

Zastosowanie promieniowania mikrofalowego w technologii adsorpcyjnej

The use of microwave radiation in adsorption technology

Naświetlanie mikrofalowe jest atrakcyjną metodą konwersji energii elektromagnetycznej w energię cieplną. Dzięki zdolności mikrofal do bezpośredniego, objętościowego ogrzewania materiałów można znacznie przyspieszyć przebieg wielu procesów oraz wpływać na właściwości obrabianych materiałów. Zaprezentowano przykłady wykorzystania energii mikrofal w technologii adsorpcyjnej dla preparatyki, modyfikacji właściwości i opracowania niekonwencjonalnych metod regeneracji adsorbentów.

A review with 30 refs. covering microwave-assisted preparation of carbon and mineral adsorbents, modification of surface properties of carbonaceous adsorbents and regeneration of adsorbents.

Mikrofałe stanowią część widma elektromagnetycznego o długości fali od 1 mm do 1 m, co odpowiada częstotliwości 300–300 GHz. Znaczną część promieniowania elektromagnetycznego w tym zakresie wykorzystuje się w telefonii komórkowej, radarach, łączności satelitarnej, dlatego też dla celów naukowych, medycznych i przemysłowych wydzielono następujące częstotliwości 0,434, 0,915, 2,450, 5,800 oraz 24,12 GHz. Generatory mikrofal w Europie pracują najczęściej na częstotliwości 2,450 GHz, w USA i Wielkiej Brytanii przy 0,915 GHz.

Energia promieniowania mikrofalowego jest rozpraszana w materiałach wg trzech różnych mechanizmów: jako straty magnetyczne w materiałach ferromagnetycznych, straty omowe w materiałach przewodzących oraz jako straty elektryczne spowodowane niejednorodnością elektromagnetyczną jonów lub cząsteczek z momentem dipolowym. Pozwala to na wyróżnienie trzech typów

materiałów różnie zachowujących się w polu mikrofalowym, co schematycznie przedstawiono na rys. 1.

Z praktycznego punktu widzenia szczególne znaczenie mają materiały całkowicie lub częściowo pochłaniające promieniowanie mikrofalowe, dzięki czemu możliwe jest ogrzanie ciała stałego lub cieczy. Ogrzewanie mikrofalowe wykazuje wiele zalet w porównaniu z ogrzewaniem konwencjonalnym. Jest ono bezkontaktowe, szybkie, selektywne i zachodzące w całej objętości. Energia mikrofalowa indukuje ruch cząsteczkowy przez rotację dipoli i migrację jonów.

Efektywność ogrzewania mikrofalowego zależy od dipolowego czasu relaksacji, przewodnictwa jonowego i objętości próbki. W przypadku ogrzewania mikrofalowego należy raczej mówić o konwersji energii elektromagnetycznej w energię cieplną niż o przenoszeniu ciepła wg klasycznych mechanizmów konwekcji, przewodzenia i promieniowania. Ta zasadnicza różnica od dawna jest wykorzystywana w obróbce żywności i pozwala na skrócenie czasu procesu oraz oszczędności energii. Równocześnie otwiera ona pole do poszukiwań nowych możliwości wykorzystania promieniowania mikrofalowego w procesach fizycznych, fizykochemicznych oraz reakcjach chemicznych¹⁾. Mikrofałe zastosowano już w wielu dziedzinach chemii i technologii, jak np. procesy obróbki minerałów²⁾, chemia polimerów³⁾, chemia fullerenów⁴⁾, chemia węgla^{5, 6)} oraz przygotowanie próbek dla celów analitycznych⁷⁾.

Celem artykułu jest przegląd możliwości potencjalnego zastosowania promieniowania mikrofalowego w chemii fizycznej i technologii adsorbentów.

Preparatyka adsorbentów

Adsorbenty węglowe otrzymuje się z różnego rodzaju surowców pochodzenia organicznego, takich jak drewno, torf, węgiel brunatny i kamienny, produkty karbo- i petrochemiczne, polimery organiczne, pestki i łupiny niektórych owoców oraz różnego typu odpady pochodzenia organicznego⁸⁾. Tradycyjnie węgiel



Mgr Małgorzata RUMIAN w roku 2000 ukończyła Wydział Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Jest laureatką IV edycji Ogólnopolskiego Konkursu na Najlepszych Absolwentów Wyższych Uczelni w dziedzinie Ochrony Środowiska. Pracuje jako asystent na Wydziale Paliw i Energii Akademii Górniczo-Hutniczej. Specjalność – chemia środowiska, technologia adsorpcyjna.



Prof. dr hab. Leszek CZEPIRSKI w roku 1972 ukończył Wydział Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Jest kierownikiem Zakładu Fizykochemii Zjawisk Międzyfazowych Wydziału Paliw i Energii Akademii Górniczo-Hutniczej. Specjalność – chemia fizyczna i teoretyczna, adsorpcja.

* Autor do korespondencji:

Zakład Fizykochemii Zjawisk Międzyfazowych, Wydział Paliw i Energii, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (0-12) 617-21-41, fax: (0-12) 617-20-66, e-mail: czepir@uci.agh.edu.pl

TYP MATERIAŁU	ODDZIAŁYWANIE Z MIKROFALAMI	ZASTOSOWANIE
 IZOLATOR np. teflon	Całkowicie przepuszczalny; nie ogrzewa się	Naczynia na naświetlane próbki
 PRZEWODNIK np. metale	Odbija mikrofałe od powierzchni; nie ogrzewa się	Materiał przewodzący, falowody
 ABSORBENT (materiały dielektryczne, np. woda)	Częściowo lub całkowicie absorbujący; ogrzewa się	

Rys. 1. Oddziaływanie mikrofal z materiałem

Fig. 1. Interaction of microwaves with materials

aktywny uzyskuje się przez utlenianie w fazie gazowej (metoda parowo-gazowa) w dwuetapowym procesie pirolizy (karbonizacja w temp. ok. 800°C) i aktywacji (zgazowanie czynnikami utleniającymi, takimi jak CO₂, para wodna). Etap aktywacji wymaga często długiego czasu, by wytworzyć dobrze rozwiniętą strukturę porowatą, co oczywiście pociąga za sobą wzrost kosztów procesowych. Ponadto podczas konwencjonalnego ogrzewania powstaje znaczny gradient temperatury między gorącą powierzchnią ziaren karbonizatu a ich zimnym wnętrzem, co utrudnia efektywne usuwanie substancji lotnych wpływając tym samym na jakość węgla aktywnego.

Guo i Lua⁹⁾ zaproponowali metodę preparatyki węgla aktywnego z karbonizatów pestek palmy olejowej poprzez reakcję z CO₂ indukowaną mikrofalami. Wyniki ich badań pokazały, że jest możliwe otrzymanie węgla aktywnego o dużej gęstości i dominującej mikroporowatości. Do najważniejszych parametrów procesowych, wpływających na charakterystykę struktury porowatej, należy zaliczyć moc promieniowania mikrofalowego, czas naświetlania oraz szybkość przepływu ditlenku węgla. Autorzy stwierdzili, że minimalna moc mikrofal potrzebna do wywołania widocznych zmian we właściwościach węgla aktywnego to 450 W, a wydłużenie czasu naświetlania do 1 h zwiększa wielkość powierzchni właściwej nawet o 30%. Maksymalną powierzchnię właściwą 412,5 m²/g otrzymano przy czasie naświetlania 1 h z mocą 750 W, gdzie w temp. ok. 673 K uzyskano energetycznie jednorodną powierzchnię. W pracy tej wykazano również, że dodatek pylistego CuO (receptor promieniowania mikrofalowego) do karbonizatu zwiększał wielkość powierzchni właściwej przy krótszym czasie naświetlania, ale równocześnie powodował zwiększenie mezoporowatości. Autorzy sugerują przydatność uzyskanego w ten sposób węgla aktywnego jako adsorbentu z fazy gazowej lub półproduktu do otrzymywania węglowego sita cząsteczkowego po dalszej modyfikacji przez osadzanie pierwiastkowego węgla.

Preparatyką adsorbentów węglowych z odpadów biomasy zajęli się również Bratek i współpracownicy^{10, 11)}. Z powodzeniem wykorzystali energię mikrofalową w procesie karbonizacji i aktywacji kolb kukurydzy, jak również karbonizowali zużytą żywicę jonowymienną w reaktorze mikrofalowym o mocy 650 W. Zaobserwowano, że liczba jodowa otrzymanych karbonizatów i aktywatów rośnie z czasem ogrzewania mikrofalami, a mikrowytrzymałość maleje.

Pierwsze informacje o zastosowaniu promieniowania mikrofalowego w syntezie materiałów nieorganicznych pojawiły się w latach osiemdziesiątych ub. wieku, gdy Chu i Dwyer¹²⁾ z grupy Mobil Oil opatentowali technikę krystalizacji zeolitów różnego typu (A, Y, ZSM-5) w polu mikrofalowym. Zaproponowane metody preparatyki syntetycznych adsorbentów mineralnych wiązały się jednak z pewnymi ograniczeniami. Konieczne było wielogodzinne starzenie mieszaniny reakcyjnej poprzedzające naświetlanie mikrofalowe i odpowiednie mieszanie; w przeciwnym razie produkt końcowy zanieczyszczony był fazami amorficznymi. Bonaccorsi i Proverbio¹³⁾ opracowali metodę otrzymywania czystego zeolitu A z żelu zawierającego tlenki sodu, glinu i krzemu

poddawanego naświetlaniu mikrofalami pod ciśnieniem atmosferycznym, bez wstępnej obróbki. W porównaniu z konwencjonalną syntezą hydrotermalną metoda wykorzystująca mikrofałe jest szybsza (1 h), a zredukowanie zawartości wody w żelu pozwala na otrzymanie produktu końcowego pozbawionego praktycznie zanieczyszczeń. Pilter i współpracownicy¹⁴⁾ przebadali wpływ promieniowania mikrofalowego na strukturę krystaliczną zeolitu NaA. W odróżnieniu od konwencjonalnego ogrzewania, podczas którego obserwuje się tworzenie przejściowych, niestabilnych faz, struktury krystaliczne powstające pod wpływem mikrofal odznaczały się wysoką stabilnością.

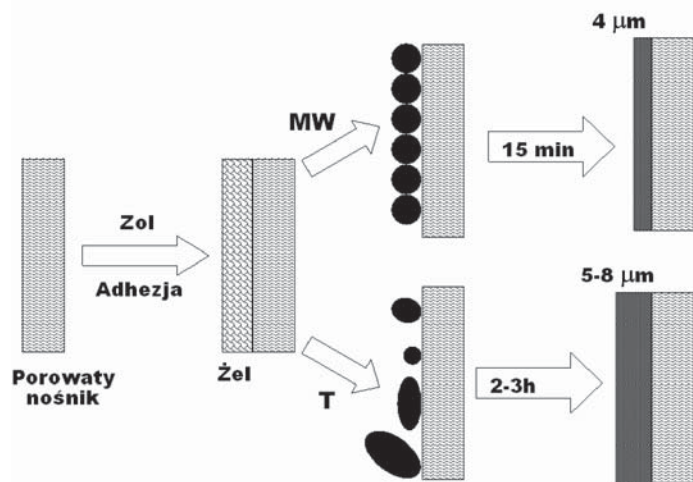
Jhung i współpracownicy¹⁵⁾ zastosowali promieniowanie mikrofalowe w syntezie sit cząsteczkowych typu SAPO (*silicoaluminophosphate*), wykazując, że ten typ syntezy może stanowić efektywną metodę kontroli właściwości morfologicznych materiałów mikroporowatych. Park i współpracownicy¹⁶⁾ przeprowadzili syntezę mezoporowatych materiałów typu MCM-41, wykazując, że w polu mikrofalowym możliwe jest skrócenie czasu krystalizacji nawet poniżej 1 h w umiarkowanych warunkach temperaturowych (373–393 K). Równocześnie dodatek do mieszaniny reakcyjnej cieczy o wysokiej stałej dielektrycznej (glikol etylenowy) pozwala uzyskać produkt o wysokim stopniu krystaliczności oraz jednorodnym kształcie i rozmiarach cząstek. Van Bekkum i współpracownicy¹⁷⁾ stwierdzili, że synteza zeolitu Y w polu mikrofalowym pozwala na uzyskanie produktów o znacznie szerszym zakresie modułu krzemowego (Si/Al) niż w syntezie hydrotermalnej.

Przytoczone przykłady wskazują, że zastosowanie mikrofal znacząco rozszerza możliwości syntezy zeolitów w porównaniu z klasyczną syntezą hydrotermalną. Oprócz zapewnienia równomiernego, objętościowego ogrzewania mieszaniny reakcyjnej, pole mikrofalowe sprzyja tworzeniu się jednorodnych zarodków krystalizacji, skracając czas procesu, a w obecności składników o dobrych właściwościach dielektrycznych może wpłynąć na mechanizm reakcji ukierunkowując ją na określoną fazę zeolitową. Te zalety syntezy w polu mikrofalowym zostały wykorzystane przy otrzymywaniu membranowych sit cząsteczkowych z naniesionymi kryształami zeolitu. Membrany tego typu znajdują zastosowanie w katalizie, rozdzielaniu mieszanin gazowych, jako elektrody i czujniki, a w ich preparatyce szczególnie ważną jest możliwość uzyskania w krótkim czasie stabilnych i zwartych struktur o kontrolowanej grubości. Zastosowanie energii mikrofalowej w preparatyce membran zeolitowych pozwoliło na spełnienie powyższych wymagań.

W pracach Hana i współpracownicy¹⁸⁾ oraz Xu i współpracownicy¹⁹⁾ wykazano możliwość znacznego skrócenia czasu reakcji w porównaniu z konwencjonalną metodą ogrzewania i otrzymania drobnych kryształów zeolitu o jednolitych rozmiarach, co było korzystne dla formowania zwartych i stabilnych membran. Ich grubość mogła być łatwo kontrolowana przez zmianę ilości mieszaniny reakcyjnej. Schematyczne porównanie syntezy mikrofalowej z konwencjonalną przedstawiono na rys. 2.

Analogiczne trudności jak w przypadku syntezy membran zeolitowych pojawiają się podczas otrzymywania sorbentów i katalizatorów z substancją aktywną osadzoną na nośniku mineralnym. Tradycyjnie uzyskuje się je np. metodą termicznej dyspersji przez długotrwałe ogrzewanie mieszaniny nośnika i substancji aktywnej przy względnie wysokiej temperaturze. Główną wadą tej metody jest to, że nie zapewnia ona równomiernego rozproszenia substancji aktywnej, szczególnie w przypadku związków o wysokiej temperaturze topnienia, jak np. tlenki metali. Ta przeszkoda może zostać wyeliminowana dzięki zastosowaniu promieniowania mikrofalowego.

Deng i Lin²⁰⁾ zaproponowali wspomaganą energią mikrofalową proces termicznej dyspersji CuO i CuCl w strukturze mikroporowatej dealuminowanego zeolitu typu Y. Zaobserwowano, że temperatura i czas wymagane do preparowania sorbentów z naniesioną warstwą aktywną były znacznie mniejsze dla procesu wykorzystującego energię mikrofalową (423 K, 60 min) niż dla procesu tradycyjnego (1123 K, 36 h). Ponadto przy grzaniu konwencjo-



Rys. 2. Porównanie termicznej i mikrowalowej syntezy membrany zeolitowej

Fig. 2. Comparison of the thermal with the microwave-assisted synthesis of a zeolite membrane

nalnym nie udało się zdyspergować CuO na zeolicie nawet przy wydłużonym czasie grzania i wyższej temperaturze. Podczas grzania mikrowalowego z powodzeniem spreparowano sorbenty, które zastosować można do usuwania SO₂ z gazów odlotowych, jak też wydzielenia etenu z mieszanin gazowych.

Modyfikacja właściwości powierzchniowych adsorbentów węglowych

Modyfikację właściwości powierzchniowych adsorbentów węglowych można traktować jako atrakcyjny sposób otrzymywania adsorbentów dla procesów w fazie gazowej i ciekłej, katalizatorów i nośników katalizatorów. Znanych jest wiele sposobów modyfikacji w środowisku utleniającym, wynikiem których jest węgiel aktywny o różnej zawartości kwasowych, tlenowych grup powierzchniowych. Równocześnie można podać przykłady termicznej obróbki w atmosferze gazu obojętnego lub redukującego, prowadzące do otrzymania węgla aktywnego o małej zawartości tlenu, właściwościach zasadowych, silnie hydrofobowym charakterze i podwyższonej odporności na starzenie. Zazwyczaj obróbkę termiczną prowadzi się w temperaturze powyżej 1073 K przez 1–2 h.

Aby efektywnie spreparować węgiel aktywny o charakterze zasadowym, z małą zawartością powierzchniowych grup tlenowych, w możliwie jak najkrótszym czasie i z najniższym zużyciem inertnego gazu, Menendez i współpracownicy²¹⁾ zastosowali w swojej pracy piec mikrowalowy do obróbki węgla aktywnego o zróżnicowanym charakterze powierzchni. Zaobserwowano, że już 1,5 min naświetlania wystarczyło, aby dwukrotnie zredukować zawartość tlenu w węglu wyjściowym natomiast w przypadku węgla wstępnie utlenionego 15-krotne zmniejszenie zawartości tlenu uzyskano już po 5 min obróbki. Równocześnie w obu przypadkach stwierdzono wyraźny wzrost pH. Zauważono także, że węgiel poddany obróbce mikrowalowej ulega w pewnym stopniu ponownemu utlenieniu pod działaniem czynników atmosferycznych. Niemniej jednak, nawet po miesiącu starzenia i przebiegającej reoksydacji, węgiel po obróbce mikrowalowej jest bardziej zasadowy niż węgiel wyjściowy.

Podobne wyniki uzyskali Carrot i współpracownicy²²⁾ poddając obróbkę mikrowalowej aktywne włókna węglowe, wykazując, że obróbka mikrowalowa przez 5–30 min powoduje praktycznie całkowite usunięcie grup powierzchniowych, podczas gdy zachowywane są atomy tlenu i azotu związane w płaszczyznach pseudografitowych. Autorzy sugerują, że tego typu obróbka pozwoli na ukierunkowane otrzymywanie adsorbentów węglowych do adsorpcji kwaśnych gazów.

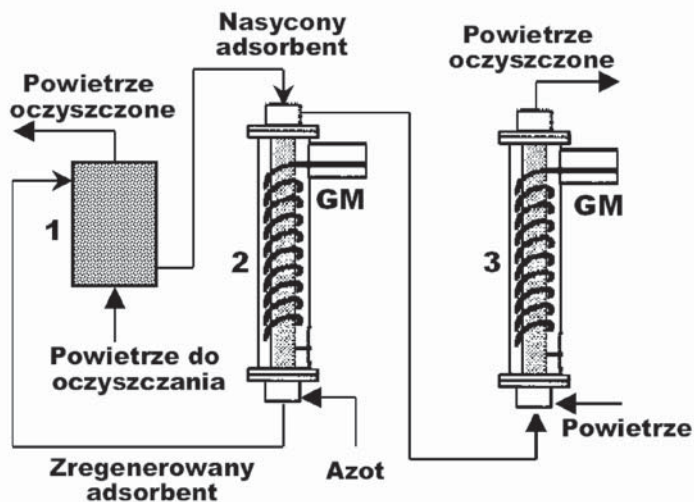
Mikrofale w regeneracji adsorbentów

W dowolnym procesie adsorpcyjno-desorpcyjnym etap desorpcji (regeneracji) jest istotną składową procesu. Po pierwsze, desorpcja daje możliwość odzyskania zaadsorbowanego składnika w tych przypadkach, gdy jest on użyteczny; po drugie, pozwala na przywrócenie sorbentowi pierwotnych właściwości sorpcyjnych i ponowne użycie go w następnych cyklach. Dąży się, więc do tego, by zregenerowany adsorbent miał właściwości sorpcyjne identyczne z wyjściowymi lub mocno do nich zbliżone. Konwencjonalne sposoby desorpcji sprowadzają się do wykorzystania ciepła z zewnętrznego źródła lub przepuszczania pary wodnej lub gorących gazów przez złożo nasyconego sorbentu, przy czym każda z metod posiada wiele istotnych ograniczeń^{23, 24)}. W tym świetle interesujące wydają się nowe, niekonwencjonalne metody desorpcji, zapewniające głównie skrócenie czasu ogrzewania złoża oraz umożliwienie realizacji procesu w warunkach bliskich izotermicznym.

Możliwość desorpcji w polu mikrowalowym silnie zależy od właściwości elektromagnetycznych adsorbentu i substancji zaadsorbowanej. Bathen²⁵⁾ wyróżnia dwa mechanizmy desorpcji mikrowalowej: selektywny i termiczny. Mechanizm selektywny przedstawiono na przykładzie desorpcji etanolu i toluenu zaadsorbowanych na dealuminowanym zeolicie typu DAY. Jest on adsorbentem całkowicie przepuszczalnym dla mikrofala a ich energia jest pochłaniana przez polarne cząsteczki etanolu, które ulegają desorpcji, podczas gdy niepolarne cząsteczki toluenu pozostają zaadsorbowane. Po całkowitym usunięciu substancji polarnych, energia mikrofal przestaje być pochłaniana, a temperatura układu spada. Daje to możliwość selektywnej desorpcji jednego z zaadsorbowanych składników. Dla adsorbentów pochłaniających promieniowanie mikrowalowe (np. krzemionka) energia mikrofal jest rozpraszana w adsorbencie, temperatura układu rośnie tak długo, jak długo jest on poddany działaniu promieniowania, a desorpcja upodabnia się do desorpcji termicznej. Porównanie metody desorpcji mikrowalowej i desorpcji termicznej przez płukanie złoża sorbentu gorącym gazem wykazuje blisko 3-krotnie wyższą efektywność pierwszej z metod, możliwość skrócenia czasu regeneracji oraz obniżenia kosztów eksploatacyjnych.

Kompleksową propozycję mikrowalowej regeneracji adsorbentu połączonej z katalitycznym utlenianiem desorbowanych substancji w reaktorze mikrowalowym zrealizowano w Zaawansowanym Parku Technologicznym w Montanie (USA)²⁶⁾. Instalacja służy do oczyszczania powietrza wentylacyjnego ze związków organicznych (złożo węgla aktywnego) oraz gazów kwaśnych i amoniaku (złożo zeolitu). Schemat blokowy procesu przedstawiono na rys. 3. Kolumna desorpcyjna pracuje w złożu ruchomym a zdesorbowane mikrowalami substancje transportowane są w strumieniu gazu obojętnego do reaktora utleniania z katalizatorem palladowo-platynowym osadzonym na węglu krzemu. Połączony efekt działania mikrofal i katalitycznego utleniania pozwala na całkowite utlenienie związków organicznych w relatywnie niskiej temperaturze. W przypadku, gdy produktem katalitycznego utleniania jest chlorowodór (oczyszczanie powietrza ze związków chloroorganicznych) strumień podaje się dodatkowo do kolumny z węglem aktywnym impregnowanym wodorotlenkiem sodu. Podczas badań testowych stwierdzono, że instalacja zapewnia wysoki stopień oczyszczenia powietrza (99%), a równocześnie regeneracja mikrowalowa skutecznie przywraca stosowanym adsorbentom ich pierwotne właściwości adsorpcyjne.

Podobne rozwiązanie zaproponowali Jou i Tai^{27, 28)} dla mikrowalowej regeneracji złoża granulowanego węgla aktywnego po adsorpcji benzenu, toluenu i ksyleny z fazy gazowej oraz fenolu z fazy ciekłej. Oprócz skutecznej desorpcji proces zapewnia także praktycznie całkowity rozkład zdesorbowanych substancji w znacznie krótszym czasie (1,5–4 min) w porównaniu z metodami obróbki biologicznej (16–24 h).



Rys. 3. Schemat procesu adsorpcyjnego oczyszczania powietrza wentylacyjnego z układem mikrofalowej regeneracji (1 – adsorber, 2 – regenerator, 3 – reaktor katalitycznego utleniania, GM – generator mikrofal)

Fig. 3. A flow diagram of adsorptive purification of ventilation air involving the microwave-assisted adsorbent regeneration system: 1 – adsorber, 2 – regenerator, 3 – catalytic oxidation reactor, GM – microwave generator

American Purification Inc. oferuje ciągły, realizowany w złożu fluidalnym i ruchomym proces PolyadTM, do odzyskiwania lotnych związków organicznych z powietrza^{8, 29)} oraz proces AmerisorbTM do usuwania związków organicznych ze ścieków²⁹⁾. W obu procesach stosuje się polimerowy adsorbent produkowany w oparciu o polimery styrenu i diwinylobenzenu. Adsorbent charakteryzuje się wysoką chłonnością sorpcyjną, nie wykazuje działania katalitycznego w stosunku do adsorbowanych substancji a jego struktura porowata umożliwia szybką i wielokrotną desorpcję bez pogorszenia właściwości adsorpcyjnych. W powyższych procesach promieniowanie mikrofalowe wykorzystywane jest jako źródło ogrzewania dielektrycznego w etapie desorpcji zaadsorbowanych składników. W procesie PolyadTM zastąpienie desorpcji przegrzaną parą wodną desorpcją mikrofalową pozwoliło na skrócenie czasu regeneracji, a pośrednio przyczyniło się do zmniejszenia ilości adsorbentu cyrkulującego w układzie.

Innym przykładem może być system reaktywacji węgla aktywnego z procesu fluidalnego płukania podczas wzbogacania rudy złota³⁰⁾. Węgiel aktywny po każdym cyklu adsorpcja/desorpcja cyankowych kompleksów złota jest poddawany obróbce kwasowej i wygrzewany w temp. 873–923 K w piecu obrotowym z ogrzewaniem zewnętrznym. Technologia mikrofalowa zastąpiła konwencjonalny cylindryczny piec obrotowy i okazała się bardziej energooszczędna, a zregenerowany węgiel wykazuje większą odporność na ścieranie, co warunkuje małe straty złota.

Podsumowanie

Naświetlanie mikrofalowe jest atrakcyjną metodą konwersji energii elektromagnetycznej w energię cieplną. Dzięki zdolności mikrofal do bezpośredniego, objętościowego ogrzewania materiałów można znacznie przyspieszyć przebieg wielu procesów oraz wpływać na właściwości obrabianych materiałów. Zalety obróbki mikrofalowej z powodzeniem mogą być wykorzystane w technologii adsorpcyjnej dla preparatyki, modyfikacji właściwości i opracowania niekonwencjonalnych metod regeneracji adsorbentów. W każdym z omówionych kierunków zastosowań mimo znaczącego postępu wciąż rysują się interesujące obszary badawcze.

W ramach realizowanego projektu badawczego Autorzy przewidują przeprowadzenie cyklu badań związanych z analizą możliwości wykorzystania promieniowania mikrofalowego w dwóch kierunkach badawczych. Jednym z nich jest modyfikacja właści-

wości powierzchniowych adsorbentów węglowych (węgiel aktywny, aktywne włókny węglowe) przez ich utlenianie w fazie ciekłej bez lub w obecności katalizatora utleniania. Oczekiwany efekt jest uzyskanie materiału węglowego o możliwie maksymalnie hydrofilowej powierzchni. Materiały takie mogą okazać się przydatne w procesach rozdzielania mieszanin gazowych lub adsorpcyjnego magazynowania paliw gazowych. Drugi kierunek to regeneracja adsorbentów pod wpływem promieniowania mikrofalowego dla ustalenia parametrów pracy układu mikrofalowego, pozwalających na osiągnięcie optymalnej efektywności desorpcji (regeneracji) adsorbentu. Przewiduje się, że badania w tym zakresie pozwolą na opracowanie kompleksowej metody opisu tej niekonwencjonalnej metody regeneracji.

Otrzymano: 25-11-2003

Praca wykonana w ramach projektu badawczego 3 T09C 040 27 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji.

LITERATURA

1. E.T. Thostenson, *Composites* 1990, **A 30**, 1055.
2. Kazi E. Haque, *Int. J. Miner. Process.* 1999, **57**, 1.
3. J. Berlan, *Radiat. Phys. Chem.* 1995, **45**, 581.
4. F. Langa, P. de la Cruz, P. Espildora, J.J. Garcia, M.C. Perez, A. de la Hoz, *Carbon* 2000, **38**, 1641.
5. P. Monsef-Mirzai, M. Ravindran, W.R. McWinnie, P. Burchill, *Fuel* 1995, **74**, 20.
6. S. Marland, B. Han, A. Merchant, N. Rowson, *Fuel* 2000, **79**, 1283.
7. J.L. Luque-Garcia, M.D. Luque de Castro, *Trends in Anal. Chem.* 2003, **22**, 90.
8. B. Buczek, L. Czepirski, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 2001, **17**, 29.
9. Jia Guo, Aik Chong Lua, *Carbon* 2000, **38**, 1985.
10. K. Bratek, W. Bratek, M. Kulażyński, M. Madej, *Mat. I Konf. "EkoChem-Tech '03 Zielona Chemia"*, Wrocław, 27–28 czerwca 2003, 81.
11. M. Kulażyński, K. Bratek, W. Bratek, S. Grodecki, *Mat. I Konf. "EkoChem-Tech '03 Zielona Chemia"*, Wrocław, 27–28 czerwca 2003, 80.
12. G. Roussy, P.J. Chenot, *J. Phys. Chem.* 1981, **85**, 2199.
13. L. Bonaccorsi, E. Proverbio, *J. Crystal Growth* 2003, **247**, 555.
14. Z. Piltzer, S. Szabo, M. Hasznos-Nezdei, P. Pallai-Varsanyi, *Microporous and Mesoporous Materials* 2000, **40**, 257.
15. Jhung Sung Hwa, Chang Jong-San, Jin Soo Hwang, Park Sang-Eon, *Microporous and Mesoporous Materials* 2003, **64**, 33.
16. Sang-Eon Park, Dae Sung Kim, Jong-San Chang, Woo Young Kim, *Catal. Today* 1998, **44**, 301.
17. U. Lohse, R. Bertram, K. Jancke, I. Kurzawski, B. Parlitz, E. Loeffler, E. Schreier, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 1995, **91**, 1163.
18. Yu Han, Hao Ma, Shilin lu, Feng-Shou Xiao, *Microporous and Mesoporous Materials* 1999, **30**, 321.
19. Xu Xiaochun, Yang Weishen, Liu Jie, Lin Liwu, *Separation and Purification Technol.* 2001, **25**, 241.
20. S.G. Deng, Y.S. Lin, *Chem. Eng. Sci.* 1997, **52**, 1563.
21. J.A. Menendez, E.M. Menendez, M.J. Iglesias, A. Garcia, J.J. Pis, *Carbon* 1999, **37**, 1115.
22. P.J.M. Carrott, J.M.V. Nabais, M.M.L. Ribeiro Carrott, J.A. Menendez, *Microporous and Mesoporous Materials* 2001, **47**, 243.
23. L. Czepirski, *Konf. Węgiel Aktywny w Ochronie Środowiska, Częstochowa* 1998, 10.
24. L. Czepirski, M. Kochel, M. Martyniak, *Chem. Inż. Ekol.* 2002, **9**, nr 4/5, 426.
25. D. Bathen, *Separation and Purification Technology* 2003, **33**, 163.
26. http://www.coe.montana.edu/me/faculty/george/NIST_webpage/CHA_link.html
27. Hua-Shan Tai, Chih-Ju G. Jou, *Chemosphere* 1999, **38**, 2667.
28. Chih-Ju G. Jou, H. S. Tai, *Chemosphere* 1998, **37**, 686.
29. AMERICAN PURIFICATION Inc. Product information.
30. <http://www.oceta.on.ca/profiles/oh/micro/microwave.html>