Metana: Media Komunikasi Rekayasa Proses dan Teknologi Tepat Guna ISSN: 1858-2907
Desember 2026 Vol. 22(2):69-81 EISSN: 2549-9130

Studi Sintesis dan Karakterisasi Biochar Sekam Padi Terpirolisis sebagai Adsorben Logam Berat Timbal (Pb^{2+})

Chindy Mauliza Duana[1]*, Rosmawati Sipayung[1], Raudhatul Ulfa[2], Nurul Ismi[3], Nita Widyastuti[1], Rara Ayu Lestari[1], Ahmadi[4]

[1]Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi
Muara Bulian KM 15 Mendalo Darat, Kec. Jambi Luar Kota, Kabupaten Muaro Jambi, Jambi 36361 Indonesia
[2]Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh
Aceh Utara, Aceh, 24355 Indonesia
[3]Program Studi Teknologi Pulp dan Kertas, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya KM. 12,5, Simpang Baru, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau 28293 Indonesia
[4]Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokweumawe
Lhokseumawe, Aceh, 24301 Indonesia
Email: chindymauliza@unja.ac.id

Abstrak

Pencemaran logam berat timbal (Pb^{2+}) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang memerlukan metode pengolahan yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis biochar berbahan baku sekam padi melalui proses pirolisis menggunakan *furnace*, mengkarakterisasi adsorben, serta mengkaji pengaruh waktu kontak terhadap kapasitas dan efisiensi adsorpsi ion Pb^{2+}. Biochar disintesis pada suhu 500 °C selama 2 jam dan dikarakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Diffraction (XRD), dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Konsentrasi ion Pb^{2+} sebelum dan sesudah proses adsorpsi dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa biochar memiliki struktur silika amorf dan morfologi permukaan berpori yang mendukung proses adsorpsi. Kapasitas adsorpsi meningkat dari 0,601 mg/g pada waktu kontak 20 menit menjadi 0,769 mg/g pada 100 menit, dengan peningkatan terbesar terjadi pada interval 20–40 menit sebelum mendekati kondisi kesetimbangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar sekam padi hasil pirolisis berpotensi sebagai adsorben alternatif yang ekonomis, ramah lingkungan, dan efektif untuk penyisihan ion Pb^{2+} dari media air.

Kata kunci : biochar, sekam padi, pirolisis, adsorpsi

Abstract

Synthesis and Characterization of Pyrolyzed Rice Husk-Derived Biochar as an Adsorbent for Lead (Pb^{2+}) Heavy Metal

Lead (Pb^{2+}) contamination is one of the major environmental problems that requires an effective treatment method. This study aimed to synthesize biochar derived from rice husk through a furnace-assisted pyrolysis process, to characterize the resulting adsorbent, and to evaluate the effect of contact time on the adsorption capacity and removal efficiency of Pb^{2+}. Activated carbon was produced by pyrolysis at 500 ℃ for 2 h and characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM). The Pb^{2+} concentrations before and after adsorption were determined using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The characterization results indicated that the biochar possessed an amorphous silica structure and a porous surface morphology that supported the adsorption process. The adsorption capacity increased from 0.601 mg g^{-1} at a contact time of 20 min to 0.769 mg g^{-1} at 100 min, with the most significant increase occurring between 20 and 40 min before the system approached adsorption

*)Correponding author
DOI : 10.14710/metana.v22i2.88449
Diterima: 26-08-2026
Disetujui: 01-11-2026

equilibrium. These findings demonstrate that rice husk-derived biochar has considerable potential as an economical, environmentally friendly, and effective adsorbent for the removal of Pb^{2+} ions from aqueous solutions.

Keywords : *biochar, rice husk, pyrolysis, adsorption*

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat merupakan salah satu permasalahan lingkungan serius yang terjadi di Indonesia. Pencemaran ini umumnya bersumber dari berbagai aktivitas industri, seperti pertambangan, peleburan logam, industri baterai, hingga pembuangan limbah cair yang tidak dikelola dengan baik, sehingga mencemari sungai, tanah, dan air tanah di sekitarnya. Kondisi ini semakin mengkhawatirkan mengingat karakteristik logam berat yang memiliki toksisitas tinggi, sulit terurai secara biologis (non-biodegradable), dan cenderung terakumulasi dalam tubuh organisme melalui rantai makanan. Salah satu logam berat yang perlu mendapat perhatian khusus adalah timbal (Pb), karena paparannya pada manusia dapat menimbulkan gangguan serius pada sistem saraf, ginjal, serta perkembangan kognitif, terutama pada anak-anak. Oleh karena itu, keberadaan timbal dalam badan air perlu dikendalikan secara ketat sesuai baku mutu lingkungan yang berlaku (Radenković *et al*., 2025; Younas *et al*., 2024).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode telah dikembangkan guna menghilangkan logam berat dari limbah cair, di antaranya presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, dan adsorpsi. Di antara metode-metode tersebut, adsorpsi dinilai sebagai salah satu alternatif yang menjanjikan untuk menghilangkan polutan logam berat anorganik, termasuk timbal karena menawarkan proses yang relatif sederhana, kemudahan dalam operasional, serta potensi biaya yang relatif rendah dan juga efisiensi yang tinggi. Berbagai jenis material dapat dimanfaatkan sebagai adsorben, salah satunya biochar yang menarik perhatian untuk mendukung pengolahan air limbah secara berkelanjutan (Mei *et al*., 2025). Pada penelitiannya Biswal & Balasubramanian (2023) melaporkan biochar juga menunjukkan kinerja yang menjanjikan dalam menghilangkan berbagai logam berat (Cr, Pb, Cu, Cd, dan Zn) dari air limbah. Kapasitas adsorpsi logam berat oleh biochar sangat bergantung pada karakteristik kimia air/air limbah (pH, ion-ion pesaing, dan konsentrasi awal adsorbat), waktu kontak antara adsorbat dan adsorben, dosis adsorben, serta parameter lingkungan (suhu). Selain itu, metode ini tidak menghasilkan produk samping berbahaya dan tetap efektif digunakan meskipun pada konsentrasi logam berat yang rendah, menjadikannya pilihan yang menjanjikan untuk diterapkan secara luas dalam penanganan pencemaran logam berat di lingkungan perairan (Fei & Hu, 2023).

Efektivitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh karakteristik adsorben yang digunakan, seperti luas permukaan spesifik, struktur pori, dan gugus fungsi permukaan. Karbon aktif komersial banyak digunakan sebagai adsoben karena memiliki karakteristik tersebut dan dapat diproduksi dari berbagai bahan baku, baik sumber fosil seperti batu bara maupun biomassa terbarukan seperti tempurung kelapa dan residu pertanian lainnya (Chew *et al*., 2023). Namun, proses produksi karbon aktif yang melibatkan karbonisasi dan dilanjutkan dengan aktivasi yang menambah tahapan pengolahan serta dapat memengaruhi biaya produksi. Oleh karena itu, pengembangan adsorben alternatif berbasis sumber daya terbarukan menjadi salah satu pendekatan yang potensial (Ullah *et al*., 2024). Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah memanfaatkan limbah biomassa sebagai bahan baku untuk menghasilkan material fungsional bernilai tambah. Pendekatan pemanfaatan limbah dalam pengembangan material telah dilaporkan oleh Duana *et al*. (2023) dan Zuhra *et al*. (2024) Upaya tersebut sejalan dengan konsep *waste to value*, yaitu pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai tambah yang mendukung pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan (Sathiyamoorthy *et al*., 2026; Shukla *et al*., 2022)

Untuk mendukung pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan, residu pertanian berupa sekam padi berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku material bernilai tambah. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2025), produksi gabah kering giling (GKG) Indonesia pada tahun 2024 mencapai sekitar 53,14 juta ton dengan sekam padi sekitar 20% dari berat gabah. Sekam padi berdasarkan analisis sinar-X yang dilakukan oleh (Kordi *et al*., 2024) melaporkan bahwa pada permukaan luar maupun dalam sekam padi menunjukkan komposisi unsurnya, yaitu 9,55%–18,74% karbon, 30,90%–35,51% oksigen, 58,19%–43,17% silika, dan 1,36%–

1,66% kalium berdasarkan beratnya. Selain itu, sekam padi terdiri dari serat-serat berongga yang tersusun atas selulosa (25%–33%), lignin (25%–31%), dan hemiselulosa (18%–21%), dengan kandungan pentosan (15%) serta mineral—termasuk silika (16%) dalam jumlah yang lebih kecil (Chen *et al*., 2019). Komposisi tersebut menjadikan sekam padi berpotensi dikonversi menjadi biochar melalui proses pirolisis. Biochar sekam padi telah dikaji sebagai material untuk remediasi tanah dan air, sedangkan karakteristiknya dapat dipengaruhi oleh suhu pirolisis dan kondisi proses lainnya (El-Sayed, 2025; Li *et al*., 2023)

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termokimia biomassa pada suhu tinggi dengan ketersediaan oksigen yang sangat terbatas, sehingga material lignoselulosa terurai menjadi produk padat (*biochar*), cair (*bio-oil*), dan gas. Selama proses tersebut, kadar air dan senyawa volatil dilepaskan dari biomassa, sehingga terbentuk struktur karbon berpori yang berpotensi meningkatkan luas permukaan dan kemampuan adsorpsi biochar (Hamidu *et al*., 2025). Karakterisasi biochar sekam padi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk memperoleh informasi mengenai karakteristik fisikokimia material. Analisis SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan pori yang terlihat pada biochar, yang dapat memberikan gambaran mengenai karakteristik permukaan adsorben. Analisis FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi permukaan yang berpotensi berperan dalam interaksi dengan ion timbal (Pb^{2+}). Sementara itu, analisis XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristalin dan mengevaluasi keteraturan struktur material serta keberadaan fase mineral dalam biochar. Ketiga metode karakterisasi tersebut memberikan informasi yang saling melengkapi untuk memahami karakteristik biochar sekam padi dan mengevaluasi potensinya sebagai adsorben ion Pb^{2+}.

Penelitian mengenai pemanfaatan biochar sekam padi untuk adsorpsi logam berat, khususnya timbal (Pb^{2+}), telah di pelajari dengan mengombinasikan beragam pendekatan dan kondisi operasi. Liu *et al*., (2020) mengkaji mekanisme adsorpsi Pb2+ secara kualitatif dan kuantitatif menggunakan biochar sekam padi, jerami padi, dan serbuk kayu yang di pirolisis pada suhu 400-600 ^{o}C dalam *fluidized bed*. Kapasitas adsorpsi Pb^{2+} pada biochar sekam padi dilaporkan sebesar 25,15–30,40 mg/g, lebih rendah dibandingkan biochar jerami padi yang mencapai 116–127,57 mg/g. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa jenis bahan baku dan suhu pirolisis memengaruhi kapasitas serta mekanisme adsorpsi Pb^{2+}. Pada penelitian lain Ndekei *et al*., (2021) memanfaatkan biochar sekam padi yang diaktivasi secara kimia untuk untuk menyisihkan ion Cu(II) dan Pb(II) dengan variasi temperatur yaitu 300, 400, 500, 600, dan 700°C selama 2 jam dengan efisiensi penyisihan mencapai 99,26% untuk Cu(II) dan 97,03% untuk Pb(II). Huang *et al*., (2025) lebih lanjut membandingkan biochar sekam padi yang tidak dimodifikasi dengan biochar yang telah dimodifikasi menggunakan asam nitrat (HNO_3) dan kalium hidroksida (KOH). Biochar yang dimodifikasi dengan KOH pada suhu pirolisis 300 °C menghasilkan kapasitas adsorpsi Pb(II) maksimum sebesar 170,84 mg/g. Berdasarkan hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik bahan baku, kondisi pirolisis, dan perlakuan modifikasi memengaruhi kinerja adsorpsi biochar (Huang *et al*., 2025; Liu *et al*., 2020; Ndekei *et al*., 2021).

Selain karakteristik adsorben keberhasilan proses adsorpsi juga dipengaruhi oleh kondisi operasional, salah satunya adalah waktu kontak. Parameter ini penting untuk menentukan waktu yang diperlukan agar proses adsorpsi mencapai kesetimbangan. Waktu kontak menentukan lamanya interaksi antara ion logam dan situs aktif pada permukaan adsorben serta memengaruhi jumlah ion logam yang dapat teradsorpsi (Bih *et al*., 2025; Mei *et al*., 2025). Pada tahap awal, kapasitas adsorpsi dapat meningkat seiring bertambahnya waktu kontak karena ion Pb^{2+} memiliki kesempatan lebih besar untuk berinteraksi dengan situs aktif adsorben. Namun, peningkatan tersebut dapat melambat ketika situs aktif semakin terisi dan sistem mendekati kesetimbangan. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi pengaruh waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi biochar sekam padi hasil pirolisis tanpa aktivasi dalam menyerap ion Pb^{2+}.

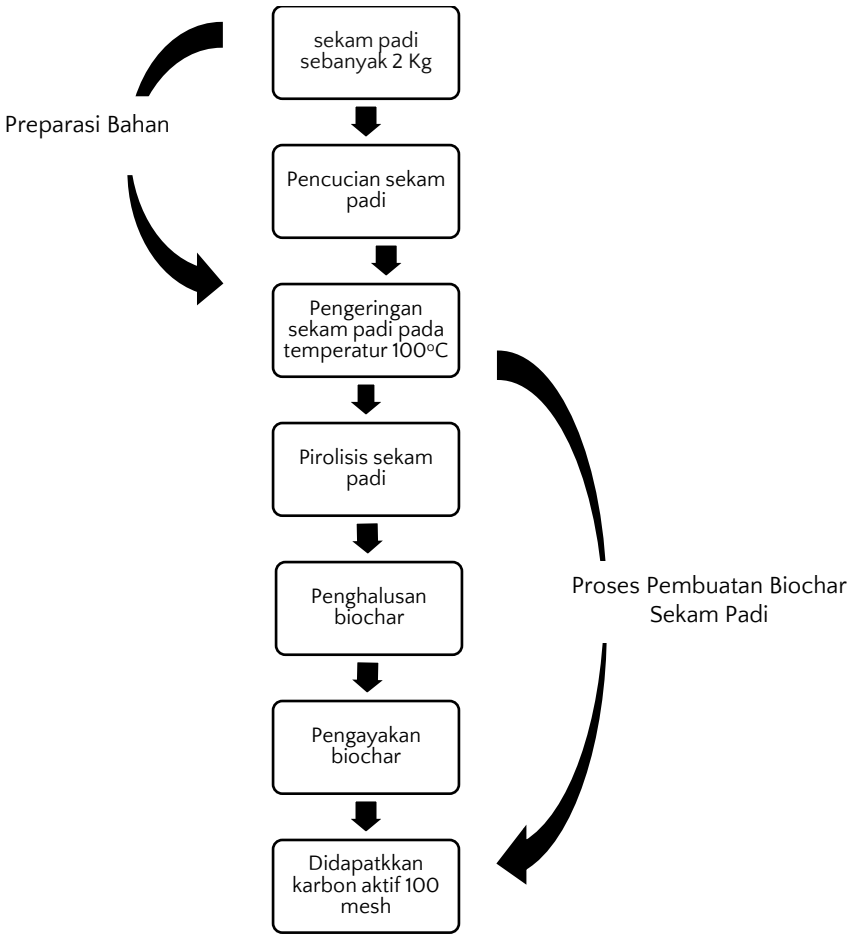
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan menyintesis biochar sekam padi melalui pirolisis menggunakan furnace tanpa aktivasi maupun modifikasi kimia, mengkarakterisasi material menggunakan SEM, FTIR, dan XRD, serta mengevaluasi pengaruh waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+}. Kombinasi pengujian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik morfologi, gugus fungsi, dan fase kristalin biochar serta perubahan kapasitas adsorpsinya terhadap waktu. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar untuk menilai potensi sekam padi sebagai bahan baku adsorben alternatif dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat.

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang bertujuan untuk mensintesis biochar berabahan baku sekam padi, mengkarakteriasi sifat fisik dan kimianya, serta mengevaluasi pengaruh waktu adsorpsi terhadap efisiensi adsorpsi logam timbal (Pb^{2+}). Adapun tahapan penelitiannya meliputi preparasi bahan baku, sintesis biochar sekam padi, karakterisasi biochar dan uji adsorpsi. Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sekam padi, $Pb(NO_3)_2$, dan akuades. Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain, ayakan 100 mesh, oven dryer, Furnance (*Line Thermolyne, model: FB1410M-33*), labu ukur 250 mL, gelas ukur 50 mL dan 100 mL, timbangan Digital (*Ohaus*), Erlenmeyer 250 ml dan 1000 mL, SEM (*Scanning Electron Microscope Jeol JSM-6350LA*), FTIR (*Fourier Transform Infra Red; Shimadzu IR Prestige 21*), AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry; Shimadzu AA-6300*), XRD *(X-Ray Diffraction Shimadzu 7000).*

Persiapan bahan dimulai dengan penyucian sekam padi dalam wadah berisi air untuk menghilangkan zat pengotor pada sekam padi. Kemudian sekam padi yang telah dicuci dikeringkan dengan oven pada temperature 100°C. Kemudian Sekam Sekam padi diaktifkan melalui proses pirolisis di dalam furnace selama 2 jam dengan temperatur yaitu 500°C dengan aliran gas nitrogen (N^2) (Divyangkumar *et al*., 2024; Wang *et al*., 2022). Biochar yang dihasilkan selanjutnya dihaluskan dengan penggerus porselen dan diayak hingga ukuran 100 mesh. Proses pembuatan biochar sekam padi diperlihatkan pada Gambar 1.

Biochar sekam padi yang telah disintesis kemudian dikarakterisasi untuk mengetahui sifat fisik dan kimianya. Karakterisasi dengan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan untuk menganalisis gugus fungsi yang terkandung didalam adsorben. Selanjutnya, karakterisasi struktur dengan X-



Gambar 1. Proses Pembuatan Biochar Sekam Padi

Ray Diffraction (XRD) menganalisis struktur kristal dan derajat kristalinitas biochar berdasarkan pola difraksi sinar-X. Morfologi permukaan dan struktur pori adsorben diamati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Hasil karakterisasi tersebut digunakan untuk mengevaluasi kualitas biochar yang dihasilkan serta hubungannya dengan kemampuan adsorpsi ion timbal (Pb^{2+}).

Studi adsorpsi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan biochar sekam padi dalam menyisihkan ion timbal (Pb^{2+}) dari larutan menggunakan sistem batch. Proses adsorpsi dilakukan pada variasi waktu kontak 20, 40, 60, 80, dan 100 menit. Larutan Pb^{2+} dengan konsentrasi awal 20 mg/L disiapkan dengan melarutkan timbal (II) nitrat ($Pb(NO_3)_2$) dalam akuades. Massa $Pb(NO_3)_2$ yang digunakan dihitung berdasarkan massa Pb yang dibutuhkan untuk mencapai konsentrasi awal tersebut, dengan memperhitungkan perbandingan massa molar Pb terhadap $Pb(NO_3)_2$. Pada setiap pengujian, 1 g biochar sekam padi dicampurkan dengan 10 mL larutan Pb^{2+}. Proses adsorpsi dilakukan pada suhu lingkungan 28 °C dengan kecepatan pengadukan 180 rpm. Waktu kontak divariasikan selama 20, 40, 60, 80, dan 100 menit, sedangkan konsentrasi awal Pb^{2+}, massa adsorben, volume larutan, suhu, dan kecepatan pengadukan dijaga konstan. Konsentrasi Pb^{2+} sebelum dan sesudah proses adsorpsi dianalisis menggunakan *spektrofotometer serapan atom* (AAS). Data konsentrasi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung kapasitas dan efisiensi adsorpsi menggunakan persamaan berikut. Data konsentrasi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung kapasitas dan efisiensi adsorpsi menggunakan persamaan berikut:

Kapasitas adsorpsi dihitung menggunakan persamaan:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}$$

Efisiensi adsorpsi dihitung menggunakan persamaan:

$$\%\text{Removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100\%$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Fourier Transform Infra Red (FTIR) yang dilakukan bertujuan untuk menentukan gugus fungsi atau komponen adsorben biochar sekam padi. Berdasarkan hasil analisis FTIR pada adsroben sekam padi, yang ditunjukkan pada Gambar 2 terlihat beberapa puncak serapan khas yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi aktif pada permukaan adsorben. Spektrum FTIR menunjukkan beberapa pita serapan utama pada bilangan gelombang 3648 cm^{-1}, 3026 cm^{-1}, 1869 cm^{-1}, 1577 cm^{-1}, dan sekitar 1050–1100 cm^{-1}.

Pita serapan pada 3648 cm^{-1} diidentifikasi sebagai vibrasi ulur gugus hidroksil (O–H) yang berasal dari gugus hidroksil maupun silanol (Si–OH). Keberadaan gugus hidroksil menunjukkan bahwa permukaan adsorben masih memiliki gugus fungsi yang bersifat polar dan dapat berperan sebagai situs aktif dalam proses adsorpsi melalui pembentukan ikatan hidrogen maupun kompleksasi dengan ion logam. Pita serapan ini juga mengindikasikan retensi gugus fungsi fenolik atau alkoholik, serta kemungkinan adanya air yang teradsorpsi pada permukaan material terkarbonisasi (Goularte *et al*., 2025; Singh Karam *et al*., 2022).

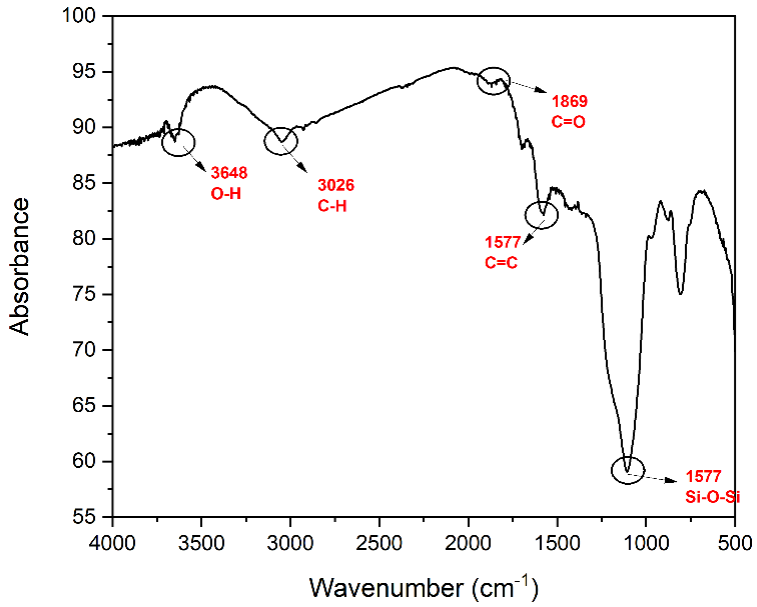
Puncak pada 3026 cm^{-1} merupakan vibrasi ulur ikatan C–H, yang mengindikasikan keberadaan struktur hidrokarbon aromatik maupun alifatik hasil pirolisis biomassa. Selanjutnya, pita serapan pada 1869 cm^{-1} menunjukkan vibrasi gugus karbonil (C=O) disebabkan oleh gugus karbonil bebas, yang banyak terdapat dalam struktur selulosa dan hemiselulosa sekam padi yang telah diproses. Sedangkan pita pada 1577 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi ulur ikatan C=C pada cincin aromatik, yang berasal dari getaran struktur aromatik lignin di dalam sekam padi (Hamidu *et al*., 2025). Gugus karbonil dan struktur aromatik tersebut terbentuk akibat dekomposisi lignoselulosa selama proses pirolisis dan berperan dalam meningkatkan afinitas permukaan adsorben terhadap ion logam melalui mekanisme kompleksasi dan interaksi elektrostatik (Foong *et al*., 2022).

Pita serapan pada 1107 cm^{-1} diidentifikasi sebagai vibrasi ulur asimetris ikatan Si–O–Si, yang merupakan karakteristik khas silika amorf pada sekam padi. Keberadaan pita serapan ini menunjukkan bahwa silika masih mendominasi komponen anorganik adsorben setelah proses pirolisis. Menurut Haider *et al*., (2022), pita pada daerah tersebut mengindikasikan adanya jaringan siloksana (Si–O–Si) asimetris dan simetris yang terkondensasi dengan baik, sehingga mengonfirmasi keberadaan silika pada material berbasis sekam padi. Hasil ini konsisten dengan karakterisasi XRD yang menunjukkan dominasi fase SiO_2 pada biochar sekam padi. Selain berperan sebagai penyusun utama material, silika juga memiliki gugus silanol (Si–OH) pada permukaannya yang berfungsi sebagai situs aktif untuk berinteraksi dengan ion logam berat melalui mekanisme kompleksasi dan interaksi elektrostatik, sehingga mendukung proses adsorpsi (Hamidu *et al*., 2025; Rodriguez-Otero *et al*., 2024).

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi FTIR menunjukkan bahwa biochar sekam padi hasil pirolisis memiliki gugus fungsi O–H, C–H, C=O, C=C, dan Si–O–Si. Keberadaan gugus-gugus fungsi tersebut menunjukkan bahwa adsorben memiliki situs aktif yang berpotensi mendukung proses adsorpsi ion Pb^{2+} melalui mekanisme interaksi elektrostatik, kompleksasi permukaan, serta pembentukan ikatan dengan gugus yang mengandung oksigen.

Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*) bertujuan untuk mengetahui struktur kristalin pada adsorben dari kitosan dan adsorben yang ditandai dengan puncak-puncak pada sudut 2θ ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan pola difraksi sinar-X menunjukkan bahwa adsorben sekam padi didominasi oleh fase SiO_2, Al_2O_3 dan Fe_2O_3 dengan persentasi masing- masing sebesar 60,2% , 20,2% dan 19,5%, yang menunjukkan bahwa SiO_2 merupakan fase dominan dalam adsorben. Puncak difraksi utama pada 2θ = 22,41° (d = 3,9670 Å) mengindikasikan keberadaan silika dengan karakteristik khas dengan struktur amorf yang berasal dari sekam padi. Pola difraksi yang lebar di sekitar 2θ = 22° merupakan karakteristik yang umum juga dilaporkan untuk silika amorf dari sekam padi (Nayak *et al*., 2019; Younesi & Ghasemi, 2011). Keberadaan fase-fase mineral ini memengaruhi interaksi antara permukaan biochar dan ion Pb^{2+} selama proses adsorpsi. Gao *et al*., (2020) menjelaskan dalam penelitian bahwa komponen mineral dan gugus fungsi yang mengandung oksigen dalam biochar dapat berkontribusi terhadap adsorpsi Pb^{2+} melalui berbagai mekanisme.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Sevim *et al*. (2025) yang melaporkan bahwa *biochar* sekam padi hasil pirolisis pada suhu 500 °C menunjukkan puncak difraksi pada sekitar 2θ = 22° dan 45°, yang berkaitan dengan sifat amorf dan rendahnya derajat grafitisasi struktur karbon. Karakteristik tersebut diduga dipengaruhi oleh tumpang



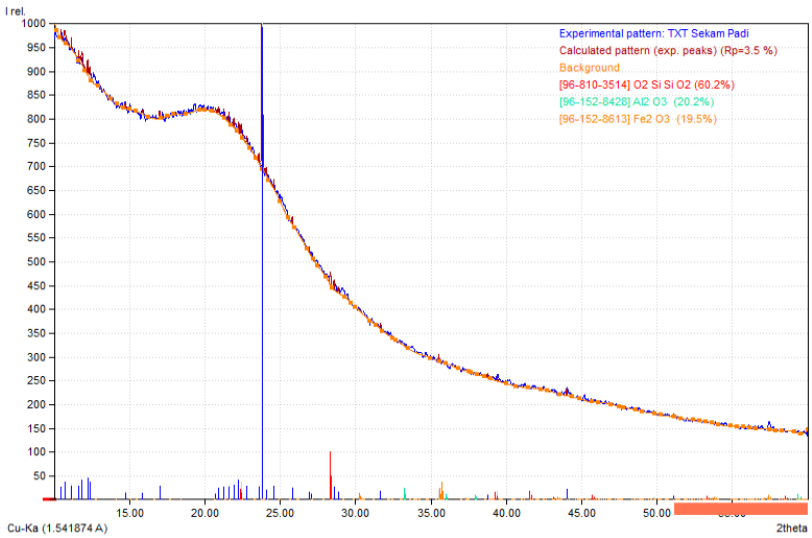
Gambar 2. Hasil analisa FTIR adsorben sekam padi

tindih difraksi antara fase silika dan karbon pada material sekam padi. Selain itu, (Haider *et al*. (2022) melaporkan bahwa silika berbasis sekam padi memiliki karakter amorf dengan struktur mesopori. Struktur amorf tersebut memiliki tingkat kristalinitas yang rendah sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif pada permukaan adsorben untuk berinteraksi dengan ion logam berat. Menurut Lubis *et al*.(2025)material berbasis silika memiliki kemampuan yang baik dalam mengadsorpsi logam berat karena menyediakan situs aktif yang mendukung mekanisme adsorpsi melalui kompleksasi dan interaksi elektrostatik. Dominasi SiO_2 pada adsorben juga berkontribusi terhadap kemampuan adsorpsi melalui keberadaan gugus silanol (Si–OH) yang dapat berperan sebagai situs pengikatan ion logam berat. Dengan demikian, karakteristik struktur dan komposisi adsorben yang diperoleh menunjukkan potensi karbon sekam padi sebagai adsorben untuk penyisihan ion Pb^{2+} dari larutan (Rodriguez-Otero *et al*., 2024).

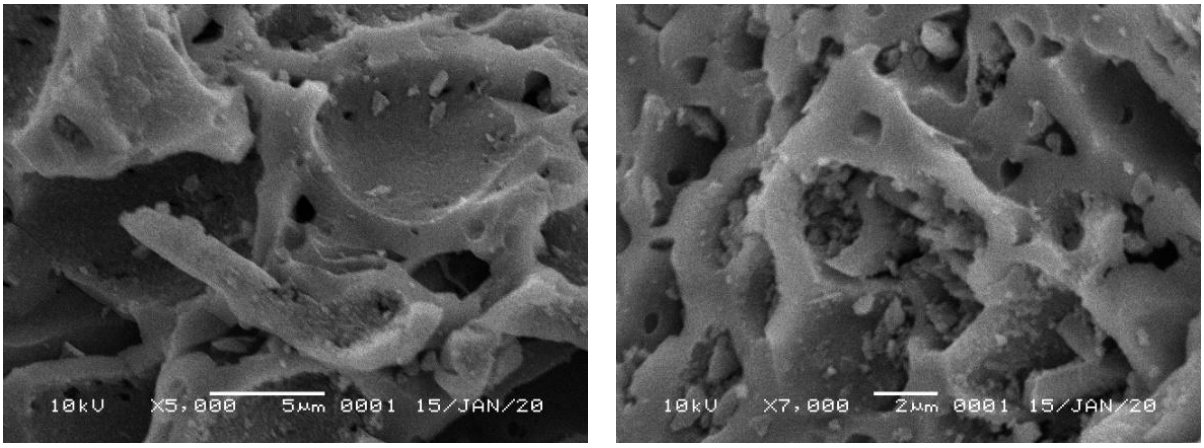
Keberadaan Al_2O_3 dan Fe_2O_3 dalam adsorben sekam padi juga berpotensi mendukung proses adsorpsi Pb^{2+} melalui penyediaan situs aktif pada permukaan. Fe_2O_3 dapat berperan dalam pengikatan ion logam melalui mekanisme interaksi elektrostatik, pertukaran ion, presipitasi, dan kompleksasi (Y. Li *et al*., 2023). Selain itu, keberadaan Al pada permukaan oksida besi dapat meningkatkan ketersediaan situs aktif melalui pembentukan gugus Al–OH yang berinteraksi dengan Pb^{2+} (Y. Li *et al*., 2024). Oleh karena itu, keberadaan SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 secara bersamaan berpotensi menyediakan berbagai situs interaksi pada permukaan adsorben yang mendukung proses penyisihan Pb^{2+} dari larutan.

Berdasarkan hasil analisis Scanning Electron Microscopy (SEM**)** pada Gambar 4. (a) dan (b) menunjukkan permukaan adsorben sekam padi dengan morfologi yang tidak beraturan ditandai dengan adanya rongga dan pori pada permukaan. Terbentuknya struktur berpori tersebut dapat dikaitkan dengan proses pirolisis yang menyebabkan dekomposisi komponen lignoselulosa serta pelepasan senyawa volatil dari biomassa, sehingga meninggalkan struktur kaya karbon dengan rongga-rongga di tempat komponen tersebut tadinya berada. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Nguyen *et al.* (2023)pada biochar sekam padi yang dipirolisis pada suhu 500 °C, yang juga melaporkan terbentuknya struktur berpori dengan permukaan relatif kasar dan tidak beraturan akibat pelepasan komponen volatil selama proses pirolisis.

Selain berpori, permukaan adsorben juga memperlihatkan struktur yang tidak homogen, dengan sebagian area tampak lebih padat sementara bagian lainnya membentuk rongga. Morfologi tersebut merupakan karakteristik umum biochar sekam padi, karena struktur karbon yang terbentuk selama pirolisis masih mempertahankan sebagian karakteristik jaringan seluler bahan asalnya. Beberapa penelitian terbaru juga melaporkan bahwa biochar sekam padi umumnya memiliki permukaan yang kasar dan berpori, dengan keberadaan silika sebagai komponen anorganik utama turut memengaruhi morfologi permukaan material tersebut (Kaya, 2017; Sun *et al*., 2024).



Gambar 3. Profil XRD untuk adsorben sekam padi



(a) **(b)**

Gambar 4. Morfologi adsorben (a) Sekam Padi x5000, 5µm (b)Sekam Padi x7000, 2µm

Keberadaan pori pada permukaan adsorben menjadi karakteristik penting dalam aplikasinya sebagai adsorben karena dapat meningkatkan luas permukaan dan menyediakan ruang bagi ion Pb^{2+} untuk berinteraksi dengan permukaan material. Li *et al*. (2024) dalam penelitiannya melaporkan bahwa semakin meningkatnya porositas pada biochar yang kaya akan silika, menyebabkan semakin bertambahnya kemampuan adsorpsi Pb^{2+}. Kemampuan adsorpsi tersebut terjadi dalam beberapa mekanisme diantaranya interaksi elektrostatik, pertukaran ion, ikatan dengan gugus fungsi, dan pengendapan (presipitasi). Dengan demikian, morfologi permukaan yang berpori dan tidak beraturan pada biochar sekam padi menunjukkan karakteristik bahwa material ini berpotensi digunakan sebagai adsorben untuk menyisihkan Pb^{2+}.

Studi adsorpsi untuk melihat pengaruh waktu kontak terhadap kapasitas dan efisiensi adsorpsi ion Pb^{2+} menggunakan biochar padi terpiroslisi. Berdasarkan hasil analisa yang ditunjukkan pada Gambar 5, kapasitas adsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Pada waktu kontak 20 menit menunjukkan kapasitas adsorpsi 0,601 mg/g dan menjadi 0,769 mg/g pada waktu kontak 100 menit. Peningkatan yang paling signifikan terjadi pada interval 20–40 menit, sedangkan setelah 40 menit kenaikan kapasitas adsorpsi cenderung melambat hingga mendekati kondisi konstan. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa pada tahap awal adsorpsi masih tersedia banyak situs aktif pada permukaan adsorben sehingga ion Pb^{2+} dapat berinteraksi dan terikat dengan cepat, sehingga proses adsorpsi berlangsung cepat. Seiring bertambahnya waktu kontak, jumlah ion Pb^{2+} yang berikatan dengan permukaan adsorben semakin meningkat, sehingga kapasitas adsorpsi juga meningkat. Waktu kontak merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi keberhasilan proses adsorpsi karena menentukan lama interaksi antara adsorben dan adsorbat (Okoro *et al*., 2022).

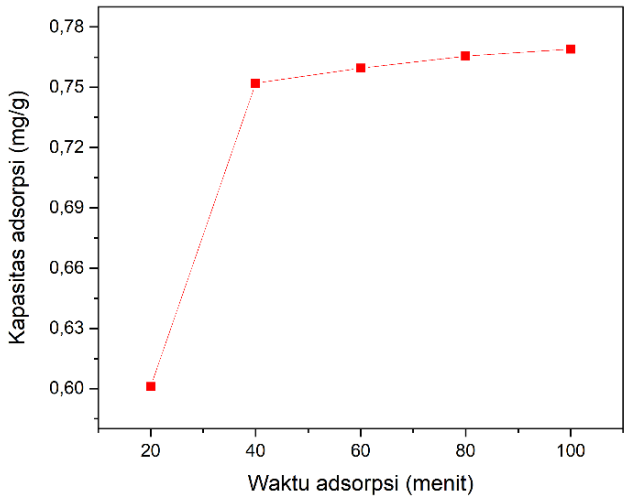
Seiring berlangsungnya proses adsorpsi, sebagian besar situs aktif pada permukaan adsorben mulai terisi sehingga laju adsorpsi menurun dan sistem secara bertahap mencapai kondisi kesetimbangan (*adsorption equilibrium*). Kesetimbangan adsorpsi terjadi ketika adsorben telah berkontak dengan adsorbat dalam waktu yang cukup hingga mendekati kapasitas adsorpsi maksimumnya. Pada kondisi ini, laju adsorpsi dan desorpsi menjadi seimbang sehingga konsentrasi adsorbat yang tersisa di dalam larutan cenderung konstan meskipun waktu kontak terus ditambah (N. Kaya *et al*., 2024). Kondisi tersebut terlihat pada hasil penelitian, di mana peningkatan kapasitas adsorpsi setelah waktu kontak 40 menit relatif kecil dibandingkan dengan pada tahap awal. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar situs aktif pada permukaan adsorben telah terisi oleh ion Pb^{2+} sehingga adsorben mulai mendekati kondisi jenuh. Akibatnya, penambahan waktu kontak tidak lagi meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan. Pola tersebut merupakan karakteristik umum proses adsorpsi logam berat menggunakan biochar dan biochar berbasis biomassa (Sevim *et al*., 2025; Shi *et al*., 2024).

Pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi adsorpsi menunjukkan tren yang sama dengan pengaruhnya terhadap kapasitas adsorpsi. Berdasarkan Gambar 6, semakin lama waktu kontak, semakin besar jumlah ion Pb^{2+} yang berinteraksi dengan situs aktif pada permukaan biochar, sehingga persentase penyisihan Pb^{2+} juga meningkat. Peningkatan efisiensi adsorpsi ini berlangsung cepat pada tahap awal. Namun, setelah mendekati

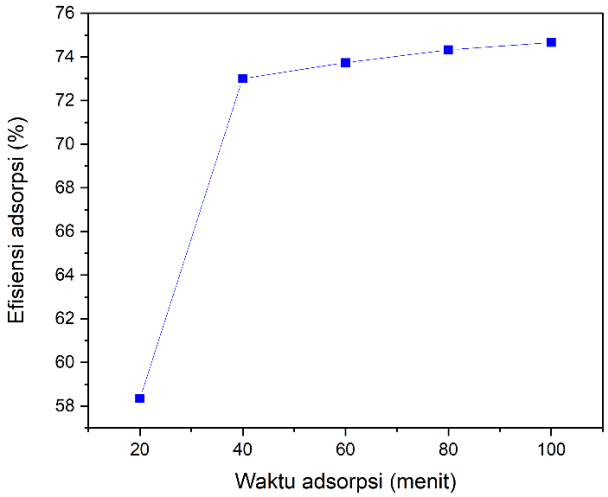
kondisi kesetimbangan, peningkatan efisiensi melambat karena jumlah situs aktif yang belum terisi semakin berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa waktu kontak merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi efisiensi penyisihan logam berat karena menentukan durasi interaksi antara adsorben dan adsorbat (Okoro *et al*., 2022).

Berdasarkan hasil karakteriasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus Si-O-Si, sedangkan pada analisi XRD mengidentifikasi SiO_2 sebagai fase dengan persentase tertinggi, yaitu 60,2%. Kedua hasil karakterisasi tersebut menunjukkan keberadaan komponen silika pada biochar sekam padi yang berpotensi berkontribusi terhadap interaksi dengan ion Pb. Gao *et al*. (2020) serta Xu *et al*. (2014) melaporkan bahwa komponen mineral dan gugus fungsi pada biochar dapat berkontribusi terhadap adsorpsi Pb^{2+} melalui mekanisme yang berbeda.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Li *et al*. (2023) yang melaporkan bahwa kapasitas adsorpsi biochar sekam padi terhadap logam berat meningkat seiring bertambahnya waktu kontak hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Selain itu, Y. Sun *et al*., (2022)menyatakan bahwa adsorpsi Pb^{2+} menggunakan biochar berlangsung cepat pada tahap awal karena masih banyaknya situs aktif yang tersedia, kemudian laju adsorpsi menurun ketika permukaan adsorben mulai jenuh. Penelitian (Sherlala et al., 2018) juga menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan logam berat meningkat seiring bertambahnya waktu kontak hingga mencapai kondisi optimum, kemudian cenderung konstan setelah sebagian besar situs aktif pada adsorben terisi.



Gambar 5. Pengaruh waktu adsorpsi/kontak terhadap kapasitas adsorpsi



Gambar 6. Pengaruh waktu adsorpsi/kontak terhadap efisiensi adsorpsi

Berdasarkan hasil yang diperoleh, waktu kontak 100 menit menghasilkan kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar 0,769 mg/g dan efisiensi adsorpsi sebesar 74,66%. Namun, peningkatan kapasitas adsorpsi setelah 40 menit relatif kecil, begitu pula efisiensi adsorpsinya, yang mengindikasikan bahwa sistem telah mendekati kondisi kesetimbangan. Hal ini menunjukkan bahwa biochar sekam padi memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap ion Pb^{2+}, yang didukung oleh struktur pori dan gugus fungsi aktif yang telah dikonfirmasi melalui hasil karakterisasi FTIR, XRD, dan SEM.

KESIMPULAN

Biochar sekam padi berhasil disintesis melalui pirolisis pada suhu 500 °C selama 2 jam. Karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi O–H, C–H, C=O, C=C, dan Si–O–Si, sementara analisis XRD mengidentifikasi SiO_2 sebagai fase dominan (60,2%), bersama Al_2O_3 dan Fe_2O_3. Analisis SEM memperlihatkan morfologi permukaan yang heterogen dengan struktur berpori. Karakteristik-karakteristik tersebut meliputi gugus fungsi, fase mineral, dan morfologi yang berperan dalam proses adsorpsi, meskipun kontribusi spesifik masing-masing fitur terhadap penyisihan Pb^{2+} belum dapat ditentukan secara terpisah. Uji adsorpsi menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat dari 0,601 mg/g pada waktu kontak 20 menit menjadi 0,769 mg/g pada 100 menit, dengan efisiensi penyisihan maksimum sebesar 74,66%. Peningkatan kapasitas yang relatif kecil setelah 40 menit mengindikasikan bahwa sistem telah mendekati kesetimbangan. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa biochar sekam padi yang diproduksi melalui pirolisis berpotensi menjadi adsorben alternatif untuk menghilangkan Pb^{2+} dari larutan. Meskipun demikian, evaluasi lebih lanjut tetap diperlukan untuk mengoptimalkan kinerjanya serta menilai kelayakan penerapannya dalam pengolahan air atau air limbah.

DAFTAR PUSTAKA

Bih, N.L., Rwiza, M.J., Ripanda, A.S., Mahamat, A.A., Machunda, R.L., & Choi, J.W. 2025. Adsorption of phenol and methylene blue contaminants onto high-performance catalytic activated carbon from biomass residues. *Heliyon*, 11(1): e41150. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41150

Biswal, B.K., & Balasubramanian, R. 2023. Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5): 110986. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986

Chen, R.S., Ahmad, S., Gan, S., & Tarawneh, M. 2019. High loading rice husk green composites: dimensional stability, tensile behavior and prediction, and combustion properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33: 882–897. https://doi.org/10.1177/0892705718815536

Chew, T.W., H'ng, P.S., Abdullah, L.C., Chin, K.L., Lee, C.L., Hafizuddin, M.N.S., & TaungMai, L. 2023. A review of bio-based activated carbon properties produced from different activating chemicals during chemicals activation process on biomass and its potential for Malaysia. *Materials*, 16(23): 7365. https://doi.org/10.3390/ma16237365

Divyangkumar, N., Panwar, N.L., Agrawal, C., Gupta, T., Meena, G.L., & Singh, M. 2024. Cradle-to-gate analyses of biochar produced from agricultural crop residues by vacuum pyrolysis. *Clean Energy*, 8(6): 1–15. https://doi.org/10.1093/ce/zkae069

Duana, C.M., Aprilia, S., Mulana, F., Rosnelly, C.M., & Zuhra. 2023. Mechanical properties of hybrid composites reinforced with oil palm empty fruit bunches/fly ash. *AIP Conference Proceedings*, 2613(1): 1-6. https://doi.org/10.1063/5.0120239

El-Sayed, S.A. 2025. Chemical products yielded from different pyrolysis processes of rice waste residues: a comprehensive review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(14): 20615–20655. https://doi.org/10.1007/s13399-025-06624-3

Fei, Y., & Hu, Y.H. 2023. Recent progress in removal of heavy metals from wastewater: a comprehensive review. *Chemosphere*, 335: 139077. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139077

Foong, S.Y., Chan, Y.H., Chin, B.L.F., Lock, S.S.M., Yee, C.Y., Yiin, C.L., Peng, W., & Lam, S.S. 2022. Production of biochar from rice straw and its application for wastewater remediation – an overview. *Bioresource Technology*, 360: 127588. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127588

Gao, Y., Zhang, H., Kang, H., Huang, M., & Lai, F. 2020. Road performance of liquid nitrile-butadiene rubber modified unsaturated polyester resin concrete. *Construction and Building Materials*, 263: 120479. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120479

Goularte, M.P., de Sousa, Á.F., Cholant, C., Romano, L., Labidi, J., Missio, A.L., Acosta, A., & Gatto, D.A. 2025. Pyrolysis of rice husk for the production of bioactive compounds with potential in green chemistry and sustainable agriculture. *Molecules*, 30(13): 2754. https://doi.org/10.3390/molecules30132754

Haider, J.B., Haque, M.I., Hoque, M., Hossen, M.M., Mottakin, M., Khaleque, M.A., Johir, M.A.H., Zhou, J.L., Ahmed, M.B., & Zargar, M. 2022. Efficient extraction of silica from openly burned rice husk ash as adsorbent for dye removal. *Journal of Cleaner Production*, 380: 135121. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135121

Hamidu, I., Afotey, B., Kwakye-Awuah, B., & Anang, D.A. 2025. Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: a review. *Heliyon*, 11(4): e42491. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491

Huang, Z., Wang, Q., Zhang, Y., Du, B., Zhou, J., & Ji, D. 2025. Effects of pyrolysis temperatures and modified methods on rice husk-derived biochar characteristics and heavy metal adsorption. *Molecules*, 30(17): 3616. https://doi.org/10.3390/molecules30173616

Kaya, M. 2017. Preparation and TG/DTG, FT-IR, SEM, BET surface area, iodine number and methylene blue number analysis of activated carbon from pistachio shells by chemical activation. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 16 (2): 20170060. https://doi.org/10.1515/ijcre-2017-0060

Kaya, N., Carus Özkeser, E., & Yıldız Uzun, Z. 2024. Investigating the effectiveness of rice husk-derived low-cost activated carbon in removing environmental pollutants: a study of its characterization. *International Journal of Phytoremediation*, 26(3): 427–447. https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2246584

Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M.I., & Ahmadikhah, A. 2024. Rice husk at a glance: from agro-industrial to modern applications. *Rice Science*, 31(1): 14–32. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005

Li, Y., Yin, H., Cai, Y., Luo, H., Yan, C., & Dang, Z. 2023. Regulating the exposed crystal facets of α-Fe_2O_3 to promote Fe_2O_3-modified biochar performance in heavy metals adsorption. *Chemosphere*, 311: 136976. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136976

Li, Y., Zhao, M., Yan, H., Chen, Y., Liu, Y., Jiang, H., Chen, L., Hou, S., Chi, N., & Jia, S. 2024. Silica from rice husk for sludge-based biochar modification: as a novel adsorbent for lead. *Journal of Water Process Engineering*, 60: 105218. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105218

Li, Z., Zheng, Z., Li, H., Xu, D., Li, X., Xiang, L., & Tu, S. 2023. Review on rice husk biochar as an adsorbent for soil and water remediation. *Plants*, 12(7): 1524. https://doi.org/10.3390/plants12071524

Liu, L., Huang, Y., Meng, Y., Cao, J., Hu, H., Su, Y., Dong, L., Tao, S., & Ruan, R. 2020. Investigating the adsorption behavior and quantitative contribution of Pb^{2+} adsorption mechanisms on biochars by different feedstocks from a fluidized bed pyrolysis system. *Environmental Research*, 187: 109609. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109609

Lubis, S.B.P., Inayah, S., Duana, C.M., Ismi, N., Dienna, A.N., & Permatasari, D.I. 2026. Pencemaran dan toksikologi logam berat: dampak, deteksi dan penanggulangannya. U ME Publishing

Mei, Y., Zhuang, S., & Wang, J. 2025. Adsorption of heavy metals by biochar in aqueous solution: a review. *Science of the Total Environment*, 968: 178898. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178898

Nayak, P.P., Nandi, S., & Datta, A.K. 2019. Comparative assessment of chemical treatments on extraction potential of commercial grade silica from rice husk. *Engineering Reports*, 1(2): e12035. https://doi.org/10.1002/eng2.12035

Ndekei, A., Gitita, M., Njomo, N., & Mbui, D. 2021. Synthesis and characterization of rice husk biochar and its application in the adsorption studies of lead and copper. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 22(4): 36–50. https://doi.org/10.9734/irjpac/2021/v22i430402

Nguyen, T.B., Nguyen, V.T., Hoang, H.G., Cao, N.D.T., Nguyen, T.T., Vo, T.D.H., Nguyen, N.K.Q., Pham, M.D.T., Nghiem, D.L., Vo, T.K.Q., Dong, C.D., & Bui, X.T. 2023. Recent development of algal biochar for

contaminant remediation and energy application: a state-of-the art review. *Current Pollution Reports*, 9(1): 73–89. https://doi.org/10.1007/s40726-022-00243-6

Okoro, H.K., Alao, S.M., Pandey, S., Jimoh, I., Basheeru, K.A., Caliphs, Z., & Ngila, J.C. 2022. Recent potential application of rice husk as an eco-friendly adsorbent for removal of heavy metals. *Applied Water Science*, 12(12): 259. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01778-1

Radenković, M., Kovačević, M., Radojičić, V., Tošić, M., Momčilović, M., & Živković, S. 2025. Corn residue-based activated carbon for heavy metal removal: a review of adsorptive performance and properties. *Processes*, 13(11): 3406. https://doi.org/10.3390/pr13113406

Rodriguez-Otero, A., Galarneau, A., Drané, M., Vargas, V., Sebastian, V., Wilson, A., Grégoire, D., Radji, S., Marias, F., Christensen, J.H., & Bouyssiere, B. 2024. Towards achieving circular economy in the production of silica from rice husk as a sustainable adsorbent. *Processes*, 12(11): 2420. https://doi.org/10.3390/pr12112420

Sathiyamoorthy, M., Ahmed, N., Bhargav, P.B., & Gokulasaravanan, T. 2026. Rice husk-derived activated carbon and recycled kerf silicon composite anodes for high-performance lithium-ion batteries. *Ionics*, 32: 1–16. https://doi.org/10.1007/s11581-026-07254-z

Sevim, F., Laçin, Ö., Demir, F., & Erkiliç, Ö.F. 2025. Adsorption capacity, isotherm, kinetics, and thermodynamics examinations on the removal of a textile azo dye by local natural adsorbent. *Global Challenges*, 9(5): 2500024. https://doi.org/10.1002/gch2.202500024

Sherlala, A.I.A., Raman, A.A.A., Bello, M.M., & Asghar, A. 2018. A review of the applications of organo-functionalized magnetic graphene oxide nanocomposites for heavy metal adsorption. *Chemosphere*, 193: 1004–1017. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.093

Shi, X., Yang, W., Li, J., & Yao, Z. 2024. The application of biochar as heavy metals adsorbent: the preparation, mechanism, and perspectives. *International Journal of Environmental Research*, 18(3): 41. https://doi.org/10.1007/s41742-024-00592-8

Shukla, S.S., Chava, R., Appari, S., A, B., & Kuncharam, B.V.R. 2022. Sustainable use of rice husk for the cleaner production of value-added products. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1): 106899. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106899

Singh Karam, D., Nagabovanalli, P., Sundara Rajoo, K., Fauziah Ishak, C., Abdu, A., Rosli, Z., Melissa Muharam, F., & Zulperi, D. 2022. An overview on the preparation of rice husk biochar, factors affecting its properties, and its agriculture application. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(3): 149–159. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.07.005

Sun, J., Yan, W., Liu, X., Hu, T., Xiong, Y., Tian, S., Feng, J., Huang, Z., & Zhao, Z. 2024. Rice husk waste-derived super-biochar with the max surface area and philic-CO_2 textural structure: boosting effect and mechanism of post-desilication. *Chemical Engineering Journal*, 490: 151583. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151583

Sun, Y., Su, G., He, Z., Wei, Y., Hu, J., Liu, H., & Liu, G. 2022. Porous carbons derived from desiliconized rice husk char and their applications as an adsorbent in multivalent ions recycling for spent battery. *Journal of Chemistry*, 2022: 8225088. https://doi.org/10.1155/2022/8225088

Ullah, S., Shah, S.S.A., Altaf, M., Hossain, I., El Sayed, M.E., Kallel, M., El-Bahy, Z.M., Rehman, A.U., Najam, T., & Nazir, M.A. 2024. Activated carbon derived from biomass for wastewater treatment: synthesis, application and future challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 179: 106480. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106480

Wang, G., Yong, X., Luo, L., Yan, S., Wong, J.W.C., & Zhou, J. 2022. Structure-performance correlation of high surface area and hierarchical porous biochars as chloramphenicol adsorbents. *Separation and Purification Technology*, 296: 121374. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121374

Xu, X., Cao, X., Zhao, L., Zhou, H., & Luo, Q. 2014. Interaction of organic and inorganic fractions of biochar with Pb(II) ion: further elucidation of mechanisms for Pb(II) removal by biochar. *RSC Advances*, 4(85): 44930–44937. https://doi.org/10.1039/c4ra07303g

Younas, F., Younas, S., Bibi, I., Farooqi, Z.U.R., Hameed, M.A., Mohy-Ud-Din, W., Shehzad, M.T., Hussain, M.M., Shakil, Q., & Shahid, M. 2024. A critical review on the separation of heavy metal(loid)s from the contaminated water using various agricultural wastes. *International Journal of Phytoremediation*, 26(3): 349–368. https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2242973

Younesi, H., & Ghasemi, Z. 2011. Preparation and characterization of nanozeolite NaA from rice husk at room temperature without organic additives. *Journal of Nanomaterials*, 2011: 858961. https://doi.org/10.1155/2011/858961

Zuhra, Z., Duana, C.M., Zuwanna, I., Rahmah, K., Mulana, F., Rosnelly, C.M., Meilina, H., Amin, A., & Aprilia, S. 2024. Effect of filler loading on hybrid composites reinforced with oil palm empty fruit bunches/fly ash: physicochemical properties and thermal analysis. *Rasayan Journal of Chemistry*, 17(4): 1517–1527. https://doi.org/10.31788/RJC.2024.1748822