

Lidia DĄBEK¹, Krzysztof KUŚMIEREK², Andrzej ŚWIĄTKOWSKI²

¹ Politechnika Świętokrzyska, Katedra Inżynierii i Ochrony Środowiska

al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

² Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Chemii

ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

e-mail: ldabek@tu.kielce.pl, krzysztof.kusmieriek@wat.edu.pl, a.swiatkowski@wp.pl

Adsorpcja fenoli z roztworów wodnych na pylistych węglach aktywnych

Adsorption of Phenols from Aqueous Solutions on Powdered Activated Carbons

The adsorption process by solid adsorbents is one of the most efficient methods for the removal of organic pollutants from water. Adsorption is attractive for its relative flexibility and simplicity of design, low cost, ease of operation and regeneration. Activated carbons are now the most commonly used adsorbents of proven adsorption efficiency for organic compounds due to their physicochemical properties including specific surface area, pore volume, pore size distribution and surface chemistry. For water treatment on a commercial scale granular activated carbon is most commonly used. In this paper the adsorption of phenol (Ph) and 4-cresol (4K) from aqueous solutions on powdered activated carbons (PAC) was studied. As adsorbents, two activated carbons L2S and SX2 with similar physicochemical properties were used. The adsorption was studied in a batch adsorption system, including both kinetics and equilibrium. The kinetics was fitted with the pseudo-first order and pseudo-second order models. The adsorption kinetics was found to follow the pseudo-second order model with the coefficient of determination values greater than 0.99. The adsorption isotherms were determined and modeled with the Freundlich and Langmuir equations. The equilibrium data obtained for both adsorbates were better described by the Langmuir model than by the Freundlich isotherm model. It was found that the 4K was adsorbed better than Ph on both adsorbents. The adsorption capacities of the L2S and SX2 activated carbons towards phenols were comparable. The values of the Langmuir adsorption capacity q_m for phenol were 1.634 and 1.591 mmol/dm³ for the L2S and SX2 activated carbons, respectively. The q_m values for 4-cresol were 1.885 and 1.844 mmol/dm³ for the L2S and SX2, respectively. The influence of solution pH on the adsorption was also investigated. The adsorption of the Ph and 4K was almost constant from the pH 2 to 8, and decreased significantly with further increase in the pH (above the pK_a of the adsorbates and pH_{PZC} of the adsorbents).

Keywords: phenol, 4-cresol, adsorption, powdered activated carbon

Wstęp

Adsorpcja na ciałach stałych jest jednym z najpopularniejszych i równocześnie najskuteczniejszych sposobów usuwania zanieczyszczeń organicznych z wody [1-3]. Proces adsorpcji cieszy się niesłabnącym zainteresowaniem z uwagi na stosunkowo niskie koszty, prostotę procesu, a także ze względu na fakt, że nie generu-

je dodatkowych zanieczyszczeń (produktów ubocznych), jak to ma miejsce w przypadku utleniania zanieczyszczeń. Najczęściej stosowanymi adsorbentami na szeroką skalę są węgle aktywne. Doskonałe zdolności adsorpcyjne węgli aktywnych wynikają z ich unikalnych właściwości fizykochemicznych, przede wszystkim dobrze rozwiniętej struktury porowatej (powierzchni właściwej, objętości porów i rozkładu wielkości porów) oraz chemii powierzchni (rodzaju i charakteru powierzchniowych grup funkcyjnych). Skuteczność adsorpcji związków organicznych na węglach aktywnych zależy również od właściwości fizykochemicznych adsorbentu (ciężar cząsteczkowy, rozpuszczalność, polaryzacja, typ grup funkcyjnych), roztworu (siła jonowa, pH) czy też temperatury [4]. Do oczyszczania wody na skalę przemysłową stosowany jest przede wszystkim granulowany węgiel aktywny (GAC). Pylisty węgiel aktywny (PAC) jest stosowany rzadziej, głównie w sytuacjach awaryjnych, w przypadkach gdy w dopływającej wodzie pojawia się nagły lub cykliczny wzrost zanieczyszczenia [5]. PAC jest dodawany do wody najczęściej do komór szybkiego mieszania w procesie koagulacji lub przed osadnikiem z osadem zawieszonym, gdzie spełnia wówczas rolę zarówno obciążnika kłaczków, jak i adsorbentu [6]. Chociaż PAC jest stosowany rzadziej, jego właściwości adsorpcyjne nie ustępują granulowanemu węglom aktywnym. Skuteczność pylistych węgli aktywnych wykazano w procesach usuwania z wody metali [5], naturalnych rozpuszczonych substancji organicznych [6, 7] czy też chlorofenoli [8-11].

W pracy porównano właściwości adsorpcyjne dwóch pylistych węgli aktywnych o zbliżonych właściwościach fizykochemicznych jako adsorbentów do usuwania fenolu i 4-krezolu z roztworów wodnych. Zbadano kinetykę adsorpcji, adsorpcję w warunkach równowagowych oraz wpływ pH roztworu.

1. Materiały i metodyka badań

Fenol (Ph), 4-krezol (4K) oraz wszystkie inne odczynniki wykorzystywane w badaniach pochodziły z firmy Avantor Performance Materials (Polska). Jako adsorbenty wykorzystano dwa pyliste węgle aktywne L2S (Ceca) oraz SX2 (Norit). W celu scharakteryzowania rozwinięcia powierzchni obu zastosowanych węgli wyznaczono izotermy adsorpcji-desorpcji azotu w temp. 77 K, wykorzystując analizator ASAP 2020 (Micromeritics, USA). Wykonano także zdjęcia skaningowym mikroskopem elektronowym (Quanta 250 FEG) sprzężonym z detektorem EDS przy różnym powiększeniu. Przed użyciem obydwie węgle aktywne zostały wysuszone do stałej masy w suszarce próżniowej w temperaturze 120°C.

Wszystkie badania adsorpcyjne prowadzono w szklanych kolbach stożkowych, do których wprowadzano po 0,04 dm³ wodnych roztworów fenolu lub 4-krezolu o odpowiednim stężeniu oraz 0,02 g węgla aktywnego. Kolby wytrząsano w temperaturze 25°C ze stałą prędkością 200 obr/min. Stężenia Ph i 4K w roztworach oznaczano techniką spektrofotometrii UV-Vis (spektrofotometr Carry 3E, USA); pomiary absorbancji wykonywano przy długościach fali 269 i 277 nm odpowiadających maksimum absorpcji poszczególnych związków.

Kinetykę adsorpcji Ph i 4K zbadano dla ich stężenia początkowego w roztworze równego $1,0 \text{ mmol/dm}^3$. Ilość adsorbentu, która uległa adsorpcji na węglu aktywnym w czasie t (q_t , mmol/g), wyznaczono, korzystając z zależności:

$$q_t = V \frac{C_0 - C_t}{m} \quad (1)$$

gdzie: C_0 - stężenie początkowe adsorbentu, mmol/dm^3 ; C_t - stężenie po czasie t , mmol/dm^3 ; V - objętość roztworu, dm^3 ; m - masa adsorbentu, g.

Do wyznaczenia izoterm adsorpcji wykorzystano serię roztworów o różnych stężeniach adsorbatów w zakresie od $0,25$ do $2,0 \text{ mmol/dm}^3$. Adsorpcję w warunkach równowagowych (q_e , mmol/g) obliczano w oparciu o równanie:

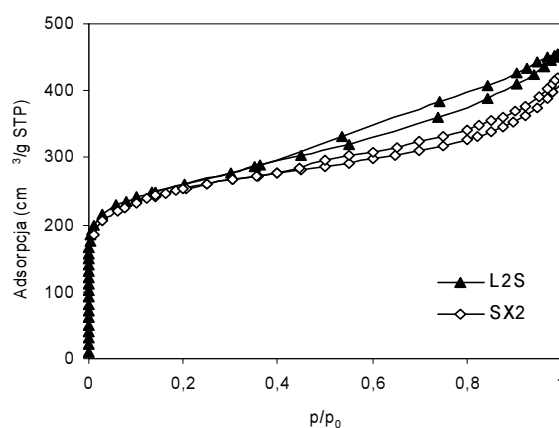
$$q_e = V \frac{C_0 - C_e}{m} \quad (2)$$

gdzie C_e - równowagowe stężenie adsorbentu, mmol/dm^3 .

Eksperymenty dotyczące wpływu pH na adsorpcję Ph i 4K na węglach aktywnych przeprowadzono w identyczny sposób. Stężenie początkowe adsorbatów wynosiło 1 mmol/dm^3 , pH roztworów było doprowadzane do odpowiedniego odczynu przez dodanie niewielkich ilości NaOH lub H_2SO_4 o stężeniu $0,1 \text{ mol/dm}^3$.

2. Wyniki i dyskusja

Wyznaczone izotermy adsorpcji-desorpcji azotu w temperaturze 77 K dla pylistych węgli aktywnych przedstawiono na rysunku 1. Obliczone na ich podstawie wielkości powierzchni właściwej S_{BET} , objętości mikroporów V_{mi} i mezoporów V_{me} podano w tabeli 1. Uzyskane rezultaty pomiarów pozostają w zgodzie z wcześniej opublikowanymi wynikami [10, 12].



Rys. 1. Izotermy adsorpcji-desorpcji azotu w temp. 77 K na pylistych węglach aktywnych
Fig. 1. Nitrogen adsorption-desorption isotherms of powdered activated carbons at 77 K

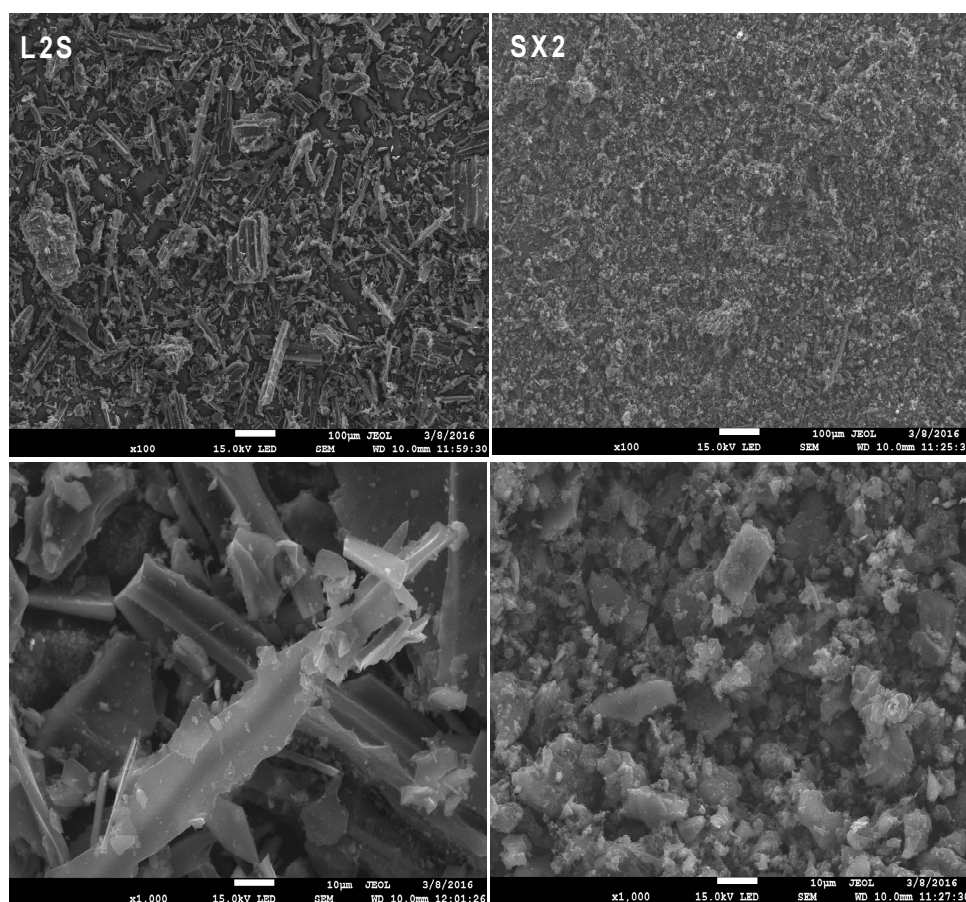
Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne pylistych węgli aktywnych

Table 1. Physicochemical properties of powdered activated carbons

Adsorbent	S_{BET} m ² /g	V_{mi} cm ³ /g	V_{me} cm ³ /g	Tlen* % wag.	Popiół % wag.	pH _{pzc}
L2S	920	0,395	0,295	3,9	0,3	7,10
SX2	885	0,371	0,245	4,8	3,8	7,15

* wynik z EDS

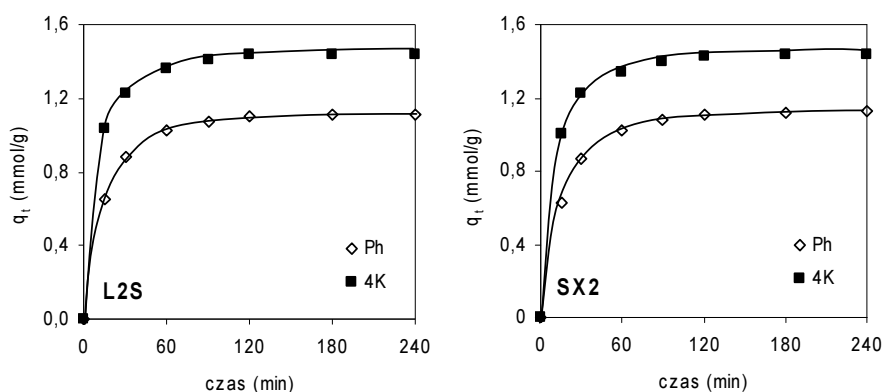
Fotografie SEM węgli L2S i SX2 przy dwóch różnych powiększeniach przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Fotografie SEM pylistych węgli aktywnych L2S i SX2

Fig. 2. SEM images of the L2S and SX2 powdered activated carbons

Kinetyka adsorpcji Ph i 4K na pylistych węglach aktywnych została przedstawiona na rysunku 3.



Rys. 3. Kinetyka adsorpcji fenolu i 4-krezolu na pylistych węglach aktywnych

Fig. 3. Adsorption kinetics of phenol and 4-cresol on powdered activated carbons

Do opisu uzyskanych danych eksperymentalnych zastosowano dwa modele kinetyczne - równania pseudo 1. rzędu [13] i pseudo 2. rzędu [14], których prostoliniowe postacie wyrażają się wzorami:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

gdzie k_1 , 1/min, i k_2 , g/mmol·min, to stałe szybkości adsorpcji równań pseudo 1. i pseudo 2. rzędu.

Obliczone parametry kinetyczne oraz uzyskane współczynniki korelacji R^2 zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Stałe szybkości równań pseudo 1. i pseudo 2. rzędu opisujące adsorpcję fenolu i 4-krezolu na pylistych węglach aktywnych

Table 2. Pseudo first- and pseudo second-order rate constants for adsorption of phenol and 4-cresol on the powdered activated carbons

Równanie	Parametr	L2S		SX2	
		Ph	4K	Ph	4K
pseudo 1. rzędu	k_1 , 1/min	0,040	0,046	0,038	0,044
	R^2	0,988	0,982	0,982	0,969
pseudo 2. rzędu	k_2 , mmol/g·min	0,093	0,122	0,080	0,101
	R^2	0,999	0,999	0,999	0,999

W każdym przypadku wyższe wartości współczynników korelacji R^2 uzyskano dla równania kinetycznego pseudo 2. rzędu. Kinetyka adsorpcji fenolu i 4-krezolu na pylistych węglach aktywnych L2S i SX2 przebiegała zgodnie z modelem pseu-

do 2. rzędu. Zarówno na węglu L2S, jak i SX2 szybciej adsorbował się 4K niż Ph. Podobną zależność zaobserwowano podczas adsorpcji tych związków na żywicach polimerowych [15, 16], aktywowanej tkaninie węglowej [17] czy też innych węglach aktywnych [18, 19]. Porównując ze sobą obydwie węgle aktywne, można zauważyć, że adsorpcja użytych adsorbatów zachodzi nieznacznie szybciej na węglu L2S. Ta niewielka różnica może być wynikiem różnic w ich strukturze porowatej, przede wszystkim większej ilości mezoporów węgla L2S odpowiedzialnych za właściwości kinetyczne adsorbentu [20].

Izotermy adsorpcji Ph i 4K na pylistych węglach aktywnych zostały przedstawione na rysunku 4. Do opisu i interpretacji danych eksperymentalnych zastosowano modele izoterm Freundlicha [21] i Langmuira [22]. Prostoliniowa postać równania Freundlicha jest opisana wzorem:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

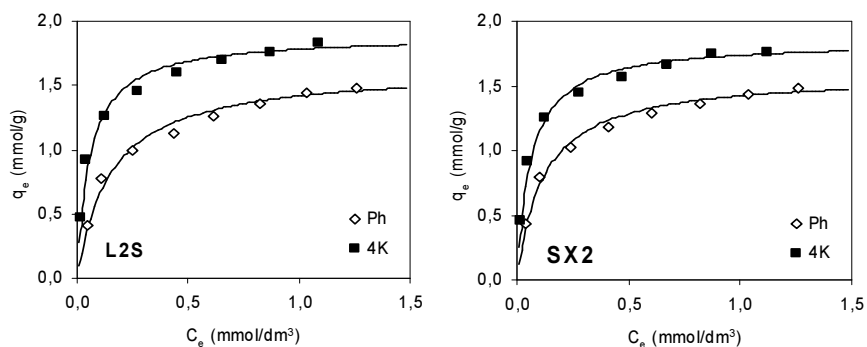
gdzie K_F oznacza stałą równania Freundlicha, $(\text{mmol/g}) \cdot (\text{dm}^3/\text{mmol})^{1/n}$, a n jest wykładnikiem równania Freundlicha.

Równanie Langmuira w postaci prostoliniowej wyraża się wzorem:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m b} \quad (6)$$

gdzie q_m oznacza maksymalną pojemność adsorpcyjną na powierzchni adsorbentu (mmol/g), natomiast b jest stałą równania Langmuira (dm^3/mmol).

Obliczone parametry równań Freundlicha i Langmuira opisujące adsorpcję fenolu i 4-krezolu na pylistych węglach aktywnych L2S i SX2 zostały przedstawione w tabeli 3.



Rys. 4. Izotermy adsorpcji fenolu i 4-krezolu na pylistych węglach aktywnych

Fig. 4. Adsorption isotherms of phenol and 4-cresol on powdered activated carbons

Przyjmując za kryterium dopasowania izotermy teoretycznej do danych eksperymentalnych wartość R^2 , można stwierdzić, że adsorpcja Ph i 4K na badanych

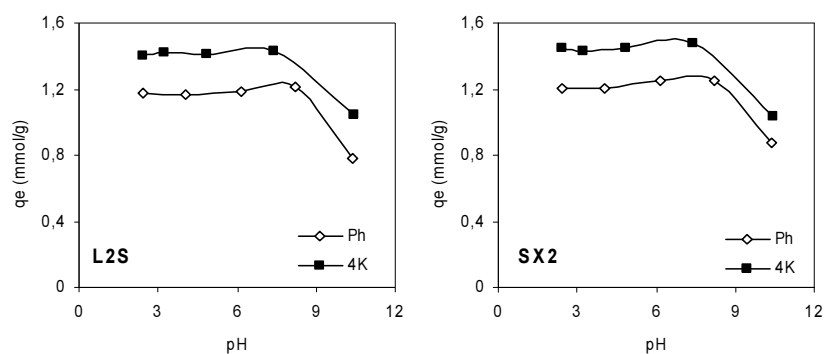
węglach pylistych przebiegała zgodnie z modelem Langmuira. 4-krezol adsorbował się zdecydowanie lepiej niż fenol, co wynika m.in. z jego większych rozmiarów, masy cząsteczkowej i hydrofobowości oraz mniejszej rozpuszczalności w wodzie w porównaniu do fenolu (25 g/l vs. 93 g/l w temp. 25°C) [1]. Podobne wyniki zostały uzyskane przez innych autorów na granulowanych węglach aktywnych [19, 23] i innych adsorbentach [15-17]. Adsorpcja poszczególnych adsorbatów na obydwu węglach aktywnych była porównywalna. Nieznacznie wyższe wartości q_m , zarówno dla Ph, jak i 4K uzyskano dla węgla L2S. Nieznacznie lepsza pojemność adsorpcyjna węgla L2S w porównaniu do SX2 jest wynikiem jego lepiej rozwiniętej struktury mikroporowatej - większej powierzchni właściwej S_{BET} (920 vs. 885 m²/g).

Tabela 3. Parametry równań Freundlicha i Langmuira oraz współczynniki korelacji R^2 opisujące adsorpcję fenolu i 4-krezolu na pylistych węglach aktywnych

Table 3. The Freundlich and Langmuir isotherm equation parameters and correlation coefficients R^2 for adsorption of phenol and 4-cresol on powdered activated carbons

Równanie	Parametr	L2S		SX2	
		Ph	4K	Ph	4K
Freundlich	$K_F, (\text{mmol/g}) \cdot (\text{dm}^3/\text{mmol})^{1/n}$	1,489	1,953	1,447	1,911
	1/n	0,358	0,278	0,326	0,292
	R^2	0,945	0,936	0,950	0,905
Langmuir	$q_m, \text{mmol/g}$	1,634	1,885	1,591	1,834
	b, dm ³ /mmol	6,551	17,01	8,369	15,95
	R^2	0,997	0,998	0,998	0,999

Wpływ pH środowiska na adsorpcję Ph i 4K na pylistych węglach aktywnych został przedstawiony na rysunku 5. Można stwierdzić, że przebieg krzywych eksperymentalnych jest bardzo podobny, porównując ze sobą poszczególne adsorbaty czy też poszczególne węgle aktywne. Takie podobieństwo wynika z podobnych właściwości adsorbatów, jak też adsorbentów.



Rys. 5. Wpływ pH na adsorpcję fenolu i 4-krezolu na pylistych węglach aktywnych

Fig. 5. The influence of the pH on the adsorption of phenol and 4-cresol on powdered activated carbons

Adsorpcja utrzymywała się na stałym poziomie w kwaśnym środowisku, jej znaczny spadek był obserwowany w wysokich wartościach pH (> 8). Wyznaczone eksperymentalnie wartości pH_{PZC} , determinujące ładunek powierzchniowy węgla aktywnego, wynosiły 7,10 dla L2S i 7,15 dla węgla SX2. Również powierzchnio- wa zawartość tlenu (a więc i kwaśnych funkcyjnych grup tlenowych) dla obydwu węgli była bardzo zbliżona (tab. 1). Wartość pK_a fenolu wynosi 10,0, natomiast 4-krezolu 10,3 [1]. Duża i stosunkowo niezmienna adsorpcja Ph i 4K w kwaśnym środowisku wynika z oddziaływania dodatnio naładowanej powierzchni węgla aktywnego z niezdysojowanymi (obojętymi elektrycznie) cząsteczkami adsorbatów, co sprzyja adsorpcji. Wyraźny spadek adsorpcji w środowisku zasadowym można wytłumaczyć odpychającym oddziaływaniem ujemnie naładowanej powierzchni adsorbentu (w $pH > PH_{PZC}$) ze zdysocjowanymi, obdarzonymi ładunkiem ujemnym, cząsteczkami Ph lub 4K (w $pH > pK_a$). Podobną zależność adsorpcji Ph i 4K od pH zaobserwowano wcześniej na węglu aktywnym pochodzącym z węgla bitumicznego [23].

Podsumowanie

W pracy zbadano adsorpcję fenolu i 4-krezolu na dwóch pylistych węglach aktywnych L2S i SX2. Zbadano kinetykę adsorpcji, adsorpcję równowagową oraz adsorpcję w zależności od pH środowiska. Równowaga adsorpcyjna ustalała się stosunkowo szybko, bo już po około 2 godzinach. Kinetyka adsorpcji Ph i 4K przebiegała zgodnie z modelem pseudo 2. rzędu. Na obydwu węglach szybciej adsorbował się 4K niż Ph. Nieznacznie lepsze właściwości kinetyczne (zdolności do szybszego wychwytu adsorbatów z roztworu wodnego) zaobserwowano w przypadku węgla L2S o większej objętości mezoporów. W warunkach równowagowych lepiej adsorbował się 4-krezol. Pojemności adsorpcyjne badanych węgli aktywnych były porównywalne, z nieznaczną przewagą L2S o większej powierzchni właściwej. Adsorpcja Ph i 4K przebiegała zgodnie z modelem izotermi Langmuira. W kwaśnym środowisku adsorpcja utrzymywała się na stałym poziomie, znaczący spadek adsorpcji Ph i 4K na obydwu pylistych węglach aktywnych był obserwowany w $pH > 8$.

Literatura

- [1] Dąbrowski A., Podkościelny P., Hubicki Z., Barczak M., Adsorption of phenolic compounds by activated carbon - a critical review, *Chemosphere* 2005, 58, 1049-1070.
- [2] Foo K.Y., Hameed B.H., Detoxification of pesticide waste via activated carbon adsorption process, *Journal of Hazardous Materials* 2010, 175, 1-11.
- [3] Soto M.L., Moure A., Dominguez H., Parajo J.C., Recovery, concentration and purification of phenolic compounds by adsorption: A review, *Journal of Food Engineering* 2011, 105, 1-27.
- [4] Moreno-Castilla C., Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials, *Carbon* 2004, 42, 83-94.

- [5] Dąbrowska L., Ocena przydatności pylistego węgla aktywnego do wspomagania procesu koagulacji, [w:] Węgiel aktywny w ochronie środowiska i przemyśle, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008, 282-288.
- [6] Szlachta M., Adamski W., Wykorzystanie adsorpcji na pylistym węglu aktywnym do usuwania rozpuszczonych substancji organicznych z wody, *Ochrona Środowiska* 2009, 31(2), 61-66.
- [7] Kulikowska D., Sułek P., Usuwanie zanieczyszczeń organicznych z odcieków składowiskowych metodą adsorpcji na pylistym węglu aktywnym. Część I, Efektywność procesu, *Czasopismo Techniczne, Środowisko* 2008, 105(1), 89-98.
- [8] Świątkowski A., Kuśmierek K., Porównanie węgla aktywnego i nanorurek węglowych jako adsorbentów do usuwania 2,4-dichlorofenolu z wody, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2013, 16(3), 293-301.
- [9] Kuśmierek K., Świątkowski A., Syga P., Dąbek L., Influence of chlorine atom number in chlorophenols molecules on their adsorption on activated carbon, *Fresenius Environmental Bulletin* 2014, 23(3a), 947-951.
- [10] Kuśmierek K., Sankowska M., Skrzypczyńska K., Świątkowski A., The adsorptive properties of powdered carbon materials with a strongly differentiated porosity and their applications in electroanalysis and SPME-GC, *Journal of Colloid and Interface Science* 2015, 446, 91-97.
- [11] Kuśmierek K., Świątkowski A., Kamiński W., Adsorpcja 4-chlorofenolu z roztworów na mieszanych adsorbentach: węgiel aktywny - nanorurki węglowe, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2015, 18(3), 373-383.
- [12] Lota G., Centeno T.A., Frackowiak E., Stoeckli F., Improvement of the structural and chemical properties of a commercial activated carbon for its application in electrochemical capacitors, *Electrochimica Acta* 2008, 53, 2210-2216.
- [13] Lagergren S., Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe, *Vetenskapsakad Handling* 1898, 24, 1-39.
- [14] Ho Y.S., McKay G., Pseudo-second-order model for sorption processes, *Process Biochemistry* 1999, 34, 451-465.
- [15] Liu F.Q., Xia M.F., Yao S.L., Li A.M., Wu H.S., Chen J.L., Adsorption equilibria and kinetics for phenol and cresol onto polymeric adsorbents: Effects of adsorbents/adsorbates structure and interface, *Journal of Hazardous Materials* 2008, 152, 715-720.
- [16] Huang J., Treatment of phenol and p-cresol in aqueous solution by adsorption using a carbonylated hypercrosslinked polymeric adsorbent, *Journal of Hazardous Materials* 2009, 168, 1028-1034.
- [17] Ayranci E., Duman O., Adsorption behaviors of some phenolic compounds onto high specific area activated carbon cloth, *Journal of Hazardous Materials* 2005, B124, 125-132.
- [18] Tseng R.L., Wu P.H., Wu F.C., Juang R.S., A convenient method to determine kinetic parameters of adsorption processes by nonlinear regression of pseudo-nth-order equation, *Chemical Engineering Journal* 2014, 237, 153-161.
- [19] Wang W., Pan S., Xu R., Zhang J., Wang S., Shen J., Competitive adsorption behaviors, characteristics, and dynamics of phenol, cresols, and dihydric phenols onto granular activated, *Desalination and Water Treatment* 2015, 56(3), 770-778.
- [20] Lorenc-Grabowska E., Diez M.A., Gryglewicz G., Influence of pore size distribution on the adsorption of phenol on PET-based activated carbons, *Journal of Colloid and Interface Sciences* 2016, 469, 205-212.
- [21] Freundlich H.M.F., Über die Adsorption in Lösungen, *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 1906, 57, 385-470.
- [22] Langmuir I., The constitution and fundamental properties of solids and liquids, *Journal of the American Chemical Society* 1916, 38, 2221-2295.
- [23] Moreno-Castilla C., Rivera-Utrilla J., Lopez-Ramon M.V., Carrasco-Marin F., Adsorption of some substituted phenols on activated carbons from a bituminous coal, *Carbon* 1995, 33(6), 845-851.

Streszczenie

W pracy porównano właściwości adsorpcyjne dwóch pylistych węgli aktywnych (L2S i SX2) o zbliżonych właściwościach fizykochemicznych jako adsorbentów do usuwania fenolu i 4-krezolu z roztworów wodnych. Zbadano kinetykę adsorpcji, adsorpcję w warunkach równowagowych oraz wpływ pH roztworu. Adsorpcja obydwu adsorbatów przebiegała zgodnie z modelem kinetycznym pseudo 2. rzędu, a w warunkach równowagowych była dobrze opisana równaniem izotermy Langmuira. W każdym przypadku 4-krezol adsorbował się szybciej i z większą wydajnością niż fenol. Różnice w pojemnościach adsorpcyjnych poszczególnych pylistych węgli aktywnych były niewielkie. Adsorpcja utrzymywała się na stałym poziomie w środowisku o pH od 2 do 8, jej znaczny spadek był obserwowany w wysokich wartościach pH (> 8), powyżej wartości pK_a adsorbatów i pH_{pzc} adsorbentów.

Słowa kluczowe: fenol, 4-krezol, adsorpcja, pylisty węgiel aktywny