

Krzysztof Kuśmierek, Lidia Dąbek, Władysław Kamiński, Andrzej Świątkowski

## Ocena przydatności torfu do usuwania chlorofenoli z roztworów wodnych

Chlorowane związki organiczne, a wśród nich szczególnie chlorofenole należą do priorytetowych zanieczyszczeń środowiska glebowo-wodnego, których szkodliwe oddziaływanie na florę i faunę wodną jest potęgowane poprzez ich kumulowanie się w łańcuchu pokarmowym. Źródłem chlorofenoli są ścieki pochodzące z przemysłu petrochemicznego, farmaceutycznego, z zakładów produkcji środków ochrony roślin, tworzyw sztucznych, środków dezynfekcyjnych, środków impregnacji drewna. Poważnym źródłem tych związków może być również chlorowanie wody i ścieków przemysłowych zawierających fenole, co może prowadzić do powstania chlorofenoli, ale również innych niebezpiecznych związków chloru, m.in. trójhalo-metanów, kwasów halogenooctowych, halogenoketonów, wodzianu chloralu, czy też chloropikryny [1]. W wodach powierzchniowych powszechnie występują substancje organiczne pochodzenia naturalnego. Podczas ich reakcji z chlorem powstają uboczne produkty dezynfekcji wody. Jedną z frakcji substancji organicznych są kwasy hydrofobowe (HPOA), do których zalicza się m.in. kwasy aromatyczne, 1- i 2-pierścieniowe fenole, kwasy fulwowe i humusowe [2].

Chlorofenole ulegają biodegradacji stosunkowo wolno [3,4]. Ich obecność w wodach powierzchniowych została wielokrotnie stwierdzona w prowadzonych systematycznie badaniach. Ponieważ wody powierzchniowe są znaczącym źródłem wody przeznaczonej do spożycia, dlatego zarówno monitoring, jak i usuwanie chlorofenoli stanowią istotne problemy do rozwiązania. Ich niekiedy dość wysoka zawartość w wodzie może powodować zagrożenie zdrowia i życia człowieka ze względu na ich właściwości mutagenne, teratogenne, a w przypadku niektórych z nich rakotwórcze. Do usuwania chlorofenoli można stosować różne metody, np. utlenianie katalityczne, fotokatalityczne, elektrochemiczne, filtrację membranową, rozkład biologiczny, stosowanie ozonu do dezynfekcji, adsorpcję. W przypadku

tej ostatniej, jako adsorbenty najczęściej i z dobrym skutkiem używane są węgle aktywne, jednak ich stosunkowo wysoka cena stwarza poważne ograniczenia. Z tego względu ostatnio prowadzi się na dużą skalę badania nad możliwością wykorzystania niekonwencjonalnych, tanich (nazywanych w literaturze angielskojęzycznej low-cost) adsorbentów różnego pochodzenia [5]. Są to zwykle materiały łatwo dostępne, np. popioły lotne i paleniskowe, odpadowe produkty pochodzenia roślinnego z przemysłu spożywczego i rolnictwa, glony, chitozan. Ważną zaletą roślinnych adsorbentów naturalnych (biosorbentów) jest możliwość ich utylizacji po wykorzystaniu w procesie oczyszczania wody lub ścieków [6,7]. Po wysyceniu sorbowanymi zanieczyszczeniami mogą być wykorzystane jako paliwo, np. w ciepłownictwie. Do grupy adsorbentów naturalnych można zaliczyć torf [5,8]. W niniejszej pracy poddano ocenie przydatność kanadyjskiego torfu Spill-Sorb do usuwania chlorofenoli z wody.

### Metodyka badań

Wykorzystane do badań chlorofenole: 4-chlorofenol, >99% (4-CP), 2,4-dichlorofenol, 99% (2,4-DCP) i 2,4,6-trichlorofenol, 98% (2,4,6-TCP) zakupiono w firmie Sigma-Aldrich (St. Louis, USA). Kwas octowy i acetonitryl o czystości HPLC pochodziły z firmy POCH (Gliwice, Polska). Jako adsorbent zastosowano komercyjnie dostępny torf Spill-Sorb „Fison” z torfowiska Parland County, Alberta, Kanada.

Wszystkie badania przeprowadzono w kolbach Erlenmeyera, do których wprowadzono 40 cm<sup>3</sup> roztworów chlorofenoli o różnym stężeniu oraz odpowiednią ilość adsorbentu. Przed użyciem torf był wygrzewany w suszarce w temperaturze 130 °C do stałej masy. Zawartość kolb mieszano z użyciem wytrząsarki laboratoryjnej WL-972 (JW Electronic, Warszawa, Polska) i następnie analizowano ilościowo.

Do oznaczeń ilościowych chlorofenoli w roztworach wodnych wykorzystano wysokosprawną chromatografię cieczową z detekcją w nadfiolecie (SHIMADZU model LC-20, Kioto, Japonia). Faza ruchoma, składająca się w 80% z metanolu i 20% wody doprowadzonej do pH=3,0 kwasem octowym, była pompowana przez kolumnę Phenomenex Luna C18 (250 mm × 4,6 mm, 3 μm) z prędkością 0,7 cm<sup>3</sup>/min. Chromatogramy rejestrowano przy długościach fali 281 nm, 284 nm i 294 nm, odpowiadających maksimum absorpcji 4-CP, 2,4-DCP i 2,4,6-TCP.

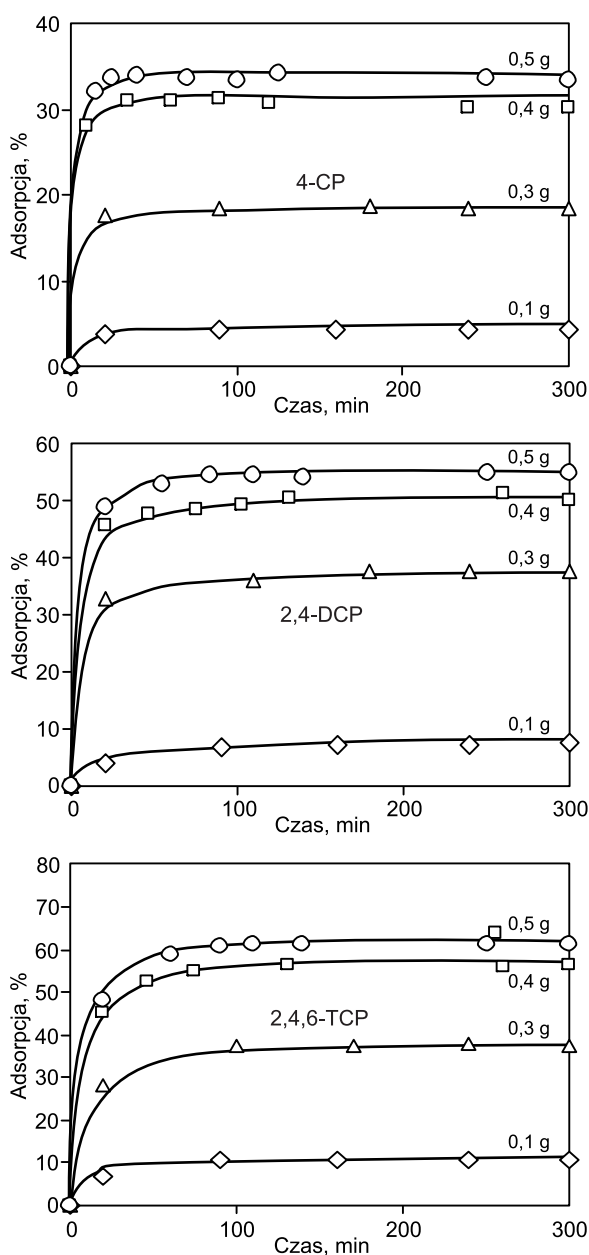
Dr K. Kuśmierek, prof. dr hab. inż. A. Świątkowski: Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Zakład Chemii, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
kkusmierek@wat.edu.pl, a.swiatkowski@wp.pl

Dr hab. L. Dąbek: Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Katedra Inżynierii i Ochrony Środowiska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce  
ldabek@tu.kielce.pl

Prof. dr hab. inż. W. Kamiński: Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Termodynamiki Procesowej, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź  
wladyslaw.kaminski@p.lodz.pl

## Dyskusja wyników

Wpływ ilości torfu na adsorpcję wybranych chlorofenoli przedstawiono na rysunku 1. Stężenia początkowe 4-CP, 2,4-DCP i 2,4,6-TCP wynosiły  $0,2 \text{ mmol/dm}^3$ , natomiast masa adsorbentu  $0,1 \text{ g}$ ,  $0,3 \text{ g}$ ,  $0,4 \text{ g}$  i  $0,5 \text{ g}$ . Większa ilość torfu spowodowała, co zrozumiale, większy ubytek chlorofenolu z roztworu. Trichlorofenol adsorbował się lepiej niż dichlorofenol i zdecydowanie lepiej niż monochlorofenol. W przypadku 4-chlorofenolu w próbkach zawierających  $0,1 \text{ g}$ ,  $0,3 \text{ g}$ ,  $0,4 \text{ g}$  i  $0,5 \text{ g}$  torfu po 5 h zaobserwowano jego ubytek o odpowiednio 4,5%, 18,5%, 30,1% i 33,3%. Różnice zaobserwowane w przypadku zastosowania  $0,4 \text{ g}$  i  $0,5 \text{ g}$  torfu były stosunkowo niewielkie – 30,1% i 33,3% (4-CP), 30,2% i 33,4% (2,4-DCP) oraz 50,2% i 54,8% (2,4,6-TCP), co mogło być spowodowane utrudnionym mieszaniem przy zbyt dużej ilości adsorbentu w kolbie. W dalszych etapach badań zastosowano  $0,4 \text{ g}$  torfu.



Rys. 1. Skuteczność adsorpcji 4-chlorofenolu, 2,4-dichlorofenolu oraz 2,4,6-trichlorofenolu na torfie Spill-Sorb

Fig. 1. Efficacy of adsorption of 4-chlorophenol, 2,4-dichlorophenol and 2,4,6-trichlorophenol on Spill-Sorb peat

Zbadano kinetykę adsorpcji wszystkich trzech chlorofenoli przy trzech różnych stężeniach początkowych ( $0,05 \text{ mmol/dm}^3$ ,  $0,2 \text{ mmol/dm}^3$  i  $0,5 \text{ mmol/dm}^3$ ), przy takiej samej ilości torfu ( $0,4 \text{ g}$ ). Próbkę roztworów ( $0,005 \text{ cm}^3$ ) pobrano po 2 min, 5 min, 15 min, 30 min, 45 min oraz 60 min i analizowano chromatograficznie. Ilość chlorofenolu, która uległa adsorpcji obliczono ze wzoru:

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

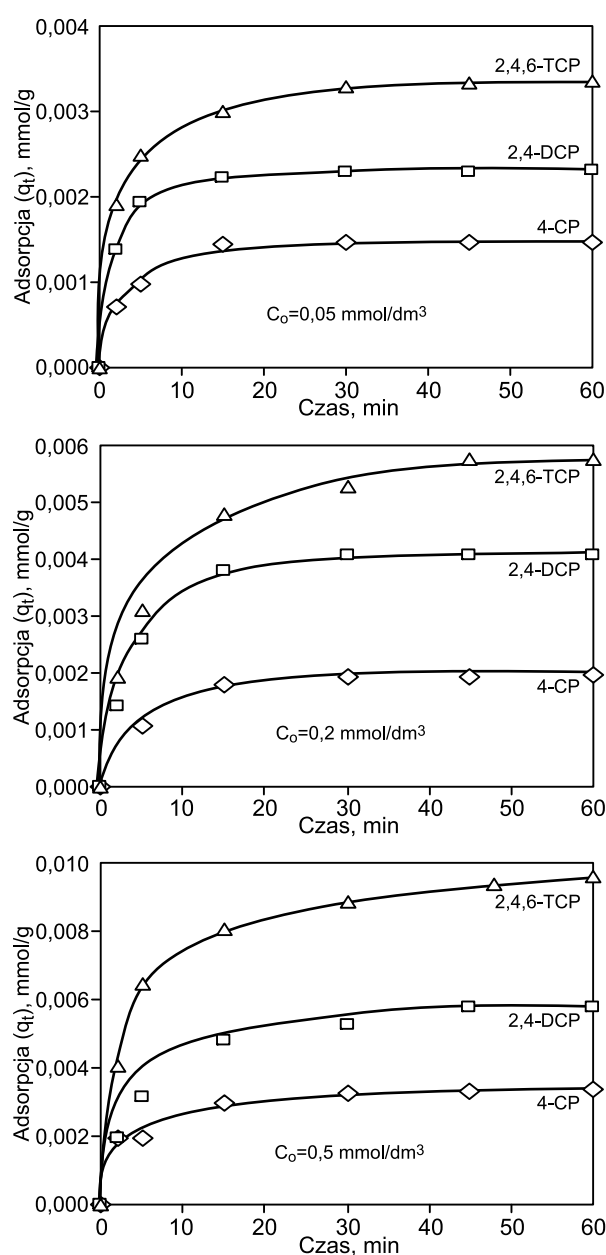
w którym:

$q_t$  – ilość chlorofenolu zaadsorbowana na torfie, mmol/g  
 $C_0$  i  $C_t$  – odpowiednio stężenie początkowe i po danym czasie  $t$ , mmol/dm<sup>3</sup>

$V$  – objętość roztworu, dm<sup>3</sup>

$m$  – masa adsorbentu, g

Wykresy zależności  $q_t$  od czasu przedstawiono na rysunku 2. Wyniki pokazały, że równowaga ustaliła się bardzo



Rys. 2. Kinetyka adsorpcji chlorofenoli na torfie Spill-Sorb

Fig. 2. Adsorption kinetics of chlorophenols on Spill-Sorb peat

szybko, bo właściwie już po 30 min. Tak duża szybkość była niewątpliwie dużą zaletą torfu jako adsorbentu. Zbliżoną szybkość osiągania równowagi adsorpcyjnej chlorofenoli (ok. 60 min) zaobserwowano na wielościennych nanorurkach węglowych [9, 10]. W przypadku najczęściej stosowanych węgla aktywnych do osiągnięcia równowagi adsorpcyjnej chlorofenoli potrzeba 5÷6 h [11].

Do opisu uzyskanych zależności zastosowano równania kinetyczne pseudo I i pseudo II rzędu. Równanie kinetyczne pseudo I rzędu jest wyrażone wzorem:

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

w którym:

$q_e$  i  $q_t$  – ilość chlorofenoli, która uległa adsorpcji na torfie w warunkach równowagowych i po czasie  $t$ , mmol/g

$k_1$  – stała szybkości adsorpcji, 1/min

$t$  – czas kontaktu roztworu z torfem, min

Wartości  $k_1$  obliczono z wykorzystaniem współczynników przesunięcia i współczynników nachylenia prostych uzyskanych dla zależności  $\log(q_e - q_t)$  od czasu.

Równanie kinetyczne pseudo II rzędu ma postać:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

w której:

$k_2$  – stała szybkości, g/mmol·min

Wartości  $k_2$  obliczono z wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów zależności  $t/q_t = f(t)$ . Obliczone stałe  $k_1$  i  $k_2$  oraz współczynniki korelacji  $R^2$  opisujące kinetykę adsorpcji wybranych chlorofenoli na torfie przedstawiono w tabeli 1. Zdecydowanie większe wartości współczynnika korelacji ( $>0,997$ ) uzyskano w przypadku równań pseudo II niż I rzędu. Sugeruje to, że kinetyka adsorpcji chlorofenoli przebiegała według modelu II rzędowego. Wartości stałych szybkości  $k_2$  zmniejszały się, co oczywiste, wraz ze wzrostem stężenia początkowego chlorofenolu. Porównując szybkość adsorpcji chlorofenoli przy najmniejszym stężeniu początkowym (0,05 mmol/dm<sup>3</sup>) wartości  $k_2$  wynosiły 362,7 g/mmol·min (4-CP), 267,7 g/mmol·min (2,4-DCP) i 134,1 g/mmol·min (2,4,6-TCP). Przy największym stężeniu początkowym (0,5 mmol/dm<sup>3</sup>) wartości  $k_2$  wynosiły 66,2 g/mmol·min (4-CP), 38,4 g/mmol·min (2,4-DCP) i 24,8 g/mmol·min (2,4,6-TCP). We wszystkich trzech badanych przypadkach można było zauważyć, że na torfie Spill-Sorb najszybciej adsorbował się 4-chlorofenol, potem 2,4-dichlorofenol i najwolniej 2,4,6-trichlorofenol. Szybkość adsorpcji zmniejszała się więc wraz ze wzrostem liczby atomów chloru w cząsteczce.

Przeprowadzono również badania, których celem była ocena skuteczności adsorpcji wybranych chlorofenoli na torfie Spill-Sorb. Eksperymenty przeprowadzono w kolbach Erlenmeyera zawierających po 0,4 g torfu oraz roztwory o różnych stężeniach chlorofenoli w zakresie od 0,02 mmol/dm<sup>3</sup> do 0,5 mmol/dm<sup>3</sup>. Po dwóch godzinach wytrząsania roztwory analizowano ilościowo. Na podstawie oznaczonych wartości stężenia początkowego ( $C_o$ ) i równowagowego ( $C_e$ ) chlorofenoli w roztworze wyznaczono wartość adsorpcji zgodnie ze wzorem:

$$q_e = V \frac{C_o - C_e}{m} \quad (4)$$

w którym:

$q_e$  – ilość chlorofenolu, która uległa adsorpcji na torfie, mmol/g

Zależności  $q_e$  od  $C_e$  (izotermy adsorpcji) przedstawiono na rysunku 3. Do opisu uzyskanych izoterm zastosowano równanie Freundlicha:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (5)$$

w postaci liniowej:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (6)$$

w którym:

$K_F$  – stała równania Freundlicha, (mmol/g)·(l/mmol)<sup>1/n</sup>

$n$  – wykładnik równania Freundlicha

Wartości  $K_F$  i  $n$  obliczono z parametrów prostej wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów z zależności  $\ln q_e$  od  $\ln C_e$  i zamieszczono w tabeli 2. Prostoliniowe izotermy Freundlicha uzyskane w przypadku badanych chlorofenoli przedstawiono na rysunku 3.

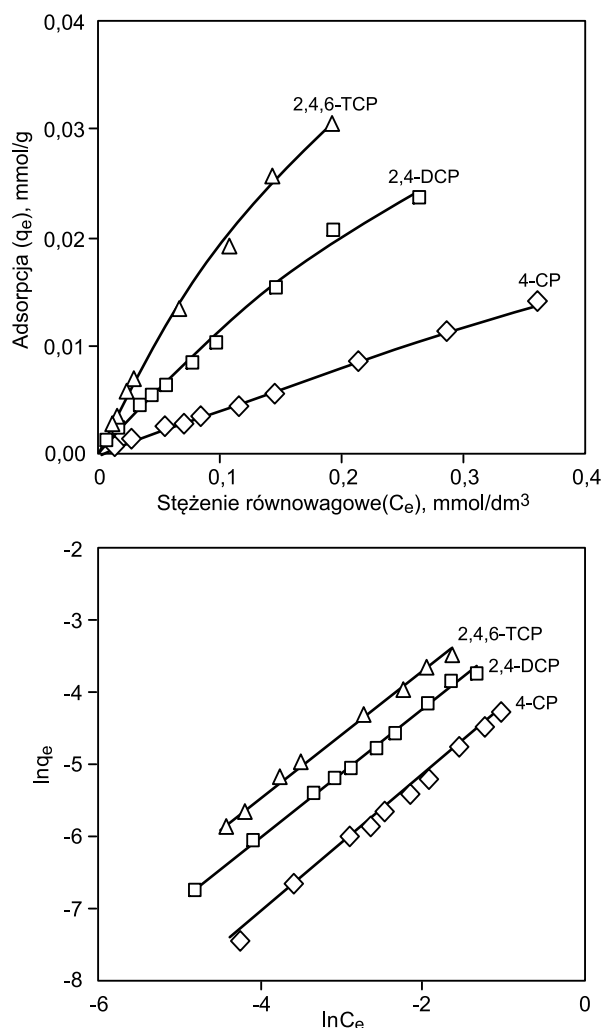
Punkty pomiarowe na izotermach ( $q_e = f(C_e)$ ) adsorpcji wszystkich trzech badanych chlorofenoli ułożyły się niemal w linii prostej. Zgodnie z klasyfikacją izoterm Gilesa [12] można je zaliczyć do typu C1. Podobny kształt izoterm zaobserwowano m.in. podczas adsorpcji benzenu na wełnie, 4-nitrofenolu na nylonie i poliglicynie, czy też fenolu na jedwabiu i włóknach poliestrowych [12]. Pomimo takiego kształtu uzyskane izotermy adsorpcji 4-CP, 2,4-DCP i 2,4,6-TCP na torfie były bardzo dobrze opisane równaniem Freundlicha, współczynniki korelacji  $R^2$  wynosiły odpowiednio 0,997; 0,998 i 0,996. Obliczone wartości  $K_F$  i  $n$ , obrazujące wartość adsorpcji, wzrastały w kolejności 4-CP < 2,4-DCP < 2,4,6-TCP. To sugeruje, że na torfie najsłabiej adsorbował się monochlorofenol, następnie dichlorofenol i najlepiej trichlorofenol. Skuteczność adsorpcji wzrastała więc wraz ze wzrostem liczby atomów chloru

Tabela 1. Stałe szybkości równań pseudo I i II rzędu opisujące adsorpcję chlorofenoli na torfie Spill-Sorb  
Table 1. Pseudo-first and pseudo-second order rate constants for adsorption of chlorophenols on Spill-Sorb peat

Związek	Stężenie początkowe mmol/dm <sup>3</sup>	Równanie pseudo I rzędu		Równanie pseudo II rzędu	
		$k_1$ , 1/min	$R^2$	$k_2$ , g/mmol·min	$R^2$
4-CP	0,05	0,027	0,992	362,7	0,999
	0,02	0,016	0,919	158,8	0,998
	0,5	0,013	0,915	66,2	0,997
2,4-DCP	0,05	0,019	0,901	267,7	0,998
	0,2	0,036	0,957	105,2	0,999
	0,5	0,026	0,926	38,4	0,999
2,4,6-TCP	0,05	0,020	0,978	134,1	0,999
	0,2	0,012	0,964	39,7	0,999
	0,5	0,014	0,953	24,8	0,998

Tabela 2. Parametry równania Freundlicha opisujące adsorpcję chlorofenoli na torfie Spill-Sorb  
Table 2. Freundlich isotherm model parameters for adsorption of chlorophenols on Spill-Sorb peat

Związek	Równanie Freundlicha		
	$K_F$	$n$	$R^2$
4-CP	0,037	1,058	0,997
2,4-DCP	0,080	1,140	0,998
2,4,6-TCP	0,137	1,167	0,996

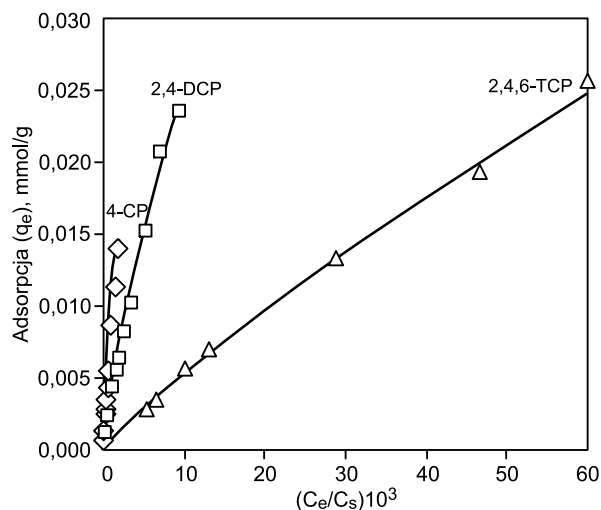


Rys. 3. Izoterm adsorpcji chlorofenoli na torfie Spill-Sorb  
Fig. 3. Adsorption isotherms of chlorophenols on Spill-Sorb peat

w cząsteczce fenolu. Podobną prawidłowość zaobserwowano podczas adsorpcji chlorofenoli na węglach aktywnych [13, 14], włóknach węglowych [15] i mezoporowatych materiałach krzemionkowych (SBA-15) [16], a także podczas adsorpcji kwasów fenoksyoctowych o rosnącej liczbie atomów chloru w pierścieniu aromatycznym na węglu aktywnym [17].

Ocena właściwości adsorpcyjnych badanych związków w oparciu o wartości parametrów  $K_F$  i  $n$  nie uwzględniała jednak ich rozpuszczalności, a tym samym zakresu stężeń, w którym wykonano izoterm. Może to powodować błędy, zwłaszcza gdy analizowane związki znacznie różnią się rozpuszczalnością. Taka sytuacja miała miejsce w przypadku mono-, di- i trichlorofenoli, których rozpuszczalności

różnią się właściwie o rząd wielkości. Rozpuszczalność 4-CP, 2,4-DCP i 2,4,6-TCP w wodzie, w temperaturze 20 °C, wynosi odpowiednio 210,0 mmol/dm<sup>3</sup>, 27,5 mmol/dm<sup>3</sup> i 2,3 mmol/dm<sup>3</sup> [3]. Zakres stężenia początkowego chlorofenoli (0,02÷0,5 mmol/dm<sup>3</sup>), jaki wykorzystano do wyznaczenia izoterm adsorpcji pokrywał więc odpowiednio około 0,25%, 1,8% i 21,7% całkowitej rozpuszczalności 4-CP, 2,4-DCP i 2,4,6-TCP w wodzie. Pewnym rozwiązaniem tego problemu jest sposób zaproponowany w pracy [18], której autorzy proponują zamianę wartości  $C_e$  na iloraz  $C_e/C_s$  ( $C_s$  – całkowita rozpuszczalność w wodzie) i w konsekwencji sporządzanie izoterm w układzie  $q_e=f(C_e/C_s)$ . Takie podejście uwzględnia różną rozpuszczalność badanych związków i w pewien sposób standaryzuje uzyskane wyniki, pozwalając na ich bardziej racjonalne porównanie. Izoterm adsorpcji badanych chlorofenoli wykonane w układzie zależności  $q_e$  od  $C_e/C_s$  przedstawiono na rysunku 4. Jak można zauważyć, uwzględnienie rozpuszczalności poszczególnych chlorofenoli odwróciło kolejność przebiegu punktów doświadczalnych na wykresie – wartość adsorpcji chlorofenoli na torfie malała w kolejności 4-CP > 2,4-DCP > 2,4,6-TCP.



Rys. 4. Izoterm adsorpcji chlorofenoli na torfie Spill-Sorb w układzie  $q_e=f(C_e/C_s)$   
Fig. 4. Adsorption isotherms  $q_e=f(C_e/C_s)$  of chlorophenols on Spill-Sorb peat

## Podsumowanie

Uzyskane wyniki pokazały, że torf Spill-Sorb może być stosowany do usuwania chlorofenoli z wody. Jego zdolności adsorpcyjne, w porównaniu do powszechnie stosowanych węgli aktywnych, były wprawdzie stosunkowo niewielkie, ale mogą być rekompensowane przez jego niską cenę. Najlepiej adsorbował się trichlorofenol, następnie dichlorofenol i najgorzej monochlorofenol (2,4,6-TCP > 2,4-DCP > 4-CP). Jednak po uwzględnieniu rozpuszczalności poszczególnych chlorofenoli w wodzie kolejność ta uległa zmianie (4-CP > 2,4-DCP > 2,4,6-TCP). W przypadku wszystkich badanych chlorofenoli równowaga adsorpcyjna ustaliła się bardzo szybko, już po około 30 min, co jest niewątpliwą zaletą torfu jako adsorbentu. Kinetyka procesu przebiegała zgodnie z modelem pseudo II rzędu. Szybkość adsorpcji zmniejszała się wraz ze wzrostem liczby atomów chloru w cząsteczce.

## LITERATURA

1. A. JANCEWICZ, U. DMITRUK, A. KWIATKOWSKA: Badania zawartości wybranych substancji halogenoorganicznych (AOX) w wodzie i ściekach. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 1, ss. 25–29.
2. A. WŁODYKA-BERGIER, T. BERGIER: Charakterystyka prekursorów lotnych ubocznych produktów chlorowania wody w sieci wodociągowej Krakowa. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 3, ss. 29–33.
3. M. CZAPLIKA: Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment. *Science of the Total Environment* 2004, Vol. 322, pp. 21–39.
4. A.O. OLANIRAN, E.O. IGBINOSA: Chlorophenols and other related derivatives of environmental concern: Properties, distribution and microbial degradation processes. *Chemosphere* 2011, Vol. 83, pp. 1297–1306.
5. M.D. AHMARUZZAMAN: Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review. *Advances in Colloid and Interface Science* 2008, Vol. 143, pp. 48–67.
6. Z. AKSU: Application of biosorption for the removal of organic pollutants: A review. *Process Biochemistry* 2005, Vol. 40, No. 3–4, pp. 997–1026.
7. D. PARK, Y.-S. YUN, J.M. PARK: The past, present, and future trends of biosorption. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 2010, Vol. 15, No. 1, pp. 86–102.
8. A. SRINIVASAN, T. VIRARAGHAVAN: Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: A review. *Journal of Environmental Management* 2010, Vol. 91, No. 10, pp. 1915–1929.
9. M. ABDEL SALAM, M. MOKHTAR, S.N. BASAHEL, S.A. AL-THABAITI, A.Y. OBAID: Removal of chlorophenol from aqueous solutions by multi-walled carbon nanotubes: Kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Alloys and Compounds* 2010, Vol. 500, pp. 87–92.
10. K. KUŚMIEREK, M. SANKOWSKA, A. ŚWIĄTKOWSKI: Adsorpcja dichlorofenoli z roztworów wodnych na wielościennych nanorurkach węglowych. *Przemysł Chemiczny* 2013, vol. 92, nr 7.
11. K. KUŚMIEREK, M. SANKOWSKA, A. ŚWIĄTKOWSKI: Kinetic and equilibrium studies of simultaneous adsorption of monochlorophenols and chlorophenoxy herbicides on activated carbon. *Desalination and Water Treatment* 2013 (DOI: 10.1080/19443994.2013.780984).
12. C.H. GILES, T.H. MacEWAN, S.N. NAKHWA, D. SMITH: Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. *Journal of the Chemical Society (Resumed)* 1960, pp. 3973–3993.
13. M.-W. JUNG, K.-H. AHN, Y. LEE, K.-P. KIM, J.-S. RHEE, J.T. PARK, K.-J. PAENG: Adsorption characteristics of phenol and chlorophenols on granular activated carbons. *Microchemical Journal* 2001, Vol. 70, pp. 123–131.
14. O. HAMDAROU, E. NAFFRECHOUX: Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon part I. Two-parameter models and equations allowing determination of thermodynamic parameters. *Journal of Hazardous Materials* 2007, Vol. 147, pp. 381–394.
15. Q.-S. LIU, T. ZHENG, P. WANG, J.-P. JIANG, N. LI: Adsorption isotherm, kinetic and mechanism studies of some substituted phenols on activated carbon fibers. *Chemical Engineering Journal* 2010, Vol. 157, pp. 348–356.
16. Q. QIN, K. LIU, D. FU, H. GAO: Effect of chlorine content of chlorophenols on their adsorption by mesoporous SBA-15. *Journal of Environmental Sciences* 2012, Vol. 24, pp. 1411–1417.
17. K. KUŚMIEREK, A. ŚWIĄTKOWSKI: Wpływ liczby atomów chloru w cząsteczkach kwasów chlorofenoksyoctowych na ich adsorpcję z roztworów wodnych na węglu aktywnym. *Ochrona Środowiska* 2013, vol. 35, nr 1, ss. 47–50.
18. P.J.M. CARROTT, P.A.M. MOURAO, M.M.L. RIBEIRO CARROTT, E.M. GONCALVES: Separating surface and solvent effects and the notion of critical adsorption energy in the adsorption of phenolic compounds by activated carbons. *Langmuir* 2005, Vol. 21, pp. 11863–11869.

**Kusmiererek, K., Dabek, L., Kaminski, W., Swiatkowski, A. Evaluation of the Usefulness of Peat for Removal of Chlorophenols from Water Solutions. *Ochrona Środowiska* 2013, Vol. 35, No. 2, pp. 51–55.**

**Abstract:** Three chlorophenols of various number of chlorine atoms in the molecule (4-CP, 2,4-DCP and 2,4,6-TCP) were selected for experiments. Removal of these compounds from aqueous solutions has been studied using commercially available Spill-Sorb peat from Parland County (Alberta, Canada). To describe the kinetic data pseudo-first and pseudo-second order models were used. The results showed that the adsorption of chlorophenols on the peat fitted well the

pseudo-second order kinetic model. The values of the rate constants  $k_2$  decreased with the increase in the initial concentration of chlorophenol and with the increase in the number of chlorine atoms in the molecule. Adsorption was analysed as a function of solution concentration at equilibrium. The experimental data received were found to be well described by the Freundlich isotherm equation.  $K_F$  and  $n$  values increased in the order 4-CP < 2,4-DCP < 2,4,6-TCP. This suggests that the adsorption efficacy increases with increasing number of chlorine atoms in the chlorophenol molecule.

**Keywords:** Water treatment, chlorophenols, peat, adsorption kinetics, adsorption equilibrium.