



Chłodzenie adsorpcyjne z wykorzystaniem złóż fluidalnych

Piotr Boruta, Tomasz Bujok, Łukasz Mika

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Katedra Maszyn Ciepłych i Przepływowych
e-mail: bujok@agh.edu.pl

Streszczenie

Jednym z perspektywicznych rozwiązań dla branży chłodniczej jest chłodzenie wykorzystujące zjawisko adsorpcji. Technologia ta umożliwia ograniczenie zużycia energii w chłodnictwie, które w znacznej mierze odpowiada za rosnącą globalną konsumpcję energii.

Przedmiotem artykułu jest analiza możliwości rozwoju technologii adsorpcyjnych. Głównym ograniczeniem chłodziarek adsorpcyjnych jest niska intensywność wymiany ciepła i masy w złożu, co prowadzi do niskiej wydajności, a w konsekwencji problemów z komercjalizacją tego rozwiązania.

Głównym celem opracowania jest analiza możliwości poprawy transportu ciepła i masy w złożu adsorpcyjnym poprzez zastosowanie złoża fluidalnego. W pracy poddano dyskusji różne stosowane obecnie w przemyśle konstrukcje złóż fluidalnych i oceniono je pod względem możliwości aplikacji w chłodziarkach adsorpcyjnych. Przeanalizowano działanie chłodziarki adsorpcyjnej z czynnikiem pośredniczącym, jak i zapewniającej chłodzenie bezpośrednie.

Po przeglądzie dostępnych danych literaturowych przedstawiono możliwości oraz potencjalne ograniczenia związane z rozwojem tej technologii. Ponadto wskazano przypuszczalny kierunek prowadzenia badań doświadczalnych, który obejmuje mechaniczne mieszanie materiału w złożu.

Słowa kluczowe: chłodziarki adsorpcyjne, złoża fluidalne, przegląd rozwiązań

1. Wprowadzenie

W 2018 roku całkowite światowe zużycie energii elektrycznej wyniosło prawie 24 739 TWh, z czego około 2075 TWh stanowiło zapotrzebowanie na energię dla celów chłodzenia [1]. Ponadto od kilku lat obserwuje się dynamiczny wzrost wykorzystania energii chłodniczej w budynkach [1]. Dynamika wzrostu jest skorelowana ze wzrostem zamożności ludzi, a także wzrostem średnich i maksymalnych temperatur powietrza na Ziemi w ostatnich latach [2]. Obserwowany trend negatywnie wpływa na ziemskie ekosystemy, co przejawia się ich zubożeniem. W związku z tym zmiany klimatyczne będą głównym tematem najbliższych światowych szczytów klimatycznych. Ostatni szczyt, który odbył się w 2018 r. w Katowicach, zakończył się podpisaniem tzw. Pakietu Katowickiego. Główne założenia tego porozumienia to konieczność ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz rozwijanie strategii zrównoważonego rozwoju [2]. Wspomniane zadania łączą się z potrzebą zwiększenia efektywności energetycznej, co jest kluczowym elementem walki z globalnym ociepleniem, a co więcej, odpowiedzią na rosnące zużycie energii [1].

W ciągu najbliższych lat sektor chłodniczy i klimatyzacji będzie w głównej mierze odpowiedzialny za rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną. Zasadniczym wyzwaniem będzie zatem modernizacja przemysłu chłodniczego, która powinna koncentrować się na wyborze najbardziej energooszczędnej technologii. Branża chłodnicza powinna umożliwić zaspokojenie rosnącego zapotrzebowania na chłód, a jednocześnie ograniczyć tempo wzrostu zużycia energii elektrycznej w sektorze. Rozwiązaniem, które wydaje się odpowiadać na te potrzeby, jest chłodzenie oparte na zjawisku sorpcji. Fenomen sorpcji polega na tym, że umożliwia chłodzenie za pomocą urządzeń zasilanych energią cieplną. Ponadto zależenie od zastosowanej technologii możliwe jest wykorzystanie ciepła w różnych zakresach temperatur. Chłodzenie adsorpcyjne jest szczególnie interesującym sposobem chłodzenia, ze względu na możliwość wykorzystania ciepła niskotemperaturowego oraz niskie zużycie energii elektrycznej w procesie.

Tabela 1. Przegląd systemów chłodzenia [3]–[9]

Metoda chłodzenia	Chłodziarka sprężarkowa	Chłodziarka absorpcyjna	Chłodziarka adsorpcyjna	Chłodzenie osuszające
Typ chłodzenia	sprężarkowy	System sorpcyjny		
Rodzaj kompresji	mechaniczna	termiczna	termiczna	hybrydowa
Źródło zasilania	energia elektryczna	ciepło >90°C	ciepło 55–90°C	ciepło 50–100°C
Czynnik chłodniczy	np. amoniak, CO ₂ , wodorofluorowęglowodory, węglowodory	absorbat, np. woda	adsorbat, np. woda	–
Wydajność	3,0–5,0	0,6–1,0	0,2–0,7	0,3–0,5

Dane zebrane w tab. 1 przedstawiają porównanie podstawowych metod chłodzenia, w celu odniesienia urządzeń sorpcyjnych do klasycznych agregatów sprężarkowych. Główną różnicą między przedstawionymi metodami chłodzenia jest rodzaj energii napędowej. Sprężarkowe agregaty chłodnicze potrzebują energii elektrycznej, a urządzenia sorpcyjne wykorzystują do napędu energię cieplną. Niemniej jednak chłodziarki absorpcyjne wykorzystują niewielką ilość energii elektrycznej do napędzania pompy cyrkulacyjnej, a systemy osuszające wymagają energii do napędu dodatkowego systemu chłodzenia (najczęściej sprężarkowego). Na tym tle wyróżniają się chłodziarki adsorpcyjne, w których energia elektryczna służy jedynie na potrzeby automatyki i sterowania [10]. W związku z tym chłodzenie adsorpcyjne ma spośród wymienionych systemów chłodniczych największy potencjał, aby ograniczyć tempo wzrostu zużycia energii elektrycznej w chłodnictwie i klimatyzacji. Inne zalety technologii sorpcyjnych to możliwość wykorzystania substancji naturalnych jako czynników chłodniczych oraz możliwość wyboru systemu chłodzenia bezpośredniego i pośredniego [11]. Systemy sorpcyjne mają jednak kilka wad, takich jak duża masa, znaczne rozmiary i wysokie koszty inwestycyjne [12], [13]. Ponadto największa dysproporcja między rozpatrywanymi technologiami chłodniczymi to wartość współczynnika wydajności COP (ang. *coefficient of performance*), który jest kilkakrotnie wyższy dla agregatów sprężarkowych. Bezpośrednie porównanie współczynników COP prowadzi jednak do błędnych wniosków, ze względu na różne źródła energii w procesach. Problem ten można wyjaśnić za pomocą równań (1) i (2), które obrazują najprostszą formę wyznaczania współczynników efektywności:

$$COP_{\text{sprężarkowy}} = \frac{CC}{EP} \quad (1)$$

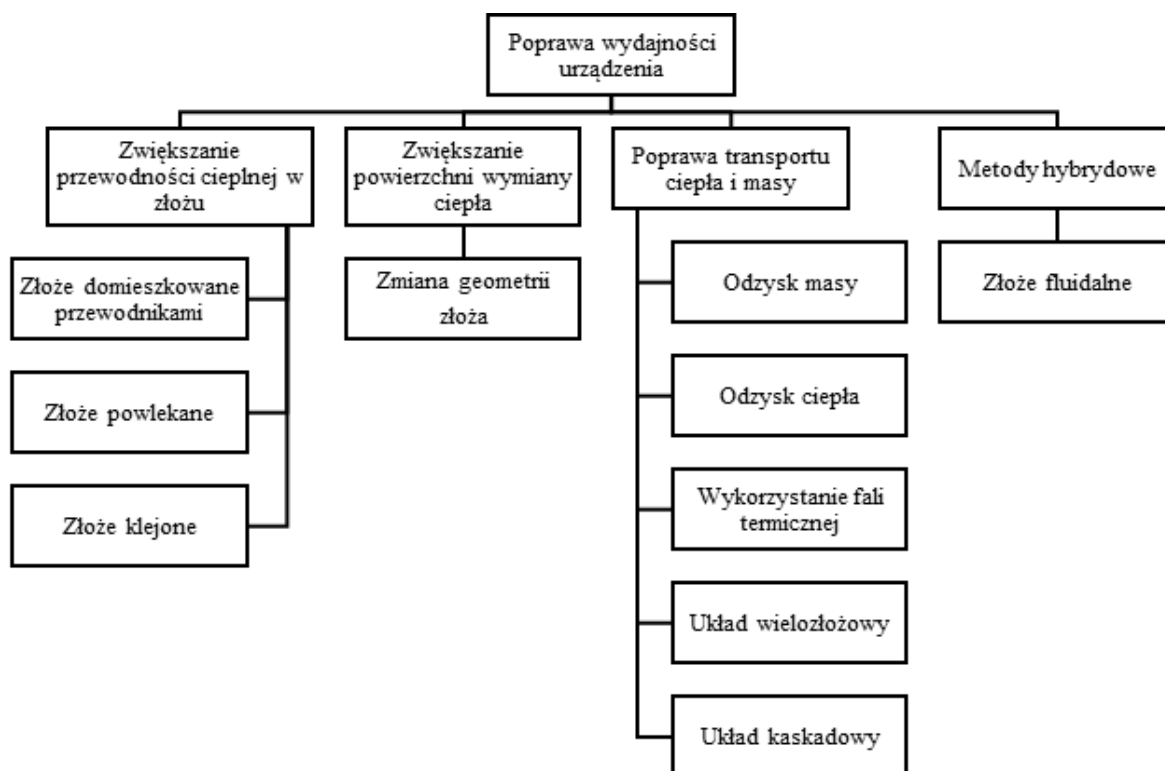
$$COP_{\text{sorpcyjny}} = \frac{CC}{HP} \quad (2)$$

gdzie CC (ang. *cooling capacity*) oznacza wydajność chłodniczą [W], EP (ang. *electric power*) moc elektryczną [W], a HP (ang. *heating power*) dostarczoną moc grzewczą [W] [14]. Zgodnie z równaniami (1) i (2) poszczególne wartości COP nie są bezpośrednio porównywalne, ze względu na różną jakość energetyczną energii elektrycznej i ciepła. Jakość energii można opisać za pomocą entropii ilościowej lub egzergii [15]. Zgodnie z teorią termodynamiki można wyróżnić energię wysokiej jakości (np. energię elektryczną) i niskiej jakości (np. ciepło). Tak więc wartość współczynnika COP dla urządzenia sorpcyjnego nie musi odpowiadać wartości COP dla urządzenia sprężarkowego.

Wszystkie poruszone aspekty prowadzą do wniosku, że chłodzenie adsorpcyjne może w przyszłości okazać się istotną technologią dla przemysłu chłodniczego [15]. Technologia ta pozwala na:

- zmniejszenie zużycia energii elektrycznej,
- wykorzystanie naturalnego czynnika chłodniczego,
- zastosowanie wielu różnych materiałów sorpcyjnych,
- zwiększenie efektywności energetycznej większych systemów energetycznych poprzez wykorzystanie ich ciepła odpadowego.

Adsorpcyjne agregaty chłodnicze są przedmiotem intensywnych badań, jednak nadal istnieją pewne krytyczne kwestie do rozwiązania. Głównymi ograniczeniami istniejących układów są mało intensywne przekazywanie ciepła między wymiennikiem ciepła a materiałem złoża (ze względu na jego porowatość) oraz niewydajny transport ciepła i masy w procesach adsorpcji i desorpcji urządzenia [10], [11].



Rys. 1. Klasyfikacja technik poprawy współczynnika COP

Wiele badań wykazało, że istnieje co najmniej kilka sposobów na poprawę wydajności chłodziarki adsorpcyjnej (rys. 1). Wszystkie przedstawione metody są warte rozważenia, ponieważ chłodzenie adsorpcyjne wymaga wielu usprawnień. Współczynnik COP zależy od przepływu ciepła oraz masy, natomiast współczynnik SCP (ang. *specifying cooling power*) od konstrukcji złoża adsorpcyjnego i wykorzystanego materiału sorpcyjnego. Cykl pracy adsorpcyjnego agregatu chłodniczego jest złożony, dlatego przy doskonaleniu danego parametru należy pamiętać o pozostałych aspektach i przede wszystkim o ogólnym efekcie energetycznym.

W literaturze przedmiotu dostępnych jest wiele prac traktujących o możliwościach poprawy współczynnika COP dla chłodziarek adsorpcyjnych

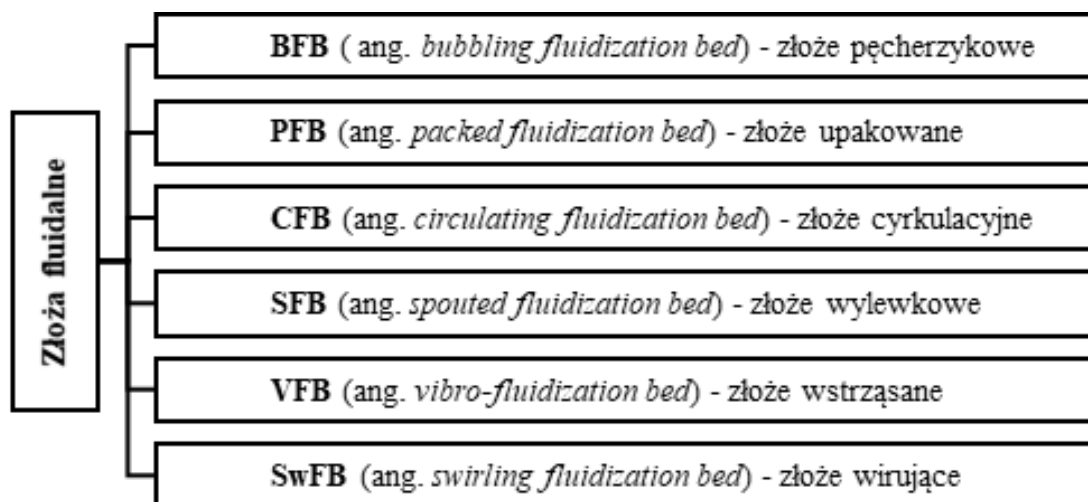
[13], [16]–[28]. Tatlier i in. [16], Grabowska i in. [17] oraz Calabrese i in. [18] dokonali oceny powlekanego wymiennika ciepła pod kątem zmniejszenia oporów kontaktowych między powierzchnią wymiany ciepła a adsorbentem. Bahrehmand i in. [19] oraz Gediz i in. [20] sprawdzali wpływ zwiększenia powierzchni wymiany ciepła na wydajność chłodniczą, adsorpcję i desorpcję. Odpowiednio dobrana geometria wymiennika ciepła pozwala na znaczne skrócenie czasu adsorpcji i desorpcji, czego konsekwencją jest mniejsze zapotrzebowanie na ciepło do regeneracji złoża. Zhaohong i in. [23], Dechang i in. [24], Khan i in. [26] oraz Chahbani i in. [27] dokonali oceny możliwości zastosowania odzysku ciepła i masy w układach wielozłożowych. Taki system pozwala na obniżenie temperatury desorpcji przy zachowaniu ciągłości procesu chłodzenia. Eliminuje to niekorzystne wahania wydajności chłodniczej, które są charakterystyczne dla systemów jednozłożowych. Odzysk ciepła z kolei można poprawić poprzez zastosowanie cyklu fal termicznych [13], które zwiększają efektywność procesu. Ostatnia metoda poprawy współczynnika *COP* nosi nazwę hybrydowej, ze względu na równoczesne zwiększenie powierzchni wymiany ciepła oraz intensyfikację transportu ciepła i masy. Zjawisko fluidyzacji polega na podnoszeniu małych cząstek ciał stałych w strumieniu gazu. Fakt ten jest szeroko stosowany w procesach spalania, suszenia i reakcji chemicznych, ponieważ dynamizuje procesy fizyczne i chemiczne. Z tego względu zastosowanie złoża fluidalnego może rozwiązać główny problem chłodzenia adsorpcyjnego – poprawić wymianę ciepła i masy. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie wymaganej ilości sorbentu oraz poprawa wydajności urządzenia.

Celem niniejszego artykułu jest przegląd, porównanie i omówienie badań przeprowadzonych w zakresie chłodzenia adsorpcyjnego w oparciu o złoża fluidalne. Analizie poddano również bezpośrednie i pośrednie układy chłodnicze. Ponadto zestawiono różne typy geometrii złóż fluidalnych wykorzystywanych w przemyśle i możliwość ich aplikacji w chłodziarkach adsorpcyjnych. Głównym punktem docelowym przeglądu jest wskazanie kierunku dalszych badań.

2. Typy złóż fluidalnych

Złoża fluidalne są powszechnie wykorzystywane w przemyśle. Niemniej jednak złożoność zjawiska fluidyzacji wiąże się z potrzebą analizy wszystkich parametrów procesu. W związku z tym zastosowanie fluidyzacji w chłodzeniu adsorpcyjnym wymaga uwzględnienia geometrii złoża, rodzaju materiału sorpcyjnego, prędkości fluidyzacji, temperatury desorpcji, rodzaju mechanizmu fluidyzacji, rozszerzania się złoża, czasu trwania poszczególnych cykli pracy, trwałości materiału sorpcyjnego oraz podatności wymiennika na ścieranie. Na podstawie wymienionych elementów, wpływa-

jących na jakość transportu ciepła i masy w złożu adsorpcyjnym, opracowano podział złożów fluidalnych (rys. 2).



Rys. 2. Typy złożów fluidalnych

Można stwierdzić, że podstawowym typem złoża fluidalnego jest złoże pęcherzykowe. Mechanizm jego działania polega na dostarczaniu gazu z dna złoża, co powoduje ruch cząstek ku górze. Ten typ złoża zastosowano w chłodzeniu adsorpcyjnym, np. w pozycjach [13], [28]. Ponadto BFB są powszechnie stosowane do wychwytywania dwutlenku węgla w procesach spalania, w oparciu o wykorzystanie materiału adsorpcyjnego. Mimo tego, że przeprowadzono wiele badań aplikacyjnych złożów BFB, to każde zastosowanie wymaga analizy reżimu fluidyzacyjnego ze względu na jego silne uzależnienie od parametrów procesu. Powszechnym problemem związanym z wykorzystaniem BFB jest występowanie efektu bypassu (ślizganie się cząstek), który znacznie ogranicza transport ciepła i masy w złożu [29]. Z kolei zaletą BFB jest możliwość ograniczenia nagrzewania się złoża za pomocą podnoszenia prędkości fluidyzacji [30]. W celu eliminacji słabych stron BFB stworzono na bazie ich geometrii inne typy złożów, których specyfika pozwala na bardziej efektywną fluidyzację.

Szereg badań, jak przykładowo [31]–[33], przeprowadzono na upakowanych złożach fluidyzacyjnych, gdzie proces mieszania zachodzi w przestrzeniach między cząstkami większymi od materiału złoża. Taka struktura złoża umożliwia bardziej chaotyczny ruch cząstek – bardziej jednorodny proces fluidyzacji, a w konsekwencji lepszy transport ciepła i masy w złożu [34]. Ponadto PCB pozwalają na efektywny transport ciepła i masy przy prędkości fluidyzacji mniejszej niż w konwencjonalnym złożu fluidalnym [35], [36]. Co więcej, reżim fluidyzacji złożów upakowanych jest silnie uzależniony od rodzaju stosowanego materiału złoża. Zastosowanie PFB pozwala na uzyskanie szerszego zakresu możliwych prędkości fluidyzacji niż w przypadku BFB, w odniesieniu do tych samych materiałów sorpcyjnych [34].

Innym rodzajem złoża fluidalnego jest złoże cyrkulacyjne, które umożliwia ciągły przebieg procesu. Tego typu złoża najczęściej składają się z dwóch lub więcej komór, a ich odpowiednia geometria pozwala na wykorzystanie zjawiska fluidyzacji do cyrkulacji cząstek między złożami adsorpcyjnym i desorpcyjnym, tak jak w [28], [37]. CFB zapewniają homogeniczną fluidyzację i bardzo dobre mieszanie cząstek, jednak każda geometria i warunki pracy wymagają analizy możliwych lokalizacji martwych stref.

Kolejnym typem złóż wymienionym w podziale (rys. 2) jest złoże wylwane, gdzie gaz fluidyzacyjny dostarczany jest punktowo od dołu, co powoduje intensywną fluidyzację i cyrkulację cząstek, np. jak w badaniach Sutkara [38]. Ten typ złoża jest połączeniem CFB i BFB. Modyfikacja SFB polega na lokalizacji komory fluidyzacyjnej w centralnej części złoża, gdzie dostarczane jest medium fluidyzujące. Cząsteczki docierając do górnej części komory „wylewają się” na boki, gdzie swobodnie opadają, wracając do komory centralnej. Głównym problemem tego typu złóż jest agregacja drobnych cząsteczek, co utrudnia swobodny opad materiału. Zjawisko to wymusza konieczność analizy stosowanych materiałów pod kątem występujących sił kohezyjnych [39].

Najbardziej wyróżniającym się na tle pozostałych złóż jest złoże drgające. Ten typ złoża jest powszechnie stosowany w procesach suszenia, ponieważ zbyt wilgotny materiał może powodować problemy z zagęszczaniem cząstek. Z drugiej strony, delikatne drgania pozwalają na przeprowadzenie zjawiska fluidyzacji z prędkością niższą od minimalnej prędkości fluidyzacji, przy jednoczesnej poprawie jednorodności procesu [40]. Celem wprowadzenia drgań jest przeciwdziałanie siłom kohezyjnym między cząsteczkami, minimalizacja efektu bypass-u i powstawaniu aglomeratów. Ruch może być realizowany poprzez drgania mechaniczne lub akustyczne, pulsacyjny przepływ powietrza lub za pomocą pól elektrycznych/magnetycznych [41].

Ostatnim typem złoża jest wirujące złoże fluidalne, które charakteryzuje się ruchem wirowym materiału. Niewielki dopływ powietrza powoduje, że wykorzystany materiał zaczyna fluidyzować [43]. Dla tego typu złoża szczególnie ważna jest geometria i dobór prędkości obrotowej. Siła odśrodkowa, będąca następstwem ruchu wirowego, powoduje przesuwanie materiału do zewnętrznej strony złoża i jego ubytek w centralnej części.

Wśród przedstawionych (tab. 2 i 3) zastosowań różnych typów złóż najczęściej wykorzystywane i badane są BFB i CFB. Tabela 2 zawiera zestawienie stosowanych złóż i charakterystycznych parametrów procesowych dla zastosowań chłodniczych. Natomiast w tabeli 3 przedstawiono geometrię złóż powszechnie stosowanych w innych gałęziach przemysłu.

Tabela 2. Schematy złożeń fluidalnych stosowanych w chłodnictwie

Odniesienie	Typ złoża	Cechy procesu	Schemat złoża
Hamed i in. [43]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> • używane w chłodzeniu osuszającym • materiał złoża to silikażel • wydajność to 80 W/kg • cyrkulacja materiału między złożami bez dodatkowej energii 	
Hamed i in. [31]	PFB	<ul style="list-style-type: none"> • PCB składający się z warstw • cząsteczki upakowane mają średnicę 9 mm • badanie jakości suszenia i wpływu rozwarstwienia na ilość adsorpcji wody 	
Hamed i in. [43]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> • materiał złoża to silikażel • max. temperatura regeneracji to 90°C • SCP wynosi 80 W/kg, dla prędkości fluidyzacji 2 m/s • złożo jest pochylone o 45° • brak obserwacji martwych stref 	
Chen i in. [28]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> • osuszanie powietrza w systemie klimatyzacji • materiał złoża to silikażel • analizowane prędkości fluidyzacji to 4/5/6 m/s, a temperatury desorpcji to 40/50/60°C 	
Chiang i in. [37]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> • układ stosowany w procesie osuszania • wykorzystano dwa materiały: silikażel (3 mm) oraz cząstki poliakrylu (2 mm) • ciągła cyrkulacja bez udziału dodatkowej energii napędowej 	

Tabela 2 cd.

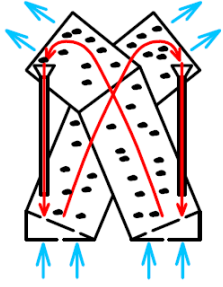
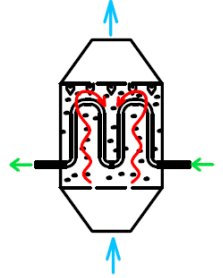
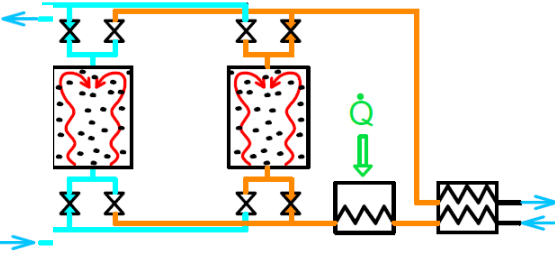
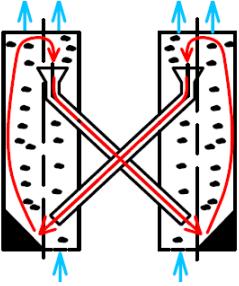
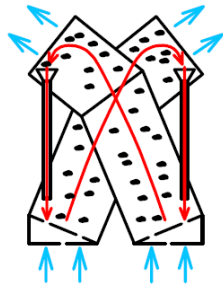
Chiang i in. [37]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> wykorzystano dwa materiały: silikażel (3 mm) oraz cząstki poliakrylu (2 mm) proces ma przebieg ciągły bez udziału dodatkowej energii napędowej wysoka jakość mieszania przyspieszenie prędkości cząstek poprzez stosowanie rur pionowych 	
Wang i in. [13]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> analiza przebiegu procesów adsorpcji oraz desorpcji materiał złoża to węgiel aktywny o średnicy cząstek 0,55 mm wykorzystany adsorbat to R134 (zamiast wody) 	
Rogala i in. [44]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> proces chłodzenia sorpcyjnego z osuszaniem zastosowano odzysk ciepła po cyklu adsorpcji zalecany rozmiar cząsteczek powinien przekraczać 1 mm 	
Chiang i in. [37]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> układ stosowany w procesie osuszania wykorzystano dwa materiały: silikażel (3 mm) oraz cząstki poliakrylu (2 mm) ciągła cyrkulacja bez udziału dodatkowej energii napędowej 	
Chiang i in. [37]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> wykorzystano dwa materiały: silikażel (3 mm) oraz cząstki poliakrylu (2 mm) proces ma przebieg ciągły bez udziału dodatkowej energii napędowej wysoka jakość mieszania przyspieszenie prędkości cząstek poprzez stosowanie rur pionowych 	

Tabela 2 cd.

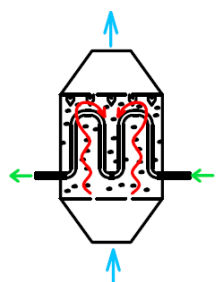
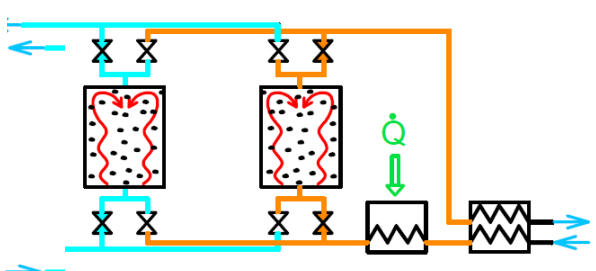
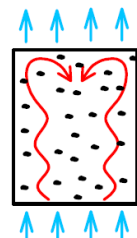
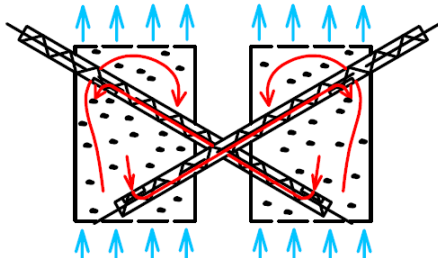
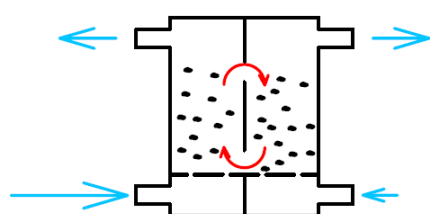
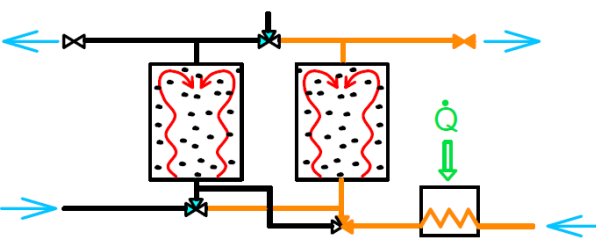
Wang i in. [13]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> analiza przebiegu procesów adsorpcji oraz desorpcji materiał złoża to węgiel aktywny o średnicy cząstek 0,55 mm wykorzystany adsorbat to R134 (zamiast wody) 	
Rogała i in. [44]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> proces chłodzenia sorpcyjnego z osuszaniem zastosowano odzysk ciepła po cyklu adsorpcji zalecany rozmiar cząsteczek powinien przekraczać 1 mm 	
Rogała i in. [45]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> badanie procesów adsorpcji i desorpcji badany materiał złoża to silikażel analizowane cząsteczki są w rozmiarach 1–5 mm 	
Horibe i in. [22]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> dwie komory (złoża) połączone przenośnikami ślimakowymi do transportu cząstek między złożami proces zachodzi w sposób ciągły, ale z wykorzystaniem dodatkowej energii do napędu przenośników 	
Reichhold i in. [46]	CFB	<ul style="list-style-type: none"> system stosowany w wielu procesach fizykochemicznych zachodzi ciągła cyrkulacja materiału dla węgla aktywnego (0,5–1 mm) minimalna prędkość fluidyzacji to 0,22 m/s 	
Chen i in. [47]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> złoża fluidalne (dwukomorowe) praca cykliczna – na przemian z regeneracją stosowane w klimatyzacji do osuszania powietrza materiał złoża to silikażel o średnicy 5 mm 	

Tabela 3. Schematy złóż fluidalnych stosowane w procesach przemysłowych innych niż chłodzenie

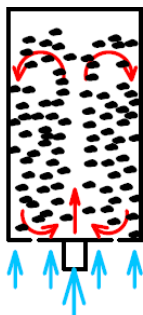
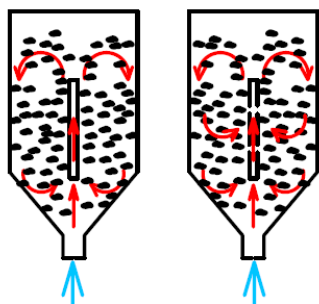
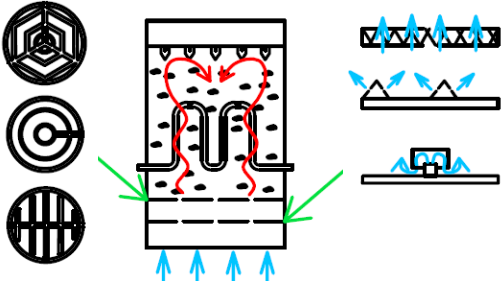
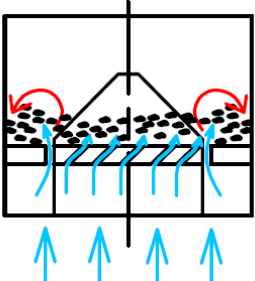
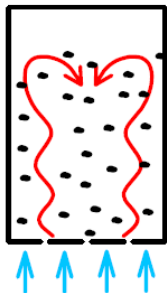
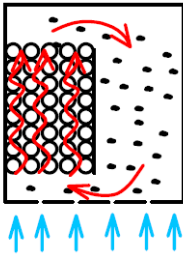
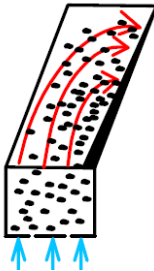
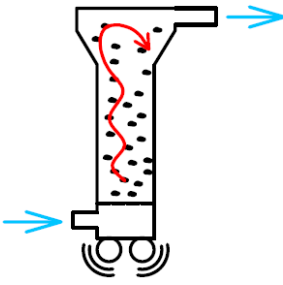
Odniesienie	Typ złoża	Cechy procesu	Schemat złoża
Sutkar i in. [38]	SFB/CFB	<ul style="list-style-type: none"> zastosowanie złoża w procesach takich jak: granulacja, powlekanie, suszenie, piroliza i spalanie wprowadzenie pary wodnej do gazu – nawilża cząsteczki i obniża obciążenie elektrostatyczne 	
Sutkar i in. [38]	SFB	<ul style="list-style-type: none"> możliwość wykorzystania materiału o średnicy 0,6–6 mm na dole złoża znajdują się szklane kulki, a na górze filtr, co zabezpiecza złoże przed ubytkami materiału wysoka jakość fluidyzacji piasku i węgla krzemowego 	
Cocco i in. [49]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> przedstawiono kilka typów dysz rozpraszających gaz fluidyzujący w złożu występowanie chaotycznych turbulencji ograniczenie efektu bypass-u 	
Mohideen i in. [42]	SwFB	<ul style="list-style-type: none"> złoże charakteryzujące się kątowym wtryskiem gazu i ruchem wirowym materiału użyto cząstek o średnicy od 3 do 9 mm konieczność stosowania dmuchawy i silnika 	
Herce i in. [53]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> zastosowanie do reformingu parowego metanu w celu produkcji wodoru występują ograniczenia co do wielkości stosowanych cząstek, ponieważ jeśli granulat jest zbyt mały, powstają kolumny fluidyzacyjne 	

Tabela 3 cd.

Song i in. [32]	PFB	<ul style="list-style-type: none"> • testowanie przebiegu fluidyzacji w PFB • zastosowano dwa rodzaje złożeń o różnej geometrii siatki • materiał to FCC Katalizator w proszku o średnicy 0,054 mm 	
Doroodchi i in. [54]	BFB	<ul style="list-style-type: none"> • badanie wpływu struktury złoża (nachylenia) na proces fluidyzacji • złożo składa się z 2 części: pionowej cylindrycznej i pochylonej stożkowej 	
Lehmann i in. [41]	VFB	<ul style="list-style-type: none"> • stosowanie VFB do suszenia żywności i produktów farmaceutycznych • drgania pozwalają na zmniejszenie frakcji pęcherzyków i obniżenie minimalnej prędkości fluidyzacji • badania prowadzone w skali laboratoryjnej (małe rozmiary układu) 	

Analizując dane eksperymentalne zebrane w tab. 2 należy stwierdzić, że w chłodnictwie i klimatyzacji wykorzystywane są głównie złoża CFB i BFB. Ponadto przedstawione schematy złożeń odnoszą się przede wszystkim do systemów osuszających. Trzeba jednak pamiętać, że chcąc uzyskać odpowiednie osuszenie materiału i zapewnić niezbędną moc układu, to systemy te wymagają dużej masy materiału sorpcyjnego, a to wpływa na niską wartość SCP, jak np. w badaniach Hameda [43], co jest ewidentnie wadą tego rozwiązania. Co więcej, w większości przypadków chłodnictwo opiera się na chłodzeniu pośrednim.

Zgodnie z danymi zawartymi w tab. 2 i 3 można stwierdzić, że minimalna prędkość medium fluidyzującego zmienia się w zależności od materiału i typu złoża – jest najniższa dla złożeń VFB, PFB oraz SwFB. Prędkość jest bardzo istotna ze względu na zależność rosnącego zużycia energii i obniżania efektywności układu wraz ze wzrostem minimalnej prędkości fluidyzacji. Ponadto wysoka wartość prędkości fluidyzacji generuje dużą liczbę zderzeń cząstek i wysoką dynamikę procesu, co w dłuższej perspektywie czasowej może doprowadzić do degradacji materiału złoża [40], [55]. W związku z tym należałoby w badaniach analizować niszczenie się materiału złoża, co

wymaga prowadzenia większej ilości serii pomiarowych i dłuższego czasu badań.

Prowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wymiana ciepła w złożu upakowanym jest nawet 260% lepsza niż w złożu konwencjonalnym [35]. Ponadto cykl adsorpcji dla złoża fluidalnego jest do 6,5 razy szybszy niż dla złoża stałego [13], a wymiana ciepła w BFB jest do 30 razy lepsza niż w złożu nieruchomym [56]. Te wyniki jednoznacznie świadczą o słuszności podejmowania tematu wykorzystania fluidyzacji w kontekście chłodzenia adsorpcyjnego, ale aplikacja w chłodziarce adsorpcyjnej złóż zestawionych w tab. 2 i 3 napotyka szereg ograniczeń. Chłodzenie adsorpcyjne wymaga zapewnienia odpowiednich parametrów procesu, by zapewnić wydajną pracę urządzenia. Dla danego typu złoża i zastosowania zawsze istnieje optymalna masa adsorbentu, ciśnienie, temperatura, dla których wymiana ciepła i masy zachodzi najwydajniej. Ponadto cykl adsorpcji chłodziarki pracującej z wodą jako czynnikiem chłodniczym wymaga utrzymania niskiego ciśnienia. To właśnie ten fakt wpływa w głównej mierze na dobór konstrukcji złoża sorpcyjnego. Należy zauważyć, że układy przedstawione w tab. 2 i 3 wykorzystują zjawisko fluidyzacji w celu poprawy dynamiki prowadzonych procesów, ale w zazwyczaj dotyczą one procesów prowadzonych przy ciśnieniu atmosferycznym. Nieliczne badania, jak np. [57], [58] traktują o przebiegu zjawiska fluidyzacji w niskim ciśnieniu, rzędu kilku kPa. Niestety, wraz ze spadkiem ciśnienia wzrasta minimalna prędkość fluidyzacji. Dodatkowo wspomniane publikacje ograniczają się tylko do badania złóż BFB, ze względu na fakt konieczności utrzymania wysokiej szczelności układu, co jest utrudnione w przypadku bardziej skomplikowanych typów złóż, jak np. CFB, SwFB, SFB. Autorzy pracy oceniają, że złoża fluidyzowane mechanicznie stwarzają najwięcej możliwości jeśli chodzi o utrzymanie niskiego ciśnienia, a jednocześnie zapewnienia dobrego mieszania, czyli transportu ciepła i masy w złożu. Stosowanie sił zewnętrznych, jak drgania mechaniczne czy pole elektrostatyczne/magnetyczne lub nakładanie się kilku tych sił, wymaga jeszcze głębszego zbadania. Poza efektem energetycznym, wynikającym z prowadzenia procesu, ważna jest również analiza zachowania materiału złoża, czy nie ulega rozdrobnieniu albo ubijaniu na skutek wstrząsów. Jest to problem niejako analogiczny do problemu doboru prędkości fluidyzacji w klasycznych złożach fluidyzowanych powietrzem.

Zawsze należy mieć na uwadze, że stosowanie fluidyzacji to dodanie kolejnej zmiennej do procesu, co wymaga szeregu dodatkowych analiz. Na podstawie danych doświadczalnych zebranych w tab. 2 i 3 można zaobserwować, że poszczególne badania skupiają się na analizie pojedynczych składowych procesu, jak: czas adsorpcji/desorpcji, wymiana ciepła oraz masy, przewodność cieplna złoża, strata ciśnienia w złożu, dobór prędkości fluidyzacji, czy analiza różnych materiałów sorpcyjnych. Należy mieć na uwadze, że współczynnik *COP* to funkcja wszystkich tych zmiennych i po przeanalizowaniu doświadczalnie poszczególnych składowych, potrzeba jeszcze analizować

całość procesu i tego, jak poszczególne rozwiązania i ich superpozycja wpłyną na końcowy efekt energetyczny, co jest ostatecznie najbardziej istotnym elementem prowadzonych analiz.

3. Analiza zastosowań złóż fluidalnych w agregatach chłodniczych

Złóża fluidalne mogą być stosowane w dwóch rodzajach agregatów chłodniczych – adsorpcyjnych z czynnikiem chłodniczym oraz osuszających z bezpośrednim chłodzeniem powietrza. Chłodzenie bezpośrednie charakteryzuje się bezpośrednią wymianą ciepła i masy między medium chłodzonym, a materiałem złoża adsorpcyjnego. Chłodzenie pośrednie z kolei wymaga zastosowania czynnika pośredniczącego, którym w znacznej liczbie przypadków może być woda. Oba rodzaje chłodzenia mają zalety i wady, które określają konkretne możliwości ich aplikacji.

3.1. Zastosowanie złóż fluidalnych w osuszaczach

Chłodzenie osuszające polega na usuwaniu wilgoci z powietrza w złożu adsorpcyjnym, a następnie jego nawilżaniu, które wiąże się z odbiorem ciepła. Standardowo proces osuszania realizowany jest przez wymienniki obrotowe, których konstrukcja oparta jest o stałe złoża sorpcyjne zamontowane na ruchomej ramie. Główną wadą tego typu rozwiązań są znaczne spadki ciśnienia, powodujące większe zużycie energii napędowej. Dodatkowo konieczne jest zastosowanie większych wymienników w celu zapewnienia odpowiedniej wydajności układu chłodzenia. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie złoża fluidalnego.

Chen i in. [28] badali zastosowanie cyrkulacyjnego złoża fluidalnego jako systemu osuszającego w układach klimatyzacji. Złoża fluidalne, w porównaniu do stałego, powoduje mniejszy spadek ciśnienia (o około 30%) oraz wzrost wydajności adsorpcji/desorpcji o odpowiednio niespełna 23% i 20%. Ponadto proponowana konstrukcja pozwala na ciągłą pracę systemu bez użycia dodatkowego silnika do transportu materiału sorpcyjnego z komory adsorpcyjnej do desorpcyjnej. W efekcie zmniejsza się zużycie energii, a zwiększa wydajność systemu chłodzenia. Podczas adsorpcji wzrasta temperatura powietrza wylotowego, co ma negatywny wpływ na wydajność procesu chłodzenia. Dlatego tak ważne jest dążenie do obniżenia temperatury powietrza wylotowego ze złoża. Badania przeprowadzone przez Chena i in. [47] pokazują, że zastosowanie złoża fluidalnego pozwala na obniżenie temperatury powietrza wylotowego o 30% w stosunku do złoża stałego. Jest to spowodowane lepszym mieszaniem złoża, dzięki czemu proces adsorpcji odbywa się równomiernie w całej jego objętości, eliminu-

jąc powstawanie gorących punktów. Warto zauważyć, że konstrukcja złoża CFB zaproponowana przez zespół Chena [28] wykazuje dużą wrażliwość na agregację materiału osuszającego, co powoduje blokowanie kanałów łączących złoża. Rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie materiałów domieszkowanych lub zmiana geometrii złoża. Ulepszeniem wspomnianego prototypu była konstrukcja zaproponowana przez Chianga [44], w której pionowe cylindry zostały zastąpione przez cylindry pochylone i dodatkowo zastosowano proste kanały łączące złoża. Nachylenie złoża poprawia efekt mieszania cząstek, co skutkuje niższą minimalną prędkością fluidyzacji, a w konsekwencji mniejszym spadkiem ciśnienia. Dodatkowo poprawiono wydajność adsorpcji i zmniejszono zużycie energii. W porównaniu do złoża stałego uzyskano niższe spadki ciśnienia dla złoża pionowego i pochylego, odpowiednio o około 64% i 71%. Poprawa wydajności adsorpcji została zaobserwowana na poziomie 24% i 27%. Zużycie energii było niższe o około 49% i 51%, ale jak wskazali autorzy, niewielka poprawa była spowodowana konstrukcją stanowiska badawczego, tj. wykonaniem dodatkowego kolana do kierowania strumienia powietrza. Wynika z tego, że w celu uzyskania wiarygodnych wyników konieczne jest przeprowadzenie badań z prostopadłym położeniem wentylatorów w stosunku do cylindrów. Horibe [22] zaproponował inne rozwiązanie w zakresie transportu materiału sorpcyjnego między złożami. Złoża zostały połączone za pomocą dwóch przenośników ślimakowych. Główną zaletą tego rozwiązania jest możliwość indywidualnej regulacji prędkości obrotowej ślimaków, a tym samym intensywności wymiany materiału między komorą adsorpcyjną a desorpcyjną. Dodatkowo zmniejsza się prawdopodobieństwo blokowania materiału w rurach łączących złoża. Zwracając uwagę na wady proponowanego rozwiązania, zastosowanie przenośników ślimakowych wiąże się z koniecznością zapewnienia dodatkowego napędu, a tym samym zwiększa zużycie energii napędowej. Ponadto wzrost liczby ruchomych elementów systemu powoduje zmniejszenie jego niezawodności. W złożu mogą występować również martwe strefy, pod wlotem do przenośników, zmniejszając tym samym wydajność układu. Rozwiązaniem tego problemu byłoby nachylenie dna cylindra, tak aby wejście do przenośnika znajdowało się w najniższym punkcie. Należy zauważyć, że efekty zastosowania proponowanych prototypów są znacznie gorsze niż wynikałoby to z rozważań teoretycznych. Rogala [44] podkreśla, że dla przyjętych rozwiązań współczynnik COP_{el} powinien wynosić około 10, a nie 0,37, jak pokazał Chen. Przyczyną tak dużej różnicy jest niewłaściwy dobór parametrów procesu. Rogala przeprowadził badania symulacyjne dotyczące wpływu parametrów na przebieg adsorpcji i desorpcji w chłodzeniu fluidalnym. Stwierdzono, że średnica cząsteczki osuszacza wpływa na zakres prędkości powierzchniowych, dla których możliwe jest uzyskanie fluidyzacji złoża. Kolejnym badanym parametrem był czas przełączania złoża. Zwiększenie czasu przełączania powyżej wartości optymalnej powoduje zmniejszenie współczynników COP_{el} i SCP, ale zwiększa się COP_{tem} . Z drugiej

strony, obniżenie czasu poniżej wartości optymalnej powoduje obniżenie wydajności układu. Rogala zwraca uwagę, że wraz ze wzrostem prędkości powierzchniowej wzrasta wydajność chłodnicza. Można też wnioskować, że wartość prędkości musi zawsze mieścić się w dopuszczalnym zakresie. Ponadto manipulacja wartością prędkości powierzchniowej pozwala zneutralizować problem różnic w kinetyce adsorpcji i desorpcji, poprzez zastosowanie wyższej prędkości powierzchniowej w złożu adsorpcyjnym, niż w złożu desorpcyjnym. Autorzy zwrócili również uwagę na aspekt skalowania systemu. Pierwszym ograniczeniem jest maksymalna prędkość powierzchniowa. Dodatkowo wydajność chłodnicza zwiększa się wraz ze wzrostem wysokości napełniania osuszacza, ale kosztem spadku współczynników SCP i COP_{el} .

3.2. Zastosowanie złoż fluidalnych w chłodziarkach

W chłodzeniu adsorpcyjnym z czynnikiem chłodniczym główną różnicą w stosunku do układów bezpośrednich jest zastosowanie dodatkowego systemu, w którym następuje wymiana ciepła między parą czynnika chłodniczego, a powietrzem doprowadzanym. Zazwyczaj jest to układ wody lodowej. Dodatkowo obieg czynnika chłodniczego jest zamknięty. Obecnie w chłodziarkach adsorpcyjnych jako czynnik chłodniczy stosuje się głównie parę wodną. Chłodziarki adsorpcyjne generują mniejsze spadki ciśnienia w systemie powietrza nawiewanego, a tym samym zmniejszają zużycie energii. Wang i in. [13] przeprowadzili badania nad skutkami zastąpienia standardowego złoża stałego złożem fluidalnym, ale z wykorzystaniem czynnika chłodniczego R134a. Zgodnie z oczekiwaniami, w wyniku zastosowanej modernizacji, w złożu została zintensyfikowana wymiana ciepła i masy. Spowodowało to zwiększenie współczynnika adsorpcji. Wzrost ten ma bezpośredni wpływ na wartość współczynnika SCP , stąd autorzy wnioskują, że w wyniku modernizacji parametr ten ulegnie znacznej poprawie. Nie przedstawiono jednak wyników badań, które potwierdzałyby tę tezę. Bazując na obecnym stanie wiedzy, trzeba zaznaczyć, że nie opublikowano dotychczas wyników dotyczących wartości współczynnika COP układu, w kontekście wpływu zastosowania złoża fluidalnego w chłodziarce adsorpcyjnej z wodą jako czynnikiem chłodniczym.

Zastosowanie złoża fluidalnego, zarówno w agregatach chłodniczych adsorpcyjnych, jak i osuszających, jest korzystne, pod względem wydajności i efektywności energetycznej. W obu przypadkach należy jednak jeszcze dokładniej zbadać wspomniane rozwiązania, szczególnie w zakresie temperatur uzyskiwanych na wyjściu z układu chłodzenia. Należy jednak zaznaczyć, że chłodzenie z zastosowaniem osuszaczy jest już technologią dojrzałą i zaproponowano prototypy złoża fluidalnego do pracy ciągłej.

4. Podsumowanie

W artykule dokonano przeglądu konstrukcji źródeł fluidalnych w kontekście ich aplikacji w chłodnictwie, tj. chłodzeniu osuszającym oraz chłodziarkach adsorpcyjnych. Oceniono też możliwość stosowania różnych typów źródeł w warunkach niskiego ciśnienia.

Należy zaznaczyć, że obecne zastosowanie źródeł fluidalnych w chłodnictwie ogranicza się do chłodzenia osuszającego z adsorpcją wody z wilgotnego powietrza nawiewanego. Głównym powodem takiego stanu są trudności techniczne w zastosowaniu takich źródeł w chłodziarkach adsorpcyjnych z wodą jako czynnikiem chłodniczym. Ograniczenie aplikacji źródeł fluidalnych związane jest z koniecznością utrzymywania warunków niskiego ciśnienia, co przy zastosowaniu fluidyzacji gazowej jest trudne do osiągnięcia. Istotne jest zatem poszukiwanie takich rozwiązań, które pozwolą na obniżenie minimalnej prędkości fluidyzacji, a jednocześnie umożliwią utrzymanie wysokiej szczelności układu.

Bazując na dotychczas prowadzonych badaniach, których przedmiotem była chłodziarka adsorpcyjna, należy stwierdzić, że zjawisko fluidyzacji nie zostało skutecznie zaaplikowane w procesie pośredniego chłodzenia adsorpcyjnego. Konieczne są więc prace koncepcyjne nad adaptacją rozwiązań zestawionych w tab. 2 i 3 oraz opracowaniem nowych konstrukcji i metod mieszania cząstek sorbentu w złożu.

Analiza wyników prowadzenia procesów adsorpcji w złożach fluidalnych wykazała, że zastosowanie takiego rozwiązania w znacznym stopniu poprawia parametry przebiegu procesu adsorpcji/desorpcji. Poprawia się głównie intensyfikacja wymiany ciepła, zwiększa się wydajność adsorpcji oraz równomierność rozkładu temperatur oraz gęstość materiału w objętości złoża.

Przedstawione konstrukcje poza zastosowaniem złoża fluidalnego wprowadzają dodatkowo nowy typ złoża, tj. złożo cyrkulujące z ciągłym przepływem sorbentu między strefami adsorpcji oraz desorpcji. Rozwiązanie to pozwala na stabilniejszą pracę układu bez potrzeby stosowania przerw w dostarczaniu chłodu, jak ma to miejsce w klasycznych chłodziarkach adsorpcyjnych, gdzie regeneracja źródeł zachodzi cyklicznie. Uzyskany efekt można porównać do zastosowania układu wielozłożowego. Złożo cyrkulujące stanowi alternatywę dla stałych źródeł rotacyjnych, gdzie poza wprowadzeniem fluidyzacji, intensyfikującej wymianę ciepła, możliwe jest obniżenie zużycia energii w wyniku rezygnacji z dodatkowego napędu.

Aplikacja źródeł cyrkulujących do chłodziarek adsorpcyjnych napotyka na problem odpowiedniej separacji strefy adsorpcji oraz desorpcji. Na tej podstawie należy stwierdzić, że bezpośrednia aplikacja źródeł CFB do chłodziarek adsorpcyjnych wydaje się być obecnie trudna. Można jednak rozważyć adaptację przedstawionych konstrukcji do cyrkulacji wewnętrznej w złożu, co mogłoby wspomóc fluidyzację gazową. Należy bowiem zaznaczyć, że in-

tensyjna fluidyzacja gazowa prowadzona w warunkach niskiego ciśnienia wymaga dużych nakładów energii. Ponadto dotychczas nie analizowano, w jaki sposób zderzenia cząstek wpływają na rozdrobnienie materiału sorpcyjnego oraz abrazję powierzchni wymiennika ciepła, a są to niezwykle istotne parametry w kontekście trwałości układu.

Kolejnym istotnym aspektem jest dostosowanie konstrukcji wymiennika do podgrzewania/chłodzenia złoża, gdzie w celu zapewnienia odpowiedniego transportu ciepła między materiałem złoża a wymiennikiem oczekiwane jest zwiększenie powierzchni wymiany ciepła, np. poprzez zwiększenie udziału wymiennika w objętości złoża, co z kolei może ograniczać możliwości mieszania. Wprowadzenie elementów ruchomych do złoża fluidalnego jest niezwykle złożonym zagadnieniem. Rozważając koncepcję złoża fluidalnego do prowadzenia procesów adsorpcji i desorpcji należy mieć na uwadze obecność rozbudowanego wymiennika ciepła w złożu oraz konieczność doprowadzenia pary wodnej do złoża. W związku z tym, na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem dla chłodziarek adsorpcyjnych wydaje się być stosowanie złoża ruchomego – nie w pełni fluidyzowanego. Jest to kompromis między zapewnieniem wydajnego transportu ciepła i masy w cyklach adsorpcji i desorpcji urządzenia oraz utrzymaniem wysokiej szczelności układu. Autorzy zwracają też uwagę na możliwości związane ze wzbudzaniem złoża za pomocą sił zewnętrznych, takich jak drgania mechaniczne, fale akustyczne lub pole magnetyczne. Niemniej jednak najbardziej perspektywicznym rozwiązaniem przekształcenia złoża stałego w ruchome wydaje się być zastosowanie podajnika, np. ślimakowego. Ta koncepcja będzie stanowić przedmiot prac badawczych prowadzonych przez autorów.

Literatura

- [1] International Energy Agency, *World Energy Balances 2019*, World Energy Balances: Overview 2019.
- [2] Streck C., von Unger M., Krämer N., *From Paris to Katowice: Cop-24 tackles the Paris rulebook*, Journal for European Environmental and Planning Law 2019, 16(2), 165–190. DOI: 10.1163/18760104-01602005.
- [3] Freni A., Sapienza A., Glaznev I.S., Aristov Y.I., Restuccia G., *Experimental testing of a lab-scale adsorption chiller using a novel selective water sorbent “silica modified by calcium nitrate”*, International Journal of Refrigeration 2010, 35(3), 518–524. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.05.015.
- [4] Restuccia G., Freni A., Vasta S., Aristov Y., *Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modelling*, International Journal of Refrigeration 2004, 27, 284–293. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2003.09.003.
- [5] Daou K., Wang R.Z., Yang G.Z., Xia Z.Z., *Theoretical comparison of the refrigerating performances of a CaCl₂ impregnated composite adsorbent to those of the*

- host silica gel*, International Journal of Thermal Sciences 2008, 47, 68–75. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.003.
- [6] Jalil E., Goudarzi K., *Effect of adsorbent con fi guration on performance enhancement of continuous solar adsorption chiller with four quadric parabolic concentrators*, Renewable Energy 2020, 158, 360–369. DOI: 10.1016/j.renene.2020.05.138.
- [7] Pan Q., Peng J., Wang R., *Experimental study of an adsorption chiller for extra low temperature waste heat utilization*, Applied Thermal Engineering 2019, 163, 114341, 1–8. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114341.
- [8] Saha B.B., Akisawa A., Kashiwagi T., *Silica gel water advanced adsorption refrigeration cycle*, Energy 1997, 22(4), 437–447. DOI: 10.1016/S0360-5442(96)00102-8.
- [9] Rogala Z., *Adsorption chiller using flat-tube adsorbers – Performance assessment*, Applied Thermal Engineering 2017, 121, 431–442. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.059.
- [10] Elsheniti M.B., Elsamni O.A., Al-dadah R.K., Mahmoud S., Elsayed E., Saleh K., *Adsorption refrigeration technologies*, Sustainable Air Conditioning Systems 2018, 72–95. DOI: 10.5772/intechopen.73167.
- [11] Glück C., *Generische Simulationsmodelle für Sorptionswärmepumpen zum Heizen und Kühlen*, Karlsruhe 2015.
- [12] Rezk A., Al-Dadah R.K., Mahmoud S., Elsayed A., *Effects of contact resistance and metal additives in finned-tube adsorbent beds on the performance of silica gel/water adsorption chiller*, Applied Thermal Engineering 2012, 53, 278–284. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.008.
- [13] Wang Q., Gao X., Xu J.Y., Maiga A.S., Chen G.M., *Experimental investigation on a fluidized-bed adsorber/desorber for the adsorption refrigeration system*, International Journal of Refrigeration 2012, 35(3), 694–700. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.05.020.
- [14] Szyc M., Nowak W., *Analysis of cooling cycle in single-stage adsorption chiller*, Polish Journal of Environmental Studies 2014, 23(4), 1423–1426.
- [15] Wang R., Wang L., Wu J., *Adsorption refrigeration technology. Theory and application*, Singapore 2014.
- [16] Tatlier M., *Performances of MOF vs. zeolite coatings in adsorption cooling applications*, Applied Thermal Engineering 2017, 113, 290–297. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.189.
- [17] Grabowska K., Krzywanski J., Nowak W., Wesolowska M., *Construction of an innovative adsorbent bed configuration in the adsorption chiller – Selection criteria for effective sorbent-glue pair*, Energy 2018, 151, 317–323. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.060.
- [18] Calabrese L., Brancato V., Bonaccorsi L., Frazzica A., Caprì A., Freni A., Proverbio E., *Development and characterization of silane-zeolite adsorbent coatings for adsorption heat pump applications*, Applied Thermal Engineering 2017, 116, 364–371. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.112.
- [19] Bahrehmand H., Khajehpour M., Bahrami M., *Finding optimal conductive additive content to enhance the performance of coated sorption beds: An experimental study*, Applied Thermal Engineering 2018, 143, 308–315. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.115.

- [20] Ilis G.G., Demir H., Mobedi M., Saha B.B., *A new adsorbent bed design: Optimization of geometric parameters and metal additive for the performance improvement*, Applied Thermal Engineering 2019, 162, 114270, 1–12. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114270.
- [21] Alelyani S.M., Bertrand W.K., Zhang Z., Phelan P.E., *Experimental study of an evacuated tube solar adsorption cooling module and its optimal adsorbent bed design*, Solar Energy 2020, 211, 183–191. DOI: 10.1016/j.solener.2020.09.044.
- [22] Horibe A., Sukmawaty, Haruki N., Hiraishi D., *Continuous sorption and desorption of organic sorbent powder in two connected fluidized beds*, Journal of Thermal Science and Technology 2012, 7(4), 563–576. DOI: 10.1299/jtst.7.563.
- [23] He Z., Huang H., Yuan H., Kobayashi N., *Study and theoretical calculation on new type of adsorption chiller*, Applied Mechanics and Materials 2016, 291–294, 1867–1873. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.1867.
- [24] Wang D., Zhang J., Tian X., Liu D., Sumathy K., *Progress in silica gel-water adsorption refrigeration technology*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 30, 85–104. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.023.
- [25] Khan M.Z.I., Saha B.B., Alam K.C.A., Akisawa A., Kashiwagi T., *Study on solar/waste heat driven multi-bed adsorption chiller with mass recovery*, Renewable Energy 2007, 32(3), 365–381. DOI: 10.1016/j.renene.2006.02.003.
- [26] Khan M.Z.I., Alam K.C.A., Saha B.B., Akisawa A., Kashiwagi T., *Performance evaluation of multi-stage, multi-bed adsorption chiller employing re-heat scheme*, Renewable Energy 2008, 33(1), 88–98. DOI: 10.1016/j.renene.2007.01.012.
- [27] Chahbani M.H., Labidi J., Paris J., *Modeling of adsorption heat pumps with heat regeneration*, Applied Thermal Engineering 2004, 24, 431–447. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.08.012.
- [28] Chen C.H., Ma S.S., Wu P.H., Chiang Y.C., Chen S.L., *Adsorption and desorption of silica gel circulating fluidized beds for air conditioning systems*, Applied Energy 2015, 155, 708–718. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.06.041.
- [29] Xie Y., Liu Y., Li L., Xu C., Li B., *Simulation of different gas–solid flow regimes using a drag law derived from lattice Boltzmann simulations*, The Journal of Computational Multiphase Flows 2018, 10(4), 202–214. DOI: 10.1177/1757482X18765383.
- [30] Girimonte R., Formisani B., Testa F., *Adsorption of CO₂ on a confined fluidized bed of pelletized 13X zeolite*, Powder Technology 2017, 311, 9–17. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.033.
- [31] Hamed A., *Theoretical and experimental study on the transient adsorption characteristics of a vertical packed porous bed*, Renewable Energy 2002, 27(4), 525–541. DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00112-4.
- [32] Song X., Wang Z., Jin Y., Tanaka Z., *Gas-solids circulating fluidization in a packed bed*, Powder Technology 1995, 83(2), 127–131. DOI: 10.1016/0032-5910(94)02948-N.
- [33] Girimonte R., Vivacqua V., *The expansion process of particle beds fluidized in the voids of a packing of coarse spheres*, Powder Technology 2011, 213(1), 63–69. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.07.006.
- [34] Mandal D., Sharma V.K., Pant H.J., Sathiyamoorthy D., Vinjamur M., *Quality of fluidization in gas-solid unary and packed fluidized beds: An experimental study using gamma ray transmission technique*, Powder Technology 2012, 226, 91–98. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.022.

- [35] Mandal D., Sathiyamoorthy D., Vinjamur M., *Experimental investigation of heat transfer in gas-solid packed fluidized bed*, Powder Technology 2013, 246, 252–268. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.04.054.
- [36] Mandal D., Vinjamur M., Sathiyamoorthy D., *Hydrodynamics of beds of small particles in the voids of coarse particles*, Powder Technology 2013, 235, 256–262. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.029.
- [39] Chiang Y.C., Chen C.H., Chiang Y.C., Chen S.L., *Circulating inclined fluidized beds with application for desiccant dehumidification systems*, Applied Energy 2016, 175, 199–211. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.009.
- [37] Chiang Y.C., Chen C.H., Chiang Y.C., Chen S.L., *Circulating inclined fluidized beds with application for desiccant dehumidification systems*, Applied Energy 2016, 175, 199–211. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.009.
- [38] Sutkar V.S., Deen N.G., Kuipers J.A.M., *Spout fluidized beds: Recent advances in experimental and numerical studies*, Chemical Engineering Science 2013, 86, 124–136. DOI: 10.1016/j.ces.2012.06.022.
- [39] Valverde Millan J.M., *Fluidization of fine powders: cohesive versus dynamical aggregation*, Springer, 2015.
- [40] Suzuki K., Hosaka H., Yamazaki R., Jimbo G., *Drying characteristics of particles in a constant drying rate period in vibro-fluidized bed*, Journal of Chemical Engineering of Japan 1980, 13(2), 117–122. DOI:10.1252/jcej.13.117.
- [41] Lehmann S.E., Hartge E.U., Jongsma A., deLeeuw I.M., Innings F., Heinrich S., *Fluidization characteristics of cohesive powders in vibrated fluidized bed drying at low vibration frequencies*, Powder Technology 2019, 357, 54–63. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.105.
- [42] Mohideen M.F., Md Seri S., Raghavan V.R., *Fluidization of Geldart Type-D particles in a swirling fluidized bed*, Applied Mechanics and Materials 2012, 110–116, 3720–3727. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.3720.
- [43] Hamed A.M., *Experimental investigation on the adsorption/desorption processes using solid desiccant in an inclined-fluidized bed*, Renewable Energy 2005, 30(12), 1913–1921. DOI: 10.1016/j.renene.2005.01.001.
- [44] Rogala Z., Kolasinski P., Błasiak P., *The influence of operating parameters on adsorption/desorption characteristics and performance of the fluidised desiccant cooler*, Energies 2018, 11(6), 1–16. DOI: 10.3390/en11061597.
- [45] Rogala Z., Kolasinski P., Gnutek Z., *Modelling and experimental analyzes on air-fluidised silica gel-water adsorption and desorption*, Applied Thermal Engineering 2017, 127, 950–962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.122.
- [46] Reichhold A., Hofbauer H., *Internally circulating fluidized bed for continuous adsorption and desorption*, Chemical Engineering and Processing, 1995. DOI: 10.1016/0255-2701(95)00623-0.
- [47] Chen C.H., Schmid G., Chan C.T., Chiang Y.C., Chen S.L., *Application of silica gel fluidised bed for air-conditioning systems*, Applied Thermal Engineering 2015, 89, 229–238. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.05.058.
- [48] Sahoo P., Sahoo A., *Fluidization and spouting of fine particles: A comparison*, Advances in Materials Science and Engineering 2013, 2013, 369380, 1–7. DOI: 10.1155/2013/369380.
- [49] Cocco R., Karri S.B.R., Knowlton T., *Introduction to fluidization*, Chemical Engineering Progress 2014, 110(11), 21–29.

-
- [50] Hamed A.M., Abd El Rahman W.R., El-Eman S.H., *Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidized bed*, Energy 2010, 35, 2468–2483. DOI: 10.1016/j.energy.2010.02.042.
- [51] Zhang H.L, Baeyens J., Degrève J., Brems A., Dewil R., *The convection heat transfer coefficient in a Circulating Fluidized Bed (CFB)*, Advanced Powder Technology 2014, 25, 710–715. DOI: 10.1016/j.appt.2013.10.018.
- [52] Solnordal C.B., Kenche V., Hadley T.D., Feng Y., Witt P.J., Lim K.S., *Simulation of an internally circulating fluidized bed using a multiphase particle-in-cell method*, Powder Technology 2015, 274, 123–134. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.12.045.
- [53] Herce C., Cortés C., Stendardo S., *Numerical simulation of a bubbling fluidized bed reactor for sorption-enhanced steam methane reforming under industrially relevant conditions: Effect of sorbent (dolomite and CaO-Ca₁₂Al₁₄O₃₃) and operational parameters*, Fuel Processing Technology 2019, 186, 137–148. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.01.003.
- [54] Doroodchi E., Fletcher D.F., Galvin K.P., *Influence of inclined plates on the expansion behaviour of particulate suspensions in a liquid fluidised bed*, Chemical Engineering Science 2004, 59(17), 3559–3567. DOI: 10.1016/j.ces.2004.05.020.
- [55] Zhang W., Liu H., Sun C., Drage T.C., Snape C.E., *Performance of polyethyleneimine-silica adsorbent for post-combustion CO₂ capture in a bubbling fluidized bed*, Chemical Engineering Journal 2014, 251, 293–303. DOI: 10.1016/j.cej.2014.04.063.
- [56] Krzywanski J., Grabowska K., Sosnowski M., Zylka A., Kulakowska A., Czakiert T., Sztékler K., Wesolowska M., Nowak W., *Heat transfer in fluidized and fixed beds of adsorption chillers*, E3S Web of Conferences, Nov. 2019, 128, 01003, 1–4. DOI: 10.1051/e3sconf/201912801003.
- [57] Zarekar S., Bück A., Jacob M., Tsotsas E., *Numerical study of the hydrodynamics of fluidized beds operated under sub-atmospheric pressure*, Chemical Engineering Journal 2019, 372, 1134–1153. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.159.
- [58] Llop M.F., Madrid F., Arnaldos J., Casal J., *Fluidization at vacuum conditions. A generalized equation for the prediction of minimum fluidization velocity*, Chemical Engineering Science 1996, 51(23), 5149–5157. DOI: 10.1016/S0009-2509(96)00351-X.