

## **BADANIA MODELOWEGO UKŁADU CHŁODNICZEGO W ASPEKCIE OGRANICZANIA ŚLADU WĘGLOWEGO**

**Magdalena Wróbel-Jędrzejewska, Urszula Stęplewska, Paweł Kuleta**

Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. W. Dąbrowskiego,

Zakład Technologii i Techniki Chłodnictwa w Łodzi

Al. J. Piłsudskiego 84, 92-202 Łódź

e-mail: magdalena.jedrzejewska@ibprs.pl

### **Streszczenie**

W artykule opisano badania modelowego układu chłodniczego w aspekcie ograniczania śladu węglowego. Przeprowadzono analizę właściwości termodynamicznych układu chłodniczego i przystosowano stanowisko badawcze. Realizację założonych celów dokonano na podstawie wielkości mierzonych i wyznaczonych w wyniku obliczeń, m.in. parametry termodynamiczne czynnika chłodniczego w obiegu, pobór mocy przez napęd sprężarki, strumienie ciepłe doprowadzane i odbierane przez poszczególne wymienniki w obiegu, strumień wody chłodzącej skraplacz.

Wyliczono wskaźniki śladu węglowego dla przyjętych założeń. Określono optymalne warunki pracy jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego przy osiągnięciu możliwie najniższego współczynnika śladu węglowego.

**Słowa kluczowe:** ślad węglowy, instalacja chłodnicza, wskaźnik energetyczny

## **MODEL REFRIGERATION SYSTEM RESEARCH IN THE ASPECT OF CARBON FOOTPRINT REDUCTION**

### **Summary**

The research of model refrigeration system in the aspect of the carbon footprint reduction were described in this paper. The analysis of thermodynamic properties of the cooling system was carried out and test stand was adapted. Attaining the targets were based on the measured and determined by calculation values, i.e. thermodynamic parameters of the refrigerant system, the compressor power consumption, heat fluxes delivered and received by the individual exchangers in circulation, condenser cooling water.

The carbon footprint indicators for the assumptions were calculated. The optimal working conditions for single-stage compressor refrigerant system at achieving the lowest possible carbon footprint factor were determined.

**Keywords:** carbon footprint, cooling system, energy indicator

## **WSTĘP**

Ślad węglowy (ang. *Carbon Footprint* – CF) jest wskaźnikiem określającym nasz wpływ na środowisko naturalne. Pojęcie to zostało wprowadzone w latach 90. [Rees 1992, 1996; Wackernagel, Rees 1996, 1997; Wackernagel i in. 1999]. Według definicji ślad węglowy jest to ekwiwalentna ilość CO<sub>2</sub> odpowiadająca ilości wyemitowanych gazów cieplarnianych wytworzonych pośrednio lub bezpośrednio w wyniku działalności człowieka [Wiedmann i in. 2008]. Określenie CF pozwala na powiązanie problemu z jednostką odpowiedzialną za jego powstanie [Wiedmann i in. 2008], a tym samym wpływa na świadomość i staje się impulsem do podejmowania proekologicznych działań [Sundarakani i in. 2008]. Działania na rzecz monitorowania wytworzonego „śladu węglowego” pozwalają oszacować stopień zanieczyszczenia środowiska wywołany działalnością antropogeniczną.

Każdy proces technologiczny związany z przemysłem rolno-spożywczym jest źródłem emisji dwutlenku węgla. Wzrasta zapotrzebowanie na żywność, a wraz z tym na zapewnienie dostępności i wydłużenie okresu jej trwałości, co gwarantuje przechowywalność chłodnicze. Chłodnictwo pozostawia silny ślad środowiskowy, a zatem należy ograniczać jego negatywny wpływ [Hartikainen i in. 2012]. Wysoko energochłonne technologie przechowywania chłodniczego produktów rolno-spożywczych nie były dostatecznie badane pod kątem określenia ich wpływu na środowisko naturalne.

### **Ślad węglowy – wyznaczenie**

Metodologia wyliczania CF jest rozpracowywana, ale wciąż brak uniwersalnych narzędzi dostosowanych do konkretnych obszarów przemysłowych. Jej opracowanie wymaga interdyscyplinarnego i wieloaspektowego podejścia do przyjętych norm, różnego rodzaju przewodników, narzędzi kalkulacyjnych, czy też baz danych, które dostarczają informacji na temat emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych. Najlepiej opracowany został ślad węglowy gospodarstw domowych. Wyliczenie wskaźnika śladu węglowego wymaga precyzyjnej wiedzy technicznej oraz dostępu do specjalistycznych danych. Najnowszym standardem określającym wytyczne obliczania śladu węglowego jest międzynarodowa norma ISO 14067:2013, która bazuje na normach środowiskowych dotyczących przede wszystkim oceny cyklu życia oraz deklaracji środowiskowych. Obecnie jest to najdokładniejsza metodyka, która również uwzględnia wytyczne dotyczące raportowania i publikacji rezultatów badania śladu węglowego. Z danych literaturowych wynika, że nie ma uniwersalnych programów służących dokładnemu i bezpośredniemu obliczeniu CF. Precyzyjne obliczanie śladu węglowego dla konkretnej technologii lub produktu jest możliwe

z wykorzystaniem modeli matematycznych. Zarówno modele deterministyczne, jak i stochastyczne prezentowane w publikacjach naukowych wymagają czasochłonnego etapu zbierania i katalogowania danych oraz dużej wiedzy dla dostosowania ich do innego przypadku oraz poprawnej interpretacji otrzymanych wyników.

### **Wskaźnik CF urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych**

We wszystkich branżach przemysłu rolno-spożywczego, a także w handlu wykorzystuje się magazyny chłodnicze i urządzenia klimatyzacyjno-chłodnicze w celu utrzymania optymalnej temperatury przechowywania lub warunków produkcji. Elementem znacząco wpływającym na wielkość CF konkretnego produktu lub technologii jest wielkość zużycia energii elektrycznej. Często można poprzez racjonalne działania ograniczyć zużycie energii, bez dodatkowych kosztów [Wróbel-Jędrzejewska i in. 2015]. Obecnie branża chłodnicza rozwija się bardzo intensywnie. Główne wyzwania jej stawiane to energooszczędne eksploatawanie, dostosowanie do konkretnego zapotrzebowania oraz ograniczenie negatywnych skutków dla środowiska.

W literaturze brak jest wyliczeń śladu węglowego dla obiegów chłodniczych. Obliczenia śladu węglowego dla układów chłodniczych, z uwzględnieniem emisji bezpośrednich i pośrednich, wymagają obszernej wiedzy technicznej i dostępu do specjalistycznych danych. Działania w tym zakresie mają charakter innowacyjny. Nie ma powszechnie akceptowanej metody obliczania śladu węglowego w technologii obiegów chłodniczych. Obecnie na świecie istnieją tylko nieliczne dokładne obliczenia CF [Cucek i in. 2012], które jednak nie można uznać za przydatne dla zadania postawionego w omawianym temacie badawczym, ponieważ dotyczą one innych obszarów działań.

Zgodnie z najnowszymi wynikami badań i analiz największy wpływ na tworzenie efektu cieplarnianego przez obieg chłodniczy ma jego efektywność energetyczna, a nie np. rodzaj czynnika chłodniczego i jego własności. Proekologiczne czynniki chłodnicze mogą powodować niską efektywność energetyczną urządzenia, przyczyniając się do zwiększenia śladu węglowego. Okazuje się, że pośredni udział w śladzie węglowym powodowany poprzez zużycie energii do napędu sprężarki i innych urządzeń obiegu chłodniczego może stanowić do 95% całkowitego efektu cieplarnianego wytwarzanego przez obieg chłodniczy. Najistotniejsze jest zatem zoptymalizowanie zużycia energii w procesie chłodniczym [Butrymowicz i in. 2014].

W Polsce produkcja energii elektrycznej oparta jest w większości na węglu kamiennym i brunatnym, co stanowi istotny element śladu węglowego. Wyprodukowanie 1 kWh energii

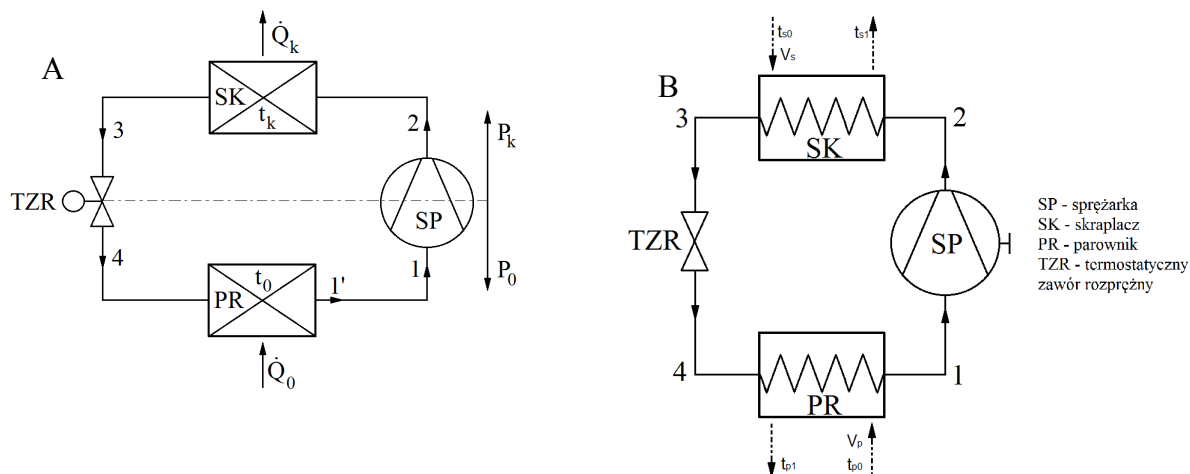
elektrycznej jest związane z uwolnieniem do atmosfery około 0,997 kg CO<sub>2</sub>. Emisja CO<sub>2</sub> podczas spalania węgla brunatnego i kamiennego jest większa do 70% niż przy spalaniu gazu ziemnego. 37% emisji CO<sub>2</sub> tworzonych jest w procesie produkcji energii. Co roku światowy sektor energetyczny emituje do atmosfery 23 mld ton CO<sub>2</sub>.

W IBPRS, w Zakładzie Technologii i Techniki Chłodnictwa w Łodzi, zespół Pracowni Chłodnictwa i Ochrony Środowiska w ramach realizacji prac badawczych zajmuje się opracowaniem metodologii obliczania emisji CO<sub>2</sub>, z uwzględnieniem potrzeb jednostkowego przedsiębiorcy, który dzięki temu narzędziu nie tylko zmniejszy swój ślad węglowy, lecz także będzie mógł zredukować koszty swojej działalności.

### **Jednostopniowy sprężarkowy obieg chłodniczy**

Obieg chłodniczy jest szczególnym przypadkiem obiegu termodynamicznego. Jest to układ, w którym następuje kilka przemian termodynamicznym czynnika, w konsekwencji których jego parametry powracają do stanu początkowego. Najprostszy układ składa się ze sprężarki, dwóch wymienników ciepła: skraplacza i parownika oraz elementu dławiącego, połączonych za pomocą systemu rurociągow. Przez wszystkie urządzenia przepływa płyn roboczy mający odpowiednie właściwości termodynamiczne, nazywany czynnikiem chłodniczym.

Jednostopniowe sprężarkowe urządzenie chłodnicze określa się jako lewobieżny obieg Lindego. Na rysunku 1A przedstawiono przykładowy układ, w którym jako elementu dławiącego użyto termostatyczny zawór rozprężny. Parametry termodynamiczne obiegu zostały opisane za pomocą następujących symboli:  $p_0$  – ciśnienie parowania czynnika chłodniczego (strona niskiego ciśnienia obiegu chłodniczego),  $p_k$  – ciśnienie skraplania czynnika chłodniczego (strona wysokiego ciśnienia obiegu chłodniczego),  $t_0$  – temperatura parowania czynnika chłodniczego,  $t_k$  – temperatura skraplania czynnika chłodniczego. Strumienie ciepłne: odbierany przez obieg chłodniczy w parowniku i oddawany w skraplaczu są oznaczone odpowiednio jako  $\dot{Q}_o$  oraz  $\dot{Q}_k$ .

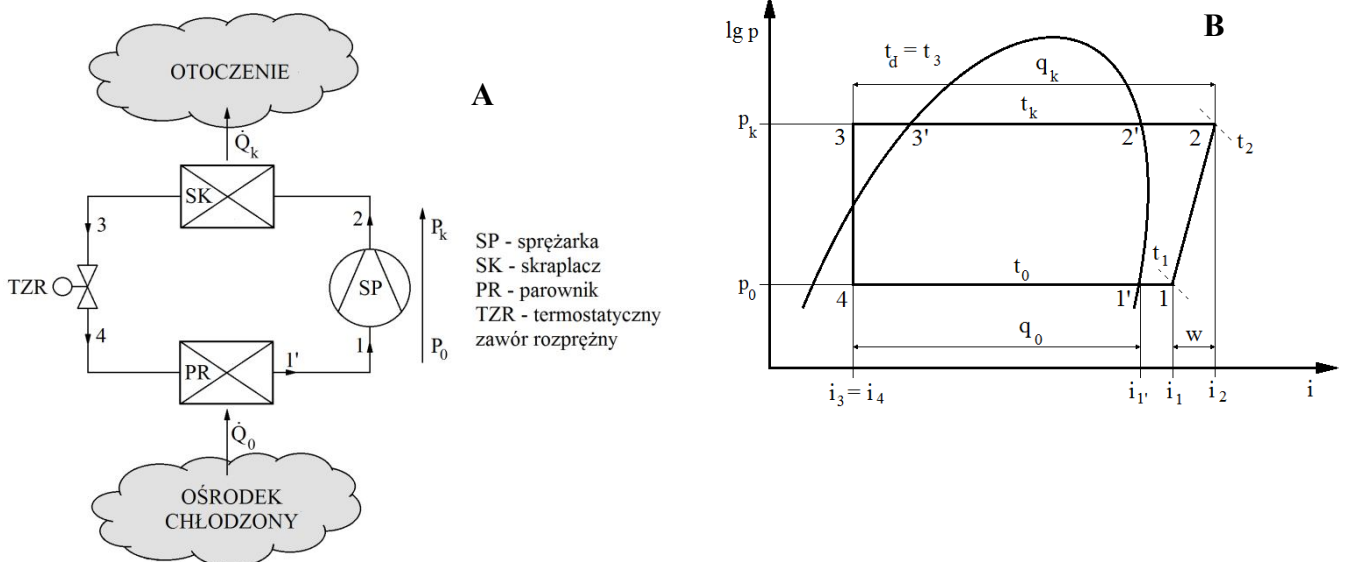


**Rysunek 1.** Schemat jednostopniowego sprężarkowego urządzenia chłodniczego (A) wraz z strumieniami cieczy pośrednich (B)  
*Scheme of one-stage compression refrigeration system (A) with intermediate liquid streams (B)*

Na rysunku 1B zamieszczono wielkości płynów przepływających przez wymienniki (skraplacz, parownik) określające ich parametry wlotowe i wylotowe obiegów cieczy pośrednich przepływających przez skraplacz i parownik, zgodnie z oznaczeniami:  $V_s$  – objętościowy strumień przepływu wody chłodzącej skraplacz,  $t_{s0}$  – temperatura wlotowa wody chłodzącej skraplacz,  $t_{s1}$  – temperatura wylotowa wody chłodzącej skraplacz,  $V_p$  – objętościowy strumień przepływu glikolu przez parownik,  $t_{p0}$  – temperatura wlotowa glikolu w parowniku,  $t_{p1}$  – temperatura wylotowa glikolu w parowniku.

Przemiany termodynamiczne zachodzące w obiegu chłodniczym przedstawia się na wykresie Molliera  $\log p$ - $i$ . W celu opisu procesów termodynamicznych zachodzących w jednostopniowym sprężarkowym obiegu chłodniczym posłużono się schematem ideowym (rysunek 2A) oraz wykresem  $\log p$ - $i$  (rysunek 2B), na którym zaznaczono parametry i funkcje stanu oraz przemiany termodynamiczne. Punkty charakterystyczne obiegu chłodniczego zostały oznaczone na rysunku 2 odpowiednio 1, 1', 2, 2', 3, 3' i 4. Czynnik chłodniczy krążący w obiegu zmienia swój stan i parametry. Czynnik chłodniczy opuszczający parownik jako para sucha – przegrzana, osiąga parametry odpowiadające punktowi 1' i jest przegrzewany od temperatury  $t_0$  do  $t_1$ . Na swej drodze do sprężarki (w przewodzie ssawnym) pobiera on dodatkowe ciepło przegrzania ( $q_p = i_1 - i_{1'}$ ). Sprężarka zasysa parę czynnika chłodniczego o ciśnieniu  $p_0$  (punkt 1) i spręża ją do ciśnienia  $p_k$  (punkt 2), podwyższając równocześnie jej temperaturę do  $t_2$ . Do zdefiniowania procesu sprężenia potrzebne jest wyznaczenie zmiany entalpii sprężania, która jest równa teoretycznej pracy sprężania ( $l_t = i_2 - i_1$ ) odniesionej do 1 kg masy czynnika.

Następnie sprężona para jest tłoczona do skraplacza, w którym jej temperatura obniża się do temperatury nasycenia (punkt 2') i dalej skrapla się (punkt 3') oraz zostaje przechłodzona do temperatury  $t_3$  (punkt 3). W procesie skraplania czynnik chłodniczy znajduje się pod stałym ciśnieniem  $p_k$ , a ciepło przekazywane jest w skraplaczu płynowi chłodzącemu. Jednostkowe ciepło skraplania wynosi ( $q_k = i_2 - i_3$ ) i składa się z ciepła przegrzania sprężonych par, ciepła właściwego skraplania oraz ciepła dochłodzenia. W efekcie tego procesu czynnik chłodniczy osiąga stan, którego parametry określamy w punkcie 3, charakteryzujący się temperaturą dochłodzenia  $t_d=t_3$ . Dochłodzony ciekły czynnik dopływa teraz do zaworu dławiącego, w którym ulega zdławieniu przy stałej entalpii właściwej (przemiana izentalpowa)  $i_3=i_4$  do ciśnienia parowania  $p_0$  (punkt 4). Ciecz przechłodzona (kondensat), przepływając przez zawór dławiący, przechodzi w stan pary mokrej i dalej przepływa do parownika (punkt 4), w którym następuje całkowite jej odparowanie kosztem ciepła pobieranego z przestrzeni ziębionej (ośrodek chłodzony rys. 2A). W parowniku mokre pary czynnika dzięki pobieraniu ciepła parowania ( $q_0 = i_{1'} - i_3$ ) podlegają procesowi odparowania. Parametry termodynamiczne czynnika chłodniczego powracają do stanu początkowego w punkcie 1, zatem obieg chłodniczy się zamyka. Przegrzany czynnik chłodniczy w stanie termodynamicznym (punkt 1) jest teraz ponownie zasysany przez sprężarkę.



**Rysunek 2.** Schemat ideowy jednostopniowego sprężarkowego urządzenia chłodniczego (A) wraz z wykresem  $\log p$ - $i$  (B)

*Scheme of one-stage compression refrigeration system (A) with  $\log p$ - $i$  figure (B)*

Energia wykorzystywana do działania sprężarki jest pracą napędzającą cały obieg

chłodniczy. Zatem jednostkową pracę obiegu oblicza się, wykorzystując zależność 1.

$$l_t = i_2 - i_1 \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (1)$$

Podczas rozprężania, czyli dławienia adiabatycznego, entalpia jest stała.

$$i_4 = i_3 \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (2)$$

Ciepło jednostkowe doprowadzone do układu i odprowadzone z niego obliczamy zgodnie z równaniem przemiany izobarycznej odpowiednio 3 i 4.

$$q_0 = i_1 - i_4 = i_1 - i_3 \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3)$$

$$q_K = i_2 - i_3 \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (4)$$

Sprawność energetyczna zwana współczynnikiem wydajności chłodniczej obiegu Lindego wyraża równanie 5.

$$\varepsilon_L = \frac{q_0}{l_t} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} \quad (5)$$

### Cel pracy i metody

Celem pracy było określenie optymalnych warunków pracy jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego, na przykładzie własnego układu modelowego, przy osiągnięciu możliwie najniższego współczynnika śladu węglowego.

Metodyka badań obejmowała następujące etapy:

- określenie właściwości termodynamicznych obiegu chłodniczego niezbędnych do badań modelowych,
- charakterystykę modelowej instalacji chłodniczej,
- przystosowanie układów pomiarowych instalacji chłodniczej umożliwiających kontrolę zmiennych, opisujących procesy zachodzące w obiegu chłodniczym,
- badania różnych termodynamicznych parametrów stanu jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego, m.in. temperatur i ciśnień przemian fazowych, temperatur płynów roboczych, natężeń przepływu płynów roboczych, obciążeń cieplnych i zużycia energii poszczególnych elementów obiegu,
- pomiary i wyznaczanie wydajności chłodniczej i zużycia energii dla jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego,

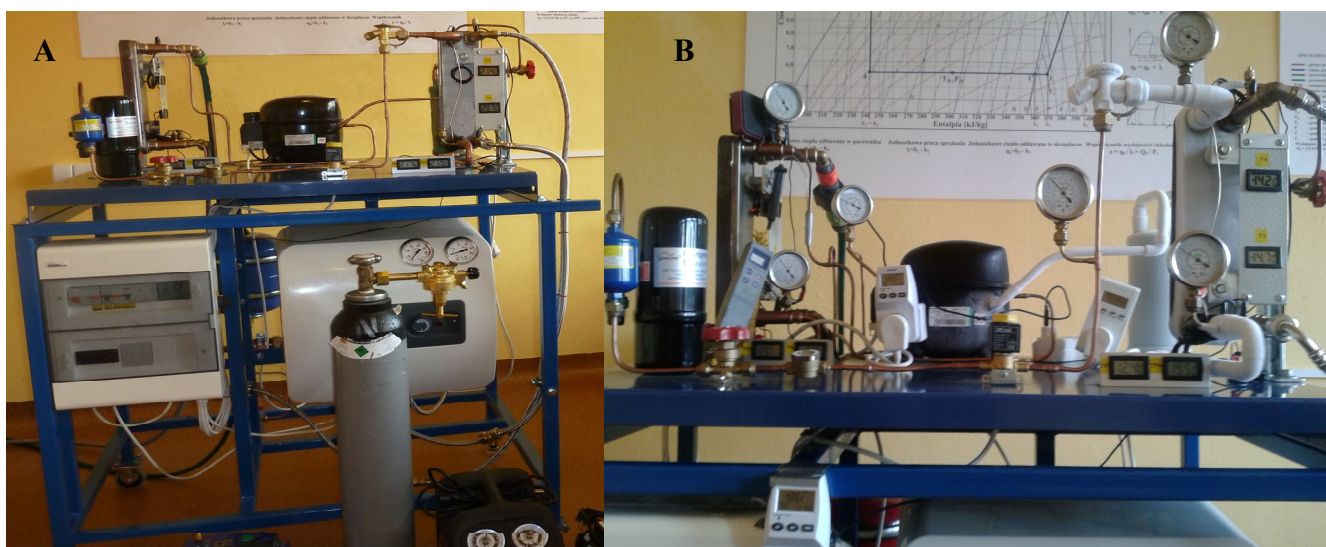
- badanie wpływu poszczególnych parametrów na wydajność chłodniczą i zużycie energii jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego,
- wyznaczenie wskaźników ekologicznych określających ślad węglowy dla zmiennych warunków pracy obiegu chłodniczego,
- określenie optymalnych, pod względem emisji CO<sub>2</sub>, warunków pracy jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego.

### **Stanowisko badawcze**

Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem modelowego jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego. Aparatura doświadczalna została opracowana i skonstruowana na podstawie następujących założeń:

- wydajność chłodnicza obiegu chłodniczego wynosi 1600 W dla temperatur cieczy przepływającej przez parownik 12/7°C (odparowanie 2°C) i cieczy przepływającej przez skraplacz 15/25°C (skraplanie 30°C),
- ciecz w parowniku to 20% roztwór glikolu etylenowego – natężenie przepływu 0,27 m<sup>3</sup>/h,
- ciecz w skraplaczu to woda – natężenie przepływu 0,158 m<sup>3</sup>/h.

Instalację zbudowaną zgodnie z tymi wytycznymi przedstawia rysunek 3A.



**Rysunek 3.** Modelowa instalacja chłodnicza (A) wraz z opomiarowaniem (B)

*Model refrigeration system (A) with measuring elements (B)*

Stanowisko badawcze składa się ze wszystkich elementów jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego koniecznych do jego prawidłowej pracy, umieszczonych na płycie montażowej. Oprócz elementów głównych, obieg został wyposażony w dodatkowe

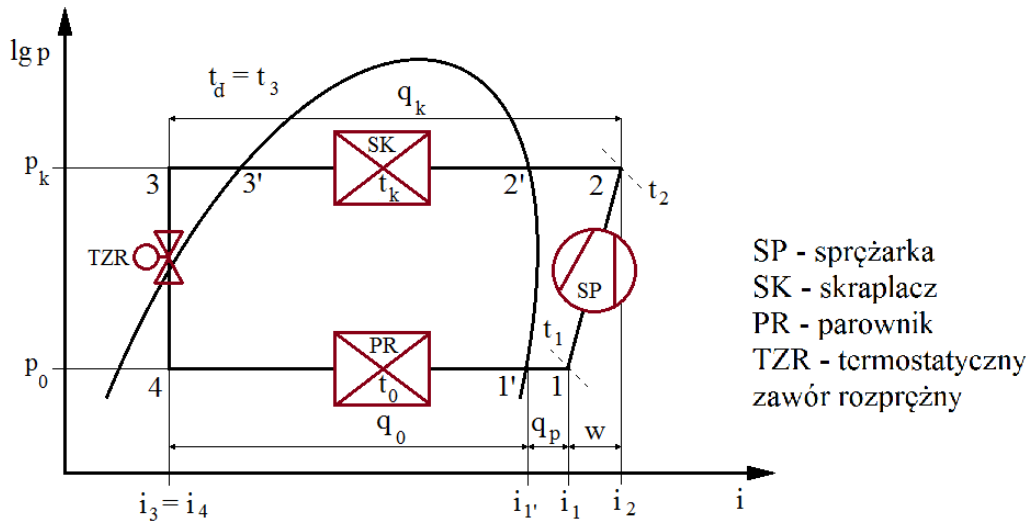


układy: pomocnicze, pomiarowe, regulacyjne i zabezpieczające. Elementy te zostały wymienione w tabeli 1. Zastosowane w niej oznaczenia konkretnych urządzeń i ich skróty będą konsekwentnie używane w dalszych rozważaniach. Na rysunku 4 przedstawiono wykres Molliera w układzie log p-i dla tej instalacji. W celu umożliwienia badania poszczególnych procesów termodynamicznych w warunkach kontrolowanych zostały przeprowadzone konieczne modyfikacje stanowiska. Polegały one na dodatkowym opomiarowaniu istotnych punktów i urządzeń jednostkowych. Zgodnie z przyjętymi założeniami na początku wytypowano optymalne przyrządy pomiarowe (pod względem zastosowania i kosztów), zweryfikowano ich działanie, ustalono zakresy pomiarowe oraz dokonano niezbędnych kalibracji; następnie zamontowano przyrządy pomiarowe (rysunek 3B). Na rysunku 5. przedstawiono schemat z zaznaczonymi punktami pomiarowymi, umożliwiającymi realizację zaplanowanego zakresu badań.

**Tabela 1.** Elementy modelowego układu chłodniczego

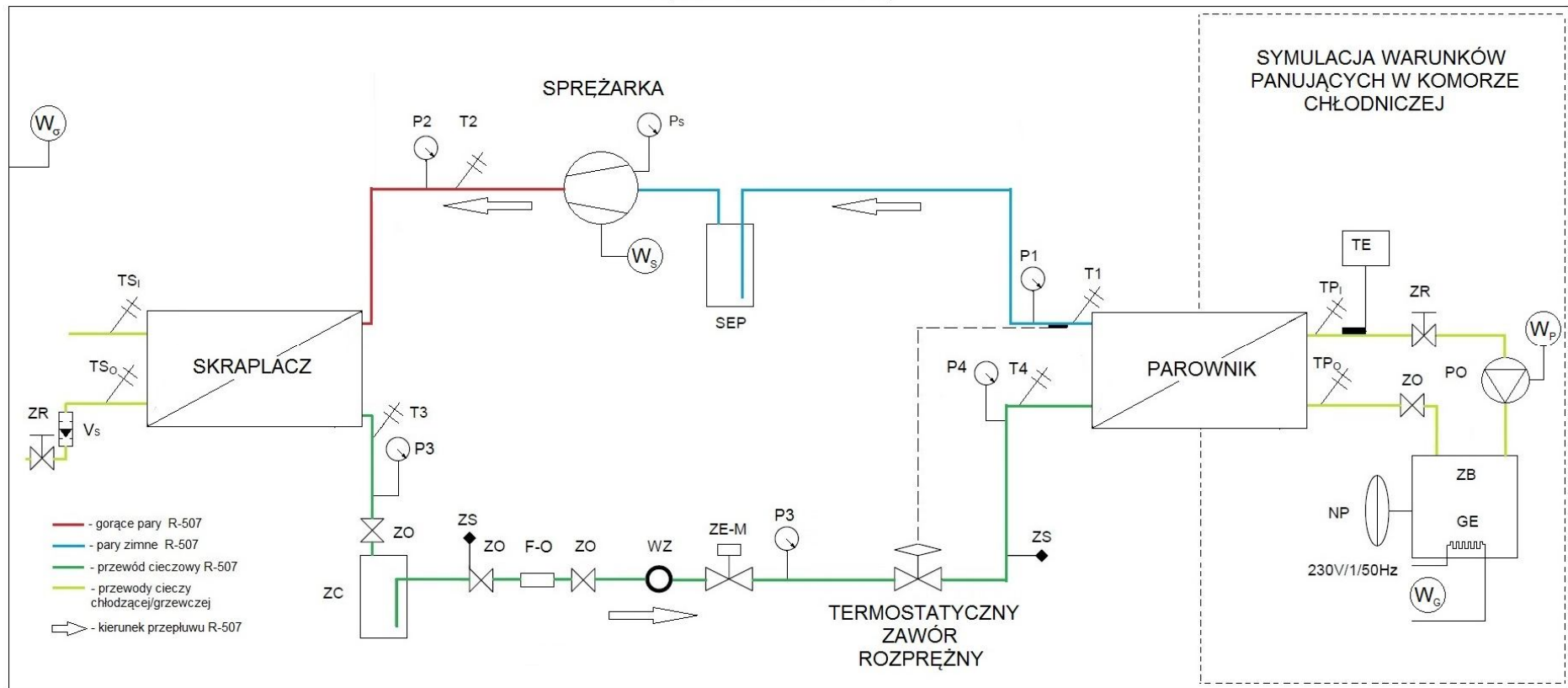
*The elements of model refrigeration system*

Elementy	Symbol i nazwa
główne	PR – parownik – płytowy wymiennik ciepła chłodzony wodą i glikolem
	SP – sprężarka hermetyczna
	SK – skraplacz – płytowy wymiennik ciepła chłodzony wodą
	TZR – termostatyczny zawór rozprężny
pomocnicze	SEP – separator cieczy
	ZC – zbiornik cieczy
	F-O – filtr osuszacz
	WZ – wziernik
	ZE-M – zawór elektromagnetyczny
regulacyjne	ZO – zawór odcinający
	ZS – zawór serwisowy
	TE – termostat sterujący
obiegu glikolowego i wodnego	PO – pompa
	ZB – zbiornik
	GE – grzałka elektryczna
	NP – naczynie wyrównawcze przeponowe
	ZR – zawór regulacyjny
	ZO – zawór odcinający



**Rysunek 4.** Wykres log p-i dla modelowej instalacji chłodniczej

*Log p-i figure for model refrigeration system*



**Rysunek 5.** Schemat stanowiska badawczego – modelowego układu chłodniczego z punktami pomiarowymi

*Test stand scheme – model refrigeration system with measuring points*

Do badań doświadczalnych niezbędne było wstępne przygotowanie modelowej instalacji, m.in. sprawdzenie poprawności działania urządzenia, właściwego stopnia napełnienia czynnikiem chłodniczym, doboru przyrządów sterujących i pomiarowych oraz ich nastaw. Dokonano regulacji i testów działania m.in. termostatycznego zaworu rozprężnego, presostatów: wysokiego i niskiego ciśnienia, termostatu sterującego temperaturą glikolu, regulatora napięcia grzałki obiegu glikolu, zaworu regulacji przepływu wody oraz watomierzy poboru energii: grzałki obiegu glikolu, przez sprężarkę, przez pompę obiegu glikolu i przez całe stanowisko badawcze.

Przed każdym badaniem przeprowadzano następujące czynności: sprawdzano szczelność układu, odpowietrzano obieg pomocniczy – glikolu, kontrolowano przepustowość filtrów i stan zaworów. Tak przygotowane stanowisko badawcze umożliwiało wiarygodne pomiary i ocenę wpływu zmian parametrów termodynamicznych na pracę obiegu chłodniczego.

### **Badania parametrów termodynamicznych modelowego układu chłodniczego**

Metodyka została opracowana na potrzeby realizacji zagadnienia badawczego z wykorzystaniem jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego. Możliwości te są ściśle związane z rodzajem procesu cieplnego oraz z zastosowanymi rozwiązaniami technicznymi w układzie chłodniczym. Mierzono następujące wielkości: temperatury i ciśnienia przemian fazowych, temperatury płynów roboczych, natężenia przepływu płynów roboczych oraz obciążenia cieplne i zużycia energii poszczególnych elementów obiegu.

Podczas badań procesu realizowanego w modelowym obiegu chłodniczym jest możliwość wpływania na obciążenia cieplne skraplacza i parownika. Każdy cykl pomiarowy przeprowadzony został przy stałych parametrach obciążenia parownika (stałym strumieniu cieplnym odbieranym przez obieg chłodniczy w parowniku) i dla stałej wartości strumienia cieplnego oddawanego przez obieg chłodniczy w skraplaczu. Obciążenie cieplne parownika oznaczone jako moc chłodnicza obiegu kontrolowane było poprzez regulację napięcia grzałki obiegu glikolu i utrzymywane na stałym poziomie poboru mocy przez grzałkę dla każdego cyklu pomiarowego. Badania przeprowadzano w zakresie od 400 W do 1300 W mocy grzałki, dokonując pomiarów co 100 W.

Obciążenie cieplne skraplacza oznaczone jako moc chłodzenia skraplacza kontrolowane było poprzez regulację natężenia przepływu wody chłodzącej i utrzymane na stałym poziomie dla danego cyklu pomiarowego. Badania przeprowadzano dla przepływów w zakresie od 1 l/min do 6 l/min co 1 l/min.

Dla każdej pary parametrów (400 W i 1 l/min), (500 W i 1 l/min), (1200 W i 6 l/min), (1300 W i 6 l/min) wykonany został jeden cykl pomiarów. Przeprowadzono 60 cykli

pomiarowych, przy założeniu zmienności: mocy chłodniczej i przepływu wody chłodzącej skraplacz.

Pomiary dla jednego cyklu rejestrowane były co 10 min dla wszystkich punktów. Jeden cykl pomiarowy trwał 190 min. W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych stwierdzono, że po tym czasie parametry termodynamiczne badanego procesu chłodniczego są termicznie ustabilizowane i niezmiennie w czasie. Mierzone były następujące parametry:

- $\tau$  [min] – czas pomiaru
- $t_1$  [°C] – temperatura czynnika chłodniczego na wyjściu z parownika (ssanie sprężarki)
- $p_o$  [bar] – ciśnienie parowania czynnika chłodniczego
- $t_2$  [°C] – temperatura czynnika chłodniczego na wejściu do skraplacza (tłoczenie sprężarki)
- $p_k$  [bar] – ciśnienie skraplania czynnika chłodniczego
- $t_3$  [°C] – temperatura czynnika chłodniczego na wyjściu ze skraplacza (przed zaworem rozprężnym)
- $t_4$  [°C] – temperatura czynnika chłodniczego na wejściu na parownik (za zaworem rozprężnym)
- $V_s$  [l/min] – natężenie przepływu cieczy chłodzącej skraplacz
- $t_{s0}$  [°C] – temperatura wlotowa cieczy chłodzącej skraplacz
- $t_{s1}$  [°C] – temperatura wylotowa cieczy chłodzącej skraplacz
- $V_p$  [l/min] – natężenie przepływu glikolu przez parownik
- $t_{p0}$  [°C] – temperatura wlotowa glikolu chłodzonego w parowniku
- $t_{p1}$  [°C] – temperatura wylotowa glikolu chłodzonego w parowniku
- $Q_o$  [W] – strumień cieplny odbierany w parowniku (moc chłodnicza)
- $P_{spręż}$  [W] – moc dostarczana do sprężarki
- $P_{pom}$  [W] – moc pobierana przez pompę obiegu glikolu
- $P_{całk.}$  [W] – moc całkowita pobierana przez stanowisko badawcze

Rzeczywiste zapotrzebowanie na moc do napędu sprężarki wyznaczono za pomocą przyrządów pomiarowych mierzących moc elektryczną pobieraną przez sprężarkę – watomierzy. Obciążenie cieplne parownika obiegu chłodniczego, określające strumień cieplny związany z mocą chłodniczą obiegu, zostało określone za pomocą watomierza poprzez pomiar mocy elektrycznej pobieranej przez grzałkę obiegu glikolu.

Na podstawie badań wpływu poszczególnych parametrów na wydajność chłodniczą i zużycie energii jednostopniowego sprężarkowego obiegu chłodniczego wyznaczono wskaźnik ekologiczny określający ślad węglowy dla zmiennych warunków pracy obiegu chłodniczego.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Badania procesu chłodzenia z wykorzystaniem modelowego układu przeprowadzono dla 60 cykli pomiarowych, przy założeniu określonej mocy chłodniczej oraz stałego przepływu wody chłodzącej skraplacza. W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki mierzonych parametrów układu modelowego tylko dla jednego przykładu. W tabeli 2. zamieszczono uzyskane rezultaty dla cyklu – wartości obciążeń cieplnych skraplacza i parownika (400 W i 1 l/min).

Zamieszczone we wszystkich tabelach wartości parametrów termodynamicznych obejmują dane dotyczące obiegu chłodniczego, obiegu wody chłodzącej skraplacza, obiegu glikolu i strumienie cieplne elementów obiegu chłodniczego. Są to wartości mierzone za pomocą odpowiednich przyrządów z optymalną czułością. Z wykresu Molliera wynika następująca zależność (równanie 6).

$$q_k = l_t + q_o \quad (6)$$

- $q_o$  – **jednostkowa wydajność chłodnicza**, czyli ilość ciepła pobierana przez 1 kg czynnika chłodniczego odparowującego w parowniku, równa przyrostowi entalpii właściwej [kJ/kg],
- $q_k$  – **jednostkowa wydajność cieplna skraplacza**, czyli ilość ciepła oddawana przez 1 kg czynnika chłodniczego w skraplaczu, równa spadkowi entalpii właściwej [kJ/kg],
- $l_t$  – **jednostkowa praca sprężania czynnika**, zużywana na podniesienie ciśnienia 1 kg czynnika, równa przyrostowi entalpii właściwej w sprężarce [kJ/kg].

Na podstawie równania 6. i wykorzystując bilans energetyczny i masowy modelowego urządzenia chłodniczego, można wyznaczyć strumień cieplny skraplacza (równanie 7).

$$P_{skrap} = P_{spręż} + \dot{Q}_o \quad (7)$$

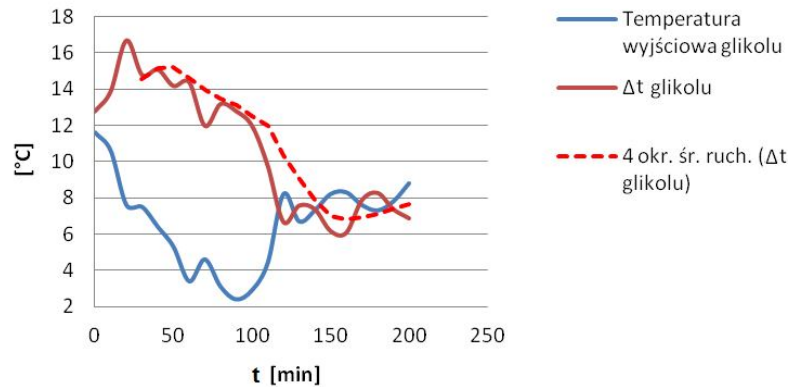
- $P_{spręż}$  – moc pobierana przez sprężarkę [W],
- $P_{skrap}$  – strumień cieplny oddawany przez obieg chłodniczy w skraplaczu [W],
- $\dot{Q}_o$  – strumień cieplny odbierany przez obieg chłodniczy w parowniku [W].

**Tabela 2.** Cykl pomiarowy dla mocy chłodniczej  $\dot{Q}_o \sim 400 \text{ W}$  i natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$

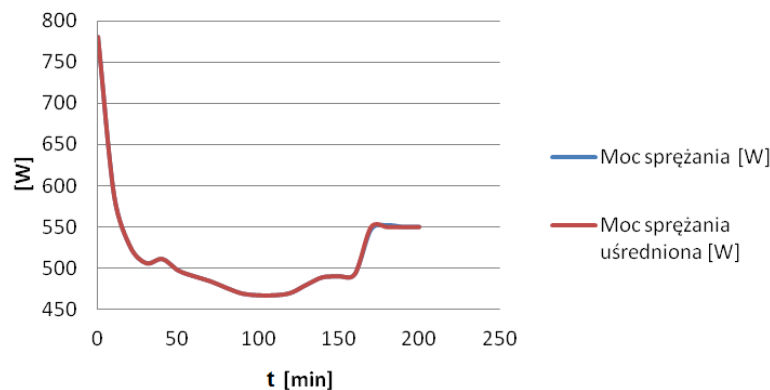
*Measuring cycle for cooling power  $\dot{Q}_o \sim 400 \text{ W}$  and the flow rate of water cooling the condenser  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$*

Czas pomiaru	Obieg chłodniczy						Obieg wody			Obieg glikolu			Strumienie ciepłne elementów obiegu chłodniczego				Wartości obliczone				
	$\tau$	$t_1$	$p_0$	$t_2$	$p_k$	$t_3$	$t_4$	$V_s$	$t_{s0}$	$t_{s1}$	$V_p$	$t_{p0}$	$t_{p1}$	$\dot{Q}_o$	$P_{\text{spręż}}$	$P_{\text{pom}}$	$P_{\text{całk}}$	$P_{\text{skrap}}$	$P_{\text{skr.śred}}$	$P_{\text{spręż.śred}}$	$\Delta t_p$
[min]	[°C]	[bar]	[°C]	[bar]	[°C]	[°C]	[l/min]	[°C]	[°C]	[l/min]	[°C]	[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[°C]
0	11,7	7,2	43,0	16,8	28,4	9,0	1	17,4	25,7	4,5	11,6	24,4	425	780	36	1258	1205	1205	780	12,8	
10	4,7	4,6	55,9	14,8	25,6	-6,4	1	17,0	25,2	4,5	10,6	24,5	400	588	36	1050	988	988	588	13,9	
20	-7,6	4,0	67,3	14	24,3	-9,3	1	17,4	24,4	4,5	7,6	24,3	403	526	36	987	929	929	526	16,7	
30	-9,6	3,8	73,9	13,5	23,7	-11,5	1	17,5	24,6	4,5	7,5	22,3	388	506	36	955	894	894	506	14,8	
40	-10,4	3,7	78,6	14,0	25,8	-11,3	1	17,4	26,2	4,5	6,4	21,5	403	511	36	978	914	914	511	15,1	
50	-10,3	3,6	78,6	13,2	23,9	-11,6	1	17,4	24,6	4,5	5,3	19,5	396	497	36	955	893	893	497	14,2	
60	-11,0	3,6	78,6	13,1	23,8	-12,1	1	17,6	24,2	4,5	3,4	17,8	397	490	36	948	887	887	490	14,4	
70	-12,5	3,5	77,7	13,0	22,2	-13,8	1	17,1	24	4,5	4,6	16,6	402	484	36	947	886	886	484	12,0	
80	-13,8	3,4	75,5	13,0	23,2	-13,5	1	17,2	23,4	4,5	2,4	15,2	403	469	36	935	872	872	469	12,8	
90	-14,5	3,4	74,5	13,0	22,2	-14,4	1	17,1	23,7	4,5	2,9	14,9	406	467	36	932	873	873	467	12,0	
100	-14,4	3,3	73,6	13,0	22,2	-14	1	16,9	24,2	4,5	4,4	14,2	406	467	36	937	873	873	467	9,8	
110	-14,5	3,3	67,3	13,0	23,2	-14,2	1	17,1	23,4	4,5	8,2	14,9	405	470	36	935	875	875	470	6,7	
120	-14,2	3,4	60,5	13,0	23,1	-14,3	1	17,4	23,4	4,5	6,7	14,3	403	480	36	942	883	883	480	7,6	
130	-14,5	3,4	54,2	13,1	23,8	-14,8	1	16,1	23,4	4,5	7,3	14,7	409	489	36	960	898	898	489	7,4	
140	-14,7	3,4	45,8	13,1	23,3	-14,4	1	16,1	23,7	4,5	8,2	14,4	406	490	36	960	896	896	490	6,2	
150	-14,5	3,4	41,6	13,2	23,4	-14,5	1	16,5	23,0	4,5	8,3	14,4	403	493	36	959	896	896	493	6,1	
160	-13,5	3,5	40,9	13,5	23,2	-13,5	1	16,2	23,0	4,5	7,6	15,5	407	547	36	1020	954	956	550	7,9	
170	-13,3	3,5	46,7	14,5	25,9	-13,6	1	17,4	25,8	4,5	7,3	15,6	408	552	36	1025	960	956	550	8,3	
180	-13,6	3,6	48,7	14,5	26,1	-13,2	1	17,9	25,2	4,5	7,8	15,2	405	550	36	1017	955	956	550	7,4	
190	-13,7	3,6	49,7	14,5	26,5	-13,3	1	17,8	25,4	4,5	8,8	15,7	406	550	36	1020	956	956	550	6,9	
Średnia	-13,5	3,6	46,5	14,3	25,4	-13,4	-	-	-	-	-	-	<b>407</b>	<b>550</b>	36	1021	956	-	-	-	

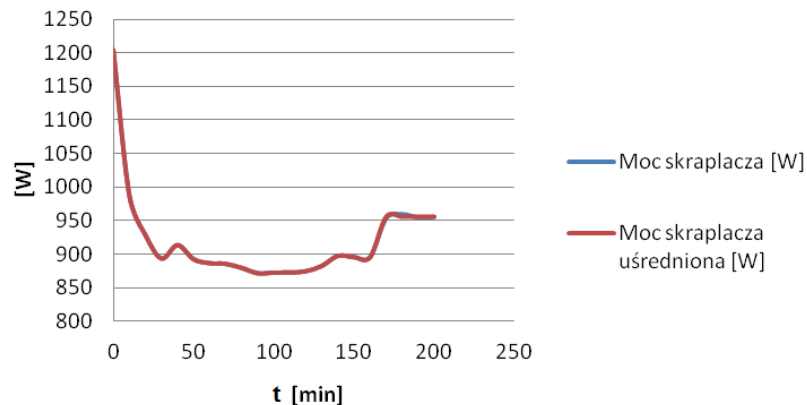
**Wskaźnik energetyczny** (dla mocy chłodniczej  $Q_o \sim 400 \text{ W}$  i natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$ ) = **1,35**



**Rysunek 6.** Temperatura glikolu podczas jednego cyklu pomiarowego dla mocy chłodniczej  $Q_o \sim 400 \text{ W}$  i natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$   
*The temperature of glycol during one measuring cycle for the cooling capacity  $Q_o \sim 400 \text{ W}$  and the flow rate of water cooling the condenser  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$*



**Rysunek 7.** Moc pobierana przez sprężarkę podczas jednego cyklu pomiarowego dla mocy chłodniczej  $Q_o \sim 400 \text{ W}$  i natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$   
*The power consumed by the compressor during one measuring cycle for the cooling capacity  $Q_o \sim 400 \text{ W}$  and the flow rate of water cooling the condenser  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$*



**Rysunek 8.** Moc oddawana w skraplaczu podczas jednego cyklu pomiarowego dla mocy chłodniczej  $Q_o \sim 400 \text{ W}$  i natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$   
*The output power in the condenser during one measuring cycle for the cooling capacity  $Q_o \sim 400 \text{ W}$  and the flow rate of water cooling the condenser  $V_s \sim 1 \text{ l/min}$*

W celu oznaczenia wartości parametrów dla procesu ustabilizowanego w czasie przy niezmiennych strumieniach cieplnych wyznaczono następujące „uśrednione” wartości:



- $P_{\text{skr.}\dot{\text{red}}}$  – strumień ciepła przepływający przez skraplacz wyznaczony na podstawie średniej wartości wyliczonej z kilku pomiarów, w których przyjęto, że układ jest już w stanie równowagi termodynamicznej,
- $P_{\text{spręż.}\dot{\text{red}}}$  – moc sprężarki wyznaczona na podstawie średniej wartości wyliczonej z kilku pomiarów, w których przyjęto, że układ jest już w stanie równowagi termodynamicznej.

Na rysunkach 6-8 przedstawiono zmienność wybranych parametrów pomiarowych w czasie trwania przykładowego cyklu badawczego. Wykres (rysunek 6) obrazuje wahania temperatury glikolu. Przeanalizowano uzyskane zależności oraz wyliczono różnicę temperatury glikolu na wlocie i wylocie z parownika. Określono ją jako  $\Delta t_p$ . Wykorzystując te wartości, wyznaczono liczbę punktów pomiarowych przyjmowanych do wyliczenia wartości średnich, które następnie wykorzystywane były do obliczenia wskaźników energetycznych. W celu potwierdzenia zasadności wyboru tych zakresów obliczeniowych wykonano również wykresy zmiany mocy pobieranej przez sprężarkę (rysunek 7) oraz zmianę mocy oddawanej w skraplaczu (rysunek 8) dla każdego cyklu badawczego. Analizując uzyskane wyniki, można zaobserwować, że układ ten osiąga po pewnym czasie stabilność strumieni ciepłych. Moc pobierana przez sprężarkę oraz moc oddawana w skraplaczu na początku procesu jest około 350 W wyższa niż w warunkach końcowych procesu. Prawdopodobnie wynika to z niewłaściwej (zbyt wysokiej) temperatury czynnika chłodzonego – glikolu, czyli z dużego odbioru ciepła przez parownik. W tych warunkach skraplacz jest zimny i ma dużą wydajność cieplną, a w konsekwencji ilość czynnika chłodniczego tłoczonego przez układ jest duża i sprężarka pracuje z wysoką wydajnością. Z drugiej strony ciśnienie skraplania jest niskie a wydajność układu chłodniczego jest wysoka.

Dla każdego cyklu pomiarowego wyznaczony został **wskaźnik energetyczny ( $\eta$ )**, określający ilość energii zużywanej do wytworzenia jednostki wydajności chłodniczej. Określa on stosunek ilości mocy pobieranej przez sprężarkę do wielkości strumienia ciepłego odbieranego przez obieg chłodniczy w parowniku (równanie 8).

$$\eta = P_{\text{spręż}} / \dot{Q}_o \quad (8)$$

W przypadku procesu termodynamicznego dla mocy chłodniczej  $\sim 400$  W i natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz  $\sim 1$  l/min wskaźnik ten wynosi 1,35. W analogiczny sposób zostały wyznaczone wartości tego wskaźnika dla wszystkich 60 zbadanych procesów chłodzenia (tabela 3). Zmianę wskaźnika emisji CO<sub>2</sub> ( $y$ ) w zależności od obciążeń cieplnych obiegu chłodniczego ( $x$ ) przedstawiono na rysunku 9. i opisano za pomocą następujących

zależności potęgowych:

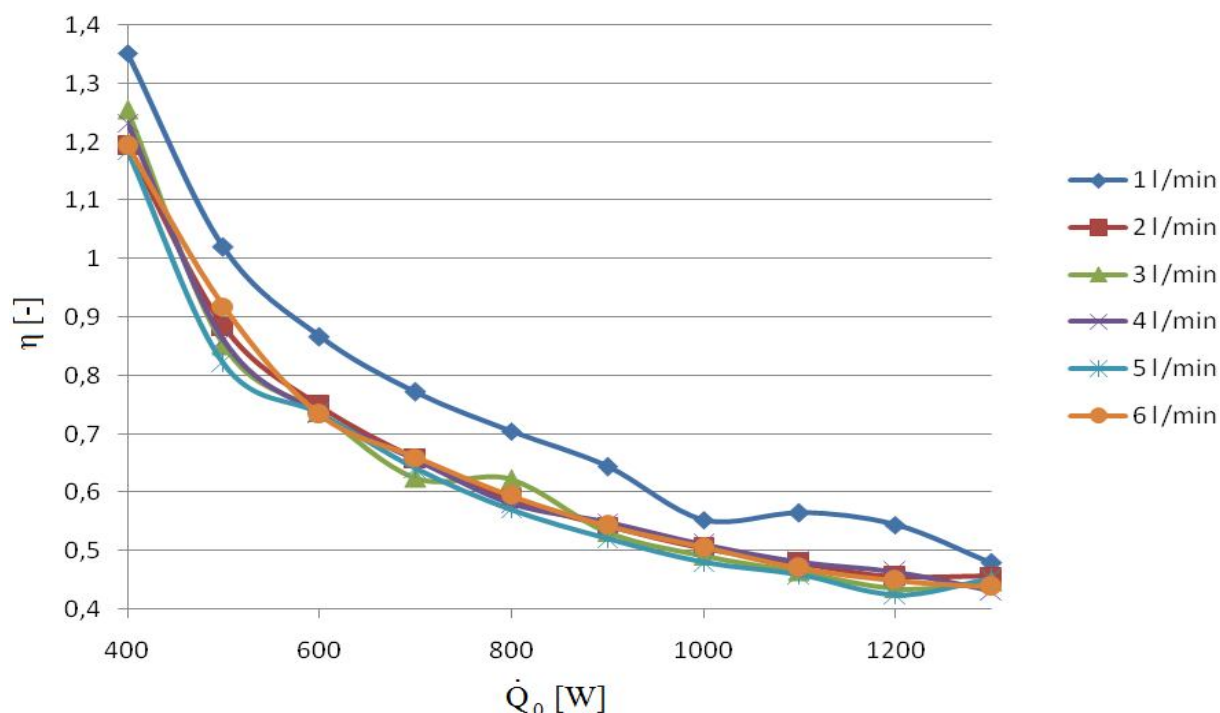
- dla 1 l/min  $y = 173x^{-0,822} R^2 = 0,9805$
- dla 2 l/min  $y = 134,22x^{-0,805} R^2 = 0,9706$
- dla 3 l/min  $y = 171,66x^{-0,844} R^2 = 0,9551$
- dla 4 l/min  $y = 146,04x^{-0,818} R^2 = 0,9657$
- dla 5 l/min  $y = 140,18x^{-0,817} R^2 = 0,9584$
- dla 6 l/min  $y = 164,46x^{-0,836} R^2 = 0,9794$

Charakter tych zmian jest analogiczny dla każdego przypadku.

Parametr  $\eta$  określa, jaką moc należy dostarczyć do napędu sprężarki, aby otrzymać 1 W wydajności chłodniczej w zależności od strumienia cieplnego parownika [W] i natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz [l/min].

**Tabela 3. Wskaźniki energetyczne dla zmiennych parametrów wstępnych układu chłodniczego**  
*Energy indicators for the initial variables of refrigeration system*

chłodzenie skraplacza [l/min]	moc chłodnicza = strumień cieplny parownika [W]									
	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
1	<b>1,35</b>	1,01	0,87	0,77	0,71	0,64	0,55	0,57	0,54	<b>0,48</b>
2	1,19	0,89	0,75	0,66	0,59	0,54	0,51	0,48	0,46	0,46
3	1,26	0,85	0,74	0,63	0,62	0,53	0,49	0,46	0,44	0,45
4	1,23	0,86	0,73	0,66	0,58	0,55	0,51	0,48	0,46	0,43
5	1,19	0,82	0,74	0,64	0,57	0,52	0,48	0,46	0,43	0,45
6	<b>1,19</b>	0,92	0,73	0,66	0,60	0,54	0,51	0,47	0,45	<b>0,44</b>



**Rysunek 9.** Zależność wskaźnika  $\eta$  od obciążeń cieplnych  
*The dependence of the index  $\eta$  from thermal loads*

Wyznaczone wartości wskaźnika energetycznego (tabela 3 i rysunek 9) określają, ile energii [W] należy zużyć do wytworzenia jednostki wydajności chłodniczej w zależności od obciążeń lub ile watów mocy włożonej do napędu silnika sprężarki potrzeba do wytworzenia 1 W „chłodu” dla badanego obiegu chłodniczego. Wskaźnik ten jest bezwymiarowy (moc sprężarki /moc chłodnicza [W/W]). Wskaźnik energetyczny jest parametrem określającym poziom emisji CO<sub>2</sub>.

Analizując uzyskane rezultaty, można stwierdzić, że im większa moc sprężarki, tym mniejszy wskaźnik w badanym zakresie, niezależnie od natężenia przepływu wody chłodzącej. Zauważono również, że różnica pomiędzy skrajnymi punktami pomiarowymi (dane pogrubione w tabeli 3) jest znacznie większa w przypadku natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz równego 1 l/min niż dla 6 l/min. Na wyznaczony wskaźnik energetyczny znaczny wpływ ma moc chłodnicza, czyli strumień cieplny parownika. Wzrost mocy o 900 W powoduje niemal trzykrotne zmniejszenie wskaźnika. W badanym zakresie wpływ natężenia wody chłodzącej skraplacz na wyznaczony wskaźnik jest znikomy.

Zakładając, że czas pracy wszystkich urządzeń, a konkretnie sprężarki i parownika, w obiegu chłodniczym jest taki sam, to wyznaczone wskaźniki w W/W są równe wartościom wskaźników w kWh/kWh. Wyznaczone wartości wskaźników dla danych obciążeń cieplnych skraplacza i parownika określają więc jednocześnie emisję CO<sub>2</sub> podczas pracy układu

chłodniczego. Uwzględniając dodatkowy parametr, jakim jest czas pracy instalacji chłodniczej, można wyznaczyć ilość energii niezbędnej do pracy danej instalacji w określonym czasie rzeczywistym. W Polsce przy wyprodukowaniu energii elektrycznej 1 kWh emituje się 0,997 kg CO<sub>2</sub>. Wykorzystując tę zależność, wyliczono ślad węglowy modelowej instalacji chłodniczej w zależności od warunków jej pracy. W przemyśle układy chłodnicze pracują okresowo. Wyliczono roczną emisję dwutlenku węgla, wykorzystując wyznaczone wskaźniki dla modelowego układu chłodniczego i zakładając, że instalacja przemysłowa pracuje ok. 50% w roku (tabela 4):

$$\tau = (365 \text{ dni} \times 24\text{h}) \times 50\% = 4380\text{h}$$

$$\text{CO}_{2\text{eq}} [\text{kg CO}_2/\text{kWh}] = \tau \times \eta \times 0,997 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$$

**Tabela 4.** Roczna emisja CO<sub>2</sub> przy wyprodukowaniu 1 kW chłodu

*The annual CO<sub>2</sub> emissions during production 1 kW of cold*

Chłodzenie skraplacza V <sub>s</sub> [l/min]	Moc chłodnicza [W]									
	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
	CO <sub>2eq</sub> [kg CO <sub>2</sub> /kWh]									
1	<b>5895,3</b>	4410,5	3799,2	3362,5	3100,5	2794,8	2401,8	2489,1	2358,1	<b>2096,1</b>
2	5196,6	3886,5	3275,1	2882,1	2576,4	2358,1	2227,1	2096,1	2008,8	2008,8
3	5502,2	3711,8	3231,5	2751,1	2707,5	2314,4	2139,8	2008,8	1921,4	1965,1
4	5371,2	3755,5	3187,8	2882,1	2532,8	2401,8	2227,1	2096,1	2008,8	1877,7
5	5196,6	3580,8	3231,5	2794,8	2489,1	2270,8	2096,1	2008,8	1877,7	1965,1
6	<b>5196,6</b>	4017,5	3187,8	2882,1	2620,1	2358,1	2227,1	2052,4	1965,1	<b>1921,4</b>

Analizując uzyskane rezultaty (tabela 4), można zauważyć trzykrotny spadek wielkości emisji CO<sub>2</sub> w zależności od mocy chłodniczej instalacji. Najlepsze chłodzenie uzyskuje się dla natężenia przepływu wody chłodzącej 2 l/min. Największa z badanych wydajność chłodnicza powoduje najmniejszą emisję CO<sub>2</sub> w przeliczeniu na jednostkę wytworzonego chłodu.

### **WNIOSKI**

Oszacowanie śladu węglowego pozwala określić ilość emitowanego dwutlenku węgla przez badaną instalację chłodniczą. Możliwe jest wskazanie w badanym procesie elementów prowadzących do zmniejszenia jego negatywnego wpływu na środowisko, przy optymalnej efektywności energetycznej. Oprócz obniżenia negatywnego wpływu na środowisko pozwala to jednocześnie na ograniczenie kosztów związanych z procesem przechowywania chłodniczego żywności.

Najważniejsze wnioski z przeprowadzonej pracy badawczej:

- Optymalne warunki pracy modelowego układu chłodniczego to natężenie przepływu wody chłodzącej skraplacza 2 l/min. Dalsze zwiększanie tej wartości nie powoduje wzrostu wydajności chłodniczej i nie zwiększa efektywności energetycznej obiegu chłodniczego.
- Wskaźnik energetyczny modelowej instalacji chłodniczej zmienia się, w zależności od wydajności chłodniczej, w zakresie 0,44-1,35.
- Im większy strumień cieplny parownika (wydajność chłodnicza obiegu), tym mniejszy wskaźnik energetyczny. Wzrost wydajności chłodniczej obiegu powoduje zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> w przeliczeniu na jednostkę „wyprodukowanego chłodu”.
- Główną składową wpływającą na ślad węglowy obiegu chłodniczego jest energia pobierana przez sprężarkę.
- Lepsze chłodzenie skraplacza (podwyższanie natężenia przepływu wody) powoduje jedynie dodatkowe zużycie wody, czyli wzrost innego wskaźnika środowiskowego, jakim jest ślad wodny.
- Wskaźnik emisji CO<sub>2</sub> [kg CO<sub>2</sub> / kWh] informuje o ilości wyemitowanego CO<sub>2</sub> podczas pracy obiegu chłodniczego. Posługując się wyznaczonym wskaźnikiem, można określić emisję CO<sub>2</sub>, uwzględniając wydajność chłodniczą i czas pracy układu chłodniczego.

Podsumowując, wszechstronna ocena skutków środowiskowych danej instalacji czy procesu powinna być kompleksową analizą uwzględniającą wszystkie oddziaływania na środowisko naturalne. Zatem podczas optymalizacji obiegu chłodniczego pod względem efektywności energetycznej (ślad węglowy) powinna również zostać przeprowadzona analiza

innych wskaźników ekologicznych, np. ślad wodny.

Obniżenie emisji pośredniej dwutlenku węgla przez układy chłodnicze powoduje jednocześnie ograniczenie kosztów związanych z procesem przechowywania chłodniczego żywności.

### **PIŚMIENNICTWO**

1. Butrymowicz D., Baj P., Śmierciew K. (2014). Technika chłodnicza. PWN
2. Cucek L., Klemes J., Kravanja Z. A. (2012). Review of Footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 34, 34, 9-20
3. Czapp M., Charun H., Bohdal T. (1996). Badania Laboratoryjne Urządzeń Chłodniczych i Klimatyzacyjnych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej
4. Hartikainen H., Roininen T., Katajajuuri J. M., Pulkkinen H. (2013). Finnish consumer perceptions of carbon footprints and carbon labelling of food products. *Journal of Cleaner Production*, 73, 285-293
5. Kotlewski F. (1972) Podstawowe pomiary w technice cieplnej. Wydawnictwa NT
6. Rees W. E. (1992). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanisation*, 4 (2), 121-130
7. Rees W. E. (1996). Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, 17 (3), 195-215
8. Sundarakani B., Goh M., de Souza R., Shun C. (2008). Measuring carbon footprints across the supply chain. *Proceeding of the 13th International Symposium on Logistics (ISL2008): Integrating the Global Supply Chain*, Nottingham University Business School, UK, 555-562
9. Ullrich H. J. (1998). Technika chłodnicza. Poradnik. IPPU MASTA
10. Wackernagel M., Rees W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers.
11. Wackernagel M., Onisto L., Bello P., Linares A. C., Falfan I. S. L., Garcia J. M., Guerrero A. I. S., Guerrero C. S. (1999). National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 29 (3), 375-390
- Wiedmann T., Minx J. (2008). A Definition of Carbon Footprint. W: Pertsova C. C. *Ecological Economics Research Trends*. Nova Science Publishers, Hauppauge 1, 1-11