limbah Cair

Indri Hertika, indrihertika@students.usu.ac.id (*)

Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Erna Frida, ernaFrida@usu.ac.id

Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Susilawati Susilawati, susilawati@usu.ac.id

Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara, Indonesia

(*) Corresponding author

Abstract

General Background Palm Oil Mill Effluent is a highly polluting industrial wastewater containing severe organic contaminant loads. **Specific Background** Conventional wastewater treatments face limitations in retention time and operational costs, necessitating advanced adsorbent materials like carbon-silica combinations. **Knowledge Gap** However, the utilization of local biomass waste, specifically combining durian peel carboxymethyl cellulose with palm kernel shell activated carbon and zeolite silica, remains unexplored for purification. **Aims** This study synthesizes and characterizes a durian peel-based biocomposite hydrogel with silica and activated carbon to reduce Chemical Oxygen Demand and Total Dissolved Solids. **Results** Characterization confirmed successful synthesis, showing a porous matrix with Si-O-Si bonds. The optimal formulation achieved water absorption of 337.56% and significantly reduced contaminants. Total Dissolved Solids dropped to 900 mg/L, satisfying regulatory standards, while Chemical Oxygen Demand decreased to 631 mg/L. The adsorption mechanism involved mechanical entrapment, electrostatic interactions, and van der Waals forces. **Novelty** This work presents a pioneering three-dimensional bio-adsorbent network integrating multi-waste agricultural derivatives. **Implications** The developed eco-friendly biocomposite offers a sustainable approach for industrial wastewater remediation.

Highlights

- ♦ The integration of agricultural biomass derivatives and zeolite creates a highly porous matrix with significant absorption capacity.
- ♦ Treatment with the optimal formulation successfully decreased dissolved solids to levels compliant with environmental quality standards.
- ♦ Contaminant removal occurs primarily through pore diffusion, mechanical entrapment, and electrostatic interactions.

Keywords

Biocomposite Hydrogel; Palm Oil Mill Effluent; Durian Husk Cellulose; Organic Pollutant Adsorption; Chemical Oxygen Demand

PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis yang berkontribusi besar terhadap perekonomian Indonesia. Namun, di balik kontribusi ekonominya yang signifikan, industri ini juga menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar yang dikenal sebagai Palm Oil Mill Effluent (POME). Setiap ton minyak kelapa sawit yang diproduksi dapat menghasilkan sekitar 3,05 ton POME [1]. POME memiliki karakteristik pencemar yang sangat tinggi, di antaranya Chemical Oxygen Demand (COD) sekitar 50.000 mg/L, Total Dissolved Solids (TDS) yang berkisar antara 10.000–40.000 mg/L [2]. Kandungan bahan organik yang tinggi tersebut berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan serius apabila tidak diolah secara optimal.

Pengolahan limbah cair kelapa sawit umumnya masih menggunakan sistem kolam anaerobik bertingkat (anaerobic ponding system). Metode ini relatif sederhana, namun memiliki kelemahan seperti waktu retensi yang lama (80–120 hari), kebutuhan lahan luas, serta efisiensi pengolahan yang tidak stabil. Selain itu, metode ini berpotensi menghasilkan emisi gas metana serta pencemaran sekunder akibat kebocoran atau luapan kolam [3]. Teknologi alternatif seperti Advanced Oxidation Processes (AOPs) dan membran memang memiliki efisiensi tinggi, namun masih terkendala biaya operasional yang besar [4].

Berdasarkan hasil observasi lapangan dan uji laboratorium terhadap sampel limbah cair yang diperoleh dari salah satu pabrik kelapa sawit di wilayah Sumatera Utara (identitas industri tidak dipublikasikan karena alasan kerahasiaan), diketahui bahwa sistem pengolahan limbah cair yang diterapkan belum sepenuhnya mampu memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan. Observasi langsung pada unit pengolahan menunjukkan bahwa kolam Seeding Pond dan kolam anaerobik telah mencapai kapasitas maksimum sehingga tidak lagi memiliki waktu tinggal yang memadai. Selain itu, meskipun pihak pabrik telah menerapkan teknologi AOPs, efektivitasnya masih belum optimal.

Sejalan dengan hasil pengujian menggunakan fasilitas industri dan laboratorium, POME masih memiliki beban organik tinggi yang ditunjukkan oleh nilai COD sebesar 1145 mg/L dan TDS sebesar 2190 mg/L. Jika dibandingkan dengan baku mutu air limbah industri minyak sawit berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014, batas maksimum yang diperbolehkan adalah COD 350 mg/L dan TDS 1000 mg/L. Dengan demikian, diperlukan teknologi pengolahan lanjutan yang lebih efektif untuk menurunkan kandungan bahan organik sebelum limbah dibuang ke badan air.

Salah satu metode yang berkembang dalam pengolahan limbah cair adalah adsorben konvensional. Metode ini memiliki keunggulan berupa proses yang sederhana, biaya relatif rendah, serta kemampuan tinggi dalam menghilangkan kontaminan organik [5]. Beberapa bahan yang sering digunakan sebagai adsorben anorganik seperti zeolit, silika dan pasir kuarsa, mineral alam, maupun resin penukar ion. Namun, adsorben konvensional memiliki keterbatasan pada luas permukaan, jumlah situs aktif, dan efisiensi adsorpsi [6].

Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang banyak digunakan karena memiliki luas permukaan tinggi dan struktur pori mikro–mesopori. Pemanfaatan biomassa seperti cangkang kelapa sawit (Palm Kernel Shell) sebagai bahan baku karbon aktif dengan proses karbonisasi dan aktivasi, yang memberikan nilai tambah dalam konsep circular economy [7]. Proses karbonisasi adalah penguraian selulosa organik menjadi unsur karbon dan pengeluaran unsur-unsur non karbon yang berlangsung pada suhu tinggi, yaitu sekitar 500–700 °C selama 3–5 jam [8]. Sebagai et al. [9] melaporkan bahwa karbonisasi cangkang kelapa sawit pada suhu 700°C selama 3 jam mampu menghasilkan luas permukaan, volume pori, dan kandungan karbon aktif tinggi. Peneliti menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis PKS mampu menurunkan nilai BOD hingga 93,52%, COD sebesar 92,79%, TSS sebesar 94,84%, serta warna hingga 89,21% pada kondisi operasi optimum [10]. Untuk meningkatkan performa adsorben, pengembangan material komposit melalui penambahan nanomaterial seperti silika (SiO₂) menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan.

Silika (SiO₂) memiliki luas permukaan yang tinggi serta gugus hidroksil (–OH) yang melimpah pada permukaannya. Keberadaan gugus tersebut mampu meningkatkan jumlah situs aktif, memperbaiki distribusi pori, meningkatkan stabilitas struktur material, dan memperkuat interaksi antara permukaan adsorben dan molekul polutan melalui mekanisme ikatan hidrogen maupun interaksi elektrostatik [11]. Sumber silika yang potensial di Indonesia adalah zeolit alam, dan berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku nano-silika melalui proses aktivasi dan modifikasi struktur [12].

Komposit karbon aktif–SiO₂ dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi adsorpsi terhadap kontaminan organik dalam air limbah karena terbentuknya struktur mikro dan mesopori yang lebih berkembang serta meningkatnya luas permukaan spesifik adsorben [13]. Sejalan dengan penelitian Susilawati et al. [12] melaporkan bahwa komposit zeolit alam Pahae dan karbon aktif berbasis kulit durian mampu menurunkan kadar fosfat hingga ±85%. Dalam pengembangan adsorben modern, penggabungan karbon aktif–SiO₂ ke dalam sistem hidrogel diharapkan dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi dalam pengolahan limbah cair.

Hidrogel merupakan jaringan polimer tiga dimensi yang mampu menyerap air dalam jumlah besar serta memiliki gugus hidrofilik aktif seperti –OH, –COOH, dan –NH₂ yang berperan dalam proses adsorpsi. Penggunaan biopolimer alami sebagai bahan dasar hidrogel, seperti carboxymethyl cellulose (CMC), menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan polimer sintesis [14]. Salah satu sumber CMC yang potensial adalah kulit durian, khususnya bagian mesokarp putih yang mengandung selulosa sekitar 63% dan dapat dimodifikasi menjadi CMC [15].

CMC merupakan turunan selulosa semi-kristalin yang mudah larut dalam air, bersifat hidrofilik, serta menunjukkan gugus fungsional yang mampu berinteraksi dengan molekul polutan dalam limbah cair. Selain itu, CMC juga bersifat

biokompatibel, biodegradabel, dan ekonomis [16]. CMC juga diketahui mampu membentuk jaringan gel yang stabil ketika dikombinasikan dengan biomolekul lainnya, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai komponen utama dalam sintesis hidrogel adsorben [17]. Kulit durian merupakan biomassa yang melimpah di Sumatera Utara namun belum dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, pengolahannya menjadi produk bernilai tambah seperti bahan komposit, yang berpotensi mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan nilai ekonominya [18]. Kombinasi CMC dengan material berpori seperti karbon aktif telah dilaporkan mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap polutan, terutama karena kontribusi karbon aktif yang memiliki luas permukaan spesifik tinggi serta mampu menyediakan lebih banyak situs aktif untuk proses penyerapan. Selain itu, penambahan filler anorganik ke dalam matriks CMC juga diketahui dapat memperkuat kemampuan adsorpsi melalui peningkatan jumlah pori dan terbentuknya interaksi elektrostatik yang lebih kuat antara permukaan adsorben dan zat warna methylene blue, dengan efisiensi penghilangan mencapai lebih dari 98% pada kondisi optimum [19]. Hasil penelitian tersebut sejalan dengan temuan yang dilaporkan oleh Afdhal et al. [20], yang menunjukkan bahwa komposit selulosa-graphene oxide mampu meningkatkan efisiensi penyerapan zat warna Rhodamine B dari sekitar 42,04% pada selulosa murni menjadi hingga 98,91%, bahkan mencapai 99,50% pada kondisi pH optimum, sehingga menunjukkan peningkatan kemampuan adsorpsi yang sangat signifikan.

Berdasarkan berbagai penelitian sebelumnya, material berbasis karbon aktif, SiO_2 maupun hidrogel menunjukkan kemampuan adsorpsi yang baik. Namun belum terdapat kajian yang memanfaatkan kombinasi CMC kulit durian, karbon aktif cangkang kelapa sawit, dan SiO_2 untuk adsorpsi COD dan TDS pada POME sehingga penelitian ini diharapkan menghasilkan adsorben dengan performa yang lebih baik. Oleh karena itu, Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada Sintesis Hidrogel Biokomposit Berbasis Kulit Durian dengan Penambahan Cangkang Kelapa Sawit dan SiO_2 untuk Adsorpsi COD dan TDS pada POME.

METODE

A. Tempat dan waktu

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Penelitian Terpadu USU, Laboratorium Fisika UNIMED, Politeknik Manufaktur Bandung, Laboratorium Farmasi USU. Penelitian ini dilaksanakan Tahun 2026.

B. Alat dan bahan penelitian

1. Alat-Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gelas ukur, beaker glass, petri dish, pipet volume, magnetic stirrer bar, hotplate stirrer, kertas saring, spatula, aluminium foil, neraca analitik, ayakan 200 mesh, blender, freezer, oven, dan pH universal. Peralatan tersebut digunakan untuk mengukur dan menyiapkan bahan, mencampur serta mengaduk larutan, memanaskan, menyaring, menghaluskan, mengeringkan, dan menyimpan sampel selama proses sintesis hidrogel. Adapun peralatan karakterisasi meliputi FTIR untuk menganalisis gugus fungsi, PSA untuk mengukur distribusi ukuran partikel, SEM-EDX untuk mengamati morfologi dan kandungan unsur, XRD untuk mengidentifikasi struktur kristal dan fase material, XRF untuk menentukan komposisi unsur, serta alat uji kualitas air untuk mengetahui tingkat pencemaran zat terlarut.

2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kulit durian, aquadest, NaOH dengan konsentrasi 10%, 20%, dan 30%, PVA, alginat, cangkang kelapa sawit, SiO_2 zeolit, HCl 2 M, natrium monokloro asetat, isopropanol 95%, dan etanol 90%. PVA yang digunakan berasal dari Sigma Aldrich, sedangkan NaOH dan HCl berasal dari Merck, natrium monokloro asetat dari Merck, serta bahan lainnya digunakan sesuai kebutuhan proses sintesis.

C. Variabel Penelitian

Penelitian menggunakan formulasi hidrogel dengan variasi pengisi karbon aktif dan SiO_2 , sedangkan jumlah PVA, alginat (ALG), dan CMC dibuat tetap. Sampel H0 terdiri atas PVA 30 g, ALG 6 g, CMC 4 g tanpa karbon aktif dan SiO_2 ; H1 terdiri atas 30 g PVA, 6 g ALG, 4 g CMC, dan 20 g SiO_2 ; H2 terdiri atas 30 g PVA, 6 g ALG, 4 g CMC, dan 20 g karbon aktif; H3 terdiri atas 30 g PVA, 6 g ALG, 4 g CMC, 10 g karbon aktif, dan 10 g SiO_2 ; sedangkan H4 terdiri atas 30 g PVA, 6 g ALG, 4 g CMC, 15 g karbon aktif, dan 5 g SiO_2 . Kode H menunjukkan sampel hidrogel dengan variasi komposisi karbon aktif dan SiO_2 .

D. Prosedur Penelitian

1. Pembuatan CMC Kulit Durian

Limbah kulit durian dicuci, dipotong, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 70°C selama 12 jam dan dihaluskan menjadi serbuk. Serbuk diekstraksi menggunakan NaOH 10% (w/v) dengan perbandingan 1:10, diaduk pada 300 rpm dan 100°C selama 2 jam, kemudian disaring dan dicuci hingga pH netral. Pulp selanjutnya dilakukan bleaching menggunakan larutan NaOH 10% (w/v) dalam dua tahap dengan perbandingan 1:5 pada 300 rpm dan 80°C selama 1 jam. Pulp putih disaring, dicuci hingga netral, dikeringkan pada 60°C selama 12 jam, lalu dihaluskan menjadi alfa selulosa. Alfa selulosa direaksikan dengan isopropanol dan NaOH 20% dengan perbandingan 1:20 dan 1:6 pada 60°C dan 250 rpm. Natrium monokloro asetat ditambahkan bertahap dengan perbandingan 1:1 hingga homogen, ditandai dengan pulp merata dilarutan. Kemudian campuran disaring, dicuci menggunakan etanol hingga netral, dikeringkan selama 24 jam, dihaluskan, dan diayak

100 mesh untuk memperoleh CMC kulit durian.

2. Pembuatan Karbon Aktif

Cangkang kelapa sawit dicuci dan dikeringkan selama 1 hari, kemudian digiling hingga ukuran 100 mesh. Serbuk dikarbonisasi menggunakan furnace pada suhu 700°C selama 4 jam. Karbon selanjutnya diaktivasi secara kimia dengan HCl 2 M pada perbandingan 1:4, diaduk selama 2 jam dan didiamkan selama 24 jam. Karbon disaring, dicuci dengan aquadest hingga pH netral, kemudian dikeringkan pada 100°C selama 24 jam. Karbon kering dihaluskan menggunakan ball milling selama 3 jam pada 300 rpm untuk memperoleh karbon aktif.

3. Pembuatan Hidrogel Biokomposit

Sebanyak 30 g PVA dilarutkan dalam 300 mL aquadest dan diaduk pada 90°C selama 30 menit. Sebanyak 4 g CMC kulit durian ditambahkan secara bertahap hingga homogen, ditandai dengan tidak ada gumpalan. Karbon aktif dan SiO₂ sesuai variasi Tabel 3.4 didispersikan dalam 100 mL aquadest dan diaduk selama 10 menit, kemudian ditambahkan ke dalam larutan PVA-CMC dan diaduk pada 80°C, 300 rpm selama 30 menit. Sebanyak 6 g alginat ditambahkan bertahap hingga terbentuk gel. Gel dicetak, dikeringkan pada suhu ruang, kemudian direndam dalam CaCl₂ 4% selama 6 jam untuk proses ikat silang. Hidrogel dicuci hingga netral, dibekukan pada -20°C selama 24 jam, kemudian dikeringkan dengan freeze drying untuk menghasilkan hidrogel berpori.

4. Pengujian Daya Serap Air dan Porositas

Pengujian dilakukan dengan menimbang masing-masing variasi hidrogel, kemudian merendamnya dalam 50 mL aquadest selama 30 dan 60 menit. Massa hidrogel setelah perendaman ditimbang dan digunakan untuk menentukan persentase daya serap air dan porositas.

5. Pengujian Adsorpsi POME

Kualitas POME dianalisis berdasarkan parameter COD dan TDS. Sebanyak 100 mL POME dicampurkan dengan 4 g hidrogel biokomposit sesuai variasi sampel dan dilakukan adsorpsi pada suhu ruang selama 30–120 menit. Setelah proses selesai, larutan diambil untuk analisis COD dan TDS. Hidrogel kemudian dibilas dengan aquadest untuk menghilangkan sisa POME pada permukaan, dikeringkan, dan dianalisis menggunakan FTIR untuk membandingkan gugus fungsi hidrogel sebelum dan sesudah adsorpsi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis X-Ray Fluorescence (XRF)

Karakterisasi X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur dan senyawa zeolit setelah diaktivasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Unsur dan Senyawa	Konsentrasi (%)
SiO ₂	69,04
Al ₂ O ₃	14,91
K ₂ O	6,98
Fe ₂ O ₃	4,07
CaO	3,54
TiO ₂	0,81
P ₂ O ₅	0,17
Cl	0,11
ZrO ₂	0,08
BaO	0,07
SrO	0,05
MnO	0,05
Rb ₂ O	0,05
V ₂ O ₅	0,02
ZnO	0,01
Y ₂ O ₃	0,01
PbO	0,01

Tabel 1 Hasil Karakterisasi XRF Zeolit sesudah Diaktivasi

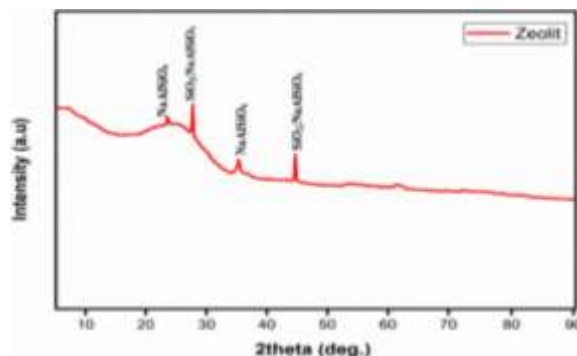
Tabel 1 menunjukkan bahwa zeolit yang digunakan didominasi oleh senyawa SiO₂ sebesar 69,04% dan Al₂O₃ sebesar 14,91%. Kandungan SiO₂ yang tinggi menunjukkan bahwa zeolit memiliki struktur aluminosilikat yang baik dan berpotensi digunakan sebagai material adsorben. Keberadaan Al₂O₃ juga menunjukkan bahwa struktur dasar zeolit tetap terjaga setelah proses aktivasi. Selain itu, kandungan oksida lain seperti K₂O, Fe₂O₃, dan CaO masih terdeteksi dalam jumlah yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi menggunakan HCl mampu mengurangi sebagian senyawa pengotor pada zeolit. Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya menyatakan bahwa zeolit alam didominasi oleh SiO₂ dan Al₂O₃ serta mengandung sejumlah oksida logam sebagai pengotor [21].

Hasil karakterisasi XRF zeolit menunjukkan bahwa memiliki kandungan silika yang tinggi dan komposisi yang relatif stabil, sehingga berpotensi digunakan sebagai material pendukung dalam sintesis biokomposit adsorben untuk adsorpsi COD dan

TDS pada POME.

B. Analisis Hasil Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi XRD dilakukan untuk menganalisis pola difraksi sampel, mengidentifikasi fase yang terbentuk, menentukan puncak difraksi dengan intensitas tertinggi, serta mengetahui struktur kristal material yang terbentuk pada sampel zeolit.



Gambar 1 Kurva hasil uji XRD sampel Zeolit

Berdasarkan pola difraksi yang diperoleh pada gambar 4.1 sampel zeolit, pola difraksi menunjukkan adanya puncak yang menandakan peningkatan kristalinitas material. Beberapa puncak yang teridentifikasi menunjukkan keberadaan fasa sodium aluminosilikat ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) yang muncul pada sekitar $2\theta = 23.53^\circ$, 27.68° , 35.11° , dan 44.6° sesuai referensi code ICSD (01-075-1860). Fasa tersebut terbentuk akibat interaksi antara silika dan alumina dengan ion Na^+ dari larutan NaOH selama proses aktivasi. Selain itu, pada pola difraksi zeolit juga masih ditemukan fase SiO_2 yang menunjukkan bahwa sebagian silika tetap berada dalam bentuk silika oksida. Puncak difraksi yang lebih tajam menunjukkan bahwa zeolit memiliki struktur semi-kristalin, sejalan dengan penelitian sebelumnya [22].

Sampel	2θ (deg)	FWHM (deg)	d (Å)	Ukuran Kristal (D)(nm)	Derajat Kristalin (%)
Zeolit	44.608	0,162	2.0313	53	64.61

Tabel 2 Parameter puncak tertinggi Zeolit

Mengacu pada Tabel 2, ukuran kristal pada sampel zeolit memiliki ukuran kristal sebesar 53 nm dengan nilai FWHM sebesar $0,162^\circ$. Berdasarkan pola difraksi yang diperoleh, zeolit memiliki struktur semi-kristalin yang ditandai oleh keberadaan fase amorf dan fase kristalin. Hasil perhitungan menunjukkan ukuran kristal zeolit sebesar 53 nm dengan derajat kristalinitas sebesar 64,61%. Nilai derajat kristalinitas yang lebih tinggi pada zeolit menunjukkan bahwa struktur kristalnya lebih teratur. Selain itu, pada sampel zeolit teridentifikasi fase sodium aluminosilikat ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), dan fase SiO_2 mengkonfirmasi keberadaan silika pada material, sejalan dengan penelitian Fatimah [23].

Ukuran kristal zeolit sebesar 53 nm menunjukkan bahwa material memiliki domain kristalin pada skala nanometer. Karakteristik ini berpotensi mendukung proses adsorpsi melalui penyediaan permukaan yang dapat berinteraksi dengan komponen pencemar dalam limbah POME. Struktur aluminosilikat zeolit juga berpotensi memfasilitasi interaksi dan perpindahan molekul melalui pori-porinya. Namun, ukuran kristal tidak secara langsung menunjukkan kapasitas penjeratan molekul organik karena kemampuan adsorpsi turut dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, serta kesesuaian ukuran molekul adsorbat dengan pori material. Oleh karena itu, ukuran kristal sebesar 53 nm dapat dipandang sebagai salah satu karakteristik pendukung potensi adsorpsi zeolit, yang kontribusinya terhadap penurunan COD dan TDS perlu dikaji bersama hasil pengujian adsorpsi dan karakterisasi pori.

C. Analisis Kualitas karbon Aktif

Karakterisasi karbon aktif dilakukan untuk mengetahui kualitas dan karakteristik karbon yang dihasilkan setelah proses karbonisasi dan aktivasi. Karakteristik tersebut dapat memengaruhi kinerja sampel CKS yang dihasilkan sesuai dan layak digunakan sebagai adsorben.

Parameter	Hasil Uji	SNI No. 06-3730-1995
Fix Carbon (Karbon Terikat)	70,3%	Min. 65%
Kadar Air	8,61%	maks.15%
Kadar Abu	3,82%	maks. 10%
Kadar zat mudah menguap (Yang hilang pada pemanasan 950°C)	25,88%	maks. 25%

Tabel 3 Hasil karakterisasi kualitas karbon aktif CKS

Berdasarkan hasil pengujian karbon aktif pada Tabel 3, diperoleh nilai karbon terikat (fixed carbon) sebesar 70,3%, kadar

air sebesar 8,61%, dan kadar abu sebesar 3,82%. Berdasarkan SNI No. 06-3730-1995, ketiga parameter tersebut telah memenuhi persyaratan mutu karbon aktif. Namun, untuk melengkapi evaluasi kualitas karbon aktif, parameter yang hilang pada pemanasan 950°C juga perlu diketahui.

Karena pengujian parameter tersebut tidak dapat dilakukan secara langsung akibat keterbatasan fasilitas selama penelitian, nilainya dihitung berdasarkan hasil karakterisasi yang diperoleh menggunakan perhitungan sesuai SNI No. 06-3730-1995.

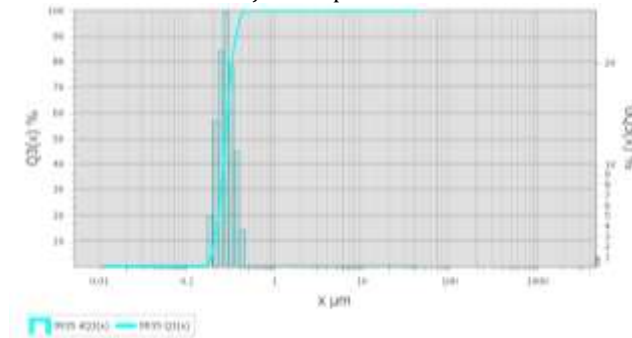
Nilai karbon terikat sebesar 70,3% menunjukkan bahwa sampel CKS memiliki kandungan karbon yang cukup tinggi. Nilai tersebut juga sejalan dengan penelitian Wahyuni dan Fathoni [8], menyatakan bahwa arang dengan kadar karbon terikat pada kisaran 70–80% memiliki potensi yang baik untuk dikembangkan menjadi karbon aktif. Kandungan karbon terikat yang tinggi umumnya menunjukkan bahwa material memiliki fraksi karbon yang lebih dominan dibandingkan komponen non-karbon. Kadar air karbon aktif CKS sebesar 8,61% juga telah memenuhi persyaratan SNI. Nilai kadar air yang relatif rendah menunjukkan bahwa proses pengeringan setelah aktivasi telah berlangsung dengan baik, sehingga berpotensi meningkatkan ketersediaan permukaan aktif dalam proses adsorpsi [24]. Selain itu, kadar abu yang diperoleh sebesar 3,82% berada jauh di bawah batas maksimum SNI sebesar 10%. Rendahnya kadar abu menunjukkan bahwa kandungan oksida logam yang tersisa dalam karbon aktif relatif kecil [24]. Kadar abu yang rendah diharapkan dapat mempertahankan ketersediaan pori dan luas permukaan karbon aktif sehingga dapat mendukung penggunaannya sebagai adsorpsi, sejalan dengan penelitian Suryani & Destiarti [25].

Parameter zat yang hilang pada pemanasan 950°C diperoleh sebesar 25,88%. Nilai tersebut sedikit melebihi batas maksimum yang ditetapkan dalam SNI sebesar 25%. Hal ini menunjukkan bahwa sampel masih ditutupi oleh senyawa nonkarbon sehingga mempengaruhi kemampuan daya serapnya. Nilai yang sedikit melebihi standar tersebut kemungkinan berkaitan dengan rendahnya suhu proses karbonisasi dan aktivasi, kadar zat mudah menguap arang aktif cenderung mengalami penurunan seiring dengan kenaikan suhu dan lama aktivasi dinaikkan, disebabkan oleh lepasnya ikatan senyawa-senyawa pada pori-pori karbon aktif [26].

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi menunjukkan bahwa karbon aktif CKS telah memenuhi persyaratan SNI untuk parameter karbon terikat, kadar air, dan kadar abu. Meskipun demikian, parameter zat yang hilang pada pemanasan 950°C menunjukkan nilai yang sedikit di atas batas standar. Oleh karena itu, karbon aktif yang dihasilkan dapat dikategorikan memiliki kualitas yang cukup baik berdasarkan sebagian besar parameter yang diuji dan selanjutnya digunakan sebagai material adsorben dalam pembuatan hidrogel biokomposit. Namun, karakterisasi tambahan, seperti luas permukaan dan struktur pori, tetap diperlukan untuk mengetahui kemampuan adsorpsi karbon aktif yang dihasilkan.

D. Analisis Particle Size Analyzer (PSA)

Karakterisasi Particle Size Analyzer (PSA) dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel karbon aktif cangkang kelapa sawit (CKS) dan silika zeolit setelah proses aktivasi. Semakin kecil ukuran partikel merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap luas permukaan spesifik material, sehingga dapat mempengaruhi kemampuan adsorpsi suatu adsorben. Hasil karakterisasi PSA CKS dan zeolit ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3



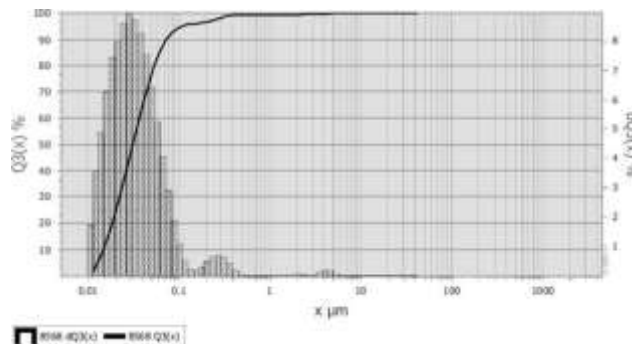
Gambar 2 Distribusi Ukuran Partikel CKS Berdasarkan Hasil PSA

Parameter	Nilai
<i>Mean (µm)</i>	0,27945
<i>Median (µm)</i>	0,27355
<i>Mode(µm)</i>	0,27526

Tabel 3 Hasil Karakterisasi PSA CKS

Berdasarkan Gambar 2 dan Tabel 4 diperoleh nilai mean, median, dan mode ukuran partikel CKS masing-masing sebesar 0,27945 µm, 0,27355 µm, dan 4,02377 µm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel CKS berada pada rentang submikropartikel. Nilai mean sebesar 0,27945 µm setara dengan 279,45 nm, yang menunjukkan bahwa proses preparasi yang dilakukan telah menghasilkan partikel dengan ukuran yang relatif kecil. Kurva distribusi ukuran partikel CKS yang relatif sempit memiliki ukuran seragam dan kecil menunjukkan bahwa proses preparasi yang dilakukan mampu menghasilkan partikel yang dapat meningkatkan luas permukaan spesifik yang lebih besar antara adsorben dan adsorbat sehingga dapat mendukung proses adsorpsi yang lebih efektif [27].

Berdasarkan hasil analisis PSA, dapat disimpulkan bahwa CKS memiliki karakteristik yang baik sebagai adsorben. Oleh karena itu, CKS berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsi biokomposit terhadap COD dan TDS melalui peningkatan luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tersedia.



Gambar 3 Distribusi Ukuran Partikel Zeolit Berdasarkan Hasil PSA

Parameter	Nilai
Mean (μm)	0,06732
Median (μm)	0,03138
Mode (μm)	0,01136

Tabel 4 Hasil Karakterisasi PSA Zeolit

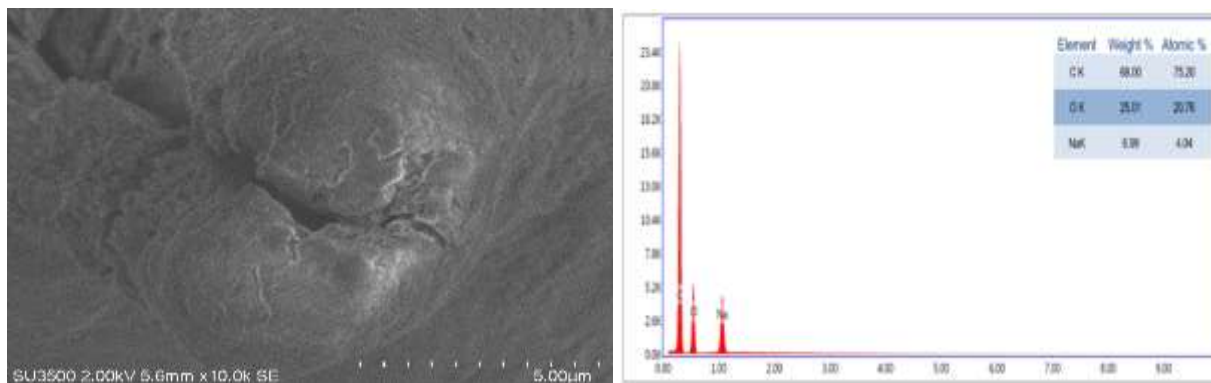
Berdasarkan Gambar 3 dan Tabel 5 diperoleh nilai mean, median, dan mode ukuran partikel zeolit masing-masing sebesar 0,06732 μm , 0,03138 μm , dan 0,01136 μm . Hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel zeolit berada pada rentang nanopartikel. Nilai mean sebesar 0,06732 μm setara dengan 67,32 nm, yang menunjukkan bahwa proses preparasi yang dilakukan telah menghasilkan partikel berukuran nano yang berpotensi meningkatkan jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan material, serta kurva distribusi ukuran partikel zeolit menunjukkan sebaran ukuran partikel yang relatif sempit. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sebagian besar partikel zeolit memiliki ukuran yang lebih seragam, ukuran partikel yang kecil dan seragam dapat meningkatkan luas kontak antara adsorben dan adsorbat sehingga dapat mendukung proses adsorpsi yang lebih efektif. Selain itu, struktur pori yang dimiliki zeolit memungkinkan berbagai senyawa organik dan ion terlarut yang terdapat dalam POME berinteraksi dengan permukaan maupun masuk ke dalam pori material sehingga dapat mendukung proses adsorpsi komponen pencemar dalam POME [28]

Berdasarkan hasil analisis PSA, dapat disimpulkan bahwa ukuran partikel rata-rata (mean) CKS sebesar 0,27945 μm atau setara dengan 279,45 nm, sedangkan ukuran partikel rata-rata zeolit sebesar 0,06732 μm atau setara dengan 67,32 nm, ukuran partikel zeolit lebih kecil dibandingkan dengan CKS, masing-masing sebesar 67,32 nm dan 279,45 nm. Ukuran partikel zeolit yang lebih kecil berpotensi meningkatkan luas kontak antara adsorben dan limbah POME, sedangkan struktur aluminosilikatnya berpotensi mendukung interaksi dengan komponen pencemar. Kombinasi zeolit dan karbon aktif CKS dalam matriks CMC, alginat, dan PVA diharapkan dapat menghasilkan hidrogel biokomposit dengan karakteristik yang saling melengkapi dan mendukung proses adsorpsi dalam menurunkan nilai COD dan TDS.

Jika dikaitkan dengan hasil XRD, ukuran kristal zeolit sebesar 53 nm relatif mendekati ukuran partikel rata-rata sebesar 67,32 nm berdasarkan PSA. Meskipun demikian, kedua parameter tersebut mengukur karakteristik yang berbeda, yaitu ukuran domain kristalin dan ukuran partikel. Hasil PSA juga menunjukkan bahwa ukuran partikel rata-rata zeolit lebih kecil dibandingkan dengan CKS, masing-masing sebesar 67,32 nm dan 279,45 nm. Ukuran partikel zeolit yang lebih kecil berpotensi meningkatkan luas kontak antara adsorben dan limbah POME, sedangkan struktur aluminosilikatnya berpotensi mendukung interaksi dengan komponen pencemar. Kombinasi zeolit dan karbon aktif CKS dalam matriks CMC, alginat, dan PVA diharapkan menghasilkan hidrogel biokomposit dengan karakteristik yang saling melengkapi dalam proses adsorpsi COD dan TDS. Namun, kontribusi masing-masing material terhadap kinerja adsorpsi perlu dikonfirmasi melalui pengujian luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, dan kapasitas adsorpsi.

E. Analisis Hasil Karakterisasi SEM-EDX

SEM-EDX digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan dan komposisi unsur penyusun adsorben biokomposit. Karakterisasi morfologi, bentuk permukaan, distribusi partikel, pori, dan homogenitas material dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), sedangkan identifikasi unsur dilakukan menggunakan Energy Dispersive X-ray (EDX)[29].

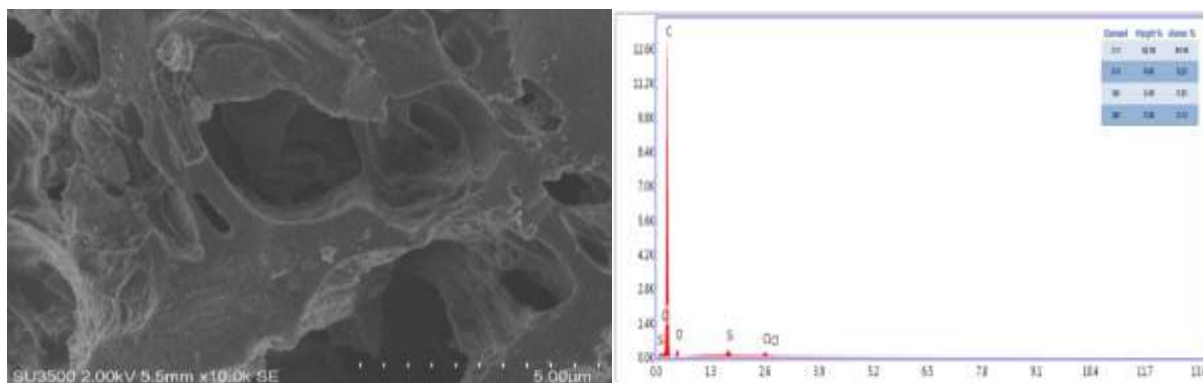


Gambar 4 Hasil analisis SEM sampel CMC KD

Hasil analisis SEM sampel CMC kulit durian pada perbesaran 10.000×, terlihat adanya struktur permukaan yang lebih kompleks dengan bagian yang membentuk agregasi, dapat dikaitkan dengan perubahan struktur bahan lignoselulosa kulit durian selama tahapan sintesis, sebagian komponen non-selulosa dapat dihilangkan sehingga struktur selulosa mengalami perubahan. Selanjutnya, proses karboksimetilasi menyebabkan terjadinya modifikasi pada rantai selulosa melalui penggantian sebagian gugus hidroksil ($-OH$) dengan gugus karboksimetil ($-CH_2COO^-$). Namun demikian, perubahan morfologi yang diamati melalui SEM tidak dapat digunakan sebagai bukti tunggal terbentuknya CMC karena karakterisasi SEM hanya memberikan informasi mengenai bentuk dan morfologi permukaan material.

Analisis EDX dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur yang terdapat pada sampel hasil sintesis. Berdasarkan hasil analisis EDX, teridentifikasi tiga unsur utama, yaitu karbon (C), oksigen (O), dan natrium (Na). Komposisi unsur berdasarkan weight percentage menunjukkan bahwa karbon merupakan unsur dominan dengan persentase sebesar 68,00%, oksigen sebesar 25,01% dan natrium sebesar 6,99%. Berdasarkan atomic percentage, karbon memiliki nilai sebesar 75,20%, oksigen sebesar 20,76%, dan natrium sebesar 4,04%. Dominannya unsur karbon sebesar 68,00% menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki komponen berbasis karbon yang tinggi, hal ini sesuai dengan karakteristik dasar selulosa yang merupakan polisakarida dengan kerangka utama berupa rantai karbon yang mengandung gugus hidroksil. Kandungan oksigen sebesar 25,01% juga menunjukkan keberadaan gugus yang mengandung oksigen dalam struktur material, seperti gugus hidroksil dan gugus eter yang terdapat pada struktur selulosa maupun gugus karboksimetil yang terbentuk selama proses modifikasi. Keberadaan unsur natrium sebesar 6,99% menjadi salah satu hasil proses karboksimetilasi, khususnya apabila sintesis CMC dilakukan menggunakan NaOH dan natrium monokloroasetat dapat mengindikasikan adanya residu yang berasosiasi dengan gugus karboksimetil yang mempengaruhi kualitas CMC.

Berdasarkan hasil karakterisasi SEM-EDX, dapat disimpulkan bahwa proses sintesis dapat menjadi data pendukung bahwa proses sintesis dan karboksimetilasi selulosa telah berlangsung. Namun, untuk memastikan terbentuknya CMC secara kimia, hasil SEM-EDX perlu dikonfirmasi dengan karakterisasi FTIR, terutama melalui identifikasi gugus fungsi yang berkaitan dengan gugus karboksimetil.



Gambar 5 Hasil analisis SEM sampel karbon aktif CKS

Hasil analisis SEM sampel karbon aktif Cangkang kelapa sawit pada perbesaran 10.000×, struktur permukaan karbon terlihat lebih jelas. Permukaan sampel menunjukkan adanya rongga atau pori dengan ukuran dan bentuk yang bervariasi serta struktur permukaan yang tidak rata, struktur berpori tersebut menunjukkan perubahan morfologi karbon akibat proses karbonisasi dan aktivasi.

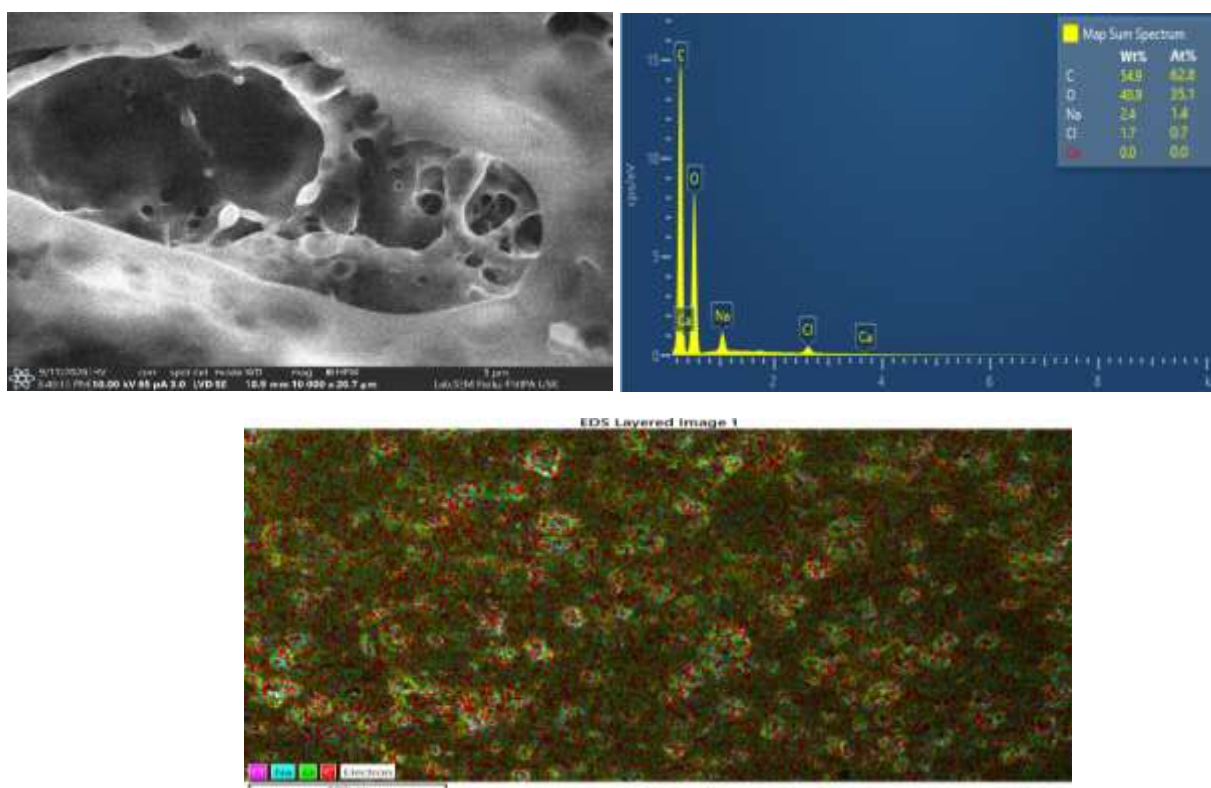
Terbentuknya pori pada permukaan karbon aktif berkaitan dengan proses pelepasan komponen pengotor dari material karbon selama proses karbonisasi dan aktivasi. Proses tersebut dapat membuka rongga-rongga pada struktur karbon sehingga menghasilkan permukaan yang lebih kasar dan berpori. Keberadaan tersebut merupakan karakteristik penting karbon aktif karena menyediakan luas permukaan dan situs aktif yang dapat berperan dalam proses adsorpsi.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa karbon aktif dari cangkang kelapa sawit memiliki morfologi permukaan yang heterogen, kasar, dan berpori. Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa karbon hasil

sintesis berpotensi digunakan sebagai material adsorben dan sebagai pengisi (filler) dalam pembentukan hidrogel biokomposit.

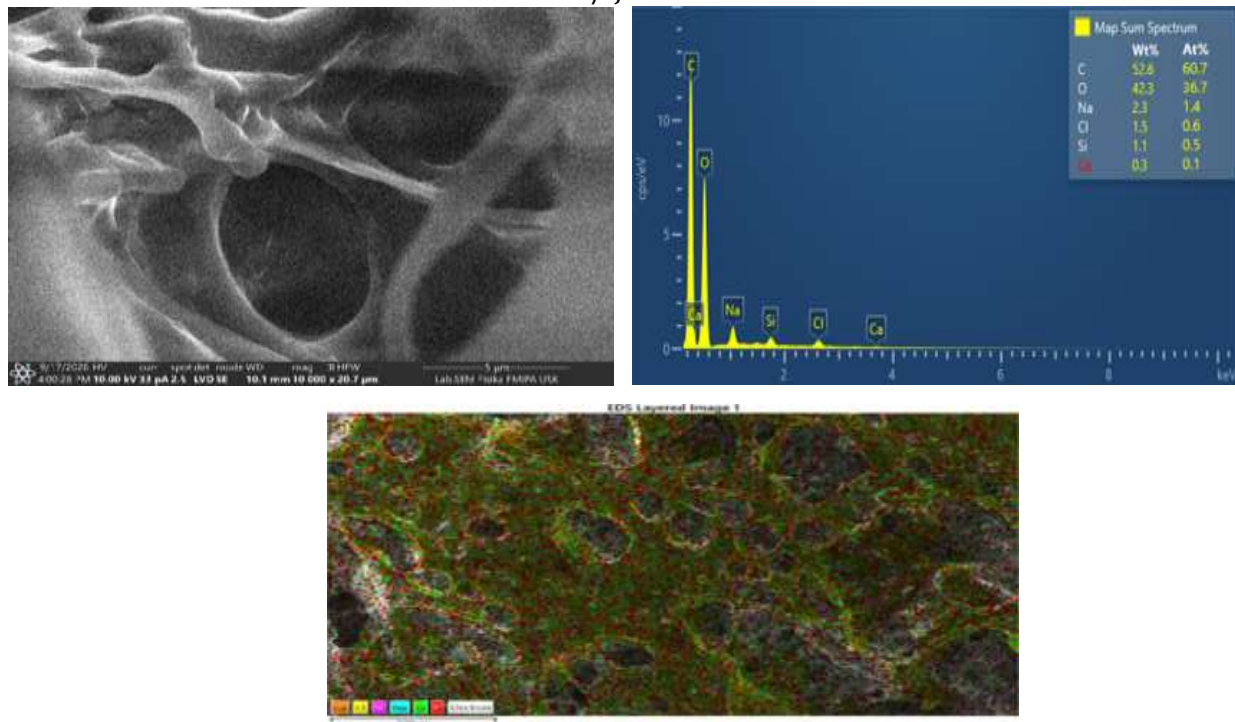
Analisis EDX dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur yang terdapat pada sampel hasil sintesis. Berdasarkan hasil analisis EDX, teridentifikasi empat unsur utama, yaitu karbon (C), oksigen (O), Silika (SiO_2), dan Klorin (Cl). Komposisi unsur berdasarkan weight percentage menunjukkan bahwa karbon merupakan unsur dominan dengan persentase sebesar 92,36%, oksigen sebesar 6,80%, silika sebesar 0,45% dan klorin sebesar 0,39%. Berdasarkan atomic percentage, karbon memiliki nilai sebesar 94,45%, oksigen sebesar 5,22%, silika sebesar 0,20% dan klorin sebesar 0,13%.

Dominannya unsur karbon sebesar 92,36% menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki komponen karbon yang tinggi, hal ini sesuai dengan karakteristik dasar karbon aktif. Kandungan oksigen sebesar 6,80% juga menunjukkan keberadaan gugus fungsi dalam struktur material di permukaan maupun pori-pori karbon. Kehadiran gugus fungsi oksigen meningkatkan sifat hidrofilisitas dan menyediakan situs aktif yang sangat berguna untuk mengikat adsorbat, khususnya polutan yang bersifat polar. Selain itu unsur pengotor seperti silika sebesar 0,45 wt% dan klorin sebesar 0,38 wt%, umumnya merepresentasikan kandungan abu bawaan dari bahan baku biomassa asal, dan sisa residu mikroskopis dari HCl pada tahap aktivasi. Namun, karena total akumulasi pengotor berada di bawah 1 wt%, keberadaan kedua unsur ini tidak memberikan pengaruh negatif yang signifikan terhadap performa dan kemurnian struktur karbon aktif yang dihasilkan. Secara keseluruhan, analisis EDX mengonfirmasi bahwa material yang disintesis telah berhasil bertransformasi menjadi karbon aktif dengan tingkat kemurnian tinggi



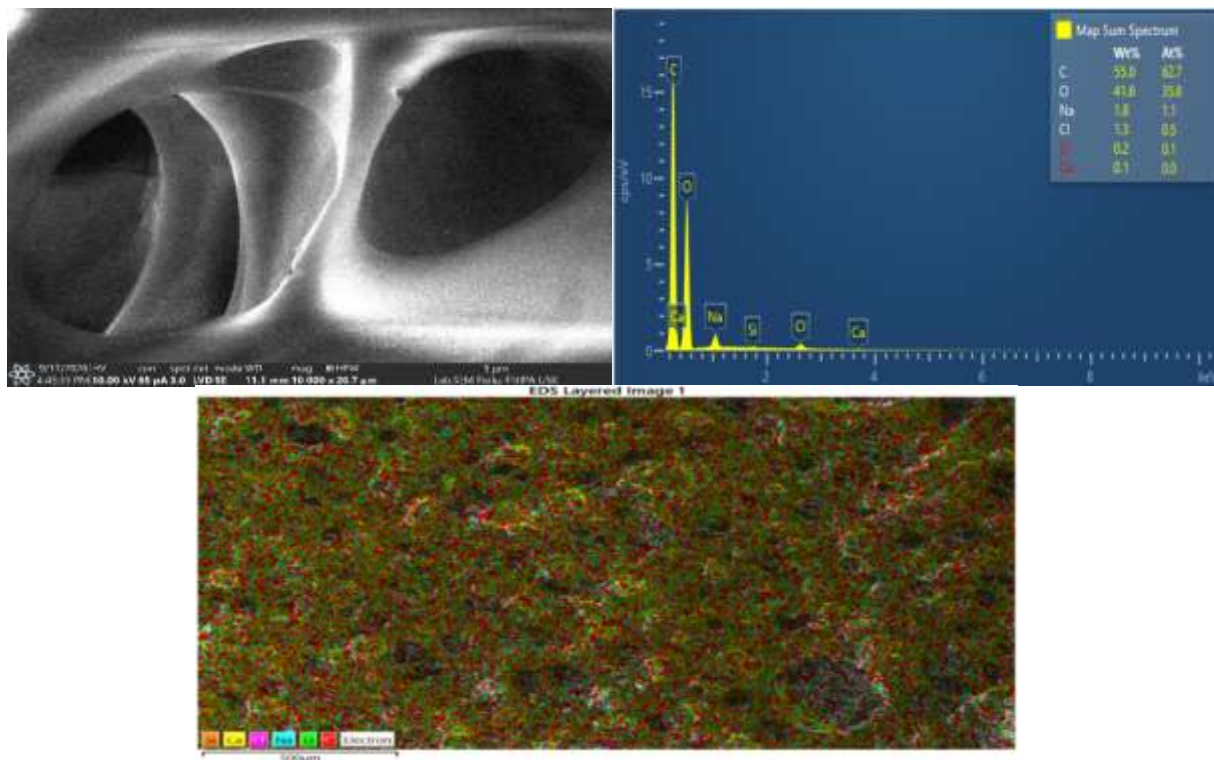
Gambar 6 Hasil Karakterisasi SEM-EDX dan Elemental Mapping H0

Gambar 6 menunjukkan bahwa sampel H0 pada perbesaran 10.000x, terlihat jelas struktur jaringan berpori yang membentuk struktur jaringan matriks tiga dimensi dari matriks hidrogel berbasis PVA, CMC, dan Alginat akibat interaksi dan ikatan silang [30]. Permukaan yang cenderung rata menandakan bahwa struktur biokomposit masih berupa jaringan polimer yang belum banyak mengalami perubahan morfologi akibat penambahan filler anorganik seperti silika zeolit, maupun karbon aktif. Hasil analisis EDX memperlihatkan bahwa unsur utama penyusun sampel adalah karbon (C) dan oksigen (O) dengan persentase berat berturut-turut sebesar 54,9% dan 40,9%, serta persentase atom 62,8% dan 35,1%, yang berasal dari struktur utama matriks [31]. Selain itu, terdeteksi pula unsur Natrium (Na) sebesar 2,4%, dan Klorin (Cl) sebesar 1,7% yang mengindikasikan sisa residu garam agen pembuat ikatan silang seperti alginat atau CaCl_2 yang digunakan selama proses sintesis hidrogel biokomposit, hasil elemental mapping menunjukkan bahwa seluruh unsur (C, O, Na, dan Cl) terdistribusi secara homogen dan terdispersi merata di seluruh area permukaan sampel. Morfologi yang padat dan jumlah pori yang masih sedikit menunjukkan bahwa luas permukaan material relatif rendah sehingga jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi juga masih terbatas. Oleh karena itu, sampel H0 digunakan sebagai kontrol atau pembandingan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan silika zeolit, dan karbon aktif terhadap perubahan morfologi serta komposisi unsur pada biokomposit.



Gambar 7 Hasil Karakterisasi SEM-EDX dan Elemental Mapping H1

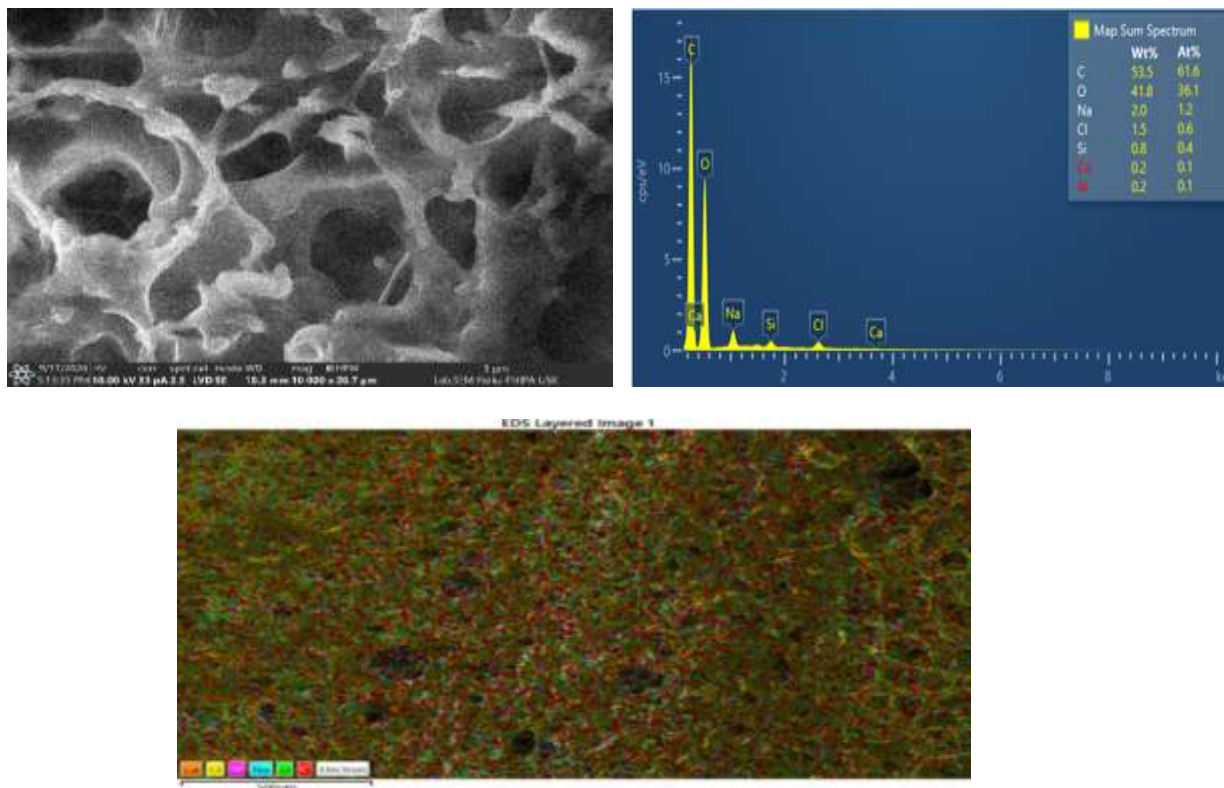
Pada sampel H1 perbesaran 10.000x dinding pori membentuk struktur jaringan matriks 3D yang lebih terbuka dibandingkan dengan H0, menunjukkan adanya peningkatan luas permukaan material sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif yang berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsi POME [32]. Hasil EDX pada H1 menunjukkan munculnya unsur Si dan terjadi penurunan persentase karbon dan peningkatan persentase oksigen dibandingkan H0 menjadi bukti silika berhasil terdistribusi di dalam matriks biokomposit, kemunculan Si masih rendah dikarenakan permukaan silika dilapisi oleh matriks sehingga Si yang terbaca menjadi kurang maksimal. Hasil elemental mapping pada sampel H1 menunjukkan bahwa seluruh unsur (C, O, Na, Cl, Si, dan Ca) terdistribusi secara homogen di seluruh area permukaan sampel.



Gambar 8 Hasil Karakterisasi SEM-EDX dan Elemental Mapping H2

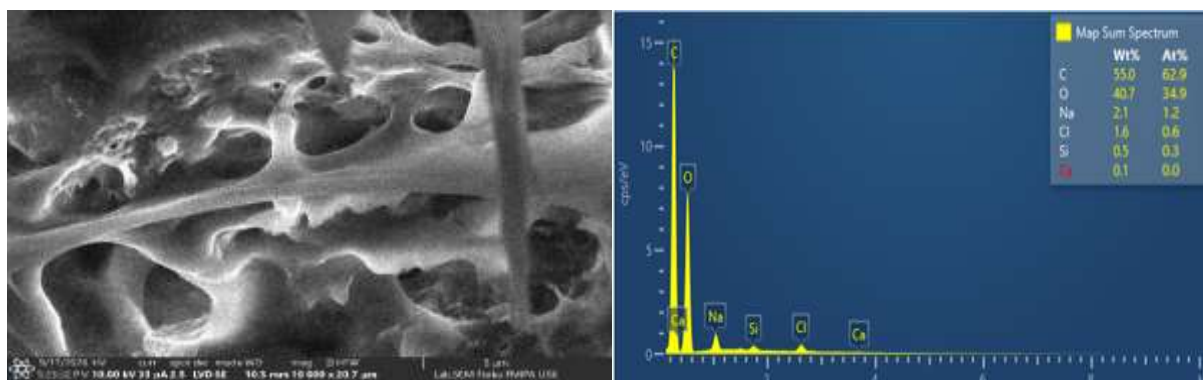
Pada sampel H2 perbesaran 10.000x, struktur jaringan berpori terlihat sangat jelas membentuk rongga-rongga tiga dimensi dengan dinding yang tebal, halus, dan kokoh. Keberadaan karbon aktif berperan dalam memodifikasi kerapatan pori sehingga meningkatkan stabilitas struktur jaringan sekaligus memperluas situs aktif permukaan hidrogel untuk proses

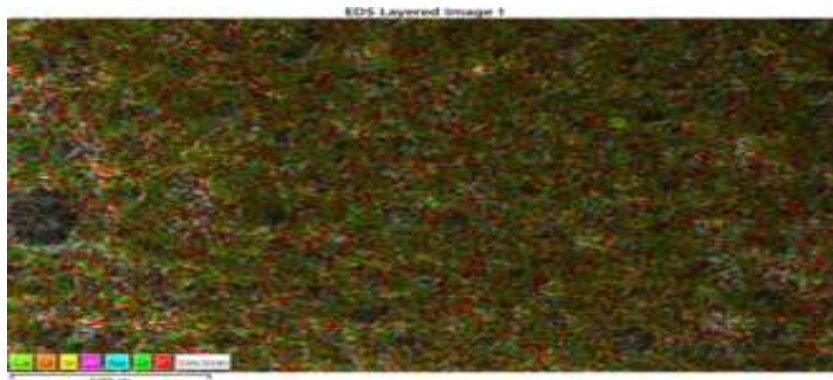
adsorpsi. Hasil EDX menunjukkan persentase karbon mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan H0 dan H1 dan adanya unsur Si yang berasal dari komposit penyusun CKS menjadi bukti penambahan filler karbon aktif berhasil terdistribusi di dalam matriks biokomposit, memperlihatkan perbedaan dengan H0 dan H1, hasil elemental mapping pada sampel H2 menunjukkan bahwa seluruh unsur (C, O, Na, Cl, Si, dan Ca) terdistribusi secara homogen di seluruh area permukaan sampel.



Gambar 9 Hasil Karakterisasi SEM-EDX dan Elemental Mapping H3

Pada sampel H3 perbesaran 10.000x, terlihat jelas pembentukan jaringan serat 3D yang saling terhubung dan membentang silang secara kokoh antara matriks polimer dan filler. Struktur permukaan yang berpori dan tidak rata ini sangat menguntungkan karena memperluas area permukaan hidrogel, sehingga membuat proses adsorpsi menjadi lebih maksimal, sejalan dengan penelitian sebelumnya [14]. Hasil EDX mengonfirmasi dominasi unsur karbon serta kenaikan unsur silika dan Al dari sisa aktivasi silika zeolit yang membuktikan semakin banyaknya kandungan filler silika yang terikat dalam matriks biokomposit, yang menunjukkan bahwa seluruh material penyusun telah terdistribusi pada matriks polimer dan menunjukkan bahwa proses pencampuran material berhasil, didukung elemental mapping pada sampel H3 menunjukkan bahwa seluruh unsur (C, O, Na, Cl, Si, Ca dan Al) tersebar secara homogen di seluruh permukaan sampel.



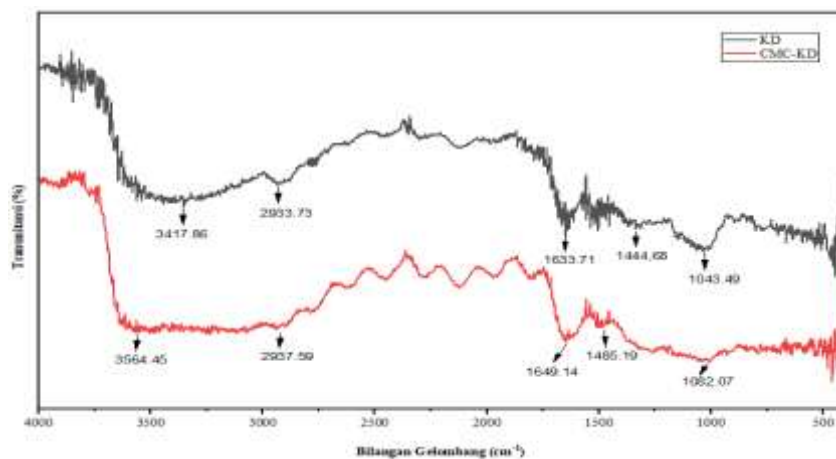


Gambar 10 Hasil Karakterisasi SEM-EDX dan Elemental Mapping H4

Pada sampel H4, perbesaran 10.000x, terlihat jelas struktur jaringan serat 3D dengan rongga-rongga besar yang dibatasi oleh jembatan matriks polimer melintang secara kokoh. Keterbentukan jaringan berpori terbuka ini berfungsi memperluas area permukaan spesifik hidrogel untuk mengoptimalkan proses adsorben sehingga kemampuan menjadi lebih baik. Hasil EDX memperlihatkan unsur karbon yang tinggi, Si, dan keberadaan rantai utama polimer penyusun biokomposit, yang menunjukkan bahwa seluruh material penyusun telah terdistribusi pada matriks polimer dan menunjukkan bahwa proses pencampuran material berhasil, dan elemental mapping pada sampel H4 menunjukkan bahwa seluruh unsur (C, O, Na, Cl, Si, dan Ca) tersebar secara homogen di seluruh permukaan sampel.

Berdasarkan hasil karakterisasi SEM-EDX dan element mapping, dapat diketahui bahwa variasi filler dari silika zeolit, dan karbon aktif CKS memberikan pengaruh yang signifikan terhadap morfologi permukaan serta komposisi unsur biokomposit yang dihasilkan pada permukaan hidrogel biokomposit. Pada sampel kontrol (H0) yang semula rata dan padat berubah menjadi lebih berpori, memiliki struktur jaringan serat 3D, dan kaya akan rongga terbuka. Hasil analisis EDX mengonfirmasi keberadaan unsur C, O, Na, Cl, dan Ca yang terdeteksi pada seluruh sampel hidrogel sebagai struktur utama dari matriks polimer dan sisa residu agen pembuat ikatan silang. Penambahan filler silika terdeteksinya unsur Si dan penambahan karbon aktif terbukti meningkatkan persentase unsur C, hasil elemental mapping menunjukkan bahwa seluruh unsur terdistribusi secara homogen di seluruh permukaan matriks tanpa mengalami aglomerasi.

F. Analisis Hasil Karakterisasi FTIR

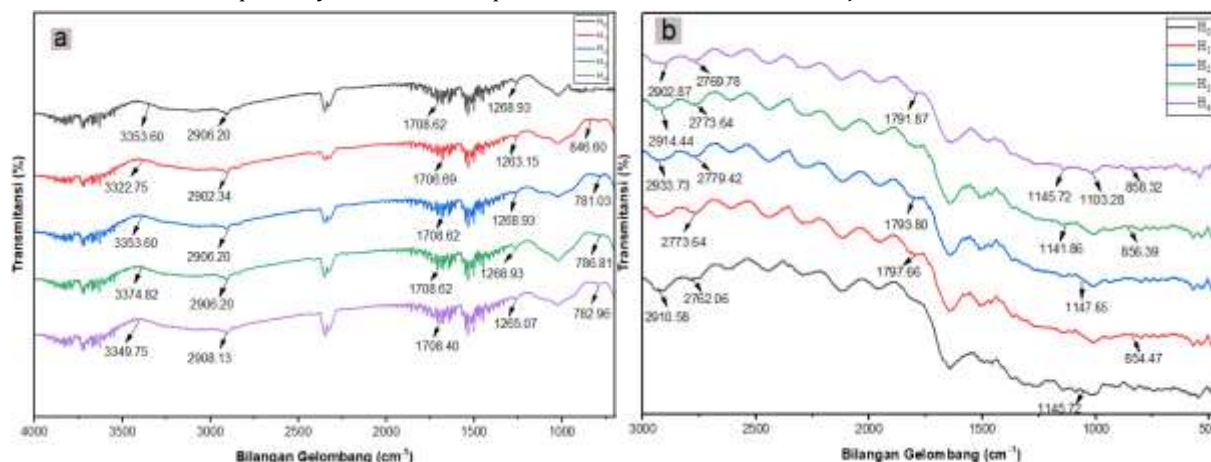


Gambar 11 Kurva hasil uji FT-IR serbuk KD, dan serbuk CMC-KD

Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR pada Gambar 11, terlihat adanya perubahan karakteristik spektrum antara kulit durian (KD) sebelum sintesis dan CMC-KD setelah proses karboksimetilasi. Pada spektrum KD, vibrasi ulur gugus hidroksil (O–H) terdeteksi pada bilangan gelombang 3417,86 cm^{-1} , sedangkan pada spektrum CMC-KD bergeser ke 3564,45 cm^{-1} . Selain itu, pita serapan vibrasi ulur C–H alkana menunjukkan pergeseran tipis dari 2933,73 cm^{-1} pada KD menjadi 2937,59 cm^{-1} pada CMC-KD, yang menegaskan keberadaan struktur tulang punggung alkana pada rantai selulosa.

Bukti utama terjadinya reaksi karboksimetilasi ditunjukkan oleh pergeseran pita serapan khas pada daerah gugus karbonil dan karboksilat. Serbuk KD awal menunjukkan serapan pada 1633,71 cm^{-1} yang berasal dari gugus karbonil pada komponen lignin atau hemiselulosa dan belum dalam bentuk garam karboksilat. Setelah melalui proses alkalisasi dan eterifikasi, terjadi pergeseran pita tajam ke 1649,14 cm^{-1} pada spektrum CMC-KD, yang mengonfirmasi keberadaan vibrasi ulur asimetris dari gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$), sejalan dengan penelitian sebelumnya [14]. Hal ini didukung pula oleh pergeseran pita dari 1444,68 cm^{-1} menjadi 1485,19 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus karboksilat, dan pergeseran pita pada 1043,49 cm^{-1} menjadi 1082,07 cm^{-1} juga memperlihatkan perubahan ikatan eter (C–O–C) pada cincin piranosa.

Perubahan karakteristik spektrum FTIR tersebut selaras dengan temuan Ginting [18], melaporkan sintesis CMC dari limbah kulit durian, khususnya pada daerah yang berkaitan dengan gugus karboksilat, menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan struktur kimia pada selulosa setelah proses sintesis. Hasil ini diperkuat oleh analisis SEM-EDX yang menunjukkan perubahan morfologi permukaan CMC-KD serta keberadaan unsur C, O, dan Na. Keberadaan Na dapat dikaitkan dengan proses karboksimetilasi dan bentuk garam natrium dari gugus karboksimetil. Berdasarkan hasil FTIR yang didukung oleh karakterisasi SEM-EDX, dapat dinyatakan bahwa proses sintesis kulit durian menjadi CMC-KD berhasil dilakukan.



Gambar 12 Kurva hasil uji FT-IR biokomposit H0-H4

(a) Sampel sebelum diaplikasikan (b) Sampel sesudah diaplikasikan

Berdasarkan hasil spektrum FT-IR pada Gambar 12, terlihat bahwa seluruh sampel H0-H4 menunjukkan pita serapan yang relatif konsisten menjadi karakteristik gugus fungsi penyusun hidrogel biokomposit, jika terjadi pergeseran pita serapan menunjukkan adanya perubahan lingkungan gugus fungsi akibat variasi komposisi filler karbon aktif dan SiO₂ dalam matriks hidrogel. Perubahan posisi pita dapat berkaitan dengan adanya interaksi antara matriks dengan filler yang ditambahkan tetapi tidak mengubah struktur dasar matriks polimer, sejalan dengan penelitian Soliman [33]. Pita serapan pada daerah sekitar 3200-3600 cm⁻¹ berkaitan dengan vibrasi regangan gugus hidroksil (O-H) [34], pita O-H teramati pada H0 sebesar 3353.60 cm⁻¹, H1 sebesar 3322.75 cm⁻¹, H2 sebesar 3353.60 cm⁻¹, H3 sebesar 3374.82 cm⁻¹, dan H4 sebesar 3349.75 cm⁻¹. Setelah diaplikasikan gugus O-H tersebut menghilang, hal ini mengindikasikan bahwa gugus hidroksil pada biokomposit telah berinteraksi dengan komponen polutan yang ada di dalam limbah POME. Pada penelitian ini, pita serapan C-H (alkana) sampel H0 teramati pada daerah 2906,20 cm⁻¹, H1 pada daerah 2902,34 cm⁻¹, 2906,20 cm⁻¹ pada H2, 2906,20 cm⁻¹ pada H3 dan 2908,13 cm⁻¹ pada H4, setelah diaplikasikan C-H mengalami pola naik-turun yang sangat teratur disebabkan pembentukan lapisan film tipis cairan minyak dari POME yang teradsorpsi secara merata di permukaan biokomposit.

Keberadaan gugus C=O (karbonil) teramati pada sampel H0 pada daerah 1708,62 cm⁻¹, H1 pada daerah 1706,69 cm⁻¹, 1708,62 cm⁻¹ pada H2, 1708,62 cm⁻¹ pada H3 dan 1708,40 cm⁻¹ pada H4, kemunculan pita ini umumnya berasal dari kandungan lignin, hemiselulosa, atau permukaan yang mengandung oksigen dari biomassa, sejalan dengan penelitian sebelumnya [35]. Setelah diaplikasikan keberadaan gugus C=O mengalami pergeseran yang lebih tinggi yang membuktikan terjadinya modifikasi lingkungan kimiawi pada gugus karbonil, yang dapat dipicu oleh interaksi elektrostatis atau pembentukan ikatan baru dengan senyawa COD yang terkandung di dalam POME. Selain itu, pita C-O teramati pada daerah 1268,93 cm⁻¹ pada H0, 1263,15 cm⁻¹ pada H1, 1268,93 cm⁻¹ pada H2, 1268,93 cm⁻¹ pada H3 dan 1265,07 cm⁻¹ pada H4, setelah diaplikasikan keberadaan gugus C=O mengalami pergeseran yang lebih tinggi, sedangkan C-O terjadi penurunan intensitas yang membuktikan terjadinya modifikasi lingkungan kimiawi pada gugus karbonil, yang dapat dipicu oleh interaksi elektrostatis atau pembentukan ikatan baru dengan senyawa COD yang terkandung di dalam POME.

Sampel yang mengandung filler, keberadaan pita karakteristik Si-O-Si teramati pada puncak 846,60 cm⁻¹ pada H1, 781,03 cm⁻¹ pada H2, 786,81 cm⁻¹ pada H3 dan 782,96 cm⁻¹ pada H4, yang membuktikan keberhasilan penambahan komponen SiO₂ dalam sampel, namun sampel dengan variasi SiO₂ yang sangat rendah, pita serapan tersebut tidak teramati dengan jelas akibat tertutupi oleh dominasi sinyal karbon aktif dan matriks utama.

No	Gugus Fungsi	Keterangan	Kode Sampel				
			H0	H1	H2	H3	H4
1	3200-3500 O-H	Sebelum	3353,60	3322,75	3353,60	3374,82	3349,75
		Sesudah	-	-	-	-	-
2	2850-2970 C-H	Sebelum	2906,20	2902,34	2906,20	2906,20	2908,13
		Sesudah	2762,06- 2910,58	2773,64	2779,42- 2933,73	2773,64- 2914,44	2769,78- 2902,87
3	1050-1300 C-O	Sebelum	1268,93	1263,15	1268,93	1268,93	1265,07
		Sesudah	1145,72	-	1147,65	1141,86	1145,72
4	1690-1760 C=O	Sebelum	1708,62	1706,69	1708,62	1708,62	1708,40
		Sesudah	-	1797,66	1793,80	-	1791,87
5	780-850	Sebelum	-	846,60	781,03	786,81	782,96

Tabel 5 Serapan Gugus Fungsi FT-IR

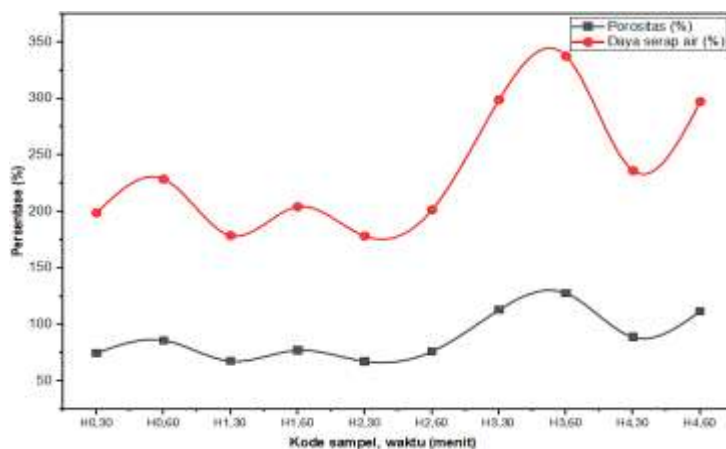
Berdasarkan tabel 6, hidrogel H0-H4 mempertahankan gugus fungsi utama penyusun matriks, yang ditunjukkan oleh keberadaan pita O-H, C-H, C=O, dan C-O disemua variasi sampel, dan pita Si-O-Si mendukung keberadaan variasi filler, tanpa merusak kerangka polimer utama. Kehadiran gugus-gugus fungsi tersebut menyediakan situs aktif potensial untuk berinteraksi dengan zat terlarut dalam POME, Setelah diaplikasikan dengan POME, spektrum FT-IR menunjukkan perubahan signifikan berupa penurunan dan kenaikan intensitas pada bilangan gelombang tertentu, sehingga beberapa puncak tidak terdeteksi setelah kontak dengan limbah dapat dikaitkan dengan keberhasilan proses adsorpsi. Fenomena ini mengindikasikan bahwa situs aktif pada permukaan hidrogel telah berinteraksi secara kuat dan mengikat senyawa polutan organik COD dan TDS yang terkandung di dalam POME.

G. Analisis Hasil Karakterisasi Daya Serap Air dan Porositas

Pengujian Daya serap air dan porositas dilakukan untuk mengetahui besarnya tingkat penyerapan, dan besarnya pori sampel hidrogel. Data diperoleh dengan cara mengukur massa dan volume awal hidrogel sebelum perendaman dan setelah perendaman selama 1 jam swbagai massa dan volume sesudah dengan hasil pengujian daya serap air dan porositas ditampilkan seperti pada tabel 7.

Kontrol		Hidrogel, waktu(menit)	Massa (gram)	Volume (ml)	Volume (cm3)	DSA (%)	Porositas (%)
Massa	Volume						
0,188	50	H0,30	0,562	48,5	0,5	198,93	74,80
0,188	50	H0,60	0,618	47	0,5	228,72	86,00
0,189	50	H1,30	0,527	49,5	0,5	178,83	67,60
0,189	50	H1,60	0,575	48	0,5	204,23	77,20
0,189	50	H2,30	0,526	48,5	0,5	178,30	67,40
0,189	50	H2,60	0,570	47,9	0,5	201,58	76,20
0,189	50	H3,30	0,754	48	0,5	298,94	113,00
0,189	50	H3,60	0,827	46	0,5	337,56	127,60
0,188	50	H4,30	0,632	49	0,5	236,17	88,80
0,188	50	H4,60	0,747	47,5	0,5	297,34	111,80

Tabel 6 Data pengujian daya serap air hidrogel biokomposit



Gambar 13 Diagram daya serap air dan porositas

Berdasarkan gambar diatas semua sampel termasuk hidrogel dengan daya serap air tinggi karena memiliki nilai DSA lebih dari 100%, berdasarkan variabel sampel, H0 memiliki gugus hidrofilik aktif, dan jaringan polimer tiga dimensi dari sampel CMC, PVA, dan alginat yang mampu menyerap air dalam jumlah besar [30]. Hidrogel biokomposit paling optimal nilai daya serap air dan porositas secara signifikan dicapai pada variasi H3 dengan waktu 60 menit (H3,60), yakni berturut-turut sebesar 337,56% dan 127,60%, sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa penambahan agen pengikat atau komposisi biomaterial penyusun hidrogel dalam jumlah yang tepat akan meningkatkan jumlah gugus hidrofilik pada rantai polimer, sehingga rongga makropori semakin membesar dan mampu memerangkap lebih banyak molekul air [36]. Karena sifat hidrofilik SiO₂ berperan meningkatkan kapasitas penyerapan air, sementara penambahan karbon aktif membantu meningkatkan porositas makro, yang disebabkan oleh sifat porositas dan luas permukaan spesifik tinggi serta mampu menyediakan lebih banyak situs aktif untuk proses penyerapan. Namun, penambahan SiO₂ berlebihan akan menyumbat pori matriks dan mempersempit rongga akibat tingginya kerapatan ikatan silang polimer yang terlalu padat, sehingga memperkaku jaringan dan membatasi penetrasi air ke dalam matriks hidrogel, sedangkan kelebihan karbon aktif akan mendominasi matriks dengan sifat hidrofobiknya, sehingga menurunnya kapasitas pada hidrogel biokomposit, sejalan dengan penelitian Ghanbari et al., [37]. Fenomena penurunan kapasitas penyerapan air setelah melewati titik optimum ini umum dilaporkan pada sintesis hidrogel biokomposit akibat terjadinya peningkatan kerapatan ikat silang.

H. Analisis Karakterisasi Kualitas Air Adsorpsi

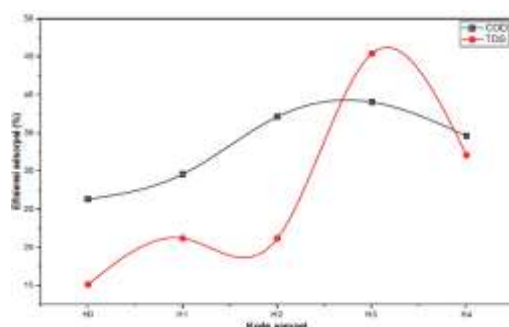
Pengujian kualitas air dilakukan untuk mengetahui kondisi fisik dan kimia suatu sampel air, baik air bersih maupun air limbah. Parameter kualitas air dapat meliputi parameter fisik dan kimia, seperti suhu, warna, bau, kekeruhan, Total Dissolved Solids (TDS), serta Chemical Oxygen Demand (COD). Pengujian kualitas air dalam penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan hidrogel biokomposit berbasis PVA, alginat, CMC, karbon aktif, dan SiO₂ dalam menurunkan kandungan pencemar pada POME, yaitu COD dan TDS. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi hidrogel, yaitu H₀, H₁, H₂, H₃, dan H₄, dengan waktu kontak 30-120 menit. Hasil pengujian COD dan TDS akan digunakan untuk menentukan perbandingan serta menghitung efisiensi adsorpsi hidrogel biokomposit. Data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 7 dan tabel 8.

Waktu (menit)	H0 (mg/L)	H1 (mg/L)	H2 (mg/L)	H3 (mg/L)	H4 (mg/L)	SNI (mg/L)
0	1036	1036	1036	1036	1036	
30	911	938	968	971	1007	
60	834	898	878	895	882	350
90	820	886	794	708	768	
120	763	729	651	631	677	
Efisiensi adsorpsi (%)	26,35	29,63	37,16	39,09	34,65	

Tabel 7 Nilai Adsorbansi COD

Waktu (menit)	H0 (mg/L)	H1 (mg/L)	H2 (mg/L)	H3 (mg/L)	H4 (mg/L)	SNI (mg/L)
0	1650	1650	1650	1650	1650	
30	1600	1560	1600	1400	1480	
60	1510	1450	1400	1250	1300	1000
90	1400	1300	1300	900	1120	
120	1800	2000	1900	1920	2200	
Efisiensi adsorpsi (%)	15,15	21,21	21,21	45,45	32,12	

Tabel 8 Nilai Adsorbansi TDS



Gambar 13 Diagram efisiensi adsorpsi

Berdasarkan Tabel dan diagram adsorpsi COD dan TDS pada masing-masing sampel H₀-H₄, proses adsorpsi menunjukkan penurunan konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD) secara bertahap seiring bertambahnya waktu kontak hingga 120 menit, di mana efisiensi tertinggi mencapai 39,09% pada perlakuan H₃. Meskipun demikian, sisa konsentrasi COD terendah sebesar 631 mg/L pada perlakuan tersebut belum memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan pada 350 mg/L sesuai SNI. Hasil ini sejalan dengan penelitian Mohammad Razi et al. [38] nilai COD dan TSS maksimum dengan menggunakan sampel PSK-AC dengan ketebalan 40 mm mencapai rasio tertinggi 50%, dan 42,11%. Parameter Total Dissolved Solids (TDS), kinerja terbaik juga dicapai pada perlakuan H₃ dengan tingkat efisiensi 45,45% dan konsentrasi sebesar 900 mg/L pada menit ke-90, yang telah berhasil memenuhi batas maksimal SNI sebesar 1000 mg/L. Namun, efektivitas penyerapan TDS menurun pada menit ke-120 akibat terjadinya lonjakan konsentrasi di seluruh perlakuan, yang mengindikasikan terjadinya fase desorpsi karena adsorben yang telah jenuh. Perbedaan nilai COD dan TDS antarvariasi hidrogel dapat dikaitkan dengan perbedaan komposisi karbon aktif dan SiO₂ serta karakteristik permukaan hidrogel yang memengaruhi interaksi dan mampu mengurangi sebagian senyawa organik dalam POME melalui proses adsorpsi. Kombinasi saringan pasir silika dan karbon aktif mampu menurunkan kadar COD rata-rata sekitar 41%, tergantung pada ketebalan media dan waktu tinggal air [39].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik biokomposit berdasarkan hasil SEM-EDX menunjukkan morfologi permukaan yang berpori serta adanya unsur dominan C sebesar 54,9% dan O 40,9%. Hasil FTIR menunjukkan gugus fungsi yang relatif konsisten menunjukkan bahwa struktur dasar matriks polimer, adanya ikatan Si-O-Si pada penambahan variasi silika yang menandakan terbentuknya biokomposit.

2. Biokomposit berbasis filler SiO₂ dari zeolit dan karbon aktif dari CKS yang dikombinasikan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya serap air dan efektifitas adsorpsi, dibandingkan dengan penggunaan salah satu filler.

3. Biokomposit berbasis filler SiO₂ dari zeolit dan karbon aktif dari CKS mampu menurunkan nilai parameter COD dan TDS, dengan efisiensi penurunan COD dan TDS tertinggi dengan nilai 631 dan 900 mg/L pada sampel H3. Parameter TDS sudah memenuhi batas maksimal SNI sebesar 1000 mg/L, namun sisa konsentrasi COD belum memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan pada 350 mg/L.

4. Saat biokomposit berbasis filler SiO₂ dari zeolit dan karbon aktif dari CKS direndam dalam limbah POME, biokomposit akan membuka struktur jaringan tiga dimensinya. Proses ini memicu terjadinya difusi pori dan penjeratan mekanis, di mana molekul organik berukuran makro serta partikel tersuspensi masuk dan terjebak di dalam rongga-rongga yang telah diperluas oleh porositas karbon aktif. Selain penjeratan fisik, interaksi antarmolekul pada permukaan komposit juga memegang peranan krusial dalam menurunkan nilai COD. Sementara itu, penurunan nilai TDS lebih banyak digerakkan oleh interaksi elektrostatis dari gugus Si-O-Si dari penambahan SiO₂ yang mengikat polutan organik polar, secara spesifik menarik senyawa-senyawa organik hidrofobik melalui gaya van der Waals.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan optimasi komposisi biokomposit, massa adsorben, waktu kontak, dan pH limbah POME guna meningkatkan efisiensi penyisihan COD hingga memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Pengujian adsorpsi secara bertahap serta regenerasi dan penggunaan ulang biokomposit juga perlu dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas dan kelayakannya dalam pengolahan limbah POME. Selain itu, penelitian lanjutan disarankan untuk memperbaiki formulasi hidrogel biokomposit melalui variasi rasio CMC, alginat, PVA, silika zeolit, dan karbon aktif CKS guna meningkatkan ketersediaan situs aktif serta aksesibilitas pori adsorben. Optimasi rasio komposisi tersebut diharapkan dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dan menekan konsentrasi COD hingga memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai referensi dalam pengembangan material hidrogel biokomposit berbasis limbah untuk mendukung pengolahan limbah cair yang lebih efektif dan ramah lingkungan. Dalam penyusunan artikel ini, penulis berkomitmen untuk mematuhi kebijakan penggunaan kecerdasan buatan (AI), menjaga integritas akademik, memastikan keakuratan informasi, serta bertanggung jawab penuh atas isi dan orisinalitas karya ilmiah yang dipublikasikan.

References

1. I. U. Khan et al., "Innovative Solutions for Palm Oil Mill Effluent Treatment: A Membrane Technology Perspective," ACS ES T Water, vol. 5, no. 7, pp. 3538–3562, 2025, doi: 10.1021/acsestwater.4c00432.
2. Q. N. Ho, W. J. Lau, J. Jaafar, M. H. D. Othman, and N. Yoshida, "Membrane Technology for Valuable Resource Recovery from Palm Oil Mill Effluent (POME): A Review," Membranes (Basel), vol. 15, no. 5, 2025, doi: 10.3390/membranes15050138.
3. M. A. F. Hamzah, P. M. Abdul, S. S. Mahmod, A. M. Azahar, and J. M. Jahim, "Performance of anaerobic digestion of acidified palm oil mill effluent under various organic loading rates and temperatures," Water (Switzerland), vol. 12, no. 9, 2020, doi: 10.3390/w12092432.
4. S. Martini, "Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan Membrane Technology for Water Pollution Control : A Review of," J. Rekayasa Kim. dan Lingkung., vol. 17, no. 1, pp. 83–96, 2022.
5. L. Nishi et al., "Low-Cost Adsorbents for Water Treatment : A Sustainable Alternative for Pollutant Removal," pp. 1–25, 2025.
6. I. A. Maulani, S. S. Agus, and B. P. Lubis, "KOMPOSISI MEDIA ADSORBEN KARBON AKTIF DAN ZEOLIT," J. Kesehat. SILIWANGI, vol. 2, no. 2, pp. 492–499, 2021.
7. K. F. Muhammad, W. D. R. Putri, and M. Nur, "The Potency of Palm Kernel Shell as an Adsorbent," Adv. Food Sci. Sustain. Agric. Agroindustrial Eng., vol. 1, no. 1, pp. 159–165, 2023.
8. I. Wahyuni and R. Fathoni, "Pembuatan Karbon Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit Dengan Variasi Waktu Aktivasi," vol. 03, no. 1, pp. 11–14, 2019.
9. H. S. O. Sebagai, M. Adsorpsi, A. Nh, A. N. Rahma, E. D. Oktavianti, and A. Meidinariasty, "Aktivasi Karbon Aktif dari Sekam Padi dan Cangkang Kelapa," vol. 6, no. Desember, pp. 1167–1176, 2025.
10. Z. Nahrul Hayawin et al., "Palm oil mill final discharge treatment by a continuous adsorption system using oil palm kernel shell activated carbon produced from two-in-one carbonization activation reactor system," J. Water Process Eng., vol. 36, p. 101262, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101262.
11. S. F. Agustin, A. Kusdiana, W. Rahmah, H. Rusli, and G. T. M. Kadja, "Zeolite-based core-shell adsorbent for the removal of toxic pollutants from aquatic environment: current challenges and opportunities," J. Nanoparticle Res., vol. 26, no. 5, p. 94, 2024, doi: 10.1007/s11051-024-05996-3.
12. Susilawati, S. Fadhillah, and F. Anggraini, "Synthesis and Characterization of Natural Pahae Zeolite-Durian Peel Activated Carbon as an Adsorbent for Phosphate Reduction in Laundry Wastewater," J. Technomaterial Phys., vol. 7, no. 2, pp. 110–118, 2025, doi: 10.32734/jotpv7i2.22735.
13. X. Xiuzhen, Z. Jiang, S. Xu, and B. Shi, "Composite adsorbent material for the effective removal of benzaldehyde from Chinese spirit: synergistic adsorption behavior of AC-SiO₂," Biochar, vol. 7, 2025, doi: 10.1007/s42773-025-00476-w.
14. G. Rando, E. Scalone, S. Sfameni, and M. R. Plutino, "Functional Bio-Based Polymeric Hydrogels for Wastewater Treatment: From Remediation to Sensing Applications," Gels (Basel, Switzerland), vol. 10, no. 8, Jul. 2024, doi: 10.3390/gels10080498.
15. W. Suryaningih, T. Budiati, M. P. Dyiah Utami, O. Ardhiarisca, and A. C. Dewi, "Isolasi Selulosa Mesocarp Kulit

- Durian Untuk Bahan Baku Pembuatan Biofoam Cellulose Isolation Of Durian Peel Mesocarp As Raw Material For Biofoam Manufacture,” *J. Imiah Inov.*, vol. 25, no. 1, pp. 64–71, 2025.
16. V. Kanikireddy, K. Varaprasad, T. Jayaramudu, C. Karthikeyan, and R. Sadiku, “Carboxymethyl cellulose-based materials for infection control and wound healing: A review,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 164, pp. 963–975, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.160>.
 17. M. Liu, Y. Wang, Y. Wu, C. Liu, and X. Liu, “Preparation of Graphene Oxide Hydrogels and Their Adsorption Applications toward Various Heavy Metal Ions in Aqueous Media,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 21, 2023, doi: 10.3390/app132111948.
 18. A. R. J. Ginting, “Sintesis hidrogel komposit selulosa karboksimetil kulit durian dengan penambahan prafena oksida dan TiO₂ sebagai adsorben metilen biru,” (Thesis, Universitas Sumatera Utara), 2025.
 19. S. J. Peighambardoust, M. Vatankhah, P. Mohammadzadeh Pakdel, R. Foroutan, and R. Mohammadi, “Carboxymethyl cellulose/activated carbon/hydroxyapatite composite adsorbent for remediation of methylene blue from water media,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 276, p. 133764, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133764>.
 20. A. M. Afdhal, F. Nata, and S. Aqilah, “Graphene oxide — bacterial cellulose composites for enhanced adsorption of rhodamine B from aqueous solutions,” vol. 18, no. 4, pp. 474–485, 2025.
 21. S. Eka Putri and S. Side, “Analisis Kandungan Oksida Logam Zeolit Alam Sulawesi Selatan Teraktivasi Asam Klorida,” *Sainsmat J. Ilm. Ilmu Pengetah. Alam*, vol. 9, p. 159, Oct. 2020, doi: 10.35580/sainsmat92153842020.
 22. H. Sudibyo, N. Agustin, P. Karo Karo, S. Ali, F. S. Rohman, and N. A. Ali Bashah, “Influence of Sodium Silicate, Sodium Aluminate, and Filicium Decipiens Charcoal on The Conductivity of Artificial Zeolite,” *ESTEEM Acad. J.*, vol. 19, no. March, pp. 43–53, 2023, doi: 10.24191/esteem.v19imarch.21187.
 23. S. Fatimah, R. Ragadhita, D. F. Al Husaeni, and A. Nandiyanto, “How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method,” *ASEAN J. Sci. Eng.*, vol. 2, pp. 65–76, Jun. 2021, doi: 10.17509/ajse.v2i1.37647.
 24. E. Suryani and L. Destiarti, “Chimica et Natura Acta,” vol. 12, no. 1, pp. 19–27, 2024.
 25. M. S. Batu, E. Naes, and M. M. Kolo, “PEMBUATAN KARBON AKTIF DARI LIMBAH SABUT PINANG ASAL PULAU TIMOR SEBAGAI BIOSORBEN LOGAM Ca DAN Mg DALAM AIR TANAH,” *J. Integr. PROSES*, vol. 11, no. 1, pp. 21–25, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip>
 26. Z. N. Oktaviani, D. Wahyuni, and M. Nurhanisa, “Sintesis Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Aktivator Gelombang Mikro dan Pengujian Kualitas Berdasarkan SNI 06-3730-1995,” 2024.
 27. H. Pujiastuti, “REKAYASA STRUKTUR MIKRO-MESOPORI PADA KARBON AKTIF BERBASIS BIOMASSA UNTUK ADSORPSI METILEN BIRU : SEBUAH REVIU,” *J. Integr. PROSES*, vol. 14, no. 2, pp. 212–226, 2025.
 28. H. Hadda Aya, N. Djamel, A. Samira, M. Otero, and M. Ali Khan, “Optimizing methylene blue adsorption conditions on hydrothermally synthesized NaX zeolite through a full two-level factorial design,” *RSC Adv.*, vol. 14, no. 33, pp. 23816–23827, Jul. 2024, doi: 10.1039/d4ra04483e.
 29. A. Ali, N. Zhang, and R. M. Santos, “Mineral Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the Fundamentals, Advancements, and Research Directions,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 23, 2023, doi: 10.3390/app132312600.
 30. J. Zhu et al., “Recent Advances in Superabsorbent Hydrogels Derived from Agro Waste Materials for Sustainable Agriculture: A Review,” *J. Agric. Food Chem.*, 2024, doi: 10.1021/acs.jafc.4c04970.
 31. P. Sharma, P. Kumar Agrawal, V. K. Singh, S. Chauhan, and J. Bhaskar, “A Comprehensive Review on Properties of Polyvinyl Alcohol (PVA) Crosslinked with Carboxylic Acid,” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 14, no. 10, pp. 1236–1252, 2023.
 32. R. Onbas and O. Yesil-Celiktas, “Synthesis of alginate-silica hybrid hydrogel for biocatalytic conversion by β -glucosidase in microreactor,” *Eng. Life Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 37–46, Jan. 2019, doi: 10.1002/elsc.201800124.
 33. T. S. Soliman, “Effects of SiO₂ Nanoparticles on Polyvinyl Alcohol / Carboxymethyl Cellulose Polymer Blend Films’ Structural, Wettability, Surface Roughness, and Optical Characteristics,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 2024, 2024.
 34. A. Talubun, H. Taunaumang, and A. Rampengan, “Karakterisasi Gugus Fungsi Arang Aktif Sabut Kelapa dengan Metode Pirolisis,” *J. FisTa Fis. dan Ter.*, vol. 7, pp. 21–27, Apr. 2026, doi: 10.67006/fista.v7i1.627.
 35. D. Nuñez, J. Barraza, J. Guerrero, L. Díaz, A. K Dalai, and V. B. Borugadda, “Adsorption of Lufenuron 50-EC Pesticide from Aqueous Solution Using Oil Palm Shell-Derived Activated Carbon,” *Mater. (Basel, Switzerland)*, vol. 17, no. 21, Nov. 2024, doi: 10.3390/ma17215389.
 36. W. Zhang, H. Ahari, Z. Zhang, and S. M. Jafari, “Role of silica (SiO₂) nano/micro-particles in the functionality of degradable packaging films/coatings and their application in food preservation,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 133, pp. 75–86, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.01.009>.
 37. M. Ghanbari, M. Salavati-Niasari, F. Mohandes, B. Dolatyar, and B. Zeynali, “In vitro study of alginate–gelatin scaffolds incorporated with silica NPs as injectable, biodegradable hydrogels,” *RSC Adv.*, vol. 11, no. 27, pp. 16688–16697, May 2021, doi: 10.1039/d1ra02744a.
 38. M. A. Mohammad Razi, A. Al-Gheethi, M. Al-Qaini, and A. Yousef, “Efficiency of activated carbon from palm kernel shell for treatment of greywater,” *Arab J. Basic Appl. Sci.*, vol. 25, no. 3, pp. 103–110, Sep. 2018, doi: 10.1080/25765299.2018.1514142.
 39. Ronny and D. M. Syam, “Aplikasi Teknologi Saringan Pasir Silika dan Karbon Aktif dalam Menurunkan Kadar BOD dan COD Limbah Cair Rumah Sakit Mitra Husada Makassar,” *Higiene*, vol. VOLUME 4, pp. 1–5, 2018.