

Sorpcyjne układy chłodzenia

Cz. 3. Zastosowanie agregatów adsorpcyjnych ze złożem klejonym

Marcin MALICKI

Dzięki zdolności zagospodarowania ciepła pochodzącego ze źródeł odpadowych, nieużytecznych bądź odnawialnych, chłodziarki sorpcyjne stały się realną alternatywą dla rozwiązań konwencjonalnych zasilanych energią elektryczną. W niniejszej publikacji skupiono się na możliwości zastosowania agregatów adsorpcyjnych o innowacyjnej, klejonej konstrukcji złoża, do produkcji wody lodowej do celów klimatyzacyjnych bądź procesowych.

W pierwszej części cyklu przedstawiającego technologię sorpcyjną, zatytułowanej „Praktyczne zastosowania agregatów sorpcyjnych” (Ch&K nr 5/2018), zaprezentowano możliwe scenariusze implementacji chłodziarki absorpcyjnej oraz adsorpcyjnej do zastosowań przemysłowych i klimatyzacyjnych. W kolejnej części, pod tytułem „Ekonomika zastosowania agregatów adsorpcyjnych zasilanych różnymi źródłami ciepła”(Ch&K 6/2018), przedstawiono uwarunkowania ekonomiczne eksploatacji układów adsorpcyjnych zasilanych różnymi źródłami ciepła, przy różnych cenach energii zasilającej oraz porównano koszt wytworzenia chłodu z rozwiązaniem konwencjonalnym. Zarysowano także uwarunkowania kierujące inwestorów w stronę rozpoczęcia budowy źródła adsorpcyjnego, a nie adsorpcyjnego.

W niniejszej publikacji przedstawiono z kolei zastosowania agregatów adsorpcyjnych o innowacyjnej, klejonej konstrukcji złoża, do produkcji wody lodowej do celów klimatyzacyjnych bądź procesowych.

Dostępne na rynku chłodziarki adsorpcyjne osiągają zbyt niskie współczynniki wydajności chłodniczej (Coefficient Of Performance – COP) określające stosunek użytecznego efektu chłodzenia do wykorzystanego do jego produkcji ciepła. W znanych rozwiązaniach, podnoszenie sprawności urządzenia

jest bezpośrednio związane ze wzrostem jego masy, prowadzącym do wzrostu rozmiaru, a co za tym idzie ceny, dyskwalifikując zastosowanie rozwiązania sorpcyjnego zamiast sprężarkowego. W obecnym stanie techniki brak jest technologii w istotny sposób podnoszących wydajność złożów chłodziarki adsorpcyjnej, głównie ze względu na specyfikę samego złoża. Wykorzystanie materiału porowatego w sposób naturalny prowadzi do powstawania przestrzeni wypełnionych gazem, które z jednej strony umożliwiają ograniczenie oporów przepływu czynnika chłodniczego w stanie gazowym, a więc są korzystne, a z drugiej zmniejszenie przewodności cieplnej złoża – co jest bardzo niekorzystne dla efektywności działania całego urządzenia. Opracowywana właśnie technologia wykorzystania specjalnego kleju do konstrukcji złoża sorpcyjnego przyczynia się bezpośrednio do wzrostu efektywności produkcji chłodu do celów klimatyzacyjnych, a co za tym idzie – ograniczenia zużycia energii pierwotnej.

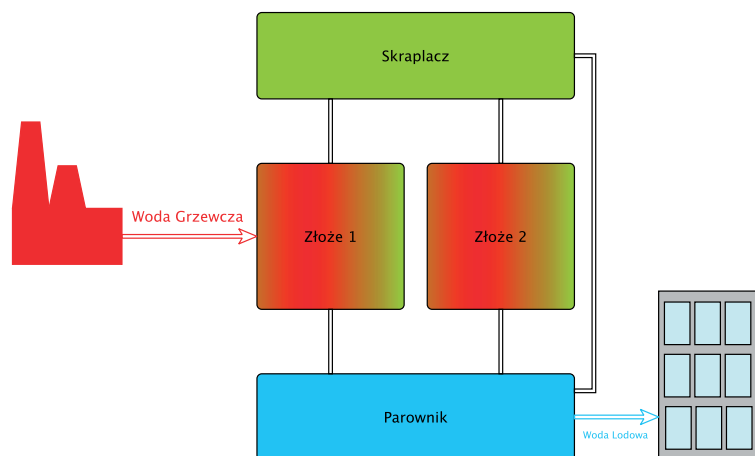
Zasada działania

Dostępne na rynku chłodziarki adsorpcyjne składają się z trzech głównych elementów:

- skraplacza,
- parownika,
- złożów wypełnionych sorbentem.

Liczba złożów zależy w dużej mierze od przeznaczenia oraz zaawansowania technologicznego układu. Możemy wyróżnić układy składające się z parzystej liczby złożów (np. dwa złoża, jeden skraplacz i jeden parownik) oraz nieparzystej (np. trzy złoża, jeden skraplacz i jeden parownik). Dostępne na rynku rozwiązania, mające na celu maksymalizację mocy chłodniczej układu, składają się także z większej niż jeden liczby parowników (np. dwóch: jeden wysokociśnieniowy produkujący wodę lodową o wyższej temperaturze oraz drugi niskociśnieniowy produkujący wodę lodową o niższej temperaturze). Schemat przykładowego urządzenia z parzystą liczbą złożów (urządzenie dwuzłożowe) zaprezentowano na rysunku 1., zaś na rysunku 2. schemat urządzenia z nieparzystą liczbą złożów (urządzenie trójzłożowe). Z kolei rysunek 3. przedstawia przykładowe komercyjnie dostępne urządzenie adsorpcyjne.

W chłodziarce adsorpcyjnej, niezależnie od ilości złożów, użyteczny efekt chłodzenia uzyskujemy dzięki parowaniu czynnika chłodniczego przy obniżonym ciśnieniu, a więc także przy obniżonej temperaturze. Komercyjnie dostępne urządzenia wyposażone są w parowniki pracujące przy ciśnieniu absolutnym około 700 Pa, gwarantującym odparowanie wody pełniącej rolę czynnika chłodniczego, w temperaturze około 6°C. Tak niskie ciśnienie możliwe jest do osiągnięcia dzięki pochłanianiu par czynnika chłodniczego przez adsorbent, którym wypełnione jest złoże sorpcyjne. Wykorzystywane w komercyjnych urządzeniach sorbenty, najczęściej silikażele, są materiałami silnie higroskopijnymi, czyli posiadającymi



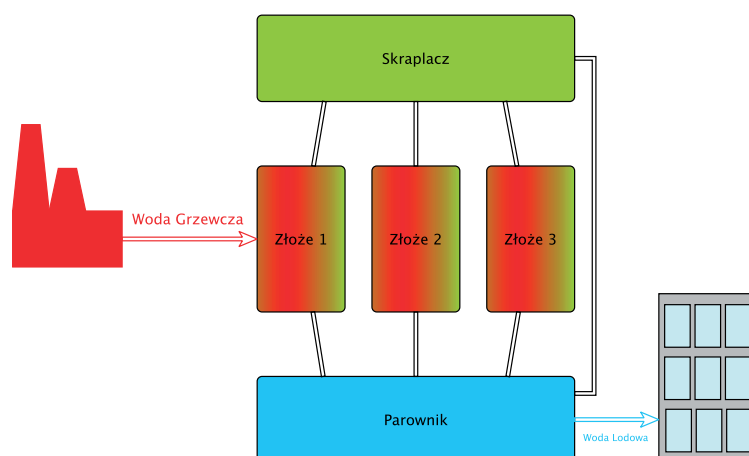
Rys. 1. Schemat dwuzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej

właściwości pochłaniania wody, dzięki czemu w cyklu adsorpcji utrzymują niskie ciśnienie w parowniku. W związku z tym, że adsorbent, będący ciałem stałym, ma skończoną chłonność, aby możliwe było ciągłe utrzymywanie niskiego ciśnienia w parowniku, cykl należy odwrócić: w podwyższonej temperaturze dochodzi do odwrotnego procesu – zaadsorbowany czynnik chłodniczy ulega desorpcji, a następnie skraplaniu w skraplaczu urządzenia. Oznacza to, że to samo złożo adsorpcyjne musi być na zmianę ogrzewane, aby zdeadsorbować czynnik chłodniczy przy wysokim ciśnieniu oraz chłodzone, aby zaadsorbować go przy niskim.

Możemy wyróżnić dwa główne etapy cyklu pracy adsorpcyjnego agregatu chłodniczego:

- chłodzenie złoża adsorpcyjnego połączonego z parownikiem (proces prowadzony jest do momentu „napelnienia” sorbentu);
- ogrzewanie złoża adsorpcyjnego połączonego ze skraplaczem (proces prowadzony jest do momentu „zregenerowania” sorbentu).

Urządzenia o większej liczbie złożeń oraz parowników muszą wykorzystywać bardziej skomplikowane cykle, prowadzące do osiągnięcia wyższych współczynników wydajności chłodniczej oraz umożliwiające pracę przy niższych temperaturach wody grzewczej.



Rys. 2. Schemat trójzłozowej chłodziarki adsorpcyjnej

Złoża sorpcyjne

Kluczowym elementem agregatu adsorpcyjnego są więc złoża wypełnione sorbentem. Każde ze złożeń musi posiadać układ, umożliwiający ich naprzemienne ogrzewanie i chłodzenie w celu umożliwienia realizacji opisanych powyżej

Bądź na bieżąco z fachową wiedzą!

PRENUMERATA ROCZNA

- wersja drukowana 138 zł
- wersja elektroniczna 99 zł
- pakiet (drukowana + elektroniczna) 180 zł

Zamów prenumeratę
prenumerata@euro-media.pl, 22 535 32 27, www.e-czasopisma.net

elementów cyklu produkcji użytecznej mocy chłodniczej. Sam sorbent jest materiałem chropowatym, o bardzo dużej powierzchni rozwinięcia, sięgającej nawet 1000 m² na 1 g materiału. Tak duża powierzchnia umożliwia prowadzenie procesów powierzchniowych, których przykładem jest adsorpcja fizyczna, będąca podstawą działania urządzenia sorpcyjnego.

Adsorpcja fizyczna jest możliwa dzięki oddziaływaniom Van der Waalsa – najsłabszym oddziaływaniom międzycząsteczkowym powstającym pomiędzy dwoma momentami dipolowymi, z których jeden jest indukowany przez drugi trwały moment dipolowy. W wypadku cząsteczek pozbawianych trwałego momentu dipolowego, chwilowy moment dipolowy powstaje przez fluktuacje chmur elektronowych. Oddziaływania te są tak słabe, że podniesienie temperatury złoża o około 30°C prowadzi do ich rozerwania, a więc umożliwienia procesu desorpcji czynnika chłodniczego.

Tak niska temperatura umożliwiająca regenerację złoża, a więc pracę chłodziarki, jest największą zaletą adsorpcyjnych agregatów chłodniczych, otwierając bardzo szeroki zakres zastosowań: od współpracy z kolektorami słonecznymi, przez zasilanie ciepłem odpadowym, po wykorzystanie już nieużytecznych dla innych zastosowań strumieni ciepła odpadowego. Aktualnie trwają prace prowadzące do minimalizacji wielkości urządzeń przez innowacyjne konstrukcje oraz metody produkcji złożeń adsorpcyjnych, które muszą zaadresować ograniczenia termiczne stosowanych sorbentów.

Sorbentem wykorzystywanym w komercyjnie dostępnych urządzeniach jest najczęściej silikażel (tlenek krzemu). Materiał charakteryzuje się, poza bardzo dużą powierzchnią rozwinięcia, także odpornością chemiczną i termiczną. Żel krzemionkowy jest materiałem powszechnie dopuszczonym do użytku i szeroko wykorzystywanym na przykład w pochłaniaczach wilgoci. Niestety, posiada także bardzo niską przewodność cieplną, utrudniającą proces ogrzewania bądź chłodzenia złoża. Dostępne na rynku materiały charakteryzują się przewodnością cieplną mniejszą od 1 W/(m·K), co klasyfikuje je raczej jako materiały izolacyjne (dla porównania miedź charakteryzuje się przewodnością cieplną na poziomie 375 W/(m·K), a aluminium – ok. 200 W/(m·K)). Stąd opór transportu ciepła



Rys. 3. Komercyjnie dostępna chłodziarka adsorpcyjna

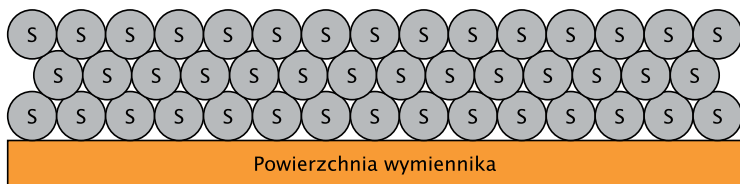
wewnątrz złoża adsorpcyjnego jest jednym z najistotniejszych ograniczeń konstrukcyjnych i efektywnościowych urządzenia. Jednym z możliwych rozwiązań tego wyzwania jest hybrydowa konstrukcja obszaru kontaktu powierzchni grzewczej – najczęściej powierzchni rurki wymiennika bądź lameli – wprowadzająca do układu materiał wypełniający przestrzeń gazową oraz umożliwiający efektywny transport ciepła od powierzchni wymiennika do powierzchni sorbentu. Na rysunku 4. zaprezentowano schemat obszaru wymiennika bezpośrednio stykającego się z sorbentem, zaś na rysunku 5. koncepcję zastosowania materiału łączącego wymiennik z sorbentem.

Dzięki zastosowaniu specjalnie dobranego zestawu (wymiennik / sorbent / wypełniacz / czynnik chłodniczy), istnieje możliwość poprawy szeregu parametrów urządzenia: od parametrów fizycznych, takich jak ograniczenie wielkości, przez parametry termodynamiczne takie jak wyższe COP, po parametry eksploatacyjne, takie jak mniejsze zużycie energii pierwotnej.

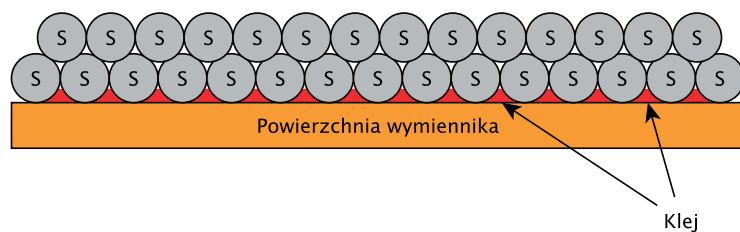
Opracowane w ten sposób urządzenia, w połączeniu z systematycznie rosnącymi cenami energii, zbliżają nas do stworzenia realnej konkurencji dla agregatów sprężarkowych na rynku komercyjnym.

System hybrydowy – przykład modelowy

W pierwszej części cyklu przybliżającego sorpcyjne układy chłodzenia, zatytułowanej „Praktyczne zastosowanie agregatów sorpcyjnych” (Ch&K nr 5/2018), przedstawione zostały możliwości zastosowania agregatów absorpcyjnych oraz adsorpcyjnych produkujących chłód do celów zasilania systemów klimatyzacyjnych oraz technologicznych. Nie jest to oczywiście jedyne możliwe zastosowanie urządzeń sorpcyjnych. Działania mające na celu integrację w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym odnawialnych



Rys. 4. Schemat powierzchni wymiennika stykającej się bezpośrednio z sorbentem



Rys. 5. Schemat powierzchni wymiennika pokrytej materiałem wypełniającym wolne przestrzenie

źródeł energii oraz ciepła pochodzącego ze skojarzonych bądź rozdzielonych układów wytwórczych zasilanych biopaliwami doprowadziły do rozważań nad hybrydową konstrukcją źródeł chłodniczych – z jednej strony wyposażonych w układ sprężarkowy zasilany energią elektryczną, a z drugiej w układ sorpcyjny zasilany ciepłem, pochodzącym z układów odzysku ciepła przemysłowego bądź sieci ciepłowniczej. Przykład możliwej konfiguracji takiego źródła przedstawiono na rysunku 6.

Niewątpliwą wadą takiego układu jest jego skomplikowanie techniczne i wysokie nakłady inwestycyjne. Wśród zalet jednak można wyróżnić:

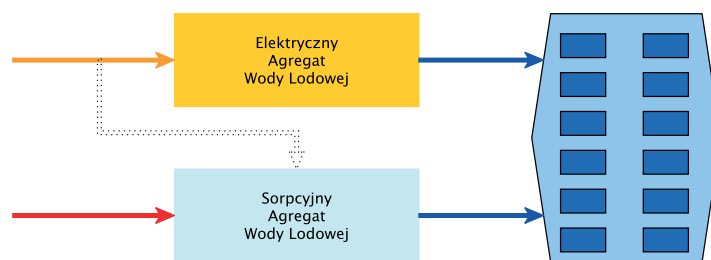
- pełne wykorzystanie potencjału ciepła w danym momencie nieużytecznego bądź odpadowego co w wypadku źródeł skojarzonych umożliwia zwiększenie produkcji energii elektrycznej w okresie letnim;
- zwiększenie sprzedaży ciepła pochodzącego z sieci ciepłowniczych, umożliwiając wykorzystanie „zamrożonych” mocy przesyłowych latem;
- wybór energii (elektrycznej bądź ciepła) dostępnej w danym momencie doby po niższym koszcie;
- ograniczenie inwestycji w infrastrukturę elektroenergetyczną, zarówno w obszarze dystrybucyjnym, jak i produkcyjnym.

W celu oceny korzyści płynących z implementacji chłodniczego źródła hybrydowego przygotowano model zapotrzebowania na chłód do celów klimatyzacyjnych budynku biurowego zlokalizowanego w Polsce, z zapotrzebowaniem szczytowym na moc chłodniczą wynoszącym 1000 kW. Model został przygotowany na bazie danych rzeczywistych z 12-miesięcznej eksploatacji obiektu oraz danych dotyczących zużycia energii elektrycznej przy obciążeniach częściowych przez układ sprężarkowy oraz zużycia ciepła i energii elektrycznej przez układ sorpcyjny. W wypadku obu układów uwzględniono zużycie energii przez systemy zewnętrzne, na przykład układ pompowy wody chłodzącej agregat absorpcyjny czy zasilania wentylatora wieży chłodniczej. Następnie wykonano obliczenia dla każdej godziny eksploatacji układu pracującego w czterech wariantach w ciągu roku kalendarzowego:

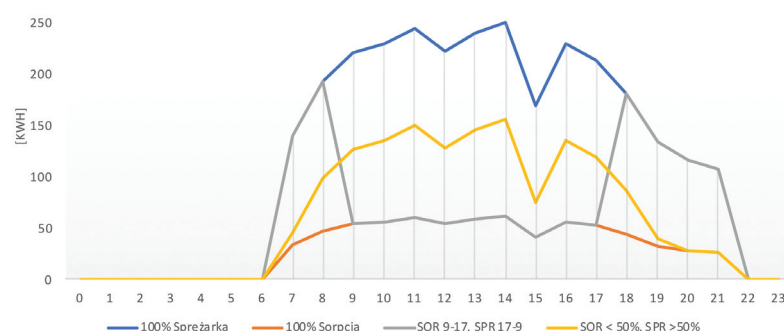
- Wariant 1 – praca tylko układu sprężarkowego pokrywającego pełne zapotrzebowanie na chłód przez cały rok;
- Wariant 2 – praca tylko układu sorpcyjnego pokrywającego pełne zapotrzebowanie na chłód przez cały rok;
- Wariant 3 – praca układu sorpcyjnego w godzinach 9-17 i praca układu sprężarkowego w godzinach 17-9;
- Wariant 4 – praca układu sorpcyjnego do momentu pokrycia zapotrzebowania na 50% mocy chłodniczej oraz układu sprężarkowego do pokrycia zapotrzebowania na chłód od 51% do 100% zapotrzebowania (praca szczytowa).

Na rysunku 7. zaprezentowano zużycie energii elektrycznej przez źródło w każdym z czterech wariantów dla przykładowego letniego dnia.

Dla roku modelowego zapotrzebowanie na chłód wyniosło 3290 GJ, co w przypadku Wariantu 1. oznaczało zużycie ~228 MWh energii elektrycznej. Implementacja źródła w pełni sorpcyjnego, a więc Wariantu 2., oznaczała ograniczenie zużycia energii elektrycznej do ~56 MWh rocznie oraz dodatkowe



Rys. 6. Przykład hybrydowego układu chłodniczego



Rys. 7. Zapotrzebowanie na energię elektryczną dla różnych wariantów konstrukcji źródła

zapotrzebowanie na ciepło do zasilania układu sorpcyjnego na poziomie 4700 GJ.

Bardzo interesujące efekty dała eksploatacja źródeł w Wariantach 3. i 4., prowadząc odpowiednio do zużycia ~95 MWh energii elektrycznej i 3648 GJ ciepła bądź odpowiednio ~67 MWh i 4403 GJ. Należy zaznaczyć, że w każdym wariantcie zapotrzebowanie na chłód zostało w pełni pokryte, a więc komfort użytkownika nie uległ zmianie.

Podsumowanie

Powyższa analiza jasno wskazuje na wyższość Wariantu 4., niosącą za sobą, poza znaczącym ograniczeniem zużycia energii elektrycznej, także uatrakcyjnienie nakładów inwestycyjnych – w stosunku do pozostałych wariantów urządzenia sorpcyjne i sprężarkowe mają moc sumaryczną równą szczytowemu zapotrzebowaniu na chłód, ograniczając nakłady inwestycyjne na dublowanie infrastruktury energetycznej czy ciepłowniczej.

O AUTORZE

dr inż. Marcin MALICKI – dyrektor ds. technologii i kierownik naukowy projektów badawczo-rozwojowych w New Energy Transfer, ekspert Komisji Europejskiej i Innovation Fund Republiki Serbii, autor patentów i publikacji w dziedzinie efektywności energetycznej

