

Sorpcyjne układy chłodzenia

Cz. 1. Praktyczne zastosowanie agregatów sorpcyjnych

Marcin MALICKI

Zapotrzebowanie na energię elektryczną do celów chłodniczych i klimatyzacyjnych systematycznie rośnie. Należy spodziewać się, że zapotrzebowanie na sam chłód będzie kontynuowało ponad dwudziestoletni trend wzrostowy, zarówno w zakresie urządzeń do klimatyzacji przemysłowej, jak i poprawy komfortu użytkownika obiektów. Widoczna jest także intensyfikacja trendu modernizacji istniejących obiektów handlowych, usługowych, biurowych czy mieszkaniowych z wykorzystaniem urządzeń klimatyzacyjnych: od rozległych systemów wody lodowej po lokalne systemy typu „split”.



Rys. 1. Instalacja bromolitowego agregatu adsorpcyjnego zasilanego parą

Najczęściej stosowanym rozwiązaniem służącym do pokrycia zapotrzebowania na chłód są centralnie instalowane sprężarkowe agregaty chłodnicze, produkujące wodę lodową przesyłaną wewnętrzną instalacją hydrauliczną do odbiorników: systemów technologicznych, klimakonwektorów (potocznie nazywanych fan-coilami), bądź chłodnic w centralach wentylacyjnych. W wypadku agregatów sprężarkowych energią niezbędną do wyprodukowania chłodu jest energia elektryczna, której dostępność w szczególności w okresie letnim, staje się ograniczona. Wzrost zapotrzebowania na chłód prowadzi, z jednej strony do wyraźnego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną latem, a z drugiej do widocznego wzrostu kosztu wytworzenia chłodu dla użytkownika końcowego. Oba czynniki mają negatywny wpływ zarówno na eksploatację obiektów kubaturowych, jak i koszty wytwarzania produktów, dla których chłodzenie jest niezbędnym elementem procesu wytwórczego.

Nie tylko w Polsce zapotrzebowanie na energię elektryczną systematycznie wzrasta. Podobny trend jest widoczny

w szczególności w rozwiniętych metropoliach, takich jak Londyn, gdzie do 2030 roku prognozuje się wzrost zainstalowanej mocy chłodniczej o 40%. Na świecie systemy chłodzenia są odpowiedzialne za zużycie od 16% do nawet 50% energii elektrycznej przy ponad 40% udziale zużycia energii przez sektor mieszkaniowo-usługowy. Intensywność wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną z krajowej sieci elektroenergetycznej jest ponad dwukrotnie większa w miesiącach letnich. Jeśli taki trend będzie się utrzymywał, to do 2030 roku, zniknie „letnia dolina”, wyrównując szczytowe zapotrzebowanie na energię elektryczną zimą i latem.

Jednym z możliwych scenariuszy pokrycia wzrastającego zapotrzebowania na chłód jest zastosowanie sorpcyjnych (adsorpcyjnych bądź adsorpcyjnych) agregatów chłodniczych. W odróżnieniu od agregatów sprężarkowych, wykorzystujących do produkcji chłodu energię elektryczną, agregaty sorpcyjne, jako główne źródło energii wykorzystują ciepło:

- **gorącą wodę**, która może pochodzić z miejskiej sieci ciepłowniczej, o temperaturze już od 60÷75°C dla agregatów adsorpcyjnych do 85÷135°C dla agregatów adsorpcyjnych, bądź parę nieużyteczną z systemu technologicznego o ciśnieniu od 1 do 8 bar (G);
- bezpośrednie **spalanie gazu** (przy pomocy wbudowanego palnika na dowolne paliwo);
- bądź bezpośrednio **ze spalin wylotowych** (o temperaturze wyższej od 400°C) dla wielostopniowych agregatów adsorpcyjnych.

Sorpcyjne agregaty chłodnicze, w stosunku do sprężarkowych, poza wykorzystaniem ciepła do produkcji chłodu, posiadają także szereg zalet eksploatacyjnych, takich jak:

- możliwość wykorzystywania ciepła o dostępnym w okresie letnim z miejskiej sieci ciepłowniczej parametrze;
- dużą trwałość wynikającą z ich konstrukcji;
- niski poziom hałasu i wibracji oraz zastosowanie wody jako czynnika chłodniczego.

Ze względu na różnice w budowie, agregaty adsorpcyjne wykorzystują jako czynnik roboczy najczęściej roztwór soli (przeważnie bromku litu), a agregaty adsorpcyjne – ciało stałe (najczęściej różne rodzaje krzemionki). Rodzaj zastosowanej technologii powinien zależeć od dostępnej temperatury ciepła. Agregaty adsorpcyjne znajdują swoje zastosowanie wszędzie tam, gdzie dostępna temperatura ciepła przekracza 85°C, a agregaty adsorpcyjne zadowolają się ciepłem o temperaturze od 60°C.

Agregaty adsorpcyjne znajdują swoje zastosowanie wszędzie tam, gdzie dostępna temperatura ciepła przekracza 85°C, a agregaty adsorpcyjne zadowolają się ciepłem o temperaturze od 60°C

Na świecie systemy chłodzenia są odpowiedzialne za zużycie od 16% do nawet 50% energii elektrycznej przy ponad 40% udziale zużycia energii przez sektor mieszkaniowo-usługowy

Zasada działania absorpcyjnych agregatów chłodniczych

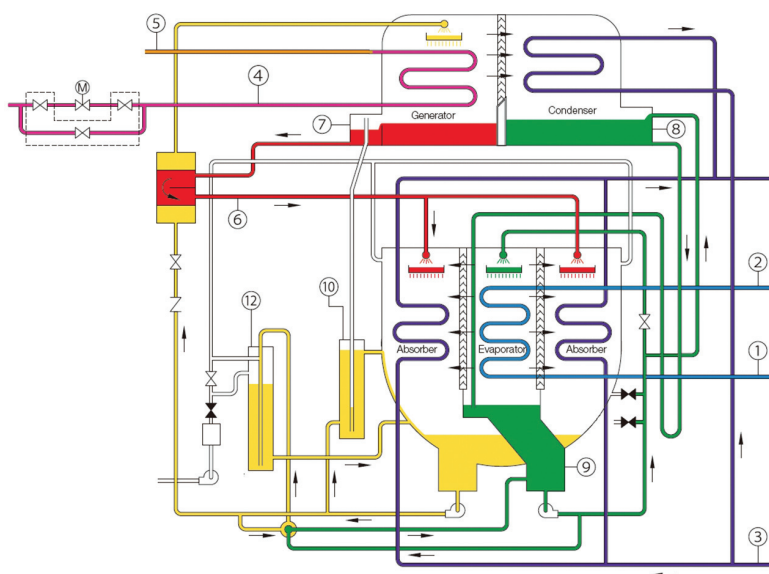
Chłodziarka absorpcyjna wytwarza tzw. wodę lodową na potrzeby chłodnicze bądź klimatyzacyjne, dzięki krążeniu czynnika chłodniczego między absorberem (jest w nim pochłaniany), a desorberem (generatorem). Układ absorbera i desorbera odpowiada, porównując do agregatu konwencjonalnego, sprężarce elektrycznej, z tą różnicą, że nie używa jako energii zasilającej prądu, a ciepła. Czynnikiem chłodniczym wykorzystywanym w agregacie bromolitytowym jest woda, najbardziej ekologiczny z czynników chłodniczych, która tworząc mieszaninę z bromkiem litu – nieszkodliwą solą, wykorzystywana jest jako czynnik roboczy układu chłodniczego. Stosowane dziś bromolitytowe agregaty absorpcyjne praktycznie nie mają części ruchomych, dzięki czemu ich eksploatacja jest możliwa przez wiele lat, co w stosunku do rozwiązań sprężarkowych wydłuża cykl życia urządzenia.

Na rysunku 2. zaprezentowano schemat bromolitywowego absorpcyjnego agregatu wody lodowej.

W chłodziarce zasilanej gorącą wodą, dzięki ciepłu podanemu do generatora (7) zasilanie (4), powrót (5) z roztworu LiBr, przy bardzo niskim ciśnieniu, odparowuje czysta woda. Para wodna przez separator wędruje do skraplacza, w którym dzięki oddaniu ciepła do wody chłodzącej, ulega kondensacji (8), aby trafić w celu rozpylenia do parownika (9) i odebrania ciepła podczas wrzenia na powierzchni rurek z wody lodowej – zasilanie (1), powrót (2). Po odebraniu ciepła, para wodna trafia przez separatory do absorbera, gdzie jest pochłaniana przez rozpylany stężony roztwór bromku litu pochodzący z generatora. Ciepło absorpcji odprowadzone jest poprzez układ wody chodzącej. Chłodziarka dodatkowo wyposażona jest w systemy zwiększające sprawność poprzez odzysk ciepła (6) oraz automatyczny system utrzymywania próżni (12) i zapobiegania krystalizacji (10).

Zasada działania trójzłozowych chłodziarek adsorpcyjnych

Mechanizm działania cyklu chłodniczego w urządzeniach adsorpcyjnych oparty jest o właściwości higroskopijne sorbentu, będącego substancją nietoksyczną. Sorbent, w poszczególnych cyklach pracy urządzenia, jest nasycany parą wodną, a następnie osuszany. Ze względu na bardzo niskie ciśnienie absolutne parujące w komorze, czynnik chłodniczy odparowuje w stosunkowo niskiej temperaturze, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie użytecznego efektu chłodniczego. Obieg wody lodowej zasilającej parownik schładza się poprzez oddanie ciepła na potrzeby odparowania czynnika chłodniczego, który został wcześniej skroplony w skraplaczu. Powstałe pary czynnika chłodniczego trafiają następnie do złóż adsorpcyjnych, pełniących rolę „sprężarki chemicznej”. Złóża adsorpcyjne wypełnione są silnie higroskopijnym sorbentem, pochłaniającym parę wodną za sprawą sił elektrostatycznych i wiązań van der Waalsa. Każde ze złóż jest nasycane parą powstałą w parowniku indywidualnie. Proces adsorpcji (pochłaniania powierzchniowego par czynnika chłodniczego przez złożę), jest procesem egzotermicznym, więc konieczne jest odprowadzanie powstającego ciepła. Po fazie adsorpcji, złożę zostaje odseparowane od parownika oraz skraplacza i następuje doprowadzenie ciepła w celu podniesienia ciśnienia panującego w złożu do ciśnienia panującego w skraplaczu. Po wyrównaniu ciśnień, pary skumulowane w żelu krzemionkowym zostają zdesorbowane i trafiają do skraplacza,



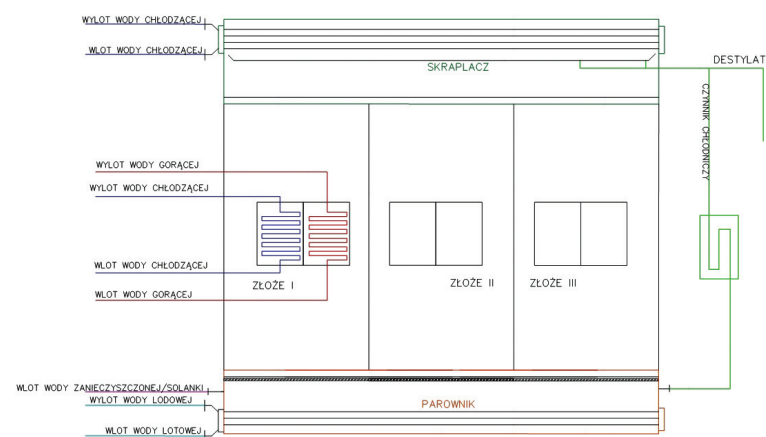
Rys. 2. Schemat komercyjnie dostępnego bromolitywowego agregatu absorpcyjnego[1]

gdzie w wyniku schłodzenia i odbioru ciepła kondensacji ulegają skropleni. Skropliny zgromadzone w dolnej sekcji skraplacza, transportowane są z powrotem do parownika, za pośrednictwem elementu dławiącego, celem utrzymywania różnicy ciśnień pomiędzy ciśnieniem panującym w skraplaczu i parownika, zamykając cykl chłodzenia. Na rysunku 3. zaprezentowano schemat trójzłozowego agregatu adsorpcyjnego umożliwiającego produkcję chłodu do celów technologicznych i klimatyzacyjnych.

Przykład zastosowania agregatu adsorpcyjnego do modernizacji systemu klimatyzacyjnego w budynku użyteczności publicznej

Szczegółowo przeanalizowano możliwość modernizacji układu kontroli klimatu (ogrzewania, wentylacji i chłodzenia) w budynku użyteczności publicznej podłączonym do miejskiej sie-

Współpraca chłodziarki adsorpcyjnej z centralami rekuperacyjnymi pozwala na uzyskanie korzyści w postaci zmniejszenia zużycia ciepła systemowego w okresie zimowym i zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w okresie letnim



Rys. 3. Schemat komercyjnie dostępnego na rynku trójzłozowej chłodziarki adsorpcyjnej NETI® [2]

Tabela 1. Porównanie zużycia energii przed i po modernizacji

Energia		Przed modernizacją	Po modernizacji
Ciepło [GJ]	zima	1 294	23
	lato	0	367
Elektryczność [MWh]	zima	14	0
	lato	36	40

ci ciepłowniczej. Jako podstawę rozwiązania zaproponowano agregat adsorpcyjny zasilany ciepłem sieciowym i produkujący wodę lodową służącą do schładzania powietrza wentylacyjnego rozprowadzanego do pomieszczeń biurowych budynku z central rekuperacyjnych. Współpraca chłodziarki adsorpcyjnej z centralami rekuperacyjnymi pozwala na uzyskanie korzyści w postaci zmniejszenia zużycia ciepła systemowego w okresie zimowym i zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w okresie letnim, połączone ze wzrostem komfortu w pomieszczeniach biurowych poprzez zwiększenie skuteczności wymiany powietrza oraz jego nawilżania zimą. Chłód dla budynku przed modernizacją dostarczany był przez zainstalowany układ klimatyzacyjny z bezpośrednim odparowaniem – system Multi-Split.

Do obliczeń zapotrzebowania na chłód do standaryzacji powietrza wentylacyjnego w zakresie higienicznym oraz doboru urządzeń przyjęto temperaturę powietrza zewnętrznego $t_2 = 32^\circ\text{C}$, temperaturę powietrza wewnątrz budynku $t_w = 24^\circ\text{C}$ oraz temperaturę wody lodowej $12/18^\circ\text{C}$, otrzymując zapotrzebowanie na chłód na cele instalacji wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła dla budynku w ilości około 42 kW. W związku z dostępną temperaturą zasilania i powrotu wody sieciowej w lecie $70/35^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 35^\circ\text{C}$) oraz efektywnie dostępną temperaturą wody zasilającej z sieci ciepłowniczej 65°C , do-

brano agregat NETI50 produkujący chłód o powyższych parametrach przy $\text{COP} = 0,7$. Podczas prac obliczono zapotrzebowania na ciepło do produkcji chłodu oraz uwzględniono aktualną specyfikę pracy urządzeń klimatyzacyjnych (10 h dziennie), EER/COP urządzeń (zarówno sprężarkowych, jak i adsorpcyjnych) oraz roczne zużycie energii elektrycznej. W ten sposób obliczono ilość ciepła zużywanego do produkcji chłodu, co umożliwiło porównanie zużycia energii przed i po modernizacji. Wyniki zaprezentowano w tabeli 1.

Dzięki zastosowaniu central wentylacyjnych z odzyskiem ciepła/chłodu i wilgoci, uległo zmniejszeniu zapotrzebowanie na ciepło wykorzystywane do wentylacji z 1294 GJ do 390 GJ rocznie, a więc ponad 3,3-krotnie. Jest to szczególnie istotne w kontekście zasilania urządzeń sorpcyjnych z istniejących węzłów ciepłych. Zmniejszeniu z 50 MWh do 40 MWh rocznie – a więc o 20%, uległo także zapotrzebowanie na energię elektryczną. Jest to głównie spowodowane wyłączeniem sprężarkowych układów klimatyzacyjnych i produkcją chłodu przy wykorzystaniu ciepła sieciowego. Jak widać, powyższa modernizacja wpisuje się bezpośrednio w działania służące poprawie efektywności energetycznej budynków.

Przykład zastosowania agregatu absorpcyjnego do modernizacji systemu produkcji chłodu w zakładzie mleczarskim

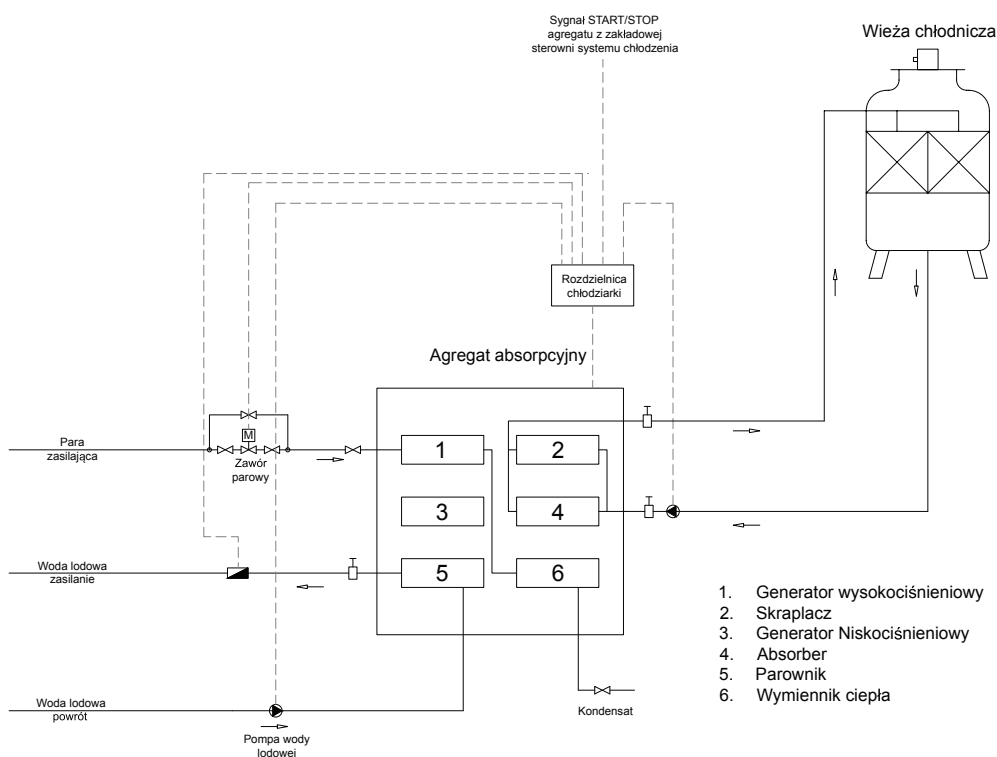
Dwustopniowy bromolitowy agregat absorpcyjny zasilany parą stał się podstawą modernizacji istniejącej instalacji produkcji chłodu w jednym z zakładów mleczarskich. Specyfiką pracy instalacji produkcji i dostawy chłodu na cele produkcji sera żółtego jest zapotrzebowanie na wodę lodową o temperaturze $\sim 1^\circ\text{C}$. Zmienność zapotrzebowania na chłód jest bardzo wysoka, co prowadzi do szeregu wyzwań eksploatacyjnych, związanych z osiągnięciem efektywności energetycznej i ekonomicznej instalacji. Bromolitowe agregaty absorpcyjne, w odróżnieniu od amoniakalnych agregatów absorpcyjnych, posiadają fizyczne ograniczenie temperatury medium chłodzonego do około 4°C , wynikające z wykorzystania wody jako czynnika chłodniczego. Dlatego też implementacja agregatu w systemie technologicznym wymaga zlokalizowania go w miejscu gwarantującym bezpieczeństwo urządzenia, połączone z maksymalizacją czasu pracy układu oraz efektu ekonomicznego.

Dobry agregat absorpcyjny SL Eco Energy Systems o mocy 500 kW został zainstalowany w sposób umożliwiający wstępne chłodzenie, niezależnie od temperatury, wody powracającej z systemu technologicznego do zbiornika buforowego wody lodowej, służącego do zasilania szeregu systemów technologicznych.

Korzyści płynące z modernizacji instalacji z wykorzystaniem agregatu absorpcyjnego zasilanego ciepłem widoczne są na wielu poziomach: wykorzystane urządzenie absorpcyjne o mocy



Rys. 4. Dwustopniowa i dwuefektowa Bromolitowa chłodziarka absorpcyjna SL Eco-Energy Systems zabudowana przez New Energy Transfer w istniejącą amoniakalną instalację chłodniczą



Rys. 5. Schemat instalacji chłodniczej agregatu absorpcyjnego w zakładzie mleczarskim

500 kW zwiększa chłodniczą moc zainstalowaną, podnosząc bezpieczeństwo instalacji, dzięki wykorzystaniu ciepła – a nie energii elektrycznej – do produkcji chłodu oraz umożliwia docelowe zwiększenie produkcji w zakładzie. Jednocześnie, urządzenie do produkcji chłodu wykorzystuje ciepło w danym momencie nieużyteczne, prowadząc do poprawy efektywności energetycznej całego układu oraz znaczącego obniżenia zarówno kosztów eksploatacyjnych, jak i oddziaływania instalacji na środowisko. Uwzględniając dane historyczne, przeprowadzono analizę korzyści dla jednego roku eksploatacji instalacji.

Algorytm zakładał wstępne chłodzenie wody powracającej z instalacji do temperatury docelowej 5°C. Dla przyjętych założeń inwestycja osiąga czas zwrotu na poziomie 5 lat, w porównaniu z rozwiązaniem sprężarkowym przy ~20% niższym koszcie wytworzenia GJ chłodu na cele technologiczne.

Podane dane prezentują bardzo dużą rezerwę, zakładającą tylko jeden cykl produkcyjny dziennie, a więc pracę agregatu tylko przez 33% możliwego czasu. Analiza nie uwzględnia także możliwości do pozyskania dofinansowań inwestycji związanych z jej proekologicznym oraz proefektywnościowym charakterem.

Uwzględnienie dofinansowania na poziomie umożliwiającym ograniczenie kosztu inwestycyjnego urządzenia do porównywalnego z agregatem sprężarkowym, skraca czas zwrotu inwestycji do mniej niż jednego roku.

Podsumowanie

Agregaty sorpcyjne prezentują bardzo szerokie możliwości poprawy efektywności energetycznej zarówno w zastosowaniach klimatyzacyjnych, jak i przemysłowych. Prawidłowa implementacja urządzenia przyczynia się bezpośrednio do widocznych oszczędności eksploatacyjnych. Układy znajdują swoje zastosowanie w szczególności tam, gdzie istnieje możliwość wykorzystania odpadowego bądź nieużytecznego w danym momencie ciepła, produkując chłód w sposób ekonomiczny i ekologiczny.

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



Implementacja agregatu w systemie technologicznym wymaga zlokalizowania go w miejscu gwarantującym bezpieczeństwo urządzenia połączone z maksymalizacją czasu pracy układu oraz efektu ekonomicznego

LITERATURA:

- [1] Instrukcja instalacji, obsługi i konserwacji bromolitowego agregatu absorpcyjnego SL, Eco Energy Systems 2016.
- [2] Instrukcja instalacji, obsługi i konserwacji trójzłożowego agregatu adsorpcyjnego NETI[®], New Energy Transfer 2016.