Efektywność energetyczna systemów chłodniczych pracujących z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym

Energy efficiency of refrigeration systems using carbon dioxide as a working fluid

inż. Paulina Boroń, dr inż. Blanka Jakubowska*
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Instytut Energii

Artykuł dotyczy zagadnienia efektywności energetycznej układów chłodniczych pracujących z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym. W celu szczegółowego przeanalizowania potencjału zastosowania dwutlenku węgla, jako czynnika roboczego w urządzeniach chłodniczych, przeprowadzone zostały obliczenia dla kilku modeli układów chłodniczych. Do przeprowadzenia analizy wybrano trzy układy chłodnicze, tj. układ transkrytyczny, układ kaskadowy oraz typu booster. W ramach prowadzonej analizy zbadano i omówiono wpływ temperatury skraplania i parowania na efektywność energetyczną analizowanych układów.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, dwutlenek węgla, układ transkrytyczny, układ kaskadowy, układ typu booster, system chłodniczy

This article is related to the issue of energy efficiency of refrigeration systems using carbon dioxide as a working fluid. In order to analyze in detail the potential of using carbon dioxide as a working fluid in refrigeration systems, calculations have been performed for several models of refrigeration systems. In order to conduct this analysis, three refrigeration systems were selected, i.e. a transcritical system, a cascade system and a booster system. As part of the analysis, the influence of the condensation and evaporation temperature on the energy efficiency of the analyzed systems has been examined and discussed.

Keywords: energy efficiency, carbon dioxide, transcritical system, cascade system, booster system, refrigeration system

SPIS OZNACZEŃ:

COP – efektywność energetyczna [-]
c_p – ciepło właściwe [kJ/(kgK)]
h – entalpia właściwa [kJ/kg]
l_t – jednostkowa praca techniczna [kJ/kg]
p – ciśnienie [MPa], [bar]
q_o – jednostkowe ciepło dostarczone [kJ/kg]
s – entropia właściwa [kJ/(kgK)]
t – temperatura [°C]
ρ – gęstość [kg/m^3]

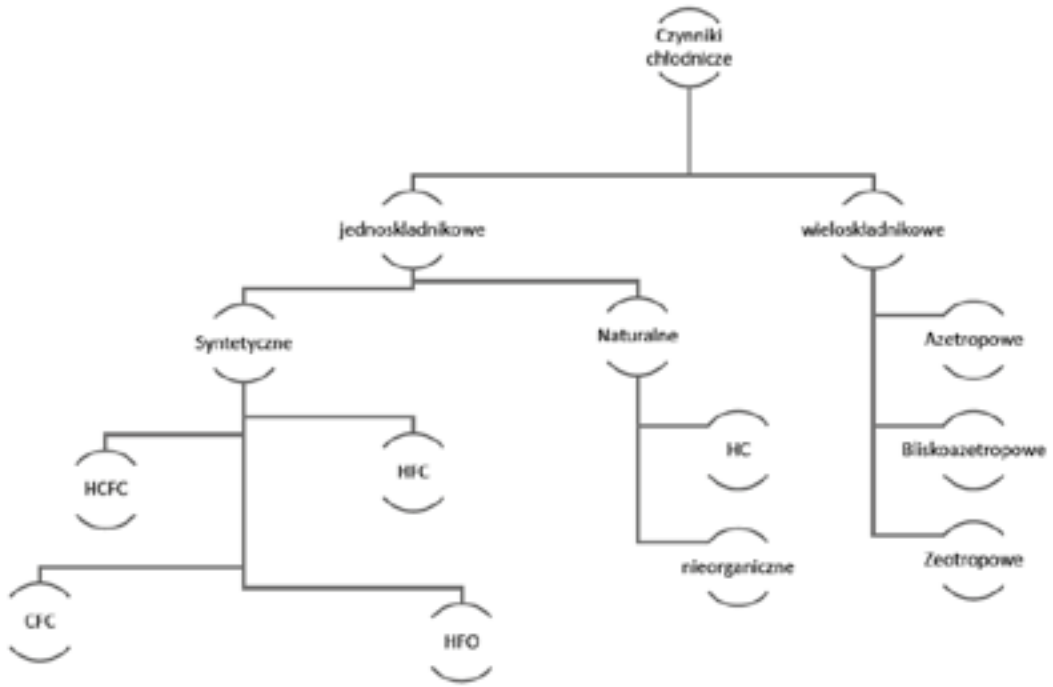
indeksy dolne:
g – faza parowa
k – skraplanie
l – faza ciekła
o – parowanie

WSTĘP

Chłodzenie jest to proces polegający na obniżaniu temperatury danego środowiska do temperatury niższej od otoczenia tego środowiska, a następnie utrzymywaniu tej temperatury na stałym poziomie. Działanie tego procesu jest znane ludzkości od wieków. Chęć udoskonalenia tego procesu doprowadziła do powstania osobnej dziedziny techniki znanej jako chłodnictwo. Dalszy rozwój technologii wymusza, zarówno na naukowcach, jak i projektantach, poszukiwanie coraz bardziej nowoczesnych i wydajniejszych rozwiązań. Nie ominęło to również chłodnictwa. Wykorzystywanie nowych technik w tej dziedzinie jest istotne przede wszystkim ze względu na potrzeby ogólnie pojętego rynku technologicznego. Jednak nie należy zapominać o wpływie chłodnictwa na środowisko, którego ochrona stała się obecnie bardzo istotną częścią badań, rozwoju, jak również dyskusji społecznej. Wybór rozwiązań dokonany przez projektanta stał się zatem nie tylko kwestią dopasowania parametrów na potrzeby urządzenia lub do wymagań np. inwestora, ale coraz częściej jest brany pod osąd społeczny i może mieć wpływ na decyzję o zakupie przez konsumenta. Obecnie w branży chłodniczej można zaobserwować duże zróżnicowanie stosowanych czynników. W celu zobrazowania różnorodności stosowanych czynników na rys. 1 przedstawiono szczegółowy podział stosowanych czynników chłodniczych.

Jak można zauważyć na podstawie przedstawionej klasyfikacji, najbardziej podstawową systematyzacją jest kategoryzacja na czynniki jednoskładnikowe i wieloskładnikowe. Substancje wieloskładnikowe dzielą się ponadto na: substancje azeotropowe, zachowujące się jak substancje jednorodne i nieulegające procesowi destylacji; czynniki zeotropowe, czyli mieszaniny czynników o różnej lotności oraz mieszaniny bliskoazeotropowe, które również wykazują lotność czynników składowych, jednak przy bardzo małych różnicach temperatur. Istotne jest również usystematyzowanie substancji pod kątem ich pochodzenia: syntetycznego oraz naturalnego [11 – 15].

Przykładowym, perspektywicznym czynnikiem należącym do grupy czynników naturalnych jest dwutlenek węgla, na któ-



Rys. 1. Klasyfikacja czynników chłodniczych [1, 4]

rym skupiono uwagę w niniejszym artykule. Dwutlenek węgla, w porównaniu z wielu stosowanymi w technice czynnikami roboczymi, jest relatywnie bezpieczny z uwagi na niepalność, niewybuchowość, a także obojętność względem metali i większości tworzyw sztucznych [12, 13]. Substancja ta, ze względu na swoje zastosowanie chłodnicze, była wykorzystywana już w 1866 roku, od momentu, gdy Franz Windhausen stworzył sprężarkę działającą na CO_2 [17]. Z tego względu, substancja ta uznawana jest za jeden z najstarszych czynników ziębniczych. Szczególnie do czasu pierwszej wojny światowej dwutlenek węgla był szeroko wykorzystywany zarówno w chłodniczych układach okrętowych, jak i w mniejszych urządzeniach oraz układach klimatyzacji w budynkach użyteczności publicznej [6]. Po rezygnacji z jego powszechnego zastosowania na początku XX wieku, dwutlenek węgla powraca obecnie do systemów chłodniczych i klimatyzacyjnych przede wszystkim ze względów konieczności ochrony środowiska. Wzrost zainteresowania wykorzystaniem tego atrakcyjnego i perspektywicznego czynnika do zastosowań technicznych był przesłanką do przeprowadzenia teoretycznej analizy efektywności układów chłodniczych pracujących z wykorzystaniem wspomnianego czynnika.

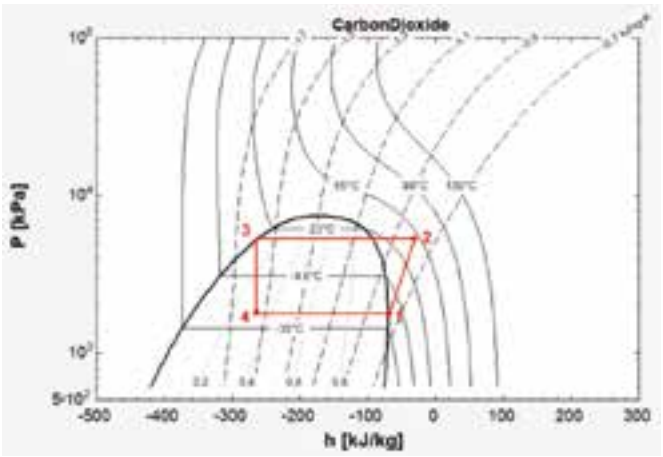
ZASTOSOWANIE DWUTLENKU WĘGLA W UKŁADACH CHŁODNICZYCH

Dwutlenek węgla obecnie stosowany jest w wielu gałęziach techniki. Od dawna znane jest jego użycie jako chłodziwa, w postaci tzw. suchego lodu, lub przy procesach obróbki skrawaniem metali [19]. Ponadto, CO_2 jest stosowany jako czynnik roboczy w elektrowniach atomowych, w układach Braytona [19]. Jest też brany pod uwagę jako czynnik roboczy w elektrowniach termojądrowych [10]. Dodatkowo, brany jest on pod uwagę do zastosowań jako płyn zasilający układy klimatyzacji w motoryzacji ze względu na fakt, iż jest jednym z najbezpieczniejszych czynników roboczych pochodzenia naturalnego. Już teraz stosowany on jest w niektórych nowych pojazdach marki Mercedes oraz Volkswagen [18]. Oczywiście, obecnie dwutlenek węgla stosowany jest również w wielu układach chłodniczych przemysłowych, szczególnie w przemyśle spożywczym, gdzie, ze względu na charakter produktów, konieczne jest zapewnienie bezpieczeństwa i nietoksyczności w przypadku ewentualnego wycieku czynnika chłodniczego [20].

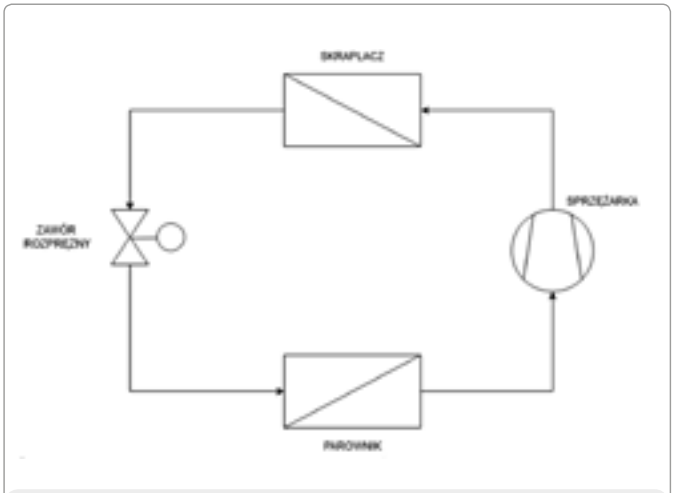
Podstawowym typem urządzenia chłodniczego jest jednostopniowe urządzenie chłodnicze o parametrach podkrytycznych. Dwutlenek węgla realizuje obieg chłodniczy Lindego, w odpowiednich dla tej substancji parametrach. Jest to typowy obieg teoretyczny dla sprężarkowych urządzeń chłodniczych, w którym zachodzi kolejno: izentropowe sprężanie pary w sprężarce, skraplanie pary w parowniku przy stałych parametrach temperatury i ciśnienia w obrębie pary wilgotnej (w obrębie pary suchej przegranej i w przy parametrach nadkrytycznych proces ten zachodzi izobarycznie), izentalpowe dławienie, po którym często następuje rozdzielenie fazy ciekłej od fazy gazowej czynnika oraz wrzenie cieczy przy stałych parametrach temperatury i ciśnienia [6]. Przemiany na wykresie $p - h$, realizowane w przykładowym obiegu chłodniczym jednostopniowym, podkrytycznym przy zastosowaniu dwutlenku węgla jako czynnika roboczego, przedstawiono na rys. 2. Natomiast schemat ideowy tego typu urządzenia zaprezentowano na rys. 3. Warto nadmienić, że ciśnienie pracy dwutlenku węgla w urządzeniu realizującym taki obieg wynosi od 6 do 7,3 MPa, natomiast ciśnienie w parowniku nie powinno być niższe od 0,6 MPa, ze względu na zamarznięcie czynnika po przekroczeniu parametrów punktu potrójnego [17].

Stosowanie dwutlenku węgla w urządzeniach jest często ograniczone przez temperaturę punktu krytycznego. Z tego względu urządzenia wyposażone w układy podkrytyczne CO_2 stosowane są głównie w krajach o klimacie umiarkowanym,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 2. Przemiany na wykresie p-h realizowane w układzie jednostopniowym, podkrytycznym z zastosowaniem dwutlenku węgla jako czynnika roboczego [8]



Rys. 3. Schemat urządzeń realizujących jednostopniowy obieg chłodniczy [20]

TABELA 1. Przyjęte do analizy temperatury skraplania i parowania

	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Temperatura skraplania	t_k	°C	32
			35
			38
Temperatura parowania	t_o	°C	-53
			-46
			-38
			-32
			-26

z niskimi temperaturami powietrza zewnętrznego, szczególnie w okresie miesięcy zimowych. Ponadto, tego typu układu stosowane są również w technologii okrętowej, gdzie istnieje możliwość ochładzania skraplacza przy użyciu chłodziwa, którego funkcję pełni woda morska. Warto również podkreślić, że przede wszystkim, układy podkrytyczne na dwutlenek węgla stosowane są jako elementy większego układu, tj. urządzenia kaskadowego czy też transkrytycznego [17].

MODEL OBLICZENIOWY

Analiza efektywności układów chłodniczych pracujących z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym została przeprowadzona dla trzech obiegów teoretycznych, tj.: obiegu transkrytycznego, obiegu kaskadowego oraz typu booster. W celu przeprowadzenia analizy porównawczej efektywności tych układów obliczenia przeprowadzono dla tych samych temperatur skraplania t_k oraz parowania t_o. Przyjęte do obliczeń wartości temperatur t_k i t_o przedstawiono w tab. 1. Natomiast, w tab. 2 przedstawiono wybrane właściwości dwutlenku węgla dla rozważanych w niniejszej analizie temperatur parowania. Dodatkowo, warto nadmienić, że niezależnie od analizowanego układu, w prowadzonych obliczeniach przyjęto pełną izolację sytemu. W związku z tym w obliczeniach nie uwzględniono strat energetycznych.

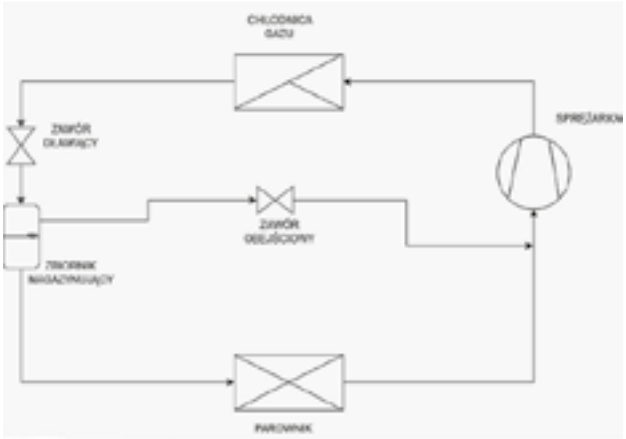
Schematy urządzeń realizujących poszczególne obiegi, przyjęte do niniejszej analizy oraz odwzorowanie zachodzących w nich przemian, zostało przedstawione na rys. 4 – 9.

Jak można łatwo zauważyć, na podstawie przedstawionych schematów urządzeń realizujących przyjęte do niniejszej analizy obiegi oraz zachodzących w tych obiegach przemian, w celu wyznaczenia efektywności poszczególnych układów chłodniczych, dla każdego z nich należało przyjąć dodatkowe założenia obliczeniowe. W przypadku obiegu transkrytycznego do obliczeń, oprócz temperatur t_k i t_o, założono również wartość ciśnienia upustowego gazu za zbiornikiem magazynującym na poziomie 25 barów. Ponadto, dla obiegu transkrytycznego należało również przyjąć dodatkowe założenie wartości ciśnienia, dla którego będzie zachodził proces skraplania. W tab. 3 przedstawiono wybrane właściwości dwutlenku węgla dla nadkrytycznych wartości ciśnienia i temperatury.

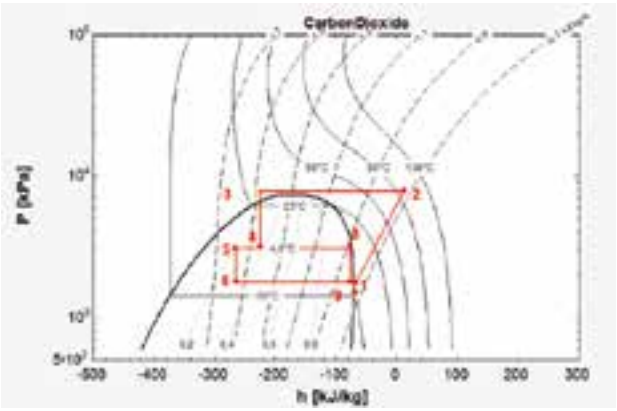
W przypadku układu typu booster dodatkowo przyjętymi założeniami, w celu przeprowadzania obliczeń, było przyjęcie stałego ciśnienia procesu rozprężania gazu wynoszącego 25 barów oraz ciśnienia panującego w parow-

TABELA 2. Wybrane właściwości dwutlenku węgla dla temperatur parowania [9]

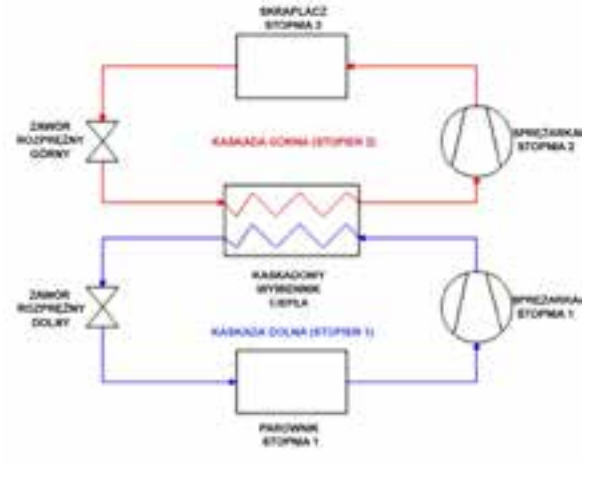
t_o	p_o	ρ_l	ρ_g	h_l	h_g	s_l	s_g	c_{pl}	c_{pg}
°C	kPa	kg/m³	kg/m³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kgK)	kJ/(kgK)	kJ/(kgK)	kJ/(kgK)
-53	602,91	1165,6	15,913	87,023	431,69	0,55299	2,1186	1,9622	0,93132
-46	800,15	1139,6	20,912	100,88	433,86	0,61418	2,0801	1,9853	0,98196
-38	1080,5	1008,5	28,071	116,95	435,72	0,68261	2,0382	2,0220	1,0523
-32	1334,2	1084,1	34,644	129,20	436,62	0,73311	2,0079	2,0587	1,1165
-26	1629,3	1058,6	42,445	141,69	437,04	0,78311	1,9781	2,1055	1,1938



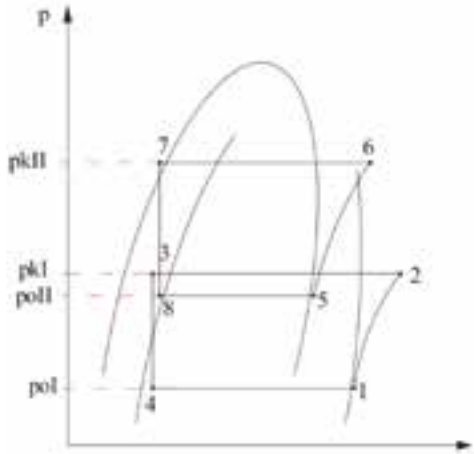
Rys. 4.. Układ transkrytyczny na CO_2 z zaworem rozprężnym wysokiego ciśnienia [5]



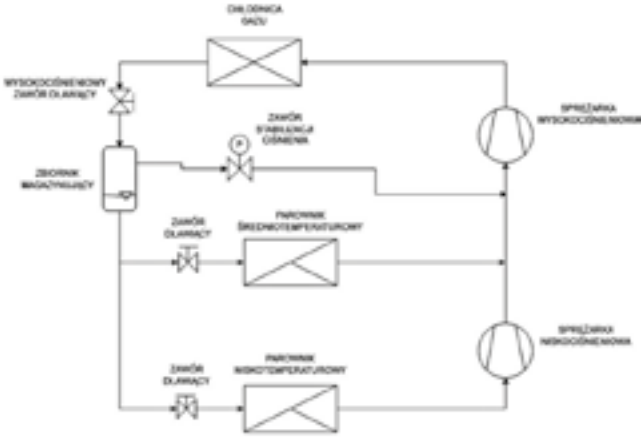
Rys. 5. Obieg transkrytyczny na CO_2 w układzie p–h [8]



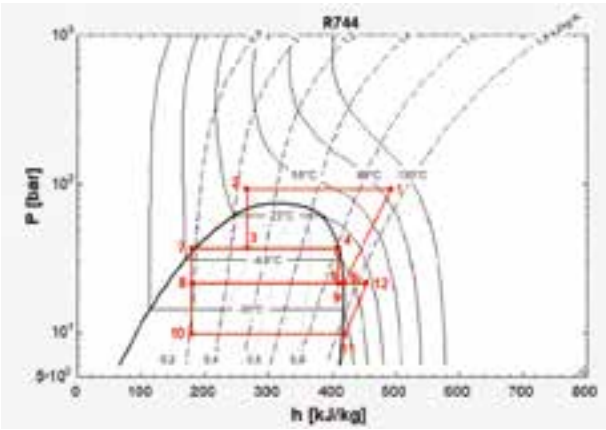
Rys. 6. Schemat układu kaskadowego, pracującego na CO_2 i NH_3 [5]



Rys. 7. Obieg kaskadowy układu NH_3/CO_2 w układzie p–h [3]



Rys. 8. Układ typu booster [2, 5]



Rys. 9. Obieg typu booster w układzie p–h [2, 8]

niku średniotemperaturowym. Proces parowania w parowniku średniotemperaturowym został obliczony dla założonego ciśnienia wynoszącego 15,19 bara. Jednakże, na skutek zmniejszającej się różnicy ciśnień, zdecydowano się na dodatkowe obliczenia, zakładając ciśnienie w parowniku średniotemperaturowym na poziomie 20 barów.

Natomiast, w przypadku analizy układu kaskadowego, przyjęto, że temperatura parowania amoniaku (górna kaska-

TABELA 3. Wybrane właściwości dwutlenku węgla dla temperatury i ciśnienia skraplania w obiegu transkrytycznym [9]

t_k	p_k	ρ	h	s	c_p
°C	kPa	kg/m³	kJ/kg	kJ/(kgK)	kJ/(kgK)
32	7650,0	584,90	309,57	1,3575	20,110
35	9430,0	688,01	294,12	1,2981	4,6858
38	10000,0	666,79	302,62	1,3229	4,8154

TABELA 4. Wybrane właściwości amoniaku dla temperatur skraplania i parowania [9]

t	p	ρ_l	ρ_g	h_l	h_g	s_l	s_g	c_{pl}	c_{pg}
°C	kPa	kg/m³	kg/m³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kgK)	kJ/(kgK)	kJ/(kgK)	kJ/(kgK)
-10	290,71	652,06	2,3906	297,16	1593,9	1,3009	6,2285	4,5636	2,5419
32	1238,2	592,08	9,5950	494,61	1630,3	1,9911	5,7128	4,8471	3,2985
35	1350,8	587,40	10,457	5 9,23	1631,5	2,0382	5,6801	4,8771	3,3745
38	1470,9	582,65	11,381	523,93	1632,5	2,0850	5,6479	4,9091	3,4546

da) będzie wynosić -10°C, a temperatura skraplania dwutlenku węgla (dolna kaskada) będzie na poziomie -5°C. Wybrane właściwości amoniaku, zastosowanego w górnej kaskadzie analizowanego obiegu, zostały zamieszczone w tab. 4.

W celu wyznaczenia efektywności energetycznej poszczególnych układów wykorzystano ogólną zależność opisaną równaniem (1) [16]:

$$COP = \frac{q_0}{l_t} \tag{1}$$

gdzie: q_0 – jednostkowe ciepło dostarczone do czynnika, l_t – jednostkowa praca techniczna sprężarki.

Przy czym, określenie zarówno jednostkowego ciepła dostarczonego do czynnika, jak również jednostkowej pracy technicznej, w każdym z analizowanych obiegów, wymagało określenia wartości entalpii właściwych w punktach węzłowych. Dla przejrzystości prowadzonych obliczeń przyjmuje się, że w przypadku każdego z omawianych układów poszczególne punkty węzłowe są zgodne z punktami przedstawionymi na rysunkach prezentujących przemiany w tych obiegach, tj. dla układu transkrytycznego – rys. 5, dla układu kaskadowego – rys. 7, a dla układu typu booster – rys. 9. Końcowe zależności, które zostały wykorzystane do określenia efektywności energetycznej poszczególnych obiegów, zostały bardziej szczegółowo przedstawione w tab. 5. Przy czym wartości entalpii właściwych w poszczególnych punktach węzłowych określono za pomocą programu REFPROP [9].

TABELA 5. Zależności opisujące *COP* dla poszczególnych układów chłodniczych [2, 3, 7]

Układ	Rysunek	Równanie opisujące *COP*
Transkrytyczny [7]	rys. 5	$COP = \frac{h_1 - h_6}{h_2 - h_1}$ (2)
Kaskadowy [3]	rys. 7	$COP = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_1) + (h_6 - h_5) \cdot \mu}$ (3) $\mu = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8}$ (4) gdzie μ jest stosunkiem jednostkowego ciepła oddanego w wymienniku kaskadowym przez CO_2 do jednostkowego ciepła dostarczonego do wymiennika przez NH_3
Booster [2]	rys. 9	$COP = \frac{q_{o_{LT}} + q_{o_{MP}}}{l_{t_{LT}} + l_{t_{MP}}}$ (5) $COP = \frac{(h_{11} - h_{10}) + (h_9 - h_8)}{(h_{12} - h_{11}) + (h_1 - h_6)}$ (6)

WYNIKI ANALIZY

Wyniki obliczeń prowadzonej analizy efektywności energetycznej systemów chłodniczych pracujących z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym zostały przedstawione na rys. 10 – 14. Efektywność energetyczna układu transkrytycznego przy zmiennej temperaturze parowania została przedstawiona na rys. 10.

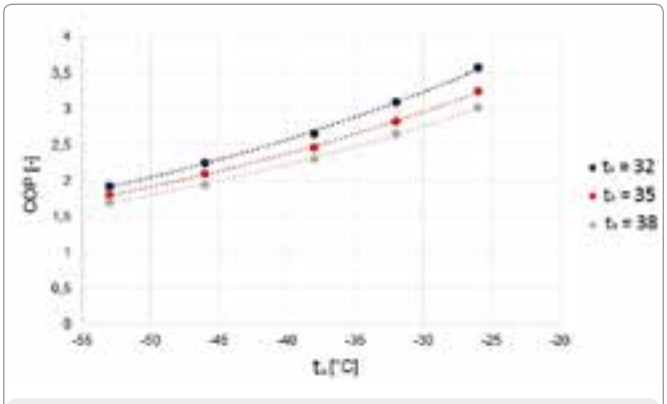
W związku z faktem, że w przypadku układu typu booster obliczenia prowadzono zarówno dla ciśnienia w parowniku średniotemperaturowym wynoszącego odpowiednio 15,19 bara oraz 20 barów, uzyskane wartości *COP* dla obu analizowanych przypadków w tym układzie przedstawiono kolejno na rys. 11 i 12.

Natomiast, wyniki analizy efektywności energetycznej układu kaskadowego przedstawiono na rys. 13.

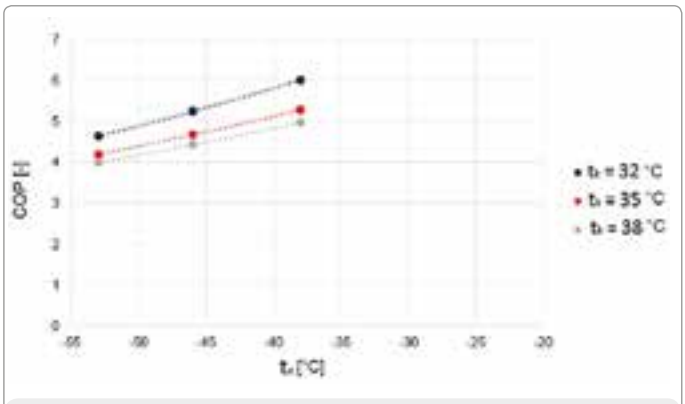
Jak można łatwo zauważyć, wpływ na efektywność energetyczną układów chłodniczych ma m.in. temperatura skraplania. Im niższa temperatura skraplania, tym uzyskiwana wartość *COP* jest większa. Ponadto, na uzyskiwaną efektywność energetyczną ma wpływ również temperatura parowania. W przypadku temperatury parowania, wartość uzyskiwanego *COP* jest większa przy wyższej temperaturze parowania. W tab. 6 przedstawiono zbiorcze zestawienie uzyskanych wyników obliczeń.

Natomiast, porównanie uzyskanych wyników obliczeń dla wszystkich analizowanych układów przy zmiennej temperaturze parowania zostało przedstawione dla wybranej temperatury skraplania, wynoszącej 32°C, na rys. 14. Na podstawie tab. 6 oraz rys. 14 można łatwo zauważyć, że w przypadku ukła-

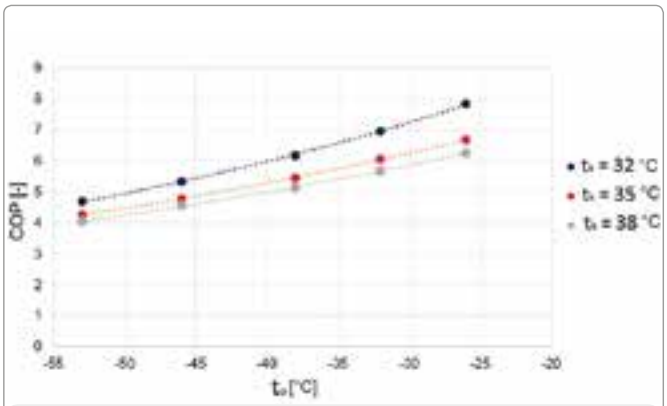
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



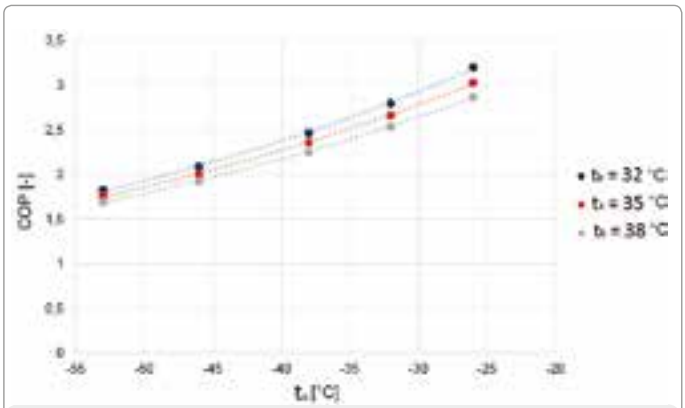
Rys. 10. Efektywność energetyczna układu transkrytycznego przy zmiennej temperaturze parowania



Rys. 11. Efektywność energetyczna układu typu booster przy zmiennej temperaturze parowania i ciśnieniu w parowniku p_{MT} = 15,19 bara



Rys. 12. Efektywność energetyczna układu typu booster przy zmiennej temperaturze parowania i ciśnieniu w parowniku p_{MT} = 20 barów



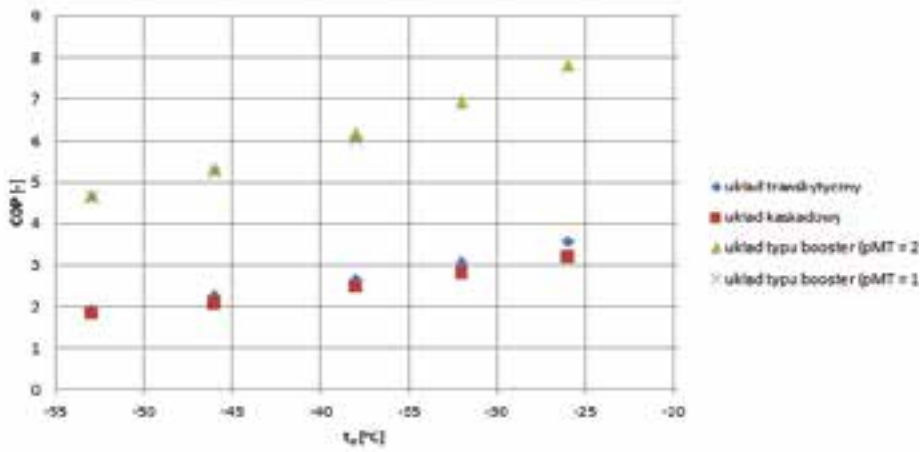
Rys. 13. Efektywność energetyczna układu kaskadowego przy zmiennej temperaturze parowania

du transkrytycznego oraz kaskadowego wyniki uzyskanych wartości *COP* są bardzo zbliżone. Przy czym różnica wartości *COP* dla układu transkrytycznego w porównaniu z wartościami dla układu kaskadowego nieznacznie zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury parowania. Natomiast efektywność energetyczna układu typu booster jest znacznie wyższa niż w przypadku układów transkrytycznego i kaskadowego. Warto również nadmienić, że w przypadku układu typu booster niemożliwe okazało się przeprowadzenie obliczeń dla temperatur parowania -32 i -26 °C, przy założonym ciśnieniu części średniotemperaturowej 15,19 bara. Ciśnienie to okazało się za niskie, powodując nieprawidłową do realizacji różnicę ciśnień między częścią niskotemperaturową a średniotemperaturową. W związku z tym wprowadzona została poprawka zmieniająca

TABELA 6. Wartości COP dla analizowanych układów chłodniczych

Układ	Temperatura skraplania t_k [°C]	*COP* [-]				
		Temperatura parowania t_o [°C]				
		-53	-46	-38	-32	-26
Transkrytyczny	32	**1,917**	**2,248**	**2,654**	**3,093**	**3,571**
	35	**1,794**	**2,095**	**2,465**	**2,823**	**3,244**
	38	**1,705**	**1,939**	**2,306**	**2,651**	**3,017**
Kaskadowy	32	**1,824**	**2,086**	**2,466**	**2,796**	**3,196**
	35	**1,758**	**2,003**	**2,357**	**2,661**	**3,026**
	38	**1,694**	**1,956**	**2,252**	**2,533**	**2,867**
Booster p_{MT} = 20 barów	32	**4,688**	**5,323**	**6,170**	**6,954**	**7,833**
	35	**4,256**	**4,773**	**5,446**	**6,049**	**6,671**
	38	**4,040**	**4,553**	**5,132**	**5,665**	**6,235**
Booster p_{MT} = 15,19 bara	32	**4,634**	**5,241**	**6,001**	**-**	**-**
	35	**4,188**	**4,679**	**5,278**	**-**	**-**
	38	**3,988**	**4,432**	**4,967**	**-**	**-**

wartość ciśnienia w parowniku średniotemperaturowym. Jak już nadmieniono w niniejszym artykule, nową wartość ciśnienia w parowniku średniotemperaturowym przyjęto na poziomie 20 barów i dla takiej wartości obliczono ponownie wszystkie elementy obiegu. Na podstawie tego można zauważyć, jaki wpływ na *COP* ma odpowiedni wybór temperatury i ciśnienia w parowniku średniotemperaturowym. Jak można zauważyć na podstawie zaprezentowanych wyników, w przypadku zwiększenia wartości tego ciśnienia nastąpił nieznaczny wzrost wartości *COP*.



Rys. 14. Porównanie efektywności energetycznej analizowanych układów przy zmiennej temperaturze parowania i temperaturze skraplania t_k = 32°C

PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule dokonano analizy efektywności energetycznej trzech układów chłodniczych, tj. transkrytycznego, kaskadowego oraz typu booster, pracujących z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem roboczym. Na podstawie przeprowadzonej analizy można łatwo zauważyć wpływ doboru temperatury parowania czynnika. Wzrost temperatury parowania wpływa na wzrost *COP* w przypadku każdego analizowanego w artykule układu chłodniczego. Na podstawie prowadzonej analizy można również zauważyć, że na wartość efektywności energetycznej układów ma również wpływ temperatura skraplania. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, w tym przypadku wzrost temperatury ma działanie odwrotnie proporcjonalne, tj. wzrost temperatury skraplania wpływa na zmniejszenie uzyskiwanych wartości *COP*.

Wykonane i zaprezentowane w tym artykule obliczenia mają charakter teoretyczny i przez to zastosowano w nich pewne uproszczenia. W związku z tym otrzymane wyniki mogą prezentować się w sposób bardziej satysfakcjonujący, niż wartości osiągane w rzeczywistych urządzeniach chłodniczych. Niemniej, uzyskane wyniki przedstawiają tendencje do wykorzystania w realnych systemach oraz przewidują, jak wprowadzone modyfikacje, polegające głównie na zmianie temperatur skraplania i parowania, mogą wpłynąć na pracę danego układu. Obliczenia zawarte w artykule niestety nie wyczerpują pełnego spectrum możliwości wpływania na efektywność chłodniczą układu. Źródła literaturowe wskazują, że dobrym rozwiązaniem dla układów chłodniczych pracujących z dwutlenkiem węgla jest zastosowanie dochłodzenia czynnika. Powoduje to zwiększenie efektywności systemu przez obniżenie temperatury końca procesu schładzania. Odwrotnie sprawa wygląda w przypadku przegrzania czynnika.

W związku z tym można stwierdzić, że w wyniku zastosowania odpowiednich modyfikacji obiegu bazowego, możliwe jest sterowanie wartością *COP* obiegu bazowego tak, aby osiągnął on zadowalające użytkownika parametry.

LITERATURA

[1] Andrzejczyk R., T. Muszyński, B. Jakubowska. 2015. "Nowe czynniki chodnicze i zmiany w intalacjach chłodniczych. Cz.1". *Przem. Spożywczy* (69) 9: 12 – 15.

[2] Baj P. 2013. "R744 – układy chłodnicze typu booster". *Chłodnictwo i Klimatyzacja* (5) 174: 28 – 30.

[3] Baj P., D. Butrymowicz. 2008. "Ocena efektywności energetycznej obiegu kaskadowego w układzie dwutlenek węgla/amoniak". *Chłodnictwo i Klimatyzacja* (11).

[4] Bonca Z., D. Butrymowicz, W. Targański, T. Hajduk. 2004. *Nowe czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Własności cieplne, chemiczne i użytkowe.* Poradnik. Gdańsk: IPPU MASTA sp. z o.o.

[5] Brak G., P. Kącki, A. Styrna. 2016. "Akademia R744 (CO_2) – wprowadzenie branży w chłodnictwo oparte na dwutlenku węgla," in *III warsztaty chłodnicze.*

[6] Butrymowicz G. K. D. 2012. Chłodnictwo i klimatyzacja. Warszawa: Wydawnictwo WNT.

[7] Jamali S., M. Yari, F. Mohammadkhani. 2017. "Performance improvement of a transcritical CO_2 refrigeration cycle using two-stage thermoelectric modules in sub-cooler and gas cooler". *Int. J. Refrig.* (74): 105 – 115.

[8] Klein S. 2020. Engineering Equation Solver. Demonstration Version 10.889D. F-Chart Software.

[9] Lemmon E. W., M. L. Huber, M. O. McLinden. 2013. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP. Version 9.1.

[10] Linares J. I., A. Cantizano, B. Y. Moratilla, V. Martin, L. Batet. 2016. "Supercritical CO_2 Brayton power cycles for DEMO fusion reactor based on Dual Coolant Lithium Lead blanket". *Energy* (98): 271 – 283.

[11] Mikielewicz D., B. Jakubowska. 2014. "Prediction of flow boiling heat transfer data for R134a, R600a and R290 in minichannels". *Arch. Thermodyn.* (35) 4: 97 – 114.

[12] Mikielewicz D., B. Jakubowska. 2015. "Wyznaczanie współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie dwutlenku węgla". *Chłodnictwo* (1–2): 28 – 34.

[13] Mikielewicz D., B. Jakubowska. 2016. "Prediction of flow boiling heat transfer coefficient for carbon dioxide in minichannels and conventional channels". *Arch. Thermodyn.* (37) 2: 89 – 106.

[14] Muszyński T., R. Andrzejczyk, B. Jakubowska. 2016. "Wpływ ekologicznych czynników roboczych na efektywność układu sprężarkowej pompy ciepła". *Instal* (2): 26 – 34.

[15] Noch T. 2017. "Termodynamiczne czynniki robocze stosowane w pompach ciepła". *Czas. o Inżynierii Lądowej, Środowiska i Archit.* (64) 4: 269 – 278.

[16] Pudlik W. 2011. Termodynamika. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.

[17] Szelągowski A. 2017. "Aspekty prawne i technologiczne stosowania czynnika CO_2 w instalacjach chłodniczych". *Apar. Badaw. i Dydakt.* 22: 269–276.

[18] Tuchowski W., P. Nikończuk. 2016. "Przegląd czynników chłodniczych w klimatyzacji samochodowej," *Autobusy* (12): 479 – 481.

[19] Vesely L., V. Dostal, S. Entler. 2016. "Comparison of S-CO_2 power cycles for nuclear energy". *Acta Polytech. CTU Proc.* 4: 107–112.

[20] Yu B., J. Yang, D. Wang, J. Shi, J. Chen. 2019. "An update review of recent advances on modified technologies in transcritical CO_2 refrigeration cycle". *Energy* (189): 116 – 147.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl