

# Sorpcyjne układy chłodzenia

## Cz. 5. Amoniakalne agregaty absorpcyjne w zastosowaniach przemysłowych

Marcin MALICKI

Produkcja chłodu w sposób efektywny i ekonomiczny, przy wykorzystaniu ciepła odpadowego bądź nieużytecznego, które może pochodzić ze źródeł odnawialnych bądź odzysku ciepła, doprowadziła w ciągu ostatnich lat do wzmoczonego rozwoju chłodziarek sorpcyjnych. Piąta część cyklu poświęconego sorpcyjnym układom chłodzenia, skupia się na przemysłowym zastosowaniu tym razem amoniakalnych agregatów absorpcyjnych – do produkcji chłodu niskotemperaturowego.

### O czym warto przeczytać w poprzednich częściach cyklu

W pierwszej części cyklu przedstawiającego technologię sorpcyjną pt. „Praktyczne zastosowania agregatów sorpcyjnych” (Ch&K 5/2018) zaprezentowano możliwe scenariusze implementacji chłodziarki absorpcyjnej oraz adsorpcyjnej do zastosowań przemysłowych i klimatyzacyjnych. W kolejnej części cyklu pt. „Ekonomia zastosowania agregatów absorpcyjnych zasilanych różnymi źródłami ciepła” przedstawiono uwarunkowania ekonomiczne eksploatacji układów absorpcyjnych zasilanych różnymi źródłami ciepła, przy różnych cenach energii zasilającej oraz porównano koszt wytworzenia chłodu z rozwiązaniem konwencjonalnym. Należono także uwarunkowania kierujące inwestorów w stronę rozpoczęcia budowy konkretnego typu źródła sorpcyjnego. W trzeciej części cyklu pt. „Zastosowanie agregatów adsorpcyjnych ze złożem klejonym” skupiono się na możliwości zastosowania agregatów adsorpcyjnych o innowacyjnej, klejonej, konstrukcji złoża, do produkcji wody lodowej do celów klimatyzacyjnych bądź procesowych oraz możliwości implementacji takich agregatów do hybrydowych źródeł chłodniczych składających się z różnych konfiguracji urządzeń sprężarkowych i sorpcyjnych. W czwartej części cyklu dotyczącego technologii sorpcyjnej, przedstawiono odwrotne do wcześniejszych zastosowanie urządzeń sorpcyjnych: do produkcji ciepła na cele technologiczne bądź ciepłownicze przy jednoczesnym odzysku ciepła o bardzo niskiej temperaturze. Zaprezentowano zasadę działania układu absorpcyjnej pompy ciepła, określono korzystne w skali kraju obszary implementacji technologii i przedstawiono ciekawe realizacje. W tym wydaniu omówione zostanie przemysłowe zastosowanie amoniakalnych agregatów absorpcyjnych – do produkcji chłodu niskotemperaturowego.

**Agregaty absorpcyjne znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie dostępna temperatura ciepła przekracza 85°C, zaś agregatom adsorpcyjnym wystarczy ciepło o temperaturze około 60°C**

### Agregaty sorpcyjne

Jednym z możliwych scenariuszy pokrycia zapotrzebowania na chłód jest zastosowanie sorpcyjnych – absorpcyjnych bądź adsorpcyjnych – agregatów chłodniczych. W odróżnieniu od agregatów sprężarkowych, wykorzystujących do produkcji chłodu energię elektryczną, agregaty sorpcyjne jako główną energię zasilającą wykorzystują ciepło: gorącą wodę, która może pochodzić z miejskiej sieci ciepłowniczej, o temperaturze już od 60°C÷75°C dla agregatów adsorpcyjnych do 85°C÷135°C dla agregatów absorpcyjnych, bądź parę nieużyteczną z systemu technologicznego (o ciśnieniu od 1 do 8 bar (G)), bezpośrednie spalanie gazu (przy pomocy wbudowanego palnika na dowolne paliwo) lub bezpośrednio ze spalin wylotowych (o temperaturze wyższej od 400°C) dla wielostopniowych agregatów absorpcyjnych.

Sorpcyjne agregaty chłodnicze w porównaniu 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 absorpcyjne 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 absorpcyjne znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie dostępna temperatura ciepła przekracza 85°C, zaś agregatom adsorpcyjnym wystarczy ciepło o temperaturze około 60°C.

Osobną grupą agregatów absorpcyjnych są urządzenia wykorzystujące nie mieszaninę soli i wody (LiBr/H<sub>2</sub>O), a mieszaninę wody i amoniaku (H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub>). Urządzenia tego typu wymagają znacząco wyższej temperatury zasilania czynnikiem grzewczym: preferowana jest tutaj para nasycona o ciśnieniu 8 bar (G), ale mogą także wyprodukować czynnik chłodniczy o zdecydowanie niższej temperaturze odparowania, dochodzącej nawet do -55°C. Dla porównania agregaty bromolitowe produkują ok. +5°C. Powyższa różnica wynika z zastosowania nie wody, jak w agregatach bromolitowych, a amoniaku jako czynnika chłodniczego. Efektem tego jest także niższa sprawność COP (*Coefficient of Performance*) amoniakalnych agregatów chłodniczych, na poziomie 0,5 – rozumianym jako stosunek użytecznego efektu chłodzenia do wprowadzonego do układu ciepła. Szczegółowa zasada działania urządzenia sorpcyjnego została wielokrotnie opisana we wcześniejszych czterech częściach cyklu, na przykładzie chłodziarki adsorpcyjnej, absorpcyjnej i absorpcyjnej pompy ciepła.

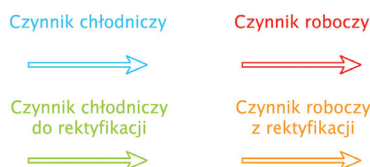
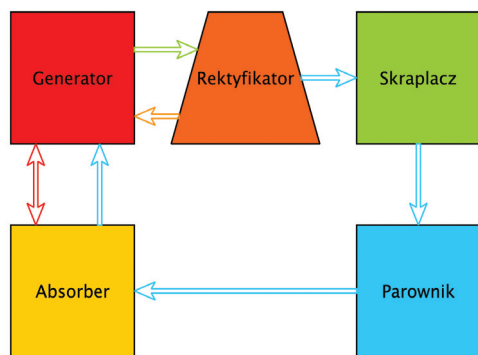
### Absorpcyjne agregaty amoniakalne

Zasada działania chłodniczych agregatów absorpcyjnych opartych na mieszaninie bromku litu i wody (LiBr/H<sub>2</sub>O) została już opisana we wcześniejszych częściach cyklu m.in. tej dotyczącej zastosowania technologii sorpcyjnej pt. „Sorpcyjne układy chłodzenia”. Fundamentalna zasada działania chłodniczych agregatów absorpcyjnych wykorzystujących mieszaninę wody i amoniaku (H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub>) jest taka sama jak w agregatach wykorzystujących bromek litu i wodę, to jednak proces absorpcji, a więc pochłaniania gazu w całej objętości cieczy, wykorzystuje dodatkowy element techniczny, niezbędny do zapewnienia prawidłowej pracy całego urządzenia.

Schemat absorpcyjnego urządzenia amoniakalnego przedstawiono na rysunku 1. Podobnie jak w agregatach bromolitowych, do generatora urządzenia dostarczane jest ciepło, co umożliwia desorpcję czynnika chłodniczego z mieszaniny. W odróżnieniu od agregatów bromolitowych, w agregatach amoniakalnych czynnikiem chłodniczym nie jest woda (H<sub>2</sub>O), lecz amoniak (NH<sub>3</sub>). Oznacza to, że generator opuszcza amoniak, który może

zawierać niewielkie ilości wody. Stąd niezbędnym dodatkowym elementem technicznym amoniakalnych agregatów absorpcyjnych jest rektyfikator zapewniający pełną separację czynnika chłodniczego z roztworu  $H_2O/NH_3$ .

Pozostałe elementy cyklu przebiegają w sposób zbieżny z procesami zachodzącymi w agregatach bromolitowych: czynnik chłodniczy jest dławiony, a następnie rozprężany, co umożliwia uzyskanie użytecznego efektu chłodzenia (temperatury tak niskie jak  $-40^{\circ}C$  są spotykane), a potem pochłaniany przez wodę w absorberze. Uzyskana w ten sposób mieszanina przepompowywana jest do generatora, umożliwiając powtórzenie cyklu.



Rys. 1. Schemat absorpcyjnego urządzenia amoniakalnego

**Na rynku dostępne są układy produkujące chłód o temperaturze  $-40^{\circ}C$ , a rynkowym standardem jest  $-28^{\circ}C$**

### Porównanie absorpcyjnych agregatów amoniakalny i bromolitowych

Niewątpliwą zaletą amoniakalnych agregatów chłodniczych jest możliwość produkcji użytecznego efektu chłodzenia o temperaturze o rząd wielkości niższej niż w przypadku agregatów bromolitowych. Okupione jest to jednak wyższymi o rząd wielkości nakładami inwestycyjnymi na urządzenie oraz instalację.

Dla przypomnienia, ze względu na zastosowanie wody jako czynnika chłodniczego w agregacie bromolitowym, możliwe jest produkowanie chłodu o temperaturze nie niższej niż  $4^{\circ}C$ . Agregaty amoniakalne są wolne od tego ograniczenia. Na rynku dostępne są układy produkujące chłód o temperaturze tak niskiej jak  $-40^{\circ}C$ , a rynkowym standardem jest  $-28^{\circ}C$ . Oczywiście absorpcyjne agregaty amoniakalne mogą produkować chłód o temperaturze wyższej, jednak w zakresie temperatur dodatnich nie są konkurencyjne inwestycyjnie oraz eksploatacyjnie.

W warunkach krajowych zastosowanie amoniakalnych agregatów absorpcyjnych umożliwia produkcję czynnika chłodniczego o temperaturze odparowania na poziomie  $0^{\circ}C$  z wykorzystaniem ciepła o temperaturze  $90^{\circ}C$  przy efektywności produkcji chłodu rozumianej jako stosunek użytecznego efektu chłodzenia

do ciepła zasilającego (COP – Coefficient of Performance) na poziomie 0,6. Jeśli weźmiemy pod uwagę temperatury umożliwiające porównanie absorpcyjnego agregatu amoniakalnego z bromolitowym, a więc produkcję czynnika chłodniczego o temperaturze  $+5^{\circ}C$ , przy zasilaniu obu urządzeń wodą gorącą o temperaturze  $95^{\circ}C$  oraz wykorzystaniu wody chłodzącej o temperaturze  $25^{\circ}C$ , możemy spodziewać się wskaźnika COP dla agregatu amoniakalnego równego 0,67, a bromolitowego równego 0,8, co w połączeniu z wyższymi o rząd wielkości nakładami inwestycyjnymi na rozwiązanie amoniakalne, dyskwalifikuje je w tym zakresie temperatur.

### Możliwe krajowe zastosowania amoniakalnych agregatów chłodniczych

Wysokie jednostkowe nakłady inwestycyjne połączone ze stosunkowo niską sprawnością produkcji chłodu prowadzą do możliwości zastosowania amoniakalnych agregatów absorpcyjnych wszędzie tam, gdzie występuje zapotrzebowanie na chłód o temperaturze niższej niż  $+5^{\circ}C$  oraz duża ilość wysokojakościowego ciepła odpadowego.

Zarówno w Polsce, jak i na świecie amoniakalne agregaty chłodnicze stosowane są głównie w:

- przemyśle mięsnym;
- przemyśle mlecznym;
- chłodniach składowych.

Z wymienionymi zakresami zastosowania zbieżne jest wykorzystanie lokalnych źródeł wytwarzania energii elektrycznej, co prowadzi do korzystnego efektu synergii: źródła skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i chłodu.

### Kogeneracja

Układy kogeneracyjne mają bardzo szerokie zastosowanie zarówno w produkcji energii bezpośrednio w miejscu jej wykorzystania, jak i na potrzeby miejskich systemów ciepłowniczych. W obu przypadkach potwierdzają swoją przewagę w stosunku do systemów rozdzielonych, gwarantując jednocześnie zapewnienie szeregu zalet ekologicznych (oszczędność energii pierwotnej oraz redukcji  $CO_2$  o 33% w przypadku rozwiązań opartych na węglu kamiennym i 66% w wypadku rozwiązań opartych na gazie) i ekonomicznych. W układach rozdzielonych energia elektryczna i ciepło produkowane są w osobnych instalacjach oraz dostarczane do finalnego odbiorcy za pomocą sieci elektroenergetycznej i ciepłowniczej. Zarówno proces produkcji energii elektrycznej, jak i ciepła oraz ich transferu na większe odległości generuje straty, których część udaje się uniknąć za pomocą połączenia procesu produkcji energii elektrycznej z ciepłem blisko odbiorcy.

Efektywność energetyczna układu skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w stosunku do układu rozdzielonego produkującego energię elektryczną i ciepło w osobnych urządzeniach jest o 40% wyższa, co oznacza o 30% mniejsze zużycie paliwa w celu wyprodukowania takiej samej ilości energii elektrycznej i ciepła. To właśnie skojarzona produkcja energii elektrycznej i ciepła umożliwia osiągnięcie najwyższych wartości sprawności wytwarzania mediów, a przez to ograniczenia zużycia energii pierwotnej i emisji do atmosfery, będąc głównym motywem inwestycyjnym dla klientów przemysłowych. Niestety, w wielu przypadkach, mimo występowania stałego zapotrzebowania na energię elektryczną, nie występuje stałe zapotrzebowanie na ciepło, znacząco ograniczając opłacalność kogeneracji.

**Efektywność energetyczna układu skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w stosunku do układu rozdzielonego produkującego energię elektryczną i ciepło w osobnych urządzeniach jest o 40% wyższa**

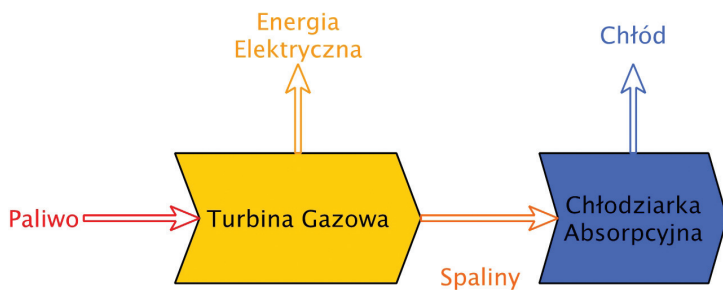


Tabela 1. Porównanie nakładów inwestycyjnych na kluczowe urządzenia dwóch rodzajów źródeł trójgeneracyjnych

### Trójgeneracja

Jednoczesne występowanie zapotrzebowania na energię elektryczną, ciepło i chłód bądź energię elektryczną i chłód umożliwia instalację źródła trójgeneracyjnego składającego się z układu kogeneracyjnego produkującego ciepło i energię elektryczną oraz chłodziarki absorpcyjnej wykorzystującej ciepło do produkcji chłodu. Trójgeneracja (CCHP – *Combined Cooling Heating and Power*) definiowana jest jako układ skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu. Instalacja urządzenia zamieniającego energię, w danym momencie nieużyteczną (ciepło), na użyteczną (chłód), pozwala znacząco wydłużyć czas pracy układów kogeneracyjnych z mocą nominalną poprawiając ich eksploatacyjną efektywność energetyczną.

Aktualnie najbardziej rozpowszechniony model instalacji trójgeneracyjnej składa się z układu skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła – kogeneratora oraz układu wykorzystania ciepła do produkcji chłodu – chłodziarki absorpcyjnej, które mogą być rozbudowane o źródła szczytowe bądź awaryjne w celu poprawy wskaźników ekonomicznych inwestycji.

Popularność takiego zestawu potwierdzają w szczególności eksploatowane od wielu lat w kraju i za granicą instalacje oparte właśnie na silnikach tłokowych z zapłonem iskrowym oraz bromolitowych chłodziarkach absorpcyjnych, produkujące energię na potrzeby wszelkiego rodzaju odbiorców. Tego rodzaju układy zawdzięczają swoją popularność m.in. szerokiemu zakresowi dostępnych mocy produkcyjnych, w tym sięgającym od tak małych urządzeń, jak te o 30 kW do dużych, jak 9 MWe na jedną jednostkę. W połączeniu

z dostępnymi na rynku krajowym chłodziarkami absorpcyjnymi dają możliwość produkcji zarówno energii elektrycznej, ciepła oraz chłodu, zaspokajając potrzeby energetyczne większości lokalnych odbiorców. Niestety, zastosowanie układu silnika z zapłonem iskrowym nie jest w pełni adekwatnym do napędu amoniakalnej chłodziarki absorpcyjnej, ze względu na wysokie wymagania temperaturowe zasilania generatora (wornika) urządzenia absorpcyjnego. Z tego też powodu stosowane na świecie układy wykorzystują układy turbin gazowych i są zasilane bezpośrednio gazami wylotowymi, bądź parą produkowaną przy pomocy gazów wylotowych. Na rysunku 2. zaprezentowano schemat takiego układu.

Pokazana na rysunku 2. konfiguracja umożliwia efektywną eksploatację amoniakalnej chłodziarki absorpcyjnej dzięki zapewnieniu podstawowego medium zasilającego, jakim jest ciepło wysokotemperaturowe pochodzące z turbiny gazowej. Jednocześnie, pełne wykorzystanie ciepła z układu kogeneracyjnego gwarantuje zapewnienie najwyższej sprawności, a co za tym idzie – najniższego kosztu produkcji mediów.

### Nakłady inwestycyjne

Zastosowanie amoniakalnego agregatu absorpcyjnego wiąże się z wysokimi nakładami inwestycyjnymi na zakup urządzenia oraz na niezbędny do jego zasilania układ kogeneracyjny. Nakłady inwestycyjne są wyraźnie wyższe niż w urządzeniach bromolitowych bądź źródłach trójgeneracyjnych opartych na silnikach tłokowych, ze względu na przymus zastosowania turbiny gazowej, jednak proste czasy zwrotu z inwestycji w źródła o mocy średniej i dużej, są bardzo atrakcyjne w stosunku do rozwiązań opartych na agregatach sprężarkowych zasilanych z sieci elektroenergetycznej, potwierdzając opłacalność tego rodzaju źródeł pracujących na średnią i dużą skalę.

W tabeli 1. zaprezentowano przykładowe porównanie nakładów inwestycyjnych na kluczowe urządzenia dwóch rodzajów źródeł trójgeneracyjnych.

### Podsumowanie

Amoniakalne agregaty absorpcyjne reprezentują bardzo ciekawy i, ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne, nieczęsto stosowany przykład układów sorpcyjnych. Wysokie wymagania w zakresie temperatury ciepła zasilającego oraz stosunkowo niskie COP wymagają przemyślanej inwestycji realizowanych na dużą skalę – około dziesięciokrotnie większą od popularnych inwestycji w źródła bromolitowe.

Rosnące ceny energii elektrycznej skłaniają do podejmowania rozważań dotyczących instalacji źródeł trójgeneracyjnych, także średnich, mogących wykorzystywać ciepło odpadowe do produkcji chłodu o niskiej temperaturze. Krajowe uwarunkowania technologiczne oraz rozbudowany w Polsce przemysł mięsny i mleczarski zachęcają do ponownego analizy wykonalności i opłacalności inwestycji w takie źródła oraz możliwości ich połączenia z istniejącymi źródłami chłodu.

Tabela 1. Porównanie nakładów inwestycyjnych na kluczowe urządzenia dwóch rodzajów źródeł trójgeneracyjnych		
Opis	Agregat absorpcyjny	
	bromolitowy	amoniakalny
Najniższa temperatura produkowanego chłodu [°C]	+5	-55
Sprawność COP przy zasilaniu ciepłem o temperaturze 100°C	0,8	0,5
Nakłady inwestycyjne na 1 kW mocy chłodniczej (średnie) [EUR/kW]	250	1500
Nakłady inwestycyjne na 1 kW mocy elektrycznej układu kogeneracyjnego [EUR/kWe]	1200	2200
Nakłady inwestycyjne na źródło trójgeneracyjne o mocy chłodniczej 1 MW [EUR]	1 450 000	3 050 000

### 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

