

Artikel Penelitian (Teknik Kimia)

## Pemanfaatan Karbon Magnetit dari Tempurung Kelapa sebagai Adsorben Ion Seng (II) dalam Larutan Artifisial

Heni Sugesti\*, Yogi Chandra, Wahyu Triaji Rahadianto

Jurusan Teknik Kimia, Teknik Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang 30128, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 06 Januari 2026  
Revisi Akhir: 23 Januari 2026  
Diterbitkan Online: 25 Januari 2026

### KATA KUNCI

Adsorben Magnetik  
Limbah Biomassa  
Tempurung Kelapa  
Seng (II)  
Limbah artifisial

### KORESPONDENSI

Phone: +62 813-6391-3154  
E-mail: [Henisugesti@polsri.ac.id](mailto:Henisugesti@polsri.ac.id)

### A B S T R A K

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja adsorpsi karbon magnetit sebagai adsorben ion Seng ( $Zn^{2+}$ ) dalam larutan berair menggunakan metode batch. Karbon magnetik dari tempurung kelapa dianalisa karakterisasi menggunakan FTIR dan SEM. Hasil karakterisasi menggunakan FTIR mengonfirmasi keberhasilan pembentukan komposit melalui munculnya puncak serapan khas ikatan Fe-O pada bilangan gelombang di bawah  $600\text{ cm}^{-1}$ . Selain itu, teridentifikasi gugus fungsi aktif hidroksil (O-H) dan karbonil (C=O) yang berperan sebagai situs aktif pengikatan logam. Analisis SEM memperlihatkan morfologi permukaan yang berpori dengan distribusi partikel magnetit pada matriks karbon aktif, yang memberikan sifat pemisahan magnetik yang cepat. Adsorben karbon magnetit disintesis melalui teknik kopresipitasi dan diaplikasikan untuk menyisihkan ion  $Zn^{2+}$  dengan variasi konsentrasi awal 5, 15, dan 25 mg/L. Proses adsorpsi dilakukan pada suhu  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan dosis adsorben 0,08 g dalam 100 mL larutan dan waktu kontak hingga 75 menit. Konsentrasi sisa  $Zn^{2+}$  dianalisis menggunakan instrumen *flame Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk menentukan efisiensi penyisihan (% removal). Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi meningkat seiring bertambahnya waktu kontak dan konsentrasi awal  $Zn^{2+}$ . Pada waktu kontak 75 menit, persentase *removal* 90% untuk 25 mg/L. Peningkatan efisiensi adsorpsi pada konsentrasi yang lebih tinggi menunjukkan adanya pengaruh gradien konsentrasi sebagai gaya pendorong utama proses adsorpsi. Secara keseluruhan, karbon magnetit menunjukkan kinerja adsorpsi yang baik terhadap ion  $Zn^{2+}$  dan berpotensi diaplikasikan sebagai adsorben magnetik yang efektif dalam pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat.

### PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh logam berat telah menjadi isu krusial di tingkat global seiring dengan pesatnya perkembangan sektor industri, seperti pertambangan, pelapisan logam (*electroplating*), serta produksi baterai dan zat pewarna [1, 2]. Salah satu polutan logam berat yang sering ditemukan dalam limbah cair industri adalah ion Seng atau Zinc (II). Meskipun seng dikategorikan sebagai elemen mikro yang dibutuhkan oleh tubuh manusia dalam jumlah tertentu, paparan konsentrasi tinggi secara terus-menerus dapat memicu dampak kesehatan yang sangat serius [3]. Akumulasi  $Zn(II)$  yang berlebihan dalam sistem biologis dapat menyebabkan gangguan metabolisme, iritasi saluran pencernaan, kerusakan fungsi ginjal, hingga gangguan pada sistem saraf pusat. Selain dampak pada manusia, pelepasan ion  $Zn(II)$  ke ekosistem perairan tanpa pengolahan yang memadai dapat mengganggu rantai makanan dan menurunkan kualitas air permukaan secara signifikan [4].

Dalam upaya mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode pengolahan limbah telah dikembangkan, termasuk presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, dan adsorpsi [5]. Di antara berbagai teknik tersebut, metode adsorpsi dinilai sebagai teknik yang paling efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan. Keunggulan utama adsorpsi terletak pada

desain operasionalnya yang sederhana, biaya investasi yang relatif rendah, serta kemampuannya untuk menyisihkan polutan meskipun berada pada konsentrasi yang sangat rendah [6]. Namun, keberhasilan proses adsorpsi sangat bergantung pada jenis material penyerap (adsorben) yang digunakan, sehingga pengembangan material baru yang lebih efisien terus menjadi fokus utama dalam riset teknologi lingkungan [7].

Saat ini, pengembangan adsorben berbasis biomassa atau limbah pertanian mendapatkan perhatian luas karena mendukung prinsip ekonomi sirkular dan kimia hijau. Tempurung kelapa merupakan salah satu limbah biomassa yang sangat potensial untuk dimanfaatkan di Indonesia. Secara alami, tempurung kelapa memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, jaringan yang kuat, dan kadar abu yang rendah, sehingga sangat ideal untuk diolah menjadi karbon aktif. Karbon aktif dari tempurung kelapa dikenal luas memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan struktur mikropori yang sangat efektif dalam menangkap ion-ion logam di dalam larutan melalui interaksi fisik maupun kimia [8].

Meskipun karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki kapasitas serap yang tinggi, penggunaan dalam bentuk serbuk halus sering kali menghadapi kendala teknis pada tahap akhir pengolahan air [9]. Pemisahan adsorben dari fase cair setelah proses penjuanan memerlukan waktu lama dan biaya tambahan jika hanya mengandalkan teknik filtrasi atau sentrifugasi konvensional. Selain itu, teknik filtrasi sering kali menyebabkan penyumbatan filter (*fouling*) yang menghambat efisiensi operasional. Sebagai solusi inovatif, dilakukan modifikasi material melalui pembentukan komposit dengan partikel magnetit  $Fe_3O_4$ . Pentingnya integrasi sifat magnetik ini terletak pada kemudahan operasional, dimana adsorben yang telah jenuh dapat dipisahkan dari larutan dengan sangat cepat dan mudah hanya dengan menggunakan bantuan medan magnet eksternal. Hal ini menghilangkan kebutuhan akan proses pemisahan mekanis yang rumit. Lebih lanjut, magnetit dalam skala nanometer memiliki sifat superparamagnetik, yang memastikan adsorben tidak menggumpal (*agregasi*) secara permanen setelah medan magnet dihilangkan, sehingga menjaga stabilitas material untuk penggunaan jangka panjang [10].

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi karbon magnetit berbasis tempurung kelapa serta mengevaluasi kinerjanya dalam menyerap ion Seng (II) dari larutan artifisial. Penggunaan larutan artifisial dalam studi ini dimaksudkan untuk memahami mekanisme adsorpsi secara mendalam tanpa gangguan dari ion-ion pengganggu yang kompleks pada limbah riil. Melalui optimasi konsentrasi awal limbah diharapkan penelitian ini dapat memberikan informasi ilmiah mengenai kapasitas adsorpsi maksimum dan stabilitas material tersebut. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi pengolahan air yang lebih efisien, berkelanjutan, dan mudah diaplikasikan dalam skala yang lebih luas.

## TINJAUAN PUSTAKA

### *Dinamika Adsorpsi dan Toksisitas Seng (II) pada Perairan*

Adsorpsi bukan sekadar proses penempelan partikel, melainkan fenomena kompleks yang melibatkan transfer massa dari fase cair ke fase padat melalui interaksi gaya antarmolekul. Pada kasus ion Seng (II) atau  $Zn^{2+}$  efektivitas penyerapan sangat dipengaruhi oleh spesiasi logam tersebut di dalam air. Seng merupakan logam berat yang dalam konsentrasi tertentu bersifat esensial, namun menjadi polutan berbahaya saat mencapai ambang batas toksik bagi organisme. Secara kimiawi, ion Seng memiliki afinitas yang tinggi terhadap situs aktif yang mengandung donor elektron. Dalam lingkungan perairan,  $Zn^{2+}$  tidak dapat terurai secara alami, sehingga cenderung terakumulasi dalam sedimen dan jaringan lemak organisme (bioakumulasi). Oleh karena itu, proses adsorpsi bertujuan untuk memutus rantai polusi ini dengan memanfaatkan gaya tarik elektrostatis maupun ikatan kimia kovalen koordinasi pada permukaan adsorben [6].

### *Karakteristik Struktural dan Kimiawi Karbon Aktif Tempurung Kelapa*

Tempurung kelapa menonjol sebagai prekursor karbon karena densitas strukturnya yang tinggi dan kandungan lignin yang mencapai 36%, lebih tinggi dibandingkan biomassa lainnya. Secara mikroskopis, karbon dari tempurung kelapa setelah proses aktivasi memiliki arsitektur pori yang unik, didominasi oleh mikropori (diameter < 2 nm) dan mesopori (2-50 nm). Struktur ini menyediakan luas permukaan spesifik yang sangat masif, seringkali melebihi  $1000\text{m}^2/\text{g}$  yang berfungsi sebagai ruang penampung bagi adsorbat. Selain struktur fisik, permukaan karbon aktif mengandung gugus fungsi oksigen seperti karboksil, fenol, dan karbonil. Gugus-gugus ini bertindak sebagai situs aktif yang mampu melakukan pertukaran kation dengan ion Seng, menjadikan karbon tempurung kelapa bukan hanya penyaring mekanis, melainkan reaktor kimia skala mikroskopis [11].

### **Aktivasi Adsorben**

Kapasitas adsorpsi karbon aktif merupakan fungsi dari proses aktivasi. Tujuan dari langkah aktivasi adalah untuk meningkatkan porositas dan pembakaran tar yang ada selama karbonisasi. Proses aktivasi didasarkan pada reaksi berbagai komponen yang membentuk struktur karbon dan dapat dikategorikan menjadi aktivasi fisik, kimia, dan fisik/kimia. Langkah pertama dari proses ini melibatkan penghilangan tar yang menyebabkan penyumbatan pori. Ini membantu memudahkan kontak antara permukaan karbon dan agen aktivasi. Ini diikuti oleh langkah kedua di mana kristal kecil karbon dibakar. Pada fase ketiga, oksidasi partikel karbon terjadi.

#### 1. Aktivasi Fisik

Jenis aktivasi ini juga disebut aktivasi termal dan dilakukan dengan mengoksidasi biochar dengan bantuan agen pengaktif biasanya dalam kisaran suhu 800–1100 °C untuk mendapatkan persentase karbon aktif tertentu. Proses aktivasi fisik terdiri dari dua fase; fase pertama melibatkan pembakaran prekursor sedangkan pada fase kedua, aktivasi dilakukan menggunakan agen pengaktif seperti uap, atau karbon dioksida. Zat volatil dalam arang dihilangkan sehingga menghasilkan pengamatan tekstur berpori dari karbon aktif. Tujuan utama gasifikasi adalah untuk meningkatkan pori-pori. Namun demikian, suhu harus diatur dengan hati-hati. Pada suhu yang lebih rendah, reaksi terjadi di dalam permukaan karbon selama tahap awal. Sedangkan pada suhu yang lebih tinggi, reaksi dikendalikan oleh difusi di luar partikel karbon.

#### 2. Aktivasi Kimia

Dalam jenis aktivasi ini, material dikenai aktivasi serta karbonisasi. Prekursor disuntikkan dengan sejumlah agen pengaktif untuk menghilangkan molekul air. Agen pengaktif yang biasanya digunakan adalah kalium karbonat, seng klorida, kalium hidroksida, kalsium karbonat, natrium hidroksida, dan asam fosfat. Proses aktivasi kimia biasanya dilakukan pada suhu yang lebih rendah, tidak seperti proses aktivasi fisik. Kandungan karbon yang diperoleh dari aktivasi kimia relatif lebih tinggi daripada jumlah yang diperoleh selama proses aktivasi fisik. Namun, diperlukan pencucian lebih lanjut untuk menghilangkan bahan kimia yang membatasi penggunaannya.

#### 3. Aktivasi Fisik/Kimia

Beberapa jenis penelitian yang dilakukan oleh penulis sebelumnya berfokus pada proses aktivasi fisik atau kimia. Karbon aktif yang diperoleh dari salah satu dari dua metode ini memiliki mikropori atau luas permukaan yang rendah. Oleh karena itu, kombinasi aktivasi fisik dan kimia sangat diperlukan, dengan proses aktivasi fisik dan kimia, ada kemungkinan untuk mendapatkan karbon aktif dengan karakteristik permukaan yang berbeda. Karbon aktif dengan luas permukaan tinggi dianggap penting dalam memecahkan masalah lingkungan. Untuk proses aktivasi fisik dan kimia, pembakaran biomassa dilakukan dan diikuti dengan aktivasi menggunakan agen pengaktif fisik dan kimia [12].

### **Sifat Superparamagnetik dan Sintesis Komposit Magnetit ( $Fe_3O_4$ )**

Magnetit ( $Fe_3O_4$ ) dalam skala nanometer memiliki sifat superparamagnetik, di mana partikel tersebut menunjukkan respon magnetik yang kuat terhadap medan luar tetapi tidak memiliki remanensi (magnetisme sisa) ketika medan dihilangkan. Sifat ini sangat krusial agar adsorben tidak menggumpal (*agregasi*) secara permanen setelah digunakan. Sintesis komposit karbon-magnetit biasanya dilakukan melalui metode kopresipitasi, yaitu pengendapan garam besi (II) dan besi (III) dalam suasana basa di dalam suspensi karbon. Partikel magnetit akan terdeposit secara merata dalam pori-pori atau menyelimuti permukaan karbon. Kehadiran magnetit memberikan dimensi baru pada material: stabilitas kimia dari karbon bergabung dengan kemampuan pemisahan fase yang cepat menggunakan magnet eksternal, menghilangkan kebutuhan akan proses filtrasi konvensional yang sering kali menyebabkan penyumbatan filter (*fouling*) [13].

### **Mekanisme Interaksi Ion Zn(II) pada Permukaan Karbon Magnetit**

Interaksi antara ion Seng (II) dengan karbon magnetit merupakan fenomena kompleks yang melibatkan kombinasi gaya fisik dan kimia. Secara kimiawi, ion Zn(II) memiliki afinitas tinggi terhadap situs aktif pada permukaan adsorben yang mengandung donor elektron [14]. Mekanisme utama yang terjadi meliputi gaya tarik elektrostatik antara ion Zn(II) yang bermuatan positif dengan permukaan adsorben yang memiliki densitas muatan negatif tinggi akibat keberadaan gugus fungsi oksigen dan fase magnetit. Selain itu, terjadi kompleksasi permukaan melalui pembentukan ikatan kovalen koordinasi antara ion logam dengan gugus karbonil (C=O) dan hidroksil (O-H) yang bertindak sebagai situs aktif. Mekanisme pertukaran kation juga berperan penting, di mana gugus hidroksil pada kerangka lignoselulosa karbon aktif memfasilitasi penggantian ion hidrogen dengan ion Zn(II) [15]. Sinergi antara struktur mikropori karbon yang luas dengan keberadaan nanopartikel magnetit ini menciptakan reaktor kimia skala mikroskopis yang sangat efektif dalam menangkap polutan logam berat.

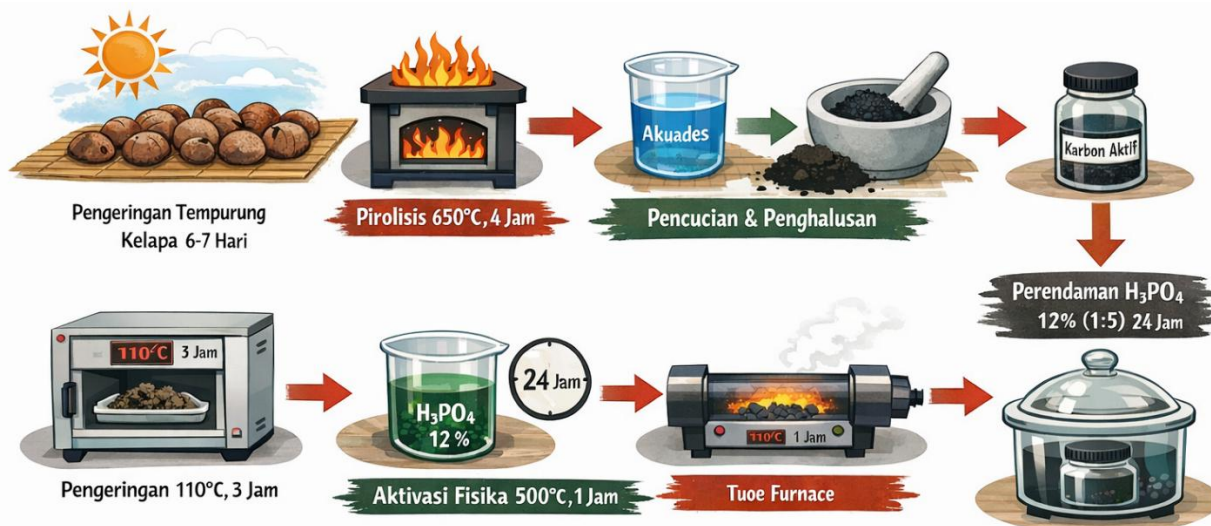
## METODOLOGI

### Bahan dan Peralatan Utama

Material utama yang digunakan dalam studi ini adalah limbah tempurung kelapa yang dikumpulkan dari kawasan Kota Palembang. Bahan kimia dengan derajat kemurnian *analytical pro* (Merck) meliputi asam fosfat ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ), besi klorida heksahidrat ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), besi sulfat heptahidrat ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), perak nitrat ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), serta asam klorida ( $\text{HCl}$  1 N) dan akuades sebagai pelarut. Instrumen utama yang digunakan untuk analisis kuantitatif ion Seng (II) adalah *Atomic Absorption Spectrometer* (AAS) atau Spektrofotometer Serapan Atom AAS3000F (*flame*), sedangkan evaluasi morfologi permukaan dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM JEOL, USA). Selain itu analisis menggunakan instrumen FTIR (Thermo Scientific/ Nicolet iS5) dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi pada permukaan material sebelum dan sesudah proses modifikasi magnetit.

### Prosedur Preparasi Karbon Aktif

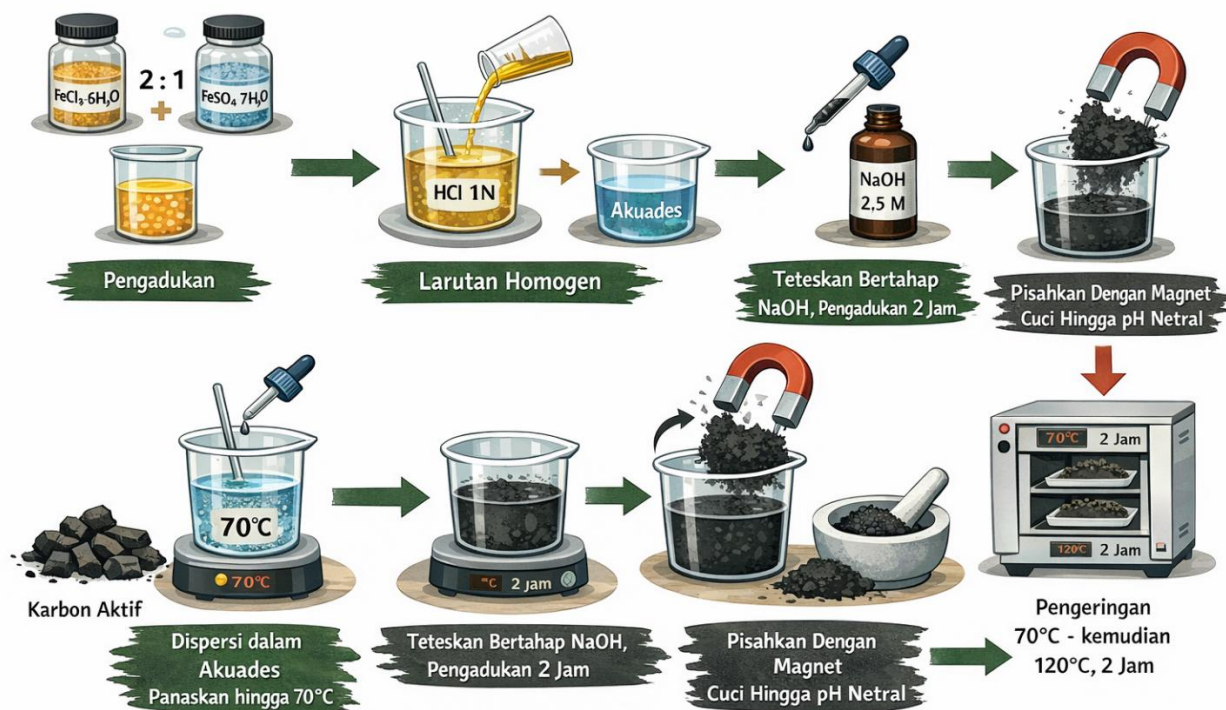
Tahap awal dimulai dengan pengeringan alami tempurung kelapa di bawah sinar matahari selama 6 hingga 7 hari. Material yang telah kering kemudian melalui proses pirolisis di dalam *furnace* pada temperatur  $650^\circ\text{C}$  selama durasi 4 jam untuk menghasilkan arang. Arang tersebut dibersihkan menggunakan akuades, dikeringkan dalam oven, dan dihaluskan hingga menjadi partikel kecil. Proses aktivasi kimia dilakukan dengan merendam sampel karbon dalam larutan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  konsentrasi 12% dengan rasio 1:5 selama 24 jam. Setelah perendaman, karbon dibilas hingga bersih, dikeringkan pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 3 jam, dan dilanjutkan dengan aktivasi fisika pada suhu  $500^\circ\text{C}$  selama 1 jam untuk mengoptimalkan porositasnya. Karbon aktif kemudian disimpan dalam desikator sebelum tahap berikutnya [16].



Gambar 1. Preparasi Karbon Aktif

### Sintesis Komposit Karbon Magnetit

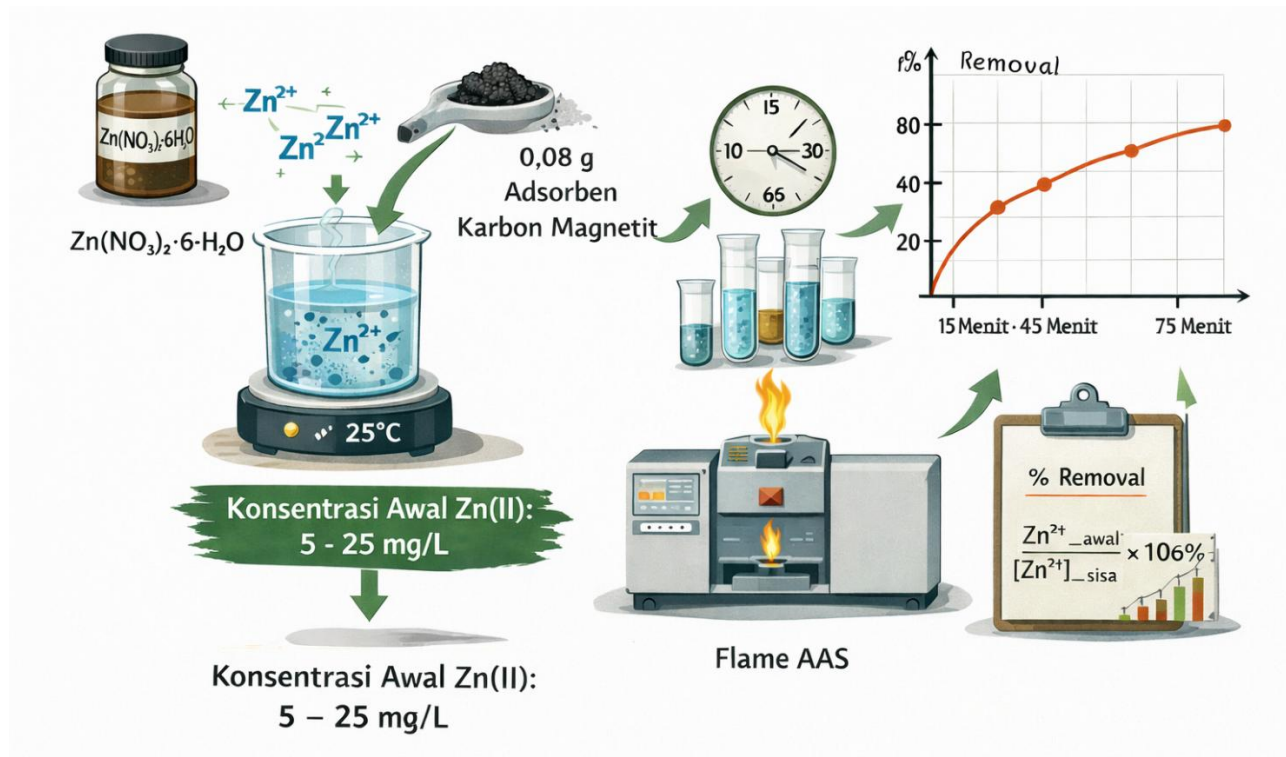
Pembentukan sifat magnetik pada karbon dilakukan melalui teknik kopresipitasi. Garam besi  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dicampurkan dengan rasio molar 2:1 ke dalam larutan  $\text{HCl}$  1 N dan diaduk hingga homogen. Di wadah terpisah, karbon aktif disuspensikan dalam akuades dan dipanaskan hingga mencapai suhu  $70^\circ\text{C}$ . Larutan  $\text{NaOH}$  2,5 M ditambahkan secara bertahap (tetes demi tetes) ke dalam campuran sambil terus diaduk selama 2 jam untuk mengendapkan nanopartikel magnetit pada matriks karbon. Produk komposit padat berwarna hitam yang terbentuk kemudian dipisahkan secara cepat menggunakan medan magnet eksternal dan dicuci hingga mencapai pH netral. Tahap akhir melibatkan pengeringan material pada suhu  $70^\circ\text{C}$  yang dilanjutkan pada suhu  $120^\circ\text{C}$  selama 2 jam sebelum akhirnya dihancurkan menjadi adsorben magnetik siap pakai [17].



Gambar 2. Sintesis Karbon Magnetit

**Prosedur Eksperimen Adsorpsi Ion Zn(II)**

Uji kinerja adsorpsi dilakukan menggunakan metode *batch* dengan mencampurkan 0,08 g adsorben karbon magnetit ke dalam 100 mL larutan  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Variasi konsentrasi awal ion Seng (II) diatur pada rentang 5 hingga 25 mg/L dengan suhu operasional dipertahankan pada 25°C. Proses adsorpsi berlangsung selama total 75 menit, di mana sampel diambil secara periodik untuk diukur konsentrasi sisa logamnya menggunakan instrumen *flame AAS* guna menentukan efisiensi penyisihan (% Removal).

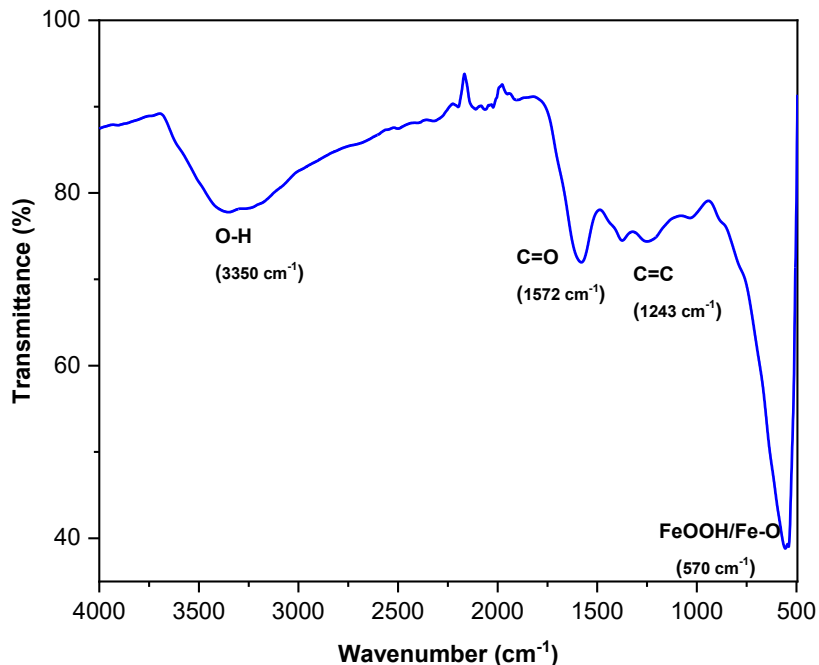


Gambar 3. Adsorpsi ion Zn(II) menggunakan Karbon Magnetit

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis FTIR Karbon Magnetit

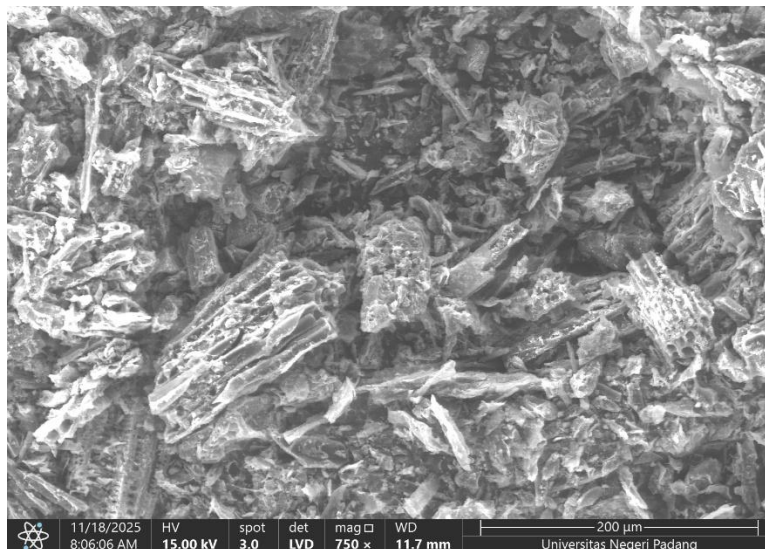
Analisis FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi spesifik pada permukaan adsorben yang berperan dalam proses pengikatan ion logam Seng (II). Berdasarkan gambar spektrum FTIR yang diperoleh ( $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ), terlihat profil transmitansi terhadap bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ ) yang mengonfirmasi keberhasilan pembentukan komposit antara karbon aktif tempurung kelapa dan fase magnetit.



Gambar 4. Analisa FTIR Karbon Magnetit

Puncak serapan lebar yang terdeteksi pada daerah bilangan gelombang sekitar  $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya vibrasi regangan dari gugus hidroksil (O-H) [18]. Keberadaan gugus ini berasal dari struktur lignoselulosa pada tempurung kelapa serta molekul air yang teradsorpsi pada permukaan karbon. Gugus hidroksil sangat krusial dalam mekanisme adsorpsi karena bertindak sebagai situs aktif yang dapat berinteraksi dengan ion  $\text{Zn}^{2+}$  melalui ikatan hidrogen atau pertukaran kation. Spektrum menunjukkan puncak tajam pada area  $1600\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$  yang mengindikasikan adanya gugus karbonil (C=O). Munculnya gugus ini merupakan hasil dari proses aktivasi kimia menggunakan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  yang mengoksidasi permukaan karbon. Selain itu, terdapat puncak di sekitar  $1400\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$  yang merujuk pada vibrasi regangan C=C aromatik. Keberadaan ikatan rangkap karbon ini membuktikan bahwa proses karbonisasi pada suhu  $650^\circ\text{C}$  telah membentuk kerangka karbon aktif yang stabil dengan derajat aromatisitas yang baik. Bukti paling signifikan dari pembentukan komposit magnetik terlihat pada munculnya puncak serapan yang sangat kuat dan tajam di daerah bilangan gelombang rendah, yaitu di bawah  $600\text{ cm}^{-1}$  (ditandai sebagai FeOOH) [19]. Puncak ini merupakan vibrasi regangan khas dari ikatan logam-oksigen (Fe-O). Kehadiran puncak ini mengonfirmasi secara spektroskopi bahwa nanopartikel magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  telah berhasil disintesis dan tertanam secara efektif dalam matriks karbon aktif tempurung kelapa melalui metode kopresipitasi. Sinergi antara gugus organik (O-H dan C=O) serta gugus anorganik (Fe-O) menyediakan densitas muatan negatif yang tinggi pada permukaan adsorben. Hal ini memfasilitasi gaya tarik elektrostatik yang kuat terhadap ion  $\text{Zn}(\text{II})$  yang bermuatan positif. Selain itu, keberadaan fase magnetit yang terkonfirmasi pada spektrum menjamin bahwa adsorben ini memiliki sifat superparamagnetik, sehingga memudahkan pemisahan fase secara instan menggunakan magnet eksternal setelah proses penjerapan selesai.

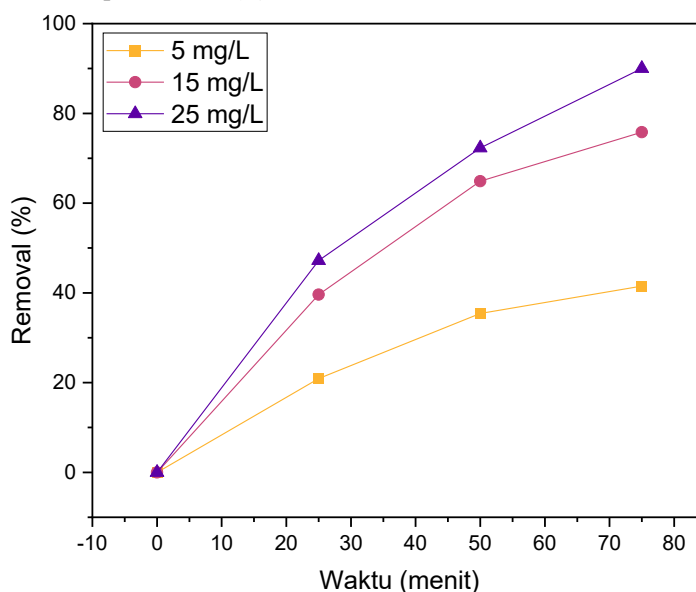
### Analisis SEM Karbon Magnetit



Gambar 5. SEM Karbon Magnetit

Karakterisasi material merupakan tahapan krusial untuk memverifikasi keberhasilan transformasi limbah tempurung kelapa menjadi adsorben komposit fungsional. Berdasarkan pengamatan mikroskopis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada perbesaran 750x, material ini menunjukkan morfologi permukaan yang sangat heterogen dan kompleks. Bahan dasar yang berasal dari tempurung kelapa memberikan struktur kerangka karbon yang kokoh dengan jaringan pori yang berkembang baik. Proses aktivasi pada tempurung kelapa telah membuka jalur-jalur mikropori dan mesopori yang terlihat sebagai rongga-rongga tidak beraturan, yang secara teoritis menyediakan luas permukaan spesifik yang besar untuk menangkap polutan. Karakteristik unik dari sampel ini adalah adanya modifikasi magnetik. Partikel magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  tampak terdistribusi atau tertanam pada matriks karbon aktif. Kehadiran oksida besi ini tidak hanya mengisi sebagian pori tetapi juga menciptakan situs aktif baru di permukaan. Terdapat perbedaan kontras yang menunjukkan interaksi yang kuat antara fase karbon yang bersifat organik dengan fase mineral magnetit. Secara keseluruhan, visualisasi SEM mengonfirmasi bahwa material ini adalah adsorben hibrida yang ideal. Penggabungan sifat adsorptif alami dari limbah tempurung kelapa dengan sifat magnetik dari  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  menciptakan material yang tidak hanya kuat dalam menyerap logam  $\text{Zn(II)}$ , tetapi juga praktis dalam manajemen limbah pasca-proses, sejalan dengan prinsip teknologi hijau dan pengolahan limbah yang berkelanjutan [20].

### Uji Adsorpsi Karbon Magnetit terhadap Limbah $\text{Zn(II)}$



Gambar 6. Efisiensi Penyisihan Ion  $\text{Zn(II)}$

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara waktu kontak adsorpsi dan efisiensi penyisihan ion Seng ( $Zn^{2+}$ ) menggunakan adsorben karbon magnetit pada variasi konsentrasi awal 5, 15, dan 25 mg/L. Secara umum, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan persentase removal seiring bertambahnya waktu kontak, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara progresif hingga mendekati kondisi kesetimbangan. Pada tahap awal (0–25 menit), terjadi peningkatan removal yang cukup signifikan untuk seluruh variasi konsentrasi. Hal ini disebabkan oleh masih banyaknya situs aktif adsorben yang tersedia sehingga ion  $Zn(II)$  dapat terikat dengan mudah pada permukaan karbon magnetit. Fenomena ini menunjukkan laju adsorpsi yang tinggi pada fase awal akibat perbedaan konsentrasi (*driving force*) antara larutan dan permukaan adsorben. Konsentrasi awal yang lebih tinggi menciptakan gradien konsentrasi yang lebih kuat antara fase larutan dan fase padat (adsorben). Gradien ini memberikan tekanan kinetik yang mendorong ion  $Zn(II)$  untuk menembus lapisan batas film dan masuk ke dalam pori-pori internal karbon magnetit lebih cepat. Peningkatan efisiensi pada konsentrasi tinggi juga menunjukkan bahwa pada rentang 5-25 mg/L, jumlah situs aktif yang tersedia pada 0,08 g adsorben masih sangat mencukupi (belum jenuh). Dengan gaya dorong yang kuat, probabilitas tumbukan antara ion  $Zn(II)$  dan gugus fungsi aktif (C=O dan O-H) meningkat, sehingga kapasitas adsorpsi yang dimanfaatkan menjadi lebih optimal dibandingkan pada konsentrasi rendah [21]. Seiring bertambahnya waktu kontak hingga 50 dan 75 menit, peningkatan efisiensi penyisihan masih terjadi, namun dengan laju yang lebih lambat. Kondisi ini menandakan bahwa sebagian besar situs aktif mulai terisi dan sistem secara bertahap mendekati keadaan kesetimbangan adsorpsi. Pada waktu 75 menit, nilai removal tertinggi dicapai untuk masing-masing konsentrasi, yaitu sekitar 41% untuk 5 mg/L, 75% untuk 15 mg/L, dan 90% untuk 25 mg/L.

Perbedaan efisiensi removal pada variasi konsentrasi awal menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi  $Zn^{2+}$  dalam larutan, semakin besar persentase penyisihan yang diperoleh. Hal ini dapat dikaitkan dengan meningkatnya jumlah ion logam yang berinteraksi dengan adsorben, sehingga probabilitas tumbukan efektif antara ion  $Zn^{2+}$  dan situs aktif karbon magnetit menjadi lebih besar [22]. Selain itu, gradien konsentrasi yang lebih tinggi memperkuat gaya pendorong proses adsorpsi. Hasil ini mengindikasikan bahwa karbon magnetit memiliki kinerja adsorpsi yang baik terhadap ion  $Zn^{2+}$ , terutama pada konsentrasi awal yang lebih tinggi dan waktu kontak yang cukup. Dengan demikian, waktu adsorpsi 75 menit dapat dianggap sebagai kondisi operasional yang mendekati optimum dalam sistem batch yang digunakan pada penelitian ini.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa karbon magnetit berbasis tempurung kelapa berhasil disintesis melalui metode kopresipitasi dan menunjukkan kinerja yang baik sebagai adsorben ion Seng ( $Zn^{2+}$ ) dalam larutan artifisial. Hasil karakterisasi FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi aktif seperti hidroksil (O–H), karbonil (C=O), serta ikatan Fe–O yang menandakan keberhasilan pembentukan komposit karbon–magnetit. Analisis SEM menunjukkan morfologi permukaan yang berpori dengan distribusi partikel magnetit yang relatif merata pada matriks karbon aktif. Uji adsorpsi secara batch memperlihatkan bahwa efisiensi penyisihan  $Zn^{2+}$  meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak dan konsentrasi awal larutan. Pada waktu kontak 75 menit, efisiensi removal mencapai sekitar 41% pada konsentrasi awal 5 mg/L, 75% pada 15 mg/L, dan 90% pada 25 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa karbon magnetit memiliki afinitas yang tinggi terhadap ion  $Zn^{2+}$ , khususnya pada konsentrasi awal yang lebih tinggi. Selain itu, sifat magnetik adsorben memungkinkan pemisahan yang cepat dan efisien dari larutan menggunakan medan magnet eksternal, sehingga meningkatkan kepraktisan aplikasi dalam pengolahan limbah cair.

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh parameter operasional lain seperti pH larutan, dosis adsorben, dan keberadaan ion pengganggu terhadap kinerja adsorpsi ion  $Zn^{2+}$ . Selain itu, studi isoterm dan kinetika adsorpsi perlu dilakukan untuk memahami mekanisme adsorpsi secara lebih mendalam. Pengujian regenerasi dan penggunaan ulang adsorben karbon magnetit juga penting dilakukan guna mengevaluasi stabilitas dan kelayakan aplikasinya dalam skala industri. Penggunaan limbah cair riil sebagai media uji juga direkomendasikan agar performa adsorben dapat dievaluasi secara lebih representatif terhadap kondisi lapangan

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada P3M Politeknik Negeri Sriwijaya atas dukungan skema Penelitian Mandiri tahun 2025 (No.09643/PL6.4.1/ST/2025) serta fasilitas yang mendukung sintesis dan pengujian adsorpsi logam Zn(II) dalam studi ini. Penulis juga mengapresiasi bantuan teknis dari staf laboratorium terkait. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada inovasi pengolahan limbah berkelanjutan di masa depan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Zainul, *Elektrokimia dalam Pemurnian Logam dan Pemulihan Sumber Daya*. PT. RajaGrafindo Persada-Rajawali Pers, 2024.
- [2] P. Indrayani *et al.*, *Ilmu Teknik Lingkungan*. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah, 2025.
- [3] M. Marlina, "Penurunan Kadar Logam Seng (Zn) Pada Limbah Cair Industri Batik Dengan Metode Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Aluminium," Universitas Islam Indonesia, 2023.
- [4] Y. T. Male, I. Ismail, S. Koto, R. Mangesa, and N. Hadi, *Logam Berat Merkuri (Hg): Penggunaannya Pada Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK) Dan Dampaknya Terhadap Ekosistem Perairan*. Deepublish, 2025.
- [5] S. D. M. Suherman, M. A. Firdaus, M. H. D. Ryansyah, and D. A. Sari, "Teknologi dan metode pengolahan limbah cair sebagai pencegahan pencemaran lingkungan," *Barometer*, vol. 5, no. 1, pp. 232-238, 2020.
- [6] M. Manurung, O. Ratnayani, and Y. Ciawi, "Karbon dari Bahan Alam sebagai Adsorben Ramah Lingkungan: Potensi, Tantangan, dan Aplikasinya," *Nata Palembang: Journal of Environmental Engineering Innovations*, vol. 2, no. 1, pp. 38-48, 2025.
- [7] H. Askari, D. Larasati, and H. Yudo, "Pengembangan Material Baru untuk Pengolahan Limbah Industri: Tinjauan Sistematis Literatur," *Nusantara Technology and Engineering Review*, vol. 2, no. 2, pp. 84-93, 2024.
- [8] M. Muhajir, A. N. Syaief, and P. Y. Wica, "Teknologi dan Karakterisasi dalam Proses Produksi Arang Sekam Padi untuk Berbagai Aplikasi: Tinjauan Pustaka," *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, vol. 9, no. 2, pp. 265-275, 2025.
- [9] R. Alisha, "Analisis Efisiensi Karbon Aktif Berbasis Kompos untuk Penyisihan Logam Berat (Cr, Cu, Pb) pada Air Lindi TPA Piyungan," Universitas Islam Indonesia, 2025.
- [10] R. AHDIATY, "Adsorpsi Anion Dalam Air Dengan Nanokomposit Magnetik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Karbon Aktif Anions Adsorption In Aqueous Solution With Magnetic Nanocomposite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Activated Carbon," 2022.
- [11] D. Tani, *Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif*. Penerbit NEM, 2023.
- [12] E. I. Ugwu and J. C. Agunwamba, "A review on the applicability of activated carbon derived from plant biomass in adsorption of chromium, copper, and zinc from industrial wastewater," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 192, no. 4, p. 240, 2020.
- [13] M. Pauzan, T. Kato, S. Iwata, and E. Suharyadi, "Pengaruh ukuran butir dan struktur kristal terhadap sifat kemagnetan pada nanopartikel magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)," *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVII HFI Jateng & DIY. Solo: Himpunan Fisika Indonesia*, hal. pp. 24-28, 2013.
- [14] M. Zannah, "Isoterm Adsorpsi Metilen Biru oleh Biochar dari Kulit Singkong (Manihot esculenta crantz) yang Dimodifikasi Menggunakan Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)," 2020.
- [15] M. U. Pasaribu, "Pengaruh Variasi Massa Biochar Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Terhadap Karakteristik Nanokomposit Biochar Magnetit Sebagai Adsorpsi Rhodamin B," Universitas Jambi, 2025.
- [16] M. T. H. Siddiqui *et al.*, "Synthesis and optimization of chitosan supported magnetic carbon bio-nanocomposites and bio-oil production by solvothermal carbonization co-precipitation for advanced energy applications," *Renewable Energy*, vol. 178, pp. 587-599, 2021.
- [17] Z. Li *et al.*, "An overview of synthesis and structural regulation of magnetic nanomaterials prepared by chemical coprecipitation," *Metals*, vol. 13, no. 1, p. 152, 2023.
- [18] S. Syafriadi, "Pengujian Gugus Fungsi Silika Berbasis Sekam Padi Dengan variasi Suhu dan Konsentrasi Cetyltrimethylammonium Bromide sebagai Bahan Baku Mesoporous Silica," 2021.
- [19] Z. Zahratunnisa, N. Azizah, S. Husain, and N. H. Haryanti, "Karakterisasi Struktural dan Fungsional Komposit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ C dari Bahan Alam dengan Variasi Rasio untuk Aplikasi Adsorpsi Zat Warna," *Jurnal Natural Scientiae*, vol. 5, no. 1, 2025.
- [20] S. As-Syifa and A. M. SUPRIATNA, "Sintesis dan karakterisasi karbon aktif dari kulit buah jeruk manis (Citrus sinensis (L.) Osbeck) termodifikasi magnetit sebagai adsorben ion logam timbal (II)," in *Gunung Djati Conference Series*, 2025, vol. 58, pp. 150-159.
- [21] S. Wang *et al.*, "Halloysite and coconut shell biochar magnetic composites for the sorption of Pb (II) in wastewater: synthesis, characterization and mechanism investigation," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 6, p. 106865, 2021.
- [22] H. Reynel-Ávila, K. Camacho-Aguilar, A. Bonilla-Petriciolet, D. Mendoza-Castillo, H. González-Ponce, and R. Trejo-Valencia, "Engineered magnetic carbon-based adsorbents for the removal of water priority pollutants: an overview," *Adsorption Science & Technology*, vol. 2021, p. 9917444, 2021.