



Modelowanie trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej

AUTORZY: Piotr Pyrka^{a,*}

REKOMENDOWANE PRZEZ: Maciej Chorowski^a

^a Zakład Automatyki i Kriogeniki, Instytut Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych, Politechnika Wroclawska

* Adres do korespondencji: piotr.pyrka@pwr.edu.pl, tel. 71 320 45 28

STRESZCZENIE

Praca omawia możliwość skonstruowania trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej wykorzystującej parę roboczą woda–silikażel i pozwalającej na konwersję niskotemperaturowego ciepła (o temperaturze około 60 °C) na chłód. Chłodziarka taka mogłaby być zasilana ciepłem sieciowym pochodzącym z kogeneracji. Zastosowanie trzech adsorberów pozwala na zróżnicowanie ciśnienia adsorpcji i podwyższenie efektywności termodynamicznej urządzenia za cenę wytwarzania mocy chłodniczej na dwóch poziomach temperatury. Opisano budowę i zasadę działania takiej chłodziarki. Procesy zachodzące w chłodziarce adsorpcyjnej mogą zostać zamodelowane w oparciu o równania różniczkowe o stałych skupionych. Praca zawiera model matematyczny chłodziarki oraz wyniki symulacji pozwalające na optymalizację cyklu chłodziarki.

SŁOWA KLUCZOWE: *trigeneracja, adsorpcja, silikażel, modelowanie*

1. WPROWADZENIE

Trigeneracja jest systemem pozwalającym na równoczesne wytwarzanie energii elektrycznej, ciepła i chłodu, przy czym chłód jest uzyskiwany przy wykorzystaniu technologii sorpcyjnych i z użyciem ciepła pochodzącego z kogeneracji. Efektywny system trigeneracyjny powinien mieć zdolność konwersji na chłód ciepła o jak najniższej temperaturze, co pozwala na uzyskanie wysokiej efektywności kogeneracji. Dostępne komercyjnie technologie adsorpcyjne (chłodziarki z wodnym roztworem BrLi) pozwalają na wykorzystanie ciepła o temperaturze nie niższej niż około 85 °C. Mogą one być zespolone z systemami kogeneracyjnymi w bezpośrednim sąsiedztwie kogeneratorów, ale nie mogą być zasilane pochodzącym z kogeneracji ciepłem rozprowadzanym sieciami ciepłowniczymi i charakteryzującym się w okresie letnim temperaturą wynoszącą około 65 °C.

Prowadzone są obecnie badania nad technologiami umożliwiającymi konwersję ciepła o niższych parametrach. Najbardziej obiecującymi wynikami charakteryzują się chło-

dziarki adsorpcyjne działające na parze adsorbent – adsorbat: silikażel – woda. Niniejsza praca zajmuje się szczególnym przypadkiem takiej chłodziarki: trójzłożową dwuparownikową chłodziarką adsorpcyjną.

1.1. TRÓJZŁOŻOWA CHŁODZIARKA ADSORPCYJNA SILIKAŻEL - WODA

Opisywana chłodziarka posiada trzy adsorbery. Jest to dość nietypowa konfiguracja ponieważ najczęściej spotyka się chłodziarki dwu- lub cztero- złożowe. Nieparzysta liczba złożeń jest nowatorskim rozwiązaniem umożliwiającym efektywniejsze wykorzystanie zdolności adsorpcyjnych złoża przy pojedynczym cyklu pracy urządzenia. Równowaga adsorpcyjna złoża jest funkcją temperatury i ciśnienia. Temperatura złoża jest podnoszona w trakcie jego regeneracji, w pozostałych cyklach pracy złoże jest chłodzone wodą chłodzącą i jego temperatura jest bezpośrednio związana z temperaturą tej wody. Chłonność złoża, czyli wielkość określająca jaką masę wody jest w stanie zaadsorbować 1 kg silikażelu, w takim przypadku jest zależna tylko od ciśnienia i wraz z jego wzrostem zwiększa się jej wartość. Proces adsorpcji prowadzony pod wysokim ciśnieniem byłby optymalny ze względu na wykorzystanie chłonności złoża jednak z ciśnieniem sztywno skorelowana jest temperatura wrzenia wody. W parowniku (parowaczu) intensywnie parująca woda pod zmniejszonym ciśnieniem odbiera ciepło od przepływającej przez rurki wody lodowej generując tym samym moc chłodniczą. Temperatura wody lodowej jaką jesteśmy w stanie osiągnąć przez chłodziarkę jest więc związana z ciśnieniem panującym w parowniku i najniższe temperatury wody lodowej są osiągalne przy niskim ciśnieniu prowadzenia procesu adsorpcji. Istnieje więc konieczność wyboru pomiędzy niską temperaturą uzyskiwanego chłodu, a efektywnością urządzenia. W dwuparownikowej chłodziarce zastosowano kompromis pomiędzy efektywnością, a temperaturą uzyskiwanego chłodu. Moc chłodnicza generowana jest w dwóch parownikach na dwóch poziomach temperatury. Takie rozwiązanie umożliwia wytwarzanie mocy chłodniczej na niskim poziomie temperatury, przy niskim ciśnieniu nie pozwalającym na efektywne wykorzystanie chłonności złoża oraz mocy chłodniczej na nieco wyższym poziomie temperatury (4–8 °C różnicy) przy wyższym ciśnieniu zapewniającym dużą efektywność wykorzystania złoża. Jest to obecnie najbardziej efektywny sposób odbierania chłodu z chłodziarek adsorpcyjnych. Można sobie wyobrazić chłodziarki z większą liczbą poziomów generowania mocy chłodniczej. Umożliwiłoby to pracę bliżej warunków równowagi, jednak nakłady inwestycyjne na bardziej skomplikowane urządzenie i kolejne sieci odbioru chłodu byłyby niewspółmiernie wyższe od zysków z poprawy sprawności.

1.2. ADSORBENT – TERMICZNA SPRĘŻARKA CHŁODZIARKI

Chłodziarka posiada trzy adsorbery – są to złoża wypełnione adsorbentem. Złoża zostały zaopatrzone w instalację umożliwiającą zarówno ich ogrzewanie jak i chłodzenie. Adsorbent jest materiałem o bardzo rozwiniętej powierzchni. Powierzchnia jednego grama typowego adsorbentu ma wielkość około 300–800 m². Tak duże rozwinięcie powierzchni umożliwia prowadzenie procesów powierzchniowych, adsorpcja jest przykładem takiego procesu.

Adsorpcja jest wiązaniem się adsorbentu z powierzchnią adsorbentu. Adsorbentem najczęściej są cząsteczki, jednak mogą to być również atomy lub jony. Siły które powodują utrzymywanie adsorbentu na powierzchni mogą mieć charakter fizyczny – mówimy wtedy o adsorpcji fizycznej, lub siły te mogą mieć charakter chemiczny – taki proces nazywamy adsorpcją chemiczną inaczej chemisorpcją. Siły wiązania w adsorpcji chemicznej są znacznie większe niż w przypadku adsorpcji fizycznej w efekcie czego jest niemożliwe lub bardzo ciężkie przeprowadzenie procesu odwrotnego – desorpcji.

W przypadku adsorpcji fizycznej za wiązanie adsorbentu na powierzchni adsorbentu odpowiadają oddziaływania van der Waals'a. Są to najsłabsze oddziaływania międzycząsteczkowe, oddziaływania te powstają pomiędzy dwoma momentami dipolowymi z czego jeden z nich jest indukowany przez drugi trwały moment dipolowy, a w przypadku cząsteczek pozbawionych trwałego momentu dipolowego chwilowy moment dipolowy powstający przez fluktuację chmur elektronowych. Oddziaływania te odpowiadają między innymi za skraplanie gazów szlachetnych. Są one jednak na tyle słabe, że już drgania termiczne przy dość niskiej temperaturze mogą rozrywać te wiązania [1]. Ta własność wykorzystana jest w chłodziarce adsorpcyjnej podczas regeneracji złoża – podniesienie temperatury adsorbentu już o 25-40 °C jest wystarczające do zerwania większości wiązań adsorbent – adsorbent, tym samym przesunięcia równowagi procesu w kierunku desorpcji.

Silikażel zwany również żelazem krzemionkowym jest syntetycznie uzyskiwaną porowatą postacią tlenku krzemu (IV) czyli krzemionki. Substancja ta cechuje się wysoką odpornością chemiczną dlatego silikażel jest nietoksyczny i niepalny [2]. W Unii Europejskiej oraz USA został dopuszczony jako dodatek do żywności [3]. Istnieje pewne ryzyko w przypadku powstania pyłu silikażelu, który jest drażniący dla dróg oddechowych i może wywoływać pylicę. Żel krzemionkowy stosowany jest jako pochłaniacz wilgoci (np. w kapsułkach pojemników zawierających tabletki musujące). Z literatury [4] wynika, że najniższa temperatura potrzebna do regeneracji złoża chłodziarki adsorpcyjnej wymagana jest właśnie dla układu silikażel – woda. Badania pokazują, że już temperatura na poziomie 55 °C jest wystarczająca do regeneracji złoża chłodziarki adsorpcyjnej silikażel – woda.

1.3. KORZYŚCI WYNIKAJĄCE Z ZASILANIA CHŁODZIARKI CIEPŁEM O NISKICH PARAMETRACH

Tak niska temperatura zasilania chłodziarki otwiera szereg możliwych zastosowań tego urządzenia. Chłodziarkę można zasilić ciepłem geotermalnym, energią cieplną z kolektorów słonecznych, energią odpadową niektórych procesów lub ciepłem z miejskich sieci ciepłowniczych. Korzystanie z sieci ciepłowniczej lub wspieranie kolektorów słonecznych ciepłem z sieci ciepłowniczej wydają się najbardziej interesującymi rozwiązaniami. Rozwiązania te nie wymagają tak kosztownych instalacji jak w przypadku geotermii, wykorzystanie energii odpadowej może być natomiast zastosowane w zakładach chemicznych lub w innych rozwiązaniach przemysłowych.

Analizując obecne zainteresowanie systemami klimatyzacji w Polsce na tle krajów rozwiniętych można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że liczba zainstalowanych systemów klimatyzacji będzie rosła. Stosowanie systemów klimatyzacyjnych opartych na chłodziarkach adsorpcyjnych niesie za sobą wiele korzyści zarówno dla użytkowników tych systemów, firm wytwarzających ciepło w procesach kogeneracyjnych, jak i ekologii. Odbiorcom chłodu zależy na niskiej jego cenie: stosując chłodziarkę, która jako źródło energii wykorzystuje znacznie tańszą od energii elektrycznej energię cieplną można się spodziewać oszczędności. Można również liczyć na korzyści z funduszy proekologicznych ze względu na stosowanie rozwiązania znacznie mniej uciążliwych dla środowiska. Kolejnym istotnym faktem jest możliwości zasilania chłodziarki ciepłem z miejskiej sieci ciepłowniczej bez potrzeby jej przebudowy – Polska posiada rozbudowane sieci ciepłownicze, co pozwala na zasilanie chłodziarek adsorpcyjnych ciepłem sieciowym w większości dużych miast naszego kraju. Firmy energetyczne produkujące energię elektryczną i ciepło w skojarzeniu powinny również być zainteresowane rozwojem chłodnictwa opartego na chłodziarkach adsorpcyjnych. Rozwój tego typu rozwiązań zapewniłby odbiór ciepła w miesiącach letnich, a tym samym poprawiłby roczny bilans wykorzystania energii pierwotnej przez te przedsiębiorstwa.

Zwiększenie udziału chłodnictwa sorpcyjnego zmniejsza (w przypadku zastąpienia chłodziarki sprężarkowej) lub nieznacznie tylko zwiększa (w przypadku nowych instalacji) zapotrzebowania na energię elektryczną. Jest to o tyle ważne, że w krajach rozwiniętych obserwuje się duże zapotrzebowanie na energię elektryczną w miesiącach letnich z czego znaczna część tej energii wykorzystywana jest przez układy klimatyzacyjne. Zwiększa to ryzyko przeciążenia sieci energetycznej w najgorętszych dniach roku.

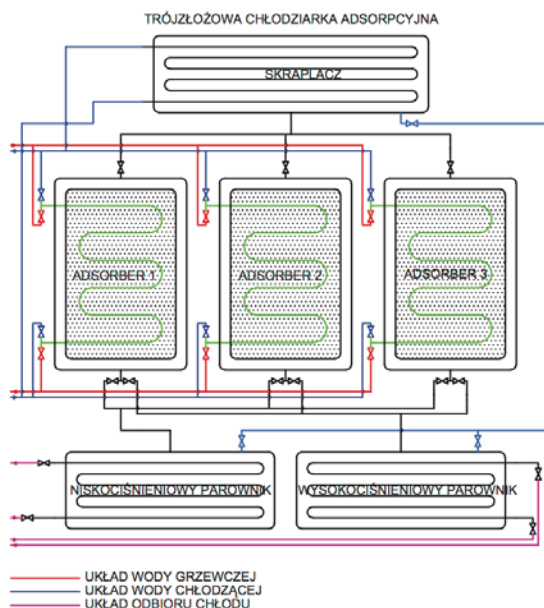
Korzyści ekologiczne z zastosowania chłodziarki adsorpcyjnej są dwojakiej natury. Pierwszą z nich jest brak stosowania niebezpiecznych i uciążliwych dla środowiska czynników roboczych takich jak freony. Druga zaleta tej chłodziarki wynika z zasilania ją energią cieplną. Pozwala to na stosowanie zarówno energii odnawialnych, energii odpadowych lub energii cieplnej z kogeneracji. Wszystkie te rozwiązania niosą ze sobą ograniczenie w emisji CO₂ i zanieczyszczeń powstałych przy konwencjonalnej produkcji energii elektrycznej.

2. ZASADA DZIAŁANIA CHŁODZIARKI ADSORPCYJNEJ

Chłodziarka składa się z 3 głównych elementów: kondensatora (skraplacza), złożeń wypełnionych adsorbentem oraz parowaczy (parowników). Schemat urządzenia pokazano na rys. 1. Dzięki procesowi adsorpcji zachodzącemu w złożach z adsorbentem następuje parowanie wody w parownikach. Parowanie odbywa się przy ciśnieniach 500–1200 Pa, czyli zbliżonych do ciśnienia pary nasyconej przy temperaturze około 5 °C (parownik niskociśnieniowy) i około 12 °C (parownik wysokociśnieniowy). Moc chłodniczą uzyskuje się w wyniku parowania wody pod zmniejszonym ciśnieniem. Niskie ciśnienie w parownikach uzyskuje się w wyniku pochłaniania pary wodnej przez adsorbent znajdujący

się w złożach – adsorberach. Złóża te wypełnione są silikazelem, który jest materiałem higroskopijnym (czyli pochłaniającym wodę). Adsorber posiada skończoną chłonność czyli może zaadsorbować określoną ilość adsorbentu (w tym przypadku wody). W podwyższonej temperaturze chłonność adsorbera jest znacznie niższa, co prowadzi do desorpcji części zaadsorbowanego adsorbentu. W efekcie powstaje para wodna, którą skrapla się przy ciśnieniu 3500–5000 Pa w kondensatorze oraz zregenerowane złożo adsorbera.

Wyróżniamy 3 główne etapy cyklu adsorbera. W pierwszym z nich chłodzony adsorber połączony jest z niskociśnieniowym parownikiem. Proces prowadzony jest do momentu, gdy stężenie zaadsorbowanej wody zbliży się do stężenia równowagowego dla tych warunków temperatury i ciśnienia, a tym samym spadnie siła napędowa procesu adsorpcji. W tym momencie przełączany jest parownik z niskociśnieniowego na wysokociśnieniowy. Wzrost ciśnienia powoduje przesunięcia stanu równowagowego w kierunku adsorpcji czyli umożliwia kontynuowanie procesu. Analogicznie do poprzedniego etapu, kończy się on w momencie gdy stężenie adsorbentu zbliży się do stanu równowagi adsorpcyjnej. Następnie adsorber przechodzi w stan regeneracji złoża polegająca na ogrzewaniu adsorbera połączonego ze skraplaczem. Etap ten zamyka sekwencję pracy adsorbera. Podczas pracy chłodziarki każde z trzech złóż jest w innym etapie cyklu (współpraca z parownikiem niskociśnieniowym, parownikiem wysokociśnieniowym lub skraplaczem) zapewniając ciągłą pracę urządzenia.



Rys. 1. Schemat trójzłozowej dwuparownikowej chłodziarki adsorpcyjnej

3. MODEL MATEMATYCZNY

Wewnątrz chłodziarki zachodzi wiele różnych procesów. Znając zależności między nimi oraz właściwości substancji można opisać językiem matematycznym zachowanie danego urządzenia. Ze względu na ograniczony czas oraz koszty obliczeniowe nie jesteśmy w stanie opisać wszystkich procesów i zależności mających miejsce w maszynie. Stosując jednak pewne uproszczenia możemy skonstruować model chłodziarki w oparciu o kilka głównych zależności wpływających na działanie maszyny. Są nimi:

- prawo zachowania masy i energii,
- równowaga adsorpcji w zależności od ciśnienia i temperatury,
- kinetyka procesu adsorpcji.

Model zbudowany na tych równaniach z dobrą dokładności opisuje zachowanie się chłodziarki, może on służyć do symulacji różnych warunków pracy i analizy zachowania urządzenia. Zaletą takiego modelu jest małe zapotrzebowanie na moc obliczeniową. Model ten stanowi również podstawę do stworzenia bardziej zaawansowanych modeli, uwzględniających kolejne czynniki wpływających na pracę urządzenia.

3.1. RÓWNANIA WYKORZYSTANE W MODELU

Do opisu procesu adsorpcji wykorzystano równanie modelu kinetycznego LDF (Linear Driving Force) [10], wzór nr 1:

$$\frac{dq}{dt} = K(T_{sg})(q^* - q) \quad (1)$$

Współczynnik proporcjonalności w równaniu kinetyki procesu adsorpcji obliczony został wg równania 2:

$$K(T_{sg}) = \frac{15D_{s0}}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT_{sg}}} \quad (2)$$

Równowaga adsorpcyjna jest funkcją ciśnienia i temperatury. Do jej obliczenia posłużono się równaniem empirycznym nr 3, gdzie $A(T_{sg})$ i $B(T_{sg})$ są wielomianami pokazanymi na równaniach 4 i 5. Współczynniki równania nr 2 zostały wyznaczone doświadczalnie przez Chihara i Suzuki [9], a współczynniki równań 4 i 5 wyznaczone zostały przez japońskiego producenta silikazelu [8]. Współczynniki równania 2, 4 i 5 zostały zebrane w tabeli 1:

$$q^* = A(T_{sg}) \frac{P}{p_{sat}(T_{sg})} e^{B(T_{sg})} \quad (3)$$

gdzie:

$$A(T_{sg}) = A_0 + A_1 T_{sg} + A_2 T_{sg}^2 + A_3 T_{sg}^3 \quad (4)$$

$$B(T_{sg}) = B_0 + B_1 T_{sg} + B_2 T_{sg}^2 + B_3 T_{sg}^3 \quad (5)$$

Tabela 1. Doświadczalnie wyznaczone współczynniki równań

Stała	Wartość	Stała	Wartość	Stała	Wartość
D_{SO}	2,54E-4 m ² /s	A_0	-6,5314	B_0	-15,587
R_p	1,7E-4 m	A_1	0,072452 K ⁻¹	B_1	0,015915 K ⁻¹
E_a	4,2E4 J/mol	A_2	-0,23951E-3 K ⁻²	B_2	-0,050612E-3 K ⁻²
		A_3	0,25493E-6 K ⁻³	B_3	0,53290E-6 K ⁻³

Z bilansu energii można wyznaczyć zależności opisujące dynamikę zmiany temperatury dla elementów składowych chłodziarki. Równanie nr 6 opisuje dynamikę zmiany temperatury adsorbenta podczas procesu adsorpcji. Równanie nr 7 ma zastosowanie dla adsorbenta podczas procesu desorpcji. Równanie nr 8 wykorzystane jest dla obu parowników. Równanie nr 9 stosuje się do obliczenia dynamiki zmian temperatury skraplacza:

$$\frac{dT_{ads}}{dt} = \frac{M_{sg} \frac{dq}{dt} [H_{ads} + C_p (T_{par} - T_{ads})] + \dot{m}_{chl_ads} C_w (T_{we_chl} - T_{wy_chl_a})}{C_A M_{ads} + M_{sg} (C_{sg} + q C_w)} \quad (6)$$

$$\frac{dT_{des}}{dt} = \frac{M_{sg} \frac{dq}{dt} H_{ads} + \dot{m}_{grz} C_w (T_{we_grz} - T_{wy_grz})}{C_A M_{ads} + M_{sg} (C_{sg} + q C_w)} \quad (7)$$

$$\frac{dT_{par}}{dt} = \frac{M_{sg} \frac{dq}{dt} H_{par} + \dot{m}_{lod} C_w (T_{we_lod} - T_{wy_lod})}{C_{par} M_{par} + M_{wod_par} C_w} \quad (8)$$

$$\frac{dT_{skr}}{dt} = \frac{M_{sg} \frac{dq}{dt} [H_{par} + C_p (T_{ads} - T_{skr})] + \dot{m}_{chl_skr} C_w (T_{we_chl} - T_{wy_chl_s})}{C_{skr} M_{skr} + M_{wod_skr} C_w} \quad (9)$$

Znając współczynniki przenikania ciepła materiału, z którego wykonano wymiennik ciepła, powierzchnię wymiennika, temperaturę wody zasilającej wymiennik, temperaturę panującą w elemencie wyposażonym w ten wymiennik ciepła oraz przepływ masowy wody można obliczyć temperaturę cieczy opuszczającej dany wymiennik, co pokazano we wzorze 10:

$$T_{wy_x} = \frac{T_{we_x} - T_x}{\frac{K_x A_x}{\dot{m}_x C_w}} + T_x \quad (10)$$

Korzystając z zależności nr 10 trzeba mieć na uwadze, że założyliśmy stały rozkład temperatury po drugiej stronie wymiennika ciepła oraz rozkład temperatury cieczy przepływającej wzdłuż wymiennika wynika jedynie z procesu wymiany ciepła. Pierwsze założenie wynika z ogólnie przyjętych założeń do tego modelu.

Drugie założenie nie będzie spełniane w momencie zmiany cykli adsorpcja/desorpcja, kiedy ma miejsce skokowa zmiana temperatury zasilającej wymiennik i trzeba mieć tego świadomość podczas analizy wyników.

Wzór nr 11 przedstawia sposób obliczenia mocy chłodniczej. Współczynnik wydajności chłodniczej został wyliczony wg wzoru nr 12:

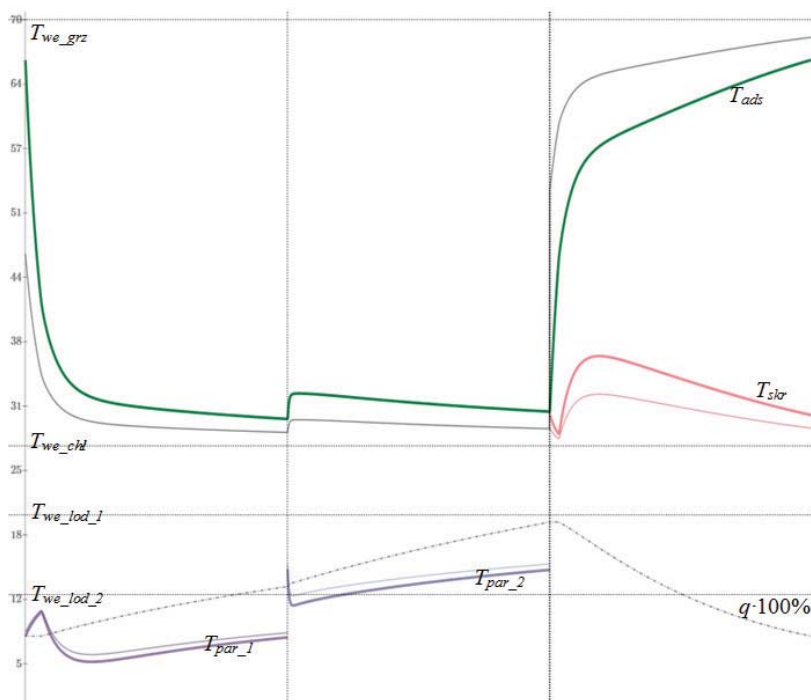
$$P = \int_0^{\tau_{\text{cykl}}} \frac{\dot{m}_{\text{lod}_1} C_w (T_{\text{we_lod}_1} - T_{\text{wy_lod}_1}) + \dot{m}_{\text{lod}_2} C_w (T_{\text{we_lod}_2} - T_{\text{wy_lod}_2})}{\tau_{\text{cykl}}} dt \quad (11)$$

$$COP = \frac{P}{\int_0^{\tau_{\text{cykl}}} \frac{\dot{m}_{\text{grz}} C_w (T_{\text{we_grz}} - T_{\text{wy_grz}})}{\tau_{\text{cykl}}} dt} \quad (12)$$

3.2. PRZYKŁADOWE SYMULACJE

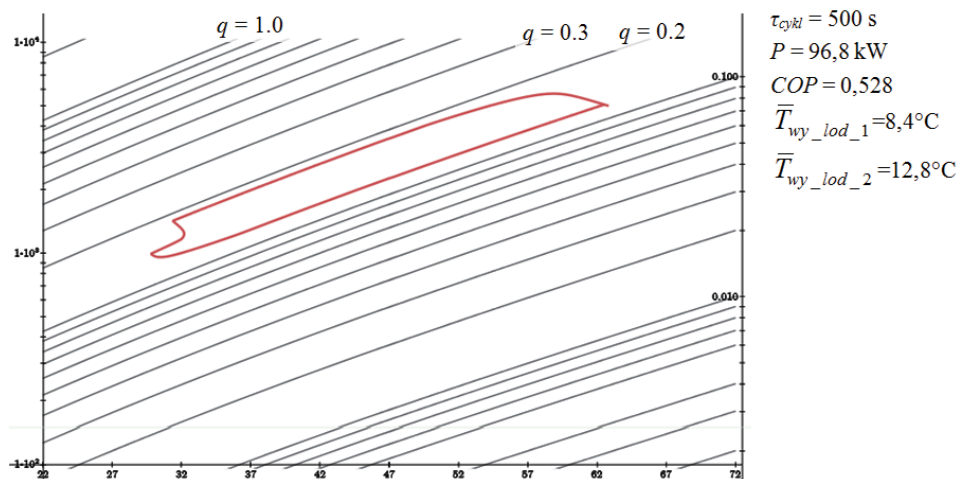
Poniższe symulacje zostały przeprowadzone dla następujących temperatur cieczy zasilających chłodziarkę:

$$T_{\text{we_grz}} = 70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{\text{we_chl}} = 27 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{\text{we_lod}_1} = 12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{\text{we_lod}_2} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \tau_{\text{cykl}} = 1000 \text{ s}$$

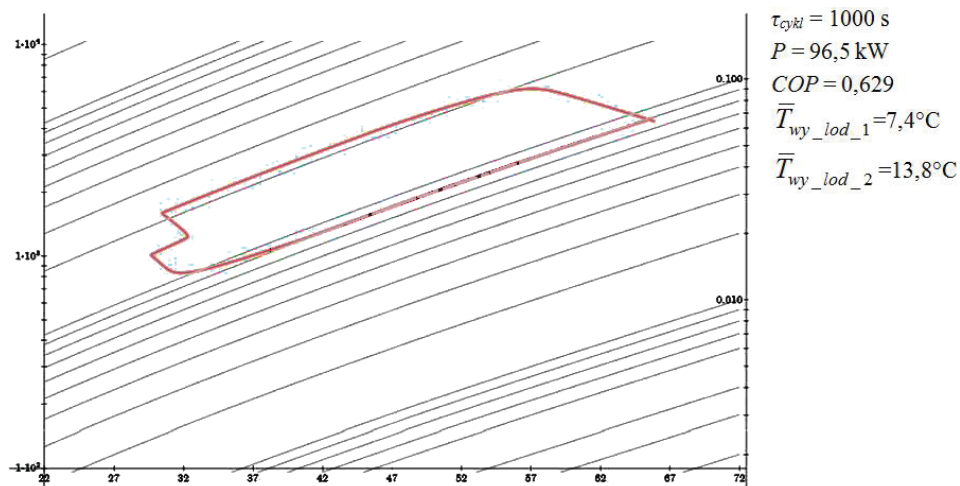


Rys. 2. Temperatury elementów składowych chłodziarki ($^{\circ}\text{C}$), temperatury cieczy opuszczających chłodziarkę ($^{\circ}\text{C}$) oraz stopień zaadsorbowania (%) w zależności od czasu dla $\tau_{\text{cykl}} = 1000 \text{ s}$

Na rys. 2 przedstawiono przebieg temperatur w czasie dla elementów (grubsza linia), oraz cieczy opuszczających element składowy chłodziarki (cieńszą linią tego samego koloru). Na wykresie pokazano również aktualny stopień zaadsorbowania złoża (w % w celu dopasowania skali).



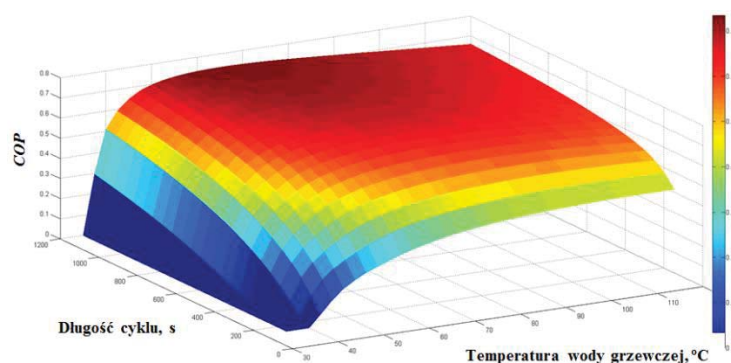
Rys. 3. Obieg termodynamiczny adsorbentu na skali logarytmicznej ciśnienia (Pa) od temperatury (°C) z zaznaczonymi izosterami adsorpcji dla $\tau_{cykl} = 500$ s



Rys. 4. Obieg termodynamiczny adsorbentu na skali logarytmicznej ciśnienia (Pa) od temperatury (°C) z zaznaczonymi izosterami adsorpcji dla $\tau_{cykl} = 1000$ s

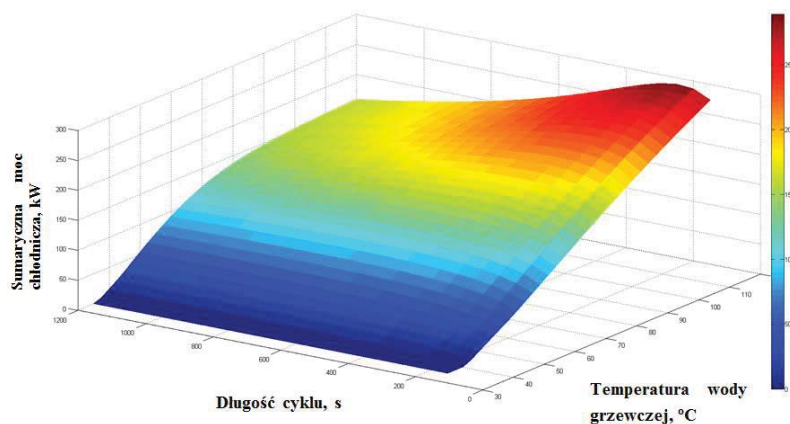
Analiza wykresów przedstawionych na rys. 2–4 ułatwia zrozumienie zasady działania chłodziarki adsorpcyjnej. Na rys. 3–4 przedstawione zostały ciśnienia oraz temperatury jakie panują w złożu podczas pracy chłodziarki. Dodatkowo zaznaczone zostały izostery, czyli linie łączące punkty o stałym stopniu zaadsorbowania. Po prawej

strony tych wykresów przedstawione zostały najważniejsze parametry pracy chłodziarki czyli moc chłodnicza, współczynnik wydajności chłodniczej, oraz średnie temperatury wody lodowej opuszczającej parowniki.



Rys. 5. Zależność COP od temperatury wody grzewczej oraz długości cyklu

Na wykresie przedstawiającym zależność COP od temperatury wody grzewczej (rys. 5) można zaobserwować, że dla małej różnicy temperatur pomiędzy wodą grzewczą a chłodzącą COP gwałtownie maleje. Jest to spowodowane tym, że tak niewielka różnica temperatur nie umożliwia regeneracji złoża. Można też zauważyć, że maksymalne COP dla stałej długości cyklu zmienia się od wody gorętszej przy krótkich cyklach do wody o niższej temperaturze przy dłuższych czasach cyklu. Zjawisko to można wytłumaczyć tym iż przy dłuższych czasach cyklu woda o temperaturze już około 50 °C wystarcza do desorpcji złoża. Podniesienie temperatury wody grzewczej przy długich cyklach spowoduje niewiele lepszą regenerację złoża, podczas gdy spora część ciepła zostanie wykorzystana na podniesienie temperatury silikażelu oraz współpracującego z nim wymiennika ciepła.



Rys. 6. Przykładowa zależność mocy chłodniczej chłodziarki od czasu cyklu i temperatury wody grzewczej

Na rys. 6 przedstawiono wykres zależności sumarycznej mocy chłodniczej od czasu cyklu i temperatury wody grzewczej. Moc chłodziarki rośnie wraz ze zwiększaniem temperatury wody grzewczej. Dzieje się tak, ponieważ wzrost tej temperatury umożliwia zdesorbowanie większej ilości wody w krótszym czasie. Zmniejszanie czasu cyklu do pewnego momentu podnosi moc chłodniczą urządzenia jednak po osiągnięciu maksimum obserwuje się szybki spadek wydajności urządzenia. Spowodowane jest to znacznym udziałem czasu potrzebnego na zmianę temperatury złoża w pojedynczym cyklu pracy.

4. WNIOSKI

Przedstawiona została koncepcja trójzłozowej dwuparownikowej chłodziarki adsorpcyjnej. Taka konstrukcja powinna zapewnić wysoką sprawność urządzenia oraz niską temperaturę wody lodowej. Pokazany został sposób w jaki można zamodelować zachowanie takiego urządzenia. Przedstawiony model matematyczny nie uwzględnia strat i oporów, tym samym może służyć do określenia maksymalnego współczynnika wydajności chłodniczej możliwego do osiągnięcia przez chłodziarki tego typu. Wyniki symulacji pozwalają również prześledzić takie parametry jak ciśnienie i temperaturę złoża w trakcie pracy oraz przebieg temperatury wody lodowej.

OZNACZENIA

q	– stopień zaadsorbowania (kg adsorbentu/ kg adsorbentu),
q^*	– równowagowy stopień zaadsorbowania,
K	– współczynnik równania kinetycznego adsorpcji,
T_{ads}	– temperatura adsorbera podczas procesu adsorpcji,
T_{des}	– temperatura adsorbera podczas procesu desorpcji,
T_{par}	– temperatura parownika,
T_{skr}	– temperatura skraplacza,
T_{we_chl}	– temperatura wody chłodzącej wchodzącej do chłodziarki,
T_{we_grz}	– temperatura wody grzewczej zasilającej chłodziarkę,
T_{we_lod}	– temperatura wody lodowej wchodzącej do chłodziarki,
T_{wy_chl}	– temperatura wody chłodzącej wychodzącej z chłodziarki,
T_{wy_grz}	– temperatura powrotu wody grzewczej,
T_{wy_lod}	– temperatura wody lodowej wychodzącej z chłodziarki,
$\bar{T}_{wy_lod_1,2}$	– średnia temperatura wody lodowej wychodzącej z parownika (1 – niskociśnieniowego, 2 – wysokociśnieniowego),
M_{sg}	– masa silikażelu, założono 350 kg,
M_{ads}	– masa adsorbera, założono 300 kg,
M_{par}	– masa parownika, założono 300 kg,
M_{skr}	– masa skraplacza, założono 350 kg,
M_{wody_par}	– masa wody w parowniku, założono 25 kg,
M_{wody_skr}	– masa wody w skraplaczu, założono 15 kg,

K_x	– współczynnik przenikania ciepła wymiennika elementu składowego chłodziarki,
A_x	– powierzchnia wymiennika ciepła elementu składowego chłodziarki, założono iloczyn K_x i A_x równy 20 kW/K dla adsorbera i parowników, oraz 25 kW/K dla skraplacza,
C_{sg}	– ciepło właściwe silikażelu przyjęto 921 J/kgK,
C_w	– ciepło właściwe wody przyjęto,
C_p	– ciepło właściwe pary wodnej,
C_{ads}	– ciepło właściwe materiału adsorbera, założono 500 J/kgK,
C_{par}	– ciepło właściwe materiału parownika, założono 500 J/kgK,
C_{par}	– ciepło właściwe materiału skraplacza, założono 500 J/kgK,
•	
m_{chl_ads}	– przepływ masowy wody chłodzącej adsorber,
•	
m_{chl_skr}	– przepływ masowy wody chłodzącej skraplacz,
•	
m_{grz}	– przepływ masowy wody grzewczej,
•	
m_{lod}	– przepływ masowy wody lodowej,
τ_{cykl}	– czas cyklu chłodziarki,
P	– moc chłodnicza,
COP	– współczynnik wydajności chłodniczej.

LITERATURA

- [1] **Atkins Peter William:** *Chemia Fizyczna*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [2] http://www.poch.com.pl/1/wysw/utworz_pdf.php?nr_karty=1367.
- [3] <http://www.accessdata.fda.gov/scripts/fdcc/?set=GRASNotices&id=321>.
- [4] **Demir H, Mobedi M, Ülkü S.:** *A review on adsorption heat pump: problems and solutions*, *Energy Rev.* 12, 2381–2403, 2008.
- [5] **Aep Saepul Uyun, Takahiko Miyazaki, Yuki Ueda, Atsushi Akisawa:** *Experimental investigation of a three-bed adsorption refrigeration chiller employing an advanced mass recovery cycle*, *Energies*, Vol.2, 3, 531–544, 2009.
- [6] **D.C. Wang, Z.Z. Xia, J.Y. Wu, R.Z. Wang, H. Zhai, W.D. Dou:** *Study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction*, *Int. J. Refrigeration*, 28, 1073–1083, 2005.
- [7] **H.T. Chua, K.C. Ng, A. Malek, T. Kashiwagi, A. Akisawa, B.B. Saha:** *Modeling and performance of two-bed, silica gel–water adsorption chiller*, *Int. J. Refrigeration*, 22, 194–204, 1999.
- [8] NACC. PTX data for the silica-gel/water pair, manufacturer's, proprietary data, Tokyo: Nishiyodo Air Conditioning Co. Ltd., 1992.
- [9] **Chihara K, Suzuki M.:** *Air drying by pressure swing adsorption*, *J Chem Engng Japan*, 16(4), 293–299, 1983.
- [10] **S. Sircar, J.R. Hufton:** *Why Does the Linear Driving Force Model for Adsorption Kinetics Work?*, *Adsorption* 6, 137–147, 2000.
- [11] **Alexander Solodov Valery Ochkov:** *Differential Models An Introduction with Mathcad*, Springer Berlin Heidelberg New York, Berlin, 2005.