

*From agricultural waste to high-performance sorbent. Activated carbon derived from hazelnut shells for water and wastewater treatment*

## Od odpadów rolniczych do wysokowydajnego sorbentu. Węgiel aktywny pochodzący z łupin orzechów laskowych do oczyszczania wody i ścieków

DOI: 10.15199/62.2023.9.3

Hazelnut shells were pyrolyzed at 500°C for 1 h. The obtained biochar was activated phys. with CO<sub>2</sub> at 800°C or chem. with KOH at 850°C. A porous material with a sp. surface area of 1211 m<sup>2</sup>/g was obtained. The adsorption properties of activated C were tested in relation to the adsorption of rhodamine B. The adsorption capacity was 64.4 mg/g. The Langmuir, Freundlich, Sips and Toth adsorption equil. models were used to describe the rhodamine adsorption isotherm. The best fit to the exptl. data was observed for the Sips isotherm.

**Keywords:** activated carbon, biomass, hazelnut shells, adsorption, sustainable waste management

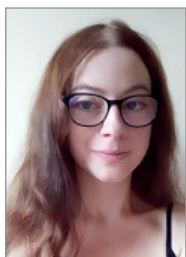
Łupiny orzechów laskowych, produkt uboczny przemysłu spożywczego, mają znaczny potencjał jako prekursor do produkcji węgla aktywnego ze względu na ich dużą dostępność i dużą zawartość węgla. Przedstawiono badania możliwości przekształcenia łupin orzechów laskowych w węgiel aktywny, wykorzystany do oczyszczania ścieków z zanieczyszczeń organicznych. Porównano procesy aktywacji fizycznej i chemicznej otrzymanego węgla. Otrzymano wysoce porowaty materiał o powierzchni właściwej 1211 m<sup>2</sup>/g. Ponadto przedstawiono izotermę adsorpcji i oznaczono pojemność adsorpcyjną biowęgla względem rodaminy B.

**Słowa kluczowe:** węgiel aktywny, biomasa, łupiny orzecha laskowego, adsorpcja, zrównoważone gospodarowanie odpadami

Węgiel aktywny (AC), powszechnie znany ze swoich wyjątkowych zdolności adsorpcyjnych, stał się bardzo obiecującym materiałem do różnych zastosowań środowiskowych, obejmujących oczyszczanie wody i powietrza, oczyszczanie ścieków i usuwanie zanieczyszczeń<sup>1)</sup>. Produkcja AC z biomasy stanowi zrównoważoną alternatywę dla konwencjonalnych metod silnie uzależnionych od prekursorów pochodzących z paliw kopalnych<sup>2)</sup>. Łupiny orzechów laskowych, które są w dużych ilościach wyrzucane jako odpady w przemyśle spożywczym, stanowią atrakcyjne źródło biomasy do produkcji AC. Uprawa orzechów laskowych jest szeroko praktykowana w wielu regionach, w tym w Europie i Turcji, co powoduje wytwarzanie znacznych ilości odpadów z łupin<sup>3)</sup>. Wykorzystanie łupin orzechów laskowych nie tylko zapewnia zrównoważone i przyjazne dla środowiska podejście do produkcji AC, ale

także przyczynia się do waloryzacji odpadów rolniczych. Skład chemiczny i właściwości strukturalne łupin orzechów laskowych sprawiają, że są one wartościowym prekursorem AC, a ich przekształcenie w wysoce wydajny materiał sorpcyjny jest obiecujące dla zastosowań w oczyszczaniu ścieków.

Celem pracy było otrzymanie AC pochodzącego z łupin orzechów laskowych i zbadanie możliwości zastosowania go do oczyszczania ścieków. Co więcej, cele tego badania obejmowały ocenę procesu aktywacji biowęgla z orzechów laskowych za pomocą różnych aktywatorów, ocenę pojemności sorpcyjnej i wyjaśnienie izoterm adsorpcji AC dla wybranego zanieczyszczenia. Oczekuje się, że wyniki badań rzucą światło na potencjał AC pochodzącego z łupin orzecha laskowego jako zrównoważonego materiału sorpcyjnego i zapewnią wgląd w jego praktyczne zastosowa-



Mgr inż. Beata BARCZAK (ORCID: 0000-0002-1069-5825) w roku 2022 ukończyła studia magisterskie na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej, kierunku technologia chemiczna, specjalność analityka techniczna i przemysłowa. Obecnie jest doktorantką w Katedrze Konwersji i Magazynowania Energii Szkoły Doktorskiej Politechniki Gdańskiej. Specjalność – biomasa, piroliza, aktywacja, ochrona środowiska.



Prof. dr hab. Ewa KLUGMANN-RADZIEMSKA (ORCID: 0000-0002-5159-3913) w roku 1985 ukończyła studia na Wydziale Fizyki i Matematyki Uniwersytetu Gdańskiego. W 1999 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych na tej samej uczelni, a w 2007 r. stopień doktora habilitowanego na Politechnice Koszalińskiej. W 2012 r. otrzymała tytuł profesora. Jest kierownikiem Katedry Konwersji i Magazynowania Energii na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej. Specjalność – badania wpływu warunków eksploatacyjnych, w tym zanieczyszczeń i temperatury na spadek mocy w krystalicznych krzemowych ogniwach słonecznych, recykling krystalicznych krzemowych ogniw i modułów fotowoltaicznych, badanie potencjału wykorzystania energii fotowoltaicznej w północnej Polsce, możliwości akumulowania energii, bezodpadowe technologie produkcji biodiesla w warunkach indywidualnego gospodarstwa rolnego i recykling odpadów gumowych.

\* Adres do korespondencji:

Katedra Konwersji i Magazynowania Energii, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.: (58) 347-15-04, e-mail: beata.barczak@pg.edu.pl

nie w procesach oczyszczania ścieków. Wykorzystując powszechnie dostępny materiał odpadowy z rolnictwa, badania te przyczynią się do rozwoju przyjaznych dla środowiska materiałów sorpcyjnych, torując drogę w kierunku bardziej zrównoważonego podejścia do oczyszczania ścieków.

## Część doświadczalna

### Materiały

Łupiny orzechów laskowych pochodziły z uprawy sadowniczej w północnej Polsce. Po oddzieleniu orzechów biomasę odpadową przemyto wodą destylowaną, a następnie suszono przez 12 h w temp. 105°C. Wysuszone łupiny rozdrobniono do ziaren o wielkości poniżej 4 mm. W procesie aktywacji wykorzystano wodorotlenek potasu cz.d.a. firmy Avantor Performance Materials Poland SA, a w eksperymentach adsorpcyjnych wykorzystano rodaminę B firmy POL-AURA.

### Metodyka badań

Wysuszoną biomasę poddawano pirolizie w temp. 500°C przez 1 h. Proces prowadzony był w piecu muflowym Midi Sun MX, w reaktorze stalowym ze złożem stałym o wymiarach 60×70 mm, w atmosferze azotu. W celu przeprowadzenia aktywacji fizycznej odważono po 10 g karbonizatu, który następnie przeniesiono do reaktora stalowego o wymiarach 330×30 mm. Reaktor umieszczano w piecu rurowym, który ogrzewano do 800°C, z szybkością nagrzewania wynoszącą 10°C/min. Przez złożę przepuszczano ditlenek węgla o natężeniu przepływu wynoszącym 3,3 L/h. Materiał węglowy poddawano działaniu utleniacza przez 2, 4 i 6 h od momentu osiągnięcia maksymalnej temperatury. Gazy wydzielające się w trakcie procesu przepuszczono przez system płuczek z izopropanolem i roztworem wodnym wodorotlenku sodu celem neutralizacji. Aktywację chemiczną za pomocą KOH rozpoczęto od impregnacji materiału węglowego, w stosunku masowym aktywatora do materiału węglowego w zakresie 1:1–3:1<sup>4)</sup>. Do każdej z prób dodano 20 mL wody destylowanej i mieszano za pomocą mieszadła magnetycznego przez 2 h w temp. 70°C. Następnie mieszaniny pozostawiono na noc w suszarce w 105°C w celu odparowania rozpuszczalnika. Osuszone próby przeniesiono do łądek kwarcowych i umieszczono

no w rurze kwarcowej zamkniętej szczelnie gwintowaną pokrywą z króćcem. Aktywację prowadzono w piecu rurowym w temp. 850°C w atmosferze azotu jako gazu obojętnego przez 1 h. Otrzymany węgiel aktywny płukano wodą destylowaną, a następnie rozcieńczonym roztworem kwasu chlorowodorowego w celu zobojętnienia nieprereagowanego aktywatora, aż do uzyskania obojętnego odczynu przesączu. Otrzymane węgle aktywne suszono przez 12 h w temp. 105°C.

Eksperymenty adsorpcji modelowego zanieczyszczenia organicznego (rodamina B) przeprowadzono, wykorzystując materiał o największej powierzchni właściwej (CAC\_3:1). Efektywną dawkę adsorbentu określono poprzez odważenie 2,5–12,5 mg AC i dodanie go do 5 mL roztworu rodminy o stężeniu 40 mg/g. Po upływie 2 h mieszaninę filtrowano i analizowano przesącz za pomocą spektrofotometru UV-VIS ( $\lambda_{\max}$  553 nm)<sup>5)</sup>. Następnie wykonano eksperymenty mające na celu zbadanie izoterm adsorpcji, które polegały na dodaniu wyznaczonej dawki adsorbentu do 5 mL roztworu barwnika o stężeniu 10–80 mg/L i pozostawieniu w kontakcie przez 2 h. Dane eksperymentalne porównano z wartościami wyznaczonymi za pomocą modeli izoterm adsorpcji Langmuira, Freundlicha, Totha i Sipsa opisanymi równaniami (1)–(4):

$$Q_e = \frac{q_m \cdot K_L}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

$$Q_e = K_F C_e^n \quad (2)$$

$$Q_e = \frac{q_{ms} K_S C_e^n}{1 + K_S C_e^n} \quad (3)$$

$$Q_e = \frac{K_T C_e}{(a_T + C_e^z)^{\frac{1}{z}}} \quad (4)$$

których  $C_e$  oznacza stężenie adsorbentu w równowadze, mg/L;  $K_L$  stałą Langmuira związaną ze zdolnością adsorpcyjną, L/mg;  $q_m$  maksymalną pojemność adsorpcyjną monowarstwy, mg/g;  $K_F$  stałą Freundlicha, L/mg;  $1/n$  parametr separacji wskazujący na intensywność procesu adsorpcji;  $q_{ms}$  maksymalną zdolność adsorpcji Sipsa, mg/g;  $K_S$  stałą modelu izoterm Sipsa, L/mg;  $n$  parametr heterogeniczności izoterm Sipsa;  $K_T$  powinowactwo powierzchni, mg/g;  $a_T$  stałą Totha, mg<sup>z</sup>/L<sup>z</sup>; a  $z$  parametr heterogeniczności.

Model izoterm Langmuira (1) jest jednym z najczęściej stosowanych modeli. Uwzględnia on pokrycie powierzchni poprzez równowagę między względnymi szybkościami adsorpcji i desorpcji, znaną jako równowaga dynamiczna<sup>6)</sup>. W tym przypadku adsorpcja jest proporcjonalna do wolnych miejsc aktywnych, podczas gdy desorpcja zachodzi z zajętych miejsc aktywnych na adsorbencie. W przeciwieństwie do izoterm Langmuira, model Freundlicha (2) jest stosowany do procesów zachodzących na heterogenicznych, wielowarstwowych powierzchniach<sup>7)</sup>. Modele Sipsa (3) i Totha (4) reprezentują kombinacje izoterm odpowiednio



Dr inż. Katarzyna JANUSZEWICZ (ORCID: 0000-0003-4664-3039) w roku 2009 ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej, kierunek technologie ochrony środowiska, specjalność monitoring i analityka zanieczyszczeń środowiska. W 2013 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest adiunktem w Katedrze Konwersji i Magazynowania Energii na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej. Specjalność – termochemiczna konwersja, aktywacja, reforming parowy.

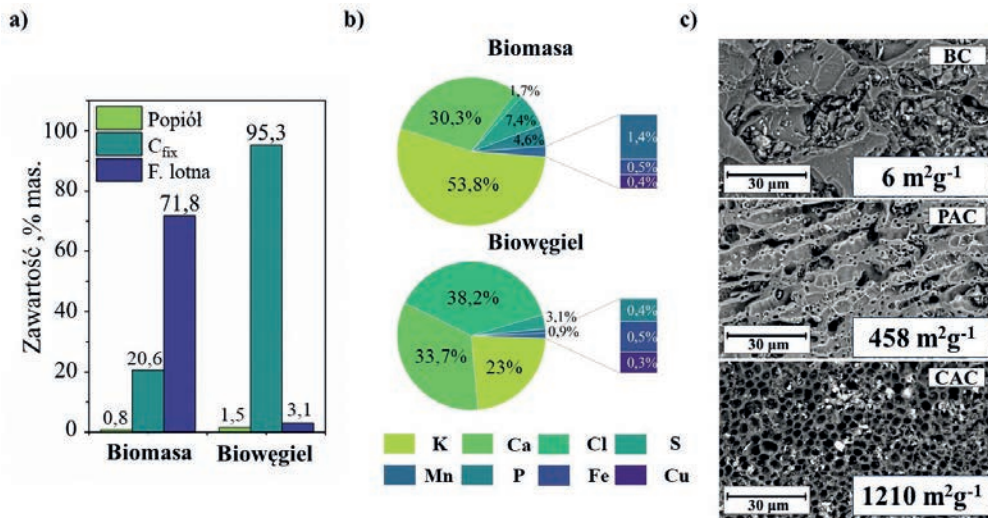


Fig. 1. Proximate analysis of biomass and biocarbon (a), elemental analysis of ash (b), surface morphology of biocarbon BC, physically activated carbon PAC and chemically activated carbon CAC (c)

Rys. 1. Analiza składu chemicznego biomasy i biowęgla (a), analiza pierwiastkowa popiołu (b), morfologia powierzchni biowęgla BC, fizycznie aktywowanego PAC i chemicznie aktywowanego CAC (c)

Langmuira i Freundlicha. Izoterma Sipsa jest właściwa do przewidywania adsorpcji na niejednorodnych powierzchniach i redukuje się do modelu Freundlicha przy małych stężeniach adsorbentu i do modelu Langmuira przy dużych stężeniach. Model Totha znajduje najszersze zastosowanie w opisie heterogenicznych układów adsorpcyjnych, które spełniają zarówno górne, jak i dolne granice stężenia adsorbentu<sup>7</sup>.

Analiza wpływu początkowego stężenia adsorbentu pozwala na określenie pojemności adsorpcyjnej oraz zgodności eksperymentalnie wyznaczonych izoterm z modelami izoterm. W badaniach wykorzystano modele dwuparametrowe Langmuira i Freundlicha oraz modele trójparametrowe Sipsa i Totha. Wartości parametrów oraz niepewności zostały wyznaczone w programie Origin Pro,

ponadto wyznaczono wartości regresji liniowej  $R^2$  oraz regresji nieliniowej  $\chi^2$ , na podstawie których określono najlepsze dopasowanie modelu do danych eksperymentalnych.

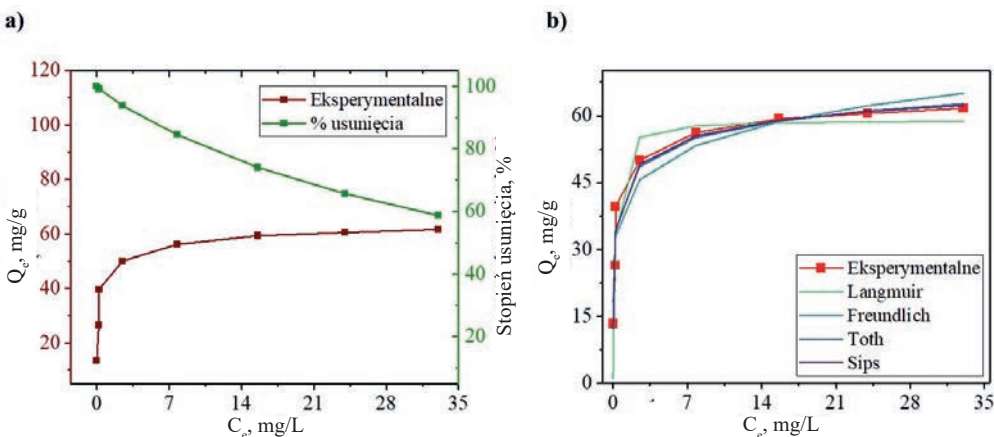
Biowęgiel oraz węgle aktywne zostały poddane szczegółowej analizie w celu zbadania wpływu różnych procesów na ich właściwości. Przeprowadzono analizę proksymalną biomasy oraz biowęgla, polegającą na wyznaczeniu zawartości wilgoci (za pomocą wagosuszarki), frakcji lotnej (ubytek masy podczas prażenia 1 g materiału w zamkniętym naczyniu przez 7 min w 840°C), popiołu (stała pozostałość po prażeniu 1 g materiału przez 35 min w 815°C) oraz węgla

związanego (pozostała część masy materiału obliczona na podstawie różnicy). Skład frakcji mineralnej zbadano za pomocą spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej (XRF, EDX-8000 Shimadzu). Wszystkie analizy zostały przeprowadzone trzykrotnie, a przedstawione wyniki stanowią średnią arytmetyczną uzyskanych wartości. Niepewność obliczono na podstawie odchylenia standardowego. Powierzchnię właściwą (SSA) węgla aktywnych oznaczono metodą Brunauera, Emmetta i Tellera (BET), a powierzchnię i objętość mikroporów metodą  $t$ -plot z wykorzystaniem izotermi Harkinsa i Jury, za pomocą aparatu Micrometric Gemini V. W celu oceny wpływu aktywatora na powierzchnię i strukturę węgla aktywnych przeprowadzono analizę za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Obrazy SEM i analizę EDX wykonano, używając aparatu

Phenom XL G2 Desktop SEM. Analiza EDX dostarczyła informacji na temat składu chemicznego powierzchni analizowanych materiałów węglowych.

## Wyniki badań i ich omówienie

Biomasa i powstały biowęgiel zostały poddane analizie w celu ilościowego określenia zawartości popiołu, substancji lotnych i węgla związanego. Łupiny orzechów laskowych wykazywały stosunkowo dużą zawartość węgla związanego i niewielki udział frakcji mineralnej, zapewniając znaczną przewagę



g. 2. Plot of the dependence of adsorption capacity and adsorbate removal rate on initial RhB concentration), RhB adsorption isotherms determined experimentally and according to Langmuir, Freundlich, Toth and Sips models (b)

rs. 2. Wykres zależności pojemności adsorpcyjnej i szybkości usuwania adsorbentu od początkowego stężenia RhB (a), izoterm adsorpcji RhB wyznaczone eksperymentalnie i zgodnie z modelami Langmuira, Freundlicha, Totha i Sipsa (b)



Table 1. Specific surface area, micropore surface area and micropore volume of the carbon materials

Tabela 1. Powierzchnia właściwa, powierzchnia mikroporów i objętość mikroporów otrzymanych węgla aktywnych

Aktywacja fizyczna (PAC)				Aktywacja chemiczna (CAC)			
Czas aktywacji, h	SSA, m <sup>2</sup> /g	microSSA, m <sup>2</sup> /g	mV <sub>p</sub> , cm <sup>3</sup> /g	Stosunek masowy KOH/materiał węglowy	SSA, m <sup>2</sup> /g	microSSA, m <sup>2</sup> /g	mV <sub>p</sub> , cm <sup>3</sup> /g
2	408,8	124,3	0,09	1:1	866,2	213,7	0,15
4	426,7	216,7	0,11	2:1	1008,5	475,4	0,26
6	457,5	307,1	0,15	3:1	1210,7	823,3	0,40

np. nad łupinami orzechów włoskich, które zawierają do 4% popiołu<sup>8</sup>). Popiół składał się z potasu (54%), wapnia (30%), chloru (7,4%) i siarki (4,6%). Piroliza spowodowała drastyczne zmniejszenie zawartości substancji lotnych z prawie 72% do 3%, co doprowadziło do znacznego wzbogacenia materiału w węgiel związany do 95%. Zawartość poszczególnych biopolimerów w omawianej biomacie wskazuje, że był to materiał lignocelulozowy, co pozwala na szeroki zakres zastosowań (lignina 21,3%, celuloza 20,3%, hemiceluloza 8,0%)<sup>9</sup>).

Biowęgiel (rys. 1c) wykazywał niezorganizowaną i unikatową strukturę powierzchni, charakteryzującą się głównie porami o większej średnicy. Dzięki przeprowadzonym procesom aktywacji (zarówno fizycznej, jak i chemicznej) zaobserwowano znaczny rozwój porowatości, co spowodowało powstanie licznych porów o różnych średnicach. Po aktywacji fizycznej zaobserwowano poprawę organizacji i powtarzalności struktury porowatej, której towarzyszyło pojawienie się licznych perforacji, wskazujących na znaczny wzrost powierzchni właściwej (SSA) analizowanego materiału. Wysoce powtarzalna porowata struktura materiału węglowego była charakterystyczna dla aktywacji chemicznej KOH, co potwierdzają badania przeprowadzone dla innych źródeł biomasy, takich jak łupiny orzecha kokosowego, kolby kukurydzy i pestki wiśni<sup>4, 10, 11</sup>).

Analizy SSA, powierzchni mikroporów (microSSA) i objętości mikroporów (mV<sub>p</sub>) przeprowadzono za pomocą wielowarstwowego modelu adsorpcji BET zarówno dla materiałów karbonizowanych, jak i AC, aby ocenić wpływ poszczególnych etapów syntezy na rozwój SSA i struktury porowatej (tabela 1). Na podstawie analizy parametrów strukturalnych uzyskanych AC wybrano materiał o najlepiej rozwiniętej powierzchni właściwej do zastosowania jako adsorbent modelowego zanieczyszczenia organicznego.

W przypadku aktywacji ditlenkiem węgla najbardziej znaczący wzrost SSA zaobserwowano po 2 h utleniania. Dalsze utlenianie przyczyniło się przede wszystkim do rozwoju mikroporów w obrębie większych porów, o czym świadczył wzrost microSSA z 124 m<sup>2</sup>/g po 2 h do 307 m<sup>2</sup>/g po 6 h, podczas gdy SSA w tym zakresie czasu aktywacji zrosła tylko o 49 m<sup>2</sup>/g. W przypadku aktywacji chemicznej SSA wzrastała w zakresie 866–1211 m<sup>2</sup>/g wraz ze wzrostem nadmiaru masy aktywatora. Zaobserwowano również opóźniony wzrost udziału microSSA (214–823 m<sup>2</sup>/g). Co ciekawe, udział mikroporów w strukturze materiału akty-

wowanego 3-krotnym nadmiarem KOH był porównywalny z AC po 6 h aktywacji fizycznej (ok. 68% SSA odpowiadało microSSA).

Dla porównania, dostępne badania dotyczące aktywacji łupin orzechów laskowych za pomocą alternatywnych aktywatorów, takich jak chlorek cynku lub kwas fosforowy(V) pokazują, że zastosowanie tych utleniaczy pozwala otrzymać materiały węglowe o powierzchni właściwej w przedziale 736–1363 m<sup>2</sup>/g<sup>12, 13</sup>). Niemniej jednak, aktywacje wykorzystujące ditlenek węgla i wodorotlenek potasu są bardziej rozpowszechnione ze względu na ich opłacalność i mniejszy wpływ na środowisko.

### Zastosowanie węgla aktywnego w eksperymentach oczyszczania wód

Rodamina B została wykorzystana jako model organicznego zanieczyszczenia ścieków. Wraz ze wzrostem dawki AC, pojemność adsorpcyjna stopniowo zmniejszała się z 54,2 mg/g do 32,0 mg/g. Podstawowym wskaźnikiem optymalnej ilości sorbentu był procent usunięcia barwnika obliczony na podstawie różnicy stężeń przed i po procesie adsorpcji. Skuteczność usuwania barwnika wzrastała wraz ze wzrostem dawki AC i wynosiła 64,3–99,8%. Dodanie co najmniej 1,6 g/L AC powodowało adsorpcję rodaminy powyżej 98%, dlatego w dalszych eksperymentach zastosowano 1,5 g/L AC.

Pojemność adsorpcyjna rodaminy B wzrastała wraz ze wzrostem stężenia początkowego z 13,3 mg/g do 64,4

Table 2. Adsorption parameters determined using Langmuir, Freundlich, Toth and Sips isotherm models

Tabela 2. Parametry adsorpcji wyznaczone za pomocą izoterm Langmuira, Freundlicha, Totha i Sipsa

Izoterma	Parametry	Izoterma	Parametry
Langmuir	$q_m = 59,1 \pm 3,2$	Freundlich	$K_F = 40,2 \pm 2,2$
	$K_L = 5,6 \pm 2,0$		$n = 7,3 \pm 1,0$
	$R^2 = 0,8849$		$R^2 = 0,9355$
	$\chi^2 = 14,22$		$\chi^2 = 4,97$
Sips	$q_{ms} = 78 \pm 17$	Toth	$K_T = 100 \pm 46$
	$K_S = 1,24 \pm 0,73$		$a_T = 0,161 \pm 0,025$
	$n_s = 0,33 \pm 0,11$		$z = 0,18 \pm 0,10$
	$R^2 = 0,9638$		$R^2 = 0,9618$
	$\chi^2 = 2,71$		$\chi^2 = 2,87$

mg/g, osiągając najwyższą wartość dla roztworu o stężeniu początkowym 80 mg/L. Jednak wraz ze wzrostem stężenia początkowego, procent usuwania barwnika stopniowo spadał z 99,9% do 61,3%. Można to przypisać ograniczeniu dostępnych miejsc aktywnych dla adsorbentu z powodu adsorpcji<sup>14</sup>). Dla porównania, AC z kolb kukurydzy i pestek wiśni aktywowane KOH adsorbowały ok. 45 mg/g rodaminę B. Wyznaczone stężenia równowagowe ( $C_e$ ) i pojemności adsorpcyjne ( $Q_e$ ) porównano z odpowiednimi wartościami uzyskanymi za pomocą modeli adsorpcji (tabela 2, rys. 2).

Najlepsze dopasowanie do danych eksperymentalnych obserwowano dla izotermy Sipsa, co potwierdza najwyższa wartość współczynnika korelacji liniowej  $R^2$  wynosząca 99,38, ale przede wszystkim najniższa wartość współczynnika korelacji nieliniowej  $\chi^2$ -kwadrat ( $\chi^2 = 2,71$ ). Ten trójparametrowy model izotermy jest powszechnie stosowany do opisu adsorpcji jednowarstwowej i może opisywać zarówno układy homogeniczne, jak i heterogeniczne. Jego fizyczne znaczenie opiera się na założeniu, że jedna cząsteczka adsorbentu jest adsorbowana na  $1/n$  aktywnych miejscach, a zatem wysoka zgodność z danymi eksperymentalnymi wskazuje na duże prawdopodobieństwo takiego mechanizmu. Ponadto parametr  $K_s$  w równaniu izotermy Sipsa reprezentuje intensywność lub powinowactwo adsorpcji między adsorbentem a adsorbentem. Jest to stała, która ilościowo określa siłę interakcji między cząsteczkami adsorbentu a powierzchnią adsorbentu. Większa wartość wskazuje na większe powinowactwo adsorbentu do adsorbentu, a uzyskana wartość w tym badaniu wskazuje na wysokie powinowactwo rodaminę B do otrzymanego AC.

## Podsumowanie i wnioski

Łatwo dostępna biomasa z łupin orzechów laskowych została wykorzystana jako prekursor do syntezy wysokiej jakości porowatych materiałów węglowych. Unikatywny skład chemiczny i właściwości strukturalne łupin orzechów laskowych sprawiają, że są one interesującym prekursorem AC, a ich przekształcenie w wysoce wydajny materiał sorpcyjny jest obiecujące dla zastosowań w oczyszczaniu ścieków. Porównano wpływ aktywacji fizycznej ( $\text{CO}_2$ ) i chemicznej (KOH) na rozwój struktury porowatej, w szczególności mikroporowatej. Największą powierzchnię właściwą wynoszącą 1211  $\text{m}^2/\text{g}$  osiągnięto dla chemicznie aktywowanego AC za pomocą KOH w stosunku do AC jak

3:1. Materiał ten został poddany eksperymentom adsorpcyjnym za pomocą modelowego organicznego zanieczyszczenia ścieków, rodaminę B. Uzyskana pojemność adsorpcyjna wynosząca prawie 65 mg/g wskazuje na wysoki potencjał otrzymanego AC w procesach poprawy jakości wody i ścieków. Oczekuje się, że wyniki badań rzucą światło na potencjał AC pochodzącego z łupin orzecha laskowego jako zrównoważonego materiału sorpcyjnego i zapewnią wgląd w jego praktyczne zastosowanie w procesach oczyszczania ścieków. Badania te mogą przyczynić się do rozwoju ekologicznych materiałów sorpcyjnych i utworzyć drogę w kierunku bardziej zrównoważonego podejścia do oczyszczania ścieków.

Otrzymano: 22-06-2023

## LITERATURA

- [1] G. Sharma, S. Sharma, A. Kumar, C. Wei Lai, M. Naushad, Shehbaz, J. Iqbal, F. Stadler, *Adsorpt. Sci. Technol.* 2022, 4184809, <https://doi.org/10.1155/2022/4184809>.
- [2] P. Kazimierski, K. Januszewicz, W. Godlewski, A. Fijuk, T. Suchocki, P. Chajza, B. Barczak, D. Kardaś, *Materials* 2022, **15**, nr 3, 1038, <https://doi.org/10.3390/ma15031038>.
- [3] M. Gantner, E. Czernyszewicz, K. Kopczyńska, K. Król, *Zesz. Nauk. SGGW Ekonomia Organizacja Gospodarki Żywnościowej* 2017, **118**, 127, <https://doi.org/10.22630/EIOGZ.2017.118.21>.
- [4] B. Barczak, P. Kazimierski, J. Łuczak, E. Klugmann-Radziemska, K. Januszewicz, [w:] *The book of articles National Scientific Conference "Understand the Science" 2021, "e-Factory of Science" 2021* (red. A. Firaja, N. Kępczak, P. Byczkowska), Promovendi Found. Pub., Łódź 2022, [https://promovendi.pl/wp-content/uploads/2021/12/The-Book-of-Articles-National-Scientific-Conferences-UTS\\_-eFoS.pdf](https://promovendi.pl/wp-content/uploads/2021/12/The-Book-of-Articles-National-Scientific-Conferences-UTS_-eFoS.pdf), dostęp 08.02.2023 r.
- [5] K. Januszewicz, P. Kazimierski, M. Klein, D. Kardaś, J. Łuczak, *Materials* 2020, **13**, nr 9, 2047, <https://doi.org/10.3390/ma13092047>.
- [6] T. Elmorsi, *J. Environ. Prot.* (Irvine, Calif) 2011, **2**, nr 6, 817, <https://doi.org/10.4236/jep.2011.26093>.
- [7] N. Ayawei, A.N. Ebelegi, D. Wankasi, *J. Chem.* 2017, 3039817, <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>.
- [8] N. Chundawat, B. Parmar, A. Deuri, D. Vaidya, K. Sepehr, N.P.S. Chauhan, *Polym. Compos.* 2020, **41**, nr 12, 5317, <https://doi.org/10.1002/pc.25796>.
- [9] L. Cruz-Lopes, J. Martins, B. Esteves, L. Lemos, Mat. Konf. ECOWOOD 2012, 5th International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products, September 5–7, 2012, Portugal.
- [10] C. Song, S. Wu, M. Cheng, P. Tao, M. Shao, G. Gao, *Sustainability* 2014, **6**, 86, <https://doi.org/10.3390/su6010086>.
- [11] H. Li, P. Gao, J. Cui, F. Zhang, F. Wang, J. Cheng, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018, **25**, 20743, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2026-y>.
- [12] P. Ozpinar, C. Dogan, H. Demiral, U. Morali, S. Erol, C. Samdan, D. Yildiz, I. Demiral, *Renew. Energy* 2022, **189**, 535.
- [13] A. Sencan, M. Karaboyacı, M. Kiliç, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2014, **22**, 3238, <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2974-9>.
- [14] S. Banerjee, M.C. Chattopadhyaya, *Arabian J. Chem.* 2017, **10**, S1629, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arabjch.2013.06.005>.