

Sintesis dan Karakterisasi *Biochar-Fe Nanoparticles* dari Limbah Kulit Kopi

Synthesis and Characterization of Biochar-Fe Nanoparticles from Coffee Husk Waste

Riskal Fadli^{*1}, Muhammad Damris², Ira Galih Prabasari³

¹Program Studi Kimia Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jl. Jambi-Ma. Bulian KM 15 Mendalo Darat, Jambi, 36361, Indonesia

²Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jl. Jambi-Ma. Bulian KM 15 Mendalo Darat, Jambi, 36361, Indonesia

³Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jl. Jambi-Ma. Bulian KM 15 Mendalo Darat, Jambi, 36361, Indonesia

*Email: riskalfadli@unja.ac.id

Article history:

Diterima : 8 Januari 2026
Direvisi : 31 Januari 2026
Disetujui : 17 Februari 2026
Mulai online : 27 Maret 2026

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Riskal Fadli, Muhammad Damris, Ira Galih Prabasari. (2026). Sintesis dan Karakterisasi *Biochar-Fe Nanoparticles* dari Limbah Kulit Kopi. Jurnal Teknik Kimia USU, 15(1), 1-10.

ABSTRAK

Limbah kulit kopi berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Salah satu upaya pemanfaatan limbah tersebut adalah konversi menjadi *biochar*. Pada penelitian ini, *biochar* diproduksi melalui pirolisis pada suhu 400 °C, 500 °C, dan 600 °C selama 1 jam, kemudian disintesis menggunakan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam larutan NaOH 1,5 M pada suhu 80 °C selama 4 jam. Hasil karakterisasi SEM-EDX menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis memengaruhi perkembangan struktur pori, di mana suhu lebih tinggi menghasilkan diameter pori yang lebih kecil dan permukaan yang lebih padat setelah penambahan Fe. Kandungan Fe tertinggi diperoleh pada *biochar* hasil pirolisis 600 °C sebesar 14,32%. Pemanfaatan limbah kulit kopi sebagai bahan baku *biochar* termodifikasi Fe menunjukkan potensi dalam meningkatkan kemampuan stabilisasi DOC. Potensi ini didasarkan pada karakteristik material yang diperoleh, yaitu kombinasi luas permukaan berpori dan keberadaan fase besi aktif yang secara teoritis dapat meningkatkan interaksi kimia serta kapasitas ikatan terhadap senyawa organik terlarut.

Kata kunci: *biochar* termodifikasi besi, presipitasi kimia, suhu pirolisis

ABSTRACT

Coffee husk waste has the potential to cause environmental problems if it is not properly managed. One possible utilization approach is its conversion into *biochar*. In this study, *biochar* was produced through pyrolysis at temperatures of 400 °C, 500 °C, and 600 °C for 1 hour, followed by synthesis using $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ in a 1.5 M NaOH solution at 80 °C for 4 hours. The SEM-EDX characterization results indicate that increasing the pyrolysis temperature affects the development of the pore structure, where higher temperatures produce smaller pore diameters and a denser surface after Fe incorporation. The highest Fe content was obtained in *biochar* produced at a pyrolysis temperature of 600 °C, reaching 14.32%. The utilization of coffee husk waste as a precursor for Fe-modified *biochar* demonstrates potential for enhancing DOC stabilization. This potential is based on the material characteristics obtained, namely the combination of a porous surface area and the presence of active iron phases, which theoretically can enhance chemical interactions and increase the binding capacity toward dissolved organic compounds.

Keyword: iron-modified *biochar*, chemical precipitation, pyrolysis temperature



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i1.24417>

1. Pendahuluan

Produksi kopi di Indonesia terus berkembang. Berkembangnya produksi ini tentu diikuti dengan potensi limbah yang juga besar. Data Badan Pusat Statistik, menunjukkan bahwa luas lahan tanaman kopi di Provinsi Jambi pada tahun 2024 mencapai 30.000 Ha dengan produksi sebesar 19.980 ton [1]. Kopi termasuk tanaman yang menghasilkan limbah berupa daging buah dengan komposisi mencapai 48% yang terdiri dari kulit buah 42% dan kulit biji 6% [2]. Kandungan limbah kulit kopi yang kaya unsur karbon dan mineral menjadikannya bahan baku yang potensial untuk produksi *biochar* fungsional. Kulit buah kopi memiliki kadar C-organik sebesar 45,3%, nitrogen 2,98%, fosfor 0,18%, kalium 2,26%, magnesium 0,21%, serta mengandung unsur mikro seperti Fe, Cu, dan Zn [3]–[7].

Kadar air limbah kulit kopi yang tinggi, yaitu sekitar 75-80% [8], [9], menyebabkan bahan ini cepat mengalami dekomposisi biologis dan menimbulkan bau tidak sedap. Proses pembusukan yang berlangsung secara terbuka dalam jumlah besar dapat menurunkan kualitas lingkungan di sekitar lokasi pengolahan, terutama akibat peningkatan aktivitas mikroorganisme pengurai. Selain itu, kandungan nutrisi yang masih tinggi mempercepat proses degradasi bahan organik sehingga menjadi tidak stabil apabila tidak segera dikelola. Oleh karena itu, diperlukan penanganan permasalahan ini, yaitu dengan pengolahan lebih lanjut limbah kulit kopi menjadi *biochar*.

Biochar merupakan arang hayati yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan sedikit oksigen. Disebut arang hayati karena berasal dari biomassa tanaman (pertanian, perkebunan, dan kehutanan). Kulit kopi merupakan salah satu bahan yang potensial untuk dijadikan *biochar* karena mengandung senyawa karbon yang tinggi [10]–[12]. Dalam aplikasi tanah, *biochar* mampu menjaga stabilitas *Dissolved Organic Carbon* (DOC). Melalui mekanisme adsorpsi dan interaksi permukaan, *biochar* dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara makro seperti kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg), serta beberapa unsur mikro seperti Fe, Cu, dan Zn. Struktur berpori *biochar* juga mendukung habitat mikroorganisme tanah dan meningkatkan kapasitas retensi air.

Meskipun *biochar* dari limbah kulit kopi telah banyak diteliti sebagai amelioran tanah [13]–[19]. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada *biochar* tanpa modifikasi. *Biochar* konvensional memiliki keterbatasan dalam kapasitas adsorpsi senyawa organik terlarut dan kestabilan interaksi kimia di dalam tanah, terutama pada tanah tropis yang memiliki dinamika bahan organik tinggi. Modifikasi dengan logam aktif seperti besi (Fe) berpotensi meningkatkan jumlah situs aktif permukaan, memperkuat ikatan dengan senyawa organik terlarut, serta meningkatkan stabilisasi DOC. Namun, kajian mengenai *biochar* kulit kopi termodifikasi Fe dalam konteks stabilisasi DOC pada tanah perkebunan sawit masih sangat terbatas, sehingga aspek efektivitas material, karakteristik morfologi, dan kandungan Fe yang terikat belum banyak dilaporkan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengarakterisasi *biochar* termodifikasi Fe berbasis limbah kulit kopi serta mengevaluasi potensinya dalam meningkatkan stabilisasi DOC pada tanah perkebunan sawit. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material *biochar* fungsional berbasis limbah agroindustri, sekaligus menawarkan pendekatan pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan strategi peningkatan kualitas tanah tropis.

2. Metode

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu kulit kopi yang diperoleh dari Desa Sungai Lalang, Kec. Lembah Masurai, Kab. Merangin, Jambi, air deionisasi (aquabidest, CV. Tirta Envitech), *ferric chloride hexahydrate* ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, *analytical reagent*, Pudak Scientific), *granular sodium hydroxide* (NaOH, EMSURE *for analysis*, Merck Milipore), *hydrochloric acid* (HCl, EMSURE *for analysis*, Merck Milipore).

Pembuatan *Biochar*

Kulit kopi digiling hingga berukuran kurang dari 1 cm, kemudian disiapkan sebanyak 2 kg dalam bentuk ekuivalen berat kering. Selanjutnya, kulit kopi dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C untuk menghilangkan kadar air. Sebanyak 100 g kulit kopi dimasukkan ke dalam *muffle crucible* dan dipanaskan dengan laju pemanasan 10 °C/min hingga mencapai suhu akhir 400 °C, 500 °C, dan 600 °C. Suhu akhir tersebut dipertahankan selama 1 jam di bawah aliran gas nitrogen kontinu untuk menciptakan kondisi terbatas oksigen, kemudian didinginkan hingga suhu ruang. Setiap variasi suhu pirolisis dilakukan tiga kali pengulangan untuk memastikan keakuratan data.

Pemilihan suhu pirolisis 400 °C, 500 °C dan 600 °C didasarkan pada studi terdahulu yang melaporkan bahwa rentang suhu ini efektif menghasilkan *biochar* dengan perkembangan pori yang baik, kestabilan karbon yang tinggi, serta gugus fungsi permukaan yang masih reaktif untuk proses modifikasi logam. Suhu di bawah

400 °C umumnya menghasilkan *biochar* dengan kestabilan rendah, sedangkan suhu di atas 600 °C dapat menurunkan jumlah gugus fungsi oksigen yang berperan dalam interaksi kimia [12], [20]–[24].

Sintesis *Biochar-Fe Nanoparticles* (BNPs)

Sebanyak 5 g *biochar* yang telah diperoleh ditambahkan ke dalam 25 mL air deionisasi dengan rasio 1:5 (b/v), kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga homogen. Selanjutnya 5,4 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dilarutkan ke dalam suspensi *biochar* dengan rasio massa *biochar*: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebesar 1:1,08 (w/w), diikuti dengan penambahan 0,85 mL HCl pekat. Seluruh suspensi kemudian dipindahkan ke dalam 250 mL larutan NaOH 1,5 M yang telah dipanaskan sebelumnya pada suhu 80 °C. Reaksi dilanjutkan selama 4 jam pada suhu 80 °C yang menghasilkan *biochar-Fe nanoparticles* disaring melalui kertas saring dengan ukuran 0,45 µm dan dikeringkan pada suhu 80 °C selama 12 jam. *Biochar-Fe nanoparticles* kering dicuci beberapa kali dengan air deionisasi, dikeringkan kembali pada suhu 80 °C, dan kemudian disimpan dalam wadah tertutup hingga digunakan. Gambar 1 menunjukkan skema proses pembuatan *biochar-Fe nanoparticles*.

Karakterisasi

Perhitungan Rendemen *Biochar*

Rendemen *biochar* setelah proses pirolisis dihitung untuk mengevaluasi efisiensi konversi biomassa menjadi produk padat. Sebelum pirolisis, sampel kulit kopi dikeringkan pada suhu 105 °C hingga mencapai berat konstan guna memastikan massa awal merupakan berat kering. Setelah proses pirolisis pada suhu yang ditentukan dan pendinginan hingga suhu ruang dalam aliran nitrogen, *biochar* yang dihasilkan kemudian ditimbang menggunakan neraca analitik.

Nilai rendemen ditentukan berdasarkan perbandingan antara massa *biochar* kering setelah pirolisis dengan massa awal biomassa kering sebelum pirolisis, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{b}{a} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana :

a = massa awal sampel kulit kopi kering sebelum pirolisis (g)

b = massa *biochar* kering setelah pirolisis (g)

Analisis Morfologi Permukaan dan Distribusi Unsur

Analisis morfologi permukaan dan distribusi unsur dari *biochar* dilakukan dengan menggunakan alat *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX JSM-IT200, JEOL). Sampel *biochar* sebelum dan sesudah ditambahkan Fe terlebih dahulu digerus secara perlahan hingga menjadi serbuk halus dan homogen. Pengamatan SEM dilakukan pada beberapa tingkat perbesaran untuk mengevaluasi perubahan morfologi permukaan, sedangkan analisis EDX dilakukan pada area yang representatif untuk menentukan komposisi unsur. Setiap sampel dianalisis pada sedikitnya tiga titik berbeda guna meningkatkan keandalan dan representativitas data unsur yang diperoleh.



Gambar 1. Skema proses pembuatan *biochar-Fe nanoparticles* dari limbah kulit kopi

3. Hasil

Pengaruh Suhu Pirolisis Kulit Kopi

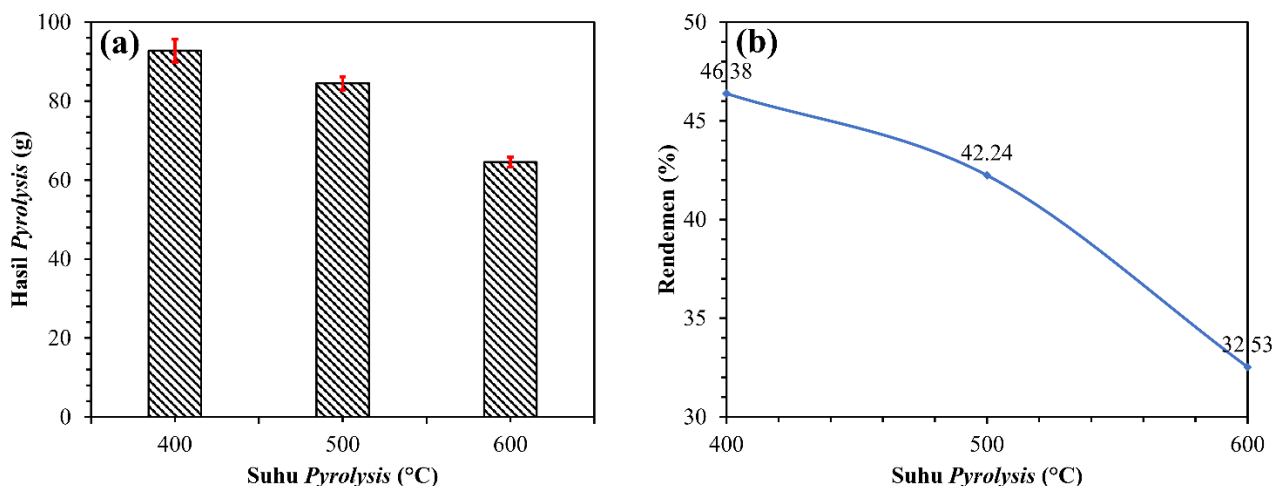
Pirolisis merupakan proses dekomposisi termokimia dari material organik yang berlangsung tanpa oksigen atau dengan sedikit oksigen. Gambar 2(a) menunjukkan massa kulit kopi sebelum pirolisis sebesar 200 g, sedangkan setelah pirolisis diperoleh massa rata-rata biochar pada suhu 400 °C, 500 °C, dan 600 °C masing-masing sebesar 92,77 g, 84,48 g, dan 64,56 g, dengan standar deviasi sebesar 2,90, 1,64, dan 1,24. Nilai standar deviasi yang relatif kecil pada semua variasi suhu menunjukkan bahwa proses pirolisis berlangsung konsisten. Dengan demikian, penurunan rendemen seiring peningkatan suhu pirolisis dapat dianggap sebagai tren yang valid secara eksperimental, bukan akibat variasi acak antarpencobaan. Penurunan ini disebabkan oleh semakin intensifnya dekomposisi termal komponen lignoselulosa, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, pada suhu yang lebih tinggi. Akibatnya, fraksi volatil yang terlepas dalam bentuk gas dan uap tar meningkat, sementara fraksi padatan yang tersisa sebagai *biochar* semakin berkurang. Tren yang sama terlihat pada Gambar 2 (b) dalam bentuk rendemen pirolisis, yang menurun dari 46,38% pada 400 °C menjadi 42,24% pada 500 °C, dan turun lebih lanjut hingga 32,53% pada 600 °C.

Pada suhu sekitar 200–300 °C, degradasi termal terutama terjadi pada komponen hemiselulosa, yang merupakan fraksi biomassa paling tidak stabil secara termal. Pada tahap ini terjadi pelepasan air terikat, CO₂, dan senyawa volatil ringan akibat pemutusan ikatan lemah dan gugus fungsional oksigen. Proses ini menandai awal penurunan massa bahan dan pembentukan struktur karbon awal [13], [25]–[27].

Selanjutnya, pada rentang suhu 300–400 °C, selulosa mengalami degradasi termal secara intensif melalui reaksi depolimerisasi dan *cracking*, menghasilkan senyawa volatil seperti CO, CO₂, tar, dan hidrokarbon ringan. Tahap ini berkontribusi besar terhadap penurunan rendemen *biochar* karena sebagian besar fraksi organik terkonversi menjadi produk volatil yang kemudian terkondensasi menjadi fraksi cair (*bio-oil*) di luar zona reaktor [13], [28].

Pada suhu yang lebih tinggi, yaitu di atas 400 °C hingga 600 °C, degradasi didominasi oleh lignin, yang memiliki struktur aromatik kompleks dan lebih stabil secara termal. Degradasi lignin berlangsung lebih lambat dan bertahap, menghasilkan residu karbon aromatik yang lebih terkonjugasi dan stabil. Pada tahap ini terjadi peningkatan tingkat karbonisasi, penyusutan diameter pori, serta penurunan jumlah gugus fungsional polar pada permukaan *biochar* [13], [29], [30].

Secara umum, semakin tinggi suhu pirolisis, semakin banyak komponen organik kulit kopi yang terurai dan berubah menjadi gas, sehingga rendemen *biochar* menurun. Namun, peningkatan suhu juga menyebabkan struktur *biochar* menjadi lebih stabil dan kaya karbon aromatik. Perubahan ini memengaruhi sifat permukaan *biochar*, seperti meningkatkan luas permukaan dan perkembangan struktur pori [11], [31], [32]. Sifat-sifat inilah yang kemudian memengaruhi kemampuan *biochar* dalam mengikat dan menahan besi (Fe) pada tahap modifikasi.



Gambar 2. (a) Hasil pirolisis variasi suhu, (b) rendemen *biochar* setelah pirolisis

Sintesis *Biochar* Kulit Kopi

Sintesis *biochar* kulit kopi dalam penelitian ini bertujuan untuk memodifikasi permukaan *biochar* melalui penambahan senyawa besi menggunakan prekursor FeCl₃·6H₂O. Modifikasi ini diharapkan dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi *biochar* melalui pembentukan fase oksida besi yang terdispersi pada permukaan dan pori *biochar*. Hasil sintesis *biochar* kulit kopi termodifikasi Fe disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil sintesis *biochar* kulit kopi termodifikasi Fe

Biochar kulit kopi (tanpa modifikasi) (g)	Suhu (°C)	Hasil sintesis (g)
20	400	32,99
	500	31,79
	600	29,16

Berdasarkan Tabel 1, massa *biochar* setelah proses sintesis meningkat dibandingkan dengan sebelum sintesis. Kenaikan massa ini menunjukkan adanya deposisi senyawa besi pada permukaan *biochar*. Peningkatan massa berturut-turut sebesar 12,99 g, 11,79 g, dan 9,16 g masing-masing untuk *biochar* yang dipirolisis pada suhu 400 °C, 500 °C, dan 600 °C.

Perbedaan jumlah besi yang terikat pada *biochar* dari berbagai suhu pirolisis berkaitan dengan perubahan sifat permukaan *biochar* akibat perlakuan termal. *Biochar* yang dihasilkan pada suhu lebih rendah (400 °C) umumnya masih memiliki lebih banyak gugus fungsi oksigen (seperti –OH, –COOH, dan C=O) di permukaannya [20], [22], [33], [34]. Gugus-gugus ini berperan sebagai situs aktif yang dapat berinteraksi dengan ion Fe^{3+} melalui mekanisme kompleksasi permukaan dan pertukaran ion. Selain itu, struktur pori yang belum terlalu teraromatisasi juga memudahkan difusi larutan prekursor besi ke dalam matriks *biochar*.

Sebaliknya, pada suhu pirolisis yang lebih tinggi (600 °C), permukaan *biochar* menjadi lebih teraromatisasi dan jumlah gugus fungsi oksigen berkurang akibat dekomposisi termal lanjutan [20], [22], [35]. Penurunan jumlah gugus fungsi ini menyebabkan berkurangnya situs aktif untuk pengikatan ion besi, sehingga jumlah besi yang terdeposisi menjadi lebih rendah. Dengan demikian, semakin tinggi suhu pirolisis, peningkatan massa setelah sintesis cenderung lebih kecil karena keterbatasan situs pengikatan pada permukaan *biochar*.

Hasil analisis EDX pada Tabel 2 menunjukkan perubahan komposisi unsur yang signifikan setelah proses sintesis *biochar* termodifikasi besi. Sebelum sintesis pada suhu 500 °C, *biochar* didominasi oleh unsur karbon (64,75%) dan oksigen (22,68%), dengan sejumlah kecil mineral anorganik alami seperti K, Ca, Mg, dan P. Setelah sintesis, unsur besi (Fe) terdeteksi pada seluruh sampel *biochar* termodifikasi, yang mengonfirmasi keberhasilan deposisi senyawa besi pada permukaan *biochar*.

Kadar Fe yang terukur masing-masing sebesar 9,87% (400 °C), 8,82% (500 °C), dan 14,32% (600 °C). Kehadiran Fe ini berasal dari presipitasi ion Fe^{3+} menjadi bentuk oksida besi selama reaksi dalam larutan basa (NaOH). Partikel-partikel besi tersebut kemudian terikat pada permukaan *biochar* melalui beberapa mekanisme, yaitu kompleksasi dengan gugus fungsi oksigen di permukaan *biochar*, interaksi elektrostatik, dan pengendapan di dalam pori *biochar*.

Pada *biochar* pada suhu 400 °C dan 500 °C, kandungan gugus fungsi oksigen masih relatif lebih banyak sehingga mendukung interaksi kimia antara permukaan *biochar* dan spesies Fe. Namun, pada suhu 600 °C, meskipun jumlah gugus fungsi oksigen menurun, struktur *biochar* menjadi lebih berpori dan memiliki luas permukaan spesifik yang lebih berkembang akibat pelepasan volatil yang lebih intensif selama pirolisis. Kondisi ini memungkinkan presipitasi dan akumulasi partikel besi oksida di dalam pori-pori *biochar*, yang menjelaskan kadar Fe tertinggi yang terdeteksi pada sampel 600 °C (14,32%).

Penurunan persentase karbon setelah sintesis juga mengindikasikan bahwa sebagian permukaan *biochar* telah tertutupi oleh fase anorganik Fe-oksida. Selain itu, terdeteksinya unsur natrium (Na) dan klorin (Cl) pada *biochar* hasil sintesis menunjukkan adanya sisa reagen NaOH dan FeCl_3 yang teradsorpsi pada permukaan material.

Secara keseluruhan, data EDX mendukung hasil pengukuran massa pada Tabel 1, di mana peningkatan massa *biochar* setelah sintesis berkaitan dengan keberhasilan pemuatan besi. Variasi kadar Fe antar suhu pirolisis menunjukkan bahwa sifat kimia dan struktur fisik *biochar* yang terbentuk pada masing-masing suhu berpengaruh langsung terhadap mekanisme dan kapasitas penempelan besi pada permukaan *biochar*.

Dari Tabel 2 diketahui bahwa ada beberapa unsur yang hilang dan berkurang setelah dilakukan sintesis. Hal ini dikarenakan penambahan senyawa kimia pada saat sintesis. Sintesis menggunakan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ mengurangi kandungan C dan meningkatkan kandungan O. Kandungan O terbesar terdapat pada *biochar* dengan suhu 600 °C. Ini menunjukkan kandungan logam oksida. Hal ini juga disebabkan oleh Fe oksida yang diserap oleh *biochar* selama proses sintesis. Semakin tinggi kandungan Fe dalam *biochar*, semakin besar potensi terbentuknya fase oksida besi yang bersifat magnetik, sehingga *biochar* kulit kopi termodifikasi Fe dapat menunjukkan respons magnetik yang lebih kuat. Sifat magnetik ini merupakan karakteristik fisik material, sedangkan keberadaan Fe^{3+} pada permukaan *biochar* berperan secara kimia dalam meningkatkan interaksi adsorptif dengan senyawa organik terlarut. Dengan demikian, keberadaan besi pada *biochar*

memberikan kontribusi ganda, yaitu meningkatkan sifat fisik berupa kemagnetan serta meningkatkan reaktivitas kimia permukaan terhadap proses adsorpsi.

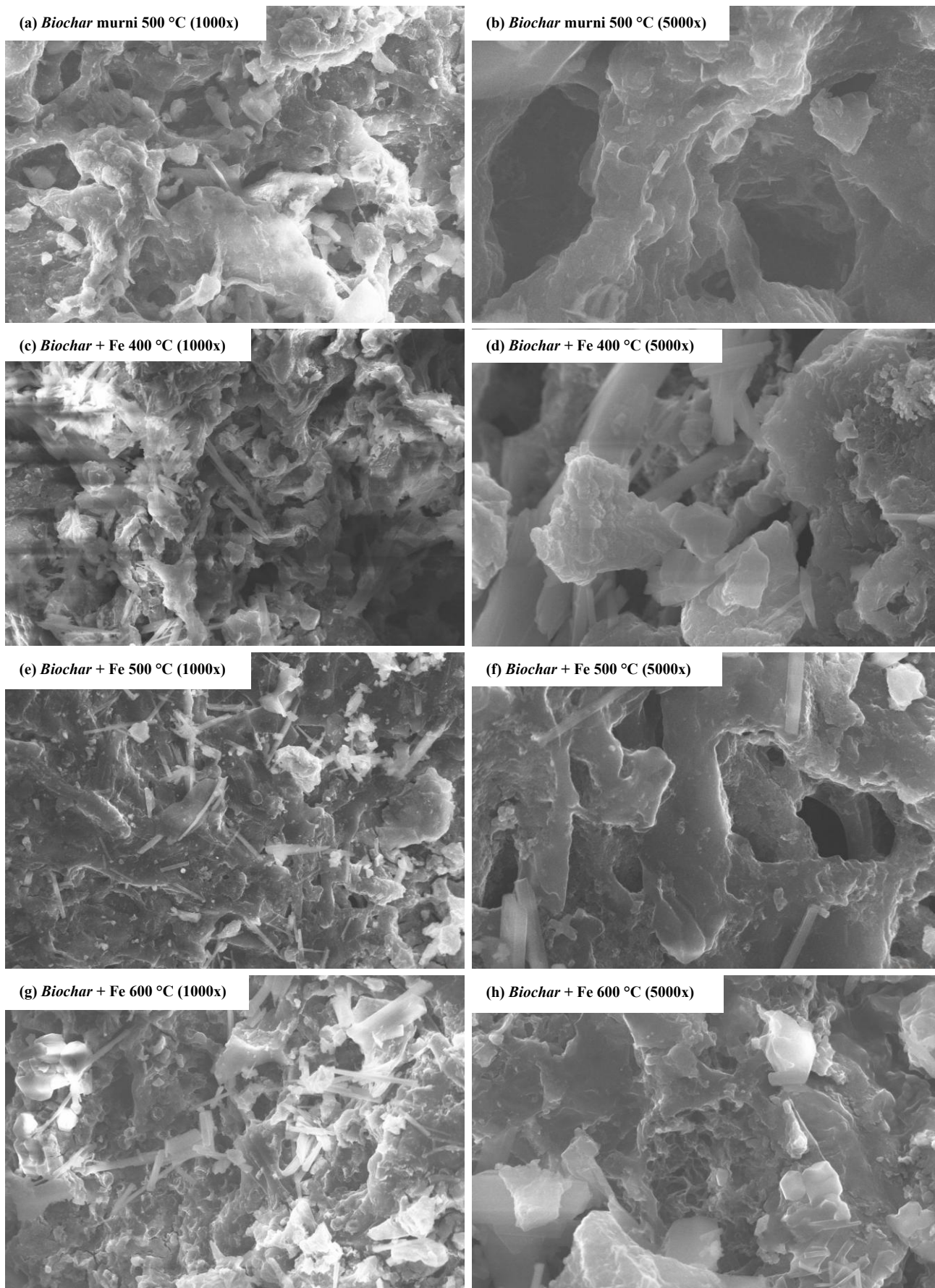
Tabel 2. Komposisi unsur *biochar* sebelum dan sesudah sintesis

Unsur	Kadar (%)			
	Sebelum sintesis (tanpa modifikasi) (500 °C)	Sesudah sintesis (400 °C)	Sesudah sintesis (500 °C)	Sesudah sintesis (600 °C)
<i>Carbon</i>	64,75	29,86	50,08	37,93
<i>Oxygen</i>	22,68	44,46	30,60	48,47
<i>Magnesium</i>	0,46	-	-	0,38
<i>Silicon</i>	0,17	0,14	0,16	0,15
<i>Phosphorus</i>	0,54	-	0,27	0,23
<i>Potassium</i>	8,63	0,46	0,33	0,46
<i>Calcium</i>	2,56	0,85	0,64	1,65
<i>Sulfur</i>	0,21	-	-	-
<i>Sodium</i>	-	12,63	8,22	7,85
<i>Iron</i>	-	9,87	8,82	14,32
<i>Chlorine</i>	-	1,69	0,89	0,90

Karakterisasi *Biochar* Kulit Kopi

Karakterisasi *biochar* kulit kopi dilakukan menggunakan analisis SEM-EDX untuk mengamati morfologi permukaan serta mengidentifikasi komposisi unsur yang terkandung dalam *biochar* sebelum dan sesudah proses sintesis. Berdasarkan Gambar 3, citra SEM *biochar* sebelum dan sesudah penambahan Fe pada masing-masing suhu ditampilkan pada skala 10 µm dengan perbesaran 1000x dan 2 µm dengan perbesaran 5000x.

Pada *biochar* sebelum penambahan Fe, permukaan terlihat memiliki struktur yang lebih renggang dengan pori-pori yang relatif lebih besar. Setelah penambahan Fe pada suhu 400 °C, 500 °C, dan 600 °C menunjukkan distribusi pori menjadi lebih padat sehingga diameter pori tampak lebih kecil, hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Jemere dkk (2024) [36]. Perubahan struktur ini berpotensi meningkatkan kapasitas adsorpsi *biochar*, karena partikel Fe berukuran nano dapat menempati sebagian pori internal serta membentuk permukaan aktif tambahan. Akibatnya, luas permukaan spesifik meningkat dan kemampuan adsorpsi menjadi lebih baik. Peningkatan daya serap ini juga berkaitan dengan keberadaan spesies besi bermuatan positif, seperti Fe^{3+} yang bersifat reaktif terhadap molekul atau ion bermuatan negatif, sehingga memperkuat interaksi adsorptif pada permukaan *biochar* termodifikasi. Hal ini didukung oleh penelitian [32], [36]–[38], yang melakukan penelitian terhadap *biochar* yang ditambahkan Fe dan tanpa ditambahkan Fe, dimana *biochar* yang ditambahkan Fe kapasitas adsorpsinya meningkat dibandingkan *biochar* tanpa Fe.



Gambar 3. Citra SEM *biochar* kulit kopi sebelum dan sesudah modifikasi Fe pada berbagai suhu pirolisis. (a–b) *Biochar* murni 500 °C, (c–d) *Biochar-Fe* 400 °C, (e–f) *Biochar-Fe* 500 °C, dan (g–h) *Biochar-Fe* 600 °C. Kolom kiri menunjukkan perbesaran 1000x dan kolom kanan 5000x.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu pirolisis berpengaruh signifikan terhadap karakteristik *biochar* kulit kopi. Peningkatan suhu dari 400 °C hingga 600 °C menurunkan rendemen *biochar*, namun menghasilkan struktur karbon yang lebih stabil serta perubahan morfologi pori. Modifikasi menggunakan Fe melalui metode presipitasi kimia berhasil meningkatkan kandungan besi pada *biochar*, dengan kadar tertinggi diperoleh pada *biochar* hasil pirolisis 600 °C sebesar 14,32% yang menunjukkan bahwa suhu tersebut merupakan kondisi terbaik dalam penelitian ini untuk menghasilkan *biochar* termodifikasi Fe. Analisis SEM-EDX mengonfirmasi adanya perubahan struktur permukaan serta keberhasilan deposisi Fe pada matriks *biochar*, yang berpotensi meningkatkan interaksi material dengan senyawa organik terlarut. Secara keseluruhan, kombinasi suhu pirolisis dan modifikasi Fe memengaruhi sifat fisikokimia *biochar* yang relevan terhadap kemampuannya dalam menstabilkan *Dissolved Organic Carbon* (DOC). *Biochar-Fe nanoparticles* berbasis limbah kulit kopi ini dapat dikembangkan sebagai amandemen fungsional untuk stabilisasi DOC pada tanah perkebunan kelapa sawit. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi efektivitas *biochar* modifikasi Fe secara langsung pada sistem tanah serta kestabilan kinerjanya dalam jangka panjang.

5. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini

Daftar Pustaka

- [1] Badan Pusat Statistik, “Luas areal tanaman perkebunan rakyat menurut jenis tanaman di Provinsi Jambi (ribu ha), 2024,” 2025. <https://jambi.bps.go.id> (accessed Jan. 31, 2025).
- [2] H. W. Amini, M. F. Rizkiana, B. Palupi, N. Hidayati, and S. H. Raharjo, “Pelatihan Pembuatan Pupuk Organik Cair dari Limbah Kulit Kopi di Desa Pakis Jember,” *J. TEPAT Teknol. Terap. untuk Pengabd. Masy.*, vol. 8, no. 1, pp. 82–93, 2025.
- [3] D. J. M. Sery, L. Z. Tokpa, K. GBA, E. J. Brice Ohoueu, T. C. Orélien Seri, and A. Konan, “Coffee Pulp and Husk Residue Compost Improve the Growth of Robusta Coffee (*Coffea canephora*) Seedlings in the Nursery,” *Indian J. Agric. Res.*, vol. 59, no. 5, 2025.
- [4] N. Setyowati and Z. Mukhtar, “Enhancing Shallot Growth and Yield in Ultisols through Coffee Husk Compost and Nitrogen Dosage Variations,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, vol. 1417, no. 1, p. 12002.
- [5] S. Kurniawan, N. Kusumarini, D. A. L. Putri, H. I. Al Farisy, G. A. Nugroho, N. Azizah, and A. D. Fitria, “Managing Coffee Fruit Husk as Compost to Improve Soil Fertility and Yield of Radish (*Raphanus sativus* L.),” *Univers. J. Agric. Res.*, vol. 11, no. 4, pp. 738–748, 2023.
- [6] J. R. Mantovani, D. W. de Paula, T. T. Rezende, A. B. da Silva, P. C. C. Andrade, and P. R. C. Landgraf, “Early growth of coffee plants and soil fertility properties in response to coffee husk application,” 2018.
- [7] D. T. Le, T. P. Tran, T. N. A. Le, Q. N. Tran, H. Q. Nguyen, and D. D. Bui, “Green synthesis of copper-based nanoparticles using coffee husk and investigation of its antifungal activity and phytotoxicity in vitro,” *Green Chem. Lett. Rev.*, vol. 17, no. 1, p. 2432491, 2024.
- [8] K. Tamilselvan, S. Sundarajan, S. Ramakrishna, A. A. A. Amirul, and S. Vigneswari, “Sustainable valorisation of coffee husk into value added product in the context of circular bioeconomy: Exploring potential biomass-based value webs,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 145, pp. 187–202, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.03.008>.
- [9] A. D. C. O. Carneiro, A. J. V. Zanoncio, A. G. Carvalho, J. A. C. G. Jorge, R. J. C. dos Santos, I. F. Demuner, and Araujo, “Sustainable Production of Coffee Husk Pellets: Applying Circular Economy in Waste Management and Renewable Energy Production,” *Resources*, vol. 14, no. 2, p. 26, 2025, doi: 10.3390/resources14020026.
- [10] H. T. T. Nguyen, H. M. Le, N. T. Vu, and H. S. Nguyen, “Effect of pyrolysis temperature and time of Robusta coffee husk on yield and product characteristics,” *J. Serbian Chem. Soc.*, vol. 90, no. 11, pp. 1401–1413, 2025.
- [11] M. M. Afessa, F. E. Olu, W. S. Geleta, S. S. Legese, and A. V. Ramayya, “Unlocking the potential of biochar derived from coffee husk and khat stem for catalytic tar cracking during biomass pyrolysis: Characterization and evaluation,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 15, no. 7, pp. 11011–11026, 2025.
- [12] S. Abella-segura, D. F. Coral, and J. E. Rodriguez, “Physicochemical Characterization Of Biochar Obtained From Coffee Husk: A Circular Economy Approach,” no. Ran, pp. 1–6, 2025, doi: 10.11159/icnnfc25.128.
- [13] L. Milian-Luperón, M. Hernández-Rodríguez, J. Falcón-Hernández, and A. Otero-Calvis, “Obtaining bioproducts by slow pyrolysis of coffee and cocoa husks as suitable candidates for being used as soil

- amendment and source of energy,” *Rev. Colomb. Química*, vol. 49, no. 2, pp. 23–29, 2020.
- [14] C. C. G. D. Silva, E. V. D. Medeiros, G. G. M. Fracetto, F. J. C. Fracetto, A. P. Martins Filho, J. R. D. S. Lima, and C. Hammecker, “Coffee waste as an eco-friendly and low-cost alternative for biochar production impacts on sandy soil chemical attributes and microbial gene abundance,” *Bragantia*, vol. 80, p. e2121, 2021.
- [15] S. S. Dawerasha, A. Nebiyu, M. Ahmed, and B. Haile, “Effect of coffee husk biochar and inorganic NP fertilizer on soil properties, growth and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) on acidic soil of southwest Ethiopia,” *CABI Agric. Biosci.*, vol. 5, no. 1, p. 56, 2024.
- [16] G. Pouangam Ngalani, F. Dzemze Kagho, N. N. C. Peguy, P. Prudent, J. A. Ondo, and E. Ngameni, “Effects of coffee husk and cocoa pods biochar on the chemical properties of an acid soil from West Cameroon,” *Arch. Agron. Soil Sci.*, vol. 69, no. 5, pp. 744–758, 2023.
- [17] R. F. da França, E. V. de Medeiros, R. O. Silvae, D. P. da Costaa, and L. Rodrigues, “Biochar in different topsoil type as alternative for increase the cassava development and soil quality,” *Rev. Bras. Geogr. Física*, vol. 16, no. 04, pp. 1813–1822, 2023.
- [18] A. P. Martins Filho, E. V. de Medeiros, J. R. de Sous Lima, G. P. Duda, W. de Moraes Silva, A. C. D. Antonino, dan C. Hammecker, “Impact of coffee biochar on soil carbon, microbial biomass and enzymatic activities in Semiarid Sandy soil cultivated with maize,” *Rev. Bras. Geogr. Física*, vol. 13, no. 3, p. 903, 2020.
- [19] A. P. Martins Filho, E. V. D. Medeiros, J. R. S. Lima, D. P. D. Costa, G. P. Duda, J. S. D. Silva, and C. Hammecker, “Impact of coffee biochar on carbon, microbial biomass and enzyme activities of a sandy soil cultivated with bean,” *An. da Acad. Bras. Ciências*, vol. 93, no. 4, p. e20200096, 2021.
- [20] C. Setter, F. A. Borges, C. R. Cardoso, R. F. Mendes, and T. J. P. Oliveira, “Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 154, p. 112731, 2020.
- [21] A. Chico-Proano, J. F. Nicolalde, M. Boada, O. Bonilla, C. Riofrio, J. A. Cueva, and J. Martinez-Gomez, “Biochar from waste coffee husk as a thermal conductivity enhancer in palm stearin BPCMs,” *Carbon Trends*, vol. 19, p. 100501, 2025.
- [22] N. Van Phuong, N. K. Hoang, L. Van Luan, and L. V Tan, “Evaluation of NH_4^+ adsorption capacity in water of coffee husk-derived biochar at different pyrolysis temperatures,” *Int. J. Agron.*, vol. 2021, no. 1, p. 1463814, 2021.
- [23] A. T. Puari, R. Rusnam, N. R. Yanti, and M. Y. Shukor, “Adsorption performance of biochar from exhausted coffee husk (ECH) under various carbonization parameters on copper (II) ion in aqueous solution,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, vol. 1426, no. 1, p. 12011.
- [24] A. T. Puari and N. R. Yanti, “Removal of Ammonium by Biochar Derived from Exhausted Coffee Husk (ECH) at Different Carbonisation Parameter,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, vol. 1182, no. 1, p. 12037.
- [25] J. Y. Yeo, B. L. F. Chin, J. K. Tan, and Y. S. Loh, “Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics,” *J. Energy Inst.*, vol. 92, no. 1, pp. 27–37, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.003>.
- [26] Z. Wang, J. Cao, and J. Wang, “Pyrolytic characteristics of pine wood in a slowly heating and gas sweeping fixed-bed reactor,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 84, no. 2, pp. 179–184, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.02.001>.
- [27] L. Cuimei, W. Xujie, M. Jun, and Q. Chusheng, “Effects of exogenous acid catalysis on the thermal degradation law of wood hemicellulose,” *J. Beijing For. Univ.*, vol. 44, no. 4, pp. 147–156, 2022.
- [28] B. Grabowska, S. Eichholz, and K. Hodor, “Thermal degradation behavior of cellulose-based material for gating systems in iron casting production,” *Polimery*, no. 1, pp. 39–44, 2013.
- [29] N. A. Bobrova, T. V. Bogdan, I. I. Mishanin, A. E. Koklin, N. V. Mashchenko, A. V. Smirnov, and V. I. Bogdan, “Effect of Fe^{3+} ions on transformation of hydrolysis lignin in water under sub- and supercritical conditions,” *Russ. Chem. Bull.*, vol. 72, no. 9, pp. 2235–2240, 2023, doi: [10.1007/s11172-023-4020-x](https://doi.org/10.1007/s11172-023-4020-x).
- [30] J. Y. Kim, H. Hwang, S. Oh, Y.-S. Kim, U.-J. Kim, and J. W. Choi, “Investigation of structural modification and thermal characteristics of lignin after heat treatment,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 66, pp. 57–65, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.02.013>.
- [31] D. T. Huyen, D. U. Thanh, D. X. Tien, L. N. Phat, L. T. Phong, and K. Rockne, “Biochars from various agro-wastes in Vietnam: Insight into the influence of pyrolysis temperatures on characteristics for potential of waste management,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 146, pp. 748–756, 2025.
- [32] E. G. D. Morais, C. A. Silva, S. Gao, L. C. A. Melo, P. A. N. Benevenuto, B. C. Lago, and L. R. G. Guilherme, “Rapid Adsorption of ammonium on coffee husk and chicken manure-derived biochars:

- Mechanisms unveiled by chemical speciation, physical, and spectroscopic approaches,” *Sustainability*, vol. 17, no. 4, p. 1616, 2025.
- [33] T. Guimarães, V. A. Luciano, M. S. V. Silva, A. P. de Carvalho Teixeira, M. M. da Costa, and R. P. Lopes, “Biochar-iron composites: An efficient material for dyes removal,” *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 17, p. 100645, 2022.
- [34] V. T. Nguyen, T. Tran, T. N. Nguyen, T.-N.-C. Le, X. T. Bui, L. G. Bach, “Biochar derived from the spent coffee ground for ammonium adsorption from aqueous solution,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 4, p. 100141, 2021.
- [35] G. J. F. Cruz, D. Mondal, J. Rimaycuna, K. Soukup, M. M. Gomez, J. L. Solis, and J. Lang, “Agrowaste-derived biochars impregnated with ZnO for removal of arsenic and lead in water,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 3, p. 103800, 2020.
- [36] J. Kochito, A. Gure, N. Abdisa, T. T. Beyene, and O. E. Femi, “Magnetic biochar nanocomposites of coffee husk and khat (*Catha edulis*) leftover for removal of Cr (VI) from wastewater,” *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 8, p. 100403, 2024.
- [37] H. Zhou, Z. Jiang, and S. Wei, “A novel absorbent of nano-Fe loaded biomass char and its enhanced adsorption capacity for phosphate in water,” *J. Chem.*, vol. 2013, no. 1, p. 649868, 2013.
- [38] G. Amante, A. Regassa Tolossa, and A. Nigussie, “Enhanced phosphorus recovery from wastewater using modified biochar for sustainable phosphorus fertilization,” *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 25, no. 3, pp. 8187–8201, 2025.