

Klasyczny układ chłodniczy komory przechowalniczej warzyw i owoców sterowany jest przez termostat komorowy działający na zasadzie włącz-wyłącz. W zależności od chwilowego obciążenia cieplnego, proporcje pomiędzy czasem pracy sprężarki i jej postojem ulegają zmianie. Gdy obciążenie cieplne wzrasta, czas pracy sprężarki wydłuża się, a czas postoju skraca i odwrotnie. Ponieważ każdemu rozruchowi sprężarki towarzyszą prądy rozruchowe, których wartość kilkakrotnie przekracza prądy znamionowe, konstrukcja układu sterowania pracą (i rozruchami) układu chłodniczego musi uwzględniać ograniczenie ich częstotliwości.

Zazwyczaj stosowanym i najprostszym sposobem zabezpieczenia agregatu chłodniczego jest ustawienie na termostacie komory przechowalniczej stosownej histerezy oraz umieszczenie czujnika pomiaru temperatury na wlocie do chłodnicy powietrza. Histereza ta w praktyce przechowalniczej ustawiana jest na 2 K, co zabezpiecza sprężarkę przed zbyt dużą częstotliwością rozruchów. Konsekwencją tego rozwiązania jest jednak znaczne wahanie temperatury powietrza na wylocie z chłodnicy powietrza. W praktyce takie rozwiązanie powoduje, że temperatura powietrza na wylocie z chłodnicy powietrza waha się o około  $2,5 \div 3,0$  K. Takie wahania temperatury powodują, że z jednej strony w obawie o przemrożenie przechowywanych produktów przechowuje się je w okresach obniżonego obciążenia w temperaturze o około 3 K wyższej niż optymalna, z drugiej – że temperatura przechowywanych produktów znajdujących się blisko chłodnicy powietrza ulega dużym wahaniom. Zjawisko to w warunkach przechowywania produktu w wysokiej wilgotności powoduje okresowe wykraplanie się na nim wilgoci. Proces ten jest bardzo niekorzystny, gdyż jest powodem gnicia i pleśnienia przechowywanych warzyw i owoców [1].

Jedynym sposobem na rozwiązanie opisanego powyżej problemu jest zastosowanie układu

chłodniczego o płynnej regulacji wydajności chłodnicy powietrza. Rozwiązania takie stosuje się od niedawna w dużych chłodniach warzyw i owoców oraz chłodniach z obiegiem pośrednim. Rozwiązania te są bardzo złożone technicznie i z tego powodu nie stosowane są w rozwiązaniach w chłodniach o niedużych pojemnościach składowych, w tym w chłodniach dla indywidualnych producentów rolniczych.

W celu wyjścia naprzeciw tym potrzebom, prowadzone są w ostatnim czasie prace nad zbudowaniem prostego układu chłodniczego z płynną regulacją wydajności chłodnicy powietrza. Jednym z takich rozwiązań jest tzw. „hybryda chłodnicza” [2, 3, 4]. W rozwiązaniu tym, wykorzystuje się zjawisko akumulacji chłodu podczas pracy sprężarki w zbiorniku z ciekłym czynnikiem pośrednim (zazwyczaj roztworem glikolu propylenowego). W okresie pracy sprężarki, gdy istnieje nadwyżka wydajności chłodniczej w stosunku do chwilowego zapotrzebowania, następuje proces „ładowania” akumulatora. Zgromadzony „chłód” jest następnie wykorzystywany w okresie postoju sprężarki. Czas trwania cyklu chłodzenia wynika z odstępu czasu między dwoma kolejnymi startami sprężarek (na ogół 10 minut), który jest zgodny z wymaganiami producentów sprężarek. Czas pracy sprężarki w okresie takiego cyklu jest zaś uzależniony przede wszystkim od mocy sprężarki oraz chwilowego obciążenia cieplnego komory przechowalniczej [5, 6]. Rozwiązanie takie zapewnia ciągłą pracę chłodnicy powietrza niezależnie od wielkości chwilowego obciążenia cieplnego [7].

Wielkość wahań temperatury wylotowej powietrza z chłodnicy powietrza jest uzależniona przede wszystkim od wielkości zbiornika. Czym większy jest zbiornik, tym wahania temperatury powietrza mniejsze. Większy zbiornik, to większe zapotrzebowanie na ziemiwo i większe zapotrzebowanie miejsca. Alternatywnym rozwiązaniem magazynu chłodu jest wykorzystanie zjawiska związanego z akumulowaniem chłodu podczas przemiany fazowej. Najbardziej znanymi tego typu rozwiązaniami, które są stosowane w praktyce, są tzw. banki lodowe. Dlatego w ramach prowadzonych prac badawczych postanowiono zbudować i przebadać (w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych) układ chłodniczy wyposażony w akumulator chłodu działający na zasadzie przemiany fazowej.

W procesie projektowania, testowania i badań zwrócono głównie uwagę na potraktowanie akumulatora PCM (phase change material) jako elementu składowego układu chłodniczego, elementu, który ma do spełnienia konkretną rolę podczas pracy urządzenia.

### **PCM – wybór materiału i rozwiązania konstrukcyjnego**

Od najdawniejszych czasów znane było pozyskiwanie naturalnego chłodu w postaci bloków lodu gromadzonych w okresie zimy, przetrzymywanych w jaskiniach bądź piwnicach i zużywanych do chłodzenia w okresie letnim. Skonstruowanie przez Lindego urządzenia chłodniczego, przyczyniło się do obumarcia tej technologii. Jednak zjawisko akumulacji ciepła podczas przemiany fazowej jest wciąż wykorzystywane np. w transporcie kolejowym do chłodzenia wagonów za pomocą tzw. suchego lodu – w tym przypadku wykorzystanie przemiany sublimacyjnej zestalonego dwutlenku węgla.

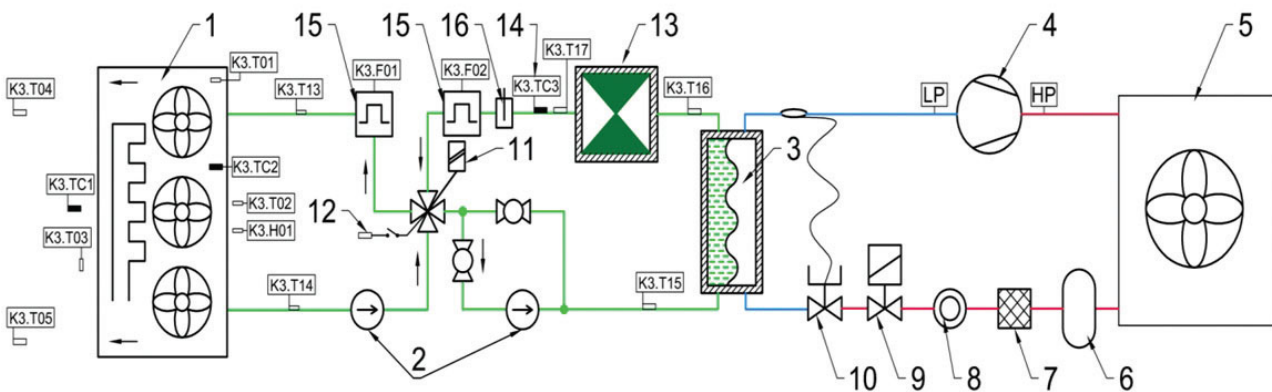
W wielu gałęziach przemysłu spożywczego (mleczarstwo, produkcja win, schładzanie warzyw i owoców), w których występuje okresowe zapotrzebowanie na chłód, wykorzystuje się jako źródło chłodu zjawisko topnienia lodu w okresie szczytowego zapotrzebowania na chłód. Układy chłodnicze w tego typu zakładach są tak projektowane, by w okresach zmniejszonego

zapotrzebowania na chłód (np. w nocy) akumulować go pod postacią lodu. W okresie maksymalnego zapotrzebowania, lód ulega roztopieniu oddając zakumulowany chłód. Układy te są szczególnie efektywne, gdy czynnikiem chłodzącym jest woda o temperaturze zbliżonej do zera. W praktyce w okresie małego obciążenia cieplnego – nadwyżka chłodu jest gromadzona w postaci lodu namrażającego się bezpośrednio na wymienniku ciepła.

Bardziej złożonym procesem, jest proces wykorzystania zjawiska przemiany fazowej przy zastosowaniu innych cieczy pośrednich niż woda oraz innej temperatury niż  $0^{\circ}\text{C}$ . W ramach prowadzonych prac badawczych skoncentrowano się na układach chłodniczych komór przechowalniczych. Temperatura cieczy chłodzącej (w analizowanym przypadku – roztworu glikolu propylenowego) zawiera się w przedziale temperaturowym od  $-2^{\circ}\text{C}$  do około  $-6^{\circ}\text{C}$ . Po analizie dostępnych na rynku materiałów PCM wybrano opcję opartą na bazie wodnego roztworu azotanu potasu o temperaturze przemiany fazowej  $-6^{\circ}\text{C}$ . Materiał taki został zakupiony u producenta PCM, firmy Phase Change Material Products Ltd. Do skonstruowania akumulatora chłodu wykorzystano typowy, płytowy wymiennik ciepła. W celu uzyskania stabilnej temperatury ziębiwa na dopływie do chłodnicy powietrza, niezależnie od stanu akumulatora chłodu, zaprojektowano innowacyjny układ chłodniczy.

### **Stanowisko badawcze – układ chłodniczy z akumulatorem PCM**

Celem budowy układu chłodniczego w Laboratorium było praktyczne sprawdzenie pracy innowacyjnego układu chłodniczego w warunkach zbliżonych do warunków panujących podczas rzeczywistej współpracy z komorą przechowalniczą. Zbudowane stanowisko badawcze pozwoliło sprawdzić program jaki został opracowany w celu sterowania pracą układu chłodniczego. Schemat cyrkulacji cieczy pośredniczącej w wymianie ciepła oraz czynnika chłodniczego (R507) układu chłodniczego zainstalowanego na stanowisku badawczym przedstawia rysunek 1.



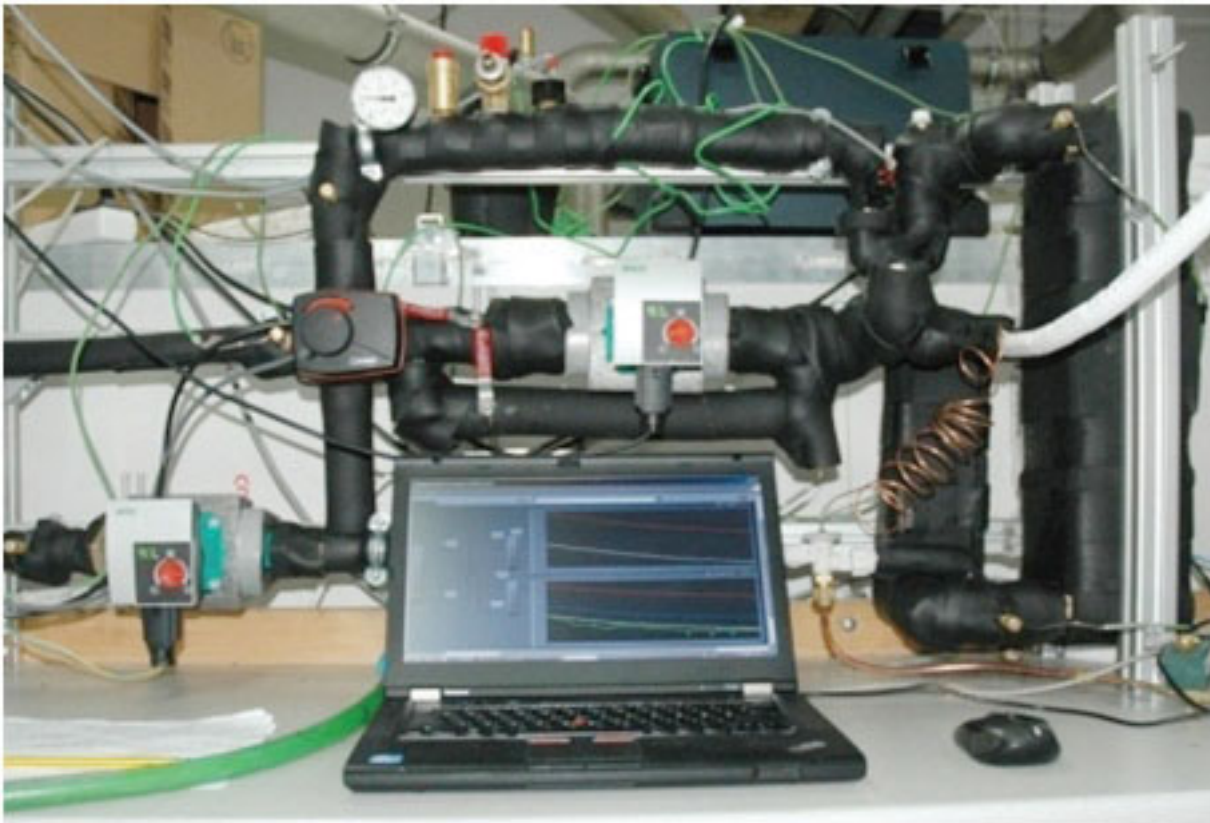
Rys. 1. Schemat układu chłodniczego z PCM – Wariant I: 1 – chłodnica powietrza, 2 – pompy cyrkulacyjne, 3 – chłodnica glikolu, 4 – sprężarka chłodnicza, 5 – skraplacz, 6 – zbiornik czynnika chłodniczego, 7 – filtr – osuszacz, 8 – wziernik, 9 – zawór elektromagnetyczny, 10 – zawór termostatyczny, 11 – zawór mieszający czterodrogowy z napędem elektrycznym, 12 – wyłącznik drogowy zaworu mieszającego wskazujący maksymalne otwarcie, 13 – akumulator PCM, 14 – presostat, 15 – przepływomierz, 16 – czujnik przepływu

Akumulator chłodu to klasyczny, płytowy wymiennik ciepła. Jeden przepływ wymiennika wykorzystano napełniając go PCM w ilości 2,5 litra, zaś drugi przepływ włączono w obieg cyrkulacyjny obiegu pośredniego. W celu zapewnienia utrzymania temperatury glikolu dopływającego do chłodnicy powietrza na wymaganym poziomie, układ chłodniczy wyposażono w dwie pętle cyrkulacji glikolu. Jedna pętla to pętla chłodnicy powietrza, druga zaś to pętla akumulatora PCM oraz chłodnicy roztworu glikolu. Obie pętle są połączone czterodrogowym zaworem mieszającym. Utrzymanie temperatury glikolu w pętli chłodnicy powietrza odbywa się poprzez precyzyjne dodawanie zimnej cieczy z pętli akumulatora i chłodnicy glikolu. Chłodzenie glikolu w pętli akumulatora jest realizowane za pomocą chłodnicy glikolu. Chłodnica glikolu jest chłodzona za pomocą klasycznego układu chłodniczego składającego się z:

- sprężarki chłodniczej,
- skraplacza powietrznego,
- zbiornika czynnika chłodniczego,
- filtra-osuszacza,
- przeziernika,
- zaworu elektromagnetycznego i zaworu termostatycznego.

Start sprężarki chłodniczej odbywa się w momencie zwarcia styków drogowych zaworu mieszającego, które sygnalizowały całkowite otwarcie zaworu. Sygnał ten oznaczał w praktyce, że temperatura ziębiwa w całym układzie (obu pętlach cyrkulacyjnych) jest jednakowa i chłód zgromadzony w pętli PCM został całkowicie wykorzystany. Start sprężarki powoduje ochładzanie cieczy w obu pętlach cyrkulacyjnych. Wraz z obniżaniem się temperatury glikolu, zaczyna przymykać się zawór mieszający – stosownie do spadku temperatury cieczy. Przepływający przez akumulator PCM zimny glikol, po osiągnięciu temperatury przemiany fazowej, zaczyna „ładować” akumulator. Gdy akumulator zostaje naładowany, następuje dalsze obniżenie temperatury glikolu, co jest sygnałem do zakończenia pracy sprężarki. Cyrkułujący w pętli akumulatora i chłodnicy roztwór glikolu jest pobierany do pętli chłodnicy powietrza i jednocześnie zasilany ciepłym glikolem z pętli chłodnicy powietrza. Proces ten ma miejsce w czterodrogowym zaworze mieszającym.

W okresie postoju sprężarki następuje ciągły wzrost temperatury roztworu glikolu w pętli akumulatora PCM, powodując coraz większe otwarcie zaworu mieszającego. Krążący w tej pętli glikol po osiągnięciu temperatury powyżej temperatury przemiany fazowej PCM powoduje rozładowanie akumulatora PCM (przemianę fazową). Z chwilą pełnego otwarcia zaworu mieszającego następuje ponowne uruchomienie sprężarki i rozpoczyna się następny cykl pracy układu chłodniczego.



Rys. 2. Stanowisko badania układu chłodniczego z PCM – Wariant I

## **Praca instalacji chłodniczej podczas badań**

(...)

## **Zmodernizowany układ chłodniczy z zasobnikiem PCM**

(...)

## **Wyniki badań zmodernizowanego układu chłodniczego z zasobnikiem PCM**



(...)

## Podsumowanie uzyskanych wyników badawczych

Sterowanie układem chłodniczym wykonanym według schematu przedstawionego na rysunku 1. okazało się w praktyce niemożliwe. Za główne przyczyny tego zjawiska można postulować znaczną nieliniowość zaworu mieszającego oraz jego dużą bezwładność ruchową, a także zastosowany system sterowania pracą układu chłodniczego. Mimo wielu prób nie udało się uzyskać stabilnej (bezpiecznej) temperatury powietrza na wylocie z chłodnicy powietrza.

W celach praktycznego wykorzystania akumulatora PCM dla tego typu układów chłodniczych należy wyznaczyć jego charakterystykę pojemnościowo-przepływową. W praktyce oznacza to konieczność wyznaczenia szybkości procesu akumulacji chłodu w zależności od natężenia przepływu czynnika roboczego i jego temperatury. Szybkość akumulowania jest dla danego rozwiązania konstrukcyjnego akumulatora PCM funkcją czasu ładowania. Znajomość tej charakterystyki ma zasadnicze znaczenie podczas projektowania instalacji chłodniczej z wykorzystaniem akumulatora PCM. Podobnie znaczenie w procesie projektowania ma także znajomość charakterystyki rozładowania akumulatora PCM w funkcji temperatury i natężenia przepływu płynu roboczego.

Oceniając konstrukcję i charakterystykę akumulatora PCM należy zwrócić także uwagę na jego sprawność, którą można zdefiniować jako iloraz teoretycznej pojemności cieplnej akumulatora PCM (t.j. iloczynu masy oraz różnicy entalpii właściwej materiału w stanie całkowitego naładowania i rozładowania) do rzeczywistej pojemności cieplnej zgromadzonej w akumulatorze PCM. Wartość ta określa rzeczywisty stopień wykorzystania akumulatora.

Można postulować, że zastosowanie zaworu mieszającego z liniową charakterystyką otwarcia i szybszego siłownika sterującego pracą zaworu mieszającego, a także sterownika pracującego w oparciu o nowoczesne programy sterujące – może przyczynić się do udanej realizacji rozwiązania technicznego według Wersji I.

W związku z zależnością średniej temperatury glikolu od wydajności chłodnicy powietrza, celowym jest zastosowanie akumulatora PCM o zmiennej temperaturze przemiany fazowej. Takie właściwości wykazują nieeutektyczne roztwory soli.

## Podziękowanie

Prace zostały sfinansowane ze środków Projektu PBS1/A8/7/2012 „Kompleksowe rozwiązania technologii chłodniczej składowania warzyw”.

**Grzegorz MIZERA**

Instytut Maszyn Przepływowych PAN,  
Gdańsk

**Jarosław KARWACKI**

Instytut Maszyn Przepływowych PAN,  
Gdańsk

**Tomasz PRZYBYLIŃSKI**

Instytut Maszyn Przepływowych PAN,  
Gdańsk

**Dariusz BUTRYMOWICZ**

Politechnika Białostocka

**Andrzej SZCZEŚNIAK**

REMSTAT, Gdańsk

**LITERATURA:**

[1] MIZERA G., BUTRYMOWICZ D., ADAMICKI F.: Uwagi o stabilności temperatury i wilgotności powietrza w aspekcie jakości warzyw po okresie przechowywania. Chłodnictwo, Vol. 45, No. 9, 2010, str. 48-55.

[2] MIZERA G., BUTRYMOWICZ D.: Cold store of new generation for carrot storage. 23rd International Congress of Refrigeration, Prague, 2011, paper No. 829.

[3] MIZERA G., BUTRYMOWICZ D., MIKIELEWICZ J.: Analysis of Indirect Storage Chamber

Cooling System. International Conference on Design and Operation of Environmentally Friendly Refrigeration and AC Systems, Poznań , 2008, str. 163-170.

[4] MIZERA G., BUTRYMOWICZ D.: Nowa generacja chłodni składowych warzyw i owoców – Chłodzenie analogowe. Chłodnictwo, 2011, Vol. 46, Nr 12, str. 30-33.

[5] GOŚCIK J., BUTRYMOWICZ D., GAGAN J.: Numerical modelling of unsteady operation of cold storage vessel. 23rd International Congress of Refrigeration, Prague, 2011, paper No. 680.

[6] KWIDZIŃSKI R., MIZERA G., KARWACKI J., BUTRYMOWICZ D.: Modelling of indirect cooling systems in applications to vegetables cold stores. 23rd International Congress of Refrigeration, Prague, 2011, paper No. 695.

[7] MIZERA G., BUTRYMOWICZ D., KARWACKI J., GRZEGORZEWSKA M., ADAMICKI F.: Badania prototypowego rozwiązania komory składowej marchwi. Technika Klimatyzacyjna i Chłodnicza, 2014, No. 3, str. 99-106.

[8] MIZERA G., BUTRYMOWICZ D., KARWACKI J., KOŁODZIEJCZYK M., PRZYBYLIŃSKI T., GAGAN J.: Ewaluacja eksperymentalna pracy innowacyjnych układów chłodniczych komór przechowalniczych. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, 2015.