

Emil Stańczyk, Bolesław Karwat, Ryszard Machnik, Jerzy Niedźwiedzki

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

E-mail: stanczykemil@gmail.com, karwat@agh.edu.pl, machnik@agh.edu.pl, jniedz@agh.edu.pl

Badania eksploatacyjne sorpcyjnego agregatu chłodniczego wykorzystującego ciepło sieciowe do wytwarzania chłodu dla potrzeb klimatyzacji

Słowa kluczowe: sieć ciepłownicza, energia chłodnicza, klimatyzacja, proces adsorpcji.

Streszczenie: Artykuł zawiera wyniki badań eksploatacyjnych instalacji pilotażowej, mających wykazać celowość zastosowania adsorpcyjnego agregatu chłodniczego do wytwarzania wody lodowej na potrzeby systemów klimatyzacyjnych. Obiektem badań była instalacja zasilana z sieci ciepłowniczej w okresie letnim, a więc wykorzystująca ciepło sieciowe, którego jest nadmiar w okresach pozagrzewczych. W artykule przedstawiono sposób działania agregatów adsorpcyjnych oraz wyniki badań wpływu temperatur wody w obiegach zasilania oraz odprowadzenia ciepła z agregatu na jego moc chłodniczą oraz sprawność wytwarzania chłodu *COP* (*Coefficient of Performance*). Badania wykonano dla zakresu temperatur wody sieciowej do 70°C, czyli typowej dla okresu pozagrzewczego w większości sieci ciepłowniczych w Polsce. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zagospodarowania, będącego w nadmiarze w okresie letnim, ciepła sieciowego do zasilania adsorpcyjnych urządzeń chłodniczych, wytwarzających wodę lodową na potrzeby klimatyzacji.

1. Wstęp

Miejskie sieci ciepłownicze są złożonymi strukturami będącymi połączeniem rur o różnych średnicach, którymi ciepło jest przesyłane, poprzez czynnik termodynamiczny, od źródeł wytwarzania ciepła sieciowego do jego odbiorów końcowych. Ciepło wykorzystywane jest do celów technologicznych, grzewczych czy komunalnych. Podstawowym problemem pracy miejskich sieci ciepłowniczych w okresie letnim jest spadek zapotrzebowania na ciepło, które wykorzystywane jest głównie na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej. Od kilku lat trwają dyskusje na temat możliwości zwiększenia obciążenia sieci ciepłowniczych poprzez wykorzystanie ciepła do wytwarzania chłodu z zastosowaniem agregatów absorpcyjnych oraz od niedawna również adsorpcyjnych. Szczególne zainteresowanie występuje w krajach skandynawskich, głównie z powodu wyższych temperatur czynnika grzewczego [17]. Dane przedstawione między innymi w publikacjach [7, 13] świadczą o tendencji wzrostowej w zakresie dostawy chłodu sieciowego. Ograniczeniem zastosowania absorpcyjnych układów klimatyzacyjnych pracujących w systemie zdecentralizowanym w większości miast w Polsce jest zbyt niska temperatura wody w sieci ciepłowniczej, która w okresie letnim jest rzędu 66-70°C na wyjściu ze źródła, a w praktyce o około 8°C niższa na wejściu do odbiorcy. Minimalna temperatura czynnika zasilającego absorpcyjne, bromo-litowe chłodziarki jest na poziomie 72°C, natomiast efektywna praca możliwa jest dopiero przy temperaturze 85-90°C [20]. Podwyższenie temperatury czynnika grzewczego do parametrów 90/55°C, typowych dla krajów skandynawskich wiązałoby się ze zwiększeniem strat ciepła na przesył [21, 22]. Problem niskiej temperatury wody w okresie letnim do zasilania sorpcyjnych agregatów chłodniczych, nie dotyczy urządzeń adsorpcyjnych silikażelowych, których praca możliwa jest dla czynnika grzewczego o parametrach temperaturowych już powyżej 55°C.

Projektowanie i rozwój adsorpcyjnych systemów chłodniczych, opierających się na wykorzystaniu żelu krzemionkowego oraz dwutlenku siarki, rozpoczął się w latach dwudziestych ubiegłego stulecia [14]. W celu zwiększenia sprawności wytwarzania chłodu oraz mocy chłodniczej dokonywano modyfikacji konstrukcji oraz stosowania różnych par adsorbent-adsorbat. W artykule [5] przedstawiono badania doświadczalne podstawowych parametrów wpływających na zdolność adsorpcyjną silikażelu w stanie ziarnistym oraz w stanie po naniesieniu na powierzchnię płaską. Dokonano oceny możliwości zwiększenia sprawności adsorpcyjnych urządzeń chłodniczych poprzez intensyfikację transportu ciepła na granicy złoża adsorbentu oraz rurek wymiennika ciepła. Wiele prac, między innymi [1, 3, 4, 12, 16, 23], dotyczy numerycznego modelowania oraz symulacji przepływu masy i energii w adsorpcyjnych agregatach chłodniczych, najczęściej dwu i trójzłożowych. Przedstawione modele bazują w oparciu o kilka głównych założeń, między innymi:

- prawo zachowania masy i energii,
- równowadze adsorpcji w zależności od ciśnienia i temperatury,
- kinetyce procesu adsorpcji.

Do opisu procesu adsorpcji najczęściej wykorzystywane są równania modelu kinetycznego, Linear Driving Force [19]. Równowaga adsorpcyjna jako funkcja ciśnienia i temperatury wyznaczana jest na podstawie równań opracowanych przez Chihara i Suzuki [2].

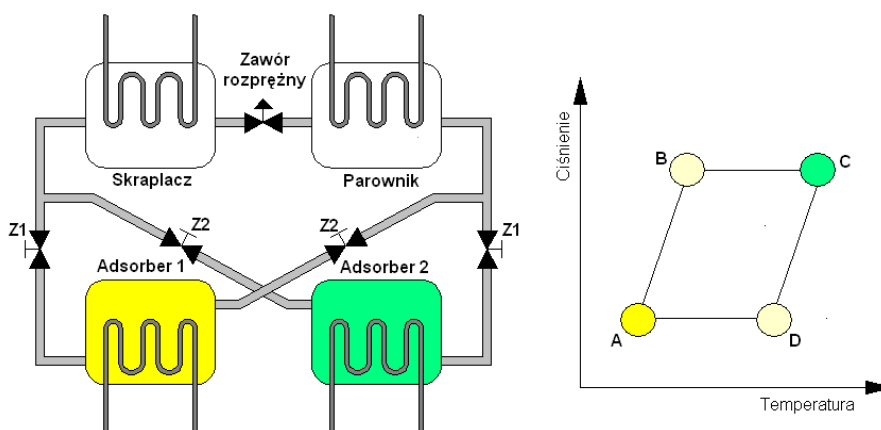
Możliwości wykorzystania adsorpcyjnych agregatów chłodniczych zasilanych ciepłem z sieci ciepłowniczej przedstawiono między innymi w publikacjach [10, 20]. W pracach [6, 8, 9, 11, 15, 18] dokonano analizy praktycznego wykorzystania urządzeń sorpcyjnych w aplikacjach przemysłowych, pozwalających na odzysk ciepła między innymi z procesów technologicznych, ciepła odpadowego z chłodzenia klinkieru czy procesu spiekania i chłodzenia materiałów żelazonośnych w hucie surowcowej stali.

W zakresie przeprowadzonego programu badań nad możliwością wykorzystania ciepła sieciowego w okresie letnim do zasilania adsorpcyjnych dwukomorowych chłodziarek było zweryfikowanie dotychczasowej wiedzy na temat wpływu temperatury gorącej wody oraz temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z agregatu na sprawność wytwarzania chłodu oraz moc chłodniczą urządzenia. Oczekiwanym rezultatem było wyznaczenie zależności opisujących badane charakterystyki, na podstawie których będzie można zapewnić lepszą stabilność procesu wytwarzania chłodu oraz dokonać optymalizacji parametrów pracy w celu efektywnego wykorzystania urządzenia chłodniczego.

2. Budowa i zasada działania adsorpcyjnego dwukomorowego agregatu chłodniczego

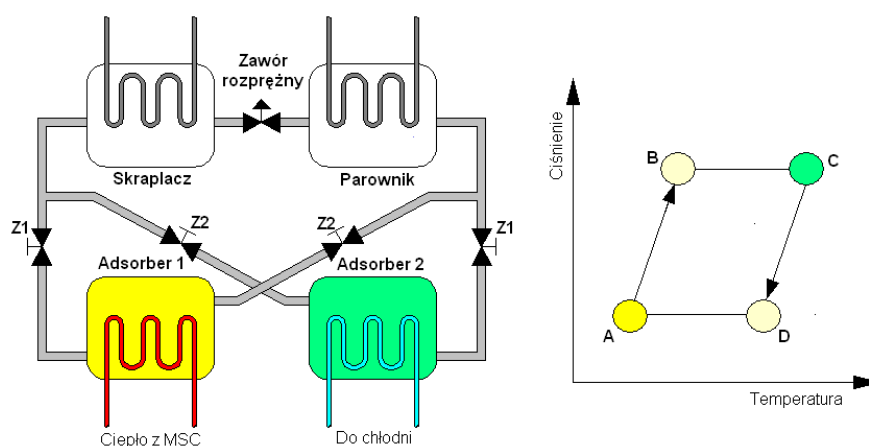
Do badań użyto adsorpcyjny silikażelowy agregat chłodniczy o mocy nominalnej 7 kW. Urządzenie zbudowane jest z dwóch komór adsorpcyjnych, które służą do pochłaniania pary czynnika chłodniczego. Adsorpcja definiowana jest jako proces wiązania się cząsteczek, atomów lub jonów na powierzchni lub granicy faz fizycznych [24]. Zdolność adsorpcji zależy od wielkości powierzchni oddzielającej dwie fazy. Agregaty adsorpcyjne zbudowane są z różnych par układów adsorbent-adsorbat. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest wykorzystanie wody jako adsorbentu oraz silikażelu jako adsorbentu. Silikażel posiada wiele zalet, między innymi zdolność do pochłaniania dużych ilości wody w niskich temperaturach oraz możliwość desorpcji w temperaturze poniżej 90°C. Środek ten jest trwały, nietoksyczny i niekorozyjny [5].

Praca urządzenia adsorpcyjnego dwukomorowego, którego zagregowany schemat przedstawiono na rysunku 1, odbywa się w dwóch półcyklach. Pierwszy półcykl rozpoczyna się gdy w adsorberze 1 panuje niskie ciśnienie i niska temperatura oraz adsorbent jest nasycony czynnikiem chłodniczym, czyli zawiera dużą ilość wody – stan A. W adsorberze 2 panuje wówczas wysokie ciśnienie i wysoka temperatura oraz adsorbent posiada minimalną zawartość wody – stan C. Zawory Z1 oraz Z2 są zamknięte.



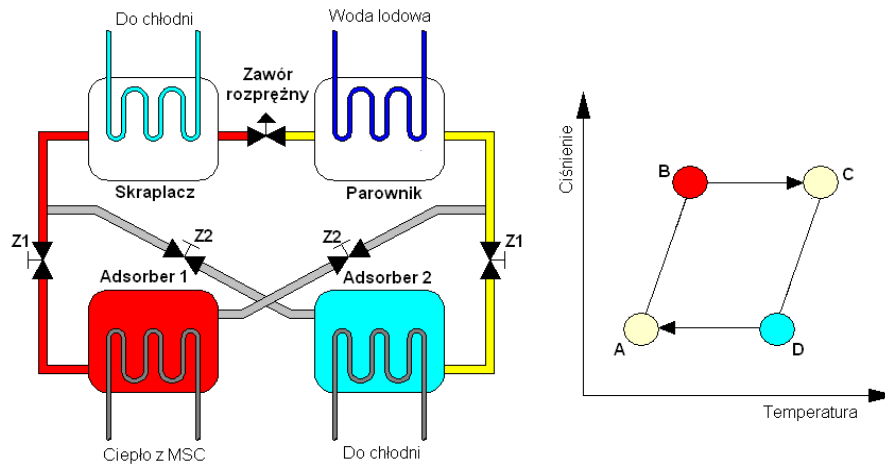
Rys. 1. Zagregowany schemat chłodziarki adsorpcyjnej – stan początkowy pierwszego półcyklu

Na rysunku 2 przedstawiony jest stan izosterycznego ogrzewania złoża 1 oraz izosterycznego chłodzenia złoża 2. Do adsorbera 1 dostarczane jest ciepło z obiegu wody grzewczej, w wyniku czego w komorze tej następuje wzrost ciśnienia i temperatury, przy stałej wilgotności złoża – krzywa A-B. W adsorberze 2 następuje odbieranie ciepła poprzez wymianę z obiegiem wody chłodzącej, co powoduje spadek ciśnienia i temperatury, przy stałej wilgotności złoża – krzywa C-D.



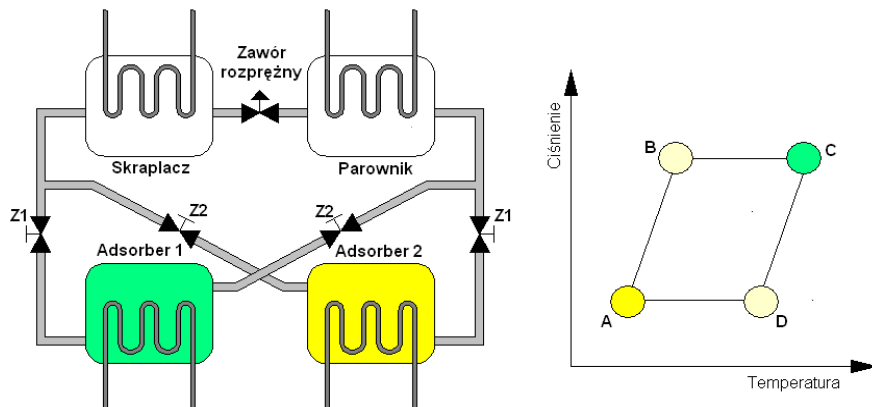
Rys. 2. Zagregowany schemat chłodziarki adsorpcyjnej dla cyklu regeneracji złoża

Gdy ciśnienie w adsorberze 1 osiągnie wartość ciśnienia skraplania P_s , a w adsorberze 2 osiągnie wartość ciśnienia parowania P_p , następuje otwarcie zaworów Z1, łączących komorę 1 ze skraplaczem oraz komorę 2 z parownikiem, co zostało przedstawione na rysunku 3. Dla tego etapu rozpoczyna się efektywna praca układu chłodniczego. W adsorberze 1 następuje regeneracja złoża sorbentu. Para wodna skroplona w skraplaczu, w którym następuje wymiana ciepła z obiegiem wody chłodzącej, przepływa przez zawór rozprężny, a następnie parując w parowniku pobiera ciepło z obiegu wody lodowej. Obieg wody lodowej zakończony jest klimakonwektorem, w którym ciepło pobierane jest z przestrzeni chłodzonej. Aby utrzymać niskie ciśnienie parowania złoża z komory 2 pochłania parę czynnika chłodniczego. Egzotermiczny proces adsorpcji wymaga odprowadzenia nadmiaru ciepła poprzez obieg wody chłodniczej. Stany adsorberów zmieniają się wzdłuż izobar B-C oraz D-A.



Rys. 3. Zagregowany schemat chłodziarki adsorpcyjnej dla cyklu chłodzenia

Efektywna praca układu chłodniczego kończy się, gdy adsorber nr 1 osiągnie stan C oraz adsorber nr 2 osiągnie stan A, co zostało przedstawione na rysunku 4. Zawory Z1 zamykają się. Praca układu rozpoczyna się w drugim półcyklu, który polega na dostarczeniu ciepła do adsorbera 2 oraz odbieraniu ciepła od adsorbera 1. W drugim półcyklu czynnik chłodniczy przepływa poprzez krzyżowe połączenie adsorbera 2 ze skraplaczem oraz adsorbera 1 z parownikiem. Połączenie takie możliwe jest poprzez otwarcie zaworów Z2. Pozostała część procesu odbywa się identycznie jak w pierwszym półcyklu pracy.



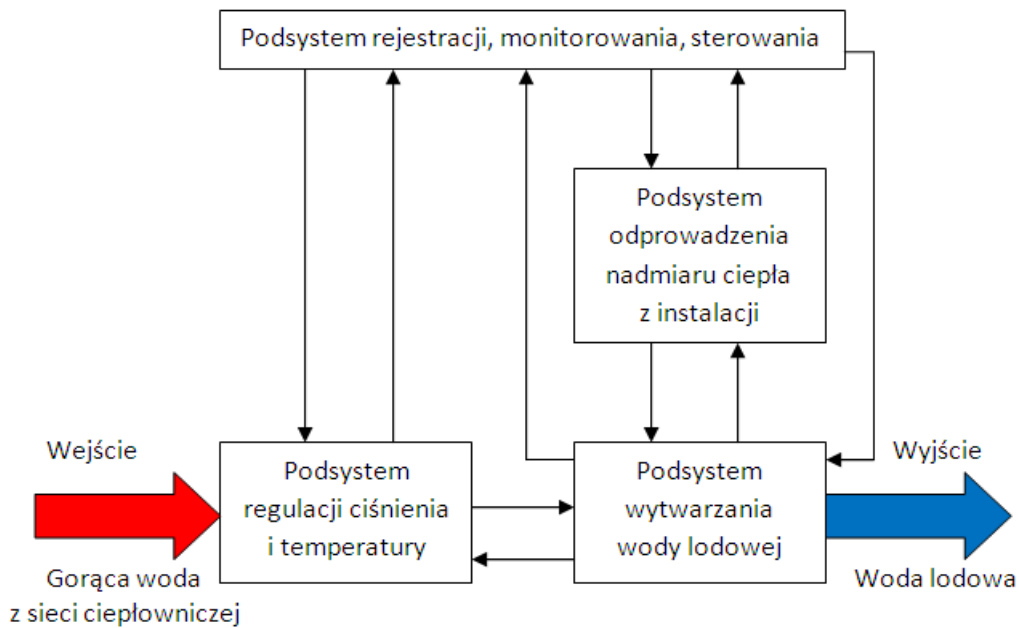
Rys. 4. Zagregowany schemat chłodziarki adsorpcyjnej – stan początkowy drugiego półcyklu

3. Metodyka badań

Badania eksperymentalne wykorzystania energii cieplnej do wytwarzania chłodu w procesie adsorpcji przeprowadzono na instalacji badawczej składającej się z podsystemów:

- rejestracji, monitorowania i sterowania,
- regulacji ciśnienia i temperatury,
- wytwarzania wody lodowej,
- odprowadzenia nadmiaru ciepła z instalacji.

Na rysunku 5 przedstawiono uproszczony model systemu wytwarzania chłodu. Wejściem do systemu jest gorąca woda z sieci ciepłowniczej, której wartość latem wynosi maksymalnie 70°C. Wyjściem z systemu jest woda lodowa, służąca do odprowadzenia ciepła z przestrzeni chłodzonej.



Rys. 5. Uproszczony model systemu wytwarzania chłodu w procesie adsorpcji

W pracy przeprowadzono szczegółową analizę pracy sorpcyjnego agregatu chłodniczego o mocy nominalnej 7 kW, biorąc pod uwagę wpływ temperatur czynników zasilających agregat na sprawność oraz moc chłodniczą. Dla danego typu urządzenia adsorpcyjnego najważniejszymi parametrami wpływającymi na pracę są:

- temperatura gorącej wody zasilającej – $TT1$,
- temperatura wody lodowej – $TT2$,
- temperatura wody w obiegu odprowadzenia ciepła z urządzenia – $TT3$.

Regulacja temperatur w poszczególnych obiegach hydraulicznych może przyczynić się do wyznaczenia najkorzystniejszych warunków pracy sorpcyjnego urządzenia chłodniczego.

Sprawność wytwarzania chłodu COP (*Coefficient of Performance*) w agregacie adsorpcyjnym, określona jest na podstawie zależności (1).

$$COP = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

gdzie:

- Q_1 – ilość energii cieplnej dostarczonej do agregatu adsorpcyjnego w kJ,
- Q_2 – ilość energii chłodniczej pobranej przez wodę lodową z przestrzeni chłodzonej w kJ.

Sprawność wytwarzania chłodu stanowi stosunek ilości ciepła odebranego z przestrzeni chłodzonej w wyniku parowania do ilości ciepła dostarczonego w etapie ogrzewania złoża i jego regeneracji.

Moc chłodnicza urządzenia adsorpcyjnego, określona jest na podstawie zależności (2).

$$P_{ch} = \frac{Q_2}{t} \quad (2)$$

gdzie:

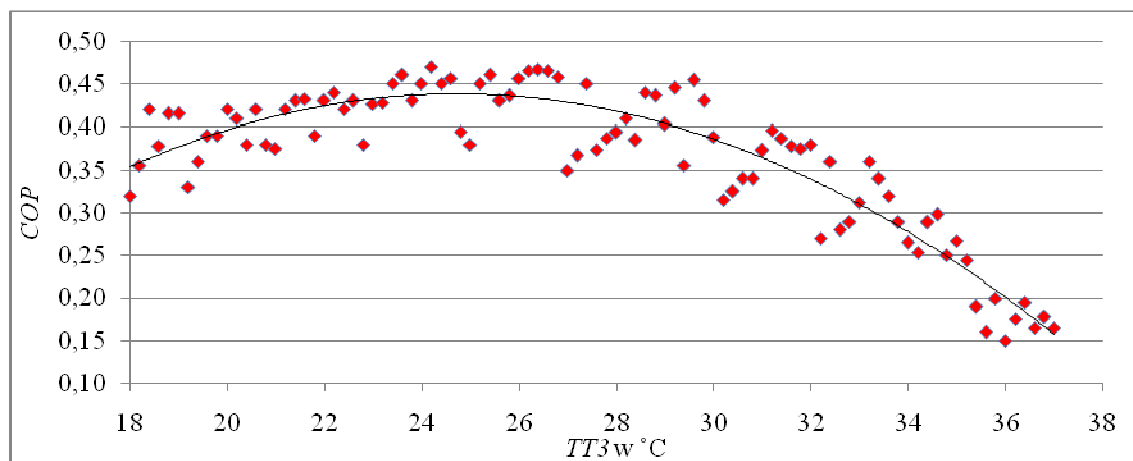
- P_{ch} – strumień ciepła pobrany przez wodę lodową z przestrzeni chłodzonej w kW,
- t – czas w sek.

4. Wyniki badań eksploatacyjnych adsorpcyjnego agregatu chłodniczego

Badania eksploatacyjne przeprowadzono w zakresie temperatur gorącej wody zasilającej agregat adsorpcyjny – $TT1$ od 55°C do 70°C . W zakresie tym dokonywano rejestracji temperatur wody lodowej oraz temperatur wody w obiegu odprowadzenia ciepła z agregatu. W celu wyznaczenia charakterystyk sprawności wytwarzania chłodu oraz mocy chłodniczej dokonano odczytów wskazań z liczników ciepła po stronie gorącej wody zasilającej agregat oraz po stronie wody lodowej. W artykule przedstawiono wyniki badań dla skrajnych wartości temperatur gorącej wody w obiegu zasilania agregatu adsorpcyjnego. Badania podstawowych charakterystyk pracy zostały wykonane dla temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła na zasilaniu urządzenia chłodniczego w zakresie od 18°C do 37°C .

4.1. Wyniki badań dla temperatury wody w obiegu zasilania agregatu $TT1=55 \pm 2,8^{\circ}\text{C}$

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład sprawności wytwarzania chłodu COP w funkcji temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z agregatu adsorpcyjnego $TT3$ dla zadanej temperatury gorącej wody zasilającej sorpcyjne urządzenie chłodnicze $TT1=55 \pm 2,8^{\circ}\text{C}$.



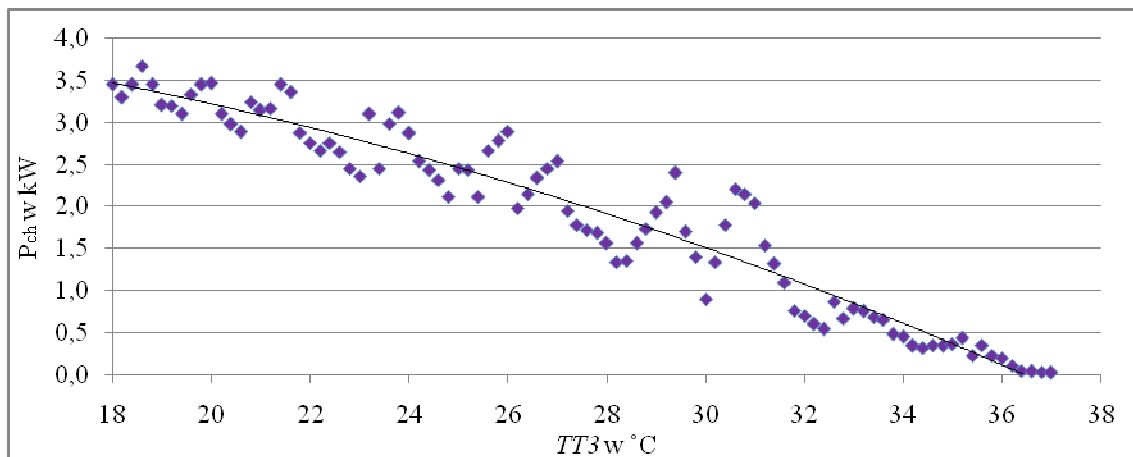
Rys. 6. Wykres sprawności wytwarzania chłodu – COP agregatu adsorpcyjnego dla $TT1=55 \pm 2,8^{\circ}\text{C}$

Postać funkcji aproksymującej rozkład sprawności wytwarzania chłodu od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z urządzenia przyjęto w postaci (3).

$$COP = -0,002 \cdot (TT3)^2 + 0,092 \cdot (TT3) - 0,7 \quad (3)$$

Najwyższą wartość sprawności $COP = 0,47$ uzyskano dla temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła $TT3 = 24,2^{\circ}\text{C}$.

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład mocy chłodniczej P_{ch} agregatu adsorpcyjnego dla przyjętego zakresu temperatur wody w obiegu odprowadzenia ciepła.



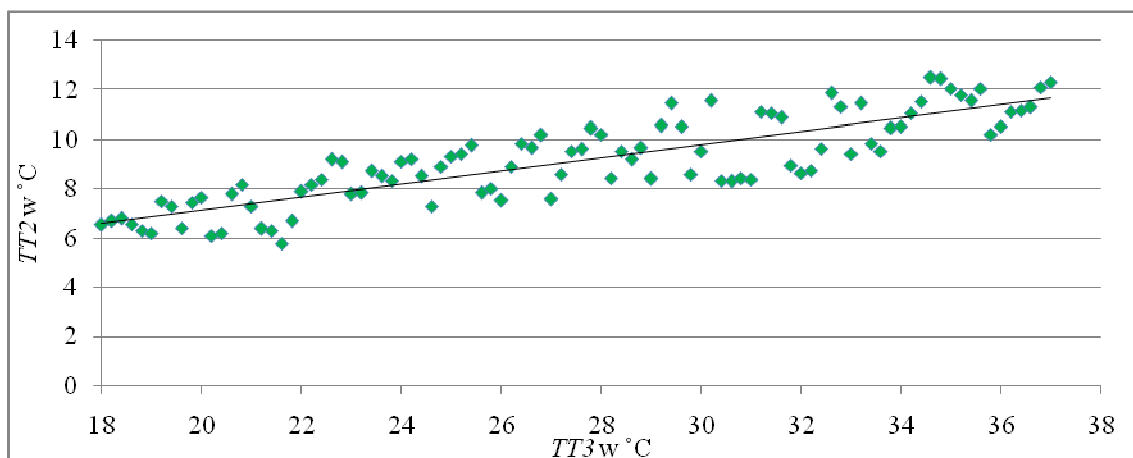
Rys. 7. Wykres mocy chłodniczej – P_{ch} agregatu adsorpcyjnego dla $TTI=55\pm 2,8^{\circ}\text{C}$

Postać funkcji aproksymującej rozkład mocy chłodniczej od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z urządzenia przyjęto w postaci (4).

$$P_{ch} = -0,004 \cdot (TT3)^2 + 0,021 \cdot (TT3) + 4,34 \quad [\text{kW}] \quad (4)$$

Najwyższą wartość mocy chłodniczej $P_{ch} = 3,67 \text{ kW}$ uzyskano dla temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła $TT3 = 18,6^{\circ}\text{C}$. Dla temperatury $TT3 > 32^{\circ}\text{C}$ moc chłodnicza agregatu zmalała do wartości poniżej 1 kW.

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład temperatury wody lodowej $TT2$ na wyjściu z agregatu adsorpcyjnego w zależności od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła $TT3$ dla temperatury gorącej wody zasilającej jednostkę chłodniczą $TTI = 55 \pm 2,8^{\circ}\text{C}$.



Rys. 8. Wykres temperatury wody lodowej – $TT2$ dla temperatury gorącej wody zasilającej agregat adsorpcyjny $TTI=55\pm 2,8^{\circ}\text{C}$

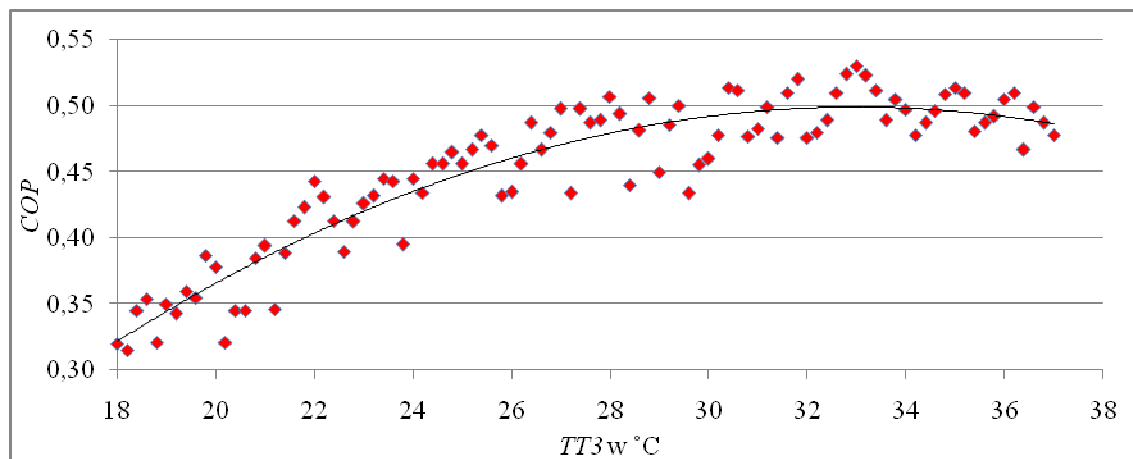
Postać funkcji aproksymującej temperaturę wody lodowej od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła przyjęto w postaci (5).

$$TT2 = 0,27 \cdot (TT3) + 1,83 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5)$$

Wraz ze wzrostem temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła rośnie również temperatura wody lodowej na wyjściu z agregatu.

4.2. Wyniki badań dla temperatury wody w obiegu zasilania agregatu $TTI=70 \pm 3,7^\circ\text{C}$

Na rysunku 9 przedstawiono wykres sprawności wytwarzania chłodu COP w funkcji temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła $TT3$ dla zadanej temperatury gorącej wody zasilającej agregat $TTI = 70 \pm 3,7^\circ\text{C}$.



Rys. 9. Wykres sprawności wytwarzania chłodu – COP agregatu adsorpcyjnego $TTI=70 \pm 3,7^\circ\text{C}$

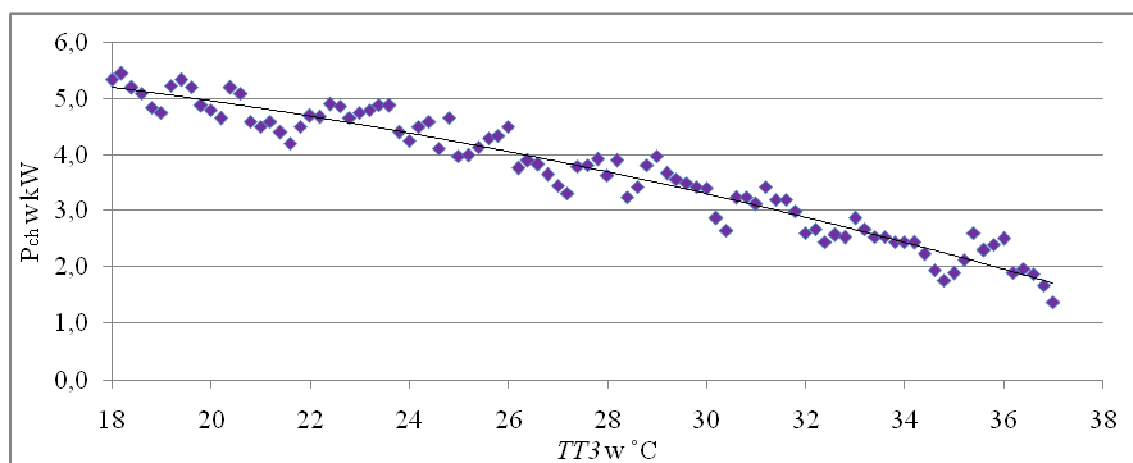
Zależność sprawności wytwarzania chłodu od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z agregatu można opisać funkcją kwadratową, przedstawioną w postaci (6).

$$COP = -0,001 \cdot (TT3)^2 + 0,052 \cdot (TT3) - 0,36 \quad (6)$$

Najwyższą wartość sprawności $COP = 0,53$ uzyskano dla temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła $TT3 = 33^\circ\text{C}$.

Przedstawione badania sprawności wytwarzania chłodu agregatu adsorpcyjnego wskazują na dużą zależność od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła. Wraz ze wzrostem temperatury gorącej wody zasilającej sorpcyjne urządzenie chłodnicze rozszerza się zakres maksymalnych sprawności, co powoduje ograniczenie wpływu temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła.

Na rysunku 10 przedstawiono rozkład mocy chłodniczej P_{ch} agregatu adsorpcyjnego w funkcji temperatury wody $TT3$.



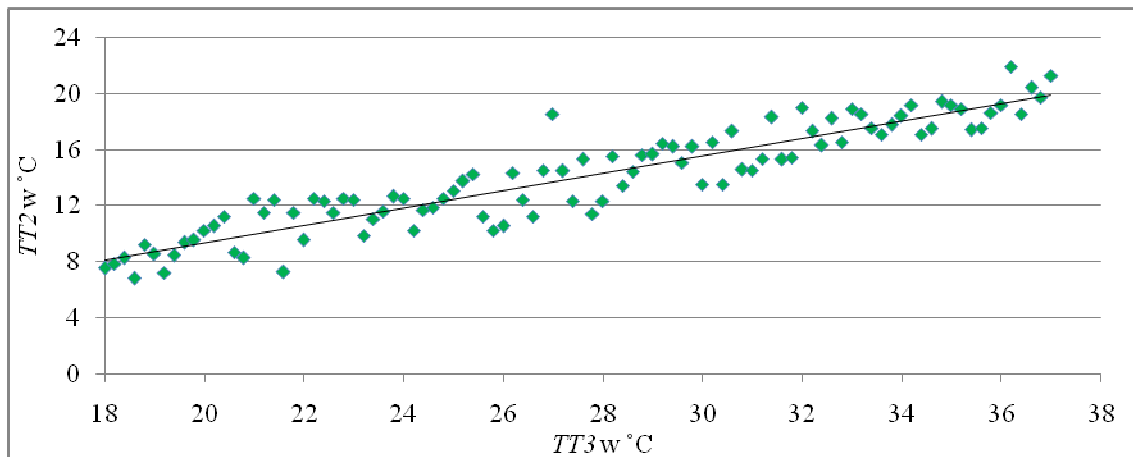
Rys. 10. Wykres mocy chłodniczej – P_{ch} agregatu adsorpcyjnego dla $TTI=70 \pm 3,7^\circ\text{C}$

Postać funkcji aproksymującej rozkład mocy chłodniczej od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z urządzenia przyjęto w postaci (7).

$$P_{ch} = -0,004 \cdot (TT3)^2 + 0,017 \cdot (TT3) + 6,1 \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

Najwyższą wartość mocy chłodniczej $P_{ch} = 5,45 \text{ kW}$ dla badanego zakresu uzyskano dla temperatury $TT3 = 18,2^\circ\text{C}$. Moc chłodnicza agregatu adsorpcyjnego rośnie wraz ze wzrostem temperatury gorącej wody zasilającej. Jest to spowodowane szybszą regeneracją złoża silikażelu.

Na rysunku 11 przedstawiono rozkład temperatury wody lodowej $TT2$ na wyjściu z agregatu adsorpcyjnego w zależności od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła $TT3$ dla temperatury gorącej wody zasilającej jednostkę chłodniczą $TT1 = 70 \pm 3,7^\circ\text{C}$.



Rys. 11. Wykres temperatury wody lodowej – $TT2$ dla temperatury gorącej wody zasilającej agregat adsorpcyjny $TT1 = 70 \pm 3,7^\circ\text{C}$

Zależność temperatury wody lodowej od temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z agregatu można opisać funkcją liniową, przedstawioną w postaci (8).

$$TT2 = 0,62 \cdot (TT3) - 3,1 \quad [^\circ\text{C}] \quad (8)$$

Dla całego zakresu przeprowadzonych badań wzrost temperatury gorącej wody zasilającej sorpcyjne urządzenie chłodnicze powoduje wzrost temperatury wody lodowej.

Badania wykazały możliwość uzyskania wysokich: sprawności wytwarzania chłodu oraz mocy chłodniczej adsorpcyjnego dwukomorowego agregatu chłodniczego, poprzez zmianę temperatury wody gorącej w obiegu zasilania tego agregatu. Sprawności wytwarzania chłodu oraz moc chłodniczą agregatu można także zmieniać poprzez zmianę temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła. Wyznaczone zależności opisujące powyższe parametry pracy pozwalają na dokonanie wyboru pomiędzy maksymalizacją mocy, a maksymalizacją sprawności, co w zależności temperatury dostępnego źródła ciepła stwarza możliwość efektywnego wykorzystania sorpcyjnego urządzenia chłodniczego przy jednoczesnym obniżeniu kosztów eksploatacyjnych.

5. Podsumowanie

Spadek zapotrzebowania na ciepło sieciowe w okresie letnim skutkuje niedociążeniem sieci ciepłowniczych i wpływa negatywnie na całoroczny bilans energetyczny przedsiębiorstw ciepłowniczych. W celu zwiększenia obciążenia sieci ciepłowniczych w okresie letnim możliwe staje się zagospodarowanie ciepła do zasilania adsorpcyjnych urządzeń chłodniczych, wytwarzających wodę lodową na potrzeby klimatyzacji.

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono silną korelację liniową pomiędzy temperaturą wody lodowej, a temperaturą wody w obiegu odprowadzenia ciepła z agregatu. Decydującymi parametrami wpływającymi na sprawność oraz moc chłodniczą badanego urządzenia mają zarówno temperatura gorącej wody zasilającej agregat, jak również temperatura wody w obiegu odprowadzenia ciepła. Dla określonej temperatury gorącej wody zasilającej sorpcyjne urządzenie chłodnicze wpływ temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła na sprawność oraz moc chłodniczą opisują funkcje kwadratowe. Wzrost temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła z urządzenia powoduje spadek mocy chłodniczej.

W celu ograniczenia wpływu temperatury wody w obiegu odprowadzenia ciepła, przy założonej charakterystyce mocy chłodniczej, do obiegu zasilania urządzenia adsorpcyjnego należy dostarczyć wodę o możliwie wysokiej temperaturze.

Przeprowadzone badania pozwalają ustalić podstawowe parametry wpływające na sprawność wytwarzania chłodu, moc chłodniczą oraz temperaturę wody lodowej adsorpcyjnego dwukomorowego agregatu chłodniczego. Uzyskane wyniki stwarzają możliwość dokładniejszej regulacji parametrów pracy urządzenia chłodniczego zasilanego z sieci ciepłowniczej, a tym samym pozwalają na obniżenie kosztów eksploatacyjnych.

Bibliografia

1. Allouache N., Chikh S., Bennacer R., Al Mers A. Modelling of heat and mass transfer in an adsorption solar cooling system. *Special Topics and Reviews in Porous Media: An International Journal*, 2013; 4: 197-205.
2. Chihara K., Suzuki M. Air drying by pressure swing adsorption. *J. Chem. Eng. Japan*, 1983; 16(4): 293-299.
3. Chua H.T., Ng K.C., Malek A., Kashiwagi T., Akisawa A., Saha B.B. Modelling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers. *International Journal of Refrigeration*, 1999; 22: 194-204.
4. Chua H.T., Ng K.C., Wang W., Yap C., Wang X.L. Transient modelling of a two-bed silica gel-water adsorption chiller. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004; 47: 659-669.
5. Gwadera M. Adsorpcja wody na silikażelu w adsorpcyjnych urządzeniach chłodniczych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2013; 52(4): 317-318.
6. Gwadera M., Kupiec K. Adsorption cooling as an effective method of waste heat utilization. *Chemistry*, 2011; 8:61-70.
7. Hokkanen V., Leskinen S., Aastrup B., Hammer F. Nowa technologia chłodu scentralizowanego dla Helsinek i Herning. *Ciepłownictwo w Polsce i na Świecie*, 1997; 1-2: 26-28.
8. Kantor R. Modelowanie hybrydowego obiegu chłodniczego przy wykorzystaniu program LabView. *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 2014; 3: 367-374.
9. Karwat B., Stańczyk E. Koncepcja wykorzystania ciepła odpadowego na przykładzie wybranych procesów technologicznych do wytwarzania wody lodowej na potrzeby klimatyzacji. *Chłodnictwo*, 2013; 9: 24-27.
10. Karwat B., Stańczyk E., Mazurek M. Wykorzystanie ciepła sieciowego do wytwarzania chłodu w procesie adsorpcji. *Chłodnictwo*, 2014; 5: 26-29.
11. Karwat B., Stańczyk E., Swatek M. Układ urządzeń do wytwarzania wody lodowej z wykorzystaniem ciepła z zakładów termicznej utylizacji odpadów. Patent - PL 404298 A1.

12. Khan M.Z.I., Sultana S., Akisawa A., Kashiwagi T. Numerical simulation of advanced adsorption refrigeration chiller with mass recovery. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, 2006; 3: 59-67.
13. Lindqvist Land A. Dynamiczny rozwój chłodu sieciowego. *Ciepłownictwo w Polsce i na Świecie*, 2001; 11-12: 202-203.
14. Miller E.B. The Development of Silica Gel, *Refrigerating Engineering in the American Society of Refrigerating Engineers*, 1929; 17(4): 103-108.
15. Mira-Hernandez C., Weibel J.A., Groll E.A., Garimella S.V. Compressed-liquid energy storage with an adsorption-based vapor accumulator for solar-driven vapor compression systems in residential cooling. *International Journal of Refrigeration*, 2016; 64: 176-186.
16. Pyrka P. Modelowanie trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej. *Zeszyty Energetyczne*, 2014, 1: 205-216.
17. Schroeder A., Łach J., Poskrobko S. Przegląd tendencji w zakresie wytwarzania wody lodowej w systemie trójgeneracji. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 2009; 11(3): 63-74.
18. Sekret R., Turski M. A concept for a solar adsorption cooling system. *Architecture Civil Engineering Environment*, 2012; 5(1): 71-78.
19. Sircar S., Hufton J.R. Why Does the Linear Driving Force Model for Adsorption Kinetics Work? *Adsorption*, 2000; 6: 137-147.
20. Smyk A., Pietrzyk Z. Czy w Polsce istnieje realna szansa na chłód z central zasilanych ciepłem systemowym. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 2010; 41/11: 400-407.
21. Smyk A., Sikora S.: Aspekty możliwości dostarczania ciepła z warszawskiego systemu ciepłowniczego na potrzeby pozyskiwania chłodu w okresie letnim. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 1999; 8: 5-9.
22. Smyk A., Sikora S. Możliwość dostarczania ciepła z systemu ciepłowniczego dla potrzeb pozyskiwania chłodu w okresie letnim. *Ciepłownictwo w Polsce i na Świecie*, 2000, zeszyt 5-6, str. 76-82.
23. Sourav M., Pramod K., Kandadai S., Pradip D. Development and performance studies of a nair cooled two-stage multi-bed silica gel and water adsorption system. *International Journal of Refrigeration*, 2015; Dostęp online.
24. Adsorption, Glossary, The Brownfields and Land Revitalization Technology Support Center, <https://brownfieldstsc.org/glossary.cfm?q=1>.