Pembuatan Biochar dari Cangkang Pinang sebagai Adsorben Logam Kadmium (Cd)

Robert Tolly[1]✉, Daud Karel Walanda[2], Mery Napitupulu[3], Yuli Nurmayanti[4]
(1, 2, 3, 4) Program studi pendidikan kimia, Fakultas keguruan dan ilmu Pendidikan, Universitas Tadulako, Indonesia.

✉ Corresponding author
[roberttolly01@gmail.com]

Abstrak

Pencemaran logam berat, khususnya kadmium (Cd), merupakan masalah lingkungan yang serius karena bersifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan biochar cangkang pinang (Areca catechu L.) sebagai adsorben ion Cd^{2+} serta menentukan kondisi optimum adsorpsi menggunakan metode Taguchi. Biochar dibuat melalui proses pirolisis dan digunakan untuk mengadsorpsi Cd dengan variasi massa biochar, pH larutan, dan konsentrasi awal Cd. Metode Taguchi diterapkan untuk menganalisis pengaruh parameter dan menentukan kondisi optimum berdasarkan rasio Signal-to-Noise (S/N). Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar cangkang pinang mampu mengadsorpsi Cd secara efektif dengan efisiensi adsorpsi maksimum sebesar 96,98% dan kapasitas adsorpsi 11,64 mg/g pada pH 3, massa biochar 0,25 g, dan konsentrasi awal Cd 100 ppm. Optimasi Taguchi menghasilkan kondisi terbaik pada massa biochar 1,00 g, pH 4, dan konsentrasi awal 50 ppm. Hasil ini menunjukkan bahwa biochar cangkang pinang berpotensi sebagai adsorben ramah lingkungan untuk pengolahan limbah yang mengandung Cd.

Kata Kunci: *Adsorpsi*, *Biochar*, *Cd*, *Cangkang Pinang*, *Metode Taguchi*, *Removal*.

Abstract

Heavy metal contamination, particularly cadmium (Cd), poses a serious environmental problem due to its toxicity, persistence, and tendency to accumulate in the food chain. This study aimed to evaluate the adsorption performance of areca nut shell biochar (Areca catechu L.) for Cd^{2+} removal and to determine the optimum adsorption conditions using the Taguchi method. Biochar was produced through pyrolysis and applied as an adsorbent under different biochar masses, solution pH values, and initial Cd concentrations. The Taguchi method was employed to assess the effects of these parameters and identify the optimum conditions based on the Signal-to-Noise (S/N) ratio. The results showed that areca nut shell biochar effectively removed Cd^{2+}, achieving a maximum adsorption efficiency of 96.98% and an adsorption capacity of 11.64 mg/g at pH 3, 0.25 g biochar mass, and 100 ppm initial Cd concentration. Taguchi optimization indicated the best condition at 1.00 g biochar mass, pH 4, and 50 ppm initial Cd concentration. These findings demonstrate the potential of areca nut shell biochar as an environmentally friendly adsorbent for Cd-contaminated wastewater treatment.
Keywords: adsorption, biochar, cd, areca nut shell, taguchi method, removal

Article info
Submitted: May 05 2026; Accepted: June 01, 2026; Published: June 08, 2026

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan, khususnya pencemaran air, merupakan salah satu permasalahan global yang terus meningkat seiring dengan perkembangan industri, urbanisasi, dan pertumbuhan populasi (Strokal dkk., 2021). Aktivitas manusia seperti industri, pertambangan, dan pertanian menghasilkan limbah yang mengandung berbagai zat berbahaya, termasuk logam berat yang bersifat

toksik (Anita dkk., 2023). Logam berat memiliki sifat persisten dan tidak dapat terdegradasi secara alami sehingga dapat bertahan lama di lingkungan (Tripathi dkk., 2016). Selain itu, logam berat juga dapat terakumulasi dalam rantai makanan dan menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan manusia serta ekosistem perairan (Mohan dkk., 2018). Keberadaan logam berat dalam perairan juga dapat menurunkan kualitas air dan mengganggu organisme akuatik (Gökırmak & Gülcan, 2023). Oleh karena itu, pengendalian pencemaran logam berat dalam perairan menjadi salah satu fokus penting dalam upaya menjaga keberlanjutan lingkungan (Jerzak dkk., 2024).

Salah satu logam berat yang menjadi perhatian serius dalam pencemaran lingkungan adalah kadmium (Cd). Kadmium merupakan logam berat yang sangat beracun dan tidak memiliki fungsi biologis dalam tubuh manusia (Jaishankar dkk., 2016). Paparan kadmium dalam jumlah kecil sekalipun dapat menimbulkan efek toksik yang berbahaya bagi kesehatan. Keberadaan kadmium di lingkungan umumnya berasal dari aktivitas industri seperti produksi baterai, pelapisan logam, pupuk fosfat, serta limbah plastik (Mohan dkk., 2018). Limbah tersebut berpotensi mencemari perairan apabila tidak diolah dengan baik. Dalam perairan, kadmium umumnya berada dalam bentuk ion Cd^{2+} yang bersifat larut dan mudah berpindah (Anita dkk., 2023). Kondisi ini menyebabkan kadmium dapat dengan cepat menyebar dan masuk ke dalam rantai makanan. Paparan jangka panjang terhadap kadmium dapat menyebabkan kerusakan ginjal, gangguan tulang, serta meningkatkan risiko kanker (Tchounwou dkk., 2016). Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang efektif untuk mengurangi konsentrasi kadmium dalam lingkungan (Jaishankar dkk., 2016).

Salah satu metode yang banyak digunakan dalam pengolahan limbah logam berat adalah adsorpsi karena memiliki proses yang sederhana dan efisiensi yang tinggi (Foo & Hameed, 2021). Metode ini juga relatif mudah diaplikasikan serta dapat digunakan untuk berbagai jenis polutan (Gökırmak & Gülcan, 2023). Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan adsorben berbasis biomassa semakin berkembang karena lebih ramah lingkungan dan ekonomis (Inyang dkk., 2016).

Salah satu material yang banyak dikembangkan adalah biochar. Biochar merupakan material karbon berpori yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen (Anita dkk., 2023). Biochar memiliki luas permukaan yang tinggi serta gugus fungsi aktif yang dapat berinteraksi dengan ion logam berat Kemampuan biochar dalam mengadsorpsi logam berat telah banyak dilaporkan dalam berbagai penelitian (Tan dkk., 2021). Biochar terbukti efektif dalam menghilangkan kontaminan organik maupun anorganik dari air limbah (Mohan dkk., 2018). Pemanfaatan biochar juga sejalan dengan konsep pengelolaan limbah berkelanjutan karena menggunakan bahan baku biomassa yang melimpah.

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku biochar dalam proses adsorpsi logam berat terus berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai biomassa seperti sekam padi, tempurung kelapa, kulit pisang, tongkol jagung, dan ampas kopi telah digunakan sebagai bahan baku biochar untuk mengadsorpsi logam berat, termasuk kadmium (Cd), dari larutan berair (Mohan dkk., 2018). Biomassa tersebut dipilih karena memiliki kandungan lignoselulosa dan karbon yang tinggi sehingga mampu menghasilkan struktur biochar berpori dengan luas permukaan yang baik (Pineda Puglla dkk., 2020). Selain itu, keberadaan gugus fungsi aktif pada permukaan biochar juga berperan penting dalam proses pengikatan ion logam berat (Flórez dkk., 2024). Pemanfaatan biomassa pertanian sebagai adsorben dinilai lebih ekonomis, ramah lingkungan, serta mendukung konsep pengolahan limbah berkelanjutan (Haris dkk., 2024). Salah satu limbah biomassa yang potensial di Indonesia adalah cangkang pinang (*Areca catechu L.*) yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal dan cenderung menjadi limbah lingkungan (Gujre dkk., 2022). Limbah kulit pinang umumnya hanya dibuang, padahal memiliki potensi untuk dikonversi menjadi material bernilai tambah seperti biochar (Herviyanti dkk., 2025).

Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan berbagai biomassa sebagai adsorben logam berat. Biochar dari sekam padi, kulit pisang, tempurung kelapa, ampas kopi, dan kulit mangga diketahui mampu mengadsorpsi logam Cd, Pb, Cu, dan Mn dengan efisiensi yang cukup baik (Chwastowski dkk., 2020). Pada biomassa pinang, beberapa penelitian telah menggunakan limbah pinang sebagai adsorben logam berat maupun zat pencemar lainnya. (Kumar dkk., 2021)melaporkan bahwa limbah pinang (*areca waste*) mampu mengadsorpsi logam Cd dan Cu dari larutan berair melalui mekanisme adsorpsi permukaan. Penelitian lain oleh Singh & Gupta (2022) menunjukkan bahwa serbuk kayu pinang (heart*wood powder of Areca catechu) efe*ktif digunakan untuk biosorpsi ion Cd^{2+}

dengan model kinetika pseudo-orde dua dan isoterm Langmuir sebagai model terbaik. Selain itu, biochar berbasis cangkang pinang juga telah dikembangkan untuk adsorpsi zat warna metilen biru dan pewarna antrakuinon dalam limbah cair (Suhas dkk., 2023). Namun, penelitian mengenai pemanfaatan biochar cangkang pinang sebagai adsorben logam kadmium (Cd) masih relatif terbatas, khususnya yang dikombinasikan dengan optimasi parameter adsorpsi menggunakan metode Taguchi. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki keterbaruan pada pemanfaatan biochar cangkang pinang sebagai adsorben ion Cd^{2+} dengan pendekatan optimasi proses adsorpsi secara sistematis melalui metode Taguchi untuk memperoleh kondisi adsorpsi yang optimum dan efisien.

Cangkang pinang memiliki kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa komposisi kimia cangkang pinang mengandung sekitar 56,10% holoselulosa dan 28,75% lignin, yang menunjukkan dominasi komponen penyusun struktur karbon biomassa (Yuan dkk., 2019). Selain itu, penelitian lain melaporkan bahwa serat pinang mengandung sekitar 65,08% selulosa, 8,40% hemiselulosa, dan 19,59% lignin, yang menunjukkan potensi tinggi sebagai bahan baku material karbon berpori seperti biochar (Sanjay dkk., 2020). Tingginya kandungan selulosa dan lignin tersebut berperan penting dalam proses pirolisis karena akan terdekomposisi menjadi struktur karbon berpori yang mendukung kemampuan adsorpsi logam berat (Chen dkk., 2022).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memanfaatkan biochar dari cangkang pinang (Areca catechu L.) sebagai adsorben untuk menurunkan konsentrasi ion Cd^{2+} dalam larutan. Penelitian ini juga menggunakan metode Taguchi untuk menentukan kondisi optimum adsorpsi berdasarkan variasi parameter seperti massa biochar, pH larutan, dan konsentrasi awal Cd. Metode Taguchi dipilih karena mampu menganalisis pengaruh beberapa parameter secara simultan dengan jumlah percobaan yang lebih efisien serta menghasilkan kondisi optimum yang lebih stabil melalui pendekatan rasio Signal-to-Noise (S/N) (Sahu dkk., 2020).

Hipotesis penelitian ini adalah biochar cangkang pinang memiliki kemampuan yang efektif dalam mengadsorpsi ion Cd^{2+}, dan optimasi menggunakan metode Taguchi dapat meningkatkan efisiensi proses adsorpsi melalui penentuan kombinasi parameter operasi yang optimum. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada pemanfaatan limbah biomassa cangkang pinang sebagai adsorben ramah lingkungan serta penerapan metode Taguchi untuk optimasi adsorpsi logam Cd. Hasil penelitian diharapkan dapat memperkaya kajian mengenai adsorben berbasis biomassa lokal dan menyediakan pendekatan optimasi yang efisien untuk pengolahan limbah logam berat secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen kuantitatif yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan biochar dari cangkang pinang sebagai adsorben logam kadmium (Cd). Tahapan penelitian dimulai dengan pembuatan biochar melalui proses pirolisis menggunakan variasi temperatur 300°C, 400°C, dan 450°C. Cangkang pinang yang telah dibersihkan dan dikeringkan selama tujuh hari kemudian dibakar menggunakan furnace hingga terbentuk biochar. Biochar yang dihasilkan dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 80 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Selanjutnya dilakukan karakterisasi biochar meliputi kadar air, kadar abu, dan morfologi permukaan pori menggunakan instrumen SEM-EDS (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy). Pengujian kadar air dan kadar abu dilakukan berdasarkan metode gravimetri untuk mengetahui kualitas biochar yang dihasilkan (Ulimaz dkk., 2021) (Manurung dkk., 2019).

Penelitian adsorpsi dilakukan menggunakan larutan kadmium $Cd(NO_3)_2$ dengan variasi massa biochar, pH larutan, dan konsentrasi awal Cd. Variasi massa biochar yang digunakan yaitu 0,25 g, 0,50 g, dan 1,00 g, sedangkan variasi pH larutan yaitu pH 3, 4, dan 5. Konsentrasi awal larutan Cd divariasikan menjadi 10 ppm, 50 ppm, dan 100 ppm. Pengujian dilakukan menggunakan metode Taguchi dengan matriks ortogonal L9 untuk memperoleh kombinasi perlakuan yang efisien. Sebanyak 30 mL larutan Cd dimasukkan ke dalam erlenmeyer, kemudian pH diatur menggunakan larutan HNO_3 atau NaOH. Setelah itu biochar ditambahkan sesuai variasi massa dan campuran dihomogenkan menggunakan shaker selama 60 menit. Larutan hasil adsorpsi kemudian disaring dan filtrat dianalisis

menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) untuk menentukan konsentrasi akhir Cd setelah proses adsorpsi berlangsung (Foo & Hameed, 2021).

Data hasil penelitian dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan jumlah kadmium yang teradsorpsi, efisiensi adsorpsi, dan kapasitas adsorpsi biochar. Jumlah logam Cd yang teradsorpsi dihitung berdasarkan selisih antara konsentrasi awal dan konsentrasi akhir larutan, sedangkan efisiensi adsorpsi dihitung dalam bentuk persentase penyisihan logam Cd dari larutan. Kapasitas adsorpsi dihitung menggunakan persamaan adsorpsi untuk mengetahui jumlah ion Cd yang dapat diikat oleh setiap gram biochar pada kondisi setimbang. Hasil analisis kemudian digunakan untuk menentukan pengaruh variasi massa biochar, pH, dan konsentrasi awal Cd terhadap efektivitas adsorpsi biochar cangkang pinang sebagai adsorben logam berat kadmium.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Biochar

Kadar Air

Hasil analisis kadar Air dari cangkang pinang sesuai dengan perhitungan yang ada ditunjukan pada tabel 1.

Table 1. Data Hasil Perhitungan Kadar Air Biochar Dari cangkang Pinang

Suhu (°C)	% Kadar Air	Data Standar Nasional Indonesia (SNI)
350	0,1402	Maks. 15%
400	0,1523	Maks. 15%
450	0,1323	Maks. 15%

Hasil Kadar Abu

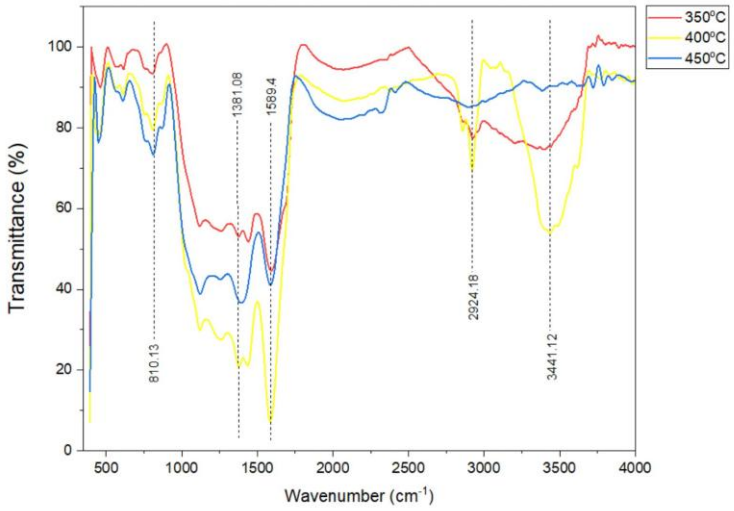
Hasil analisis kadar abu dari cangkang pinang sesuai dengan perhitungan yang ada ditunjukan pada tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Perhitungan Kadar Abu Biochar Dari cangkang Pinang

Suhu (°C)	% Kadar Abu	Data Standar Nasional Indonesia (SNI)
350	0,921	Maks. 15%
400	0,938	Maks. 15%
450	0,938	Maks. 15%

Hasil Analisis Fourier Transform Infrared Spectoscpy (FTIR)

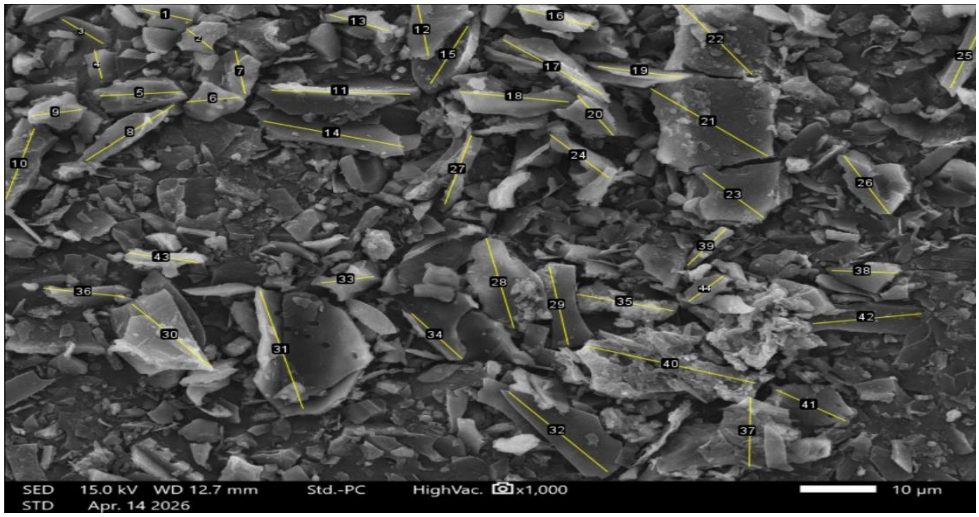
Analisis FTIR pada biochar bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada biochar serta mengetahui perubahan struktur kimia yang terjadi setelah proses pirolisis. Hasil FTIR ditunjukan pada gambar dibawah ini.



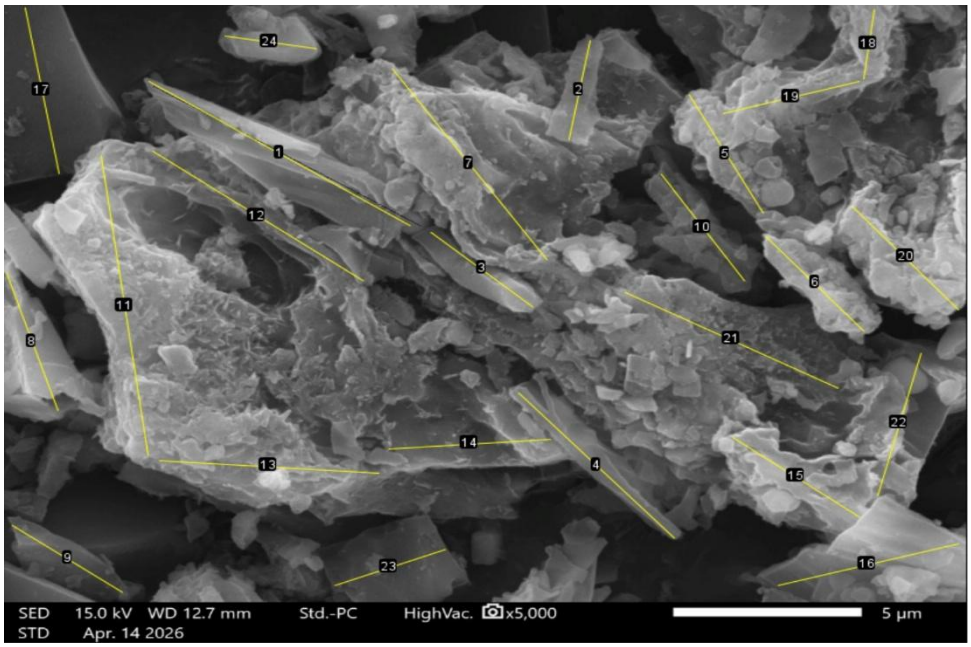
Gambar 1. Spektrum FTIR biochar cangkang pinang pada suhu pirolisis 350^{O}C, 400^{O}C, dan 450^{O}C

SEM-EDS Biochar Cangkang Pinang

Scanning Electron Miscroscopy-Energi Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel dan kandungan unsur dalam Sampel. Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan dengan Perbesaran . Hasil dari SEM ditunjukan Pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. Hasil SEM Perbesaran 1.000x



Gambar 3. Hasil SEM Perbesaran 5.000x

Data Hasil Pengukuran

Konsentrasi Awal (Ci) dan Konsentrasi Akhir (Ce)

Hasil analisis menggunakan AAS menunjukkan nilai konsentrasi awal (Ci) dan konsentrasi akhir (Ce) logam Cd setelah proses adsorpsi. Data hasil pengukuran disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Konsentrasi Awal dan Konsentrasi Akhir

No	Massa (g)	pH	Ci (ppm)	Ce (ppm)
1	0,25	3	100	3,02
2	0,25	4	50	20,50
3	0,25	5	10	16,00

4	0,50	3	100	24,00
5	0,50	4	50	20,00
6	0,50	5	10	12,60
7	1,00	3	100	33,50
8	1,00	4	50	18,00
9	1,00	5	10	10,50

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa terjadi penurunan konsentrasi Cd pada sebagian besar perlakuan, yang menunjukkan adanya proses adsorpsi oleh biochar.

Hasil Perhitungan Efisiensi Adsorpsi dan Kapasitas Adsorpsi (qe)

Berdasarkan nilai Ci dan Ce, dilakukan perhitungan efesiensi adsorpsi dan kapasitas adsorpsi. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan efisisensi adsorpsi dan kapasitas adsorpsi

No	Massa (g)	pH	Ci (ppm)	Ce (ppm)	% Efisensi teradsorpsi	qe (mg/g)
1	0,25	3	100	3,02	96,98	11,64
2	0,25	4	50	20,50	59,00	3,54
3	0,25	5	10	16,00	-60,00	-0,72
4	0,50	3	100	24,00	76,00	4,56
5	0,50	4	50	20,00	60,00	1,80
6	0,50	5	10	12,60	-26,00	-0,16
7	1,00	3	100	33,50	66,50	1,99
8	1,00	4	50	18,00	64,00	0,96
9	1,00	5	10	10,50	-5,00	-0,01

Pembahasan

Pembuatan Biochar Cangkang Pinang

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan cangkang pinang yang dijadikan biochar sebagai adsorben logam berat dimana untuk mengurangi kandungan logam berat dalam suatu media, seperti air limbah. Pemanfaatan limbah biomassa berupa cangkang pinang ini diharapkan dapat memberikan nilai tambah serta menjadi solusi alternatif yang ramah lingkungan dalam pengolahan limbah (Kumar dkk., 2021).

Proses pembuatan biochar dilakukan melalui metode pirolisis dengan variasi suhu 350°C, 400°C, dan 450°C. Pemilihan variasi suhu ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap kualitas biochar yang dihasilkan (Lee dkk., 2021). Peningkatan suhu pirolisis umumnya mendorong pembentukan struktur karbon yang lebih stabil serta pengembangan pori yang memperluas luas permukaan spesifik, sehingga secara signifikan meningkatkan efektivitas biochar dalam mengadsorpsi logam berat (Tomczyk dkk., 2020).

Tahap awal berupa pencucian dan pengeringan cangkang pinang bertujuan untuk menghilangkan kotoran serta menurunkan kadar air bahan baku. Kadar air yang rendah penting agar proses pirolisis berlangsung lebih efisien dan menghasilkan biochar dengan struktur pori yang baik. Pengeringan selama 7 hari di bawah sinar matahari memungkinkan air bebas dalam bahan berkurang secara alami. Sampel cangkang pinang kemudian dibakar menggunakan tanur pada suhu 350°C, 400°C, dan 450°C hingga mengalami proses karbonisasi dan berubah menjadi arang (biochar). Setelah proses pembakaran, biochar didinginkan hingga suhu kamar untuk mencegah terjadinya oksidasi lanjutan. Selanjutnya dilakukan proses penghalusan dan pengayakan menggunakan ayakan 80 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Ukuran partikel yang lebih halus akan meningkatkan luas permukaan spesifik, sehingga memperbesar kemampuan biochar dalam mengadsorpsi logam berat (Sewu dkk., 2021).

Setelah biochar dihasilkan, selanjutnya dilakukan analisis menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada biochar dari masing-masing variasi suhu. Hasil analisis menunjukkan bahwa biochar pada suhu 450°C memiliki karakteristik gugus fungsi yang paling baik dibandingkan suhu 350°C dan 400°C.Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu yang lebih tinggi terbentuk struktur karbon yang lebih stabil serta berkurangnya gugus volatil, sehingga meningkatkan potensi biochar sebagai adsorben logam berat (Wang dkk., 2021).

Kadar Air

Analisis kadar air pada biochar bertujuan untuk mengetahui kandungan air yang masih tersisa setelah proses pirolisis. Kadar air merupakan parameter penting karena dapat memengaruhi kualitas biochar, terutama

terhadap efisiensi adsorpsi dan stabilitas material. Biochar dengan kadar air rendah umumnya memiliki struktur pori yang lebih terbuka sehingga lebih efektif dalam mengadsorpsi logam berat. Selain itu, kadar air yang rendah dapat meningkatkan luas permukaan aktif adsorben dan mempermudah proses interaksi antara ion logam dengan permukaan biochar. Hal ini didukung oleh penelitian (Sunarto & Sari, 2024) yang menunjukkan bahwa biochar dengan kadar air rendah memiliki karakteristik adsorben yang baik dan efektif digunakan untuk adsorpsi ion logam Cu.

Berdasarkan hasil penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 4.1, diperoleh nilai kadar air biochar cangkang pinang pada variasi suhu 350°C, 400°C, dan 450°C berturut-turut sebesar 0,1402%; 0,1523%; dan 0,1323%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kadar air biochar pada seluruh variasi suhu tergolong sangat rendah dan masih jauh di bawah batas maksimum kadar air biochar menurut Standar Nasional Indonesia SNI 06-3730-1995, yaitu sebesar 15% (Leng dkk., 2021).

Rendahnya kadar air menunjukkan bahwa proses pirolisis berlangsung dengan baik sehingga sebagian besar kandungan air dalam bahan baku telah menguap selama proses pemanasan. Kadar air yang rendah juga menunjukkan kualitas biochar yang baik karena dapat meningkatkan stabilitas material, memperbesar luas permukaan aktif, dan membuka struktur pori adsorben sehingga proses adsorpsi logam berat berlangsung lebih optimal. Hal ini sejalan dengan penelitian (Ahuja dkk., 2022) yang menyatakan bahwa biochar dengan porositas tinggi dan luas permukaan yang baik memiliki kemampuan adsorpsi logam berat yang lebih efektif.

Rendahnya kadar air ini disebabkan oleh proses pirolisis pada suhu tinggi yang mampu menguapkan air bebas maupun air terikat dalam biomassa. Tripathi dkk. (2016) melaporkan bahwa selama proses pirolisis, terjadi tahap pengeringan awal pada suhu di bawah 200°C yang menyebabkan sebagian besar air dalam biomassa menguap sebelum terjadi dekomposisi termal komponen organik. Akibatnya, biochar yang dihasilkan memiliki kandungan air yang sangat rendah.

Secara umum, terjadi sedikit peningkatan kadar air pada suhu 400°C yang kemungkinan disebabkan oleh sifat higroskopis biochar, yaitu kemampuannya menyerap kembali uap air dari lingkungan setelah proses pendinginan. Ahmad dkk. (2014) menyatakan bahwa biochar memiliki gugus fungsi permukaan yang mampu berinteraksi dengan uap air sehingga dapat menyerap kelembaban dari udara. Namun, pada suhu 450°C kadar air kembali menurun, yang menunjukkan bahwa pada suhu lebih tinggi proses devolatilisasi berlangsung lebih sempurna. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan Mohan dkk, (2018) yang melaporkan bahwa biochar yang dihasilkan pada suhu tinggi umumnya memiliki kadar air sangat rendah (<5%), struktur yang lebih stabil, serta luas permukaan yang lebih besar sehingga lebih efektif dalam adsorpsi logam berat[4]. Bahkan, nilai kadar air pada penelitian ini jauh lebih rendah dibandingkan hasil penelitian tersebut, yang menunjukkan kualitas biochar yang sangat baik.

Kadar Abu

Analisis kadar abu bertujuan untuk mengetahui jumlah kandungan mineral anorganik yang tersisa dalam biochar setelah proses pirolisis. Kadar abu merupakan parameter penting karena berkaitan dengan kandungan mineral yang dapat berperan dalam mekanisme adsorpsi, seperti pertukaran ion dan pembentukan presipitat dengan logam berat (He dkk., 2021).

Berdasarkan hasil penelitian pada Tabel 4.2, diperoleh nilai kadar abu biochar dari cangkang pinang pada suhu pirolisis 350°C, 400°C, dan 450°C masing-masing sebesar 0,921%; 0,938%; dan 0,938%. Nilai tersebut tergolong sangat rendah dan berada jauh di bawah batas maksimum kadar abu arang menurut Standar Nasional Indonesia (SNI 06-3730-1995), yaitu sebesar 15%, sehingga menunjukkan bahwa biochar yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik (Ahmad dkk., 2014).

Nilai kadar abu yang relatif stabil pada setiap variasi suhu menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis dari 350°C hingga 450°C tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kandungan mineral sisa dalam biochar cangkang pinang. Kondisi ini menunjukkan bahwa biochar yang dihasilkan memiliki kestabilan komposisi mineral dan berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben berkualitas baik. Selain itu, kadar abu yang rendah juga menjadi indikator bahwa biochar memiliki kandungan karbon tetap yang tinggi, sehingga lebih efektif dalam proses adsorpsi dan penyimpanan karbon (Tripathi dkk., 2016).

Hasil penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan penelitian (Souza dkk., 2021) pada biochar cangkang sawit yang menghasilkan kadar abu sebesar 31,6% pada suhu 500°C dan meningkat menjadi 33,4% pada suhu 600°C. Tingginya kadar abu tersebut disebabkan oleh meningkatnya suhu pirolisis yang menyebabkan lebih banyak senyawa organik terdekomposisi dan menyisakan mineral anorganik dalam jumlah besar. Selain itu, biomassa cangkang sawit memiliki kandungan silika dan mineral yang lebih tinggi dibandingkan cangkang pinang sehingga menghasilkan residu abu yang lebih besar setelah proses pirolisis.

FTIR Biochar Cangkang Pinang

Analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada sampel berdasarkan interaksi radiasi inframerah dengan ikatan kimia dalam material. FTIR

digunakan untuk mengetahui perubahan struktur kimia, menentukan keberadaan gugus fungsi seperti O–H, C–H, C=O, dan C–O, serta mengevaluasi pengaruh perlakuan suhu terhadap karakteristik material. FTIR juga mampu memberikan informasi mengenai struktur molekul melalui spektrum serapan yang khas pada setiap material (Yesudhas dkk., 2023).

Berdasarkan Gambar 1, spektrum FTIR biochar cangkang pinang pada suhu pirolisis 350°C, 400°C, dan 450°C menunjukkan adanya perubahan gugus fungsi yang dipengaruhi oleh peningkatan suhu pirolisis. Perubahan intensitas pita serapan pada masing-masing suhu mengindikasikan terjadinya degradasi komponen lignoselulosa seperti hemiselulosa, selulosa, dan lignin serta pembentukan struktur karbon aromatik yang lebih stabil.

Pada Gambar 1 terlihat pita serapan pada bilangan gelombang 3441,12 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi regangan gugus hidroksil (O–H) dari senyawa alkohol, fenol, dan air terikat. Intensitas pita ini tampak lebih jelas pada biochar suhu 400°C, namun mulai menurun pada suhu 450°C. Penurunan intensitas gugus O–H menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis menyebabkan proses dehidrasi dan pelepasan senyawa volatil sehingga jumlah gugus oksigen pada permukaan biochar berkurang. Menurut (Suliman dkk., 2016), melemahnya pita O–H pada biochar terjadi akibat pemutusan ikatan hidrogen dan meningkatnya proses karbonisasi selama pirolisis suhu tinggi. Selain itu, Wang dkk. (2022) menjelaskan bahwa suhu pirolisis yang semakin tinggi menyebabkan gugus oksigen mengalami dekomposisi sehingga struktur karbon biochar menjadi lebih stabil dan aromatik.

Selain itu, pita serapan pada 2924,18 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi regangan C–H alifatik dari gugus metil dan metilena. Berdasarkan Gambar 4.1, intensitas pita ini terlihat mengalami penurunan pada suhu 450°C dibandingkan suhu 350°C dan 400°C. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa rantai alifatik mengalami degradasi selama proses pirolisis. Tomczyk dkk. (2020) menyatakan bahwa gugus alifatik mulai terdegradasi pada suhu di atas 400°C akibat pelepasan senyawa volatil dan pemecahan rantai hidrokarbon sehingga biochar menjadi lebih kaya karbon aromatik.

Pita serapan pada bilangan gelombang 1589,4 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ikatan C=C aromatik yang berkaitan dengan struktur lignin dan cincin aromatik karbon. Pada Gambar 4.1, pita ini tampak lebih jelas pada biochar suhu 450°C. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pirolisis, maka proses aromatisasi semakin meningkat akibat kondensasi struktur karbon. Menurut (Zhao dkk., 2019), peningkatan suhu pirolisis menyebabkan terbentuknya struktur aromatik yang lebih dominan akibat terjadinya kondensasi karbon dan hilangnya gugus oksigen selama proses pirolisis.

Selanjutnya, pita pada 1381,08 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi bending C–H dan gugus fenolik atau karboksilat. Pada Gambar 1 terlihat adanya perubahan intensitas pita pada setiap variasi suhu. Hal ini menunjukkan terjadinya transformasi gugus oksigen selama proses karbonisasi akibat degradasi hemiselulosa dan selulosa. Tomczyk dkk. (2020) melaporkan bahwa peningkatan suhu pirolisis menyebabkan penurunan gugus fungsi asam seperti karboksilat dan hidroksil akibat meningkatnya derajat karbonisasi biochar.

Puncak pada 810,13 cm^{-1} menunjukkan vibrasi aromatik C–H out-of-plane yang mengindikasikan keberadaan cincin aromatik. Berdasarkan Gambar 4.1, pita ini masih terlihat pada seluruh sampel biochar dan cenderung lebih stabil pada suhu 450°C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa suhu tinggi mendorong terbentuknya struktur aromatik yang lebih terkondensasi. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian (Wang dkk., 2022) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu pirolisis meningkatkan pembentukan struktur aromatik dan menghasilkan biochar dengan kestabilan kimia yang lebih baik.

Secara keseluruhan, hasil FTIR pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis dari 350°C hingga 450°C menyebabkan penurunan gugus fungsi polar seperti O–H dan C–H alifatik serta meningkatkan pembentukan struktur aromatik pada biochar cangkang pinang. Biochar pada suhu 450°C menunjukkan tingkat karbonisasi yang lebih tinggi dan struktur karbon yang lebih stabil dibandingkan suhu 350°C dan 400°C. Namun, biochar suhu 400°C masih mempertahankan beberapa gugus fungsi aktif sehingga berpotensi memiliki kemampuan adsorpsi yang baik. Hasil ini menunjukkan bahwa suhu pirolisis memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik kimia permukaan biochar yang dihasilkan.

SEM EDES Biochar Cangkang Pinang

Analisis SEM dilakukan untuk mengamati morfologi permukaan, struktur mikro, dan indikasi porositas pada biochar setelah proses pirolisis. Melalui analisis ini dapat diketahui adanya retakan, celah antarpartikel, serta perkembangan struktur karbon yang memengaruhi karakteristik fisik biochar (Hidayat dkk., 2025).

Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa biochar memiliki morfologi permukaan yang kasar, tidak homogen, dan tersusun atas partikel berbentuk serpihan yang saling bertumpuk. Pada citra SEM dengan perbesaran 1000× maupun 5000× terlihat adanya retakan kecil, celah antarpartikel, dan ruang kosong pada beberapa bagian permukaan biochar (Liu dkk., 2021). Pada perbesaran 1000×, indikasi porositas tampak pada area sekitar nomor 28, 29, 31, 33, 34, dan 40, sedangkan pada perbesaran 5000× terlihat pada area sekitar nomor 3, 4, 10, 14, dan 21. Rongga dan celah tersebut menunjukkan adanya ruang antarpartikel (*interparticle*

voids) yang terbentuk selama proses pirolisis akibat pelepasan air dan senyawa volatil dari biomassa (Leng dkk., 2021). Akan tetapi, struktur pori terbuka yang besar dan teratur belum terlihat jelas sehingga biochar masih menunjukkan struktur yang relatif padat dengan dominasi aglomerasi partikel. Kondisi ini menunjukkan bahwa biochar pada penelitian ini belum mengalami perkembangan pori yang sempurna karena tidak dilakukan proses aktivasi (Omogbehin & Yekeen, 2019).

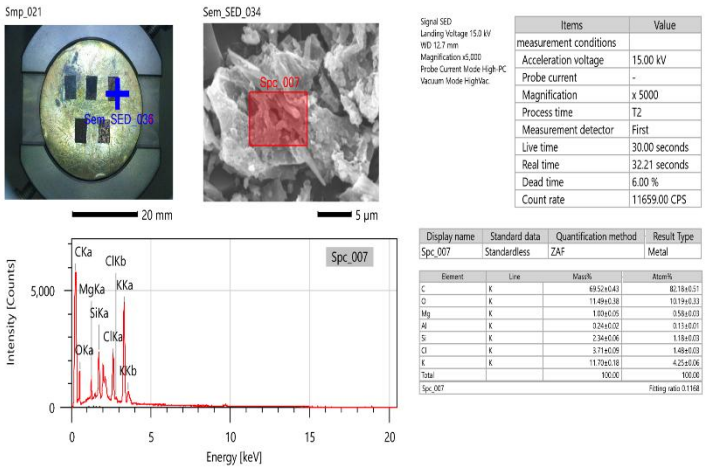
Hasil analisis distribusi ukuran menggunakan software Origin pada citra SEM perbesaran 1000× menunjukkan pola distribusi log-normal dengan nilai rata-rata ukuran fitur permukaan (*xc*) sebesar 4235,1 nm atau sekitar 4,2 µm. Namun, distribusi ukuran terlihat cukup bervariasi dengan nilai R^2 sebesar 0,50905 sehingga menunjukkan permukaan biochar yang tidak homogen. Sementara itu, hasil analisis pada citra SEM perbesaran 5000× menunjukkan distribusi Gaussian dengan nilai rata-rata ukuran sebesar 2049,6 nm atau sekitar 2,05 µm. Nilai R^2 sebesar 0,91616 menunjukkan bahwa distribusi ukuran pada sampel ini lebih seragam dan memiliki tingkat kecocokan data yang lebih baik dibandingkan hasil sebelumnya. Ukuran tersebut menggambarkan keberadaan celah kecil dan agregat partikel mikro pada permukaan biochar (Qian dkk., 2022).

Hasil penelitian ini memiliki kemiripan dengan penelitian (Sitinjak, 2024) yang melaporkan bahwa biochar tanpa aktivasi menunjukkan struktur permukaan yang relatif padat dengan dominasi retakan kecil dan celah antarpartikel, sedangkan pori terbuka belum berkembang secara sempurna. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa biochar non-aktivasi umumnya masih memiliki pori yang tertutup oleh residu karbon dan tar hasil pirolisis sehingga permukaannya tampak lebih kompak. Kondisi tersebut sesuai dengan hasil SEM pada penelitian ini yang menunjukkan sedikit rongga terbuka dan dominasi aglomerasi partikel karbon (J. Wang & S. Wang, 2022).

Selain itu, hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian (Ramadani, 2023) pada biochar kulit kopi non-aktivasi yang menunjukkan bahwa permukaan biochar sebelum aktivasi masih tampak padat dan pori belum terbuka jelas. Setelah dilakukan aktivasi menggunakan $KMnO_4$, struktur pori menjadi lebih terbuka dan permukaan biochar terlihat lebih kasar. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses aktivasi memiliki peran penting dalam membuka mikropori dan meningkatkan luas permukaan biochar. Perbedaan ini menjelaskan mengapa biochar pada penelitian ini memiliki porositas yang relatif rendah karena tidak melalui tahap aktivasi.

Perbedaan morfologi pori pada biochar juga dapat dipengaruhi oleh jenis biomassa, suhu pirolisis, waktu karbonisasi, dan metode pembuatan biochar. Menurut (Huang dkk., 2021) ukuran dan struktur pori biochar sangat dipengaruhi oleh bahan baku biomassa karena setiap biomassa memiliki kandungan lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang berbeda. Biomassa dengan kandungan lignoselulosa tinggi umumnya menghasilkan struktur pori yang lebih berkembang dibanding biomassa dengan kandungan abu tinggi. Oleh karena itu, biochar pada penelitian ini menunjukkan morfologi yang lebih padat dengan porositas terbatas karena struktur pori yang terbentuk masih berupa celah antarpartikel dan retakan kecil, bukan jaringan pori terbuka yang komplek.

Hasil EDS Biochar Cangkang Pinang



Gambar 4. Hasil EDS Biochar Cangkang Pinang

Analisis EDS pada penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi unsur-unsur penyusun sampel, menentukan persentase massa dan atom tiap unsur, serta mengevaluasi kemungkinan jenis mineral atau fase material berdasarkan hasil spektrum yang diperoleh. Selain itu, analisis ini juga digunakan untuk

membandingkan karakteristik sampel dengan penelitian terdahulu sehingga dapat diketahui kesesuaian maupun perbedaannya (Zhang dkk., 2023). Berdasarkan hasil analisis EDS pada area Spc_007, diperoleh beberapa unsur utama yaitu karbon (C), oksigen (O), magnesium (Mg), aluminium (Al), silikon (Si), klorin (Cl), dan kalium (K). Unsur karbon merupakan unsur dominan dengan kandungan sebesar 69,52% massa dan 82,18% atom. Tingginya kandungan karbon menunjukkan bahwa material memiliki fase karbon yang cukup besar atau adanya residu karbon dari proses preparasi sampel dan coating selama pengujian SEM-EDS. Kandungan karbon yang tinggi juga umum ditemukan pada material berbasis biomassa, karbon aktif, maupun material hasil pembakaran (Newbury & Ritchie, 2015). Unsur oksigen sebesar 11,49% menunjukkan adanya senyawa oksida atau mineral silikat dalam sampel. Kehadiran oksigen biasanya berkaitan dengan mineral aluminosilikat yang banyak ditemukan pada tanah lempung dan material mineral alami (Murray, 2022).

Selain itu, keberadaan unsur silikon (Si) sebesar 2,34% dan aluminium (Al) sebesar 0,24% mengindikasikan adanya kandungan mineral aluminosilikat pada sampel. Kombinasi unsur Si dan Al merupakan karakteristik utama mineral lempung seperti kaolinit, illit, dan montmorillonite (Jayawardena & Emmanuel, 2023). Kandungan kalium (K) yang cukup tinggi yaitu 11,70% menunjukkan kemungkinan adanya mineral illit atau feldspar kalium karena mineral tersebut diketahui kaya akan unsur (Han dkk., 2022). Sementara itu, unsur magnesium (Mg) sebesar 1,00% kemungkinan berasal dari mineral magnesium silikat atau mineral lempung tertentu. Kehadiran unsur klorin (Cl) sebesar 3,71% dapat disebabkan oleh kontaminasi lingkungan, residu garam, maupun proses preparasi sampel sebelum pengujian dilakukan (Zhang dkk., 2023).

Hasil penelitian ini memiliki kemiripan dengan penelitian yang dilakukan oleh Han dkk. (2022) yang melakukan karakterisasi mineral sedimen menggunakan SEM-EDS dan menemukan dominasi unsur Si, Al, O, dan K pada material lempung dan shale. Penelitian tersebut menyatakan bahwa kombinasi unsur tersebut menunjukkan keberadaan mineral aluminosilikat seperti illit dan kaolinit (Han dkk., 2022). Kesamaan dengan penelitian ini terlihat pada keberadaan unsur Si, Al, O, dan K yang juga ditemukan dalam sampel. Namun, terdapat perbedaan pada kandungan karbon yang jauh lebih tinggi pada penelitian ini. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh adanya coating karbon pada preparasi SEM, kandungan bahan organik yang lebih besar, atau karakteristik asli material yang memang kaya karbon (Newbury & Ritchie, 2015). Secara keseluruhan, hasil analisis SEM-EDS menunjukkan bahwa sampel mengandung unsur utama berupa karbon, oksigen, kalium, silikon, klorin, magnesium, dan aluminium. Keberadaan unsur Si, Al, Mg, dan K mengindikasikan adanya fase mineral aluminosilikat atau clay mineral pada material. Morfologi permukaan yang tidak beraturan dan menggumpal menunjukkan adanya aglomerasi partikel dengan tekstur kasar dan berpori. Hasil penelitian ini memiliki kesamaan dengan beberapa penelitian terdahulu terkait keberadaan mineral aluminosilikat, namun berbeda pada dominasi karbon yang jauh lebih tinggi. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh jenis material, homogenitas sampel, preparasi SEM, serta metode analisis yang digunakan (Zhang dkk., 2023).

Analisis Metode Taguchi

Hasil analisis metode Taguchi ditampilkan dalam bentuk grafik Signal-to-Noise (S/N) ratio. Metode Taguchi digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan kondisi optimum dari beberapa parameter yang mempengaruhi proses adsorpsi, yaitu massa biochar, pH, dan konsentrasi Cd. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan rasio Signal-to-Noise (S/N) dengan kategori *larger-the-better*, karena tujuan penelitian adalah memaksimalkan efisiensi adsorpsi (Mohrazi dkk., 2024).

Berdasarkan hasil analisis S/N ratio, diperoleh bahwa kondisi optimum adsorpsi berada pada kombinasi parameter massa biochar 1,00 g, pH 4, dan konsentrasi 50 ppm. Pada kondisi ini diperoleh efisiensi adsorpsi sebesar 64%. Perbedaan antara hasil optimum berdasarkan nilai maksimum dan hasil analisis Taguchi menunjukkan bahwa metode Taguchi tidak hanya mempertimbangkan nilai tertinggi, tetapi juga kestabilan data terhadap variasi kondisi percobaan. Dengan demikian, kondisi yang diperoleh dari metode Taguchi dianggap lebih robust atau stabil untuk diterapkan dalam skala yang lebih luas (Abdelhafez dkk., 2022).

Selain itu, dari analisis Taguchi dapat diketahui bahwa faktor pH memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap proses adsorpsi. Hal ini sesuai dengan teori bahwa pH mempengaruhi spesiasi ion logam serta muatan permukaan adsorben. Pada pH rendah hingga netral, ion Cd^{2+} lebih mudah berinteraksi dengan gugus fungsi pada biochar (He dkk., 2021). Dengan demikian, penggunaan metode Taguchi dalam penelitian ini terbukti efektif untuk menentukan kondisi optimum dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit namun tetap memberikan hasil yang representatif.

Efisiensi Adsorpsi dan Kapasitas Adsorpsi (qe)

Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi adsorpsi dan kapasitas adsorpsi (qe) pada Tabel 4.3, terlihat bahwa biochar cangkang pinang memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mengadsorpsi logam kadmium (Cd), meskipun terdapat variasi hasil pada setiap perlakuan. Nilai efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada percobaan ke-1 dengan kondisi massa biochar 0,25 g, pH 3, dan konsentrasi 100 ppm, yaitu sebesar 96,98% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 11,64 mg/g. Tingginya efisiensi pada kondisi ini disebabkan oleh konsentrasi

awal Cd yang tinggi sehingga meningkatkan peluang interaksi antara ion Cd^{2+} dengan permukaan biochar. Selain itu, kondisi pH asam (pH 3) menyebabkan ion Cd berada dalam bentuk terlarut (Cd^{2+}) sehingga lebih mudah teradsorpsi (Zhang dkk., 2023).

Pengaruh massa biochar juga terlihat pada hasil penelitian. Penambahan massa biochar tidak selalu meningkatkan efisiensi adsorpsi secara signifikan. Pada massa yang lebih besar, kemungkinan terjadi penumpukan partikel (agglomerasi) sehingga luas permukaan efektif menjadi berkurang. Hal ini menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi per satuan massa (Solfianti dkk., 2021). Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi optimum adsorpsi tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor, tetapi merupakan kombinasi dari pH, massa adsorben, dan konsentrasi awal larutan Cd.

Hubungan Hasil Signal-to-Noise (S/N) ratio dengan Hasil Efisiensi Adsorpsi dan Kapasitas Adsorpsi (qe)

Analisis Signal-to-Noise (S/N) ratio pada metode Taguchi digunakan untuk menentukan kombinasi faktor yang paling optimum dan stabil dalam suatu proses. Konsep S/N ratio tidak hanya mempertimbangkan nilai rata-rata respon, tetapi juga variabilitas data sehingga dapat menghasilkan kondisi yang lebih robust atau tahan terhadap gangguan (Sahu dkk., 2020). Dalam penelitian ini digunakan pendekatan larger-the-better, karena tujuan utama adalah memaksimalkan efisiensi adsorpsi logam Cd. Berdasarkan hasil analisis S/N ratio, diperoleh kondisi optimum pada massa biochar 1,00 g, pH 4, dan konsentrasi 50 ppm, dengan efisiensi adsorpsi sebesar 64%. Sementara itu, hasil pengukuran langsung menunjukkan bahwa nilai efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada kondisi massa 0,25 g, pH 3, dan konsentrasi 100 ppm, yaitu sebesar 96,98%, dengan kapasitas adsorpsi (qe) sebesar 11,64 mg/g (Simón dkk., 2024).

Perbedaan antara kondisi optimum berdasarkan S/N ratio dan nilai maksimum efisiensi adsorpsi menunjukkan bahwa metode Taguchi tidak hanya berfokus pada hasil tertinggi, tetapi juga pada kestabilan respon. Menurut (Aziri dkk., 2024), metode Taguchi dengan analisis Signal-to-Noise (S/N) ratio digunakan untuk memperoleh kombinasi parameter yang paling robust atau stabil terhadap variasi faktor gangguan (noise), sehingga kondisi optimum yang diperoleh lebih representatif untuk aplikasi praktis dibandingkan hanya berdasarkan nilai respon tertinggi dari satu percobaan (Tanash dkk., 2022). Hubungan antara S/N ratio dan efisiensi adsorpsi menunjukkan bahwa kondisi optimum Taguchi menghasilkan nilai yang cukup tinggi meskipun tidak maksimum. Hal ini disebabkan karena metode Taguchi mengoptimalkan keseimbangan antara faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi, seperti pH, massa adsorben, dan konsentrasi awal (Tang dkk., 2017). Pada kondisi optimum tersebut, efisiensi adsorpsi sebesar 64% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 1,99 mg/g menunjukkan performa yang stabil.

Jika dikaitkan dengan kapasitas adsorpsi (qe), terlihat bahwa nilai qe berbanding lurus dengan efisiensi adsorpsi, di mana semakin tinggi efisiensi maka semakin besar pula nilai qe. Hal ini sesuai dengan teori adsorpsi yang menyatakan bahwa kapasitas adsorpsi menunjukkan jumlah zat yang dapat diserap per satuan massa adsorben dan dipengaruhi oleh konsentrasi awal serta kondisi sistem (Gökırmak & Gülcan, 2023). Pada percobaan dengan efisiensi tertinggi (96,98%), nilai qe juga paling besar yaitu 11,64 mg/g, yang menunjukkan kemampuan adsorben dalam menyerap Cd secara maksimal (Newbury & Ritchie, 2015). Namun demikian, nilai qe yang tinggi tidak selalu menunjukkan kondisi optimum menurut metode Taguchi. Hal ini karena metode Taguchi lebih menekankan pada kestabilan hasil dibandingkan nilai maksimum semata. Dengan kata lain, kondisi dengan qe tertinggi dapat bersifat tidak stabil jika terjadi perubahan kecil pada parameter proses (Hariyani, 2016). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil efisiensi adsorpsi dan kapasitas adsorpsi (qe) menggambarkan performa aktual tiap percobaan, sedangkan hasil S/N ratio menunjukkan kondisi optimum yang paling stabil dan andal. Kedua hasil ini saling melengkapi, di mana efisiensi dan qe menunjukkan kemampuan adsorben, sedangkan S/N ratio menunjukkan kondisi operasi terbaik yang dapat diterapkan secara konsisten dalam proses adsorpsi logam Cd..

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa biochar dari cangkang pinang memiliki potensi yang baik sebagai adsorben dalam menyerap logam berat kadmium (Cd) dari larutan. Biochar yang dihasilkan melalui proses pirolisis pada variasi suhu 300°C, 400°C, dan 450°C mampu memenuhi karakteristik dasar adsorben yang ditunjukkan melalui pengujian kadar air, kadar abu, serta morfologi permukaan pori. Proses adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu massa biochar, pH larutan, dan konsentrasi awal logam Cd. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa biochar cenderung meningkatkan efisiensi adsorpsi karena jumlah situs aktif yang tersedia semakin banyak. Selain itu, kondisi pH larutan juga mempengaruhi proses adsorpsi, dimana pH yang lebih tinggi dalam rentang penelitian memberikan kemampuan adsorpsi yang lebih baik terhadap ion Cd. Variasi konsentrasi awal Cd menunjukkan bahwa biochar mampu mengadsorpsi logam berat secara efektif

pada berbagai konsentrasi, meskipun kapasitas adsorpsi mengalami perubahan sesuai kondisi perlakuan. Analisis menggunakan metode Taguchi matriks ortogonal L9 memberikan kombinasi perlakuan yang optimal dalam proses adsorpsi Cd menggunakan biochar cangkang pinang. Nilai efisiensi adsorpsi dan kapasitas adsorpsi yang diperoleh menunjukkan bahwa limbah cangkang pinang dapat dimanfaatkan sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan, ekonomis, dan berpotensi diaplikasikan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat, khususnya kadmium (Cd).

UCAPAN TERIMA KASIH

Kenali pihak-pihak yang membantu penelitian, terutama yang mendanai penelitian Anda secara finansial. Sertakan individu yang telah membantu Anda dalam studi Anda: Pembimbing, Pendukung keuangan, atau mungkin pendukung lain, misalnya Korektor, Pengetik, dan Pemasok, yang mungkin telah memberikan materi. Jangan menuliskan salah satu nama penulis.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelhafez, A. A., J., L., & Abbas, M. H. H. (2022). Application of Taguchi optimization for evaluating the capability of hydrochar, biochar, and activated carbon prepared from different wastes in multi-elements bioadsorption. Journal of Cleaner Production, 347 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131292

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N. S., Mohan, D., Vithanage, M. S., Lee, S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. Chemosphere, 99, 19–33 https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071

Ahuja, I., Dauksaite, E., Remhof, A., & Strømme, M. (2022). Porous biochar materials for adsorption applications: A review. Materials Advances, 3(4), 1452–1475 *https://doi.org/10.1007/s10934-022-01217-1*

Anita, Y., Riski, D. S., Edelwis, T. W., & Hilfi, P. (2023). Heavy metal pollution in Indonesian waters. BIO Web of Conferences, 79, 9 https://doi.org/10.1051/bioconf/20237904001

Aziri, I., Dar, A. A., Elrasheed, M. O., Khan, M. S., Gera, R., & Azad, I. (2024). The versatility of the Taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines. Journal of Statistical Theory and *Applications*, *23*, *365–389 https://doi.org/10.1007/s44199-024-00093-9*

Chen, D., Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Zhou, J., Zhang, Y., & Zhang, H. (2022). Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. Combustion and Flame, 242 https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142

Chwastowski, J., Bradło, D., & Żukowski, W. (2020). Adsorption of cadmium, manganese and lead ions from aqueous solutions using spent coffee grounds and biochar produced by its pyrolysis in the fluidized bed reactor. Materials, 13(12), 2782 https://doi.org/10.3390/ma13122782

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2021). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journ*al*, *156(1)*, *2–10 https://doi.org/10.3390/nano11112780*

Gujre, N., Mitra, S., Agnihotri, R., Sharma, M. P., & Packirisamy, S. (2022). Novel agrotechnological intervention for soil amendment through areca nut husk biochar in conjunction with vetiver grass. *Chemosphere*, *287*.

Han, Y., Liu, W., Chen, J., & Li, H. (2022). SEM–EDS characterization of clay minerals and aluminosilicates in sedimentary rocks. *Minerals*, *12*(7), 815.

Haris, M., Amjad, Z., Usman, M., Saleem, A., Dyussenova, A., Mahmood, Z., & Guo, J. (2024). A review of crop residue-based biochar as an efficient adsorbent to remove trace elements from aquatic systems. *Biochar*, *6*, 47.

Hariyani, S. (2016). Analisis kadar abu dan kadar air pada karbon aktif berbahan biomassa. *Jurnal Teknik Kimia*.

He, X., Zhang, Y., Shen, M., Zeng, G., Zhou, M., & Li, M. (2021). Effect of pyrolysis temperature on biochar properties and application in adsorption of heavy metals: A review. *Chemosphere*, *274*.

Herviyanti, D., Nurhayati, S., & Yuliana, A. (2025). Pemanfaatan limbah kulit pinang sebagai bahan baku biochar ramah lingkungan. *Jurnal Lingkungan Tropis*, *9*(1), 33–41.

Hidayat, M., Rahman, A., & Kurniawan, D. (2025). Morphological analysis of biochar surface using SEM characterization. *Materials Today Proceedings*.

Huang, H., Leng, L., Li, H., Li, J., & Zhou, W. (2021). Biochar stability assessment methods: A review. *Science of the Total Environment*, *647*, 210–222.

Inyang, M., Gao, B., Pullammanappallil, P., Ding, W., & Zimmerman, A. R. (2016). Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, *101*(22), 8868–8872.

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2016). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, *7*(2), 60–72.

Jayawardena, U., & Emmanuel, R. (2023). Mineralogical characterization of aluminosilicate materials using SEM-EDS analysis. *Applied Clay Science*, *235*.

Jerzak, W., Kowalski, M., & Zielinska, A. (2024). Agricultural waste biochar for environmental remediation applications. *Environmental Technology & Innovation*, *33*, 103456.

Kumar, A., Singh, E., Mishra, R., & Kumar, S. (2021). Adsorption process and adsorbents for wastewater treatment: A review. *Environmental Chemistry Letters*.

Lee, J., Kim, K. H., & Kwon, E. E. (2021). Biochar as a catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *77*, 70–79.

Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., Huang, H., & Li, J. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*, *763*.

Liu, Z., Quek, A., Kent Hoekman, S., & Balasubramanian, R. (2021). Production of solid biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization. *Fuel*, *103*, 943–949.

Manurung, R., Simanjuntak, T., & Gultom, R. (2019). Analisis karakteristik biochar berbasis biomassa. *Jurnal Kimia Mulawarman*, *17*(1), 45–52.

Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Jr., P. (2018). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent: A critical review. B*ioresource Technology*, 1*60*, 191–202.

Mohrazi, A., Ghasemi-Fasaei, R., Mojiri, A., & Safarzadeh, S. (2024). Identification of influential parameters and conditions in heavy metals adsorption onto Cal-LDH-PC using optimization approaches of RSM and Taguchi. *Scientific Reports*, *14*.

Murray, H. H. (2022). Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview. *Applied Clay Science*, *17*(5–6), 207–221.

Newbury, D. E., & Ritchie, N. W. M. (2015). Performing elemental microanalysis with high accuracy and high precision by SEM/EDS. *Journal of Materials Science*, *50*, 493–518.

Omogbehin, & Yekeen, S. I. (2019). Adsorption of heavy metal (lead) from aqueous solution using Senna occidentalis. N*igerian Research Journal of Chemical Sciences*, *7*.

Pineda Puglla, E., Guaya, D., Tituana, C., Osorio, F., & García-Ruiz, M. J. (2020). Biochar from agricultural by-products for the removal of lead and cadmium from drinking water. *Water*, *12*(10), 2933.

Qian, K., Zhang, H., Bellmer, D., Huhnke, R., & Kumar, A. (2022). Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 1055–1064.

Ramadani, H. R. (2023). Hydrochar ampas kopi termodifikasi H_2O_2 sebagai adsorben untuk ion logam berat Cd(II). *Indonesian Chemistry and Application Journal*, *5*(1), 1–9.

Sahu, J. N., Acharya, J., & Meikap, B. C. (2020). Optimization of production conditions for activated carbons from agricultural wastes using Taguchi method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(4).

Sanjay, M. R., Yogesha, B., & Jawaid, M. (2020). Characterization of areca fiber reinforced composites and lignocellulosic content analysis. *Journal of Natural Fibers*, *17*(3), 321–330.

Sewu, D. D., Boakye, P., & Woo, S. H. (2021). Highly efficient adsorption of cationic dye by biochar produced with microwave-assisted pyrolysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(2).

Singh, R., & Gupta, N. (2022). Comparative study of conventional and biosorption methods for heavy metal removal. *Desalination and Water Treatment*, *263*, 83–91.

Sitinjak, F. (2024). Karakterisasi SEM biochar tanpa aktivasi pada limbah biomassa. *Jurnal Rekayasa Material*.

Solfianti, D., Yusnaini, S., & Putri, N. (2021). Pengaruh aplikasi biochar limbah kulit pinang terhadap sifat kimia tanah Inceptisol. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, *8*(2), 255–262.

Souza, C. S., Bomfim, M. R., Almeida, M. C., Alves, L. S., Santana, W. N., Amorim, I. C. S., & Santos, J.

A. G. (2021). Induced changes of pyrolysis temperature on the physicochemical traits of sewage sludge and on the potential ecological risks. *Scientific Reports*, *11*, 974.

Strokal, M., Bai, Z., Franssen, W., Hofstra, N., Koelmans, A. A., & Ludwig, F. (2021). Urbanization: An increasing source of multiple pollutants to rivers in the 21st century. N*pj Urban Sustainability*, 1(24), 1–13.

Suhas, P., Manohar, M., & Ramesh, K. (2023). Characterization and mechanical properties of areca fiber reinforced natural composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, *72*, 2450–2455.

Suliman, W., Harsh, J. B., Abu-Lail, N. I., Fortuna, A. M., Dallmeyer, I., & Garcia-Perez, M. (2016). Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*, *84*, 37–48.

Sunarto, H., & Sari, P. (2024). Pengaruh kadar air terhadap efektivitas adsorpsi biochar pada ion logam Cu. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, *27*(1), 15–22.

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2021). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, *125*, 70–85.

Tanash, M., Al Athamneh, R., Bani Hani, D., Rababah, M., & Albataineh, Z. (2022). PDCA framework towards a multi-response optimization of process parameters based on Taguchi-Fuzzy model. *Processes*, *10*(9).

Tang, J., Zhu, W., Kookana, R., & Katayama, A. (2017). Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *116*(6), 653–659.

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., & Sutton, D. J. (2016). Heavy metal toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *19*, 191–215.

Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 467–481.

Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. R*enewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 467–481.

Ulimaz, A., Putra, D., & Wahyuni, S. (2021). Penentuan kadar air biochar berbasis biomassa pertanian. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *22*(1), 44–50.

Wang, J., Liu, X., Zhang, Y., Liu, J., & Pan, G. (2022). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochar and its adsorption to pollutants: A review. *Applied Sciences*, *12*(6), 1149.

Wang, J., & Wang, S. (2022). Removal of heavy metal ions by biochar and modified biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, *258*.

Wang, J., Wang, S., & Zhang, Y. (2021). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochar and its adsorption to contaminants: A review. *Chemosphere*, *286*.

Yesudhas, D., Gosu, V., & Anwar, M. (2023). Cadmium toxicity: Molecular mechanisms and mitigation strategies. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, *98*.

Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2019). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, *102*(3), 3488–3497.

Zhang, H., Shao, J., He, Y., & Zhang, X. (2024). Characterization of biochar pore structure and adsorption performance by SEM and BET analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*, 12544–12558.

Zhang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., & Inyang, M. (2022). Synthesis of porous biochar via bio-oil activation for adsorption applications. *Chemical Engineering Journal*, *249*, 70–79.

Zhao, L., Cao, X., Mašek, O., & Zimmerman, A. (2019). Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials*, *256*, 1–9.