

Katarzyna Jedynak, Jerzy Choma

Zastosowanie uporządkowanych mezoporowatych materiałów węglowych do usuwania wybranych związków organicznych z roztworów wodnych

Uporządkowane węgle mezoporowate (ordered mesoporous carbons – OMCs) mogą być otrzymywane za pomocą metod twardego lub miękkiego odwzorowania. Obie metody różnią się zasadniczo rodzajem i właściwościami wykorzystywanych matryc, którymi steruje się na poziomie molekularnym, otrzymując ostatecznie uporządkowane węgle mezoporowate [1, 2]. Uporządkowane węgle mezoporowate zsyntezowano po raz pierwszy pod koniec lat 90. ubiegłego stulecia, stosując metodę twardego odwzorowania (hard-templating – HT). Otrzymano wówczas węgle mezoporowate, jako odwrotne repliki uporządkowanych mezoporowatych krzemionek, takich jak MCM-48, SBA-15 czy FDU-1 [3, 4]. Proces odwzorowania uporządkowanych mezoporowatych krzemionek składał się z etapów wypełnienia ich porów prekursorem węglowym, karbonizacji oraz ostatecznie rozpuszczenia twardej matrycy. Pierwsze uporządkowane węgle mezoporowate otrzymali R. Ryoo i wsp. w 1999 r. [5] wypełniając pory uporządkowanej mezoporowatej krzemionki MCM-48 (jako twardej matrycy) sacharozą pełniącą funkcję prekursora węglowego, którą poddano następnie karbonizacji. W końcowym etapie syntezy matrycę krzemionkową rozpuszczono za pomocą roztworu NaOH i otrzymano uporządkowany węgiel mezoporowaty. Schemat metody twardego odwzorowania przedstawiono na rysunku 1.

Biorąc pod uwagę złożoność procesu twardego odwzorowania wydaje się, że otrzymywanie mezoporowatych węgla tą metodą na większą skalę może napotykać na pewne ograniczenia. Dużo prostszą metodą otrzymywania mezoporowatych materiałów węglowych jest miękkie odwzorowanie (soft-templating – ST), które znacznie różni się od metody twardego odwzorowania. W syntezie tej wykorzystuje się jako miękkie matryce kopolimery trójblokowe lub jonowe substancje powierzchniowo czynne. Najbardziej popularna okazała się strategia odwzorowania, w której wykorzystuje się kopolimery trójblokowe. Jest to metoda zapewniająca otrzymywanie uporządkowanych mezoporowatych materiałów węglowych z jednorodnymi porami o wymiarach od około 6 nm do około 30 nm oraz o bardzo dużej objętości i powierzchni porów [3]. Metoda miękkiego odwzorowania cechuje się tym, że może być realizowana w jednym etapie. W wyniku organiczno-organicznymi

oddziaływań cząsteczek kopolimeru trójblokowego (mięka matryca) i polimerowych prekursorów węglowych (zazwyczaj żywice fenolowe) tworzy się mezostruktura, w której cząsteczki prekursora węglowego są wbudowywane w domeny miękkiej matrycy. Organiczno-organiczne interakcje sprowadzają się do skomplikowanych oddziaływań elektrostatycznych, tworzenia wiązań wodorowych oraz wiązań kowalencyjnych. W procesie otrzymywania mezoporowatych węgla metodą miękkiego odwzorowania, kolejnym etapem po sformułowaniu polimerowej mezostruktury jest termiczne wygrzewanie, w czasie którego następuje rozkład niestabilnych cząsteczek kopolimeru i usunięcie ich z wnętrza mezostruktury. W tych warunkach żywica fenolowa ulega sieciowaniu w wyniku procesu polikondensacji. Proces dalszego wygrzewania w znacznie wyższych temperaturach w atmosferze beztlenowej, np. przepływającego azotu, prowadzi do karbonizacji żywicy fenolowej. Otrzymane w ten sposób węgle mezoporowate mają duże i jednorodne mezopory o geometrii analogicznej jak dobrze znane materiały krzemionkowe SBA-15, SBA-16 itp. Węgły otrzymane metodą miękkiego odwzorowania zazwyczaj zawierają mało porów o średnicach mniejszych od 2 nm [6–8]. Schemat metody miękkiego odwzorowania przedstawiono na rysunku 2 [3].

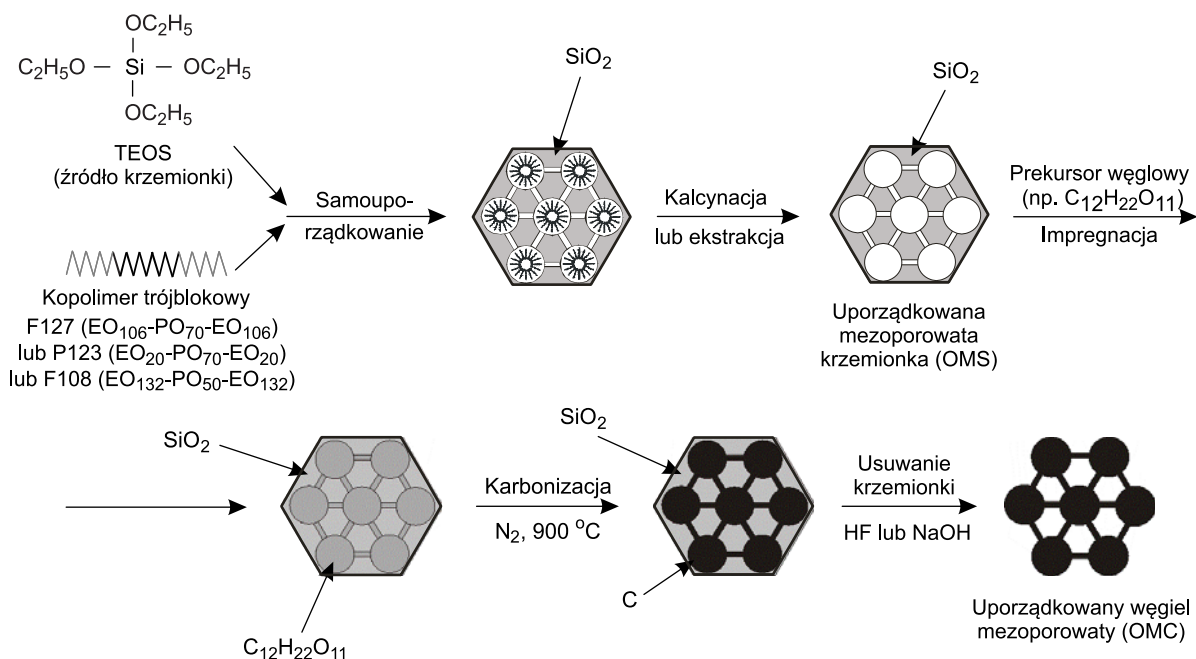
Uporządkowane węgle mezoporowate otrzymane opisanymi metodami charakteryzują się wyjątkowymi właściwościami, a mianowicie dużą powierzchnią właściwą, określonym wymiarem porów, dużą objętością porów, a także wysoką stabilnością termiczną oraz chemiczną biernością i w związku z tym są odpowiednie do wielu zastosowań, w tym do adsorpcyjnego usuwania związków organicznych z wody [9].

Barwniki organiczne

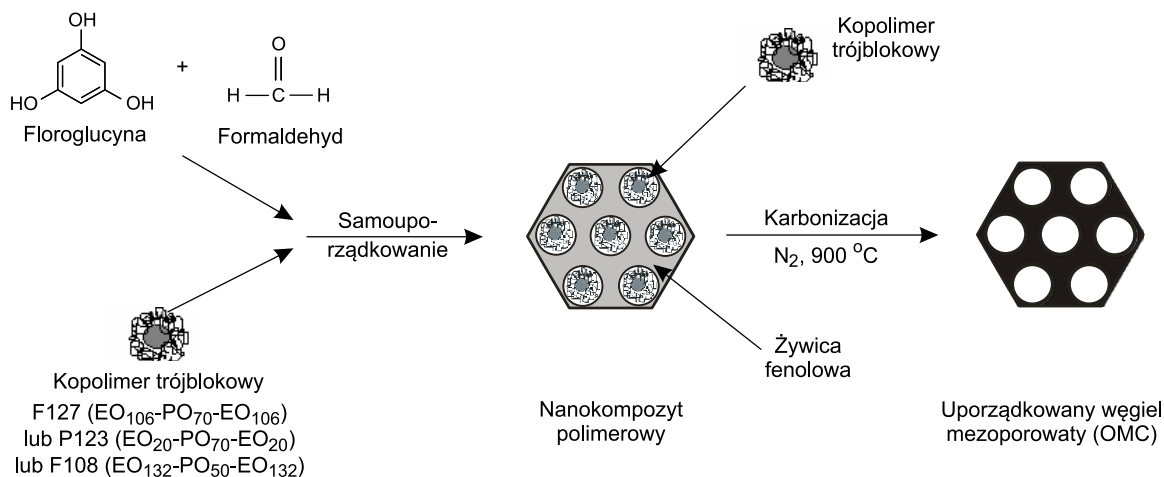
W badaniach adsorpcji chlorku metylotioniny oraz chlorowodoru heksametylo-p-rozniliny (fiolet krystaliczny) z wody na uporządkowanych węglach mezoporowatych wykazano, że materiały te miały bardzo dużą pojemność adsorpcyjną w stosunku do barwników organicznych (>800 mg/g) [10]. Badano także możliwość zastosowania węgla mezoporowatych o zróżnicowanych wymiarach porów do adsorpcji błękitu metylenowego oraz czerwieni obojętnej [11]. Ponieważ struktura porowata uporządkowanych mezoporowatych węgla składała się głównie z mezoporów (2–50 nm), dlatego cząsteczki tych barwników mogły łatwo dyfundować do wnętrza porów.

Dr K. Jedynak: Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Zakład Chemii Fizycznej, ul. Świętokrzyska 15G, 25-406 Kielce, kjedynak@ujk.edu.pl

Prof. dr hab. inż. J. Choma: Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Zakład Chemii, ul. Generała Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, jchoma@wat.edu.pl

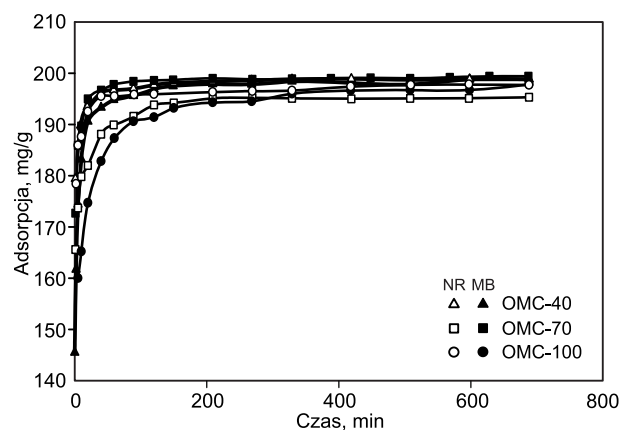


Rys. 1. Schemat syntezy uporządkowanego węgla mezoporowatego (OMC) metodą twardego odwzorowania
Fig. 1. Synthesis scheme of ordered mesoporous carbon (OMC) by hard-templating method



Rys. 2. Schemat syntezy uporządkowanego węgla mezoporowatego (OMC) metodą miękkiego odwzorowania [3]
Fig. 2. Synthesis scheme of ordered mesoporous carbon (OMC) by soft-templating method [3]

Z tego właśnie względu węgle mezoporowate mają doskonałą zdolność do usuwania dużych cząsteczek barwników organicznych z roztworów wodnych. Wyniki badań adsorpcyjnych wykazują, że podstawowym czynnikiem decydującym o zdolności oraz szybkości adsorpcji błękitu metylenowego na tych materiałach jest objętość mezoporów o wymiarach powyżej 3,5 nm. Okazało się jednak, że w adsorpcji czerwieni obojętnej istotną rolę odgrywiają mniejsze mezopory. Największą zdolność do adsorpcji błękitu metylenowego (200 mg/g) wykazywał uporządkowany węgiel mezoporowaty OMC-70 o objętości mezoporów (>3,5 nm) równej 0,779 cm³/g i powierzchni właściwej S_{BET}=693 m²/g. Największą zdolność do adsorpcji czerwieni obojętnej (200 mg/g) wykazywał natomiast węgiel OMC-40 o objętości mezoporów (>3,5 nm) równej 0,147 cm³/g i powierzchni właściwej S_{BET}=927 m²/g. Na rysunku 3 przedstawiono szybkość adsorpcji błękitu metylenowego (MB) i czerwieni obojętnej (NR) na węglach mezoporowatych [11].

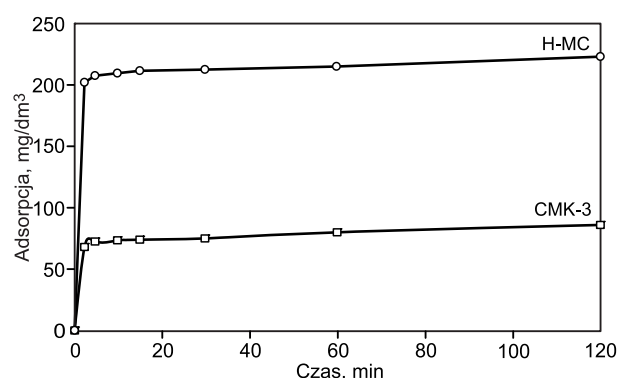


Rys. 3. Adsorpcja błękitu metylenowego (MB) i czerwieni obojętnej (NR) na materiałach węglowych (OMC-40, OMC-70 i OMC-100) [11]
Fig. 3. Adsorption of methylene blue (MB) and neutral red (NR) on carbon materials (OMC-40, OMC-70 and OMC-100) [11]

Wysocze uporządkowane węgle mezoporowate CMK-3 o heksagonalnej strukturze oraz węgle nieuporządkowane zostały zastosowane w badaniach adsorpcji barwnika anionowego – Remazol Red 3BS [12]. Wykazano, że węgle mezoporowate miały większe zdolności adsorpcyjne ($500 \div 580 \text{ mg/g}$ w temp. 25°C) w porównaniu z węglami komercyjnymi, które charakteryzowały się strukturą mikroporowatą lub mikro-mezoporowatą. Adsorpcja zanieczyszczeń organicznych z roztworów wodnych zależała od charakteru adsorbentu oraz właściwości powierzchniowych adsorbentu. Interakcje adsorbent–adsorbat w przypadku związków organicznych obejmowały oddziaływania elektrostatyczne i dyspersyjne. Ponadto pojemność adsorpcyjna adsorbentu zależała nie tylko od chemicznej budowy powierzchni i jego właściwości fizycznych, ale także w znacznym stopniu miał na nią wpływ wymiar (objętość) cząsteczek adsorbentu. W badaniach adsorpcji zieleni malachitowej z roztworów wodnych na wysocze uporządkowanym węglu mezoporowatym wykazano, że adsorpcja tego barwnika była spontaniczna, a proces był egzotermiczny [13]. Maksymalna ilość zaadsorbowanego barwnika wynosiła ponad 300 mg/g . Z kolei w pracy [14] badano adsorpcję barwników komercyjnych – błękitu reaktywnego 19, czerwieni kwasowej 57 oraz fuksyny zasadowej z roztworów wodnych w temperaturze 20°C na uporządkowanym węglu mezoporowatym CMK-5 o strukturze tubularnej. Adsorbent ten wykazywał bardzo dużą szybkość adsorpcji i wyjątkową zdolność adsorpcyjną w stosunku do badanych barwników (fuksyna zasadowa – 1403 mg/g , czerwień kwasowa $57 \div 1131 \text{ mg/g}$, błękit reaktywny $19 \div 733 \text{ mg/g}$). Badania te wykazały, że możliwa była regeneracja węgla CMK-5 z zaadsorbowanym błękitem reaktywnym 19 za pomocą ekstrakcji etanolem lub termicznego wygrzewania w temperaturze 600°C . Po regeneracji osiągnięto, w zależności od metody regeneracji, odpowiednio 51% i 77% wyjściowej pojemności adsorpcyjnej węgla. Węgiel CMK-5 okazał się bardzo dobrym adsorbentem do usuwania dużych ilości barwników kwasowych, zasadowych i reaktywnych z roztworów wodnych.

W wyniku wytworzenia grup tlenowych na powierzchni węgla CMK-3 za pomocą kwasowego roztworu KMnO_4 otrzymano hydrofilowy węgiel mezoporowaty H-MC, zachowując przy tym uporządkowaną mezoporowatą strukturę węgla wyjściowego [15]. Utleniająca modyfikacja nie spowodowała zasadniczych zmian w wymiarze porów węgla CMK-3 i H-MC, spowodowała jedynie niewielkie zmniejszenie powierzchni właściwej i objętości porów. Badano adsorpcję czerwieni reaktywnej X-3B na powierzchni tych węgla. Zaobserwowano znaczną poprawę właściwości adsorpcyjnych w wypadku węgla H-MC w stosunku do węgla CMK-3. Maksymalna zdolność adsorpcyjna węgla H-MC (224 mg/g) była około 2,5-krotnie większa w porównaniu z węglem CMK-3 (86 mg/g) (rys. 4) [15].

Badania adsorpcji oranżu metylowego na uporządkowanych węglach mezoporowatych z cząstkami magnetycznego nikiel (Ni-OMC) wykazały, że materiały te charakteryzowały się właściwościami ferromagnetycznymi, co było istotne w przebiegu adsorpcji tego barwnika ($107,1 \text{ mg/g}$) oraz w dalszej ich separacji [16]. W podobnych badaniach wykazano, że ilość zaadsorbowanego oranżu metylowego za pomocą Ni-OMC była znacznie większa i wynosiła 498 mg/g [17]. Z kolei w badaniach adsorpcji fluoresceiny z roztworu wodnego na uporządkowanym węglu mezoporowatym z nanocząstkami żelaza (Mag-OMC) stwierdzono, że kompozyt ten również wykazywał właściwości



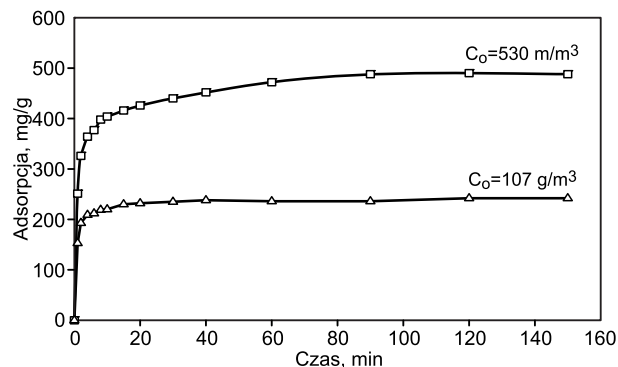
Rys. 4. Adsorpcja czerwieni reaktywnej X-3B na materiałach węglowych (CMK-3 i H-MC) [15]

Fig. 4. Adsorption of reactive red X-3B on carbon materials (CMK-3 and H-MC) [15]

magnetyczne. Analizowany barwnik był szybko i skutecznie adsorbowany przez ten węgiel (350 mg/g). Wykonano również magnetyczną separację węgla z zaadsorbowanym barwnikiem [18].

Fenol i jego pochodne

Węgle mezoporowate zyskują coraz większe zainteresowanie jako adsorbenty do oczyszczania wody z fenolu i jego pochodnych [19]. W badaniach adsorpcji bisfenolu A z roztworu wodnego na uporządkowanym węglu mezoporowatym CMK-3 i porównawczo na komercyjnym pylistym węglu aktywnym wykazano, że na adsorpcję bisfenolu A istotny wpływ miały temperatura oraz $\text{pH} > 13$ [20]. Wraz ze wzrostem temperatury (10°C , 15°C , 25°C) zdolność adsorpcyjna węgla malała (276 mg/g , 266 mg/g i 263 mg/g , odpowiednio). Doświadczenia pokazały, że bisfenol A został skutecznie usunięty za pomocą węgla CMK-3 oraz że węgiel ten okazał się skuteczniejszy niż komercyjny węgiel pylisty. Z kolei w innych badaniach adsorpcji na mezoporowatym węglu CMK-3 stwierdzono, że był on skuteczny w usuwaniu etoksylowanego nonylofenolu (NPE) z roztworu wodnego [21]. Eksperymenty wykazały znaczną zdolność adsorpcyjną NPE, która malała wraz ze wzrostem temperatury – 15°C , 25°C i 35°C – i wynosiła odpowiednio 923 mg/g , 720 mg/g i 463 mg/g . Szybkość adsorpcji NPE zależała od jego początkowego stężenia (rys. 5), przy czym duże początkowe stężenie NPE lub pewna początkowa ilość zaadsorbowanego NPE prowadziły do zmniejszenia szybkości adsorpcji z powodu dłuższego czasu dyfuzji oraz częściowego blokowania mezoporowatych kanałów węgla CMK-3 [22].



Rys. 5. Wpływ początkowego stężenia etoksylowanego nonylofenolu (NPE) na jego adsorpcję na materiale węglowym CMK-3 [21]

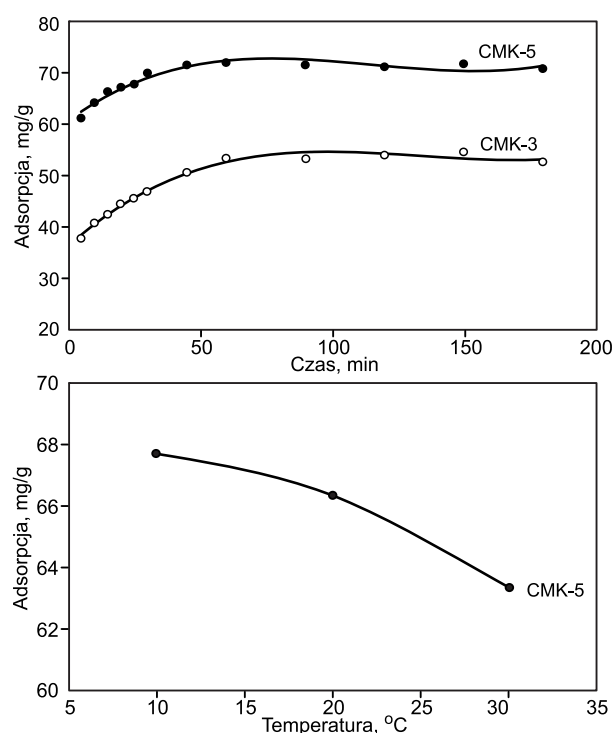
Fig. 5. Effect of initial nonylphenol ethoxyolate (NPE) concentration on its adsorption on carbon material CMK-3 [21]

Badania właściwości adsorpcyjnych, uporządkowanego węgla mezoporowatego o strukturze plastra miodu w stosunku do chlorofenolu wykazały dużą skuteczność adsorpcji w zakresie małych stężeń [22]. Analiza możliwości ponownego użycia tego węgla wykazała możliwość jego ponad 200-krotnej regeneracji, bez wyraźnych strat zarówno węgla, jak i jego zdolności adsorpcyjnej. Przeprowadzone badania adsorpcji fenolu z wody w temperaturze 20 °C wykazały, że węgle mezoporowate mogą być używane jako skuteczne adsorbenty tej grupy związków z fazy ciekłej [23]. Uporządkowane węgle mezoporowate z magnetycznymi nanocząstkami żelaza (Fe-CMK-3) zostały zastosowane do adsorpcji 4-chlorofenolu [24]. Wykazano, że węgiel ten ma znakomite właściwości adsorpcyjne oraz odznacza się niezwykle dużą szybkością adsorpcji. Materiały tego typu są bardzo przydatne z uwagi na ich łatwy proces separacji magnetycznej. Tego typu adsorbenty mogą być wykorzystywane do usuwania dużych ilości zanieczyszczeń organicznych z roztworów wodnych.

Inne zanieczyszczenia organiczne

Spośród innych zanieczyszczeń organicznych występujących w środowisku wodnym można wymienić wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), farmaceutyki, substancje powierzchniowo czynne, rozpuszczalniki organiczne, ftalany, estry, pestycydy itp. W badaniach zdolności adsorpcyjnej uporządkowanego węgla mezoporowatego zawierającego grupy karboksylowe (C-OMC) w stosunku do naftalenu, 1-naftolu oraz 1,5-diaminonaftalenu wykazano, że kwasowe grupy funkcyjne obecne na powierzchni węgla odgrywały ważną rolę w procesie adsorpcji WWA [25]. Zdolność adsorpcyjna węgla C-OMC w stosunku do badanych WWA była następująca: naftalen – 1,6 mmol/g, 1-naftol – 2,3 mmol/g oraz 1,5-diaminonaftalen – 2,8 mmol/g. Otrzymane wyniki porównano z adsorpcją na uporządkowanym węglu mezoporowatym niezawierającym grup karboksylowych na swojej powierzchni, która wynosiła w przypadku naftalenu 1,36 mmol/g, 1-naftolu – 1,25 mmol/g i 1,5-diaminonaftalenu – 1,1 mmol/g. Jak wynika z tego porównania, adsorpcja WWA na węglu niemodyfikowanym była znacznie mniejsza. W badaniach właściwości adsorpcyjnych uporządkowanych mezoporowatych kompozytów węglowych zawierających żelazo wykazano dużą skuteczność tych adsorbentów w usuwaniu nitrobenzenu z roztworów wodnych [26]. Maksymalna adsorpcja p-chloroaniliny na uporządkowanym węglu mezoporowatym wynosiła 178 mg/g [22], a ponad 200-krotnie powtarzany proces adsorpcji i desorpcji tej substancji nie spowodował znaczącego ubytku zdolności adsorpcyjnej węgla oraz straty jego masy. W ostatnio przeprowadzonych badaniach właściwości adsorpcyjnych dwóch mezoporowatych węgli (CMK-5 i CMK-3) w stosunku do dibenzotiofenu (DBT) wykazano, że węgiel CMK-5 miał dwukrotnie większą zdolność adsorpcyjną w porównaniu z węglem CMK-3 (odpowiednio 125 mg/g i 62,5 mg/g) w optymalnych warunkach, tj. dawka adsorbentu 2 g/dm³, czas kontaktu 1 h, temperatura 25 °C (rys. 6) [27].

Większą zdolność adsorpcyjną węgla CMK-5 w porównaniu z węglem CMK-3 przypisywano jego unikalnej strukturze składającej się z wysoce uporządkowanych mezoporowatych kanałów oraz bimodalnego systemu porów. Węgle CMK-5 i CMK-3 mogą być łatwo regenerowane w wyniku przemywania toluenem. Po pierwszym dwóch cyklach regeneracji węgla CMK-5 uzyskano



Rys. 6. Adsorpcja dibenzotiofenu (DBT) na materiałach węglowych (CMK-3 i CMK-5) [27]

Fig. 6. Adsorption of dibenzothiophene (DBT) on carbon materials (CMK-3 and CMK-5) [27]

86,3% i 86,0% wyjściowej zdolności adsorpcyjnej węgla. W przypadku węgla CMK-3 po regeneracji wartości te były następujące 76,9% i 75,2%. W badaniach adsorpcji dibenzotiofenu wykorzystano także węgle mezoporowate o właściwościach magnetycznych z nanocząstkami niklu (Ni-CMK-3) [28]. Maksymalna zdolność adsorpcyjna tych materiałów wynosiła 62 mg/g w optymalnych warunkach, tj. 20% wag. zawartości Ni w materiale kompozytowym, dawka adsorbentu 5 g/dm³, czas kontaktu 1 h, temperatura 40 °C. W związku z tym, że węgiel Ni-CMK-3 ma właściwości ferromagnetyczne, może być odseparowany z roztworu za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego. Przeprowadzona regeneracja tego adsorbentu za pomocą ekstrakcji toluenem pozwoliła na uzyskanie w trzech cyklach regeneracji 97%, 94% i 80% jego początkowej zdolności adsorpcyjnej.

Podsumowanie

Uporządkowane węgle mezoporowate zyskują coraz większe znaczenie w procesach oczyszczania roztworów wodnych z zanieczyszczeń organicznych. Węgle te mają dużą pojemność adsorpcyjną, a ponadto charakteryzują się dużą szybkością adsorpcji wynikającą z ułatwionej dyfuzji do wnętrza porów. Czynniki te są odpowiedzialne za bardzo dobre właściwości uporządkowanych węgli mezoporowatych do usuwania dużych cząsteczek, takich jak np. barwniki organiczne. Ważnymi czynnikami odpowiedzialnymi za adsorpcję różnych związków organicznych z roztworów wodnych za pomocą węgli mezoporowatych są również ich duża powierzchnia właściwa oraz duża objętość mezoporów. Istnieje też możliwość wytwarzania na powierzchni tych materiałów, w wyniku procesów ich modyfikacji, specyficznych miejsc aktywnych, do których mogą być przyłączane cząsteczki usuwanych zanieczyszczeń. W związku z tym uporządkowane mezoporowate materiały węglowe

z funkcjonalnymi grupami mogą pełnić rolę zaawansowanych materiałów do oczyszczania wody. Materiały te, po adsorpcji szkodliwych substancji, mogą być regenerowane za pomocą ekstrakcji, np. etanolem, toluenem lub przez termiczne wygrzewanie. Zachowują przy tym w dużym stopniu pojemność adsorpcyjną materiału wyjściowego. Uporządkowane węgle mezoporowate z nanocząstkami niklu lub żelaza są bardzo interesującymi materiałami adsorpcyjnymi z uwagi na ich właściwości magnetyczne, dzięki którym możliwa jest ich łatwa separacja z oczyszczanego roztworu. Wydaje się, że uporządkowane mezoporowate materiały węglowe staną się adsorbentami następnej generacji. Być może zastąpią one klasyczne węgle aktywne stosowane do adsorpcyjnego oczyszczania wody.

Dr K. Jedynak – projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2012/05/N/ST5/00246.

Prof. J. Choma – projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2011/03/N/ST5/04444.

LITERATURA

- J. CHOMA, A. ŻUBROWSKA, J. GÓRKA, M. JARONIEC: Adsorption properties of phenolic resin-based mesoporous carbons obtained by using mixed templates of Pluronic F127 and Brij 58 or Brij 78 polymers. *Adsorption* 2010, Vol. 16, pp. 377–383.
- C. LIANG, Z. LI, S. DAI: Mesoporous carbon materials: Synthesis and modification. *Angewandte Chemie. International Edition* 2008, Vol. 47, pp. 3696–3717.
- J. CHOMA, M. JARONIEC, A. ZAWIŚLAK: Mezoporowate węgle: Synteza i właściwości. *Wiadomości Chemiczne* 2008, vol. 61, nr 5–6, ss. 373–402.
- J. GÓRKA, M. JARONIEC, J. CHOMA: Fizykochemiczne właściwości mezoporowatych węgla z nanocząstkami zawierającymi żelazo i nikiel otrzymanych metodą miękkiego odwzorowania (Physicochemical properties of soft-templated mesoporous carbons with iron- and nickel-containing nanoparticles). *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 2, ss. 3–9.
- R. RYOO, S.H. JOO, S. JUN: Synthesis of highly ordered carbon molecular sieves via template-mediated structural transformation. *The Journal of Physical Chemistry B* 1999, Vol. 103, pp. 7743–7746.
- Y. MENG, D. GU, F.Q. ZHANG, Y.F. SHI, L. CHENG, D. FENG, Z.X. WU, Z.X. CHEN, Y. WAN, A. STEIN, D.Y. ZHAO: A family of highly ordered mesoporous polymer resin and carbon structures from organic-organic self-assembly. *Chemistry of Materials* 2006, Vol. 18, pp. 4447–4464.
- C. LIU, L. LI, H. SONG, X. CHEN: Facile synthesis of ordered mesoporous carbons from F108/resorcinol–formaldehyde composites obtained in basic media. *Chemical Communications* 2007, Vol. 7, pp. 757–759.
- C. LIANG, S. DAI: Synthesis of mesoporous carbon materials via enhanced hydrogen-bonding interaction. *Journal of the American Chemical Society* 2006, Vol. 128, pp. 5316–5317.
- J. CHOMA: Zastosowanie nanoporowatych materiałów do oczyszczania wody (Application of nanoporous materials in water treatment). *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 15–22.
- X. ZHUANG, Y. WAN, C. FENG, Y. SHEN, D. ZHAO: Highly efficient adsorption of bulky dye molecules in wastewater on ordered mesoporous carbons. *Chemistry of Materials* 2009, Vol. 21, pp. 706–716.
- X. YUAN, S.-P. ZHUO, W. XING, H.-Y. CUI, X.-D. DAI, X.-M. LIU, Z.-F. YAN: Aqueous dye adsorption on ordered mesoporous carbons. *Journal of Colloid and Interface Science* 2007, Vol. 310, pp. 83–89.
- D.D. ASOUHIDOU, K.S. TRIANTATYLLIDIS, N.K. LAZARIDIS, K.A. MATIS, S.-S. KIM, T.J. PINNAVAIA: Sorption of reactive dyes from aqueous solutions by ordered hexagonal and disordered mesoporous carbons. *Microporous and Mesoporous Materials* 2009, Vol. 117, pp. 257–267.
- Y. TIAN, P. LIU, X. WANG, H. LIN: Adsorption of malachite green from aqueous solutions onto ordered mesoporous carbons. *Chemical Engineering Journal* 2011, Vol. 171, pp. 1263–1269.
- G.-P. HAO, W.-C. LI, S. WANG, S. ZHANG, A.-H. LU: Tubular structured ordered mesoporous carbon as an efficient sorbent for the removal of dyes from aqueous solutions. *Carbon* 2010, Vol. 48, pp. 3330–3339.
- X. DONG, J. FU, X. XIONG, CH. CHEN: Preparation of hydrophilic mesoporous carbon and its application in dye adsorption. *Materials Letters* 2011, Vol. 65, pp. 2486–2488.
- Y. TIAN, X. WANG, Y. PAN: Simple synthesis of Ni-containing ordered mesoporous carbons and their adsorption/desorption of methylene orange. *Journal of Hazardous Materials* 2012, Vol. 213–214, pp. 361–368.
- N. LIU, L. YIN, L. ZHANG, CH. WANG, N. LUN, Y. QI, C. WANG: Ferromagnetic Ni decorated ordered mesoporous carbons as magnetically separable adsorbents for methyl orange. *Materials Chemistry and Physics* 2011, Vol. 131, pp. 52–59.
- B.CH. KIM, J.LEE, W. UM, J. KIM, J. JOO, J.H. LEE, J.H. KWAK, J.H. KIM, CH. LEE, H. LEE, R.S. ADDLEMAN, T. HYEON, M.B. GU, J. KIM: Magnetic mesoporous materials for removal of environmental wastes. *Journal of Hazardous Materials* 2011, Vol. 192, pp. 1140–1147.
- D.V. SRIHARI-SHUTOSH: Adsorption of phenol from aqueous media by an agro-waste (hemidesmus indicus) based activated carbon. *Applied Ecology and Environmental Research* 2011, Vol. 7, No. 1, pp. 13–23.
- Q. SUI, J. HUANG, Y. LIU, X. CHANG, G. JI, S. DENG, T. XIE, G. YU: Rapid removal of bisphenol A on highly ordered mesoporous carbon. *Journal of Environmental Sciences* 2011, Vol. 23, No. 2, pp. 177–182.
- G. LIU, S. ZHENG, D.YIN, Z. XU, J. FAN, F. JIANG: Adsorption of aqueous alkylphenol ethoxylate surfactants by mesoporous carbon CMK-3. *Journal of Colloid and Interface Science* 2006, Vol. 302, pp. 47–53.
- Y. WAN, X. CUI, Z. WEN: Ordered mesoporous carbon coating on cordierite: Synthesis and application as an efficient adsorbent. *Journal of Hazardous Materials* 2011, Vol. 198, pp. 216–223.
- B. BABIĆ, M. KOKUNEŠOSKI, M. MILJKOVIĆ, B. MATOVIĆ, J. GULICOVSKI, M. STOJMENOVIĆ, D. BUĆEVAC: New mesoporous carbon materials synthesized by a templating procedure. *Ceramics International* 2013, Vol. 39, pp. 4035–4043.
- Y. CHI, W. GENG, L. ZHAO, X. YAN, Q. YUAN, N. LI, X. LI: Comprehensive study of mesoporous carbon functionalized with carboxylate groups and magnetic nanoparticles as a promising adsorbent. *Journal of Colloid and Interface Science* 2012, Vol. 369, pp. 366–372.
- M. ANBIA, S.E. MORADI: Adsorption of naphthalene-derived compounds from water by chemically oxidized nanoporous carbon. *Chemical Engineering Journal* 2009, Vol. 148, pp. 452–458.
- X. LING, J. LI, W. ZHU, Y. ZHU, X. SUN, J. SHEN, W. HAN, L. WANG: Synthesis of nanoscale zero-valent iron/ordered mesoporous carbon for adsorption and synergistic reduction of nitrobenzene. *Chemosphere* 2012, Vol. 87, pp. 655–660.
- N.F. NEJAD, E. SHAMS, M.K. AMINI, J.C. BENNETT: Ordered mesoporous carbon CMK-5 as a potential sorbent for fuel desulfurization: Application to the removal of dibenzothiophene and comparison with CMK-3. *Microporous and Mesoporous Materials* 2013, Vol. 168, pp. 239–246.
- N.F. NEJAD, E. SHAMS, M.K. AMINI, J.C. BENNETT: Synthesis of magnetic mesoporous carbon and its application for adsorption of dibenzothiophene. *Fuel Processing Technology* 2013, Vol. 106, pp. 376–384.

Jedynak, K., Choma, J. Application of Ordered Mesoporous Carbon Materials to Removal of Organic Pollutants from Water Solutions. *Ochrona Srodowiska* 2013, Vol. 35, No. 3, pp. 3–8.

Abstract: Adsorption processes involving ordered mesoporous carbons (OMCs) can be applied to removal of various organic substances from water solutions. These materials possess unique adsorption properties resulting from their large specific surface area and high pore volume. Furthermore, they exhibit uniform and accessible pores of desired sizes as well as demonstrate high thermal stability and chemical inertness. Their well-developed and active surface can be easily modified, allowing synthesis of adsorbents with desired properties. Ordered mesoporous carbon materials

with functional groups may serve as advanced materials for water treatment. These materials, following adsorption of harmful substances, may regenerate *via* extraction, *e.g.* with ethanol or toluene or *via* thermal treatment. Their initial adsorption capacity of a starting material remains mostly unchanged. Ordered mesoporous carbons containing nickel or iron nanoparticles are very interesting adsorption materials due to their magnetic properties that allow easy separation from the solution being purified. Ordered mesoporous carbon materials may become adsorbents of the next generation. They are likely to replace classic active carbons used for adsorption-based water treatment procedures.

Keywords: Carbon materials, synthesis, adsorption properties, water treatment, organics removal.