

Monika GWADERA, Krzysztof KUPIEC

e-mail: mgwadera@chemia.pk.edu.pl

Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Badanie przenoszenia ciepła i masy w chłodziarkach adsorpcyjnych

Wstęp

Działanie chłodziarek adsorpcyjnych opiera się na naprzemiennej adsorpcji i desorpcji czynnika chłodniczego w złożu adsorbentu i wykorzystaniu efektów cieplnych tych procesów. Główne elementy takiego układu chłodniczego to adsorber/desorber, skraplacz oraz parownik.

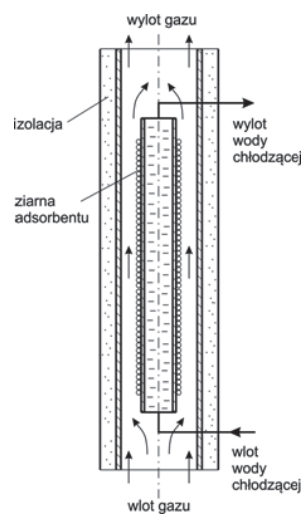
Chłodziarki adsorpcyjne mogą być stosowane do klimatyzacji pomieszczeń lub pojazdów lub do chłodzenia w celu konserwacji żywności, szczepionek i leków [Sharafian i Bahrami, 2014]. Ich podstawową zaletą jest to, że pozwalają na zmniejszenie zużycia energii pierwotnej w stosunku do tradycyjnych chłodziarek sprężarkowych [El Sharkawy i in., 2014]. Do ich zasilania można bowiem wykorzystać np. energię słoneczną lub geotermalną. Ponadto ich działanie opiera się na wykorzystaniu przyjaznych dla środowiska czynników chłodniczych np. wody. Prace dotyczące adsorpcyjnych układów chłodniczych mają zatem szczególne znaczenie w obliczu wysokich cen energii oraz rosnącego zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

Niskie wartości współczynnika efektywności energetycznej COP chłodziarek adsorpcyjnych nie pozwalają obecnie na ich komercyjne zastosowanie. Wartości te można zwiększyć poprzez intensyfikację przenoszenia ciepła i masy w adsorberze, stanowiącym podstawową część całego urządzenia. Transport ciepła pomiędzy ziarnami adsorbentu a rurkami wymiennika można zintensyfikować nanosząc adsorbent na powierzchnię rurek. Pozwala to na zmniejszenie oporu cieplnego. Badania podobnego typu są przedstawione w literaturze [Chang i in., 2005]. Wyniki podano w postaci wykresów bez interpretacji ilościowej mogącej prowadzić do uogólnień.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań doświadczalnych dotyczących przenoszenia masy i ciepła w obrębie adsorbentu chłodziarki adsorpcyjnej. Wyniki eksperymentów opracowano w oparciu o przedstawiony model matematyczny.

Badania doświadczalne

Instalacja



Rys. 1. Schemat adsorbentu

Badania prowadzono w układzie para wodna-silikażel. Ziarna adsorbentu nanoszono na zewnętrzną powierzchnię miedzianych rurek. Jako spoiwo wykorzystywano klej oparty na alkoholu poliwinylowym. Wykazano, że zastosowanie takiego spoiwa nie prowadzi do pogorszenia właściwości adsorpcyjnych silikażelu [Gwadera M., 2013].

Zastosowano rurkę o średnicy zewnętrznej 12 mm i grubości ścianki 1 mm. Rurka była umieszczona współosiowo w szklanej rurze o średnicy wewnętrznej 20 mm. Przez pierścieniową przestrzeń pomiędzy rurkami przepływało wilgotne powietrze. Wewnątrz rurki miedzianej płynęła woda, co zapewniało izotermiczne warunki procesu. Schemat tak zbudowanego adsorbentu zaprezentowano na rys. 1.

Opis badań

W trakcie badań rejestrowano szereg parametrów procesowych. Wilgotność i temperaturę powietrza na wlocie i wylocie z kolumny mierzono przy wykorzystaniu dwóch przetworników wilgotności względnej

i temperatury PC52 firmy *Michell Instruments*. Mierzono ponadto temperaturę ziaren silikażelu przy użyciu termopar miedź-konstantan (Cu-CuNi). Wszystkie wymienione wielkości rejestrowano rejestratorem elektronicznym MPI-D firmy *Metronic*. Natężenie przepływu powietrza ustalano regulatorem masowego przepływu model 4850 firmy *Brooks Instruments*. Próbkę adsorbentu regenerowano w suszarce komorowej firmy *Wamed* z elektronicznym regulatorem temperatury.

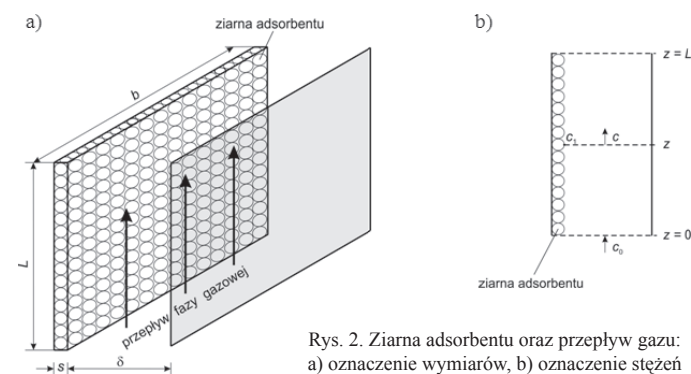
W badaniach zmieniano prędkość przepływu fazy gazowej oraz wielkość ziaren adsorbentu. Pomiary prowadzono dla frakcji o średnicach 0,8÷1,0 mm oraz 1,5÷2,0 mm. Stosowano natężenie przepływu powietrza równe 0,017 dm³/s i 0,083 dm³/s (w przeliczeniu na stan przed nawilżaniem w baterii płuczek). Wilgotność względna powietrza na wlocie była stała i wynosiła 85%.

Model przenoszenia masy

W adsorpcyjnych urządzeniach chłodniczych zasadniczym procesem jest przenoszenie ciepła. Strumień przenoszonego ciepła \dot{Q} jest bezpośrednio związany ze strumieniem pary wodnej przenoszonej pomiędzy fazami \dot{m}_w w procesie adsorpcyjno-desorpcyjnym:

$$\dot{Q} = (-\Delta H)\dot{m}_w \quad (1)$$

W przedstawionym poniżej modelu przenoszenia masy przyjęto, że adsorpcja pary wodnej zachodzi na adsorbencie stanowiącym ścianę płaską o wysokości L i szerokości b oraz grubości s (Rys. 2). Ścianę tę tworzą ziarna adsorbentu pokrywające rurę miedzianą. Ze względu na niewielką grubość warstwy adsorbentu w stosunku do średnicy rury możliwe jest założenie, że ściana jest płaska. Wzdłuż ściany kanałem o szerokości ściany b i grubości δ przepływa od dołu do góry gaz zawierający parę wodną. Masa adsorbentu wynosi m_s , jego gęstość ρ_s , natężenie przepływu gazu \dot{V} . Zatem prędkość średnia gazu wynosi $u = \dot{V}/(b\delta)$, natomiast grubość warstwy adsorbentu $s = m_s/(\rho_s bL)$.



Rys. 2. Ziarna adsorbentu oraz przepływ gazu: a) oznaczenie wymiarów, b) oznaczenie stężeń

Równanie bilansu masy adsorbentu w fazie gazowej ma postać:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{k_g}{\delta} (c - c_1) \quad (2)$$

gdzie: c_1 – stężenie na granicy faz.

Równanie bilansu masy adsorbentu w fazie stałej jest następujące:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{k_g}{\rho_s s} (c - c_1) \quad (3)$$

Kinetykę adsorpcji opisano równaniem LDF:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(q_1 - q) \quad (4)$$

zaś równowagę na granicy faz – równaniem *Freundlicha*:

$$q_1 = K_F \varphi_1^v \quad (5)$$

Związek pomiędzy stężeniem pary wodnej w fazie gazowej, a wilgotnością względną powietrza φ wynika z następujących zależności:

$$c = \frac{pM}{RT} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{p}{p_{sat}} \quad (7)$$

Warunki początkowe mają postać:

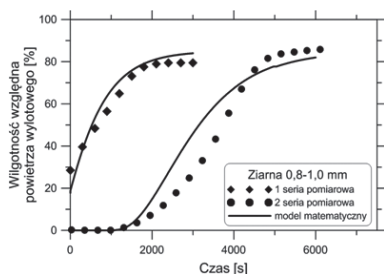
$$t = 0 \quad c = 0 \quad q = 0 \quad (8)$$

Warunek brzegowy wynika z utrzymywania wilgotności powietrza na wlocie na stałym poziomie:

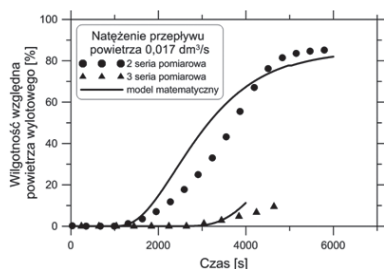
$$z = 0 \quad c = c_0 \quad (9)$$

Wyniki i ich interpretacja

Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rys. 3 i 4. Wykresy przedstawiają krzywe przebiecia czyli zależności pomiędzy zawartością pary wodnej w powietrzu na wylocie (charakteryzowanej jego wilgotnością względną), a czasem trwania procesu. Otrzymane krzywe mają charakterystyczny sigmoidalny kształt. Dla porównania przedstawiono na wykresach krzywe przebiecia wyznaczone na podstawie modelu matematycznego zaprezentowanego wyżej.



Rys. 3. Porównanie krzywych przebiecia dla 1 i 2 serii pomiarowej



Rys. 4. Porównanie krzywych przebiecia dla 2 i 3 serii pomiarowej

Równania modelu rozwiązano numerycznie metodą różnic skończonych. Do otrzymania wartości obliczeniowych stężeń wody na wylocie należało przyjąć wartości współczynników wnikania masy w fazie gazowej k_g oraz współczynnika k w równaniu LDF. Współczynniki wnikania masy określono na podstawie empirycznej zależności Wakao i Funazkri [1978]:

$$Sh = 2 + 1,1Re^{0,6}Sc^{0,33} \quad (10)$$

Współczynnik wnikania masy wyznaczono oddzielnie dla każdej z trzech serii pomiarowych. Wartości liczbowe parametrów procesu oraz wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Parametry procesu i wyniki obliczeń

Seria pomiarowa	1	2	3
Prędkość przepływu gazu [m/s]	0,064	0,318	0,064
Zakres rozmiarów ziaren adsorbentu [mm]	0,8-1,0	0,8-1,0	1,5-2,0
Masa adsorbentu [g]	3,34	3,22	5,96
Masa zaadsorbowanej wody [g]	0,87	0,85	1,70
Liczba Reynoldsa	3,6	17,9	7,0
Współczynnik wnikania masy [m/s]	0,112	0,203	0,072

Przyjęto wartość współczynnika w równaniu LDF $k = 0,0020 \text{ s}^{-1}$. Otrzymane przebiegi obliczeniowe przedstawiono na rys. 3 i 4 w postaci linii ciągłych. Jak widać, model poprawnie odzwierciedla przebiegi doświadczalne. Na przebieg krzywych przebiecia zasadniczy wpływ wywiera prędkość gazu. Jest to szczególnie widoczne przy porównaniu

1 i 2 serii pomiarowej; przy dużej prędkości gazu w serii 2 złoże zostało przebite natychmiast.

Wpływ wielkości ziaren na przebieg procesu jest trudny do ustalenia ze względu na fakt, że zmiana wielkości ziaren wiązała się bezpośrednio ze zmianą grubości warstwy adsorbentu naniesionej na rurkę.

Wnioski

Adsorpcja na ziarnach naniesionych na powierzchnię istotnie różni się od klasycznej adsorpcji w kolumnie.

Przy adsorpcji w kolumnie duże znaczenie ma rozmiar ziaren. Im mniejsze ziarna, tym adsorpcja w złożu zachodzi szybciej, ale jednocześnie zwiększają się opory przepływu gazu.

Przy adsorpcji na ziarnach naniesionych na powierzchnię większe znaczenie dla szybkości adsorpcji ma grubość warstwy utworzonej przez ziarna, niż wielkość tych ziaren. Dla oporów przepływu gazu wzdułu powierzchni na której naniesiony jest adsorbent, wielkość jego ziaren nie ma żadnego znaczenia.

Zgodność wyników otrzymanych przez rozwiązanie modelu matematycznego z wynikami przeprowadzonych doświadczeń jest zadowalająca.

Oznaczenia

- b – szerokość warstwy adsorbentu
- c – stężenie adsorbentu w fazie gazowej
- k_g – współczynnik wnikania masy
- L – wysokość warstwy adsorbentu
- M – masa molowa
- m_s – masa adsorbentu
- \dot{m}_w – strumień pary wodnej przenoszonej pomiędzy fazami
- p – ciśnienie cząstkowe
- p_{sat} – ciśnienie nasyconej pary wodnej
- q – stężenie adsorbentu w fazie stałej
- \dot{Q} – strumień przenoszonego ciepła
- R – stała gazowa
- s – grubość warstwy adsorbentu
- t – czas
- T – temperatura bezwzględna
- \dot{V} – natężenie przepływu gazu
- z – współrzędna położenia

Litery greckie

- δ – odległość warstwy adsorbentu od ściany adsorbenta
- ρ_s – gęstość adsorbentu
- φ – wilgotność względną powietrza

Indeksy

- 0 – wlot fazy gazowej
- 1 – powierzchnia międzyfazowa

LITERATURA

- Chang K.-S., Chen M.-T., Chung T.-W., 2005. Effects of the thickness and particle size of silica gel on the heat and mass transfer performance of a silica gel-coated bed for air-conditioning adsorption system. *Appl. Therm. Eng.*, **25**, 2330-2340. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.12.020
- El Sharkawy I.I., Meguid H.A., Saha B.B., 2014. Potential application of solar powered adsorption cooling systems in the Middle East. *Appl. Energy*, **126**, 235-245. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.03.092
- Gwadera M., 2013. Adsorpcja wody na silikażelu w adsorpcyjnych urządzeniach chłodniczych. *Inż. Ap. Chem.*, **52**, nr 4, 317-318
- Sharafian A., Bahrami M., 2014. Assessment of adsorber bed designs in waste-heat driven adsorption cooling systems for vehicle air conditioning and refrigeration. *Renew. Sust. Energy. Rev.*, **30**, 440-451. DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.031
- Wakao N., Funazkri T., 1978. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficients in packed beds: Correlation of Sherwood numbers. *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 1375-1384. DOI: 10.1016/0009-2509(78)85120-3

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/N/ST8/04634.