

Monika GWADERA, Krzysztof KUPIEC

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

Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Adsorpcyjne układy chłodnicze

Wstęp

Konieczność oszczędzania zasobów energetycznych i ochrony środowiska naturalnego to jedne z problemów cywilizacyjnych XXI wieku. Technologią wychodzącą naprzeciw tym wyzwaniom i cieszącą się znacznym zainteresowaniem jest chłodzenie oparte na efekcie cieplnym adsorpcji. Ze względu na problemy środowiskowe związane z emisją freonów chłodzenie adsorpcyjne jest atrakcyjnym polem do badań w porównaniu z konwencjonalnymi układami wykorzystującymi te niepożądane substancje. Substancje stosowane jako czynniki chłodnicze w urządzeniach adsorpcyjnych (np. woda) są środowiskowo przyjazne i nie niszczą warstwy ozonowej [1, 2].

Adsorpcyjne układy chłodnicze charakteryzują się prostym sterowaniem, brakiem wibracji i problemów korozyjnych. Mają też wady: nieciągłość działania, wysokie wymagania projektowe w zakresie utrzymania wysokiej próżni, duże wymiary i ciężar w porównaniu z tradycyjnymi układami chłodniczymi oraz niskie wartości współczynnika wydajności chłodniczej COP. Ze względu na niskie wartości COP instalacje tego typu najlepiej zasilać ciepłem odpadowym lub energią słoneczną. Dzięki temu mogą być alternatywą dla absorpcyjnych i sprężarkowych urządzeń chłodniczych napędzanych energią elektryczną. W krajach uprzemysłowionych o ciepłym klimacie zużycie energii do zasilania urządzeń klimatyzacyjnych jest znaczne, a co za tym idzie zdarzają się przecięcia sieci w miesiącach letnich oraz awarie [3–5].

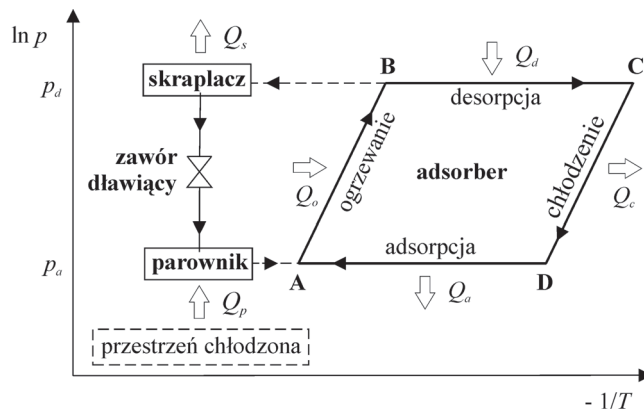
Badania prowadzone nad adsorpcyjnymi urządzeniami chłodniczymi pomogły znacznie zwiększyć efektywność ich pracy. Zastosowanie nowych zestawów adsorbent–adsorbent oraz modyfikacje konstrukcji tych urządzeń powodują ciągłą poprawę ich efektywności [6, 7].

W niniejszej pracy przedstawiono podstawowe informacje dotyczące adsorpcyjnych urządzeń chłodniczych, zasadę działania, charakterystykę stosowanych układów adsorbent–adsorbent, praktyczne zastosowanie tych urządzeń oraz podstawowe wiadomości o ich modelowaniu i możliwościach ulepszeń.

Zasada procesu

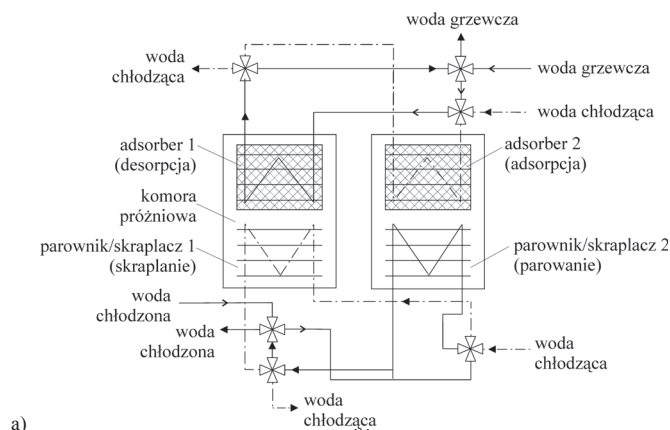
Działanie adsorpcyjnych systemów chłodniczych opiera się na podobnej zasadzie jak w przypadku urządzeń absorpcyjnych: na adsorbencie zachodzi przemienne adsorpcja i desorpcja czynnika chłodniczego. Jednak ze względu na to, że adsorbent jest stacjonarny, układ adsorpcyjny jest inaczej zbudowany niż chłodziarka absorpcyjna. Jego główne elementy to złożo adsorbentu, skraplacz i parownik. Zasadę działania takiego układu można przedstawić na wykresie *Clapeyrona* (Rys. 1). Pełny cykl pracy składa się z czterech etapów: ogrzewanie złoża, desorpcja (regeneracja), chłodzenie i adsorpcja. W etapie ogrzewania (A-B) adsorber ze złożem nasyconym adsorbentem jest ogrzewany, np. ciepłem odpadowym lub promieniowaniem słonecznym, w wyniku czego wzrasta temperatura i ciśnienie. Po osiągnięciu ciśnienia skraplania (punkt B), rozpoczyna się desorpcja. Pary adsorbentu przepływają z adsorbentu do skraplacza. Teoretycznie etap ten zostaje zakończony, gdy złożo jest całkowicie zregenerowane (punkt C). W kolejnym etapie (C-D) adsorber jest chłodzony – spada temperatura i ciśnienie. Kiedy ciśnienie spadnie do ciśnienia parowania (punkt D), rozpoczyna się adsorpcja, której towarzyszy wydzielanie ciepła Q_a . Pary adsorbentu ulegające adsorpcji powstają przez odparowanie czynnika chłodniczego w parowniku połączonym z adsorbentem. Parowanie powoduje obniżanie temperatury parującej cieczy, dzięki czemu uzyskiwany jest efekt chłodzenia. Stosunek ilości ciepła odebranego w wyniku parowania do ilości ciepła dostarczonego w etapie ogrzewania złoża i desorpcji stanowi współczynnik wydajności chłodniczej:

$$COP = \frac{Q_p}{Q_o + Q_d} \quad (1)$$



Rys. 1. Cykl chłodzenia adsorpcyjnego [6, 8-10]

Układy z jednym adsorbentem mogą pracować jedynie w sposób okresowy. Zastosowanie kilku adsorbentów pozwala na wydłużenie czasu chłodzenia, a ponadto na odzysk ciepła i masy. Na rys. 2 przedstawiono schemat układu złożonego z dwóch identycznych jednostek chłodniczych połączonych zaworami czterodrożnymi, w których każda składa się z dwóch wymienników ciepła: adsorbenta/desorbenta oraz parownika/skraplacza, umieszczonych w komorze próżniowej. Podczas gdy pierwsza jednostka pracuje w fazie ogrzewanie/desorpcja, druga znajduje się w fazie chłodzenie/adsorpcja. Sterując systemem zaworów można produkować „chłód” w sposób ciągły.



Rys. 2. Urządzenie adsorpcyjne z dwoma jednostkami chłodniczymi [11]

Stosowane układy adsorbent- adsorbent

Działanie adsorpcyjnego urządzenia chłodniczego zależy w dużej mierze od użytego układu adsorbent–adsorbent [6, 9]. Dobrze zaprojektowany układ powinien charakteryzować się znaczną pojemnością adsorpcyjną i jej dużymi zmianami temperaturowymi. Adsorbent musi wykazywać zdolność do adsorpcji dużych ilości adsorbentu w niskiej temperaturze oraz do efektywnej desorpcji pod wpływem wzrostu temperatury. Jego właściwości nie powinny się zmieniać wraz z wiekiem i wielokrotnym użyciem. Natomiast adsorbent powinien charakteryzować się niską temperaturą parowania, niskim ciśnieniem nasycenia (1–5 atm) w normalnej temperaturze roboczej, wysokim ciepłem parowania, małymi rozmiarami cząsteczek, stabilnością chemiczną, niepalnością, nietoksycznością i niekorozyjnością. Na wybór pary ad-

sorbat-adsorbent mają wpływ także koszty oraz dostępność na rynku. Najbardziej rozpowszechnione układy to: węgiel aktywny–metanol, aktywne włókna węglowe–metanol, węgiel aktywny–amoniak, zeolity–woda, silikażel–woda, chlorek wapnia–amoniak, adsorbenty kompozytowe–amoniak.

Zastosowanie

Zastosowanie chłodziarek adsorpcyjnych można podzielić na trzy kategorie [12]: klimatyzacja pomieszczeń (8–15°C), chłodzenie w celu przechowywania żywności i lekarstw (0–8°C), mrożenie w celu konserwacji żywności lub produkcji lodu (< 0°C).

Adsorpcyjne urządzenia chłodnicze mogą znaleźć zastosowanie tam, gdzie powstają duże ilości ciepła odpadowego np. w zakładach chemicznych, hutach i elektrowniach, na statkach, kutrach rybackich [7, 13–15]. Takie zastosowanie jest uzasadnione ze względu na duże rozmiary tych urządzeń oraz ich odporność na wstrząsy. Opracowane zostały prototypy chłodziarek adsorpcyjnych napędzanych ciepłem odpadowym, z przeznaczeniem na przykład do klimatyzacji pociągów lub wytwarzania lodu na kutrach rybackich w celu chłodzenia ryb [14, 15].

Kolejnym potencjalnym źródłem ciepła dla urządzeń adsorpcyjnych jest promieniowanie słoneczne [8, 9, 12, 16]. Systemy chłodzenia adsorpcyjnego napędzane energią słoneczną są szczególnie atrakcyjne ze względu na to, że działanie urządzenia jest najefektywniejsze wtedy, kiedy temperatura jest najwyższa, czyli największa wydajność układu pokrywa się z największym zapotrzebowaniem mocy chłodniczej. W wielu krajach słabo rozwiniętych gospodarczo o gorącym klimacie dostęp do energii elektrycznej jest ograniczony a natężenie promieniowania słonecznego - duże. W tych warunkach chłodziarki adsorpcyjne zasilane energią słoneczną wykorzystywane są do klimatyzacji, chłodzenia żywności, przechowywania lekarstw (np. szczepionek) i wytwarzania lodu [9, 12, 17–19].

Urządzeniami wykorzystywanymi zarówno do chłodzenia jak i ogrzewania są adsorpcyjne pompy ciepła [20, 21]. Ich zasada działania jest analogiczna do przedstawionej na rys. 1 i polega na transporcie ciepła ze źródła o niższej temperaturze do źródła o temperaturze wyższej. Jako źródło energii napędowej może być wykorzystana energia słoneczna, geotermalna lub ciepło odpadowe.

Modelowanie procesu i możliwości polepszenia wydajności chłodniczej

W modelu matematycznym chłodziarek adsorpcyjnych należy uwzględnić poszczególne części układu tj. adsorber, skraplacz i parownik [10]. Model opisuje transport ciepła pomiędzy tymi składnikami układu oraz transport masy wewnątrz adsorbera. W przypadku adsorbera należy zatem sporządzić (oddzielnie dla etapu adsorpcji i desorpcji) bilans ciepła dla adsorbentu, ścianki aparatu i czynnika przekazującego/ odbierającego ciepło oraz dodatkowo bilans masy i bilans pędu dla fazy gazowej [10, 22]. W równaniach modelu skraplacz i parownik są opisane poprzez bilans ciepła [10]. Należy również opisać odpowiednią zależnością wydajność zewnętrznego źródła ciepła [22, 23].

Ze względu na to, że w równaniach bilansowych pojawia się człon określający szybkość transportu masy, konieczne jest określenie modelu kinetycznego opisującego szybkość przenoszenia czynnika chłodniczego pomiędzy fazą gazową i powierzchnią adsorbentu. Stosowany jest m.in. model LDF (*Linear Driving Force*) [10].

W celu polepszenia współczynnika wydajności chłodniczej stosowane są rozmaite działania [24]. Są to m.in. stosowanie sprasowanych adsorbentów oraz pokrywanie powierzchni grzejnej wymiennika ciepła warstwą adsorbentu. Możliwe są jednak również inne działania oparte na wykorzystaniu zasad przenoszenia masy. Istotną rolę w procesie adsorpcji/desorpcji odgrywa prędkość przepływu fazy gazowej; np. zbyt duża prędkość przepływu uniemożliwia osiągnięcie na końcu etapu adsorpcji wysokich wartości nasycenia adsorbentu. Ważny jest też odpowiedni dobór wielkości ziaren adsorbentu, szczególnie w przypadku, gdy opory przenoszenia masy są limitowane przez dyfuzję w makroporach ziaren. Problem stanowią też różne szybkości procesów adsorpcji i desorpcji przy takich samych czasach trwania poszczególnych etapów cyklu. Wymienione problemy mogą zostać przeanalizowane na podsta-

wie wyników badań równowagi i kinetyki adsorpcji w układach adsorbent-adsorbent stosowanych w urządzeniach chłodniczych.

Ważną rolę w procesie adsorpcyjnego chłodzenia odgrywa intensyfikacja przenoszenia ciepła. Kluczowym parametrem jest przewodność cieplna złoża, którą można znacznie zwiększyć przez mieszanie adsorbentu z rozdrobnionymi elementami metalicznymi. Innym problemem jest wielkość ciepła adsorpcji. Ponieważ ciepło adsorpcji zależy od zawartości adsorbowanego składnika w ziarnach, należy rozważyć dla jakiego zakresu zmienności zawartości składnika w ziarnach, pomiędzy końcami etapów adsorpcji i regeneracji, średnie ciepło adsorpcji jest największe. Analiza obliczeniowa i doświadczalna wymienionych problemów pozwoli na stwierdzenie jakie parametry procesu należy zmodyfikować, aby usprawnić proces i polepszyć jego charakterystykę.

Wnioski

Zalety systemów chłodzenia (ogrzewania) opartych na cyklach adsorpcyjno-desorpcyjnych, takie jak prostota budowy, brak ruchomych części, cicha praca, niepodatność na wstrząsy, brak problemów z korozją, a także brak zależności od dostaw energii elektrycznej, powodują, że tego typu układy mogą stanowić konkurencję dla urządzeń adsorpcyjnych oraz sprężarkowych. Liczne prace badawcze świadczą, że w wielu krajach świata przykładą się dużą wagę do rozwoju adsorpcyjnych urządzeń chłodniczych. Wprowadzane udoskonalenia dają ciągłą poprawę współczynników wydajności chłodniczych tych urządzeń; jednakże wartości te są nadal niezadowalające, co przy wysokich kosztach inwestycyjnych nie pozwoliło dotąd na szerokie zastosowanie chłodziarek adsorpcyjnych. Konieczne są zatem dalsze prace dotyczące m.in. intensyfikacji transportu ciepła i masy. W tym przypadku ważną rolę mogą odegrać badania symulacyjne.

LITERATURA

- [1] Miniraport Energetyki, (26.04.2011): http://www.elektroenergetyka.pl/592/elektroenergetyka_nr_03_10-11_1a.pdf
- [2] Czasopismo Transmission & Distribution World, (26.04.2011): http://tdworld.com/customer_service/con-ed-power-outage-study-0710/
- [3] Serwis irishexaminer.com, (26.04.2011): <http://www.irishexaminer.com/breakingnews/ireland/mhkfgbauqlmh/>
- [4] Serwis smh.com.au, (26.04.2011): <http://www.smh.com.au/news/world/hot-weather-forces-power-cut-in-london/2006/07/28/1153816329363.html>
- [5] Serwis theage.com.au, (26.04.2011): <http://www.theage.com.au/national/massive-power-blackout-hits-victoria-20090130-7twi.html>
- [6] R. Z. Wang, R. G. Oliveira: Prog. Energy Combust. **13**, 518 (2009).
- [7] D. C. Wang, Y. H. Li, D. Li, Y. Z. Xia, J. P. Zhang: Renew. Sust. Energy Rev. **14**, 344 (2010).
- [8] E. E. Anyanwu: Energy Convers. Manage. **44**, 301 (2003).
- [9] K. Sumathy, K. H. Yeung, L. Yong: Prog. Energy Combust. **29**, 301 (2003).
- [10] W. D. Wu, H. Zhang, D. W. Sun: Appl. Therm. Eng. **29**, 645 (2009).
- [11] W. S. Chang, C. C. Wang, C. C. Shieh: Appl. Therm. Eng. **29**, 2100 (2009).
- [12] Y. Fan, L. Luo, B. Souyri: Renew. Sust. Energy Rev. **11**, 1758 (2007).
- [13] A. Grzebielec: Chłodziarstwo i klimatyzacja **4**, 52 (2005).
- [14] S. Jiangzhou, R. Z. Wang, Y. Z. Lu, Y. X. Xu, J. Y. Wu, Z. H. Li: Renew. Energy **28**, 1659 (2003).
- [15] L. W. Wang, R. Z. Wang, J. Y. Wu, K. Wang, S. G. Wang: Energy Convers. Manage. **45**, 2043 (2004).
- [16] E. E. Anyanwu: Energy Convers. Manage. **45**, 1279 (2004).
- [17] B. Dawoud: Renew. Energy **32**, 947 (2007).
- [18] J. Dai, R. Z. Wang, Y. X. Xu: Renew. Energy **25**, 417 (2002).
- [19] A. P. F. Leite, M. B. Grilo, R. R. D. Andrade, F. A. Belo, F. Meunier: Renew. Energy **32**, 697 (2007).
- [20] L. Monastruc, P. Floquet, V. Mayer, I. Nikov, S. Domenech: Chinese J. Chem. Eng. **11**, nr 4, 544 (2010).
- [21] H. Demir, M. Mobeđi, S. Ulkuh: Renew. Sust. Energy Rev. **12**, 2381 (2008).
- [22] J. Di, J. Y. Wu, Z. Z. Xia, R. Z. Wang: Int. J. Refrig. **30**, 515 (2007).
- [23] J. Y. Wu, S. Li: Energy **34**, 1955 (2009).
- [24] E. Wolak, B. Buczek, Inż. Ap. Chem. **44**, nr 6, 11 (2005).