



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU



Dziedzina: nauki inżynierijno-techniczne

Dyscyplina: inżynieria lądowa, geodezja i transport

PRACA DOKTORSKA

**Badanie wybranych układów chłodniczych mebli
gastronomicznych przyjaznych dla środowiska i użytkownika**

mgr inż. Tomasz Bernat

Promotor:

dr hab. inż. Krzysztof Bieńczyk, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr inż. Natalia Idaszewska

Poznań, 2023

*Składam serdeczne podziękowania
dr hab. inż. Krzysztofowi Bieńczakowi, prof. PP
oraz dr inż. Natalii Idaszewskiej
za przekazaną wiedzę, cenne uwagi i wskazówki,
które wpłynęły na kształt niniejszej pracy.*

*Pragnę także podziękować rodzinie i przyjaciołom
za wsparcie w trudnych chwilach
powstawania tej pracy.*

Spis treści

Streszczenie	5
Wykaz oznaczeń	7
Wstęp	9
1. Przegląd literatury	11
1.1. Czynniki chłodnicze	11
1.1.1. Wymagania stawiane przed czynnikami chłodniczymi	11
1.1.2. Charakterystyka wybranych naturalnych czynników chłodniczych	23
1.1.3. Charakterystyka wybranych syntetycznych czynników chłodniczych	31
1.2. Charakterystyka mebli gastronomicznych.....	39
1.3. Podsumowanie przeglądu literatury	43
2. Cel i zakres pracy	46
3. Dobór optymalnego czynnika chłodniczego z wykorzystaniem wspomaganie wielokryterialnego	48
3.1. Wybór metody wspomagającej podejmowanie decyzji	48
3.2. Charakterystyka wybranej metody	51
3.3. Przeprowadzenie procesu wspomaganie podejmowania decyzji podczas wyboru optymalnego czynnika chłodniczego	51
4. Autorskie stanowisko badawcze urządzenia chłodniczego zasilanego przyjaznym dla środowiska i użytkownika czynnikiem chłodniczym	58
4.1. Schemat ideowy i opis pracy stanowiska badawczego	58
4.2. Stanowisko badawcze	62
5. Przeprowadzenie badań na autorskim stanowisku badawczym	67
5.1. Metodyka badań	67
5.2. Badania z wykorzystaniem czynnika chłodniczego odniesienia – R404a	68
5.3. Badania z wykorzystaniem czynnika chłodniczego alternatywnego – R455a	100
5.4. Ocena możliwości wykorzystania ciepła poprocesowego ze skraplacza	117
6. Wnioski	119

7. Kierunki dalszych badań	121
Literatura	122
Abstract	130

Streszczenie

Przeprowadzona analiza stanu literatury umożliwiła dostrzeżenie braku szeroko dostępnych informacji na temat układów chłodniczych pracujących w meblach gastronomicznych. Zauważono, iż w większości przypadków badacze zajmowali się meblami gastronomicznymi wyłącznie od strony utrzymywania żywności w kontrolowanej temperaturze, często pomijają bardzo istotne fakty dotyczące pracy samej instalacji chłodniczej.

W zrealizowanej pracy badawczej nawiązano do zauważalnych braków w dostępnej literaturze, w związku z tym skupiono się na instalacjach chłodniczych znajdujących się w meblach gastronomicznych. W pierwszej kolejności dokonano przeglądu literatury. We współczesnych rozwiązaniach oczekuje się, aby urządzenia jak i wszystkie współpracujące elementy miały możliwie najmniejszy szkodliwy wpływ na środowisko oraz użytkownika przy jednocześnie największej możliwej efektywności energetycznej. Przedstawiono dostępne czynniki chłodnicze mogące sprostać współczesnym wymaganiom zarówno pod względem użytkowym a także prawnym. Charakterystyka omówionych czynników dotyczyła substancji pochodzenia naturalnego a także nowoczesnych substancji syntetycznych. W następnym kroku przedstawiono charakterystyki mebli gastronomicznych w celu wprowadzenia do dalszej części pracy.

Wykonane studia literatury umożliwiły jednoznaczne określenie celu oraz zakresu pracy. W dalszej części przedstawiono metodykę pozwalającą na wspomaganie podejmowania decyzji przy optymalnym doborze alternatywnego czynnika chłodniczego. Następnie dokonano wyboru jednej z metod wspomagania wielokryterialnego, w celu przeprowadzenia analizy doboru alternatywnego czynnika chłodniczego mogącego sprostać niełatwym wymaganiom.

Po wyborze optymalnego czynnika chłodniczego w celu przeprowadzenia niezbędnych badań z jego wykorzystaniem w układach chłodniczych mebli gastronomicznych opracowano projekt a następnie wykonano i przetestowano stanowisko badawcze. Wykonane liczne testy pozwoliły dopracować rozwiązania konstrukcyjne stanowiska poprzez doposażenie w wyłącznik czasowy a także w regulatory ciśnienia skraplania i ciśnienia ssania. Po stwierdzeniu poprawnej pracy stanowiska przystąpiono do właściwych badań. Na stanowisku badawczym przeprowadzono serie badań dotyczących pracy układu chłodniczego w różnych warunkach eksploatacyjnych. W celu uzyskania odniesienia dla alternatywnego czynnika chłodniczego do czynnika użytkowanego w poprzednich latach, w pierwszej kolejności przeprowadzono badania z czynnikiem R404a. Następnie dokonano zamiany czynnika roboczego bez zmiany jakiegokolwiek elementu instalacji chłodniczej na nowoczesny czynnik chłodniczy R455a.

Układ badano pod względem osiąganych parametrów roboczych, takich jak ciśnienie skraplania i parowania, temperatura za i przed skraplaczem, temperatura za parownikiem, a także pod względem zużycia energii oraz w wybranych przypadkach z uwzględnieniem możliwości odzysku ciepła skraplania jako energii do dalszego wykorzystania. W zakończeniu pracy wskazano kierunki dalszych badań.

Wykaz oznaczeń

GWP – (ang. Halocarbon Global Warming Potential) – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego odniesiony do dwutlenku węgla, dla którego GWP=1

HGWP – (ang. Halocarbon Global Warming Potential) – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego odniesiony do czynnika R11, dla którego HGWP=1

ODP – (ang. Ozone Depletion Potential) – potencjał niszczenia warstwy ozonowej, wskaźnik mający na celu ilościową ocenę wpływu poszczególnych substancji na warstwę ozonową odniesiony do czynnika R11, dla którego ODP=1

CFC – (ang. Chloro-Fluoro-Carbon) – jest to grupa chloro- i fluoropochodnych węglowodorów alifatycznych

HFC – wodorofluorowęglowodory – substancje organiczne, które nie zawierają atomów chloru oraz bromu, a ich wskaźnik ODP jest równy 0

HCFC – wodorochlorofluorowęglowodory – substancje organiczne, które mają stabilność chemiczną mniejszą niż związki CFC, a co za tym idzie niższy wskaźnik ODP

HFO – hydrofluoroolefiny – nienasycone związki organiczne składające się z wodoru, fluoru i węgla. Klasyfikowane są z ODP równym 0 i niskim GWP

LFL – (ang. Lower Flammability Limit) – dolna granica zapalności

ITH – horyzont czasowego oddziaływania

TEWI - całkowity równoważnik tworzenia efektu cieplarnianego

L – roczne wycieki czynnika chłodniczego [kg]

n – okres eksploatacji urządzenia [lat]

m – masa czynnika chłodniczego w instalacji [kg]

α_{odzysk} – stopień odzysku czynnika chłodniczego

E_{rocznie} – roczne zużycie energii elektrycznej [kWh]

β – emisja dwutlenku węgla podczas produkcji energii elektrycznej [kg/kWh]

CO₂ – dwutlenek węgla

N₂O – podtlenek azotu

CO₂ – dwutlenek siarki

CH₂Cl₂ – chlorek metylu

R290 – czynnik chłodniczy propan

R600a – czynnik chłodniczy izobutan

R1270 – czynnik chłodniczy propylen

R717 – czynnik chłodniczy amoniak

R744 – czynnik chłodniczy dwutlenek węgla

R22, R134a, R404a, R449a, R452a, R454c, R455a, R457a, R465a, R507 – syntetyczne czynniki chłodnicze

P – ciśnienie [bar]

T – temperatura [°C]

h – entalpia [kJ/kg]

v – objętość właściwa [m³/kg]

A1, A2L, A2, A3, B1, B2L, B2, B3 – grupy bezpieczeństwa czynników chłodniczych

PVC – polichlorek winylu

COP – współczynnik wydajności chłodniczej

AHP, MUZ, SAW, SMART, UTA – metody wspomaganie podejmowania decyzji

f_i – kryterium w metodzie wspomaganie podejmowania decyzji

w_i – waga kryterium w metodzie wspomaganie podejmowania decyzji

[P] – wejściowa macierz rozwiązań dla oceny wielokryterialnej

[P*] – znormalizowana macierz rozwiązań dla oceny wielokryterialnej

V_{ij} - wyniki oceny wielowariantowej i-tego wariantu, j-tego kryterium

P*_{ij} – znormalizowana wartość i-tego wariantu, j-tego kryterium

q_{ij} – waga i-tego wariantu, j-tego kryterium

Q – zużycie energii elektrycznej [kWh]

m_w – masa podgrzanej wody [kg]

C_p – ciepło właściwe wody [J/kgK]

ΔT – różnica temperatury końcowej i początkowej [K]

Wstęp

Niszczenie warstwy ozonowej odkryto w roku 1985 i od tamtego czasu prowadzi się działania na rzecz jej naprawy. W dniu 16 września 1987 roku sporządzono międzynarodowe porozumienie tzw. Protokół Montrealski [1] w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową. Zobowiązano państwa rozwijające się do zaprzestania używania substancji, które niszczą warstwę ozonową przedostając się do atmosfery, a są to CFC, HFC, HCFC, bromek metylu. Produkty te w znacznym stopniu spowodowały degradację warstwy ozonowej nad Antarktydą. Obecnie widoczna jest znaczna poprawa stanu warstwy ozonowej w stosunku do lat 90-tych, a całkowitą jej regenerację przewiduje się do roku 2050.

Drugim najważniejszym dokumentem wprowadzającym ograniczenie w sposobie postępowania z substancjami szkodliwymi dla środowiska jest Protokół z Kioto [2]. Jest to międzynarodowe porozumienie sporządzone 11 grudnia 1997 r. w Kioto w sprawie ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Dokument ten określa współpracę na poziomie międzynarodowym, mając na celu redukcję gazów, które przyczyniają się do globalnego ocieplenia. Kraje, które wzięły udział w porozumieniu, zobowiązały się do redukcji emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 5% do roku 2012 w porównaniu z rokiem 1990. Rzeczywiście protokół zaczął obowiązywać dopiero w 2005 roku, ponieważ była potrzebna ratyfikacja 55 państw, których emisje wynoszą 55% całkowitych emisji dwutlenku węgla w 1990 roku. Porozumienie zaczęło obowiązywać w Polsce w 2002 roku, a jego założenia zostały spełnione w wymaganym czasie. Stany Zjednoczone oraz Kanada nie zostały objęte porozumieniem, natomiast Chiny oraz Indie wstąpiły do porozumienia jednak nie zostały objęte limitami ograniczającymi emisję gazów cieplarnianych.

Obecnie obowiązujące przepisy dotyczące czynników chłodniczych regulują sposoby postępowania z substancjami kontrolowanymi i fluorowanymi gazami cieplarnianymi. Na podstawie Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych i uchylenia Rozporządzenia (WE) nr 842/2006 oraz Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1005/2009 z dnia 16 września 2009 r. w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową, wiadomym jest, iż dotychczas stosowane na szeroką skalę czynniki HFC od roku 2015 są sukcesywnie wycofywane z użytkowania [3, 4]. Alternatywą dla tych czynników są czynniki niemające negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Parametrem charakteryzującym negatywny wpływ czynnika chłodniczego na środowisko jest GWP. Ogólnie rzecz biorąc, im niższy współczynnik GWP tym korzystniej. Z tego powodu należy skupić się na czynnikach

chłodniczych pochodzenia naturalnego, takich jak: R744 (dwutlenek węgla), R717 (amoniak), R290 (propan) lub syntetycznych zamiennikach z grupy HFO/HFC, takich jak R448a, R449a, R452a, R455a [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Konieczność zamiany sprawdzonych rozwiązań urządzeń chłodniczych na konstrukcje pracujące z alternatywnymi czynnikami chłodniczymi wymusza opracowanie nowych urządzeń chłodniczych [14, 15, 16, 12, 9, 11]. Uwzględniając aspekt środowiskowy istotnym jest, aby nie poprzestać wyłącznie na zmianie wykorzystywanego w procesie chłodzenia czynnika chłodniczego, ale także osiągnąć inne cele. Zmiana konstrukcji urządzeń może spowodować, iż popularne staną się układy z możliwym odzyskiem ciepła poprocesowego. Zmiana konstrukcji może wpłynąć także na spopularyzowanie stosowalności skraplaczy bezobsługowych dających wygodę obsługującym takie urządzenia. Urządzenia te charakteryzować się będą wysoką efektywnością energetyczną.

1. Przegląd literatury

1.1. Czynniki chłodnicze

1.1.1. Wymagania stawiane przed czynnikami chłodniczymi

Prawidłowy dobór czynnika chłodniczego uwarunkowany jest spełnieniem szeregu wymagań, które dotyczą między innymi: szkodliwego wpływu na środowisko, bezpieczeństwa użytkowania, efektywnej pracy urządzeń oraz względów ekonomicznych. W literaturze przedmiotowej [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24] określono wymagania jakie powinny spełniać współcześnie stosowane czynniki chłodnicze:

- a) zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne

Negatywny wpływ na środowisko naturalne można określić liczbowo, za pomocą zdefiniowanych współczynników:

- ODP (ang. Ozone Depletion Potential – potencjał niszczenia warstwy ozonowej) – wskaźnik mający na celu ilościową ocenę wpływu poszczególnych substancji na warstwę ozonową. Wskaźnik odniesiono do czynnika R11 (CFC-11) uznanego za wartość jednostkową (ODP=1). Szczegółowe wartości wskaźnika dla wybranych substancji kontrolowanych zostały przedstawione w Protokole Montrealskim (Załącznik E normy PN – EN 378-1),
- HGWP (ang. Halocarbon Global Warming Potential) – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego – odniesiony do czynnika R11 (HGWP = 1). Aby uzyskać jednoznaczną ocenę współtworzenia efektu cieplarnianego przez analizowany czynnik, konieczne jest podanie horyzontu czasowego oddziaływania, oznaczanego ITH (ang. Integral Time Horizont). Zwykle przyjmuje się ITH równy 100 lub 500 lat,
- GWP (ang. Global Warming Potential) – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego odniesiony do dwutlenku węgla (GWP=1). Należy zauważyć, że pomimo iż wartość wskaźnika GWP dla dwutlenku węgla jest bardzo mała, to jednak ze względu na bardzo dużą emisję tego gazu do atmosfery ocenia się, że jest on odpowiedzialny za powstawanie efektu cieplarnianego aż w 50%. Choć czynniki chłodnicze należące do grup CFC, HCFC i HFC w porównaniu do całkowitej masy atmosfery występują w ilościach śladowych, to mając o kilka tysięcy razy większy wskaźnik GWP, przyczyniają się aż w ok. 20% do powstawania zjawiska efektu cieplarnianego,

- TEWI – (ang. Total Equivalent Warming Impact) – całkowity równoważnik tworzenia efektu cieplarnianego, w którym uwzględniono zarówno wpływ bezpośredni danego czynnika, jak i wpływ pośredni związany z wytworzeniem energii elektrycznej zużywanej przez eksploatowane urządzenie chłodnicze. Współczynnik TEWI pozwala ocenić wpływ poszczególnych instalacji chłodniczych na globalne ocieplenie. Na rys. 1.1 przedstawiono w formie graficznej wzór do obliczenia wskaźnika TEWI, wraz z zaznaczeniem składników odpowiedzialnych za bezpośredni i pośredni wpływ na efekt cieplarniany.

TEWI = **TOTAL EQUIVALENT WARMING IMPACT**

$$TEWI = (GWP \times L \times n) + (GWP \times m [1 - \alpha_{\text{odzysk}}]) + (n \times E_{\text{rocznie}} \times \beta)$$

←	Wycieki	→	←	Straty podczas odzysku	→	←	Zużycie energii	→
←	bezppośredni wpływ na efekt cieplarniany	→	←	pośredni wpływ na efekt cieplarniany	→	←	na efekt cieplarniany	→

GWP	=	Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego [względem CO ₂]
L	=	Roczne wycieki czynnika [kg]
n	=	Okres eksploatacji urządzenia [lat]
m	=	Napełnienie instalacji [kg]
α_{odzysk}	=	Stopień odzysku czynnika chłodniczego
E_{rocznie}	=	Roczne zużycie energii [kWh]
β	=	Emisja CO ₂ podczas produkcji energii [kg/kWh]

Rys. 1.1 Metodyka obliczania wskaźnika TEWI [19]

Obecność czynników chłodniczych w atmosferze jest również przyczyną tzw. efektu cieplarnianego. Naturalny efekt cieplarniany polega na zatrzymywaniu znacznej części promieniowania podczerwonego emitowanego z powierzchni Ziemi przez niektóre gazy atmosferyczne w troposferze i na ponownym zawracaniu ich w stronę Ziemi. Do gazów odpowiedzialnych za zatrzymywanie promieniowania podczerwonego zalicza się przede wszystkim: dwutlenek węgla, metan, ozon stratosferyczny oraz większość syntetycznych czynników chłodniczych.

Obecnie wymagane jest aby stosowane czynniki chłodnicze cechował wskaźnik ODP=0, oprócz tego wskazane jest aby czynniki posiadały jak najniższą wartość wskaźnika GWP. W tab. 1.1 przedstawiono wartości wskaźników ODP i GWP dla zamienników substancji z grup CFC i HCFC.

Tab. 1.1 Wartości wskaźników ODP i GWP dla zamienników czynników chłodniczych z grup CFC i HCFC [19]

Rodzaj czynnika	Skład (wzór chemiczny)	Czynnik zastępowany	ODP	GWP
Czynniki z grupy HCFC				
R22	CHClF ₂	R502 (R12)	0,055	1700
R124	CHClFCF ₃	R114 , R12B1	0,022	620
R142b	CClF ₂ CH ₃		0,065	2400
Mieszanki serwisowe (zamienniki przejściowe) z grupy HCFC				
R401A	R22/152a/124	R12 (R500)	0,037	1130
R401B	R22/152a/124		0,04	1220
R409A	R22/142b/124		0,048	1540
R402A	R22/125/290	R502	0,021	2690
R402B	R22/125/290		0,033	2310
R403B	R22/218/290		0,031	4310
R408A	R22/143a/125		0,026	3020
Bezchlorowe czynniki jednorodne z grupy HFC (zamienniki długoterminowe)				
R134a	CF ₃ CH ₂ F	R12 (R22) przede wszystkim stanowią składniki mieszanin	0	1300
R152a	CHF ₂ CH ₃			120
R125	CF ₃ CHF ₂			3400
R143a	CF ₃ CH ₃			4300
R32	CH ₂ F ₂			550
R227ea	CF ₃ -CHF-CF ₃	R12B1, R114		3500
R236fa	CF ₃ -CH ₂ -CF ₃	R114		9400
R23	CHF ₃	R13 (R503)		12000
Bezchlorowe mieszanki z grupy HFC (zamienniki długoterminowe)				
R404A	R143a/125/134a	R22 (R502)	0	3922
R507A	R143a/125			3850
R407A	R32/125/134a			1990
R407F	R32/125/134a			1705
R422A	R125/134a/600a			3040
R437A	R125/134a/600/601	R12 (R500)		1680

R407C	R32/125/134a	R22		1650
R417A	R125/134a/600			2240
R417B	R125/134a/600			2920
R422D	R125/134a/600a			2620
R427A	R32/125/143a/134a			2010
R438A	R32/125/134a/600/601a			2150
R410A	R32/125	R22, (R13B1)		1980
ISCEON MO89	R125/218/290	R13B1		3805
R508A	R23/116	R503		11940
R508B	R23/116		11950	
Czynniki naturalne (zamienniki długoterminowe)				
R717	NH ₃	R22 (R502)	0	0
R723	NH ₃ /R-E170	R22 (R502)		8
R600a	C ₄ H ₁₀	R114, R12B1		3
R290	C ₃ H ₈	R22 (R502)		3
R1270	C ₃ H ₆	R22 (R502)		3
R170	C ₂ H ₆	R13, R503		3
R744	CO ₂	różne		1
Czynniki z grupy HFO				
R1233zd	CF ₃ CH	R11, R123, R141b	0	1
R1234yf	C ₃ H ₂ F ₄	R134a		4
R1234ze	C ₃ H ₂ F ₄	R134a, R123		1
Mieszanki czynników z grupy HFO/HFC				
R448a	R32/R125/R134a/ R1234ze/R1234yf	R22, R404a, R507	0	1386
R449a	R32/R125/ R134a/R1234yf	R22, R404A, R507		1397
R450a	R134a/R1234ze	R134a		573
R452a	R32/R125/R1234yf	R404A, R507		2140
R455a	R1234yf/R32/R744	R404A, R507		146
R513a	R1234yf/R134a	R134a		573

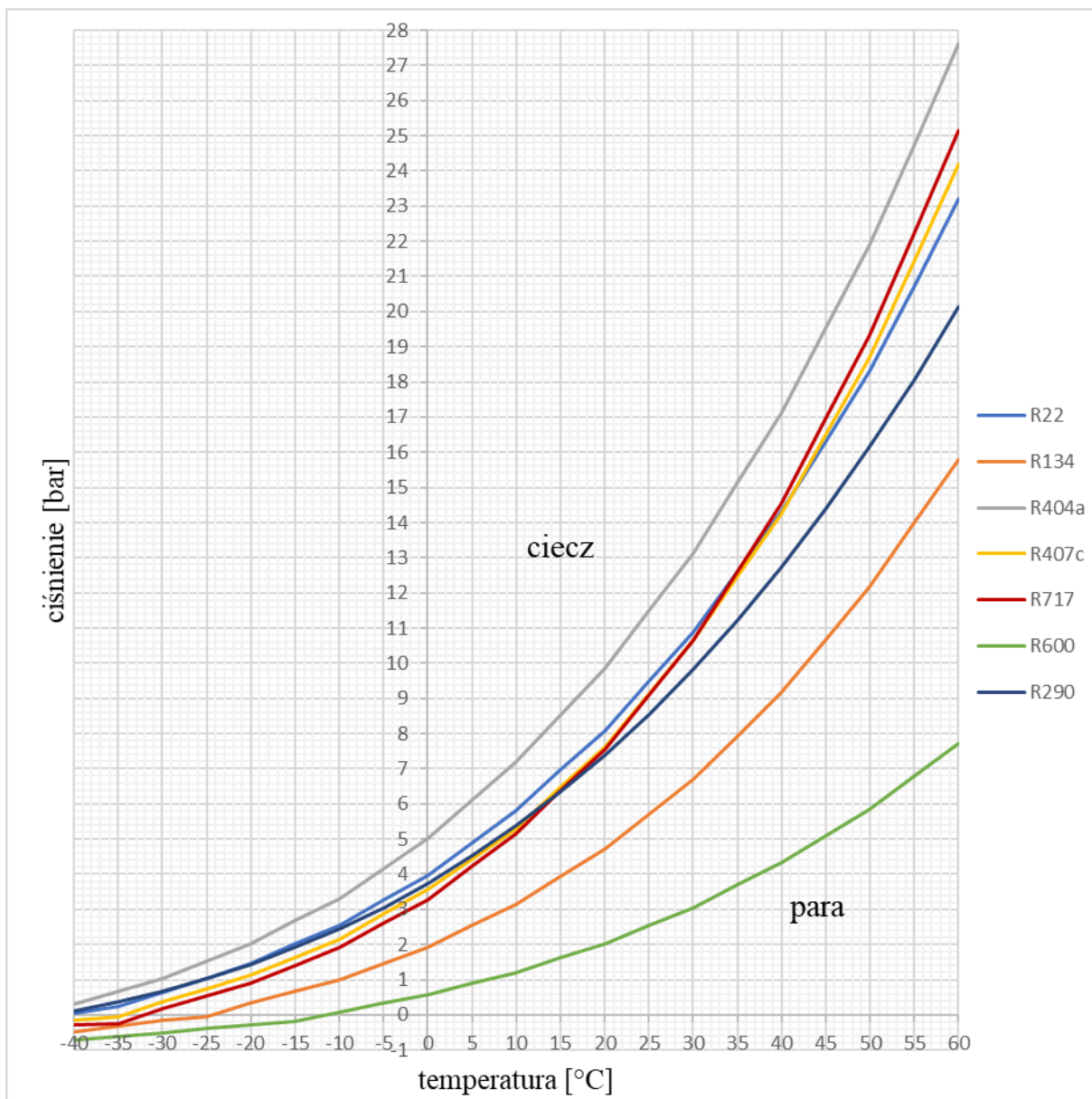
Ograniczenie wycieków czynników do atmosfery jest jednym z głównych zadań stojących przed techniką chłodniczą. Z drugiej strony, instalacje chłodnicze przyczyniają się do powstawania efektu cieplarnianego przede wszystkim w sposób pośredni, poprzez emisję CO₂ związaną z produkcją energii używanej do ich napędu. Ponieważ energię tę wytwarza się najczęściej w elektrowniach opalanych paliwami kopalnymi, na każdą kilowatogodzinę energii elektrycznej przypada w Europie średnio około 0,6 kg CO₂ emitowanego do atmosfery. Zatem zużycie energii napędowej w całym okresie eksploatacji urządzenia ma znaczny wpływ na efekt cieplarniany. Dlatego należy nie tylko dążyć do stosowania czynników chłodniczych o wysokiej efektywności termodynamicznej, ale również kłaść silny nacisk na korzystanie ze sprężarek o wysokiej sprawności i podzespołów instalacji chłodniczych o zoptymalizowanej konstrukcji. Porównując sprężarki chłodnicze o odmiennych rozwiązaniach technicznych można stwierdzić, że różnice w pośredniej emisji CO₂ z tytułu ich energochłonności mogą mieć większe znaczenie, niż wycieki czynnika chłodniczego.

b) zwiększenie efektywności pracy instalacji

W celu zwiększenia efektywności pracy instalacji powinno się uwzględnić właściwości termodynamiczne czynników chłodniczych, które istotnie wpływają na funkcjonowanie układu chłodniczego [20, 22, 23, 25], takich jak:

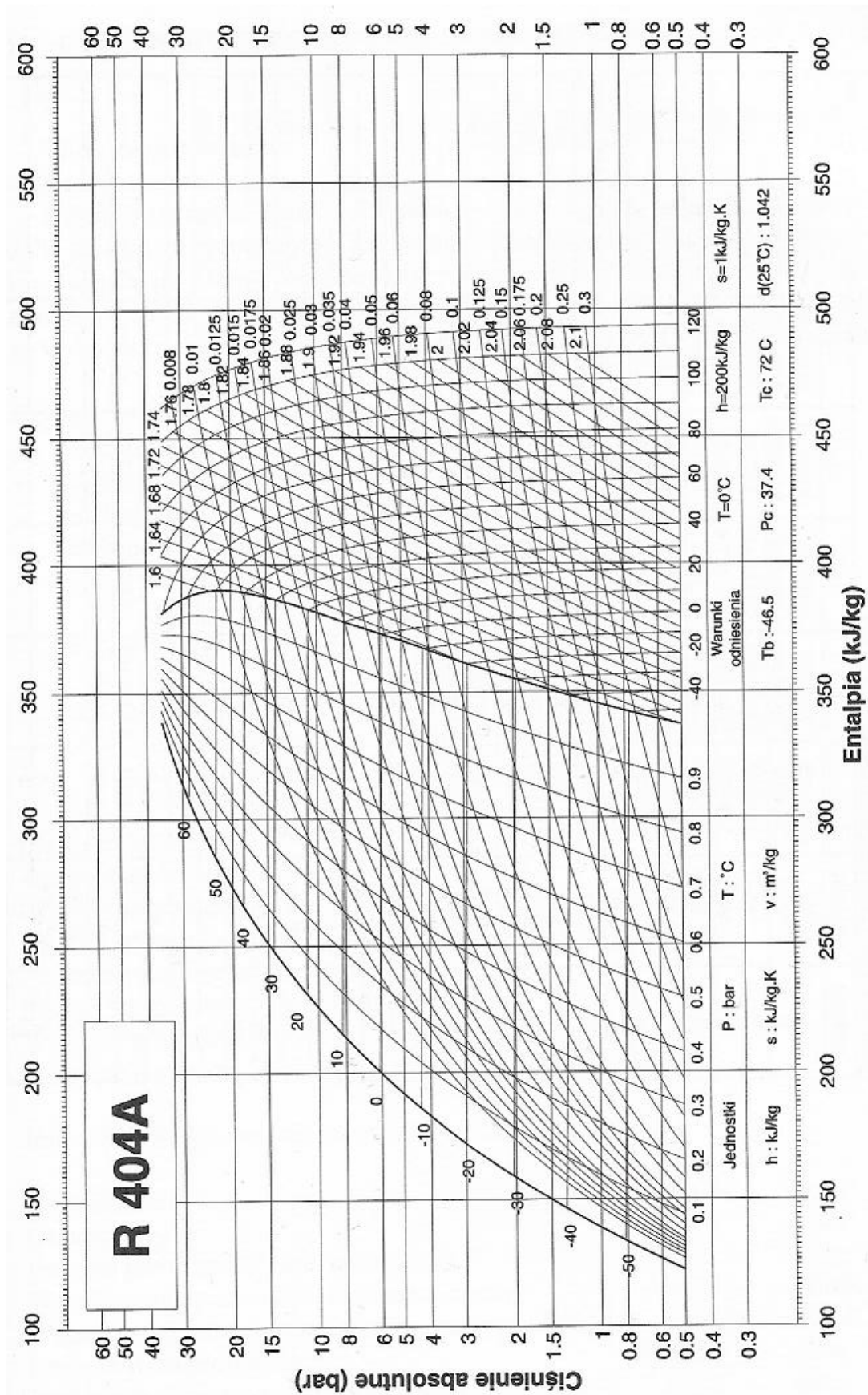
- krzywa ciśnienia pary w funkcji temperatury,
- objętość właściwa,
- entalpia właściwa,
- entropia właściwa,
- ciśnienie w punkcie krytycznym,
- temperatura w punkcie krytycznym,
- objętość właściwa w punkcie krytycznym.

Wykres ciśnienia nasycenia w funkcji temperatury pokazany na rys. 1.2 wskazuje zakres temperatury i ciśnienia, dla których wybrane czynniki chłodnicze mają postać pary oraz cieczy.



Rys. 1.2 Zależność ciśnienia nasycenia od temperatury dla wybranych czynników chłodniczych (opracowanie własne na podstawie [19, 22])

W rozważaniach praktycznych dotyczących sprężarkowych urządzeń chłodniczych często wykorzystuje się wykresy ciśnienie – entalpia pokazany na rys. 1.3. Na takich wykresach obszar pary mokrej (obszar dwufazowy) jest ograniczony z lewej strony krzywą parowania, a z prawej strony krzywą skraplania. Obie te krzywe spotykają się w najwyższym miejscu zwanym punktem krytycznym. Na lewo od krzywej parowania występuje ciecz, natomiast na prawo od krzywej skraplania para. Wykresy p, h sporządzane są do każdego czynnika chłodniczego osobno i stanowią główne źródło informacji o czynniku znajdującym się w instalacji chłodniczej.



Rys. 1.3 Wykres Mollier'a (log p, h) dla czynnika chłodniczego R404a [22]

c) zagwarantowanie bezpieczeństwa użytkownika

Gwarancja bezpiecznego użytkownika związana jest z bezpośrednim oddziaływaniem czynnika chłodniczego na otoczenie. Norma PN-EN 378 [18] określa grupy bezpieczeństwa czynników chłodniczych wyznaczone na podstawie palności i toksyczności zgodnie z tab. 1.2.

Tab. 1.2 Grupy bezpieczeństwa czynników chłodniczych określone na podstawie palności i toksyczności (opracowanie własne na podstawie [18])

wyższa palność	A3	B3
niższa palność	A2	B2
lekka palność	A2L	B2L
niepalność	A1	B1

Do grupy A zakwalifikowano czynniki chłodnicze niemające szkodliwego wpływu na większość pracowników, którzy mogą być narażeni na ich działanie codziennie, w okresie ośmiogodzinnego dnia pracy i 40 godzinnego tygodnia pracy, przy średnim stężeniu równym 400 ml/m^3 (400 ppm) lub powyżej.

Do grupy B zalicza się czynniki niemające szkodliwego wpływu na większość pracowników w warunkach jak powyżej, przy średnim (ważonym względem czasu) stężeniu poniżej 400 ml/m^3 (400 ppm).

W klasyfikacji palności do klasy 1 (bez rozprzestrzeniania płomienia) zakwalifikowano czynniki chłodnicze nie wykazujące oznak rozprzestrzeniania płomienia podczas badania w powietrzu w temperaturze 60°C i przy ciśnieniu 101,3 kPa.

Do klasy 2L są zakwalifikowane czynniki o charakterze lekko palnym. Czynniki zakwalifikowane do tej grupy odznaczają się większą wymaganą energią inicjacji zapłonu niż czynniki palne z grupy 2. Posiadają również niższą prędkość rozprzestrzeniania się płomienia (poniżej 0,1 m/s).

Do klasy 2 (niższa palność) zakwalifikowano czynniki chłodnicze spełniające wszystkie trzy poniższe kryteria:

- wykazują oznaki rozprzestrzeniania płomienia podczas badania w powietrzu w temperaturze 60°C i przy ciśnieniu 101,3 kPa,
- mają LFL \geq 3,5% objętościowo,
- mają ciepło spalania \leq 19000 kJ/kg.

Do klasy 3 (wyższa palność) zakwalifikowano czynniki chłodnicze spełniające oba następujące warunki:

- wykazują oznaki rozprzestrzeniania płomienia podczas badania w powietrzu w temperaturze 60°C i przy ciśnieniu 101,3 kPa,
- mają LFL \leq 3,5% objętościowo albo mają ciepło spalania $>$ 19000 kJ/kg.

d) zgodne z obowiązującymi przepisami prawnymi

Wdrożenie przepisów europejskich do prawa polskiego nastąpiło w wyniku uchwalenia ustawy z dnia 15 maja 2015 r. o substancjach zubożających warstwę ozonową oraz o niektórych fluorowanych gazach cieplarnianych. Ustawa ta została zmieniona ustawą z dnia 12 lipca 2017 r. o zmianie ustawy o substancjach zubożających warstwę ozonową oraz o niektórych fluorowanych gazach cieplarnianych oraz niektórych innych ustaw, zwaną dalej „ustawą zmieniającą”. Ustawa zmieniająca weszła w życie w dniu 23 września 2017 r. Nowelizacja związana jest z koniecznością wdrożenia do prawa krajowego postanowień Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych, uchylającego Rozporządzenie (WE) nr 842/2006 oraz Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1005/2009 z dnia 16 września 2009 r. w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową.

Minimalne wymagania i warunki dotyczące wzajemnego uznawania certyfikacji przedsiębiorstw i personelu w odniesieniu do poszczególnych rodzajów urządzeń zawierających fluorowane gazy cieplarniane określają następujące rozporządzenia wykonawcze:

- ROZPORZĄDZENIE WYKONAWCZE KOMISJI (UE) NR 2015/2067 z dnia 17 listopada 2015 r. ustanawiające zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014, minimalne wymagania i warunki wzajemnego uznawania certyfikacji osób fizycznych w odniesieniu do stacjonarnych urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych i pomp ciepła oraz agregatów chłodniczych samochodów

- ciężarowych i przyczep chłodni, zawierających fluorowane gazy cieplarniane, a także certyfikacji przedsiębiorstw w odniesieniu do stacjonarnych urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych i pomp ciepła zawierających fluorowane gazy cieplarniane,
- ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 304/2008 z dnia 2 kwietnia 2008 r. ustanawiające na mocy Rozporządzenia (WE) nr 842/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady, minimalne wymagania i warunki dotyczące wzajemnego uznawania certyfikacji przedsiębiorstw i personelu w odniesieniu do stacjonarnych systemów ochrony przeciwpożarowej i gaśnic zawierających niektóre fluorowane gazy cieplarniane,
 - ROZPORZĄDZENIE WYKONAWCZE KOMISJI (UE) NR 2015/2066 z dnia 17 listopada 2015 r. ustanawiające zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014, minimalne wymagania i warunki dotyczące wzajemnego uznawania certyfikacji osób fizycznych dokonujących instalacji, serwisowania, konserwacji, napraw lub likwidacji rozdzielnic elektrycznych zawierających fluorowane gazy cieplarniane bądź dokonujących odzysku fluorowanych gazów cieplarnianych ze stacjonarnych rozdzielnic elektrycznych,
 - ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 306/2008 z dnia 2 kwietnia 2008 r. ustanawiające na mocy Rozporządzenia (WE) nr 842/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady, minimalne wymagania i warunki wzajemnego uznawania certyfikacji personelu dokonującego odzysku rozpuszczalników na bazie fluorowanych gazów cieplarnianych z urządzeń.

W tab. 1.3 zamieszczono skrócony wyciąg z Rozporządzenia nr 517/2014 określający zakazy dotyczące wprowadzania do obrotu poszczególnych produktów i urządzeń z obszaru chłodnictwa.

Tab. 1.3 Wyciąg z Rozporządzenia nr 517/2014 określający zakazy dotyczące wprowadzania do obrotu poszczególnych produktów i urządzeń z obszaru chłodnictwa [4]

Produkty i urządzenia		Data wprowadzenia zakazu
Domowe chłodziarki i zamrażarki zawierające HFC o GWP równym 150 lub większym		1 stycznia 2015 r.
Chłodziarki i zamrażarki do zastosowań komercyjnych (hermetycznie zamknięte urządzenia)	zawierające HFC o GWP równym 2 500 lub większym	1 stycznia 2020 r.
	zawierające HFC o GWP równym 150 lub większym	1 stycznia 2022 r.
Stacjonarne urządzenia chłodnicze, które zawierają HFC o GWP równym 2 500 lub większym lub których działanie jest od nich uzależnione, z wyjątkiem urządzeń przeznaczonych do zastosowań służących schładzaniu produktów do temperatur poniżej – 50 °C		1 stycznia 2020 r.
Wieloagregatowe scentralizowane układy chłodnicze do zastosowań komercyjnych o mocy znamionowej 40 kW lub większej, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym lub których działanie jest od nich zależne, z wyjątkiem obiegów chłodniczych pierwszego stopnia w układach kaskadowych, w których można stosować fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 1 500 lub większym		1 stycznia 2022 r.
Przenośne pokojowe urządzenia klimatyzacyjne (hermetycznie zamknięte urządzenia, które użytkownik końcowy może przemieszczać między pomieszczeniami) zawierające HFC o GWP równym 150 lub większym		1 stycznia 2020 r.
Pojedyncze dzielone układy klimatyzacyjne zawierające mniej niż 3 kg fluorowanych gazów cieplarnianych, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 750 lub większym lub których działanie jest od nich zależne		1 stycznia 2025 r.

e) zwrot z inwestycji

Istotne jest, aby uzyskać jednocześnie szybki zwrot z inwestycji oraz dysponować niezawodnym urządzeniem. Cechy te zależą głównie od konstrukcji urządzenia oraz decyzji inwestora. Z punktu widzenia oszczędności energii ważne jest, aby dobrać czynnik o dobrych właściwościach termodynamicznych, co pozwoli zwiększyć efektywność urządzenia chłodniczego. W przypadku samego systemu chłodniczego należy podjąć kroki, aby poprawić właściwości termodynamiczne wymienników poprzez zmniejszenie uskoku temperaturowego i straty ciśnienia. Z punktu widzenia kosztów warto wykorzystywać czynnik chłodniczy, który ma wysoką objętościową wydajność chłodniczą i wymaga niskiego ciśnienia roboczego. W tab. 1.4 przedstawiono wybrane czynniki chłodnicze ze uwzględnieniem cech mających wpływ na ostateczną decyzję inwestora.

Tab. 1.4 Zestawienie wybranych czynników chłodniczych z uwzględnieniem cech wspomagających wybór czynnika (opracowanie własne na podstawie [26, 17, 27, 28, 29, 22])

rodzaj czynnika	GWP	klasa bezpieczeństwa	temperatura wrzenia przy 1 bar [°C]	temperatura skraplania przy 26 bar [°C]	poślizg temperatury [K]
R404a*	3922	A1	-47	55	0,7
R744	1	A1	-52**	-11	0
R717	0	B2L	-33	60	0
R290	3	A3	-42	70	0
R448a	1386	A1	-46	58	6,2
R449a	1397	A1	-46	58	4,5
R452a	2140	A1	-47	55	3,8
R455a	146	A2L	-52	52	12,8

* czynnik odniesienia

** przy ciśnieniu 6 bar

1.1.2. Charakterystyka wybranych naturalnych czynników chłodniczych

Czynnik chłodniczy to substancja robocza uczestnicząca w wymianie ciepła w urządzeniu chłodniczym lub pompie ciepła, która pobiera ciepło przez odparowanie w niskiej temperaturze i przy niskim ciśnieniu, a oddaje przez skraplanie przy odpowiednio wyższej temperaturze i wyższym ciśnieniu. W związku z tym, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, taki transport ciepła nie może zachodzić samoistnie. Dla realizacji procesu sprężania należy dostarczyć pewną ilość energii.

W najczęściej stosowanych urządzeniach chłodniczych, pracujących z niskowrzącymi płynami roboczymi, wykorzystuje się ich znaczne ciepło utajone przy zmianach stanu skupienia do odbierania ciepła z ochładzanego środowiska. Czynnik chłodniczy odparowuje pobierając ciepło przy niskiej temperaturze i pod niskim ciśnieniem, a skrapla się oddając ciepło w wysokiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem. Jednocześnie zmienia się jego stan skupienia, ponieważ ulega on odparowaniu, jest sprężany, skrapla się i wreszcie zostaje rozprężony.

Substancje przeznaczone do stosowania w urządzeniach chłodniczych powinny charakteryzować się następującymi własnościami:

- niską jednostkową teoretyczną pracą sprężania (niskim nakładem energii),
- dużą jednostkową wydajnością chłodniczą,
- wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła,
- zerowym potencjałem niszczenia stratosferycznej warstwy ozonowej (ODP),
- zerowym potencjałem efektu cieplarnianego (GWP),
- brakiem negatywnego oddziaływania na materiały konstrukcyjne i uszczelnienia,
- brakiem własności niszczących olej smarny, tzn. nie powinny z nimi wchodzić w reakcje chemiczne,
- brakiem własności toksycznych, palnych i wybuchowych, trwałością przy stosowanych ciśnieniach i temperaturach (nie powinny ulegać rozkładowi),
- możliwością łatwego wykrywania ewentualnych nieszczelności w instalacji,
- niską ceną.

Jak to tej pory nie powstał czynnik chłodniczy, który spełniałby te wszystkie wymagania. W związku z tym należy dokonywać kompromisowych wyborów i dla każdego zastosowania dobierać odpowiedni płyn roboczy.

Już na początku XIX wieku w instalacjach chłodniczych pracujących w zakładach przetwórstwa żywności wykorzystywano naturalne czynniki chłodnicze, takie jak dwutlenek węgla (CO_2), podtlenek azotu (N_2O), dwutlenek siarki (SO_2) i chlorek metylu (CH_2Cl_2). Jednakże z powodu swej toksyczności i agresywności znacznie straciły na znaczeniu lub też przestały być dopuszczone do stosowania ze względów bezpieczeństwa. Z powodu problemów ze strony fizycznej przy wspomnianych czynnikach zdecydowano się na zastosowanie alternatywnych czynników, takich jak chlorofluorowęglowodory, następnie wodorochlorofluorowęglowodory. Dotyczyło to zarówno obszaru zastosowań w małych chłodziarkach, jak i w przemysłowych urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych, pompach ciepła, a także w dużych urządzeniach chłodniczych wyposażonych w turbosprężarki. Z upływem lat ilość dostępnych czynników chłodniczych stale się poszerzała, tak aby dla każdego poszczególnego przypadku zastosowania móc dobrać najbardziej termodynamicznie opłacalny płyn roboczy. Z powodu ich nietoksyczności, dużej stabilności chemicznej i niepalności substancje te przez długi czas uznawane były jako bezpieczne czynniki chłodnicze. Po odkryciu niszczącego wpływu zawartych w nich cząsteczek chloru na warstwę ozonową zaczęto stosować hydrofluorowęglowodory. Samo zlikwidowanie ze składu chloru zredukowało jedynie w niewielkim stopniu negatywny wpływ na środowisko naturalne, ponieważ dalej w tych substancjach występował fluor, który powodował intensyfikację efektu cieplarnianego.

Później jednak, od czasu konferencji montrealskiej [30], jednogłośnie uznano, że atomy chloru i bromu zawarte także w tych syntetycznych związkach są odpowiedzialne za niszczenie ziemskiej warstwy ozonowej a ponadto, że posiadają one wysoki bezpośredni potencjał cieplarniany HGWP. Od tego momentu zaczęto wprowadzać nie budzące obaw pod względem ekologicznym ich substytuty. W świetle przyjętych kryteriów, niezmiernie bliskie takiemu ideałowi okazały się substancje naturalne, takie jak woda, powietrze, dwutlenek węgla (CO_2), węglowodory i amoniak, które w ostatnich latach były przedmiotem wielu prac badawczych.

Ograniczenia nakładane przez przepisy oraz względy ekologiczne wprowadzają obowiązek zredukowania negatywnego wpływu czynników chłodniczych na środowisko [3, 4]. Powoduje to konieczność powrotu do naturalnych czynników chłodniczych. Obecnie układy chłodnicze zasilane czynnikami naturalnymi najczęściej można spotkać jako małe układy chłodnicze, takie jak chłodziarki, meble gastronomiczne, klimatyzatory zasilane propanem (R290), izobutanem (R600a) czy propylenem (R1270) ale także coraz popularniejsze stają się większe instalacje zasilane oprócz amoniaku (R717) także dwutlenkiem węgla (R744).

Propan (R290) to związek organiczny należący do grupy węglowodorów nasyconych. Charakterystyczna jest jego łatwopalność oraz większa gęstość niż powietrze. Zaliczany jest do grupy bezpieczeństwa A3. Nie posiada barwy oraz zapachu. W przypadku odniesienia propanu do wycofanego z użytku czynnika R22, propan posiada znaczne korzyści. Napełnienie instalacji nowym czynnikiem może wynosić ok. 70% masy czynnika zastępowanego. Posiada także niższą wartość końca sprężania, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie zwiększonego dochłodzenia. Ponadto, propan charakteryzuje się niską lepkością dynamiczną oraz niską wrażliwością na wilgoć. Te korzyści pozwalają ograniczyć koszty związane z budową oraz eksploatacją urządzenia chłodniczego. Kolejną zaletą jest fakt, iż dla propanu zalecane jest stosowanie filtrów-odwadniaczy identycznych jak dla czynnika R134a [22, 25, 31].

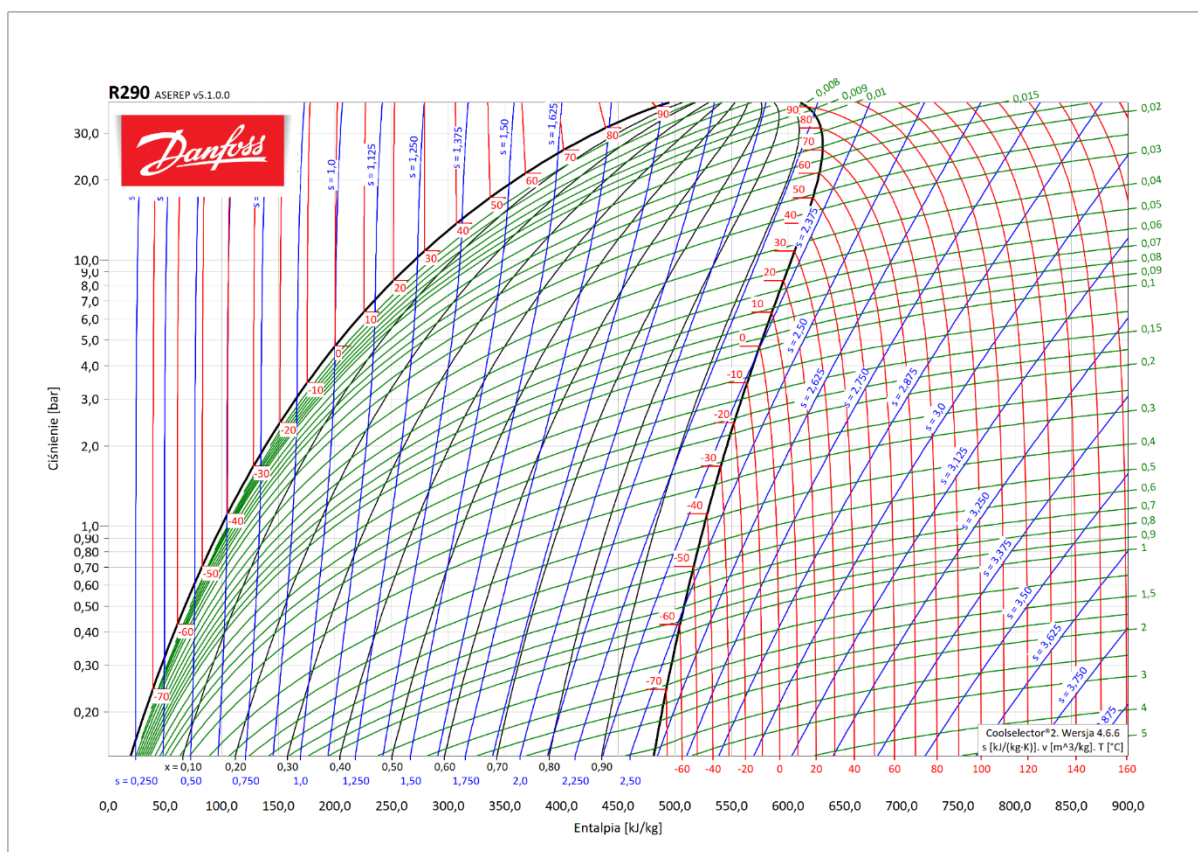
W przypadku instalacji chłodniczej pracującej z propanem zaleca się stosowanie oleju mineralnego o podwyższonej lepkości w stosunku do olejów współpracujących z czynnikami chlorowcopochodnymi. Kolejną zaletą to kompatybilność propanu ze wszystkimi materiałami konstrukcyjnymi wykorzystywanymi do budowy instalacji i urządzeń chłodniczych. Jest on również związkiem nieagresywnym w stosunku do tworzyw sztucznych za wyjątkiem polietylenu, dla którego w niektórych warunkach wykazuje własności agresywne. W przeciwieństwie do amoniaku, nie jest agresywny wobec materiałów zawierających miedź, więc bez przeszkód może pracować w układach chłodniczych wyposażonych w hermetyczne i półhermetyczne agregaty sprężarkowe.

Propan znajduje zastosowanie przede wszystkim w małych urządzeniach domowych, klimatyzacji, chłodnictwie średnim komercyjnym oraz zakładach skraplania i rozdzielania gazów. Obecnie coraz częściej można spotkać jego zastosowanie także w dużych instalacjach chłodniczych w przemyśle chemicznym i petrochemicznym.

Zestawienie podstawowych właściwości fizykochemicznych i charakterystyki czynnika chłodniczego R290 pokazano w tab. 1.5 i na rys. 1.4.

Tab. 1.5 Właściwości fizykochemiczne czynnika chłodniczego R290 (opracowanie własne na podstawie [22, 32, 10, 13, 31])

Właściwość	Wartość	Jednostka
Wzór chemiczny	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$	-
Masa molowa	44,10	kg/kmol
Temperatura krytyczna	96,70	°C
Ciśnienie krytyczne	42,84	bar
Gęstość krytyczna	220,70	kg/m ³
Współczynnik GWP	3	-
Palność	łatwopalny	-
Kolor	bezbarwny	-
Zapach	słodki	-



Rys. 1.4 Wykres log (p) - h dla czynnika chłodniczego R290 [33]

Izobutan (R600a) jest bezzapachowym i bezbarwnym węglowodorem nasyconym, który jest trwały chemicznie, ma większą gęstość od powietrza i jest nietoksyczny. Przez długi czas barierę ograniczającą wykorzystanie izobutanu w roli czynnika chłodniczego stanowiła jego palność, bowiem zaliczany jest do grupy bezpieczeństwa A3. W przypadku niewielkich instalacji (np. w urządzeniach domowych), ze względu na ich niewielkie napełnienie izobutanem (10-50 g), nie istnieje zagrożenie pożarowe nawet dla bardzo małych pomieszczeń.

Ze względu na niskie wartości ciśnienia skraplania izobutanu możliwe jest stosowanie lekkich konstrukcji, gdyż nie ma potrzeby tworzenia elementów wstrzymujących duże naciski sił na powierzchni wymienników (niższe koszty budowy). Dodatkowo czynnik ten ma wysoką wartość przejmowania ciepła w wymiennikach (parownik, skrapiacz). Z kolei niska lepkość dynamiczna oraz masa molowa R600a, powodują zmniejszenie oporów hydraulicznych w przepływie. Mała objętościowa wydajność chłodnicza wymusza montaż dłuższej kapilary, w porównaniu do alternatywnych czynników chłodniczych.

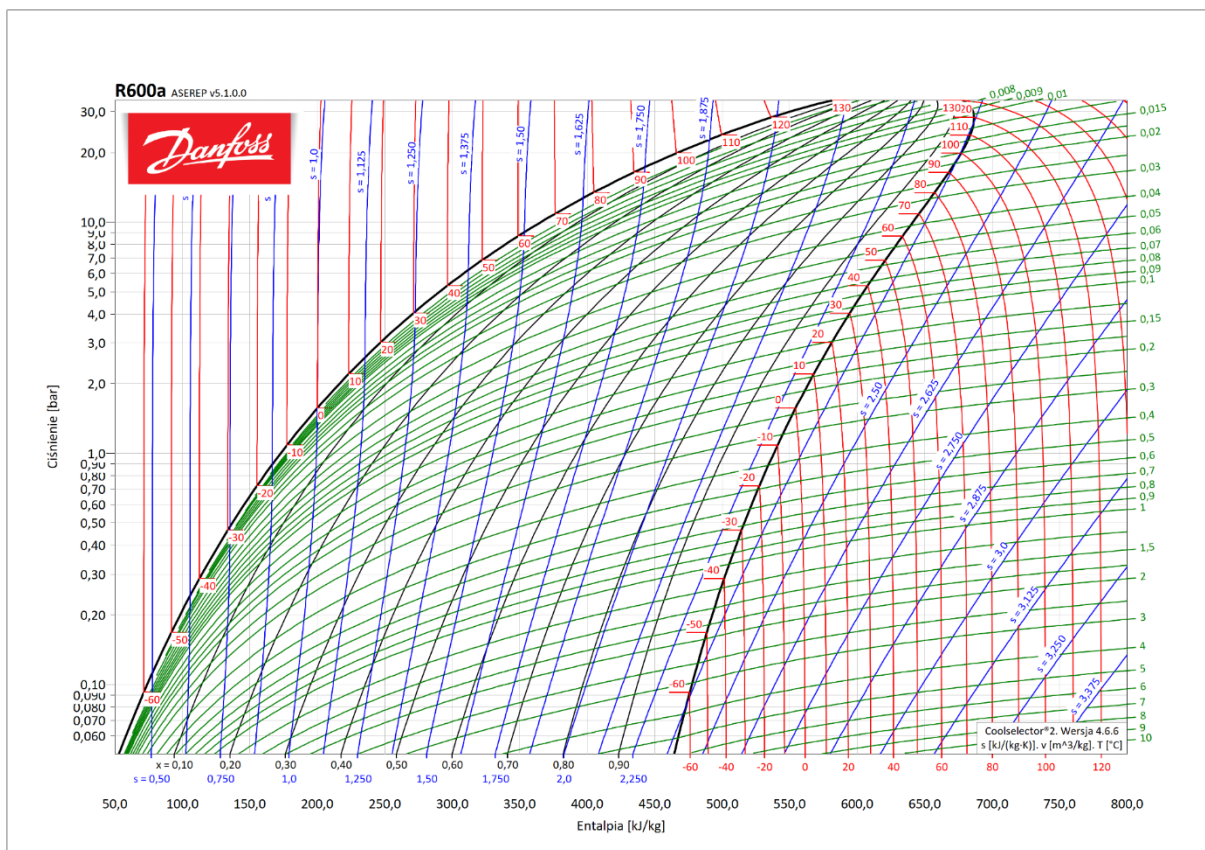
Izobutan posiada zdolność do tworzenia roztworów z olejami mineralnymi. Z uwagi na bardzo dobrą rozpuszczalność zalecane jest użycie olejów o wysokiej klasie lepkości. Odpowiednie do sprężarek pracujących z tym czynnikiem są też oleje alkilobenzenowe (AB) i półsyntetyczne środki smarne, sporządzone na bazie olejów mineralnych i olejów AB [22, 25, 31].

Izobutan zastosowanie znajduje przede wszystkim w chłodziarkach domowych, pompach ciepła, małych klimatyzatorach oraz małych urządzeniach handlowych.

Zestawienie podstawowych właściwości fizykochemicznych i charakterystyki czynnika chłodniczego R600a pokazano w tab. 1.6 i na rys. 1.5.

Tab. 1.6 Właściwości fizykochemiczne czynnika chłodniczego R600a (opracowanie własne na podstawie [22, 32, 10, 13, 31])

Właściwość	Wartość	Jednostka
Wzór chemiczny	CH(CH ₃) ₃	-
Masa molowa	53,18	kg/kmol
Temperatura krytyczna	135,00	°C
Ciśnienie krytyczne	36,45	bar
Gęstość krytyczna	220,95	kg/m ³
Współczynnik GWP	3	-
Palność	łatwopalny	-
Kolor	bezbarwny	-
Zapach	słodki	-



Rys. 1.5 Wykres log (p) – h dla czynnika chłodniczego R600a [33]

Dwutlenek węgla R744 to naturalny, bezbarwny gaz produkowany przez spalanie lub utlenianie materiałów zawierających pierwiastek węgla, jak np. węgiel, olej lub związki organiczne. Zaliczany jest do grupy bezpieczeństwa A1, zatem nie jest uznawany za czynnik palny czy toksyczny. Ulatnia się w efekcie fermentacji alkoholowej, a także jest wydychany przez wszystkie organizmy żywe. CO₂ nie pali się i nie podtrzymuje spalania. Rozpuszczalność dwutlenku węgla w wodzie uznaje się za bardzo dużą, jednak jest ona w rzeczywistości ograniczona i zależna od temperatury.

CO₂ nie rozpuszcza się w olejach mineralnych, z czego wynikają trudności w doborze odpowiedniego środka smarnego i zaleca się stosowanie olejów syntetycznych. R744 jest substancją bezwoną, jest chemicznie obojętny względem metali i większości tworzyw sztucznych.

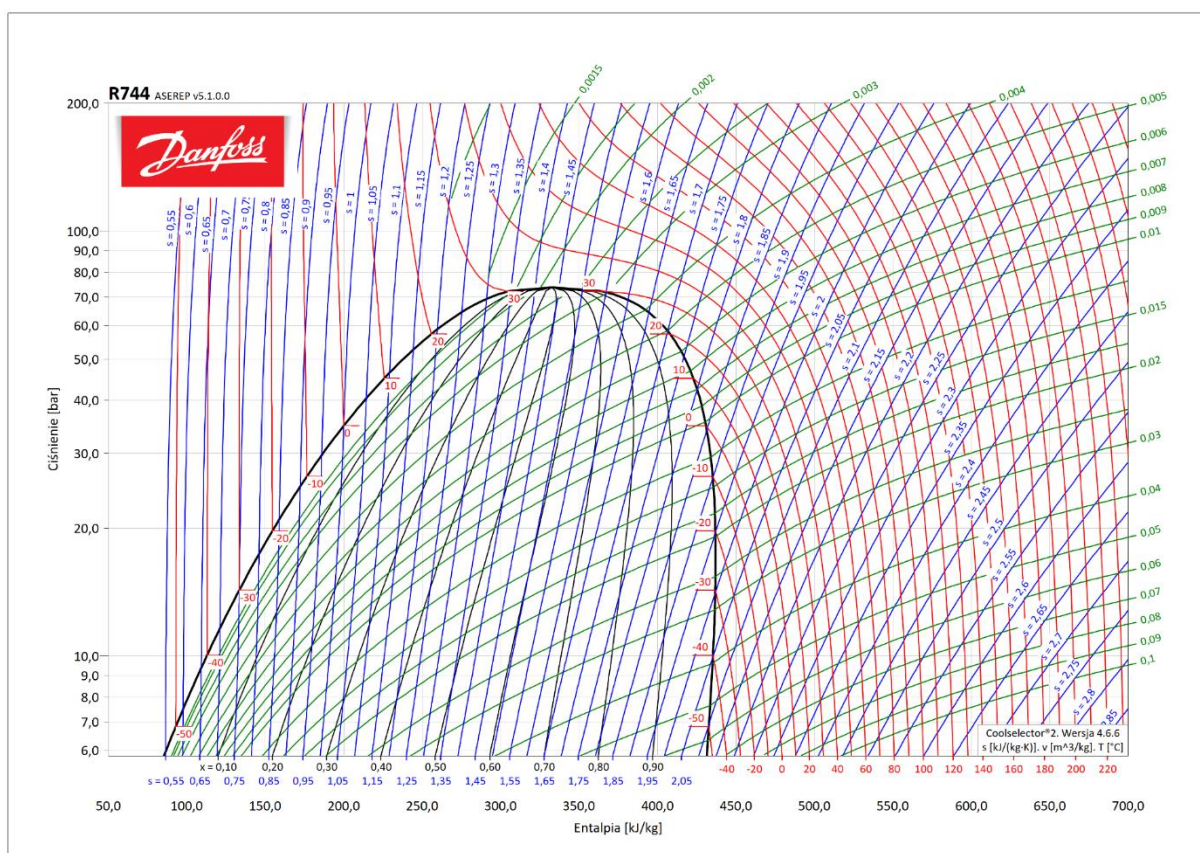
Z uwagi na niskie parametry punktu krytycznego, czynnik chłodniczy stosowany jest głównie w obiegach nadkrytycznych, co oznacza, że sprężarka spręża nie parę lecz gaz. Znaczącą wadą tego czynnika jest to, że przy wysokiej temperaturze medium chłodzącego skraplacz, ciśnienie w tym wymienniku może osiągać nawet 100 bar, natomiast przy normalnych warunkach chłodzenia skraplacza zawiera się ono w granicach 60-80 bar. Z kolei ciśnienie w parowniku nie może być niższe niż 6 bar, ponieważ przy ciśnieniu 5,18 bar i temperaturze -56,6°C dwutlenek węgla zamarza [11, 25, 31]. Przy wysokiej temperaturze wody chłodzącej obieg jest częściowo realizowany w obszarze nadkrytycznym. Wówczas w skraplaczu nie zachodzi proces skraplania pary czynnika, lecz ochładzanie gazu i element ten stosuje się jako wysokociśnieniowy wymiennik ciepła potocznie nazywany jako schładzalnik gazu (gascooler).

Dwutlenku węgla stosuje się przede wszystkim w chłodnictwie transportowym (jako suchy lód stosuje się w transporcie produktów spożywczych szybko psujących się oraz w gastronomii), średnim chłodnictwie komercyjnym, dużym chłodnictwie przemysłowym, przemyśle spożywczym, w instalacjach okrętowych a także w instalacjach kaskadowych w supermarketach.

Zestawienie podstawowych właściwości fizykochemicznych i charakterystyki czynnika chłodniczego R744 pokazano w tab. 1.7 i na rys. 1.6.

Tab. 1.7 Właściwości fizykochemiczne czynnika chłodniczego R744 (opracowanie własne na podstawie [22, 13, 25, 31])

Właściwość	Wartość	Jednostka
Wzór chemiczny	CO ₂	-
Masa molowa	44,01	kg/kmol
Temperatura krytyczna	31,00	°C
Ciśnienie krytyczne	73,83	bar
Gęstość krytyczna	464,04	kg/m ³
Temperatura punktu potrójnego	-56,5	°C
Ciśnienie punktu potrójnego	5,18	bar
Współczynnik GWP	1	-
Palność	niepalny	-
Kolor	bezbarwny	-
Zapach	bezzapachowy	-



Rys. 1.6 Wykres log (p) – h dla czynnika chłodniczego R744 [33]

1.1.3. Charakterystyka wybranych syntetycznych czynników chłodniczych

Czynnik chłodniczy R404a jest mieszaniną trzech czynników z grupy wodorofluorowęglowodorów (HFC), czyli czynników, które nie zawierają chloru, a są to: R143a (52% wag.), R125 (44% wag.) i R134a (4% wag.). Stosowany był jako zamiennik czynników R502, R22 (szczególnie przy temperaturach odparowania poniżej -20°C), a także jako zamiennik mieszaniny R507. Czynnik przeznaczony jest do stosowania w zakresie temperatur odparowania od -50°C do $+15^{\circ}\text{C}$. Istotne jest, aby temperatura skraplania nie przekraczała 53°C , natomiast temperatura końca sprężania nie przekraczała 140°C [15, 22, 25, 31, 27]. Czynnik ten uznawany jest za niepalny, niewybuchowy a także nietoksyczny podczas kontaktu z organizmem żywym. Chociaż czynnik nie jest substancją toksyczną, wdychanie par czynnika może powodować problemy w funkcjonowaniu układu nerwowego, bóle i zawroty głowy, podrażnienie płuc i oskrzeli, a także utratę świadomości. W przypadku bezpośredniego narażenia na wrzący czynnik może dojść do podrażnień skóry lub miejscowych odmrożeń.

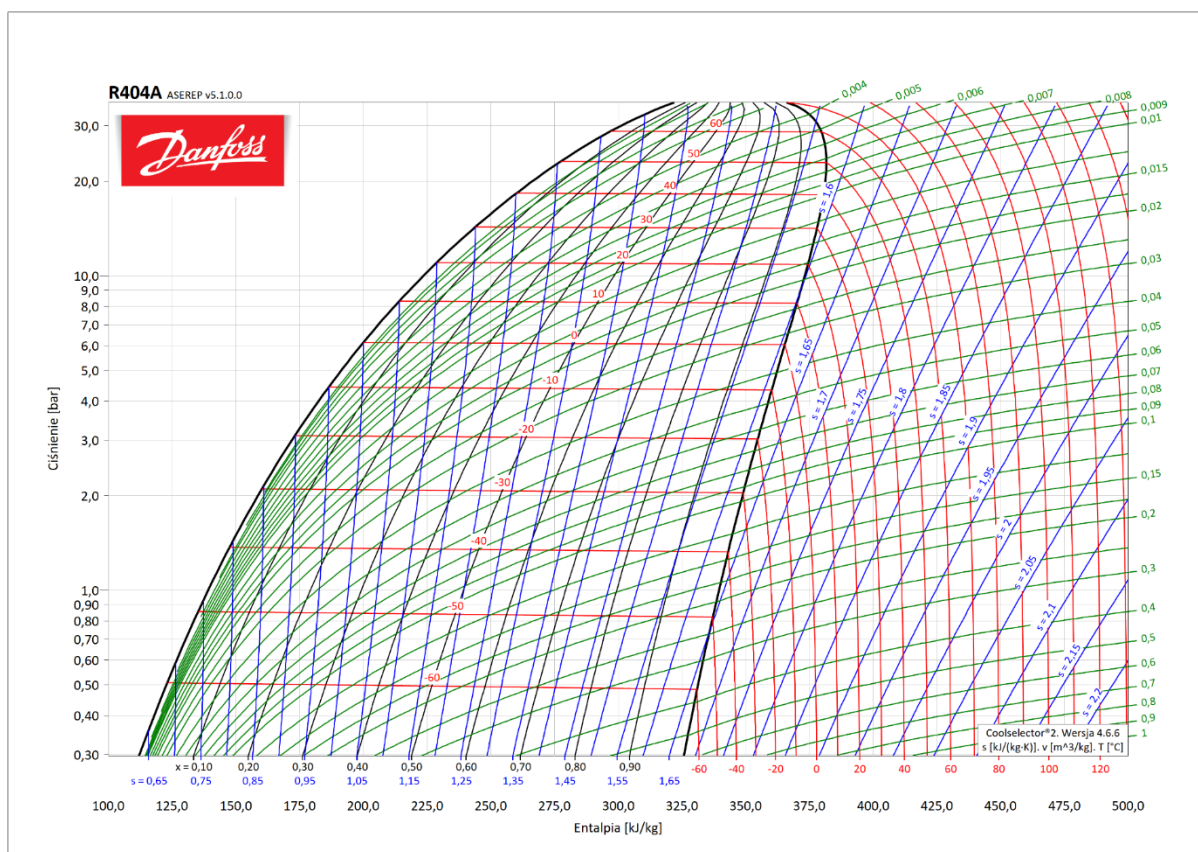
Czynnik chłodniczy R404a nie rozpuszcza się w olejach mineralnych i alkilobenzenowych, przez co w pełnym zakresie swojej pracy czyli od -60°C do $+80^{\circ}\text{C}$, stanowi dwie odrębne fazy z tymi olejami. Aby układ pracował prawidłowo należy stosować oleje syntetyczne poliestrowe. Ważnym aspektem serwisowym podczas pracy z olejami poliestrowymi jest konieczność maksymalnego skrócenia czasu kontaktu tego oleju z otoczeniem, ponieważ charakteryzuje się on wysoką higroskopijnością.

Czynnik R404a w warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego posiada zdolność do rozpuszczenia niewielkiej ilości wody. Poniżej temperatury -20°C traci tę zdolność, przez co z czynnika wydziela się woda w postaci kryształów lodu. Niezbędne jest zatem stosowanie odpowiednich odwadniaczy w celu uniknięcia poważnych konsekwencji z uwagi na możliwość występowania wolnej wody w układzie.

Zestawienie podstawowych właściwości fizykochemicznych i charakterystyki czynnika chłodniczego R404a pokazano w tab. 1.8 i na rys. 1.7.

Tab. 1.8 Właściwości fizykochemiczne czynnika chłodniczego R404a (opracowanie własne na podstawie [22, 31, 25, 27])

Właściwość	Wartość	Jednostka
Wzór chemiczny	$\text{CHF}_2\text{CF}_3 / \text{CF}_3\text{CH}_2\text{F} / \text{CH}_3\text{CF}_3$	-
Masa molowa	97,60	kg/kmol
Temperatura krytyczna	72,10	°C
Ciśnienie krytyczne	37,30	bar
Gęstość krytyczna	484,50	kg/m ³
Współczynnik GWP	3922	-
Palność	niepalny	-
Kolor	bezbarwny	-
Zapach	lekki, eteryczny	-



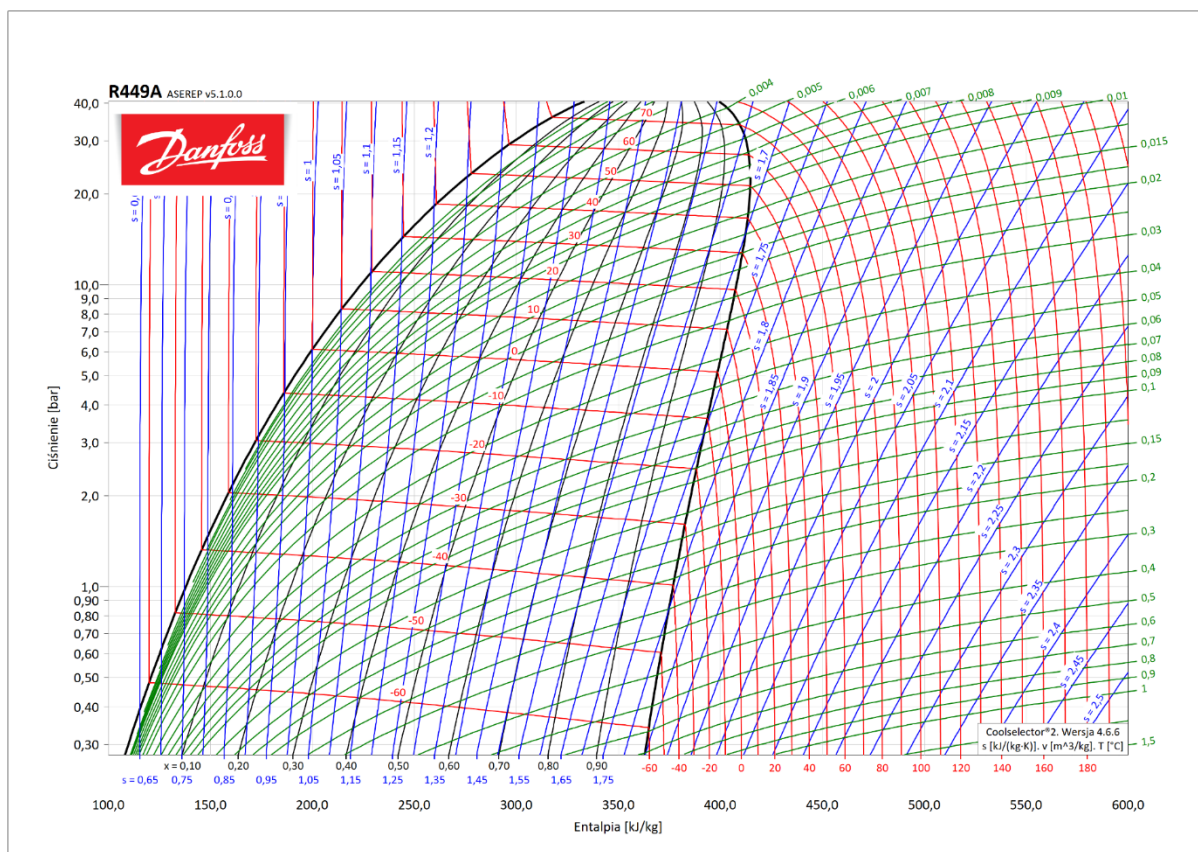
Rys. 1.7 Wykres log (p) – h dla czynnika chłodniczego R404a [33]

Czynnik chłodniczy R449a jest niepalną i nietoksyczną mieszaniną zeotropową czynników chłodniczych R32, R125, R1234yf i R134a o zbliżonych zawartościach masowych. Pozwala to osiągnąć współczynnik GWP o ponad 60% niższy niż w przypadku czynnika chłodniczego R404a. Czynnik R449a jest postrzegany jako czynnik przejściowy w instalacjach pracujących z czynnikiem R22, R404a i R507. Temperatura wrzenia jest zbliżona do temperatury wrzenia R404a, natomiast temperatura krytyczna jest nieco wyższa. Poślizg temperaturowy przy ciśnieniu atmosferycznym wynosi około 6 K. Większa gęstość oraz lepkość niż czynnika R404a powoduje zwiększenie zużycia energii elektrycznej. Przed wymianą czynnika na R449a należy rozważyć konieczność zmiany rozmiaru rurociągu po stronie pary ze względu na dużą różnicę w gęstości pomiędzy czynnikiem R404a a R449a. Duża różnica w przewodności cieplnej cieczy może wpłynąć na konstrukcję wymienników ciepła, natomiast wyższe utajone ciepło parowania może skompensować niższe masowe natężenie przepływu, dlatego wydajność chłodnicza pozostaje zbliżona do R404a. Czynnik R449a charakteryzuje się obojętnością chemiczną oraz stabilnością termiczną wobec powszechnie używanych materiałów w instalacjach chłodniczych [7, 8, 34].

Zestawienie podstawowych właściwości fizykochemicznych i charakterystyki czynnika chłodniczego R449a pokazano w tab. 1.9 i na rys. 1.8.

Tab. 1.9 Właściwości fizykochemiczne czynnika chłodniczego R449a (opracowanie własne na podstawie [31, 34])

Właściwość	Wartość	Jednostka
Wzór chemiczny	CH ₂ F ₂ / CF ₃ CHF ₂ / C ₃ H ₂ F ₄ / CF ₃ CH ₂ F	-
Masa molowa	87,20	kg/kmol
Temperatura krytyczna	81,53	°C
Ciśnienie krytyczne	44,47	bar
Gęstość krytyczna	1451,50	kg/m ³
Współczynnik GWP	1397	-
Palność	niepalny	-
Kolor	bezbarwny	-
Zapach	lekki, eteryczny	-



Rys. 1.8 Wykres $\log(p) - h$ dla czynnika chłodniczego R449a [33]

Czynnik chłodniczy R452a to nieniszcząca warstwy ozonowej, niepalna, zeotropowa mieszanina substancji zaprojektowana jako nowoczesny czynnik chłodniczy o obniżonym współczynniku tworzenia efektu cieplarnianego (GWP). W zamyśle jego tworzenia było uzyskanie czynnika chłodniczego wykorzystywanego do urządzeń pracujących w niskich i średnich temperaturach, aby móc go wykorzystać w istniejących, jak i nowych instalacjach chłodniczych. Kluczową cechą czynnika R452a jest dopasowanie temperatury tłoczenia sprężarki pracującej z czynnikami R404a i R507 zarówno w warunkach niskiej, jak i średniej temperatury. Taka właściwość pomaga zminimalizować koszty aplikacji i modernizacji urządzenia do pracy z nowym czynnikiem. Ponadto, czynnik chłodniczy R452a zapewnia bliskie dopasowanie wydajności i podobną efektywność energetyczną instalacji do układu pracującego z czynnikiem R404a. Poza tymi istotnymi właściwościami, czynnik charakteryzuje się także około 50% niższym potencjałem tworzenia efektu cieplarnianego niż jego poprzednik [35, 28].

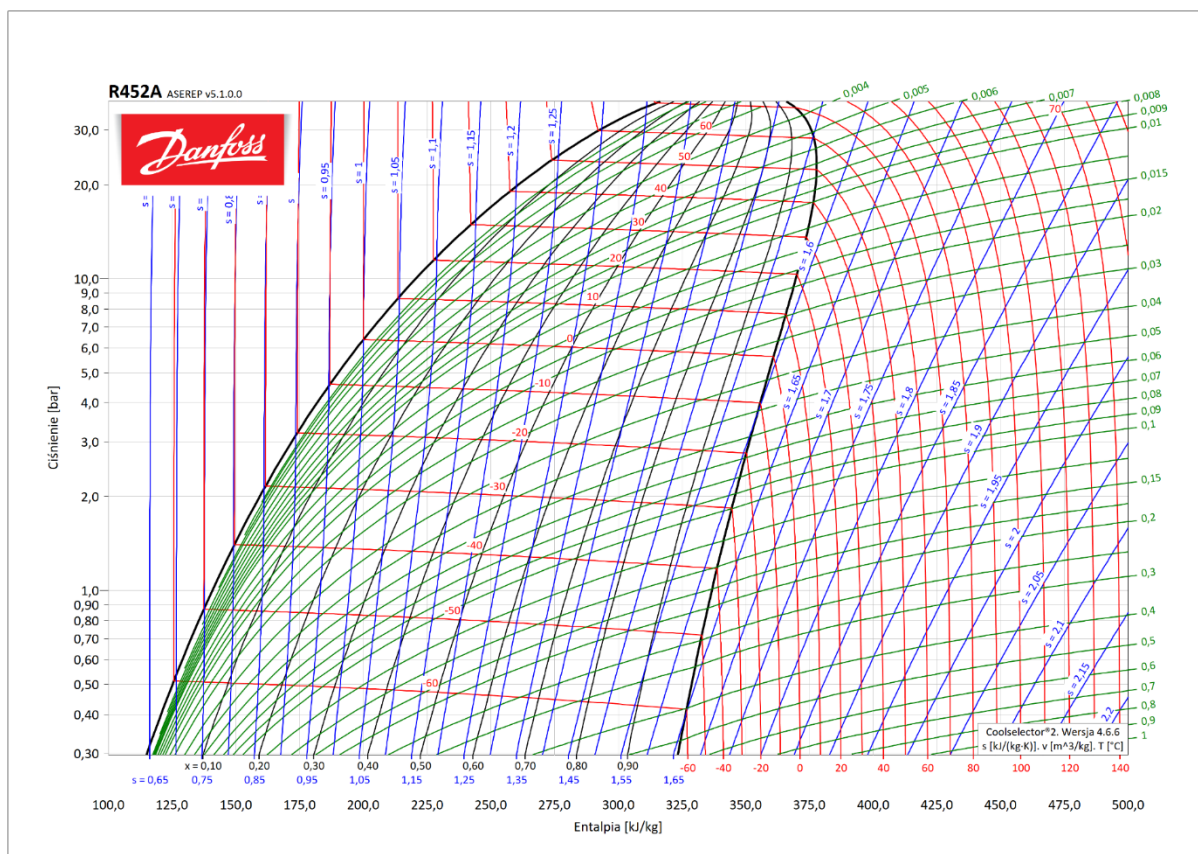
Czynnik chłodniczy znajduje zastosowanie w instalacjach chłodniczych z bezpośrednim odparowaniem w niskich i średnich temperaturach, w tym chłodnictwa komercyjnego i

przemysłowego, agregatów skraplających i chłodnictwa transportowego, takich jak ciężarówki i naczepy, samochody dostawcze lub kontenery chłodnicze.

Zestawienie podstawowych właściwości fizykochemicznych i charakterystyki czynnika chłodniczego R452a pokazano w tab. 1.10 i na rys. 1.9.

Tab. 1.10 Właściwości fizykochemiczne czynnika chłodniczego R452a (opracowanie własne na podstawie [36, 28])

Właściwość	Wartość	Jednostka
Wzór chemiczny	CF ₃ CHF ₂ /C ₃ H ₂ F ₄ /CH ₂ F ₂	-
Masa molowa	103,50	kg/kmol
Temperatura krytyczna	75,11	°C
Ciśnienie krytyczne	40,13	bar
Gęstość krytyczna	507,61	kg/m ³
Współczynnik GWP	2140	-
Palność	niepalny	-
Kolor	bezbarwny	-
Zapach	lekki, eteryczny	-

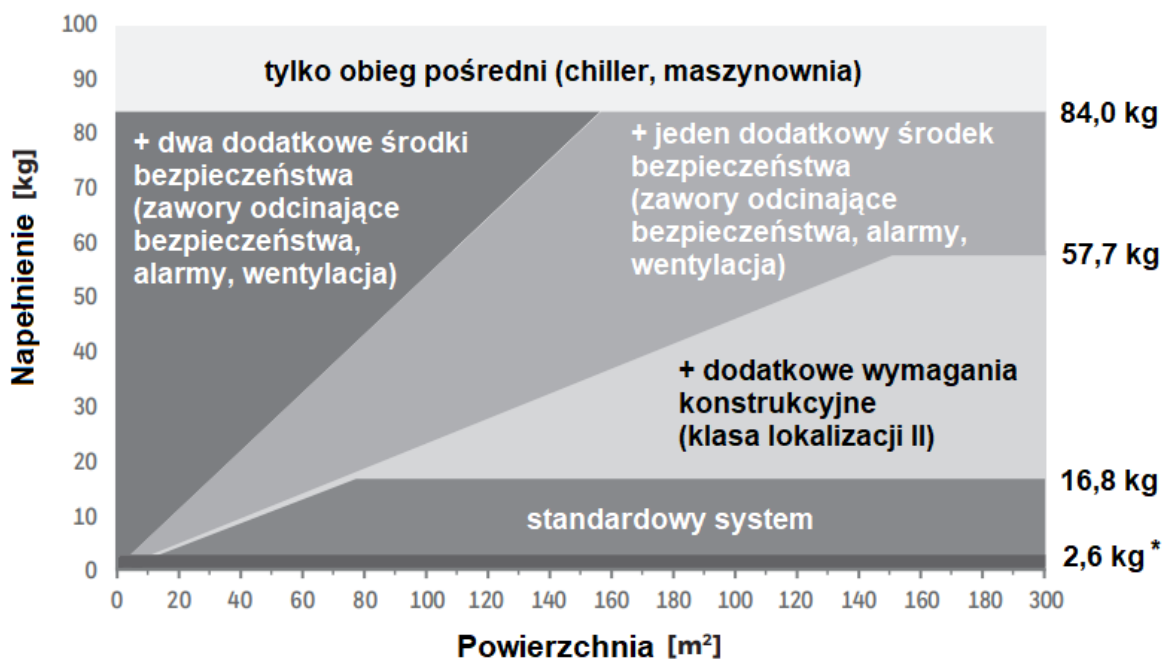


Rys. 1.9 Wykres $\log(p) - h$ dla czynnika chłodniczego R452a [33]

Czynnik chłodniczy R455a jest lekko palną, mieszaniną zeotropową z grupy czynników HFO/HFC przewidzianą jako zamiennik do obiegów nisko-, średnio- i wysokotemperaturowych w nowych urządzeniach chłodniczych [21]. Niski współczynnik GWP, wynoszący zaledwie 146 (poniżej granicy 150) zapewnia zgodność stosowania z wymogami ustawy [37]. Dodatkowo omawiany czynnik oferuje wydajność porównywalną do R404a, a także rozszerzony zakres pracy w porównaniu do propanu lub innych czynników używanych w instalacjach klimatyzacyjnych oraz niższe zużycie energii elektrycznej [38].

Europejskie i krajowe normy oraz przepisy bezpieczeństwa [18, 39] nakładają stosowanie oceny ryzyka w celu dostosowania odpowiednich wielkości napełnienia czynnikiem chłodniczym urządzeń chłodniczych. Czynnik R455a zaliczany jest do grupy bezpieczeństwa A2L. Klasyfikacja palności A2L jest zintegrowana z różnymi normami międzynarodowymi, a także z europejską normą EN 378, która określa środki wymagane do bezpiecznego stosowania czynników chłodniczych A2L. Norma ta przewiduje wyższe ograniczenia napełnienia instalacji w porównaniu z czynnikami z grupy A1, natomiast korzystniejsze niż w układach z czynnikami z grup A2 i A3. Rys. 1.10 przedstawia maksymalne wartości napełnienia instalacji chłodniczej

czynnikiem chłodniczym, które można stosować bez ograniczeń w zależności od powierzchni pomieszczenia.



Wysokość pomieszczenia: 2,5 m

* brak wymagań dla powierzchni pomieszczenia

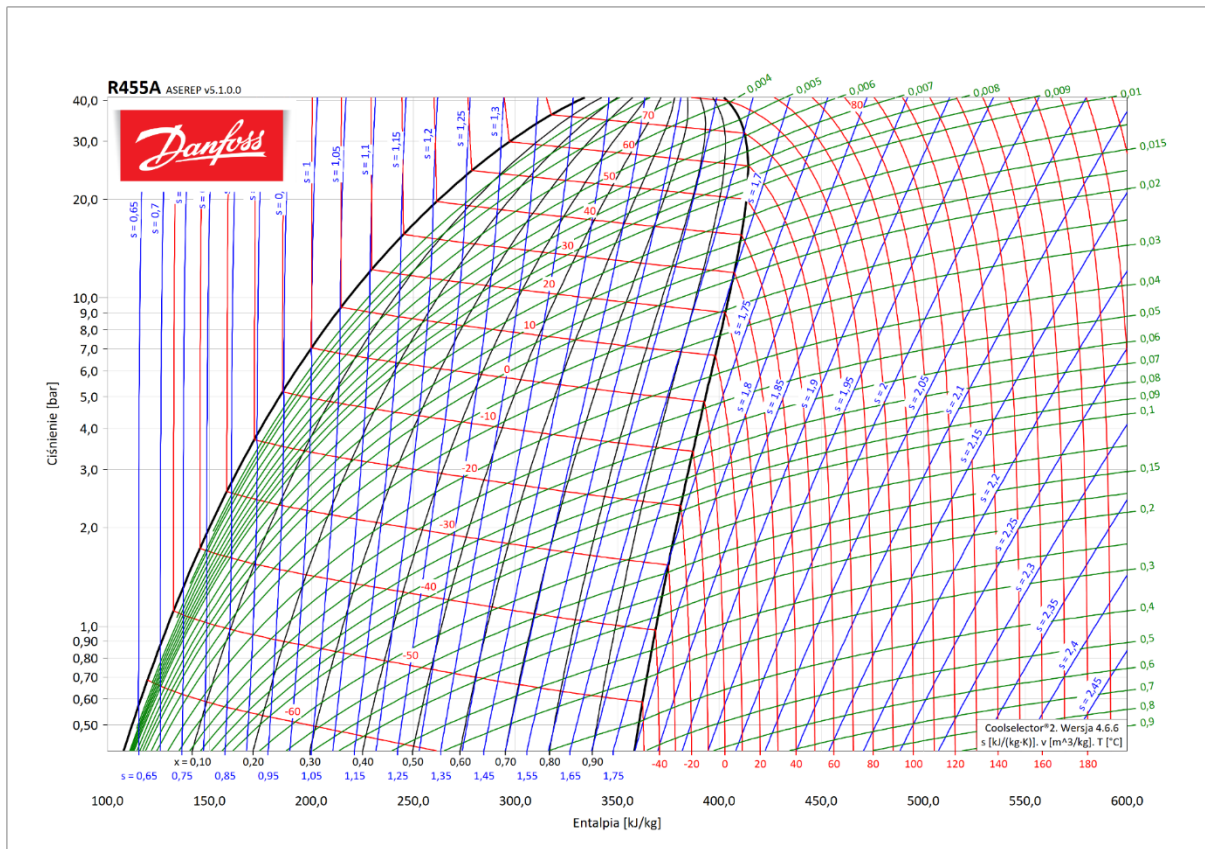
Rys. 1.10 Maksymalne wartości napełnienia instalacji chłodniczej czynnikiem chłodniczym, które można stosować bez ograniczeń w zależności od powierzchni pomieszczenia [21]

Czynnik chłodniczy R455a znajduje zastosowanie w instalacjach niskotemperaturowych w chłodnictwie komercyjnym, takich jak meble chłodnicze, agregaty skraplające, systemy z pętlą wodną. Dzięki niskiemu wskaźnikowi GWP, szerokiemu zakresowi pracy, wysokiej wydajności, wysokiej temperaturze krytycznej i niskiemu ciśnieniu krytycznemu może znaleźć również zastosowanie w urządzeniach schładzających, pompach ciepła oraz transporcie chłodniczym [7, 8].

Zestawienie podstawowych właściwości fizykochemicznych i charakterystyki czynnika chłodniczego R455a pokazano w tab. 1.11 i na rys. 1.11.

Tab. 1.11 Właściwości fizykochemiczne czynnika chłodniczego R455a (opracowanie własne na podstawie [26, 40, 38, 7])

Właściwość	Wartość	Jednostka
Wzór chemiczny	$C_3H_2F_4 / CH_2F_2 / CO_2$	-
Masa molowa	87,52	kg/kmol
Temperatura krytyczna	85,57	°C
Ciśnienie krytyczne	46,58	bar
Gęstość krytyczna	506,66	kg/m ³
Współczynnik GWP	146	-
Palność	lekko palny	-
Kolor	bezbarwny	-
Zapach	lekki, eteryczny	-



Rys. 1.11 Wykres log (p) – h dla czynnika chłodniczego R455a [33]

1.2. Charakterystyka mebli gastronomicznych

Meble gastronomiczne obecne są we wszystkich obiektach handlowych oraz obiektach użyteczności publicznej, w której istnieje zapotrzebowanie na przechowywanie żywności w kontrolowanej temperaturze. Począwszy od małego sklepu osiedlowego, przez bary i restauracje, a kończąc na dużych centrach handlowych i hurtowniach. Pośród nich można znaleźć urządzenia chłodnicze i mroźnicze takie jak lady, regały, witryny oraz wyspy. W zależności od zapotrzebowania na ilość przechowywanego produktu oraz od wielkości urządzeń niezbędne jest zagwarantowanie odpowiedniej wydajności chłodniczej tych urządzeń. Wymagana wydajność chłodnicza może być określona dla pojedynczego mebla lub do szeregu mebli chłodniczych. Wyznaczenie niezbędnej wydajności chłodniczej odbywa się na podstawie ustaleń parametrów pracy tychże urządzeń, w zależności od rodzaju towaru oraz czasu jego przechowywania. W tym celu wykonuje się bilans cieplny określony dla mebli gastronomicznych [41, 42, 43, 44], w którym uwzględnia się przede wszystkim takie parametry jak:

- ciepło wnikające z otoczenia,
- ciepło dostarczane przez produkt (gdy temperatura ładowanego produktu jest wyższa niż temperatura przechowywania),
- ciepło oddychania produktu (w przypadku świeżych owoców i warzyw),
- ciepło wprowadzone wraz z opakowaniem,
- ciepło wykorzystane do odprowadzania wilgoci z produktu.

Wartość ciepła wnikającego z otoczenia uwzględnia wpływ wszystkich strumieni ciepła z otoczenia, w którym znajduje się mebel chłodniczy. Zawiera się w nim ciepło pochodzące z oświetlenia, od ludzi, wentylacji i klimatyzacji oraz agregatu chłodniczego wbudowanego w mebel chłodniczy. Wspomniane parametry nie wpływają bezpośrednio na całkowity bilans cieplny, lecz reagują pośrednio, wpływając na temperaturę otoczenia. Wartość ciepła dostarczonego wraz z produktem a także ciepło dostarczone wraz z opakowaniem zbliża się do zera, gdy różnica między temperaturą produktu a temperaturą wnętrza przestrzeni chłodniczej dąży do zera. Dane literaturowe [45, 44, 46, 47] wskazują, które z wymienionych parametrów mają największy wpływ na ciepło całkowite. Podczas przechowywania świeżych owoców i warzyw w standardowym pojemniku do przechowywania żywności [48], całkowite ciepło z mebli chłodniczych zależy głównie od ciepła dostarczanego z otoczenia oraz ciepła oddychania przechowywanego produktu.

Pod pojęciem mebli gastronomicznych rozumiane są różnego rodzaju meble chłodnicze i mroźnicze. Przykładem mogą być nazewnictwa, takie jak wanna, witryna, stół, płyta, lada, regał. Różne rodzaje mebli gastronomicznych znajdują zastosowania w różnego rodzaju obiektach handlowych i użyteczności publicznej. Z uwagi na charakter prowadzonej działalności oraz w zależności od zapotrzebowania konsumentów na dany towar, należy zdecydować, który typ mebla będzie najkorzystniejszy. Należy zwrócić uwagę także na estetykę wybranych mebli gastronomicznych, ponieważ w dużej mierze na tej cesze odbiorca końcowy skupia swoją uwagę [49, 50, 51, 52]. W oparciu o wybranych krajowych producentów mebli gastronomicznych przedstawiono dalszą charakterystykę mebli.

Lady chłodnicze są to urządzenia służące do przechowywania świeżej żywności w kontrolowanej temperaturze (np. nabiał, mięso). Stosowane są w sklepach spożywczych, mięsnych, nabiałowych. Przykład lady chłodniczej pokazano na rys. 1.12.



Rys. 1.12 Lada chłodnicza [53]

Witryny chłodnicze są urządzeniami przeznaczonymi do eksponowania żywności przechowywanej w kontrolowanej temperaturze. Meble te często znajdują zastosowanie w cukierniach do prezentacji wyrobów cukierniczych, zatem istotna jest ich estetyka. Przykład witryny chłodniczej pokazano na rys. 1.13.



Rys. 1.13 Witryna chłodnicza [53]

Witryna mroźnicza służy do przechowywania żywności zamrożonej. Ma za zadanie utrzymywanie żywności w kontrolowanej temperaturze, jednocześnie umożliwiając klientom łatwy dostęp do wybranych produktów. Często jest spotykana w sklepach samoobsługowych w dziale mrozonek. Przykład witryny mroźniczej pokazano na rys. 1.14.



Rys. 1.14 Witryna mroźnicza [53]

Regał chłodniczy jest urządzeniem często spotykanym w samoobsługowych sklepach spożywczych. Ma za zadanie utrzymywać żywność w kontrolowanej temperaturze, jednocześnie umożliwiając łatwy dostęp do towaru klientom. Przykład regału pokazano na rys. 1.15.



Rys. 1.15 Regał chłodniczy [53]

Konstrukcja mebli gastronomicznych podyktowana jest koniecznością spełnienia warunków sprzedaży, czy jest to forma samoobsługowa czy obsługowa. Szkielet oraz rama mebli często zbudowane są ze stali nierdzewnej. Poszycie zewnętrzne oraz blat występują w różnorodnej formie, jak np. stal nierdzewna, granit, szkło, sklejka lub PVC. Aby zapewnić istotne dla klienta warunki estetyczne urządzenia w dolnej, zasłoniętej części mebla znajduje się agregat chłodniczy, który jest zaizolowany pianką poliuretanową lub innym materiałem izolującym.

Zakres temperatur stosowanych w meblach gastronomicznych zależy od rodzaju przechowywanego towaru. Może różnić się w zależności od rodzaju mebla, a także dla takich samych mebli może różnić się w zależności od wersji. Istotny jest także rodzaj obiegu powietrza w ochładzanym meblu. Wyróżnia się następujące rodzaje obiegu powietrza w meblach gastronomicznych:

- naturalny ruch powietrza wynika z lokalnej temperatury panującej w meblu. Gęstość powietrza zimnego i powietrza ciepłego zależy od miejscowych różnic temperatury. W związku z tym miejscowa różnica temperatury powoduje zmianę gęstości, co wywołuje ruch powietrza. Przepływ powietrza wymuszony grawitacyjnie charakteryzuje się małą prędkością przepływu. W tym wypadku mogą pojawiać się również miejsca, gdzie nie występuje ruch powietrza, co skutkuje zmniejszeniem efektywności chłodzenia,

- wymuszony ruch powietrza spowodowany jest pracą wentylatora, dzięki czemu istnieje mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia miejsc, w którym nie występuje ruch powietrza. Powietrze przepływające w przestrzeni chłodzonej z racji większych prędkości przepływu pozwala również na efektywniejsze ochładzanie żywności oraz jej osuszanie na powierzchniach zewnętrznych, co przedłuża czas przechowywania żywności.

1.3. Podsumowanie przeglądu literatury

Zgodnie z założeniami Unii Europejskiej, należy ograniczyć użycie czynników chłodniczych mających negatywny wpływ na środowisko naturalne. Ograniczenie to dotyczy między innymi popularnego czynnika chłodniczego R404a [24, 54, 55]. Idąc zgodnie z tą ideą, możliwe jest zastosowanie alternatywnych czynników chłodniczych o niskim współczynniku GWP. Przykładem czynnika chłodniczego o niskim GWP jest czynnik chłodniczy R455a, który jest przedmiotem badań wielu autorów [6, 7, 8, 38, 36, 56, 40, 57]. Przeprowadzona na podstawie literatury analiza dotychczasowego stanu wiedzy wskazuje, że::

- zmniejszenie GWP o 95% można osiągnąć stosując czynnik chłodniczy R455a jako alternatywę dla czynnika R404a,
- czynnik R455a wykazuje podobną charakterystykę jak czynnik R404a pod względem właściwości termodynamicznych. Jego temperatura krytyczna jest wysoka, dlatego może być odpowiedni do stosowania w regionach o gorącym klimacie,
- wskazany przez autorów współczynnik wydajności COP czynnika R455a jest większy niż w przypadku układów chłodniczych z czynnikiem R404a,
- wspomniani autorzy wykazali, że zastosowanie R455a może okazać się odpowiednie i zapewnia lepszą wydajność energetyczną w porównaniu do uprzednio stosowanych czynników chłodniczych. Dzięki temu możliwe jest stosowanie czynnika R455a o niskim współczynniku GWP w układach chłodniczych począwszy od 2022 roku zgodnie z Rozporządzeniem UE nr 517/2014.

Autorzy badań [26, 36, 56, 58, 40, 35, 38, 59, 60, 61] porównali parametry pracy pod względem ciśnień oraz temperatur roboczych, wartości GWP i ODP oraz efektywności energetycznej wybranych czynników chłodniczych, jako alternatywę dla czynnika R404a. Najlepszym wyborem okazał się czynnik R455a, następnie odpowiednio R452a i R454c. Biorąc pod uwagę przebadane przez cytowanych autorów parametry pod względem wydajności układu i zużycia

energii elektrycznej, jako alternatywny czynnik chłodniczy sprawdza się najkorzystniej czynnik R455a.

W kolejnych badaniach [62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 32] przeanalizowano wykorzystanie czynników chłodniczych o współczynniku GWP poniżej 150. Wykorzystano urządzenia chłodnicze, które są szeroko stosowane do pracy z czynnikiem chłodniczym R404a. Zbadano charakterystyki energetyczne układów chłodniczych, w których zastosowano skraplacze pracujące wewnątrz budynków. Wykazano, iż zastosowanie czynników chłodniczych, takich jak R454c, R455a, R457a i R465a w porównaniu z czynnikiem R404a umożliwia redukcję współczynnika GWP o około 95%. Badane przez autorów opracowania mieszaniny z grupy HFO/HFC (z wyjątkiem czynnika R465a) sklasyfikowane są w grupie bezpieczeństwa A2L. Pomimo tego czynniki te wykazały podobne właściwości termodynamiczne jak czynnik R404a. Ponadto wykazano, że:

- wartości współczynnika efektywności energetycznej COP badanych alternatywnych czynników chłodniczych były wyższe w porównaniu z R404a,
- zużycie energii elektrycznej przez sprężarkę w przypadku alternatywnych czynników chłodniczych było niższe niż dla czynnika R404a,
- wartości współczynnika TEWI badanych alternatywnych czynników chłodniczych są niższe niż czynnika R404a.

Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki, autorzy sugerują, że w urządzeniach takich jak zamrażarki czy chłodziarki czynniki chłodnicze R454c, R455a, R457a i R465a mogą być stosowane jako alternatywne dla czynnika R404a. Dzięki temu nie tylko poprawia się wydajność energetyczna układu chłodniczego, ale także mniej obciążone jest środowisko.

Urządzenia chłodnicze mebli gastronomicznych powinny być projektowane uwzględniając aspekty ekonomiczne. Wymagane jest, aby instalacja chłodnicza spełniała najwyższe standardy jeśli chodzi o zużycie energii [69, 41, 43, 42, 70]. W tym wypadku ważne jest spełnienie wymagań dotyczących stosowanych komponentów, a także czynników chłodniczych. Z uwagi na powszechne występowanie mebli gastronomicznych w każdym zakątku świata, nawet jednostkowa poprawa wydajności urządzenia może mieć globalny wpływ na całokształt funkcjonowania systemu. W układach chłodniczych mebli gastronomicznych najczęściej spotykanym rozwiązaniem, jeśli chodzi o sposób skraplania par czynnika chłodniczego, jest stosowanie skraplaczy chłodzonych powietrzem, w których ciepło skraplania jest oddawane do otoczenia. Dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie skraplaczy z możliwością odzysku ciepła

odpadowego, w celu jego dalszego zagospodarowania. Urządzenia chłodnicze stosowane w meblach gastronomicznych powinny charakteryzować się także małym zużyciem energii elektrycznej, co bezpośrednio przekłada się na koszt funkcjonowania urządzenia. Oba parametry zależne są od stosowanego czynnika chłodniczego.

2. Cel i zakres pracy

Analiza studiów literaturowych wykazała iż w licznych opracowaniach [49, 69, 71, 50, 42, 41] zostały ogólnie opisane komercyjne meble gastronomiczne. Dużo uwagi w tych opracowaniach poświęcono badaniom mebli gastronomicznych pod kątem możliwości kontrolowania temperatury wsadu. W mniejszym stopniu analizowano jednak zagadnienia dotyczące zastosowanych w nich układów chłodniczych. W związku z tym w pracy przyjęto następujący cel.

Cel pracy

Realizacja badań na temat możliwości zastosowania przyjaznego środowisku i użytkownikom czynnika chłodniczego dla powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego mebli gastronomicznych realizowanych na zaprojektowanym autorskim stanowisku badawczym.

Biorąc pod uwagę powyższe, w pracy podjęto się udowodnienia istnienia następującej tezy.

Teza

Istnieje alternatywny czynnik chłodniczy, pracujący w układzie chłodniczym mebli gastronomicznych, który umożliwia budowę układu chłodniczego w oparciu o dostępne na rynku komponenty, a także:

- a) zapewnia większą o co najmniej 25% efektywność energetyczną układu niż czynnik chłodniczy odniesienia R404a,
- b) zapewnia mniejsze o co najmniej 25% koszty energii,
- c) powoduje mniejszy ślad węglowy.

Zgodnie z przyjętym celem badań w pracy podjęto się realizacji następujących zadań.

Zadania do realizacji

- 1) Dobór alternatywnego czynnika chłodniczego.
- 2) Zaprojektowanie oraz zbudowanie autorskiego stanowiska badawczego.
- 3) Określenie parametrów pracy stanowiska badawczego pracującego z czynnikiem chłodniczym odniesienia podczas pracy ze skraplaczem:
 - a) powietrznym lamelowym,
 - b) powietrznym bezlamelowym,
 - c) wodnym (płytowym wymiennikiem ciepła).

- 4) Określenie parametrów pracy stanowiska badawczego pracującego z alternatywnym czynnikiem chłodniczym podczas pracy ze skraplaczem:
 - a) powietrznym lamelowym,
 - b) powietrznym bezlamelowym,
 - c) wodnym (płytkowym wymiennikiem ciepła).
- 5) Ocena możliwości wykorzystania ciepła odpadowego ze skraplacza, jako energii możliwej do dalszego zagospodarowania.

3. Dobór optymalnego czynnika chłodniczego z wykorzystaniem wspomaganie wielokryterialnego

3.1. Wybór metody wspomagającej podejmowanie decyzji

Jedną z dziedzin nauki są badania operacyjne, realizujące zadania z zakresu wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji [72, 73]. Wielokryterialne metody wspomaganie podejmowania decyzji znajdują zastosowanie podczas realizacji zadań, mających na celu rozwiązanie często bardzo wymagających problemów, z uwzględnieniem często sprzecznych ze sobą kryteriów. Z powodu tak zawiłych, niejednoznacznych problemów, należy wybrać te rozwiązania, które oferują analitykowi rozwiązanie najbliższe oczekiwanemu. Przedstawione narzędzie pozwoli wspomóc w podjęciu decyzji dotyczącej wyboru optymalnego czynnika chłodniczego.

Często spotykanym [72, 73] podziałem problemów związanych ze wspomaganie podejmowania decyzji jest podział na następujące trzy klasy:

- problemy selekcji, gdzie decydent ma za zadanie wybranie jednego wariantu spośród wielu kategorii,
- problemy porządkowania, gdzie osoba decydująca ma za zadanie posegregować założony zbiór działań wśród innych działań. Poszczególne działania mogą być porównywalne ze sobą lub mogą zostać nieporównywalne,
- problemy klasyfikacji, gdzie zgodnie z przyjętymi uprzednio założeniami, decydent dokonuje rozdzielenia wariantów na części.

Wśród różnych znanych metod wspomaganie podejmowania decyzji, rozróżnia się dwa podstawowe podejścia – amerykańskie i francuskie [74, 72, 75]. Zdarza się, że w trakcie procesu decyzyjnego występują różne kryteria, których nie można ze sobą bezpośrednio porównać. Różne metody stosują odmienne rozwiązania w tej kwestii, przez co także sam proces decyzyjny prowadzony jest w różnoraki sposób. Poszczególne metody wymienionych podejść różnią się sposobem działania na kryteriach, których nie sposób bezpośrednio porównać ze sobą.

Pierwsze wymienione podejście odnosi się do tzw. szkoły amerykańskiej, gdzie metody oparte są na kryterium syntetycznym zakładającym, że poszczególne kryteria podlegają klasyfikacji do jednej optymalnej funkcji użytecznej. Jako przykład tego podejścia [72] mogą służyć metody: AHP, SMART, SAW, MUZ, UTA.

Drugie podejście odnosi się do tzw. szkoły francuskiej, gdzie dopuszcza się klasyfikację nieporównywalnych wariantów decyzyjnych używając relację przewyższania. Pozwala to na uzyskanie wyników pomimo, że decydent porównując dwa warianty nie może jednoznacznie wskazać wyższości jednego z nich. Tworzy się klasy wzajemnych oddziaływań pomiędzy sobą. Przykładem [72] powyższej szkoły mogą być metody: Promethee, grupy metod Electre.

Występuje jeszcze trzecie podejście, które jest połączeniem dwóch poprzednich szkół [72], gdzie przykładem mogą być metody: Pragma, Idra, Mappac.

Obecnie bardzo często korzysta się z metod wspomaganie podejmowania decyzji, ponieważ znacznie przyspieszają i ułatwiają proces decyzyjny. Istotne jest natomiast, aby w odpowiedni sposób dopasować podjęty problem do odpowiedniej metody.

W literaturze przedmiotowej [76, 74, 77, 75] można spotkać się z podstawowymi zasadami dotyczącymi rozwiązywania zadań związanych z wielokryterialnym wspomaganie podejmowania decyzji:

- źródłem wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji są metody decyzyjne,
- metody decyzyjne powinny brać pod uwagę możliwość wystąpienia sytuacji, która jest mało prawdopodobna lecz niesie poważne konsekwencje,
- należy założyć, że decydent nie posiada pełnej wiedzy na dany temat,
- należy mieć na uwadze, iż mogą wystąpić czynniki warunkujące podjęcie konkretnej decyzji,
- wielokryterialne wspomaganie podejmowania decyzji należy rozważać jako szereg podjętych działań,
- należy brać pod uwagę różne spojrzenia na rozwiązania w danym modelu,
- w wielokryterialnym wspomaganie podejmowania decyzji należy uwzględnić wpływ czasu warunkujący zmienność kryteriów,
- z uwagi na dyscyplinę naukową powinno się wziąć pod rozwagę wielokryterialne wspomaganie podejmowania decyzji wraz z analizą ryzyka.

Aby zintensyfikować korzyści płynące z zastosowania wyżej wymienionych reguł, należy stosować je jednocześnie.

Biorąc pod uwagę możliwość wsparcia się metodą badawczą w celu optymalnego wytypowania czynnika chłodniczego oraz uwzględniając powyższe aspekty przyjęto, że zadanie zaliczone może być do problemów porządkowania wariantów.

Podczas wstępnej analizy dostępnych metod wytypowano trzy metody i są to: SAW, AHP, Electre III. Każda z wytypowanych metod posiada swoje wady i zalety, które przedstawiono w tab. 3.1.

Tab. 3.1 Porównanie wybranych metod wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji

	Electre III	AHP	SAW
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> – istnieje możliwość uwzględnienia nieporównywalnych wariantów, – możliwy jest wybór preferencji w stosunku do każdego kryterium, – ocenia się zgodnie z warunkami rzeczywistymi, 	<ul style="list-style-type: none"> – zgodność ocen jest kontrolowana przez współczynnik niespójności, – stosowanie podkryteriów możliwe jest w sposób bezpośredni, – uporządkowany sposób przedstawienia zadania, 	<ul style="list-style-type: none"> – prostota i intuicyjność w modelowaniu preferencji decydenta, – występuje macierz znormalizowanych ocen, – przekształcenie problemu wielokryterialnego na jednokryterialny,
Wady	<ul style="list-style-type: none"> – dość trudne w zorientowaniu się progi, – wyłącznie pośrednie stosowanie podkryteriów, – w finalnym rankingu nie ma możliwości wglądu w odległości między poszczególnymi wariantami. 	<ul style="list-style-type: none"> – niekorzystny stosunek liczby kryteriów do czasu tworzenia modelu, – w metodzie przyjmuje się skalę ocen preferencji od 1 do 9 – taka wielkość skali w opisywanym przypadku jest trudna do zrealizowania, – możliwe jest łatwe wprowadzenie niezgodności w modelu preferencji. 	<ul style="list-style-type: none"> – subiektywny sposób określania wag kryteriów, – konieczność konwersji warunków (na problemy maksymalizacyjne bądź minimalizacyjne), – problem w doborze odpowiedniej wartości wag dla poszczególnych kryteriów.

Biorąc pod uwagę powyższe wady i zalety, informacje zawarte w rozwinięciu punktu 3, a także przyjęte kryteria wyboru stwierdzono, że najkorzystniejszym wyborem jest wybór metody SAW (ang. Simple Additive Weighting Method) – metoda sumy ważonej.

3.2. Charakterystyka wybranej metody

Metoda sumy ważonej (SAW) jest to jedna z częściej stosowanych metod optymalizacji wielokryterialnej [78, 75, 79, 77]. Dzięki tej metodzie możliwe jest przekształcenie problemu wielokryterialnego na jednokryterialny dzięki określeniu wag poszczególnych kryteriów na podstawie preferencji użytkownika. W metodzie tej wprowadza się kryterium zastępcze, będące sumą ważoną kryteriów. Metodę SAW można wyrazić za pomocą funkcji określonej w równaniu 1 [75].

$$F(x) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x) \quad (1)$$

gdzie:

wskaźnik wagi – $w_i \in [0,1]$ oraz $\sum_{i=1}^m w_i = 1$

Zazwyczaj wagi poszczególnych kryteriów symbolizują ważność danego kryterium w danym problemie. Istnieje jednak podejście, które za pomocą wag kryteriów dokonuje normalizacji wartości poszczególnych warunków. Istnieje bardzo wiele metod normalizacji kryteriów i wyznaczania ich wag w_i .

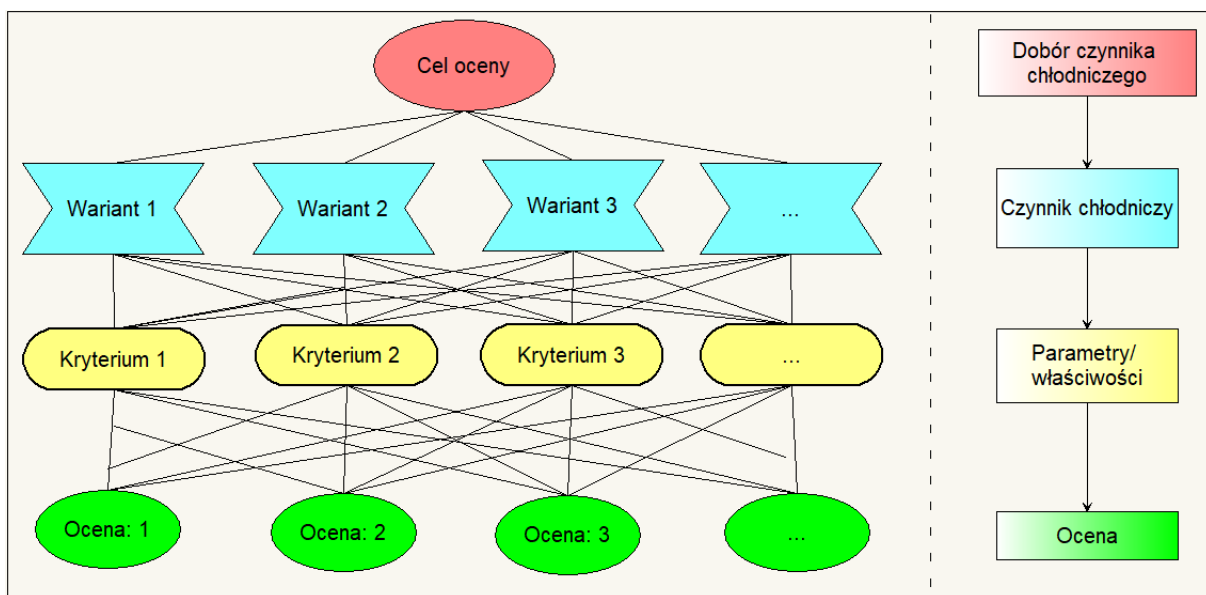
Jedną z najczęściej używanych metod normowania zmiennych, służącą do oceny skończonej liczby wariantów do wyboru to metoda unitaryzacji zerowej. W metodzie tej, do celu normalizacji i agregacji funkcji celu, wszystkie zmienne używane przy ocenie poszczególnych kryteriów dzielone są na trzy klasy:

- Stymulanty – są to zmienne, których wzrost kojarzyć należy ze wzrostem a spadek ze spadkiem oceny zjawiska.
- Destymulanty - są to zmienne, których wzrost kojarzyć należy ze spadkiem a spadek ze wzrostem oceny zjawiska.
- Nominanty – to takie zmienne, która mają określoną najkorzystniejszą wartość (przedział), a wszystkie inne wartości, zarówno większe jak i mniejsze od zadanej wartości pogarszają ocenę danego parametru.

3.3. Przeprowadzenie procesu wspomaganie podejmowania decyzji podczas wyboru optymalnego czynnika chłodniczego

Przedstawioną w punkcie 3.2 metodę wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji wykorzystano w celu wytypowania alternatywnego czynnika chłodniczego pracującego w

projektowanym stanowisku badawczym. **Założono, że najniższa wartość opisująca dane kryterium jest najlepszym wyborem, co oznacza, że najniższa suma końcowego wyniku oznacza funkcję celu.** W celu wykonania wielokryterialnej oceny wybranych czynników chłodniczych dokonano wyboru kryteriów decyzyjnych dla tychże czynników. Wśród wybranych kryteriów znajdują się takie, które w łatwy sposób można przedstawić liczbowo, ale znajdują się także takie kryteria, których nie sposób przedstawić liczbowo. Te drugie należy zaprezentować w sposób opisowy, a następnie poddać kwantyfikacji, aby móc porównać i ocenić kryteria między sobą. Na rys. 3.1. przedstawiono hierarchiczną procedurę wyboru wariantu.



Rys. 3.1 Hierarchiczna procedura wyboru wariantu

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, iż najbardziej reprezentatywny sposób przedstawienia wartości kryteriów nie dających przedstawić się liczbowo można dokonać poprzez prezentację w pięciostopniowej skali. Wartość 1 oznacza najwyższą ocenę, natomiast wartość 5 najniższą. W tab. 3.2 wyjaśniono sposób rozumowania skali ocen.

Tab. 3.2 Pięciostopniowa skala ocen kryteriów

Opis ilościowy	Opis jakościowy rozwiązania
5	Złe
4	Nienajgorsze
3	Przeciętne
2	Dobre
1	Bardzo dobre

Poniżej przedstawiono opis wybranych kryteriów decyzyjnych:

- 1) Koszt zakupu 1 kg czynnika chłodniczego [zł] – jedno z ważniejszych kryteriów ekonomicznych oraz bezpośrednio mierzalnych, wyrażonych w jednostce finansowej. Przy tym kryterium zakłada się, że raz zakupiony czynnik chłodniczy nie ulega wyciekowi.
- 2) Grupa bezpieczeństwa wg PN-EN 378 [-] – norma rozgranicza grupy bezpieczeństwa czynników chłodniczych określone na podstawie palności i toksyczności oraz określa oddziaływania na zdrowie i bezpieczeństwo ludzi, według kryterium jakości i toksyczności.

Aby umożliwić przeprowadzenie optymalizacji z wykorzystaniem niemierzalnych wartości, należy kryteria jakościowe przekształcić na kryteria ilościowe. Przekształcenie kryterium nr 2 przedstawiono w tab. 3.3.

Tab. 3.3 Grupa bezpieczeństwa przedstawiona w sposób jakościowy i ilościowy (opracowanie własne na podstawie [18])

opis jakościowy		opis ilościowy
wyższa palność	A3	4
niższa palność	A2	3
lekka palność	A2L	2
niepalność	A1	1

- 3) GWP [-] – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego odniesiony do dwutlenku węgla, dla którego GWP=1.

- 4) Ciśnienie skraplania przy temperaturze 30°C [bar] – jeden z parametrów eksploatacyjnych, decydujący o sposobie działania instalacji chłodniczej, a także o wykorzystanych materiałach i sposobie jej budowy. Im ciśnienia robocze są bardziej zbliżone do ciśnienia atmosferycznego, tym mniejsze opory musi pokonać sprężarka i mogą zostać zastosowane mniej wymagające elementy konstrukcyjne.
- 5) Ciśnienie odparowania przy temperaturze -10°C [bar] – adekwatnie jak w przypadku kryterium nr 4.

W tab. 3.4 zestawiono wartości 5 kryteriów decyzyjnych dla 5 wariantów.

Tab. 3.4 Wartości kryteriów decyzyjnych dla wybranych wariantów

		Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5
		Koszt zakupu 1 kg czynnika chłodniczego [zł]	Grupa bezpieczeństwa wg PN-EN 378	GWP [-]	Ciśnienie skraplania przy temperaturze 30°C [bar]	Ciśnienie odparowania przy temperaturze -10°C [bar]
Wariant 1	R452a	220	1	2140	14,9	4
Wariant 2	R449a	152	1	1397	14,5	3,6
Wariant 3	R455a	204	2	146	15,6	3,4
Wariant 4	R290	87	4	3	10,7	3,4
Wariant 5	R744	50	1	1	72	26,4

Tab. 3.4 przedstawia wartości kryteriów decyzyjnych dla oceny wielokryterialnej. Wartości ocen dla kryteriów mierzalnych uzyskać można na podstawie danych producenta. Natomiast wartości ocen kryterium jakościowego określono przy wykorzystaniu przyjętej skali ocen w tab. 3.3.

W tab. 3.5 przedstawiono stopnie ważności dla poszczególnych kryteriów. Uwydatniono ważność współczynnika GWP oraz istotność stopnia palności, a także kryterium określające czynnik ekonomiczny.

Tab. 3.5 Wektor wag kryteriów głównych

Kryterium	Waga
1	0,20
2	0,25
3	0,25
4	0,15
5	0,15

Jak już wspomniano, najmniejsze wartości wejściowe odpowiadają najlepszemu wyborowi. Dlatego w dalszym kroku pomija się przekształcenie tabeli z wartościami kryteriów decyzyjnych i od razu utożsamia się podane wartości jako macierz P.

Tab. 3.6 Wejściowa macierz rozwiązań dla oceny wielokryterialnej P

	220	1	2140	14,9	4
	152	1	1397	14,5	3,6
[P]=	204	2	146	15,6	3,4
	87	4	3	10,7	3,4
	50	1	1	72	26,4

Następnie należy obliczyć wyrazy macierzy znormalizowanej P* według wzoru 2.

$$[P_{ij}^*] = \frac{P_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m P_{ij}^2}} \quad (2)$$

gdzie:

i=1, ..., m; j=1, ..., n; (m – liczba wariantów, n – liczba kryteriów)

Tab. 3.7 Macierz znormalizowana P*

[P*]=	0,627	0,209	0,836	0,193	0,146
	0,433	0,209	0,546	0,188	0,132
	0,581	0,417	0,057	0,202	0,124
	0,248	0,834	0,001	0,138	0,124
	0,142	0,209	0,000	0,932	0,965

Następnym krokiem jest zestawienie macierzy znormalizowanych rozwiązań P* z przypisanymi wagami. Takie zestawienie przedstawiono w tab. 3.8.

Tab. 3.8 Znormalizowana macierz wejściowa rozwiązań P* z przypisanymi wagami

	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5
Wariant 1	0,627	0,209	0,836	0,193	0,146
Wariant 2	0,433	0,209	0,546	0,188	0,132
Wariant 3	0,581	0,417	0,057	0,202	0,124
Wariant 4	0,248	0,834	0,001	0,138	0,124
Wariant 5	0,142	0,209	0,000	0,932	0,965
Waga q	0,20	0,25	0,25	0,15	0,15

Aby uzyskać rozwiązanie problemu należy wartość każdego kryterium danego wariantu przemnożyć przez przypisaną mu wagę zgodnie z równaniem 3.

$$V_{ij} = P_{ij}^* \cdot q_{ij} \quad (3)$$

gdzie,

P*_{ij} – znormalizowana wartość i-tego wariantu, j-tego kryterium

q_{ij} – waga i-tego wariantu, j-tego kryterium

W tab. 3.9 przedstawiono wyniki oceny wielowariantowej przy użyciu metody sumy ważonej SAW.

Tab. 3.9 Wyniki oceny wielowariantowej przy użyciu metody sumy ważonej

	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	SUMA
Wariant 1	0,1254	0,0521	0,2090	0,0289	0,0219	0,4373
Wariant 2	0,0866	0,0521	0,1364	0,0281	0,0197	0,3230
Wariant 3	0,1162	0,1043	0,0143	0,0303	0,0186	0,2837
Wariant 4	0,0496	0,2085	0,0003	0,0208	0,0186	0,2978
Wariant 5	0,0285	0,0521	0,0001	0,1397	0,1447	0,3651

Przeprowadzenie procesu wielowariantowego wyboru optymalnego czynnika chłodniczego pozwoliło określić, który czynnik chłodniczy jest najlepszym wyborem do użytkowania w projektowanym stanowisku badawczym.

Najgorszą ocenę otrzymał wariant 1 (czynnik chłodniczy R452a) z uwagi na wysoki współczynnik GWP a także wysoką cenę zakupu. Następną, licząc od końca, pozycję zajął wariant 5 (czynnik R744 – dwutlenek węgla) z uwagi na wysokie ciśnienia pracy. Kolejnym czynnikiem, wyraźnie już odbiegającym od poprzednich czynników pod względem założonych kryteriów, jest czynnik chłodniczy R449a (wariant 2). W czołowym rankingu na zbliżonych pozycjach znalazły się warianty 3 i 4 (odpowiednio czynnik chłodniczy R455a i R290), przy czym lepszy wynik końcowy uzyskał wariant 5 (czynnik chłodniczy R455a).

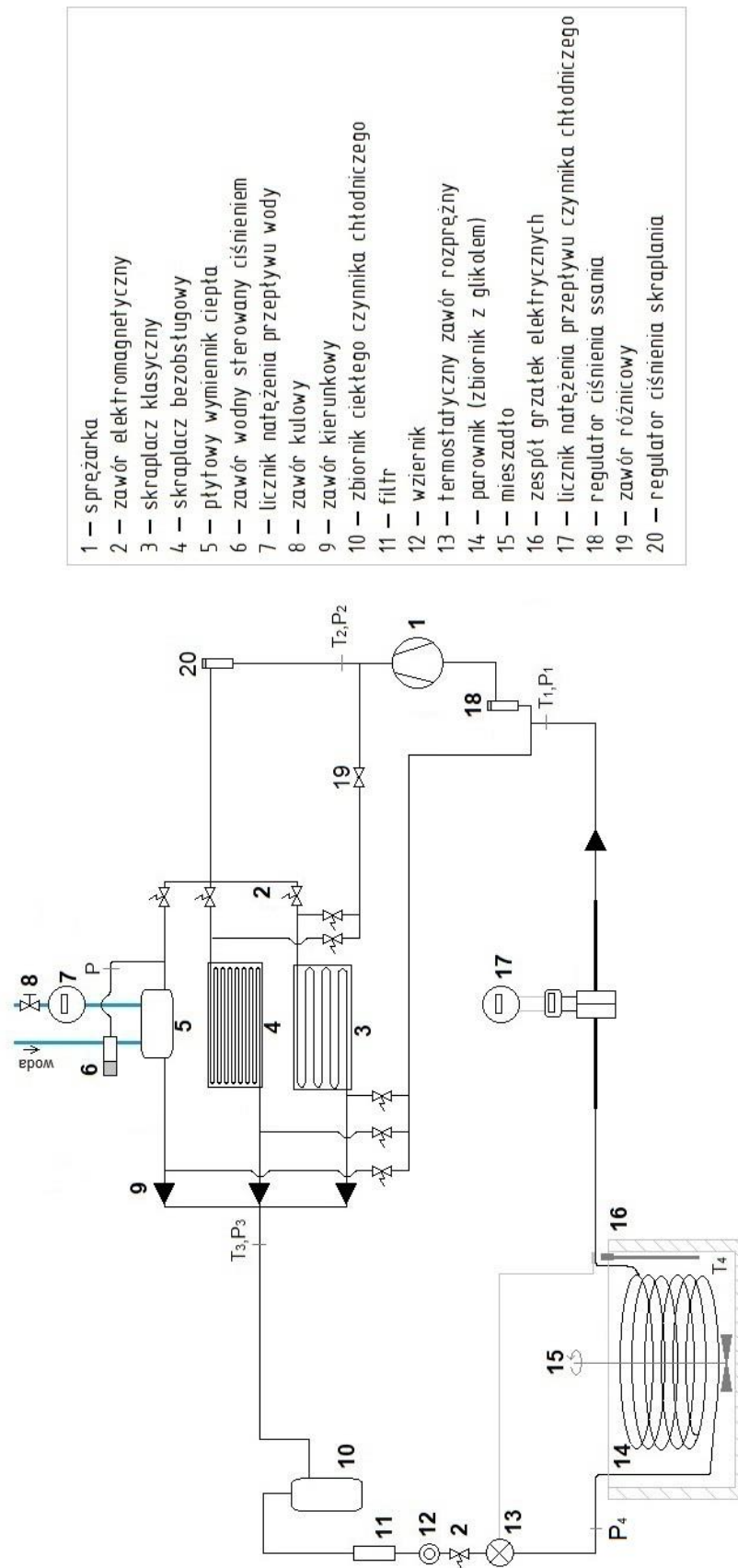
Ostateczna decyzja dotycząca optymalnego wyboru należy do końcowego decydenta, ponieważ program ma tylko wspomóc w podejmowaniu decyzji. Po przeprowadzonej analizie stwierdzono, że został wytypowany optymalny czynnik chłodniczy, którym jest R455a i to on został wykorzystany w dalszym procesie badawczym.

4. Autorskie stanowisko badawcze urządzenia chłodniczego zasilanego przyjaznym dla środowiska i użytkownika czynnikiem chłodniczym

4.1. Schemat ideowy i opis pracy stanowiska badawczego

Jako jeden z etapów podczas realizacji założeń pracy doktorskiej było zaprojektowanie autorskiego stanowiska badawczego. Umożliwiło ono weryfikację wybranych komponentów układu chłodniczego mebli gastronomicznych. Podczas realizacji pracy doktorskiej realizowano również grant wraz z producentem mebli gastronomicznych. Dostrzeżono wśród klientów zapotrzebowanie na alternatywny skraplacz zapewniający łatwiejszą obsługę. Producent w swojej ofercie uwzględnił potrzebę rynku i zaoferował skraplacze bezlamelowe charakteryzujące się łatwiejszym sposobem czyszczenia. Kolejnym produktem zamiennym dla skraplaczy powietrznych był skraplacz wodny. Oferuje on możliwość odzysku ciepła odpadowego. Do stanowiska badawczego wybrano skraplacze charakteryzujące się jednakowymi mocami cieplnymi. Podczas projektowania dokonano doboru poszczególnych komponentów z uwzględnieniem, iż urządzenie będzie pracowało w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys. 4.1.

Stanowisko badawcze zbudowane jest jako urządzenie mobilne. W jego dolnej części znajduje się sprężarka, parownik zbudowany jako zbiornik z glikolem, zbiornik ciekłego czynnika chłodniczego a także filtr, wziernik, termostatyczny zawór rozprężny oraz niezbędne zawory. W górnej części stanowiska znajdują się trzy rodzaje wykorzystywanych w trakcie badań skraplaczy. Skraplacz klasyczny (lamelowy), skraplacz bezobsługowy (bezlamelowy) i skraplacz wodny czyli płytowy wymiennik ciepła. Każdy ze skraplaczy posiada możliwość załączania i wyłączania za pomocą zaworów elektromagnetycznych NC o napięciu 230V. W górnej części znajduje się także oprzyrządowanie pomiarowe do rejestracji oraz odczytu parametrów pracy.



Rys. 4.1 Schemat stanowiska badawczego

Sprężony czynnik chłodniczy o parametrach T_2 , P_2 kierowany jest do instalacji chłodniczej z zainstalowanymi zaworami elektromagnetycznymi (2). Jednocześnie może być otwarty tylko jeden zawór elektromagnetyczny (2), podczas gdy pozostałe pozostają zamknięte. Wyboru otwartego zaworu dokonuje operator poprzez odpowiednią zmianę położenia przełącznika.

Czynnik chłodniczy dzięki otwarciu jednego z zaworów (2) jest kierowany do wybranego skraplacza (3), (4) lub (5).

W skraplaczu (3) i (4) zachodzi schłodzenie czynnika chłodniczego do temperatury nasycenia, skroplenie oraz dochłodzenie. Proces ten odbywa się dzięki wymuszeniu przepływu powietrza przy pomocy wentylatora poprzez konstrukcję skraplacza. Wyrzut ciepła ze skraplacza następuje do otoczenia.

W płytowym wymienniku ciepła (skraplacz wodny) (5) ciepło przekazywane jest przez płaszczyznę wymiennika do przepływającej wody. Natężenie przepływu wody w płytowym wymienniku ciepła (5) jest regulowane poprzez nastawę pokrętki zaworu (6), które wpływa na wartość ciśnienia czynnika chłodniczego przed wymiennikiem.

Pomiar wartości natężenia przepływu wody (7) dokonywany jest metodą wagową. Dodatkowo, aby zamknąć przepływ wody, można wykorzystać zainstalowany zawór kulowy (8).

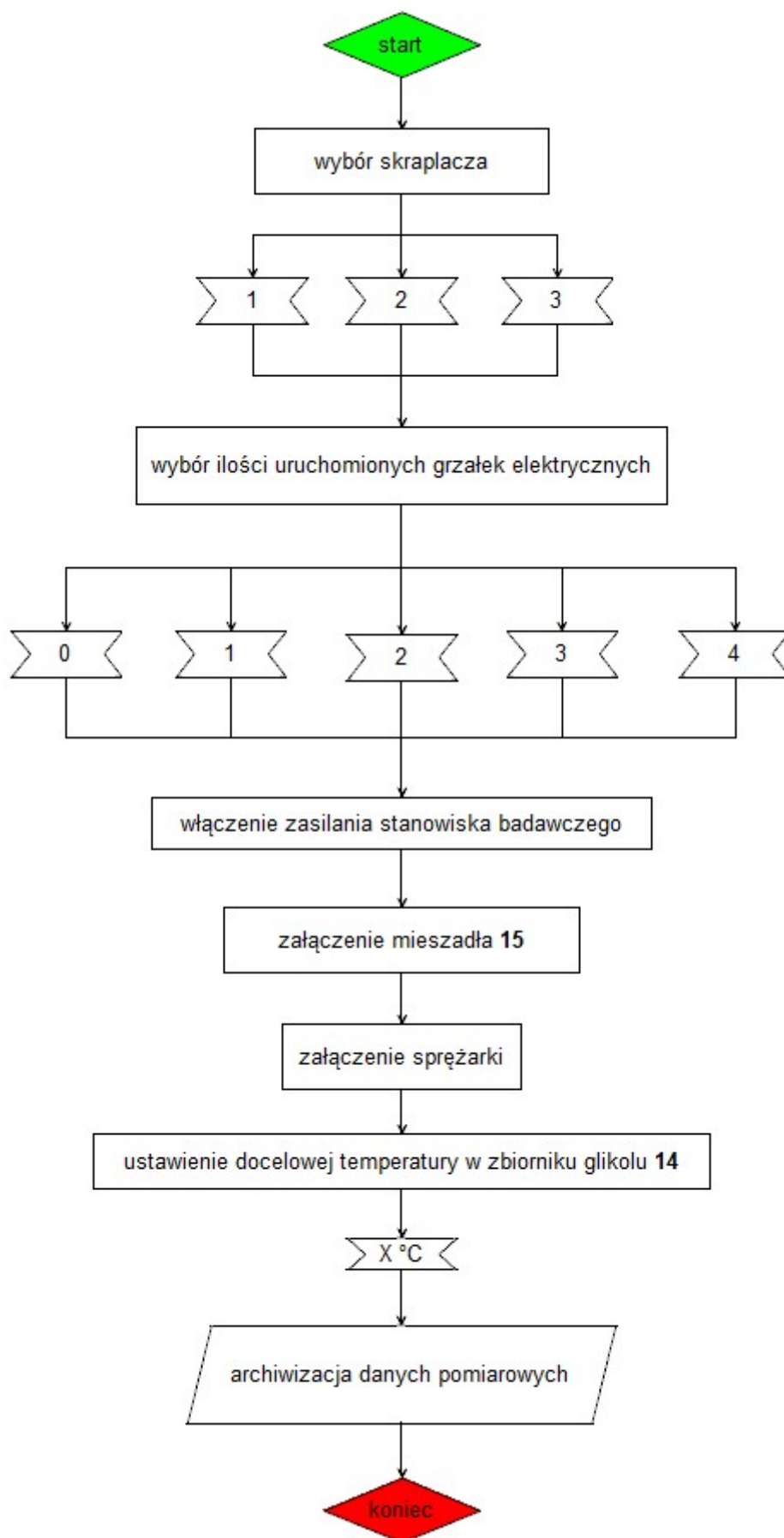
Za skraplaczami (3), (4), (5) znajdują się zawory zwrotne (9), które uniemożliwiają cofanie się czynnika chłodniczego do pozostałych niepracujących skraplaczy. Czynnik chłodniczy po opuszczeniu skraplacza posiada parametry T_3 , P_3 .

Następnie czynnik chłodniczy trafia do zbiornika cieczy (10), skąd jest dalej transportowany w postaci ciekłej przez filtr (11) i wziernik (12) do termostatycznego zaworu rozprężnego (13). Za zaworem rozprężnym (13) czynnik chłodniczy posiada ciśnienie P_4 i temperaturę T_4 .

Czynnik chłodniczy ulega odparowaniu w węzownicy umieszczonej w zbiorniku z glikolem (14), który zastępuje funkcję klasycznego parownika z wymuszonym obiegiem powietrza. W tym czasie odbiera ciepło z glikolu utrzymując temperaturę glikolu w zbiorniku na zadanym poziomie T_4 .

W zbiorniku (14) umieszczone są cztery grzałki o pojedynczej mocy 170 W (16) mające symulować obciążenie cieplne parownika. Operator dokonuje wyboru ilości włączonych grzałek (16) od 0 do 4.

Wraz z załączeniem sprężarki (1) uruchamiane jest mieszadło (15) mające zapewnić równomierną temperaturę w całej objętości zbiornika. Czynnik chłodniczy o parametrach T_1 , P_1 przepływa przez kryzę (17), przy pomocy której dokonuje się pomiar różnicy ciśnień. Zmierzona wartość różnicy ciśnień przed i za kryzą pokazana jest na wyświetlaczu elektronicznym (17).



Rys. 4.2 Schemat blokowy pracy stanowiska badawczego

4.2. Stanowisko badawcze

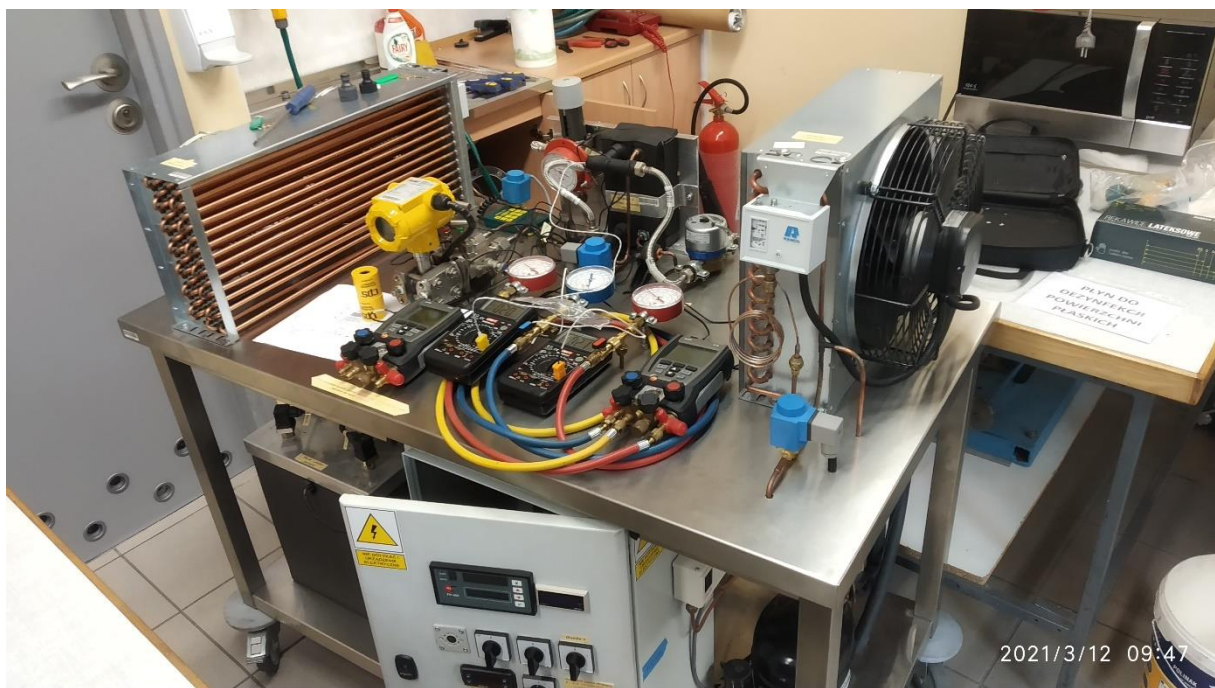
Idea budowy stanowiska badawczego zakładała możliwości mobilne urządzenia. W celu łatwego dostosowania do wymaganych podczas badań eksperymentalnych warunków, stanowisko zostało zbudowane przez autora pracy na ramie stołu z kołami. W jego dolnej części umieszczono sprężarkę, szafę sterowniczą oraz poprowadzono instalacje elektryczną i chłodniczą. W dolnej części znajdują się także zbiornik z glikolem mający symulować komorę chłodniczą. W zbiorniku umieszczono cztery grzałki elektryczne odpowiedzialne za symulowanie obciążenia cieplnego komory chłodniczej. W dolnej części zainstalowano także zbiornik czynnika chłodniczego oraz zwężkę przetwornika różnicy ciśnień czynnika chłodniczego. W górnej części stanowiska badawczego zamontowano trzy rodzaje skraplaczy, przetwornik różnicy ciśnień, zawór regulacji ciśnienia skraplacza wodnego. Ponadto, znajduje się tam także oprzyrządowanie pomiarowe do rejestracji oraz odczytu parametrów pracy, takich jak:

- temperatura glikolu, pomiar przy pomocy regulatora temperatury ESCO ES-10 z dokładnością 0,5% ,
- temperatura przed skraplaczem, pomiar przy pomocy miernika TESTO 570 z dokładnością 0,25%,
- temperatura za skraplaczem, pomiar przy pomocy miernika TESTO 570 z dokładnością 0,25%,
- temperatura za parownikiem, pomiar przy pomocy miernika TESTO 570 z dokładnością 0,25%,
- ciśnienie skraplania, pomiar przy pomocy TESTO 570 z dokładnością 0,5%,
- ciśnienie odparowania, pomiar przy pomocy TESTO 570 z dokładnością 0,5%,
- temperatura skraplania, pomiar przy pomocy miernika TESTO 570 z dokładnością 0,25%,
- temperatura odparowania, pomiar przy pomocy miernika TESTO 570 z dokładnością 0,25%,
- moc elektryczna, pomiar przy pomocy VOLTcraft Energy Logger 4000F z dokładnością 1%,
- masa ogrzanej wody w 1 cyklu pracy, pomiar przy pomocy wagi chłodniczej REFCO REF-METER z dokładnością 0,5%
- temperatura wody wejściowej, pomiar przy pomocy miernika TESTO 570 z dokładnością 0,25%,

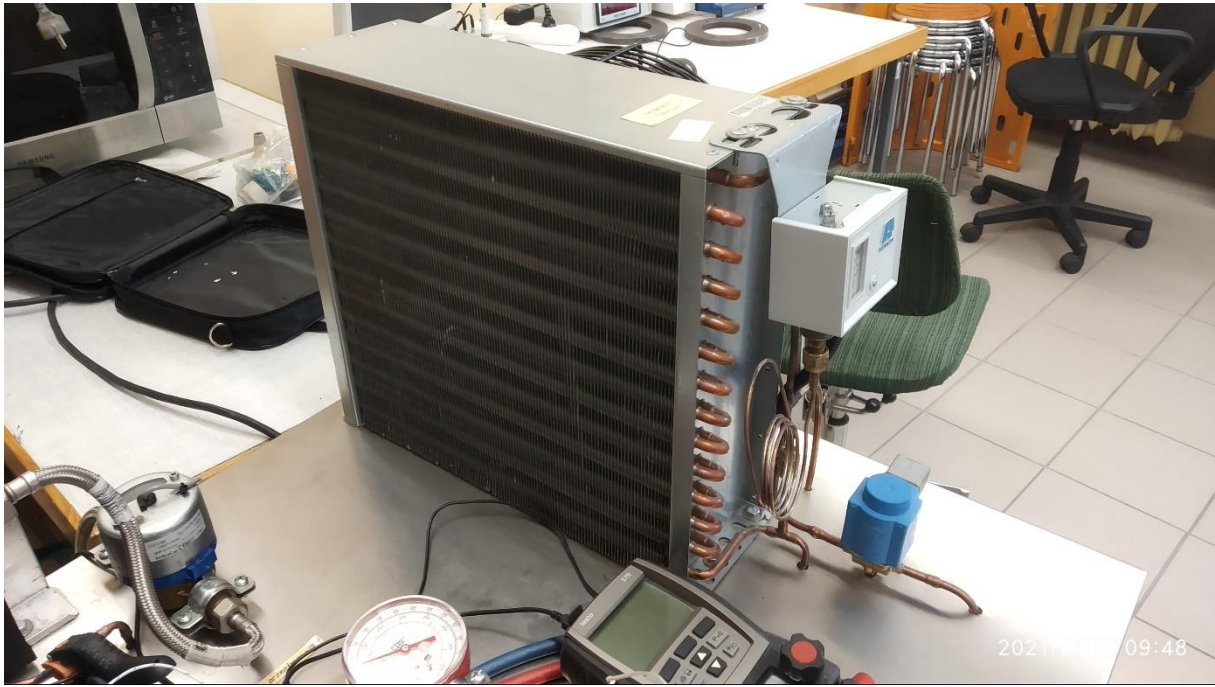
- temperatura wody wyjściowej, pomiar przy pomocy miernika TESTO 570 z dokładnością 0,25%.

Omówione elementy, jak i widok całego stanowiska podczas budowy i w czasie pracy przedstawiono na rys. 4.3 – 4.9.

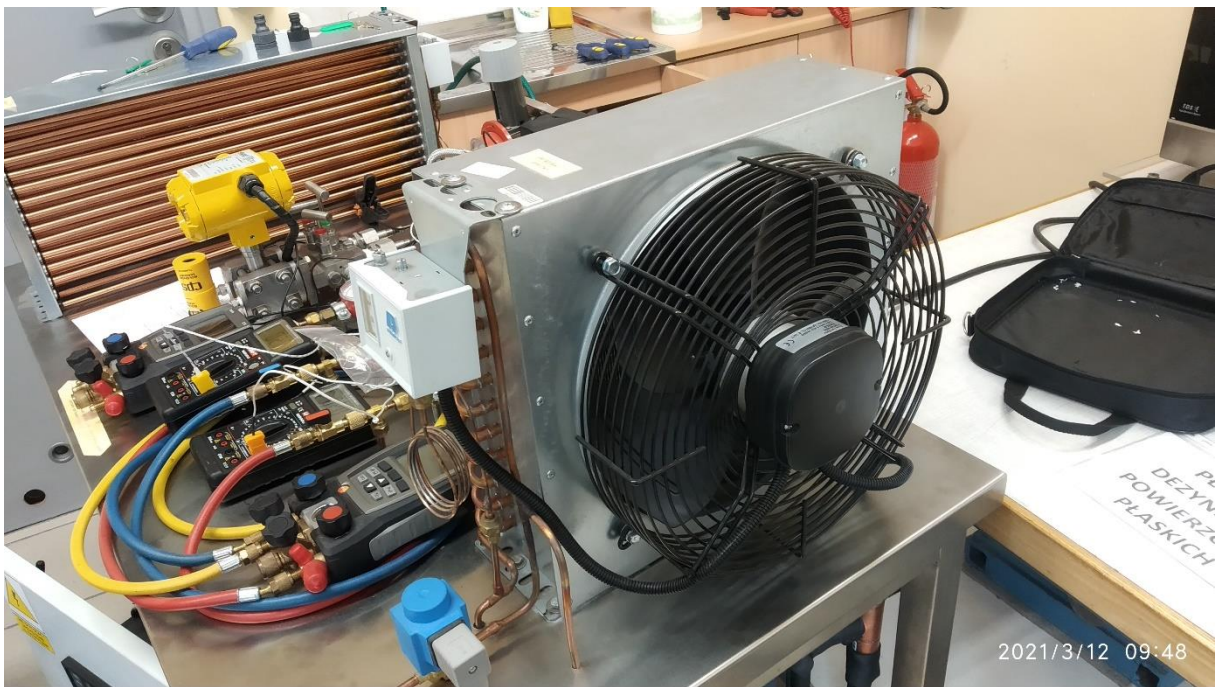
Podczas trwania wstępnych badań stwierdzono występowanie pewnych nieprawidłowości w funkcjonowaniu instalacji. W trakcie normalnego cyklu pracy, gdy dokonywano zmian pomiędzy pracą skraplaczy powietrznych, układ chłodniczy często nie osiągał ponownie zadanej temperatury. Spowodowane to było różnicą w objętości rurociągu wewnątrz skraplaczy. Aby zapewnić optymalne napełnienie instalacji czynnikiem chłodniczym, należało po wyłączeniu cyklu sprężania odessać czynnik chłodniczy z załączonego skraplacza, aby w instalacji znajdowała się maksymalna ilość czynnika. Dokonano modyfikacji instalacji poprzez zamontowanie wyłącznika czasowego, który powodował wydłużoną o 10 sekund pracę sprężarki. Równocześnie wykorzystując zawór elektromagnetyczny odcięto dopływ czynnika do skraplacza natomiast odpływ ze skraplacza odcinany był dopiero pod dodatkowych 10 sekundach.



Rys. 4.3 Widok stanowiska podczas badań



Rys. 4.4 Widok skraplacza lamelowego – z przodu



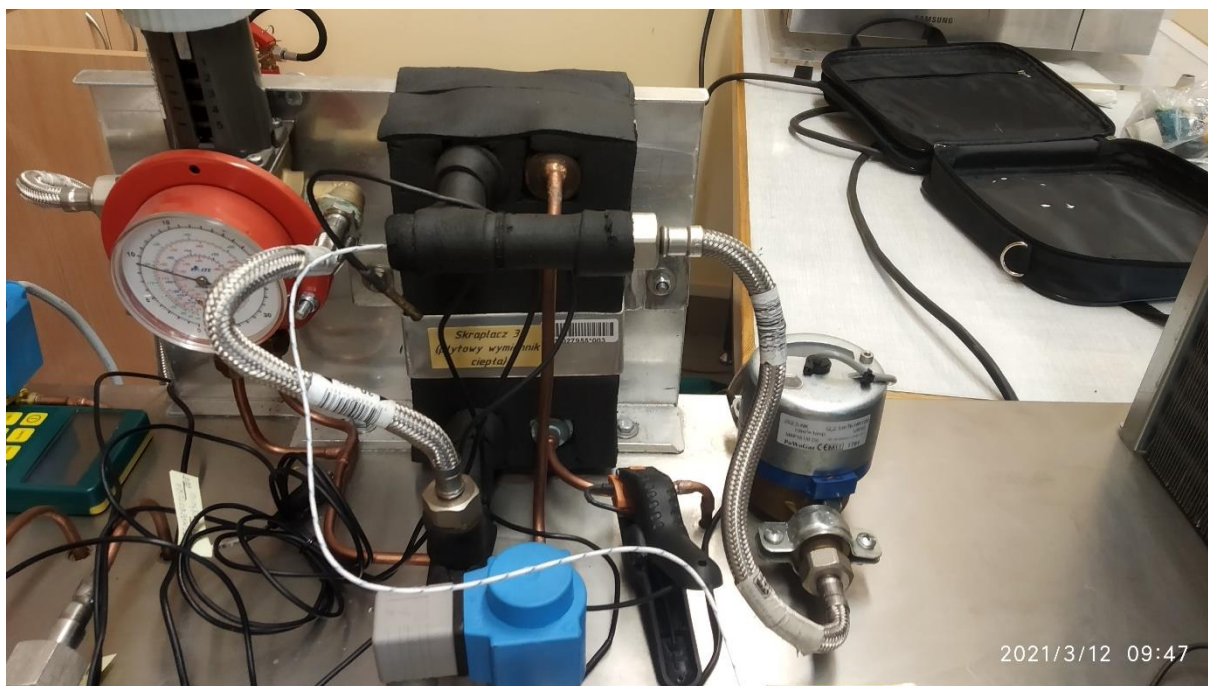
Rys. 4.5 Widok skraplacza lamelowego - z tyłu



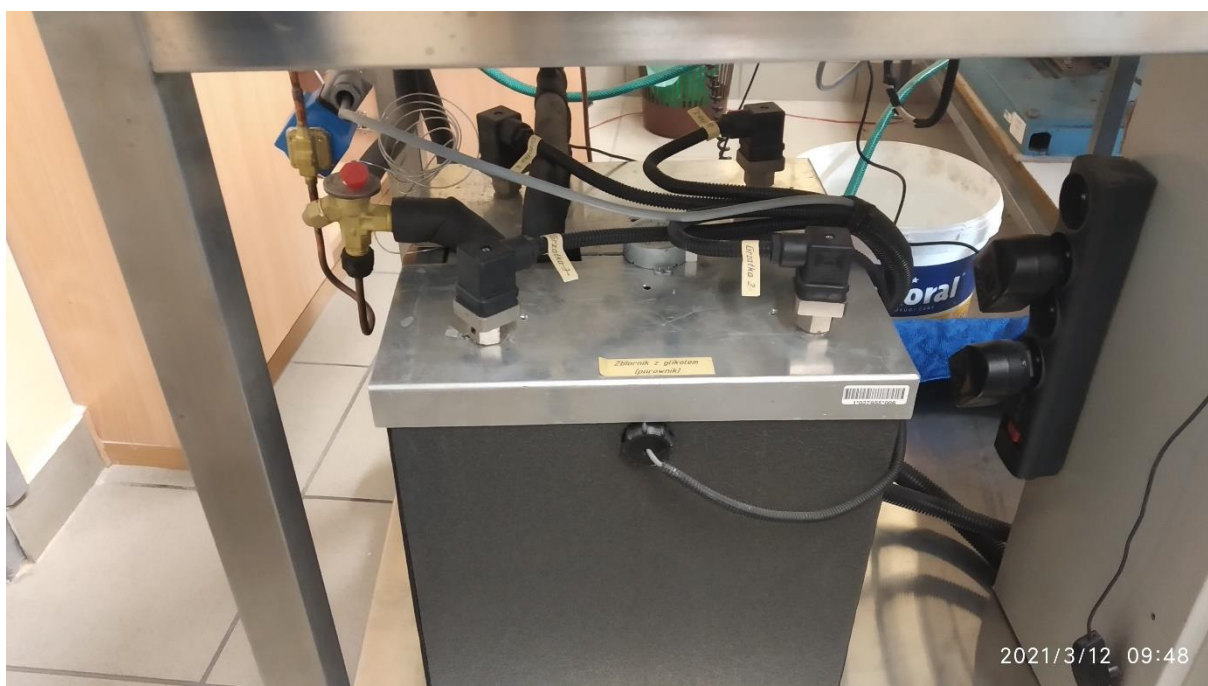
Rys. 4.6 Widok skraplacza bezlamelowego - z przodu



Rys. 4.7 Widok skraplacza bezlamelowego - z tyłu



Rys. 4.8 Widok skraplacza wodnego



Rys. 4.9 Widok zbiornika glikolu z grzałkami symulującego obciążoną cieplnie komorę chłodniczą

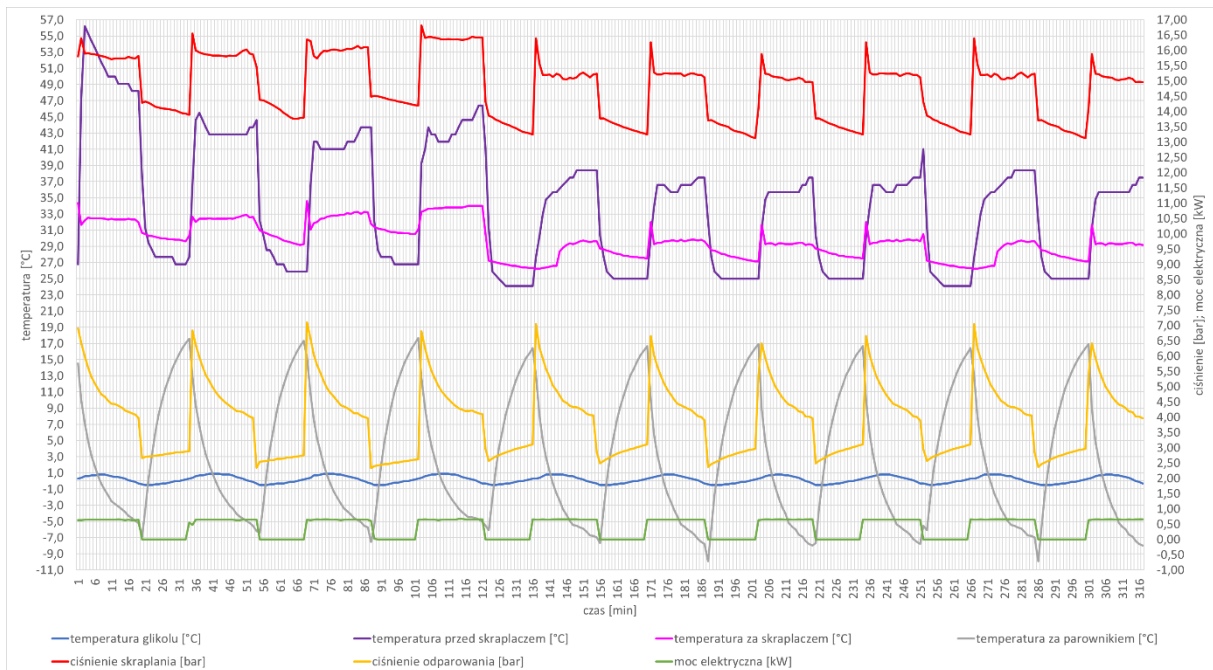
5. Przeprowadzenie badań na autorskim stanowisku badawczym

5.1. Metodyka badań

Na przygotowanym stanowisku badawczym przeprowadzono pomiary temperatur, ciśnień oraz zużycia energii elektrycznej. Stanowisko umożliwia działanie układu chłodniczego z wykorzystaniem różnych typów skraplaczy – lamelowego, bezlamelowego oraz wymiennika ciepła (wodnego), bez konieczności rozmontowywania jakiegokolwiek elementu instalacji. Układ chłodniczy zbadany został podczas pracy z czynnikiem odniesienia **R404a** oraz z alternatywnym czynnikiem chłodniczym **R455a** o napełnieniu **1,2 kg**. Wykorzystane w badaniach czynniki są typu „drop in” i wymagają jedynie zmiany nastawy termostatycznego zaworu rozprężnego zgodnie z instrukcją producenta. Pierwsza część badań dotycząca czynnika R404a została przeprowadzona w celu obserwacji pracy układu chłodniczego z czynnikiem stosowanym przez wiele lat w układach chłodniczych. W drugiej części skupiono się na nowoczesnym czynniku chłodniczym R455a. Następnie dokonano porównania pracy instalacji chłodniczej podczas pracy z dwoma różnymi czynnikami chłodniczymi. Sterowanie temperaturą w zbiorniku glikolu odbywa się poprzez regulator temperatury, który ustawiony został na **0°C** z regulacją załączania sprężarki **±0,3°C**. W parowniku podczas pracy urządzenia załączona była grzałka elektryczna o mocy **170 W**, która miała symulować oddziaływanie cieplne produktów spożywczych umieszczonych w komorze chłodniczej. Ponadto, aby zredukować oddziaływanie grzałki podczas cyklu postoju na czynnik chłodniczy znajdujący się w parowniku, zamykany był zawór przed parownikiem a czynnik był odsysany poprzez 5 sekundowe opóźnienie wyłączenia sprężarki. W badaniach skupiono się na ustalonym cyklu pracy urządzenia, dlatego w wynikach pominięto czas oraz parametry przed stanem ustalonym.

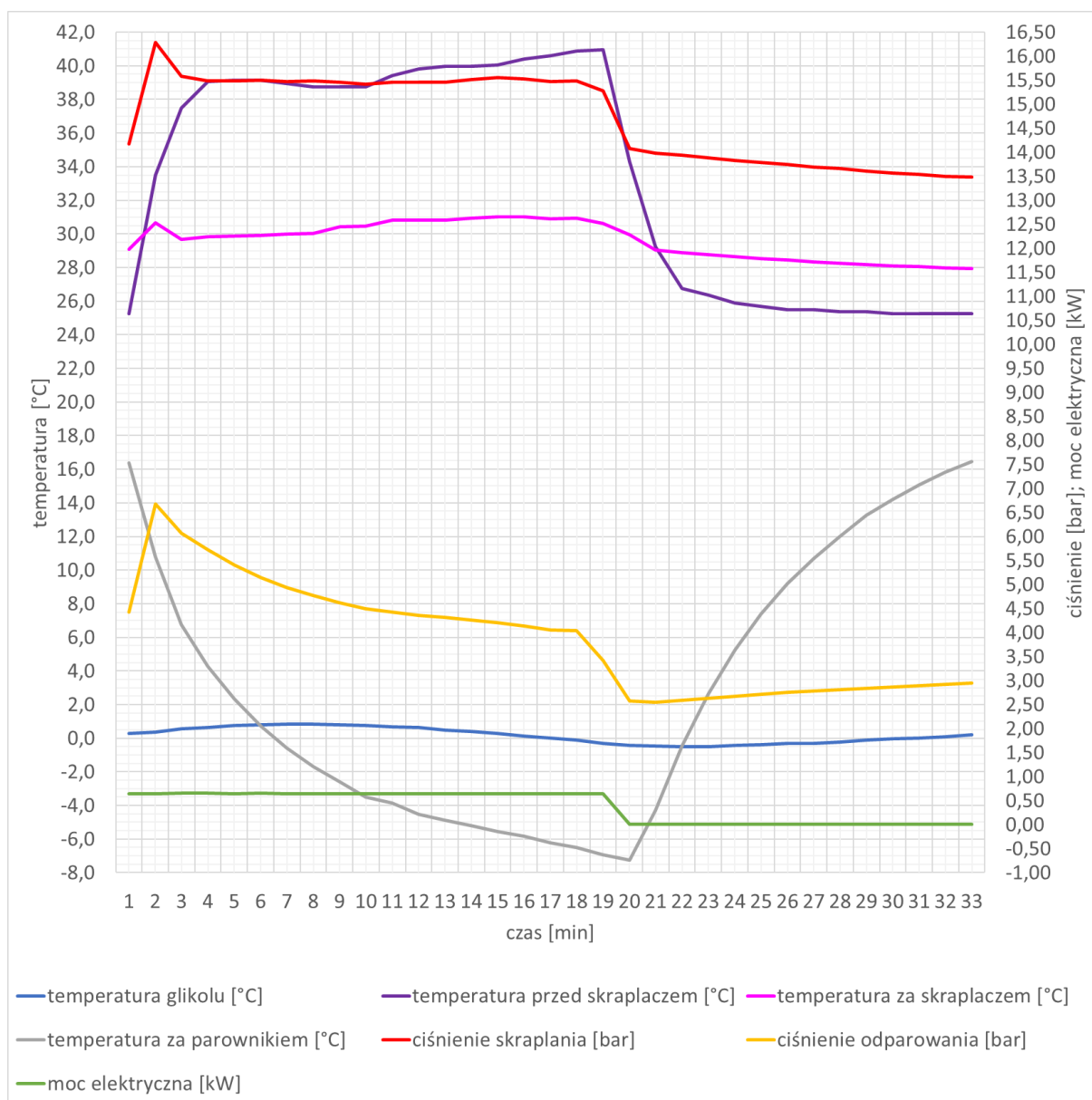
5.2. Badania z wykorzystaniem czynnika chłodniczego odniesienia – R404a

W pierwszym etapie badań określano parametry pracy stanowiska badawczego pracującego z czynnikiem odniesienia (R404a) z wykorzystaniem **skraplacza 1 (lamelowego)**. Badania prowadzono podczas 10 cykli pracy układu chłodniczego tj. od chwili włączenia sprężarki, poprzez okres postoju do chwili przed ponownym włączeniem urządzenia. Wyniki przedstawiono na rys. 5.1. Temperatura otoczenia wynosiła 27,5°C.



Rys. 5.1 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R404a

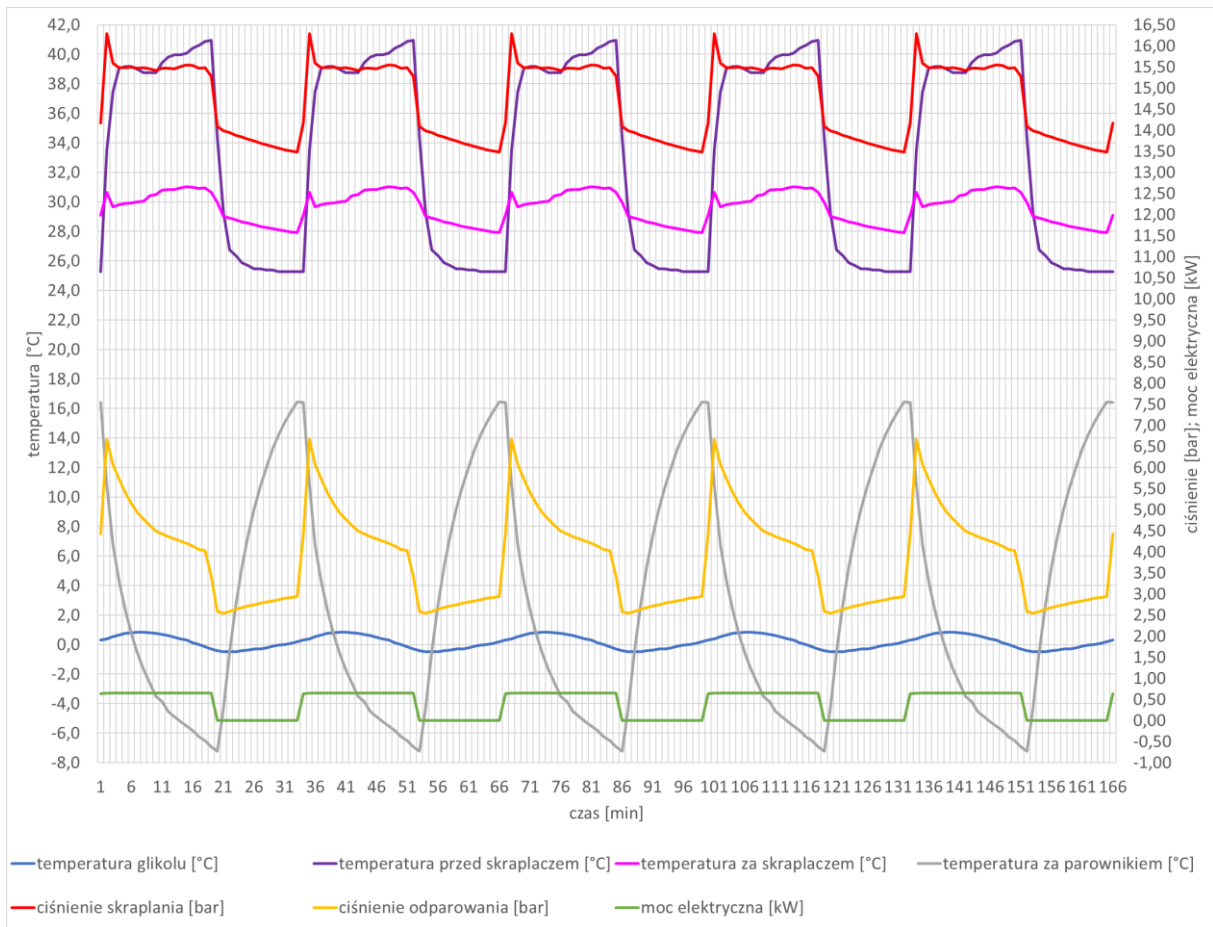
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu, w celu zintensyfikowania charakterystycznych punktów pomiarowych oraz likwidacji przypadkowych punktów pomiarowych, spowodowanych przez zewnętrzne zakłócenia. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów dla skraplacza 1, które przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R404a

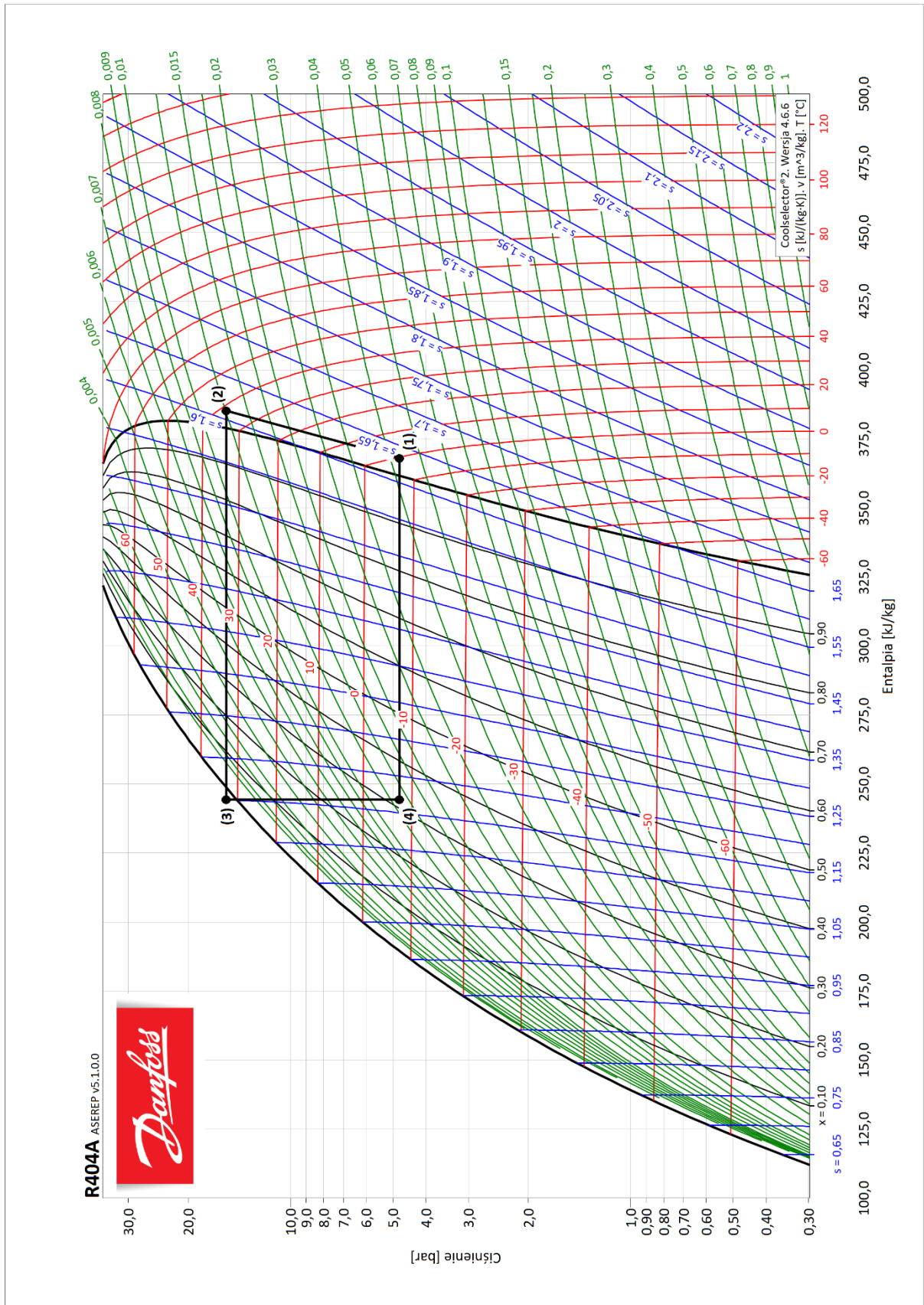
Na wykresie pokazano rozkład parametrów układu chłodniczego w czasie. Po włączeniu sprężarki potrzeba 2 minut, aby układ chłodniczy powrócił do prawidłowego stanu pracy. Tą zależność widać na wykresie na liniach temperatury skraplania i ciśnienia skraplania oraz odparowania. Temperatura glikolu w zbiorniku (komorze – parowniku) i temperatura za skraplaczem oraz ciśnienie skraplania utrzymują się na stałym poziomie. Temperatura przed skraplaczem w niewielkim stopniu zwiększa swoją wartość podczas cyklu pracy sprężarki. Ciśnienie odparowania dąży do osiągnięcia stałej wartości, jednakże okres pracy sprężarki jest zbyt krótki, aby tą wartość osiągnąć. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową zależną od ciśnienia odparowania i dąży do stabilizacji.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cykli pracy układu chłodniczego na rys. 5.3.



Rys. 5.3 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R404a

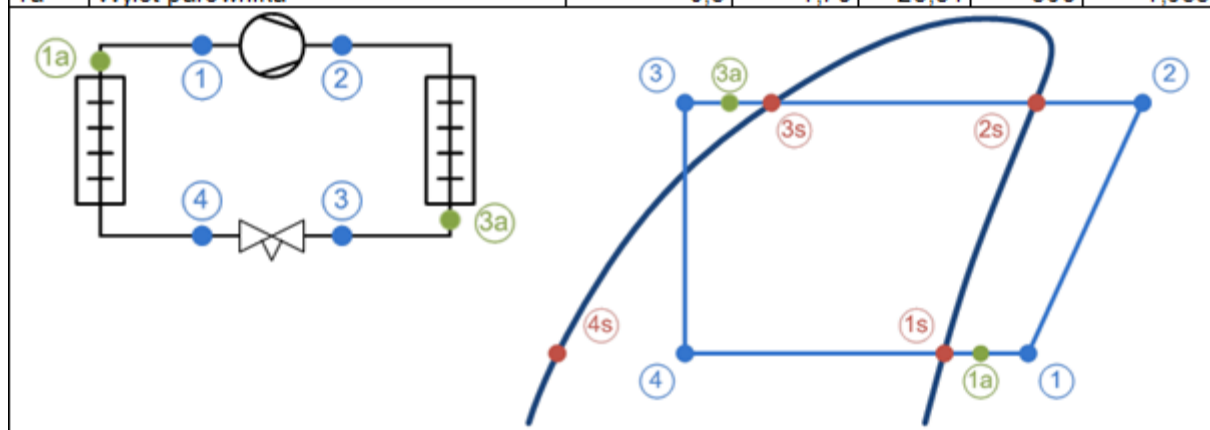
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.4, natomiast w tab. 5.1 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



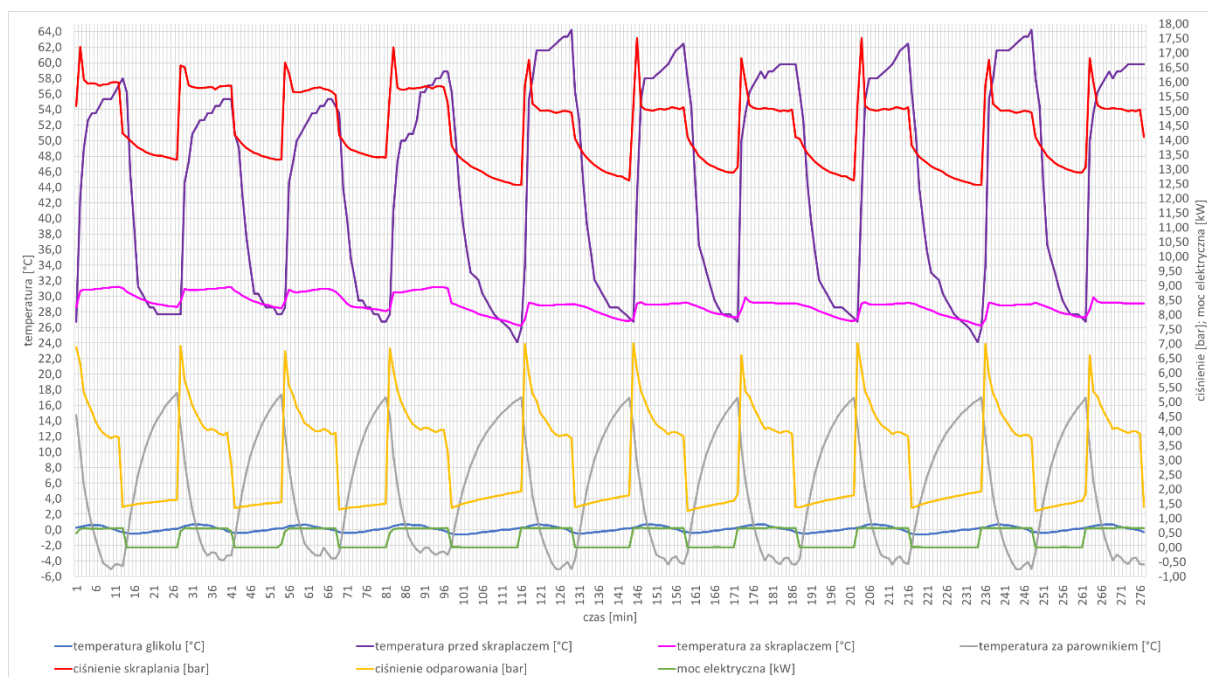
Rys. 5.4 Wykres $\log(p) - h$ układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Tab. 5.1 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	-0,5	4,78	23,31	368	1,633
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	38,3	15,46	79,44	385,3	1,611
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	33,4	15,46	83,37	378,9	1,59
3s	Temperatura wrzenia skraplania	33	15,46	1005	248,7	1,165
3a	Wylot ze skraplacza	30,3	15,46	1019	244,4	1,151
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	30,3	15,46	1019	244,4	1,151
4	Za zaworem rozprężnym	-7,6	4,78	72,68	244,4	1,168
4s	Temperatura wrzenia	-7,8	4,78	1180	189,4	0,9611
1s	Punkt rosy odparowywania	-7,2	4,78	24,24	361,6	1,609
1a	Wylot parownika	-0,5	4,78	23,31	368	1,633

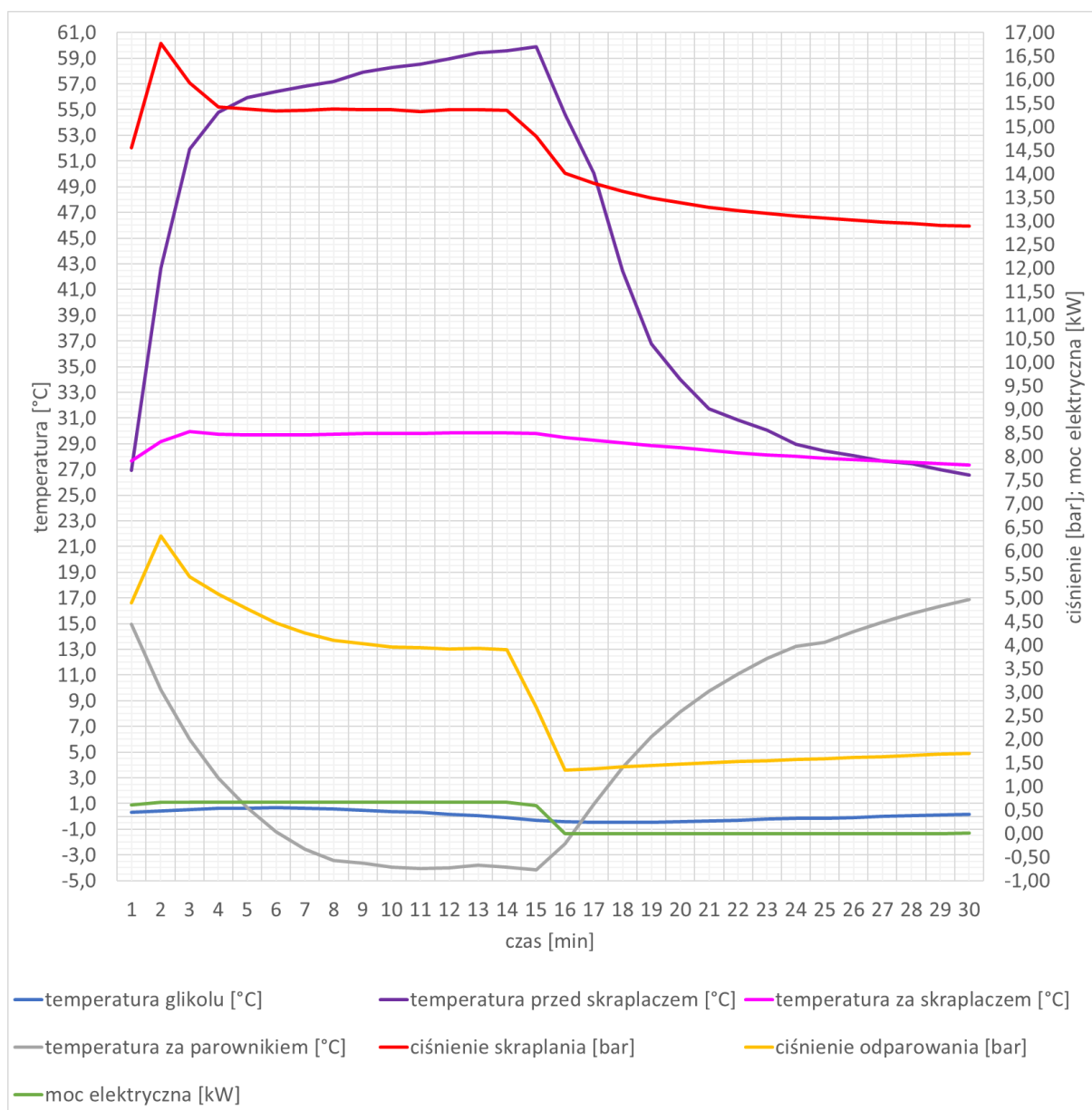


W drugim etapie badań określano parametry pracy stanowiska badawczego pracującego z czynnikiem odniesienia (R404a) z wykorzystaniem **skraplacza 2 (bezlamelowego)**. Tak samo jak w poprzednim przypadku wykonano pomiary parametrów instalacji dla 10 powtórzeń cykli pracy układu chłodniczego. Temperatura otoczenia wynosiła 27°C. Wspomniane cykle przedstawiono na rys. 5.5.



Rys. 5.5 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R404a

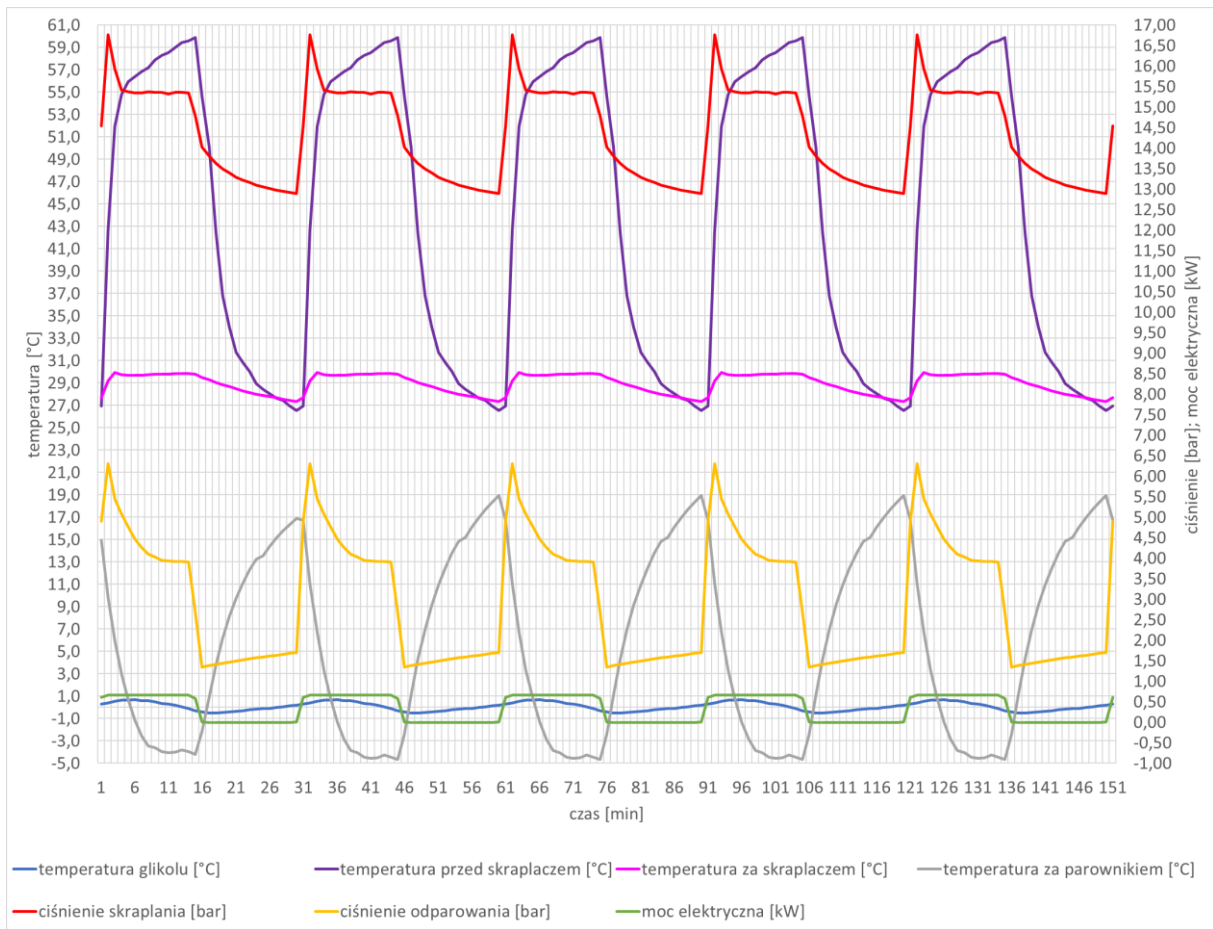
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów dla skraplacza 2, które przedstawiono na rys. 5.6.



Rys. 5.6 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R404a

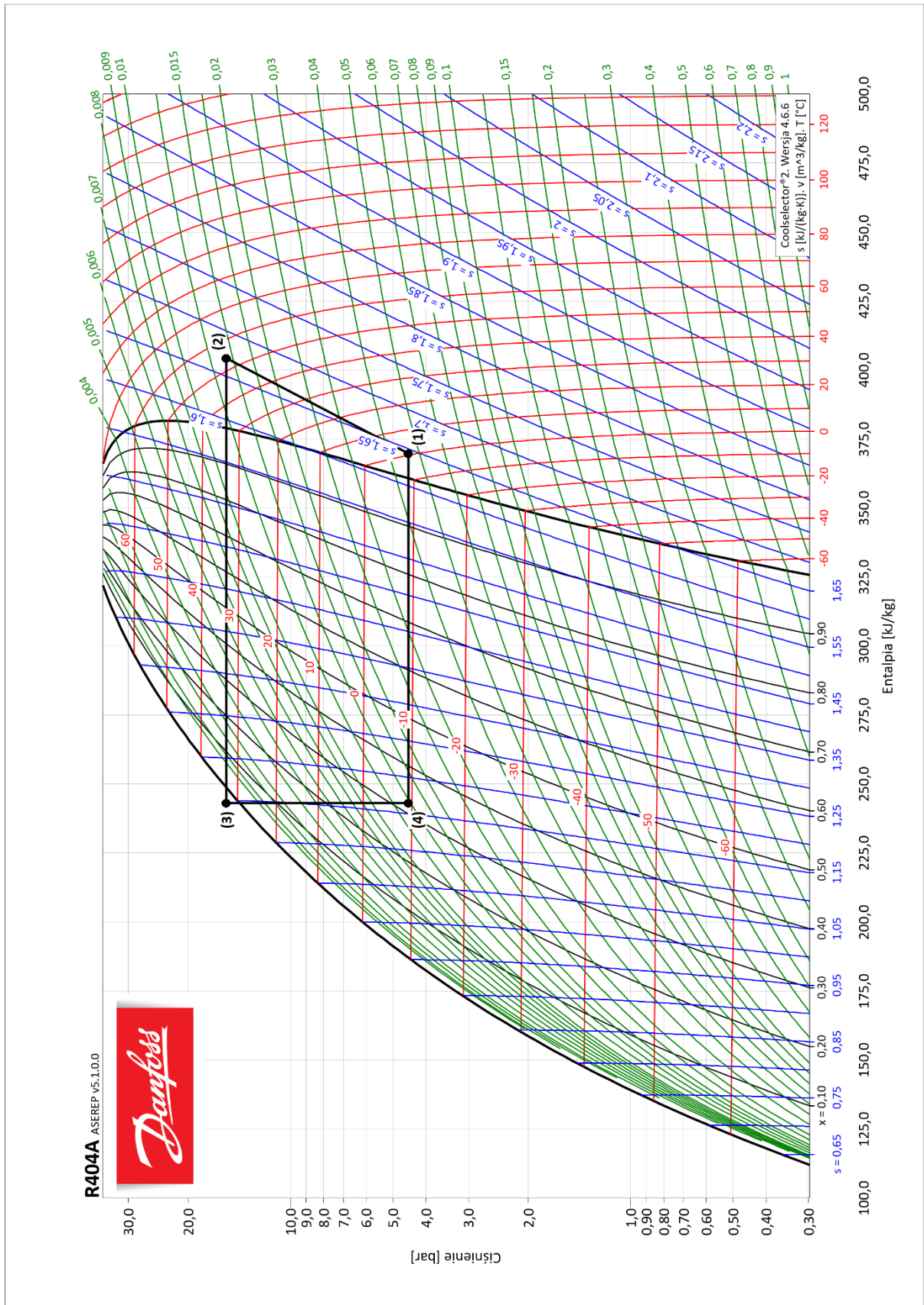
Podobnie jak w przypadku skraplacza lamelowego, potrzeba również 2 minut aby układ ustabilizował się po rozruchu. Obrazują to piki widoczne na liniach ciśnienia skraplania i odparowania a także występuje niewielki skok widoczny na linii temperatury skraplania. Glikol zachowuje nastawioną temperaturę przez cały cykl pracy. Temperatura początku skraplania ma tendencję rosnącą podczas cyklu pracy sprężarki. Ciśnienie skraplania ulega stabilizacji po 4 minutach. Ciśnienie odparowania stabilizuje się pod koniec cyklu pracy sprężarki. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową zależną od ciśnienia odparowania i stabilizuje się pod koniec cyklu pracy sprężarki.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cykli pracy układu chłodniczego na rys. 5.7.



Rys. 5.7 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R404a

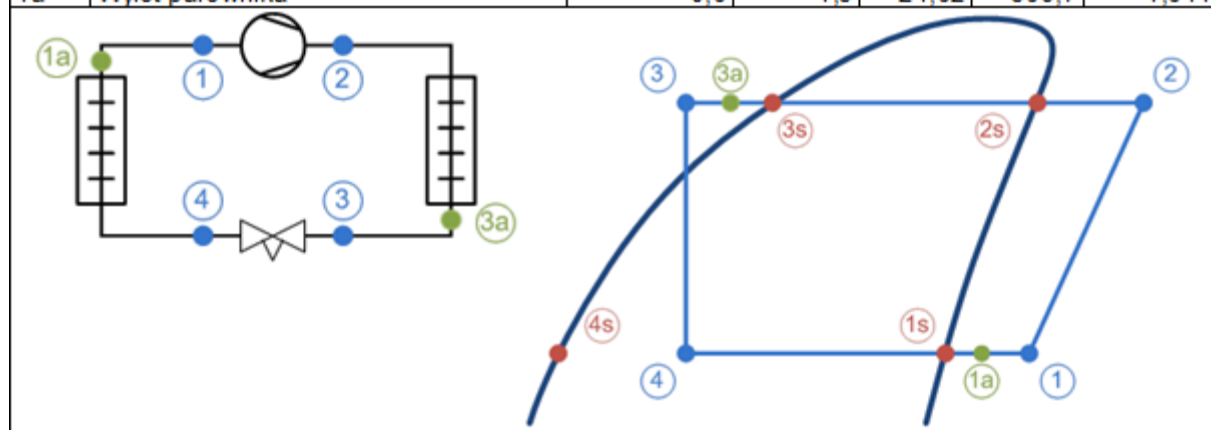
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.8, natomiast w tab. 5.2 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



Rys. 5.8 Wykres $\log(p) - h$ układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

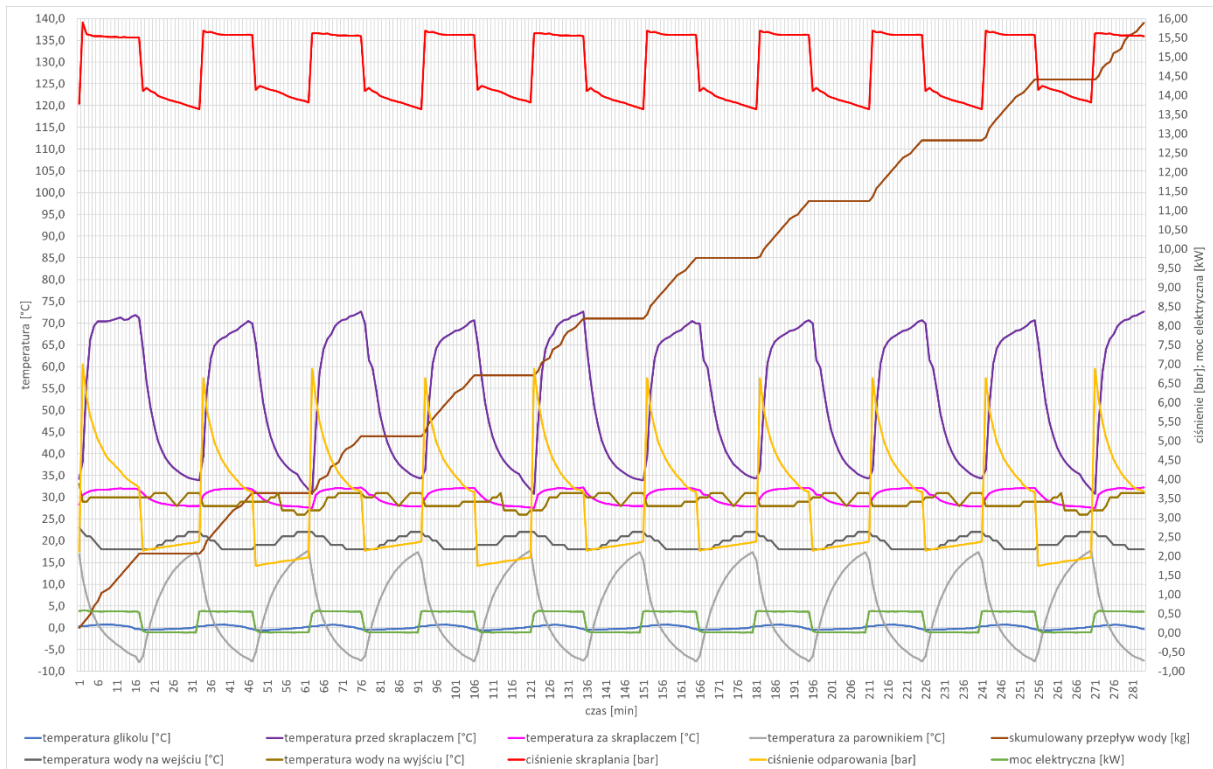
Tab. 5.2 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	0,6	4,5	21,62	369,7	1,644
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	54	15,44	70,11	404,3	1,67
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	33,4	15,44	83,25	378,9	1,59
3s	Temperatura wrzenia skraplania	33	15,44	1005	248,6	1,165
3a	Wylot ze skraplacza	29,5	15,44	1023	243,1	1,147
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	29,5	15,44	1023	243,1	1,147
4	Za zaworem rozprężnym	-9,4	4,5	67,96	243,1	1,165
4s	Temperatura wrzenia	-9,5	4,5	1186	187	0,9521
1s	Punkt rosy odparowywania	-9	4,5	22,84	360,7	1,61
1a	Wylot parownika	0,6	4,5	21,62	369,7	1,644



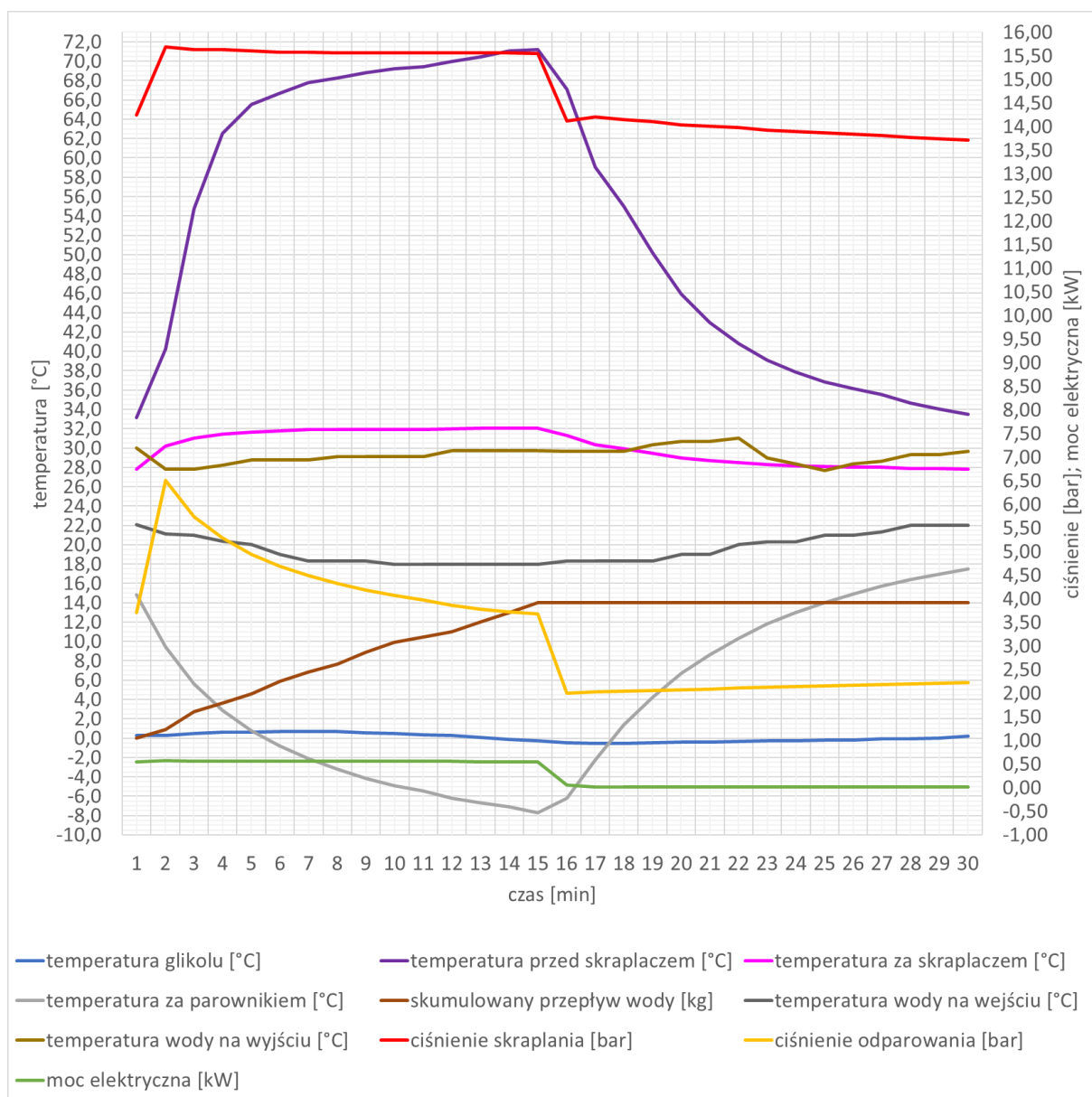
Kolejny obiekt poddany badaniom to **skraplacz 3.1 (wymiennik ciepła – skraplacz wodny)**. Tak samo jak w poprzednich przypadkach wykonano pomiary parametrów instalacji dla 10 powtórzeń cykli pracy układu chłodniczego. Każde 10 cykli pracy wykonano z uwzględnieniem różnej temperatury wody użytkowej na wyjściu ze skraplacza.

Pierwsza próba wykonana została dla temperatury wody wyjściowej **28,6°C**, przy temperaturze zewnętrznej 27°C. Rzeczywiste cykle pracy dla tej temperatury przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.9 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z założonym skraplaczem 3.1 z czynnikiem chłodniczym R404a

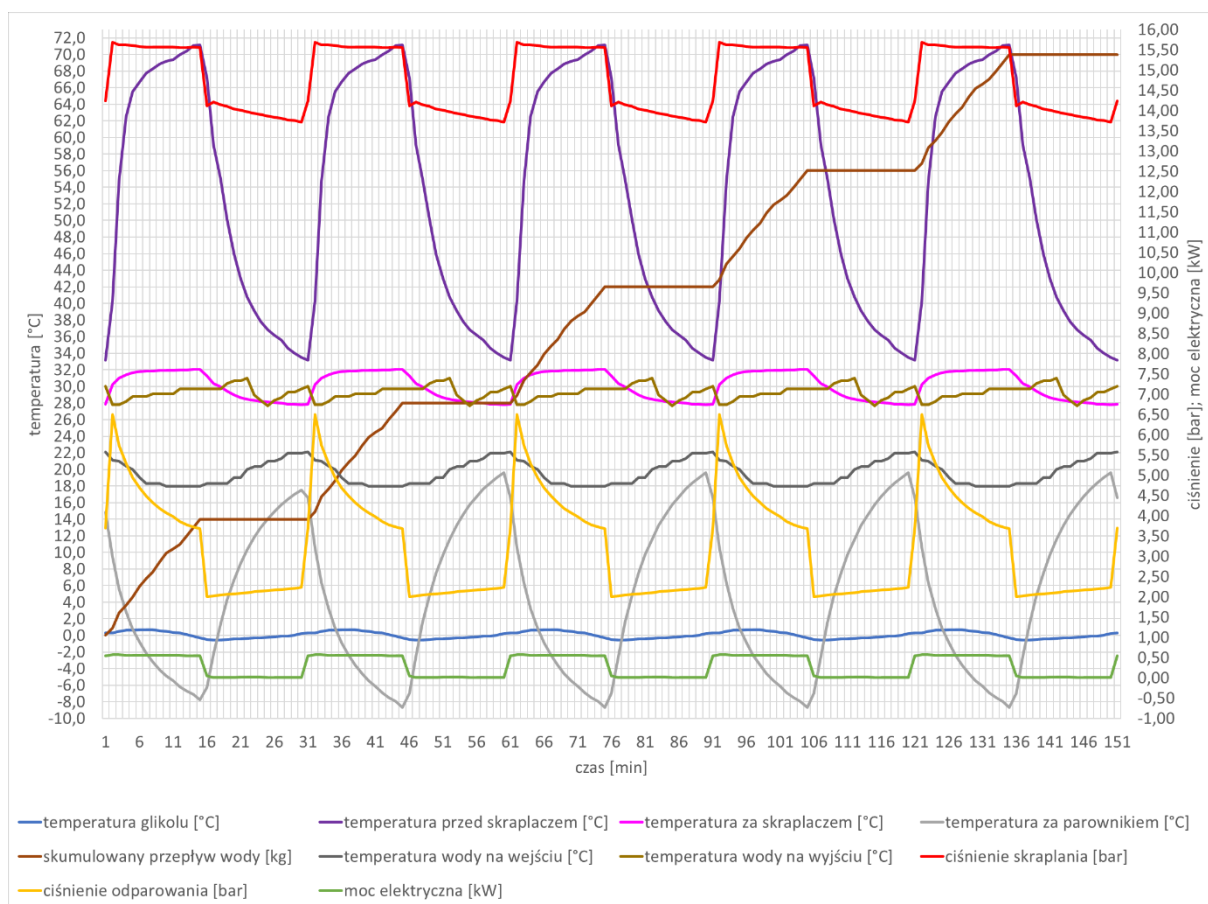
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów, które przedstawiono na rys. 5.10.



Rys. 5.10 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.1 z czynnikiem chłodniczym R404a

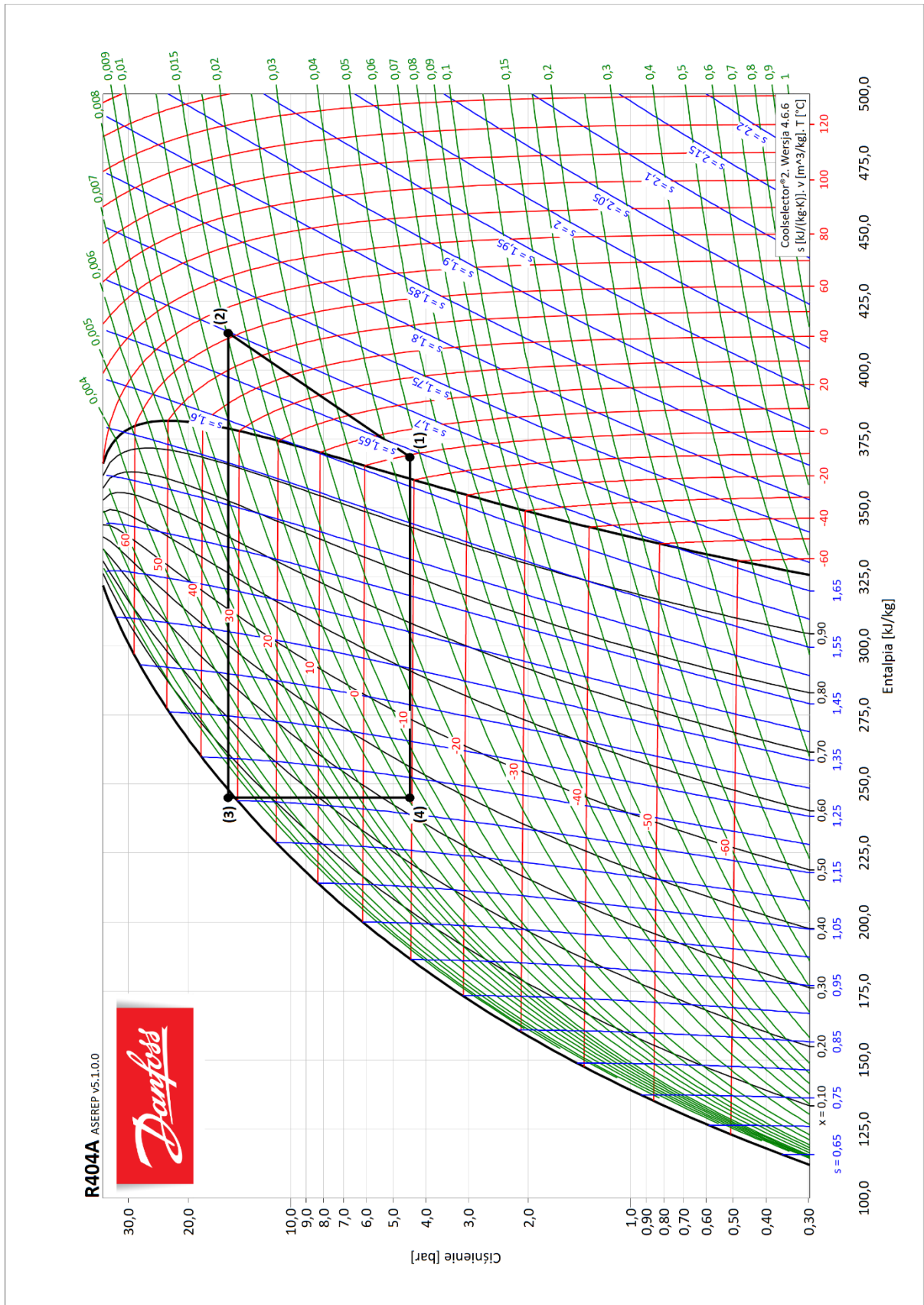
Układ stabilizuje się także po upływie 2 minut, co widać po pikach na liniach ciśnień. Dla skraplacza chłodzonego wodą, skok ciśnienia skraplania jest wyraźnie mniejszy niż dla skraplaczy chłodzonych powietrzem. Ciśnienie to w całym cyklu pracy sprężarki jest prawie na jednakowym poziomie. Ciśnienie odparowania dąży do stabilizacji. Temperatura glikolu jest prawidłowa i stała w całym cyklu. Temperatura skraplania, wody na wejściu i wody na wyjściu jest na stałym poziomie w ciągu cyklu pracy sprężarki. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową zależną od ciśnienia odparowania i dąży do stabilizacji.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cyklach pracy układu chłodniczego na rys. 5.11.



Rys. 5.11 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.1 z czynnikiem chłodniczym R404a

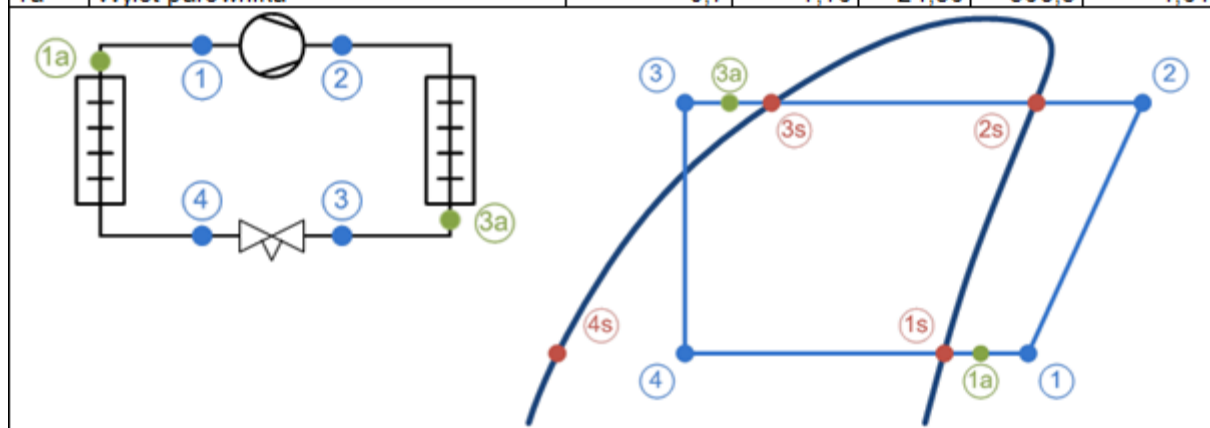
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.12, natomiast w tab. 5.3 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



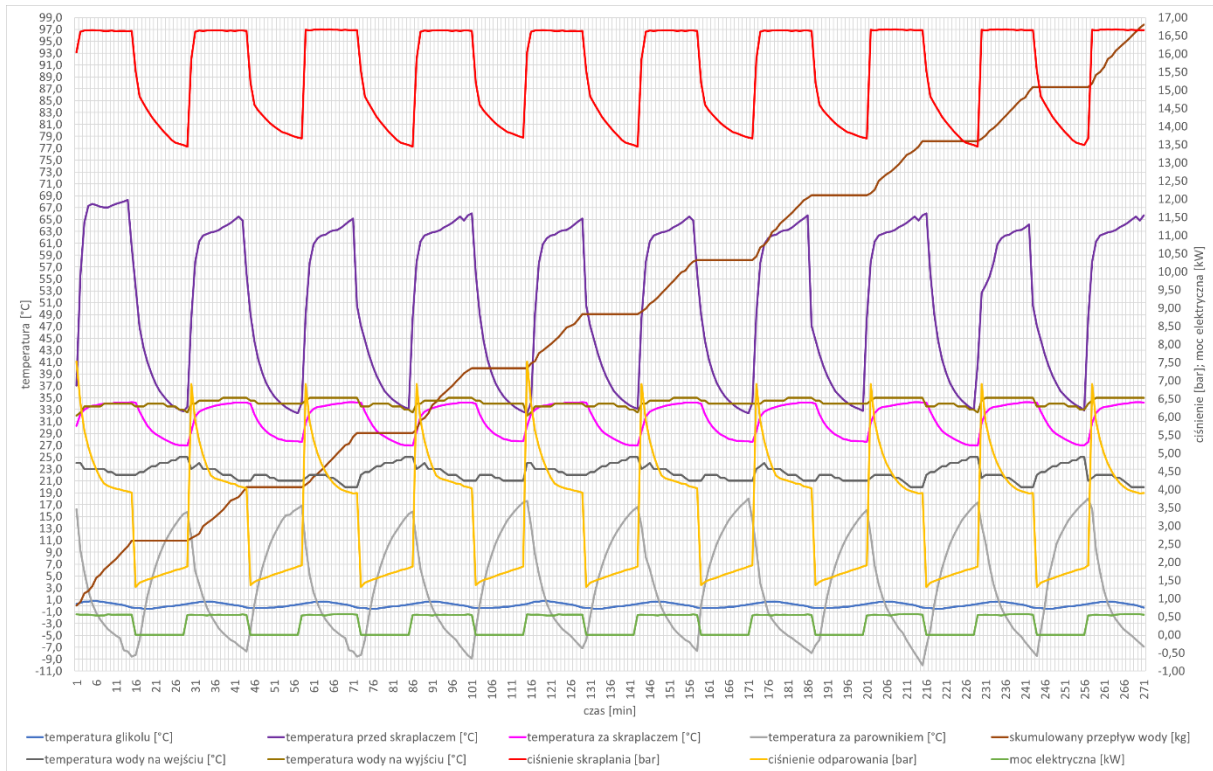
Rys. 5.12 Wykres log (p) - h układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.1 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Tab. 5.3 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.1 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	-0,7	4,46	21,56	368,5	1,64
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	61,8	15,27	65,79	413,5	1,699
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	32,9	15,27	82,18	378,8	1,59
3s	Temperatura wrzenia skraplania	32,5	15,27	1007	247,9	1,163
3a	Wylot ze skraplacza	30,7	15,27	1017	245,1	1,153
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	30,7	15,27	1017	245,1	1,153
4	Za zaworem rozprężnym	-9,6	4,46	64,94	245,1	1,172
4s	Temperatura wrzenia	-9,8	4,46	1187	186,6	0,9508
1s	Punkt rosy odparowywania	-9,2	4,46	22,64	360,6	1,611
1a	Wylot parownika	-0,7	4,46	21,56	368,5	1,64

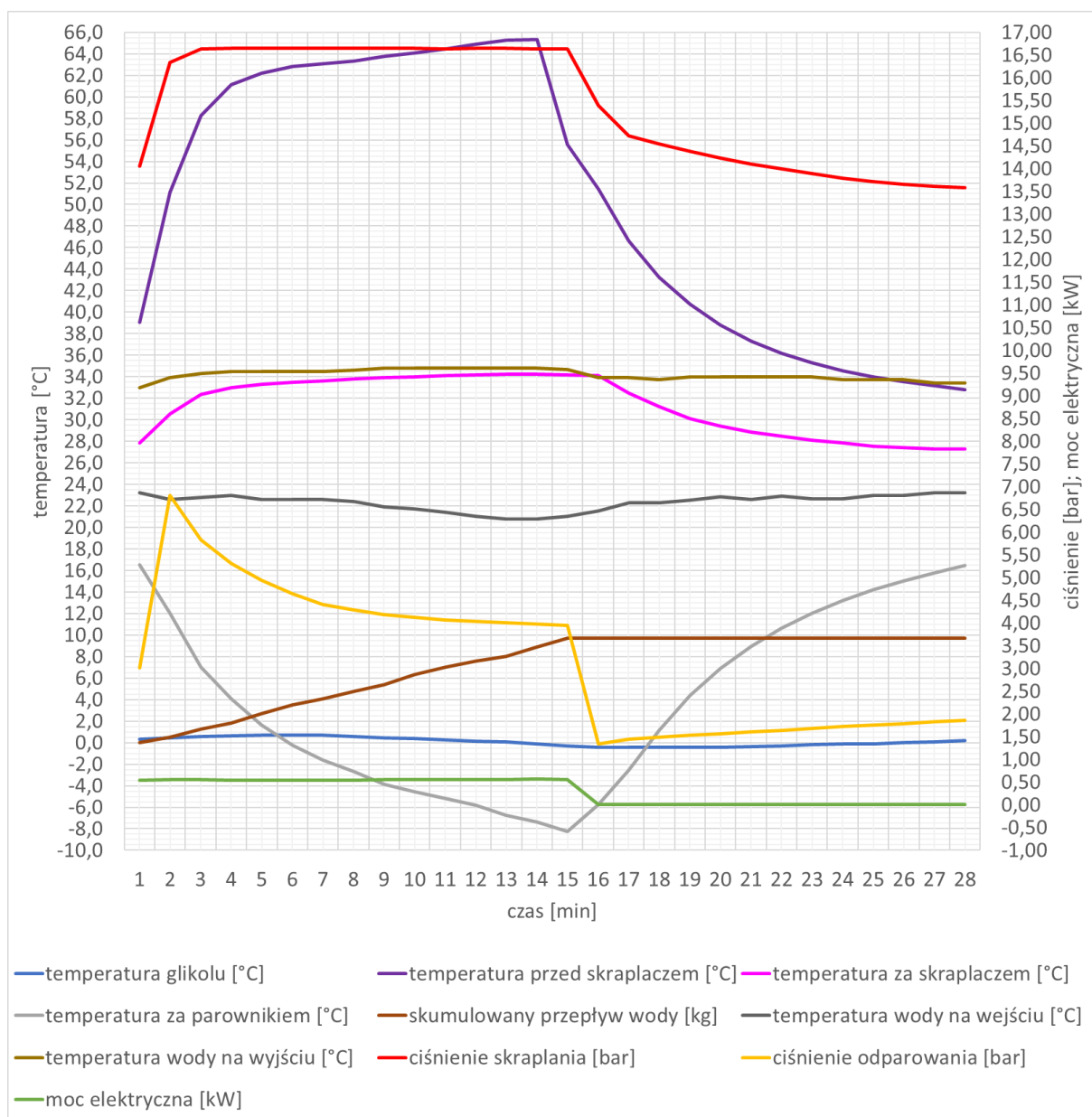


Dруга próba wykonana została dla temperatury wody wyjściowej **34,5°C**, przy temperaturze zewnętrznej 26°C, oznaczona jako próba ze **skraplaczem 3.2**. Rzeczywiste cykle pracy dla tej temperatury przedstawiono na rys. 5.13.



Rys. 5.13 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.2 z czynnikiem chłodniczym R404a

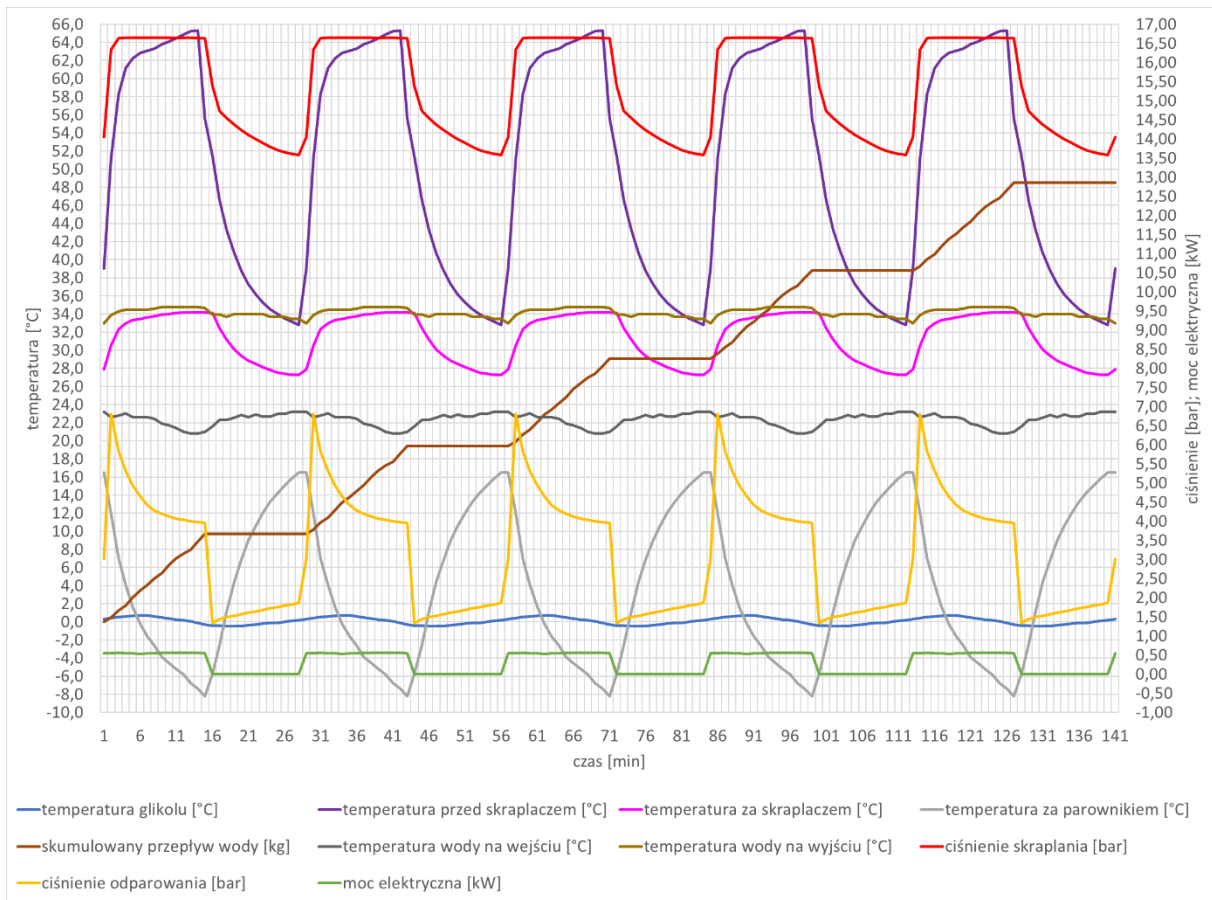
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów, które przedstawiono na rys. 5.14.



Rys. 5.14 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.2 z czynnikiem chłodniczym R404a

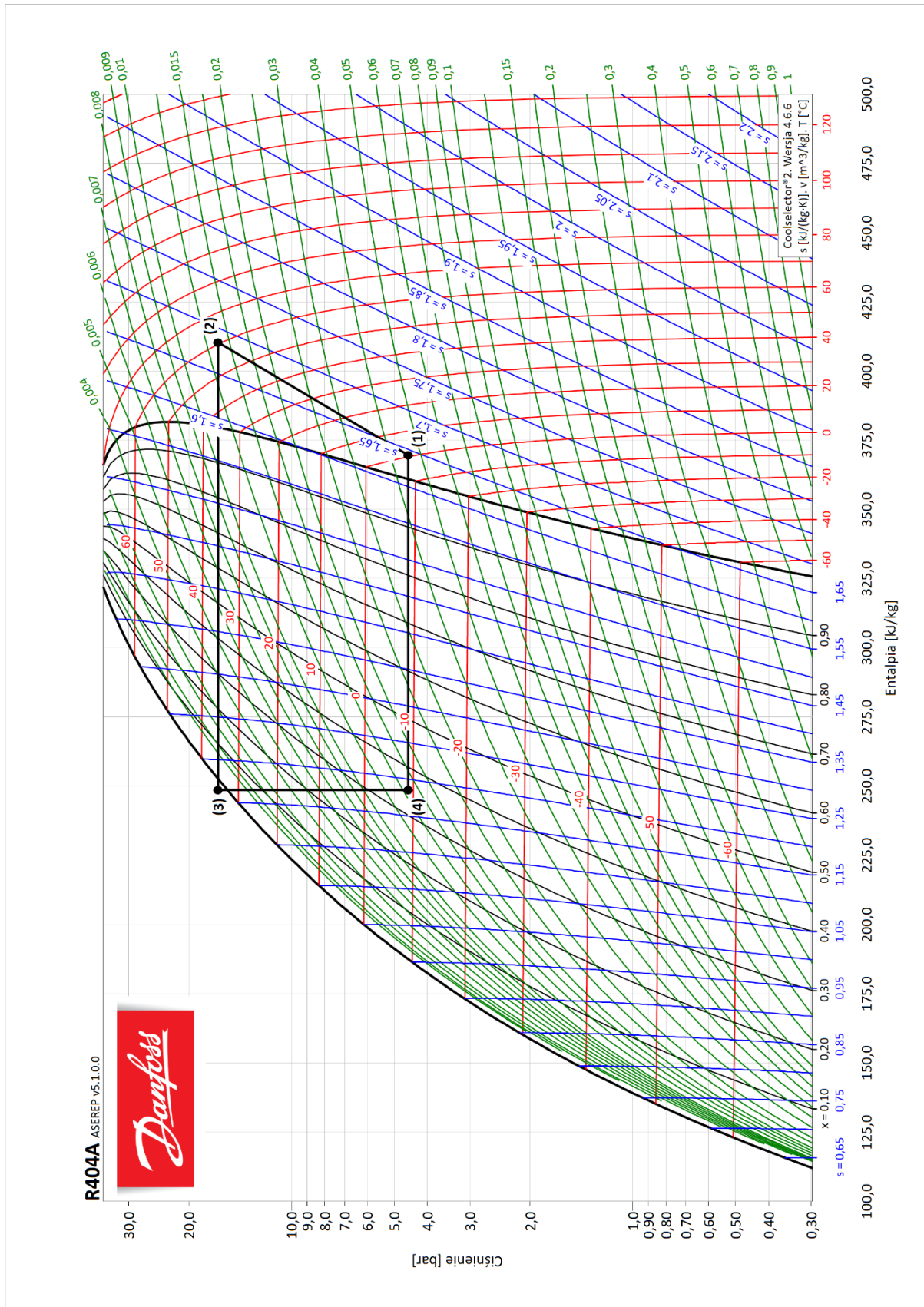
Układ stabilizuje się po upływie 2 minut, co widać po pikie na linii ciśnienia odparowania. W tym przypadku, ciśnienie skraplania łagodnie osiąga stałą wartość roboczą i jest stałe w całym okresie pracy sprężarki. Ciśnienie odparowania spada, a pod koniec cyklu pracy sprężarki stabilizuje się. Temperatura glikolu jest prawidłowa i stała w całym cyklu. Temperatura skraplania, wody na wejściu i wody na wyjściu jest na stałym poziomie w ciągu cyklu pracy sprężarki, z niewielkim spadkiem temperatury wody wpływającej do skraplacza. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową zależną od ciśnienia odparowania i dąży do stabilizacji.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cykli pracy układu chłodniczego na rys. 5.15.



Rys. 5.15 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.2 z czynnikiem chłodniczym R404a

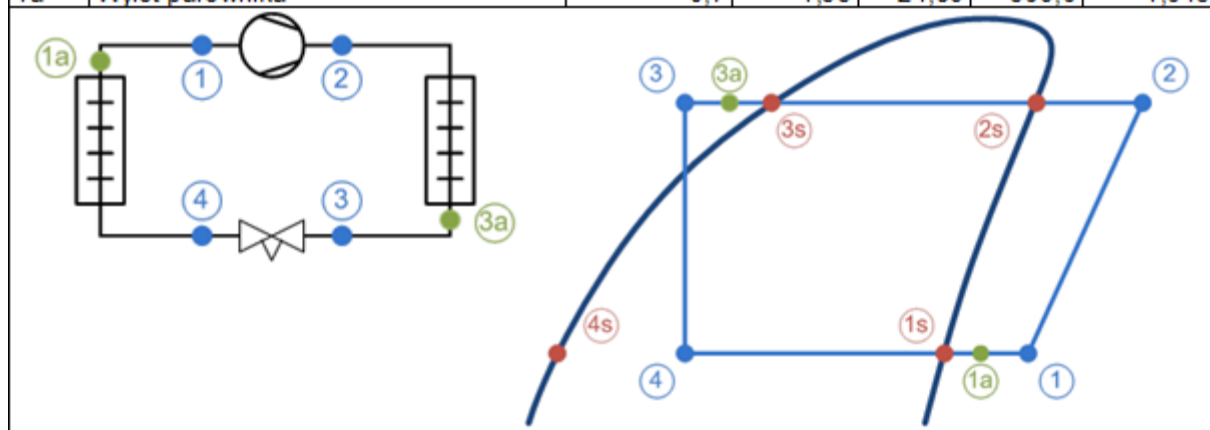
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.16, natomiast w tab. 5.4 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



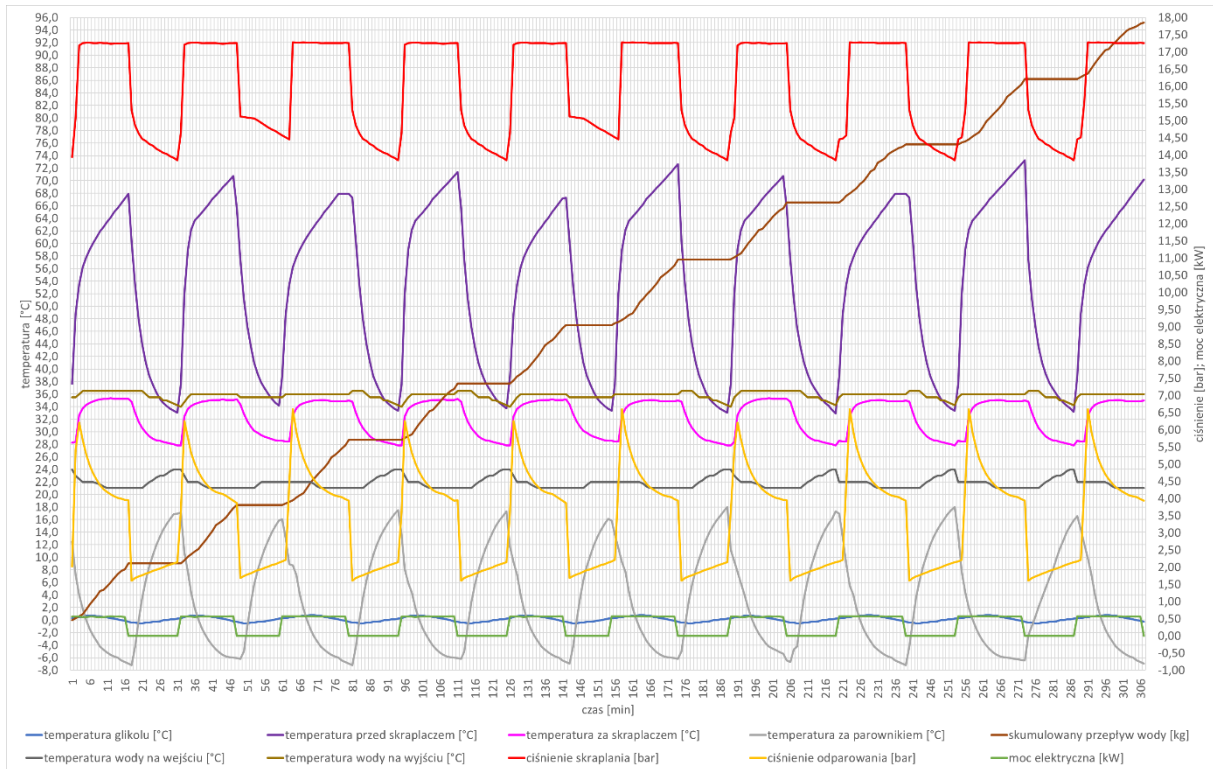
Rys. 5.16 Wykres log (p) - h układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.2 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Tab. 5.4 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.2 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	0,7	4,55	21,89	369,6	1,643
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	60,6	16,44	72,91	410,3	1,684
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	35,9	16,44	89,61	379,6	1,589
3s	Temperatura wrzenia skraplania	35,5	16,44	991,5	252,7	1,178
3a	Wylot ze skraplacza	33	16,44	1005	248,7	1,165
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	33	16,44	1005	248,7	1,165
4	Za zaworem rozprężnym	-9	4,55	63,14	248,7	1,186
4s	Temperatura wrzenia	-9,2	4,55	1185	187,4	0,9538
1s	Punkt rosy odparowywania	-8,6	4,55	23,09	360,9	1,61
1a	Wylot parownika	0,7	4,55	21,89	369,6	1,643

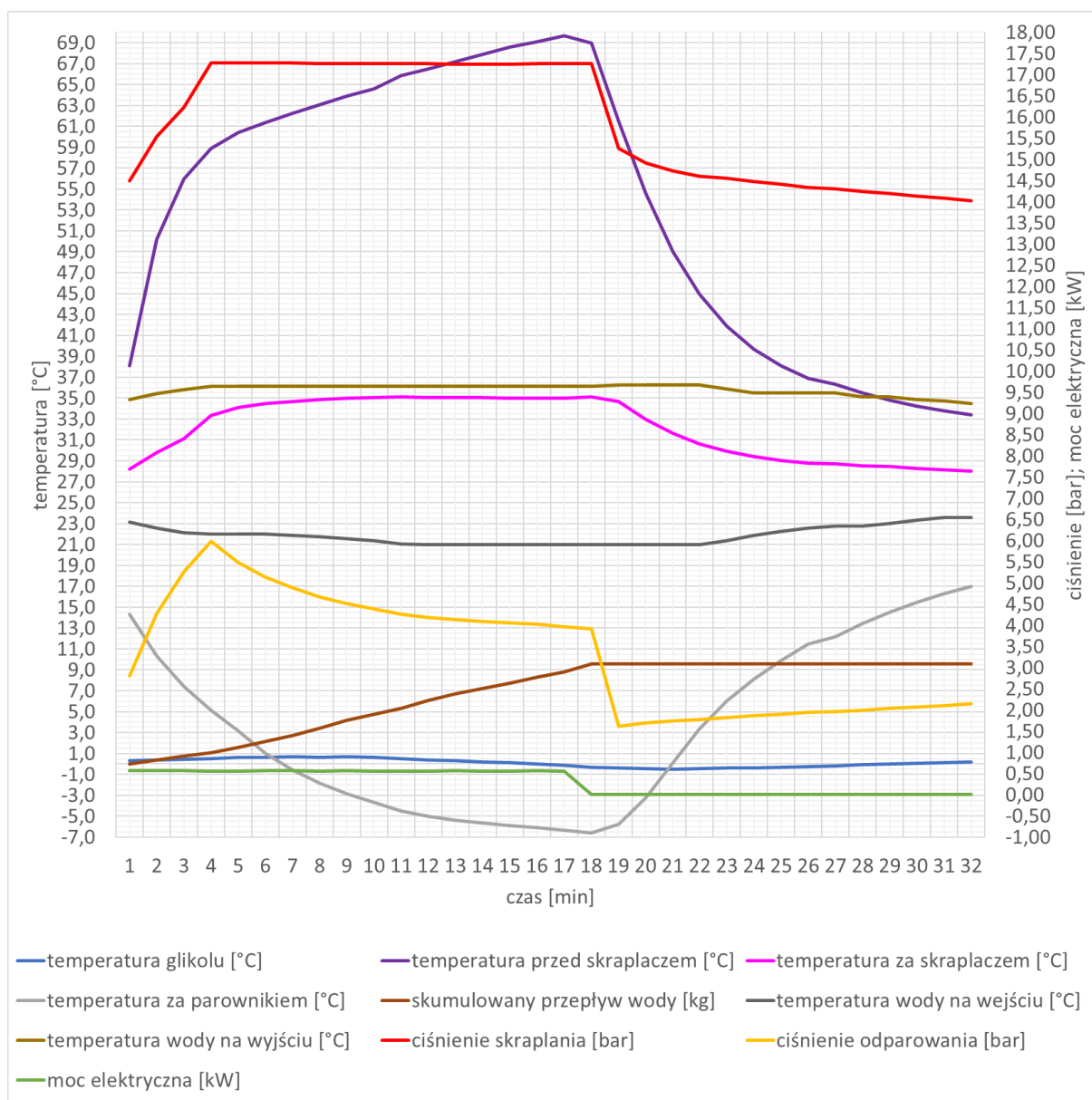


Trzecia próba wykonana została dla temperatury wody wyjściowej 36°C , przy temperaturze zewnętrznej 26°C , oznaczona jako próba ze skraplaczem 3.3. Rzeczywiste cykle pracy dla tej temperatury przedstawiono na rys. 5.17.



Rys. 5.17 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.3 z czynnikiem chłodniczym R404a

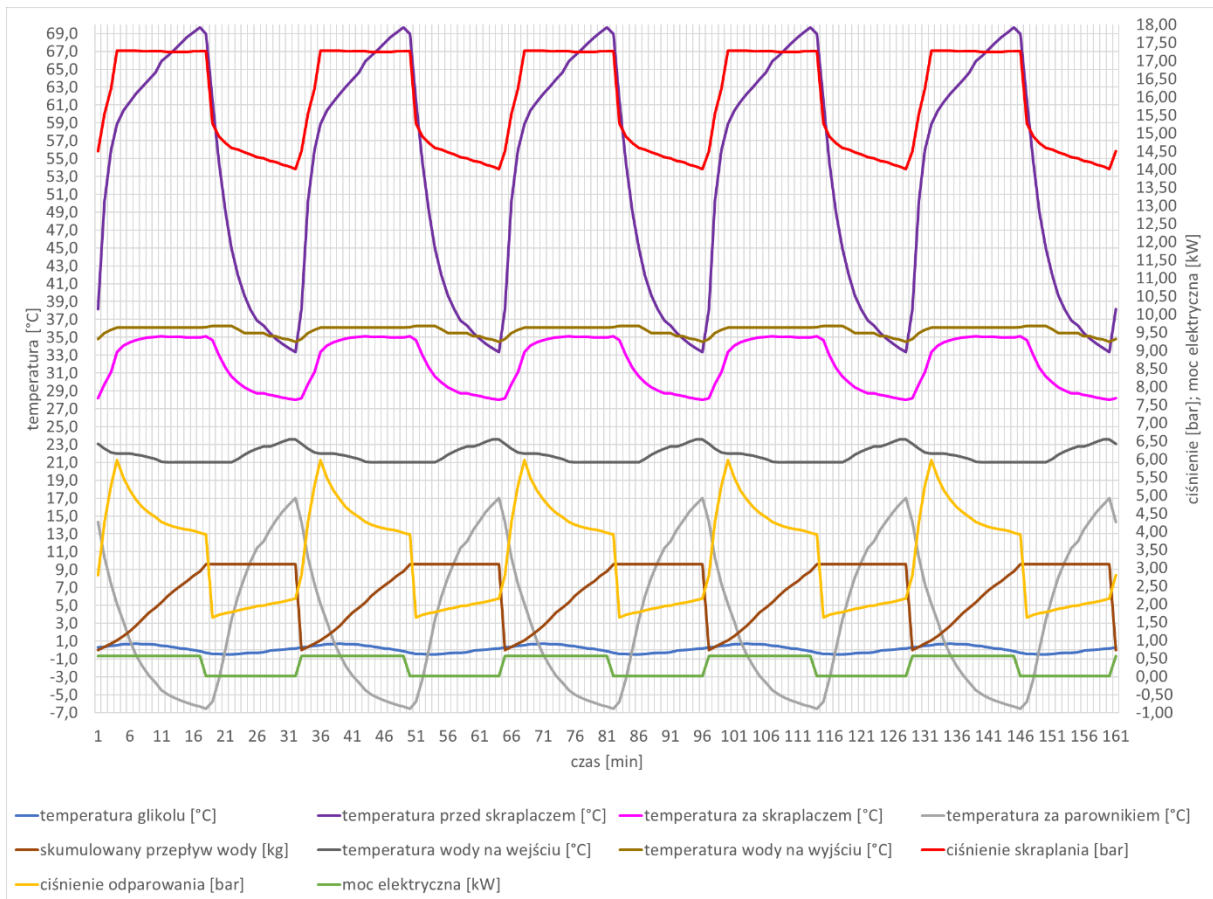
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów, które przedstawiono na rys. 5.18.



Rys. 5.18 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.3 z czynnikiem chłodniczym R404a

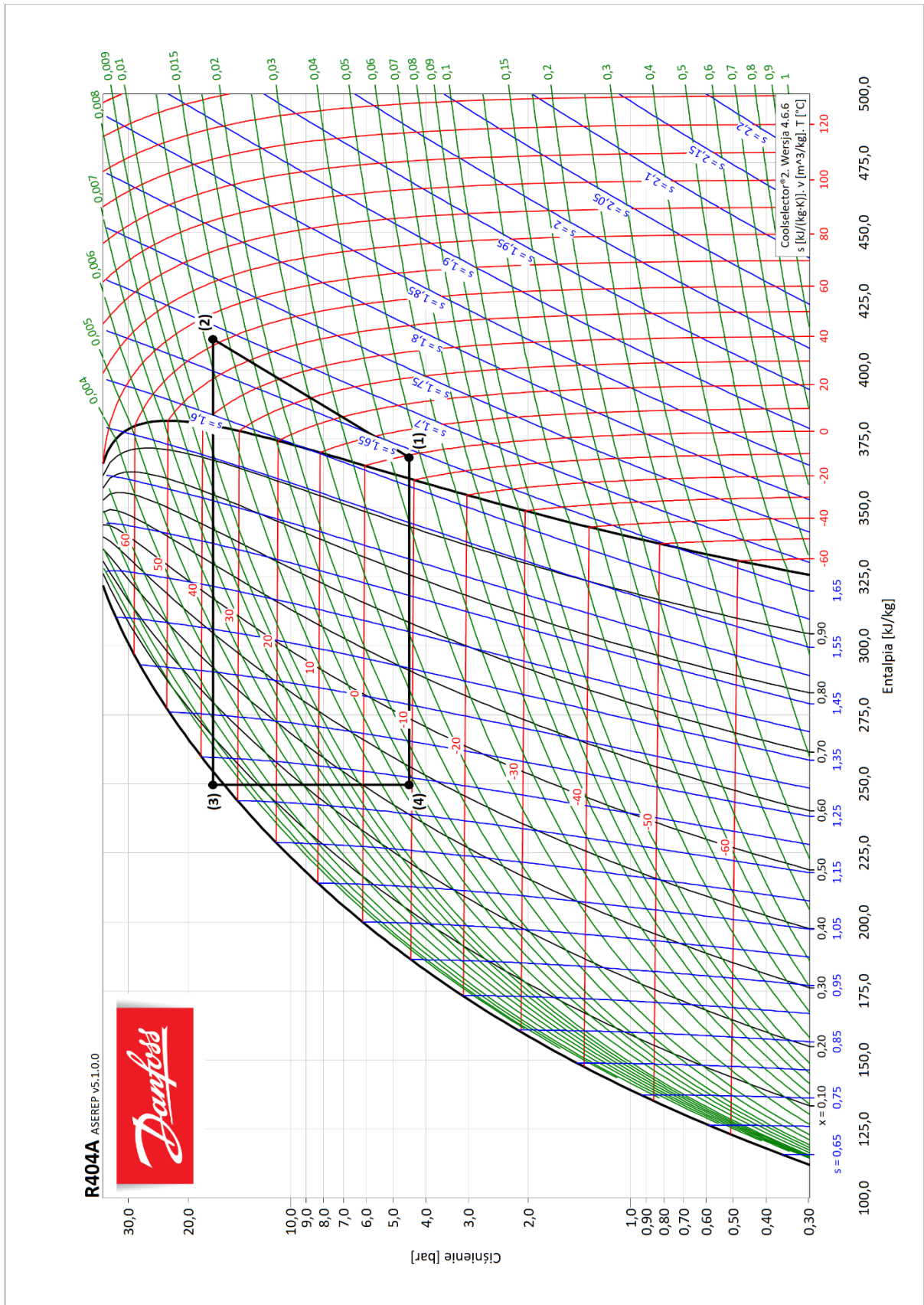
Układ stabilizuje się po upływie 4 minut, co widać po pikie na linii ciśnienia odparowania. Ciśnienie skraplania łagodnie osiąga wartość roboczą i jest stałe w całym okresie pracy sprężarki. Ciśnienie odparowania spada, a pod koniec cyklu pracy sprężarki stabilizuje się. Temperatura glikolu jest prawidłowa i stała w całym cyklu. Temperatura skraplania, wody na wejściu i wody na wyjściu jest na stałym poziomie w ciągu cyklu pracy sprężarki, z niewielkim spadkiem temperatury wody wpływającej do skraplacza. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową zależną od ciśnienia odparowania i dąży do stabilizacji.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cykli pracy układu chłodniczego na rys. 5.19.



Rys. 5.19 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.3 z czynnikiem chłodniczym R404a

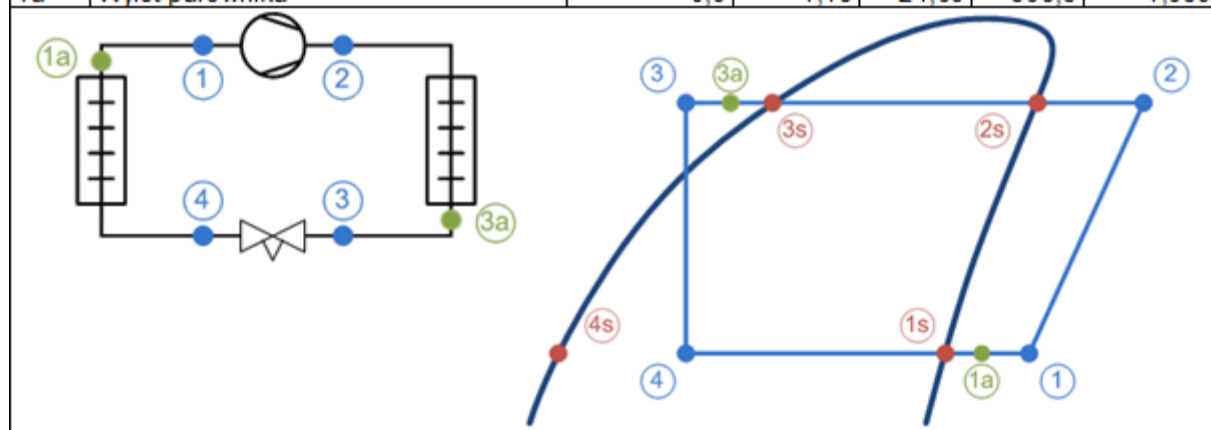
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.20, natomiast w tab. 5.5 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



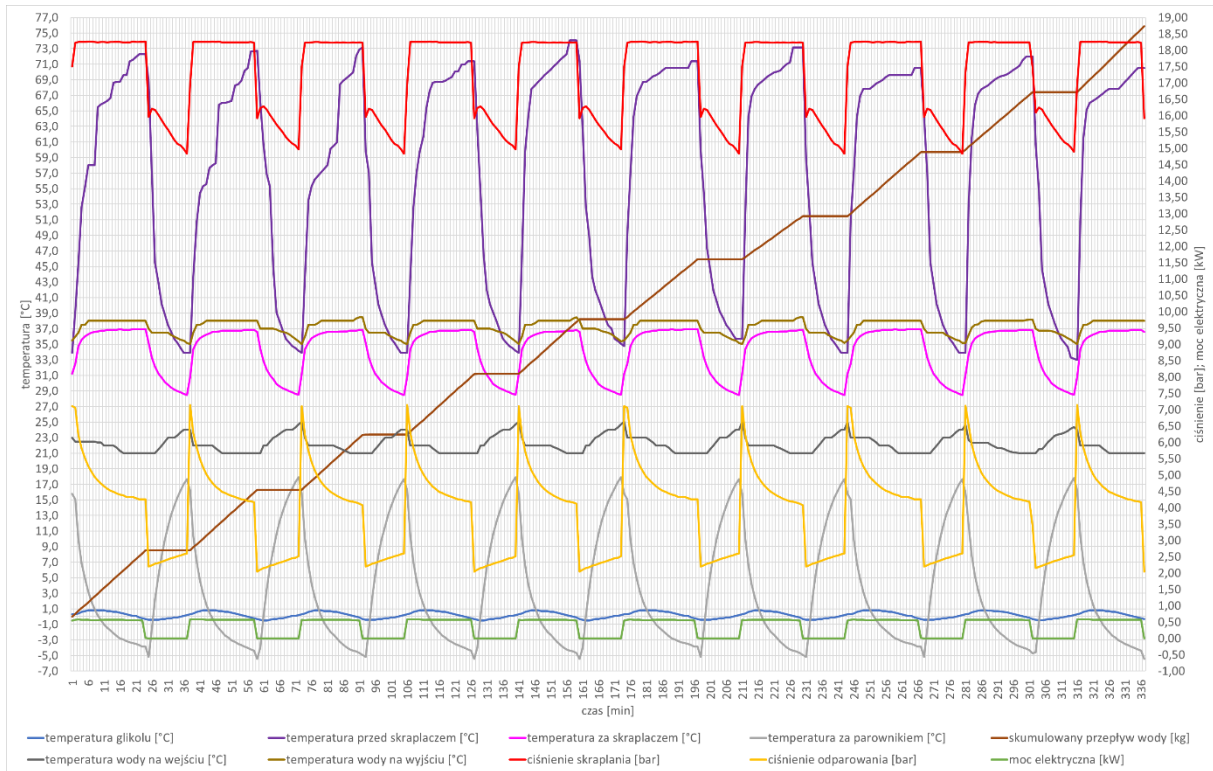
Rys. 5.20 Wykres log (p) - h układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.3 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Tab. 5.5 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.3 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	-0,9	4,48	21,69	368,3	1,639
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	62	16,93	75,1	411,1	1,685
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	37,1	16,93	92,8	379,9	1,588
3s	Temperatura wrzenia skraplania	36,7	16,93	984,9	254,6	1,184
3a	Wylot ze skraplacza	33,7	16,93	1001	249,8	1,169
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	33,7	16,93	1001	249,8	1,169
4	Za zaworem rozprężnym	-9,5	4,48	60,72	249,8	1,19
4s	Temperatura wrzenia	-9,7	4,48	1187	186,8	0,9515
1s	Punkt rosy odparowywania	-9,1	4,48	22,74	360,6	1,61
1a	Wylot parownika	-0,9	4,48	21,69	368,3	1,639

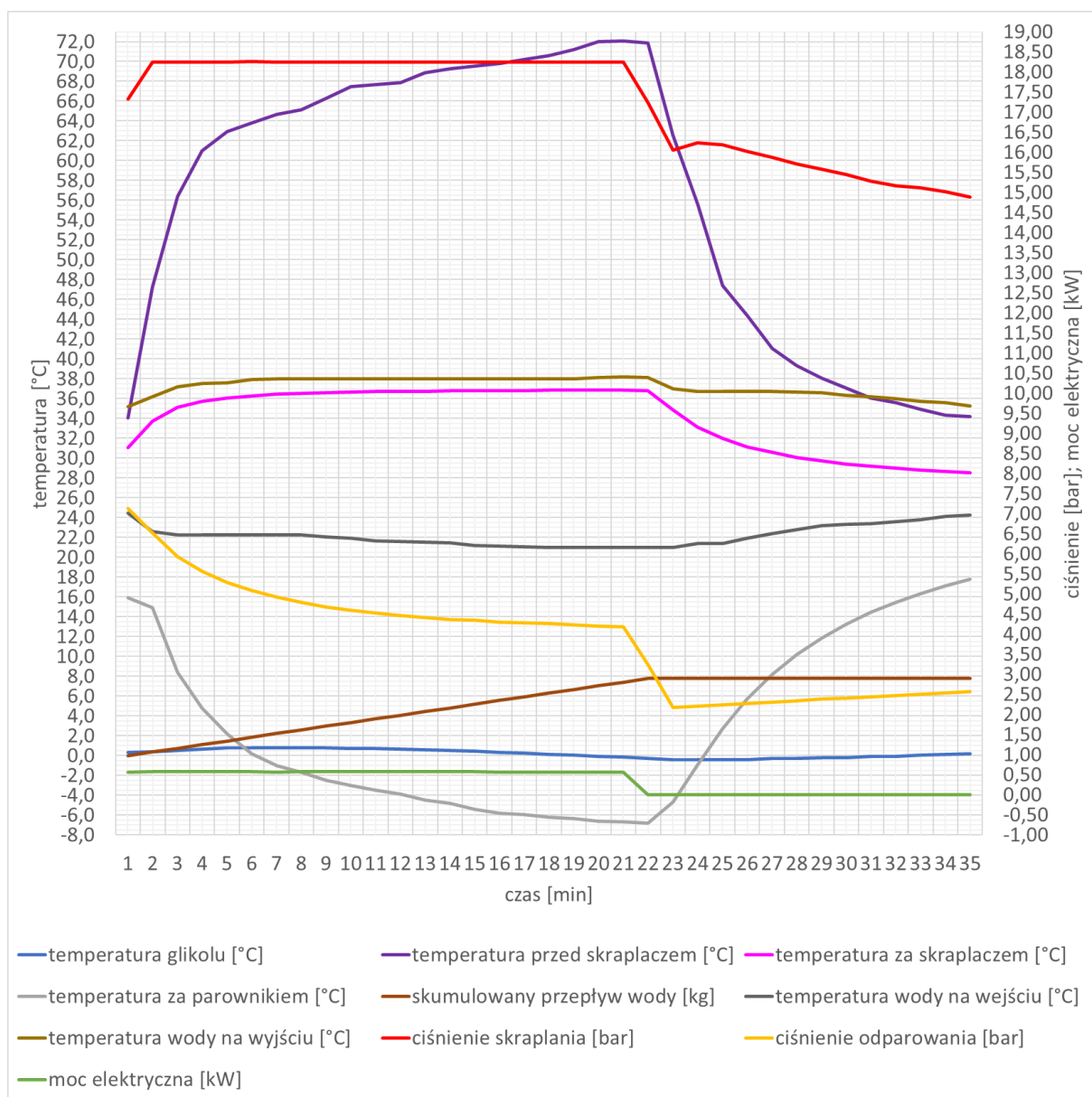


Czwarta próba wykonana została dla temperatury wody wyjściowej $37,3^{\circ}\text{C}$, przy temperaturze zewnętrznej $26,5^{\circ}\text{C}$, oznaczona jako próba ze skraplaczem 3.4. Rzeczywiste cykle pracy dla tej temperatury przedstawiono na rys. 5.21.



Rys. 5.21 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.4 z czynnikiem chłodniczym R404a

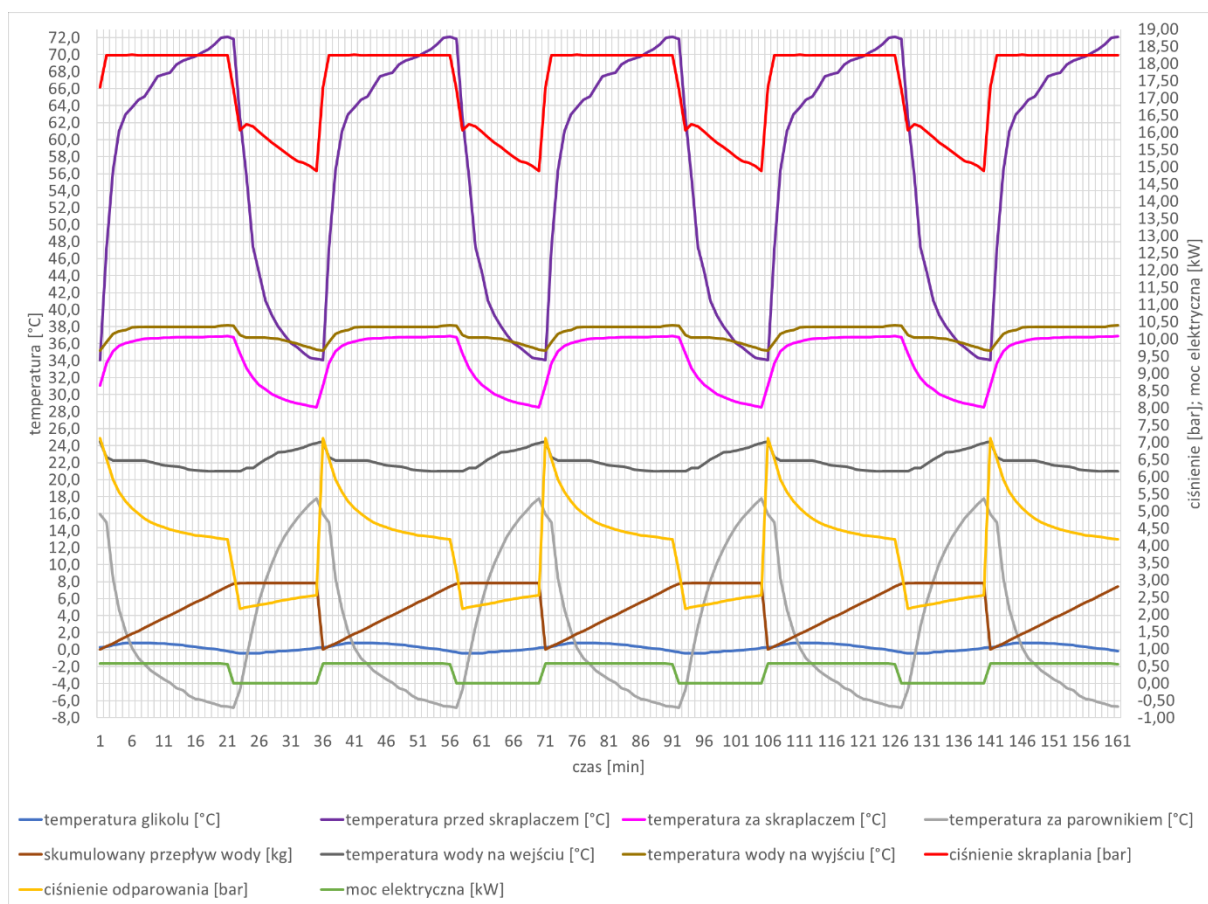
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów, które przedstawiono na rys. 5.22.



Rys. 5.22 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.4 z czynnikiem chłodniczym R404a

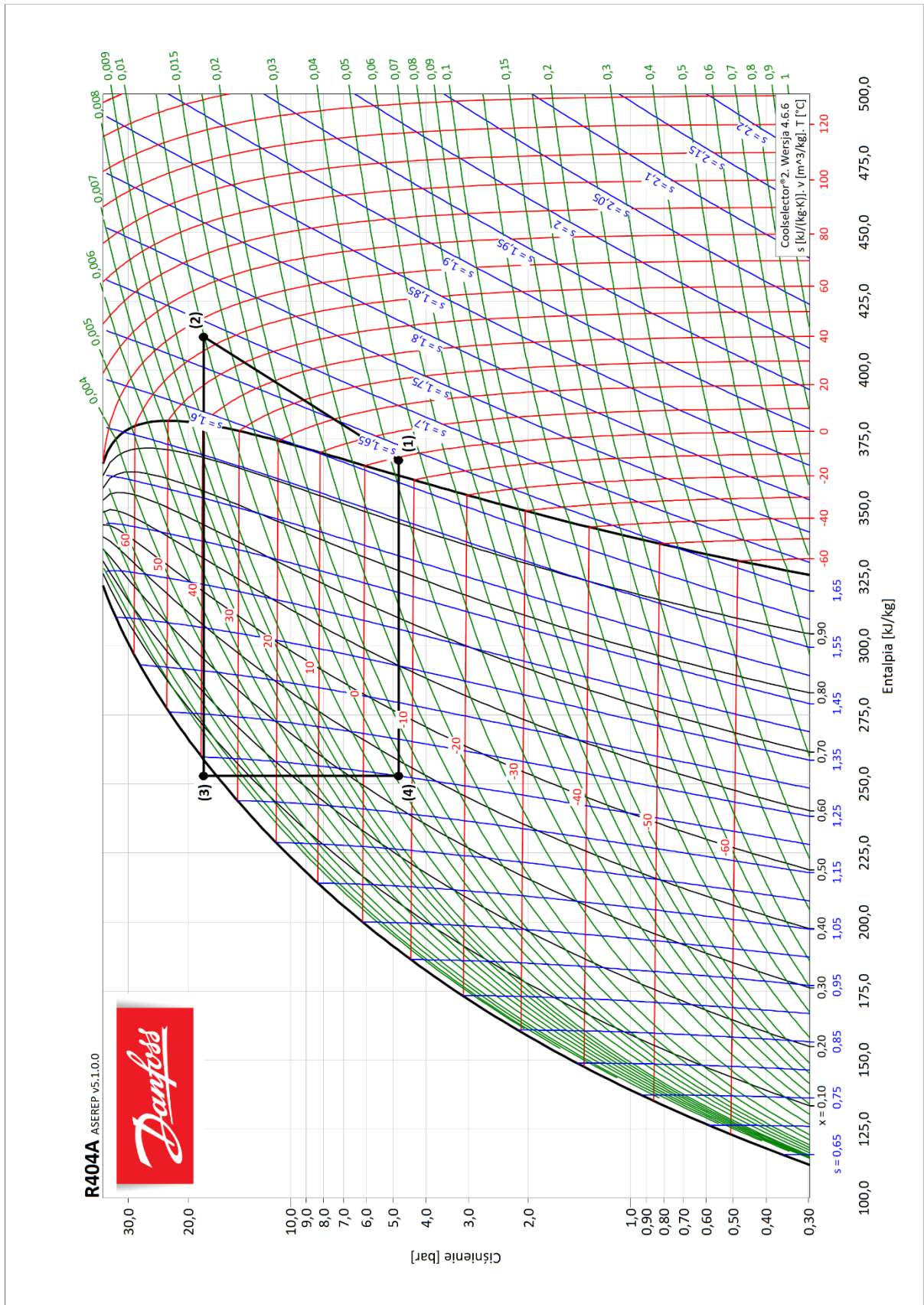
Układ stabilizuje się po upływie 2 minut, co widać po osiągnięciu stałej wartości na linii ciśnienia skraplania. Ciśnienie odparowania od razu po załączeniu sprężarki osiąga wartość maksymalną a w okresie pracy sprężarki maleje i dąży do stabilizacji. Temperatura glikolu jest prawidłowa i stała w całym cyklu. Temperatura skraplania, wody na wejściu i wody na wyjściu jest na stałym poziomie w ciągu cyklu pracy sprężarki, z niewielkim spadkiem temperatury wody wpływającej do skraplacza. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową zależną od ciśnienia odparowania i dąży do stabilizacji.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cyklach pracy układu chłodniczego na rys. 5.23.



Rys. 5.23 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.4 z czynnikiem chłodniczym R404a

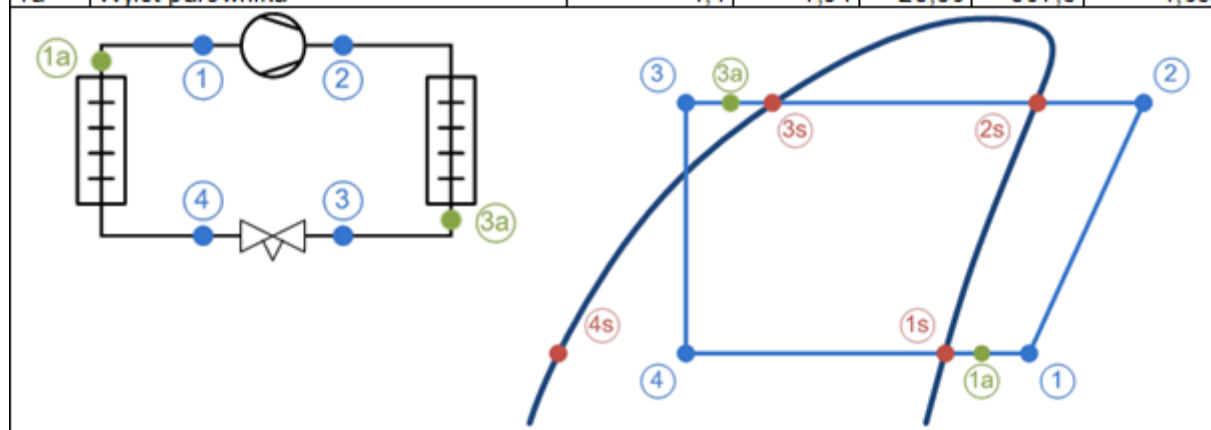
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.24, natomiast w tab. 5.6 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



Rys. 5.24 Wykres log (p) - h układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.4 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Tab. 5.6 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3.4 z czynnikiem chłodniczym R404a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	-1,1	4,81	23,56	367,3	1,63
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	64,3	18,03	80,43	412,1	1,683
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	39,7	18,03	100,1	380,4	1,586
3s	Temperatura wrzenia skraplania	39,3	18,03	970,2	258,9	1,197
3a	Wylot ze skraplacza	35,7	18,03	990,4	253	1,179
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	35,7	18,03	990,4	253	1,179
4	Za zaworem rozprężnym	-7,4	4,81	63,99	253	1,2
4s	Temperatura wrzenia	-7,6	4,81	1179	189,6	0,9621
1s	Punkt rosy odparowywania	-7	4,81	24,39	361,7	1,609
1a	Wylot parownika	-1,1	4,81	23,56	367,3	1,63



Zestawienie średnich wyników uzyskanych dla poszczególnych parametrów układu chłodniczego przy różnej konfiguracji pokazano w tab. 5.7.

Tab. 5.7 Zestawienie średnich wyników badań podczas pracy z czynnikiem chłodniczym R404a

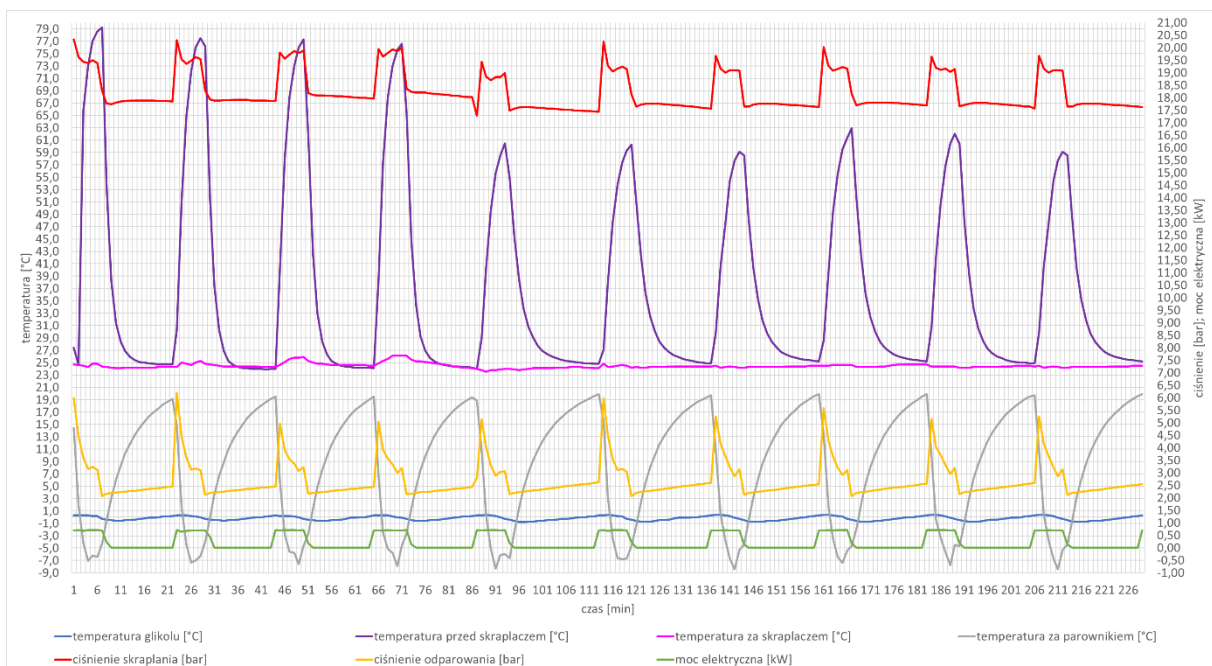
Instalacja pracująca z czynnikiem chłodniczym R404a (GWP=3922)	ilość energii potrzebnej do podgrzania 10 l wody	<i>kJ</i>	-	-	406	520	603	660
	ilość energii potrzebnej do podgrzania wody z 1 cyklu	<i>kJ</i>	-	-	568	504	577	513
	różnica temperatur wody	<i>°C</i>	-	-	9,7	12,4	14,4	15,7
	temperatura wody wyjściowej	<i>°C</i>	-	-	28,6	34,5	36,0	37,3
	temperatura wody wejściowej	<i>°C</i>	-	-	18,9	22,1	21,6	21,6
	masa ogrzanej wody w 1 cyklu pracy	<i>kg</i>	-	-	14,0	9,7	9,6	7,8
	zużycie energii elektrycznej	<i>kWh/1000 h</i>	386	342	283	303	327	364
	moc elektryczna	<i>kW</i>	0,647	0,659	0,549	0,550	0,562	0,562
	przegrzania czynnika	<i>K</i>	6,7	9,6	8,5	9,3	8,2	5,9
	dochłodzenie czynnika	<i>K</i>	2,7	3,5	1,8	2,5	3,0	3,6
	temperatura odparowania	<i>°C</i>	-7,3	-9,3	-9,0	-9,1	-8,9	-6,7
	temperatura skraplania	<i>°C</i>	33,1	33,0	32,7	35,6	36,8	39,4
	ciśnienie odparowania	<i>bar</i>	4,78	4,50	4,46	4,55	4,48	4,81
	ciśnienie skraplania	<i>bar</i>	15,46	15,44	15,27	16,44	16,93	18,03
	temperatura za parownikiem	<i>°C</i>	-0,5	0,3	-0,5	0,2	-0,7	-0,8
	temperatura za skraplaczem	<i>°C</i>	30,4	29,6	31,0	33,0	33,9	35,8
	temperatura przed skraplaczem	<i>°C</i>	38,3	54,0	61,8	60,6	62,0	64,3
	temperatura glikolu	<i>°C</i>	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
	wartość	<i>jednostka</i>	skraplacz 1	skraplacz 2	skrapalcz 3.1	skrapalcz 3.2	skrapalcz 3.3	skrapalcz 3.4

Analizując powyższe dane tabelaryczne można zauważyć, że temperatura przed skraplaczem lamelowym jest niższa o 16°C niż przed skraplaczem bezlamelowym. Dla skraplacza wodnego temperatura przed skraplaczem utrzymuje się na podobnym poziomie wynoszącym około 62°C. Temperatura za skraplaczem dla obu skraplaczy powietrznych jest podobna, natomiast dla skraplacza wodnego rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia skraplania oraz temperatury wody wyjściowej. Dochłodzenie za skraplaczem ma prawidłową wartość dla wszystkich prób i mieści się w granicach 1,8 – 3,6 K, także przegrzanie za parownikiem ma prawidłową wartość w granicach 5,9 – 9,6 K. W skraplaczach następuje całkowite skroplenie czynnika chłodniczego, natomiast w parownikach następuje całkowite odparowanie czynnika chłodniczego. Moc pobierana przez układ chłodniczy z załączonym skraplaczem 1 jest mniejsza niż moc pobierana przez urządzenie z włączonym skraplaczem 2, jednakże w przeliczeniu na 1000 godzin pracy, układ z załączonym skraplaczem 2 zużywa mniej energii elektrycznej, a także czas pracy instalacji przy załączonym skraplaczu 2 jest krótszy. W przypadku układu chłodniczego z włączonym skraplaczem wodnym, zużycie energii elektrycznej jest mniejsze od układu pracującego ze skraplaczem powietrznym o co najmniej 17%. Ciepło odpadowe skraplania nie jest wyrzucane do otoczenia, natomiast jest wykorzystane do ogrzania wody, którą można zagospodarować.

5.3. Badania z wykorzystaniem czynnika chłodniczego alternatywnego – R455a

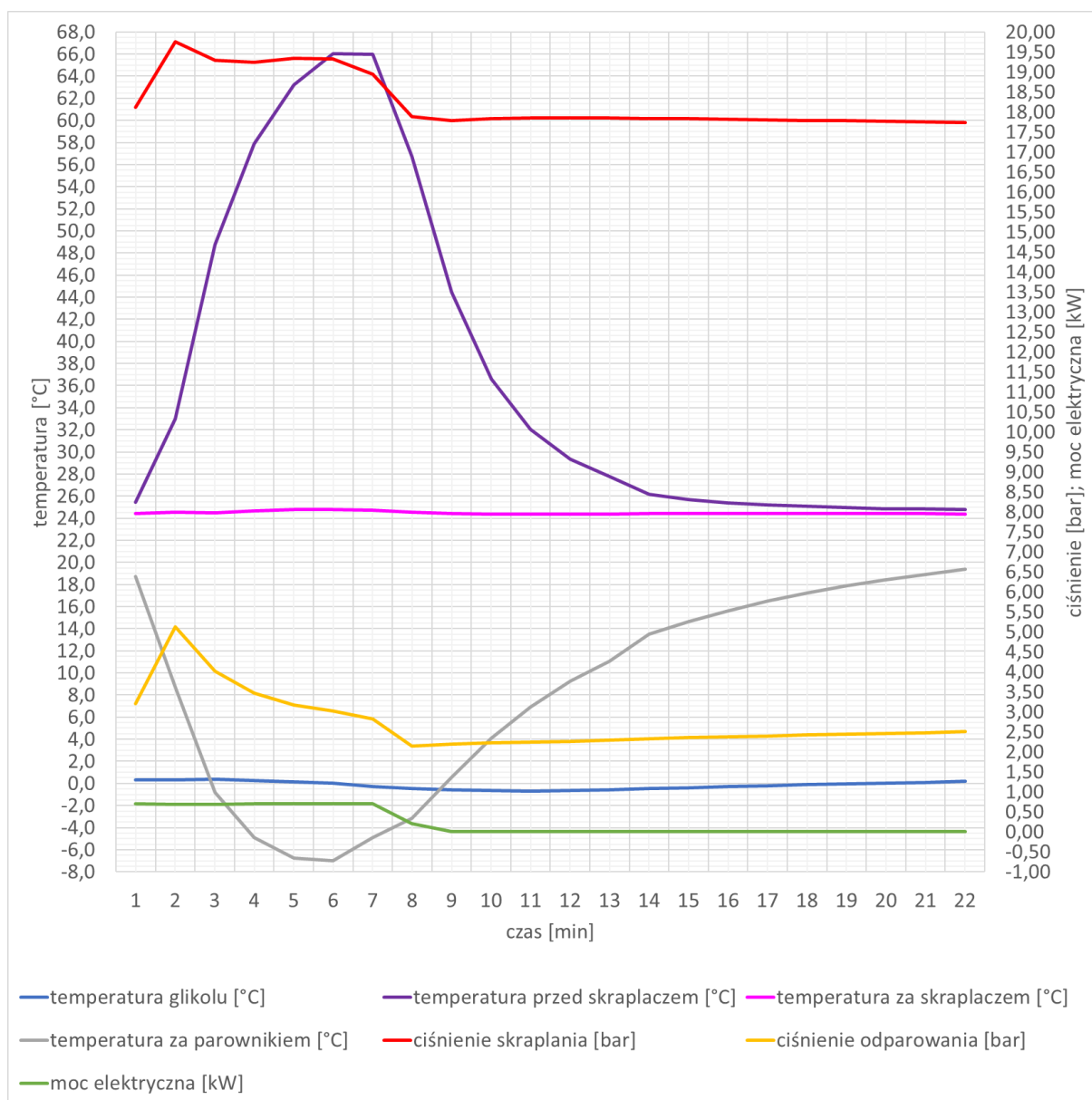
Układ chłodniczy napełniony był czynnikiem **R455a** o masie **1,2 kg**. Sterowanie temperaturą w zbiorniku glikolu odbywa się poprzez regulator temperatury, który ustawiony został na **0°C** z regulacją załączania sprężarki $\pm 0,3^\circ\text{C}$. W parowniku podczas pracy urządzenia załączona była grzałka elektryczna o mocy **170 W**, która ma za zadanie symulować oddziaływanie cieplne produktów spożywczych umieszczonych w komorze chłodniczej. Ponadto aby zredukować oddziaływanie grzałki podczas cyklu postoju na czynnik chłodniczy znajdujący się w parowniku, zamykany jest zawór przed parownikiem a czynnik zostaje odessany przez 5 sekundowe opóźnienie wyłączenia sprężarki. W badaniach skupiono się na ustalonym cyklu pracy urządzenia, dlatego w wynikach pominięto czas oraz parametry przed stanem ustalonym.

Jako pierwszy obiekt poddany próbie został **skraplacz 1 (lamelowy)**. Badania prowadzono podczas 10 cykli pracy układu chłodniczego tj. od chwili włączenia sprężarki, poprzez okres postoju do chwili przed ponownym włączeniem urządzenia. Wyniki przedstawiono na rys. 5.25. Temperatura otoczenia wynosiła 24°C .



Rys. 5.25 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R455a

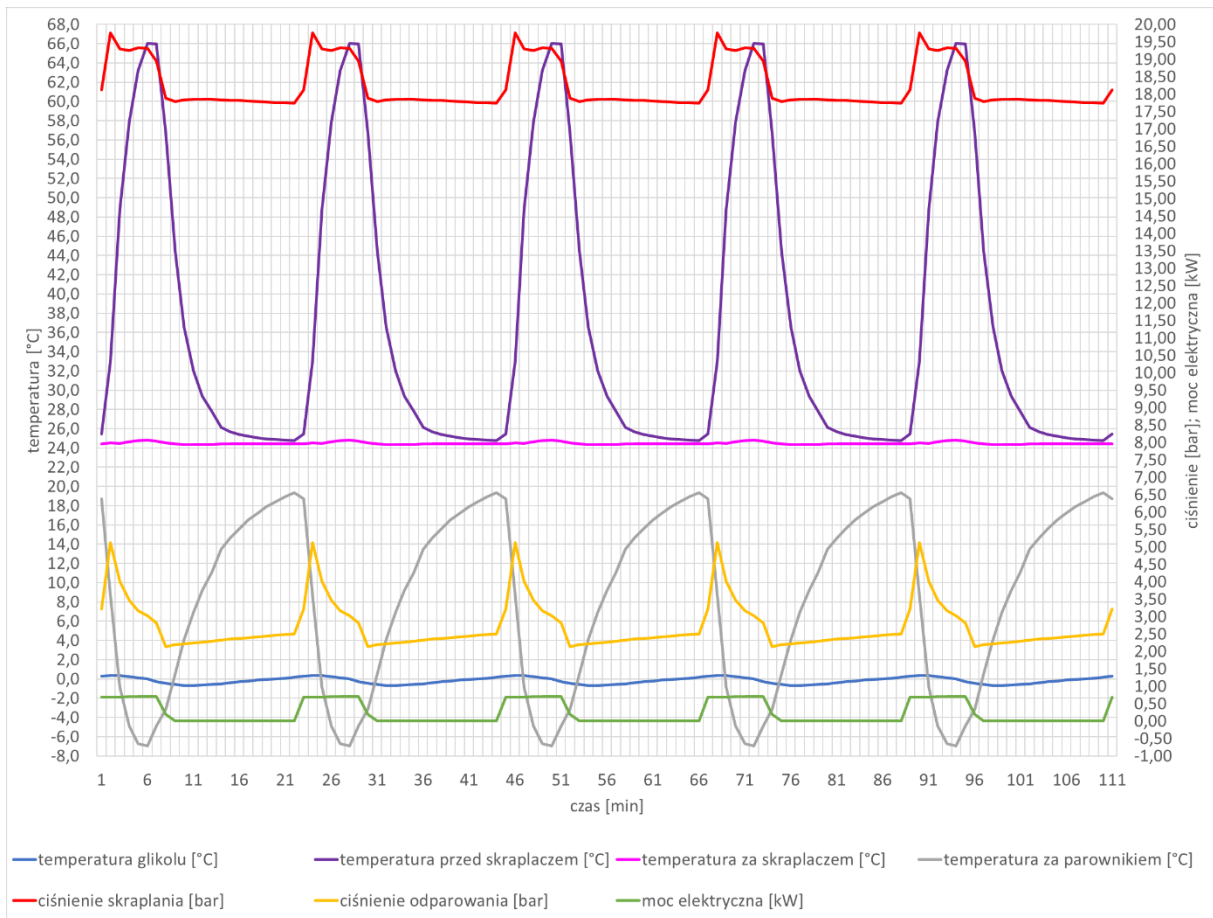
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu, w celu zidentyfikowania charakterystycznych punktów pomiarowych oraz likwidacji przypadkowych punktów pomiarowych, spowodowanych przez zewnętrzne zakłócenia. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów dla skraplacza 1, które przedstawiono na rys. 5.26.



Rys. 5.26 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R455a

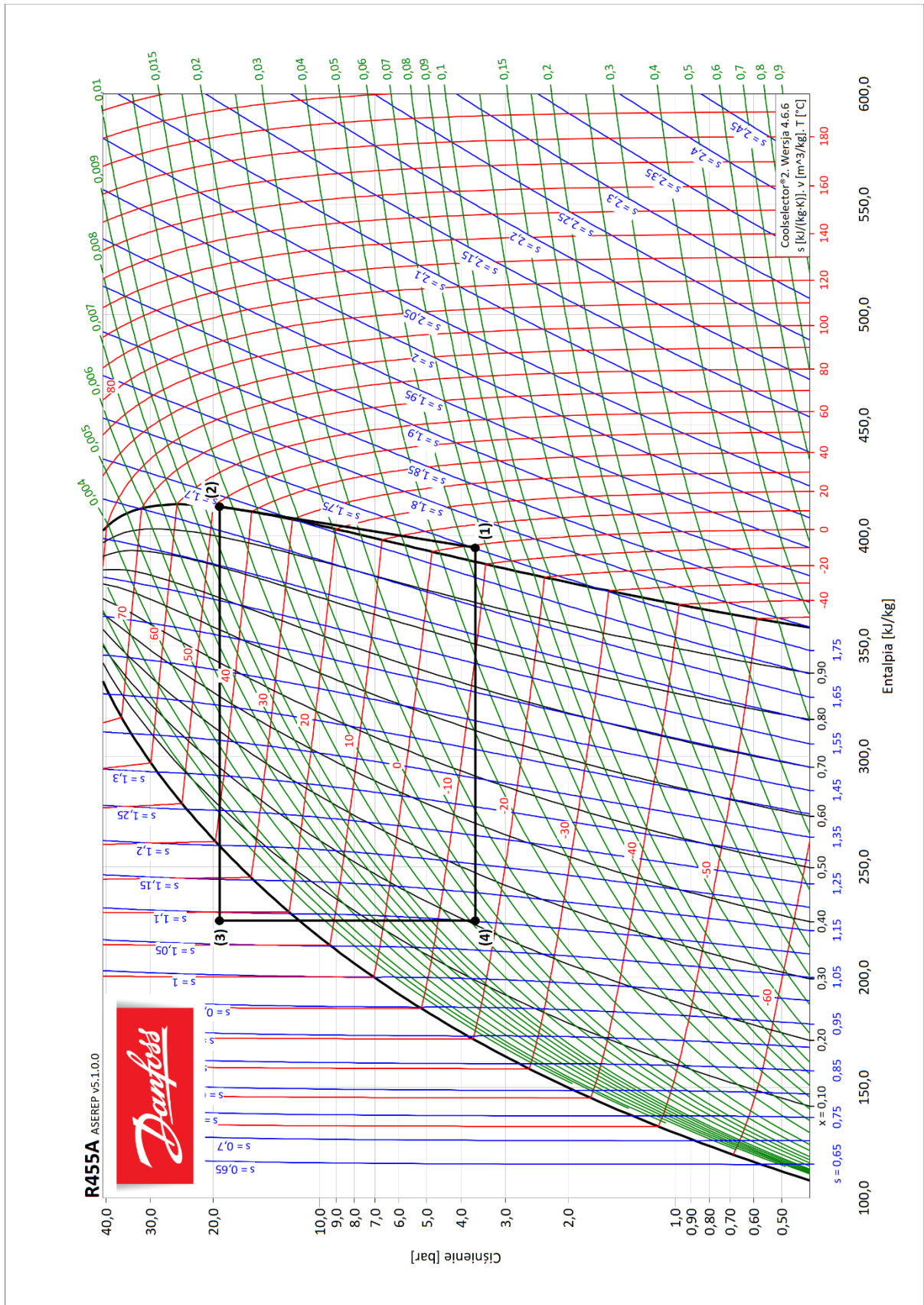
Układ chłodniczy osiąga stabilizację po upływie 2 minut. Ciśnienie skraplania jest równomierne z niewielką tendencją spadkową pod koniec cyklu sprężania. Ciśnienie odparowania charakteryzuje się tendencją spadkową. Temperatura za skraplaczem jest na stałym poziomie, natomiast temperatura przed skraplaczem rośnie w ciągu cyklu pracy, gdy minutę przed zatrzymaniem sprężarki osiągnie stałą wartość. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową zależną od ciśnienia odparowania.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cykli pracy układu chłodniczego na rys. 5.27.



Rys. 5.27 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R455a

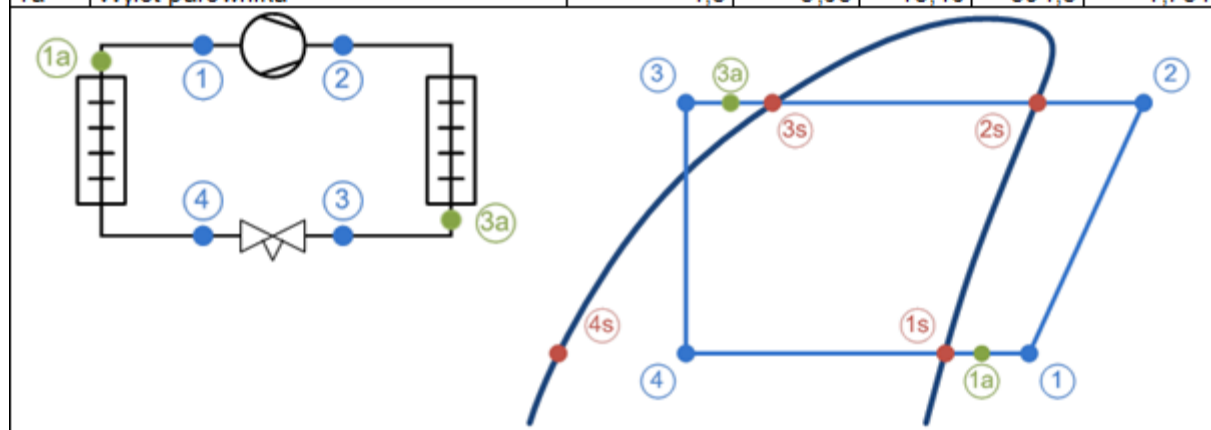
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.28, natomiast w tab. 5.8 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



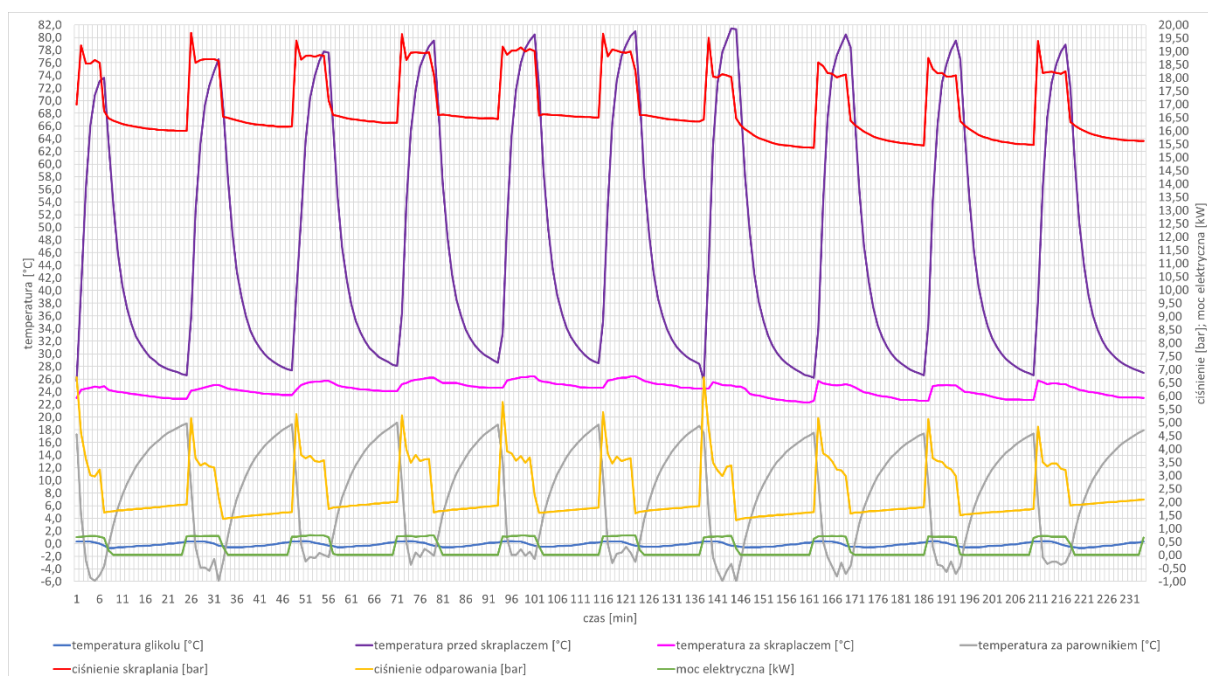
Rys. 5.28 Wykres $\log(p) - h$ układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R455a [33]

Tab. 5.8 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 1 z czynnikiem chłodniczym R455a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	-1,3	3,65	15,46	394,5	1,751
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	48,4	19,15	88,64	413,2	1,684
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	48,3	19,15	88,77	413	1,684
3s	Temperatura wrzenia skraplania	38,8	19,15	971,6	259,4	1,199
3a	Wylot ze skraplacza	17,5	19,15	1070	225,7	1,087
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	17,5	19,15	1070	225,7	1,087
4	Za zaworem rozprężnym	-16,5	3,65	63,08	225,7	1,105
4s	Temperatura wrzenia	-20,4	3,65	1197	171,4	0,8925
1s	Punkt rosy odparowywania	-8,1	3,65	16,02	388,1	1,728
1a	Wylot parownika	-1,3	3,65	15,46	394,5	1,751

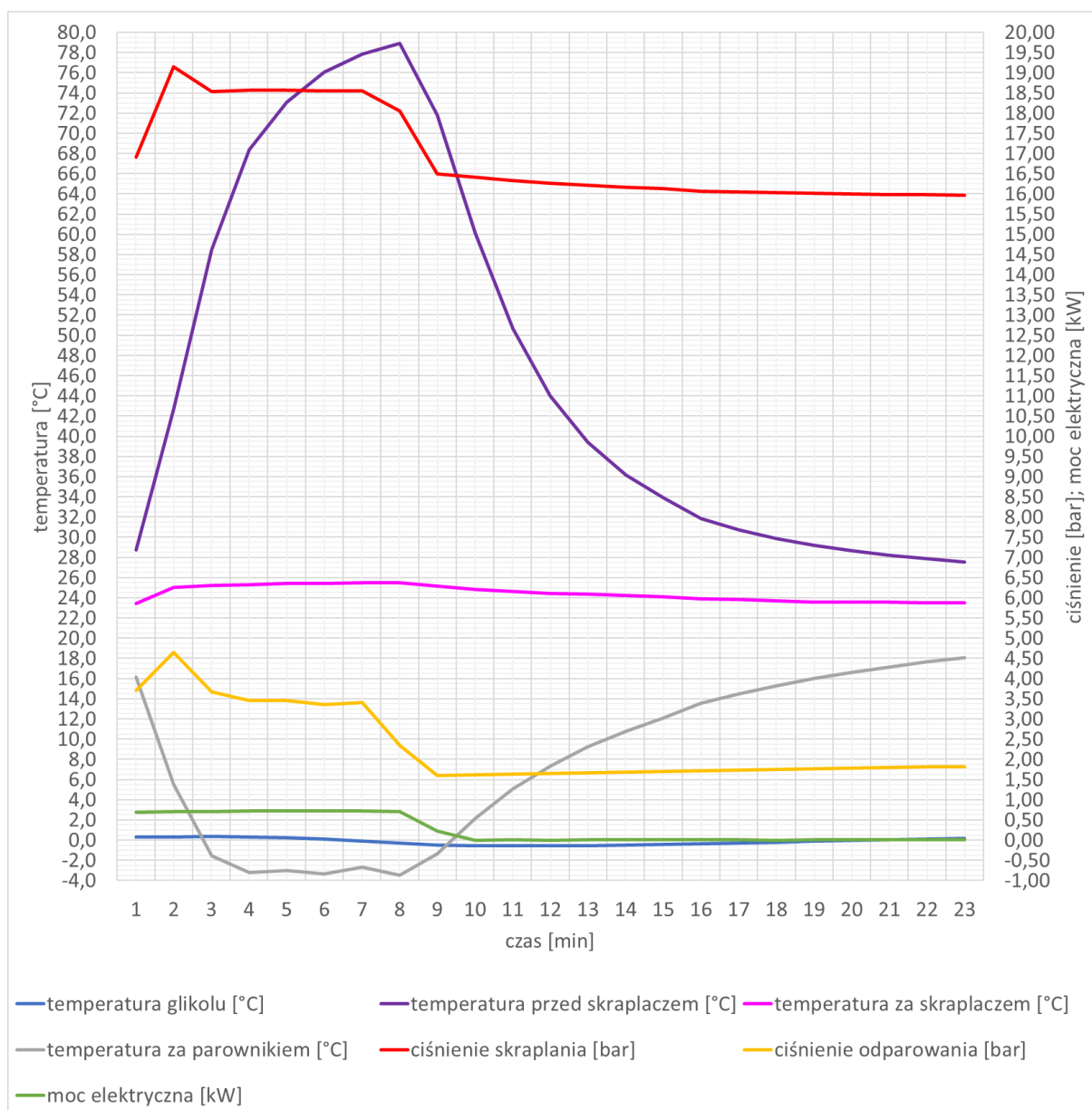


Jako drugi obiekt badaniom poddano **skraplacz 2 (bezlamelowy)**. Tak samo jak w poprzednim przypadku wykonano pomiary parametrów instalacji dla 10 powtórzeń cykli pracy układu chłodniczego. Temperatura otoczenia wynosiła 23°C. Wspomniane cykle przedstawiono na rys. 5.29.



Rys. 5.29 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R455a

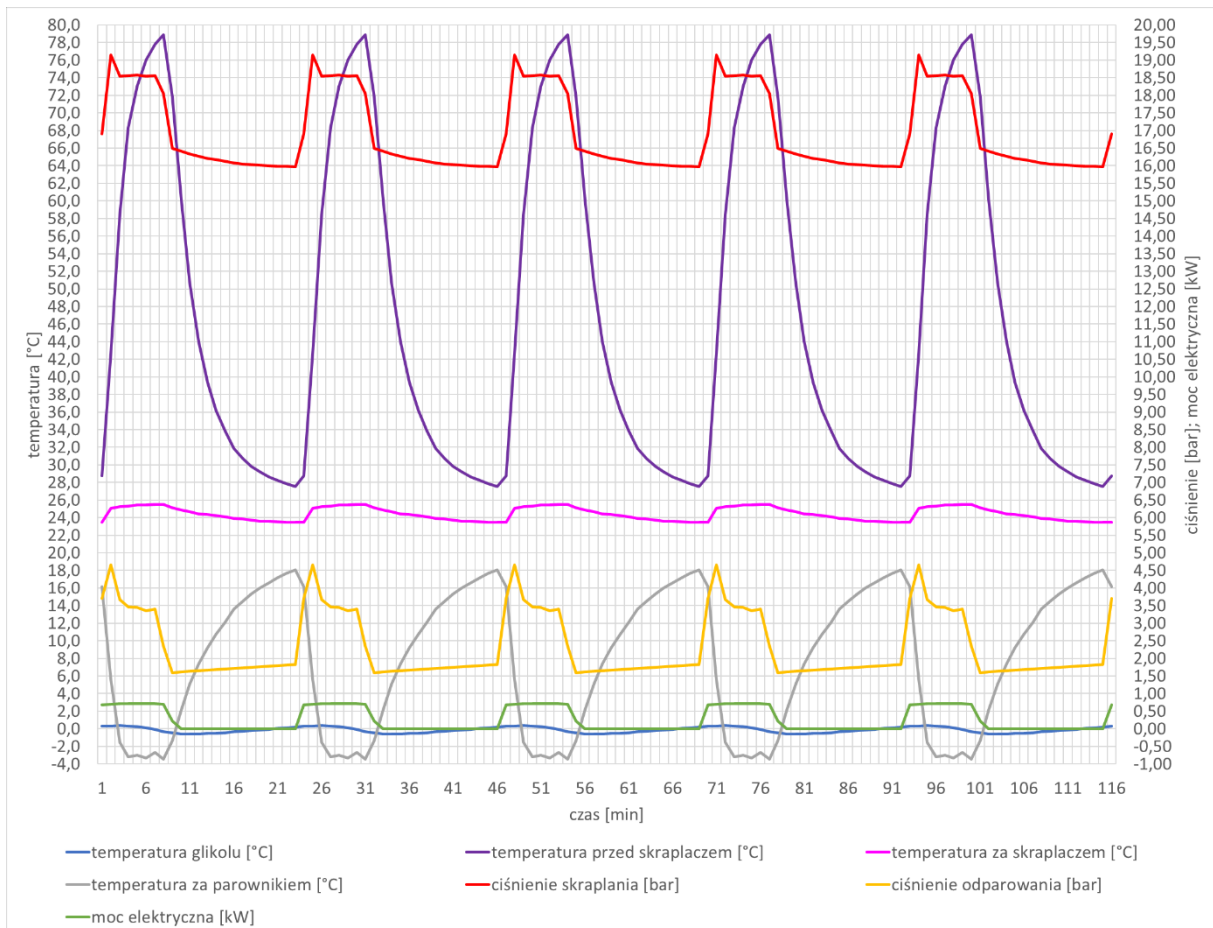
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów, które przedstawiono na rys. 5.30.



Rys. 5.30 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R455a

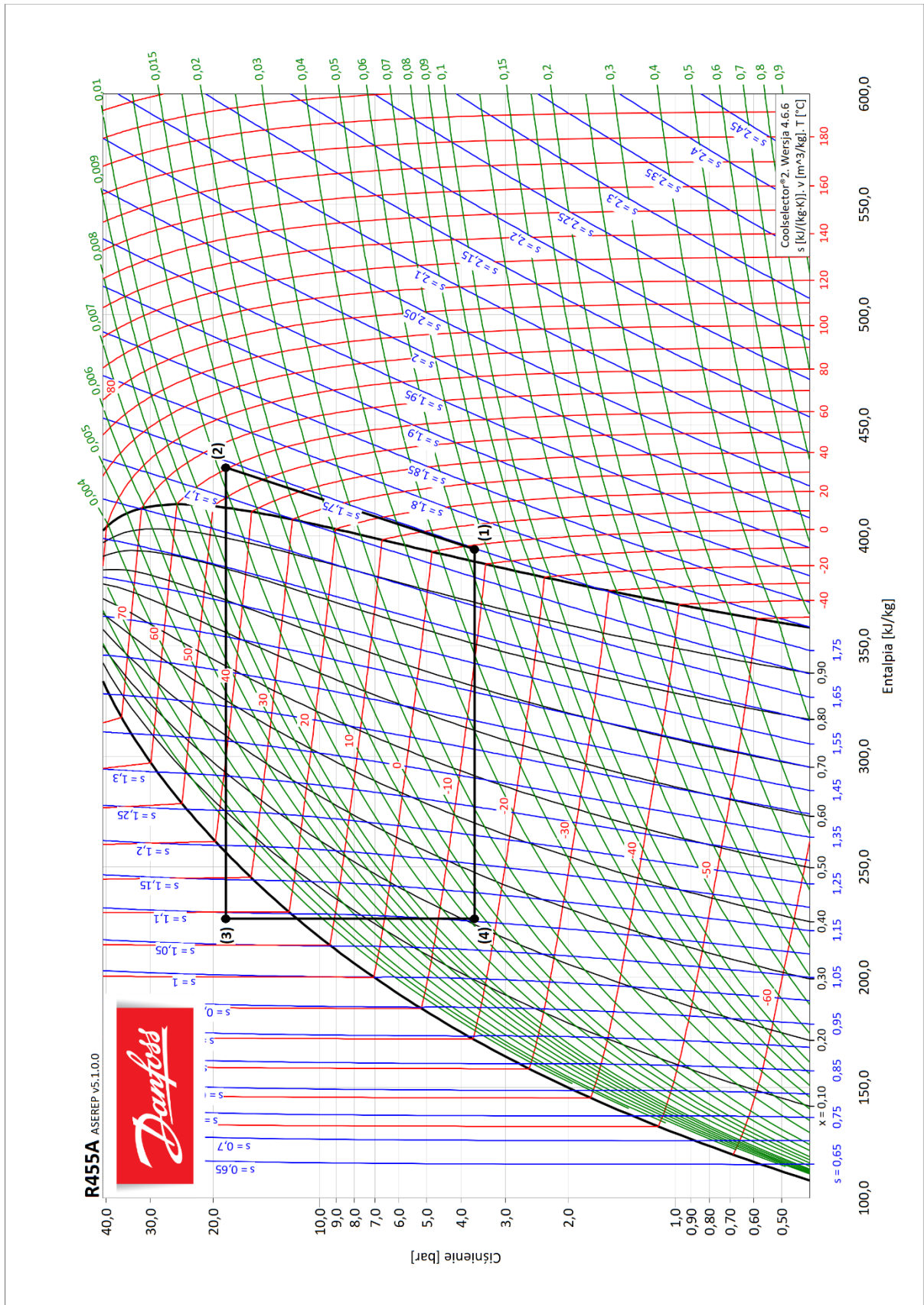
Układ chłodniczy osiąga stabilizację pracy po upływie 2 minut. W 3 minucie stabilizują się ciśnienia skraplania oraz odparowania. Temperatura za skraplaczem posiada stałą wartość w całym cyklu. Temperatura przed skraplaczem rośnie w całym cyklu pracy sprężarki. Temperatura za parownikiem osiąga stałą wartość po 3 minucie i jest zależna od stałego ciśnienia odparowania.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cyklach pracy układu chłodniczego na rys. 5.31.



Rys. 5.31 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R455a

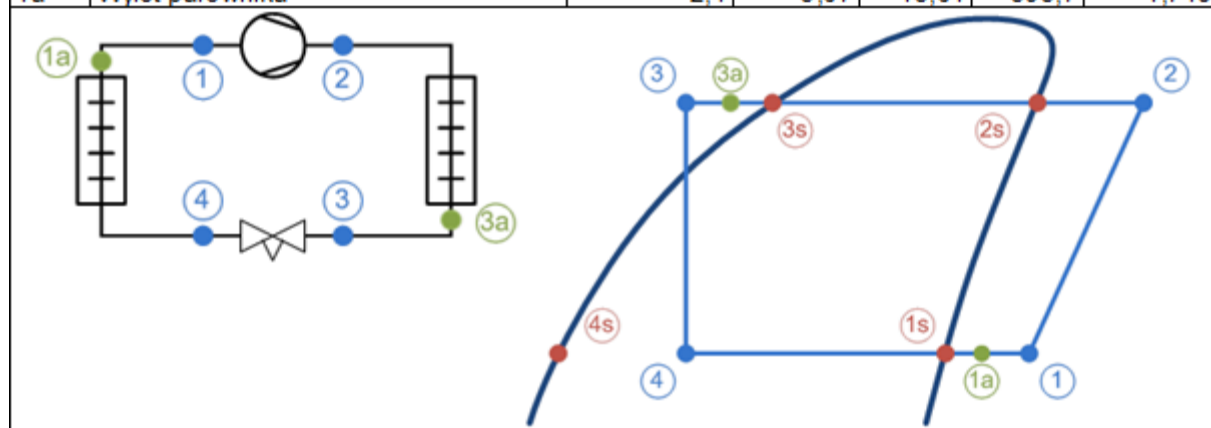
Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.32, natomiast w tab. 5.9 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



Rys. 5.32 Wykres $\log(p) - h$ układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R455a [33]

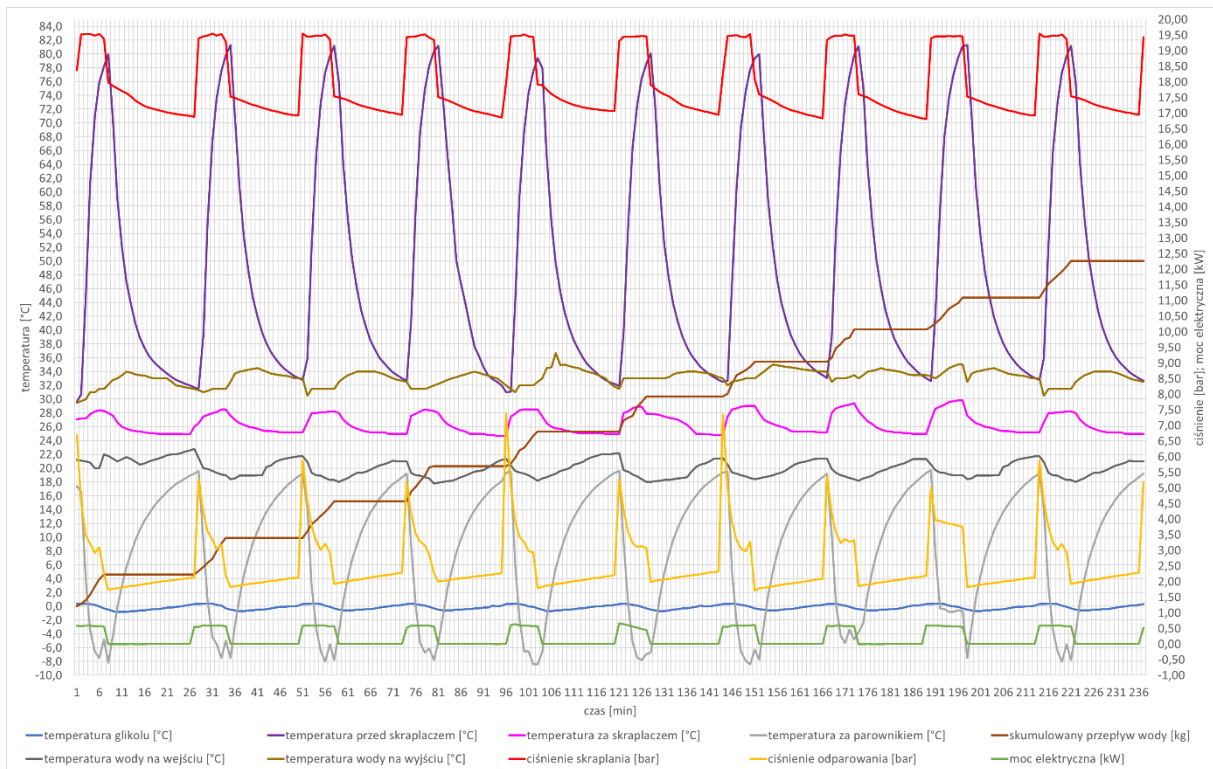
Tab. 5.9 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 2 z czynnikiem chłodniczym R455a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	-2,1	3,67	15,61	393,7	1,748
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	60,7	18,4	75,35	430,9	1,741
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	46,7	18,4	84,73	412,6	1,685
3s	Temperatura wrzenia skraplania	37	18,4	980	256,5	1,19
3a	Wylot ze skraplacza	18	18,4	1067	226,5	1,09
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	18	18,4	1067	226,5	1,09
4	Za zaworem rozprężnym	-16,3	3,67	62,7	226,5	1,108
4s	Temperatura wrzenia	-20,3	3,67	1196	171,7	0,8933
1s	Punkt rosy odparowywania	-8	3,67	16,11	388,2	1,727
1a	Wylot parownika	-2,1	3,67	15,61	393,7	1,748



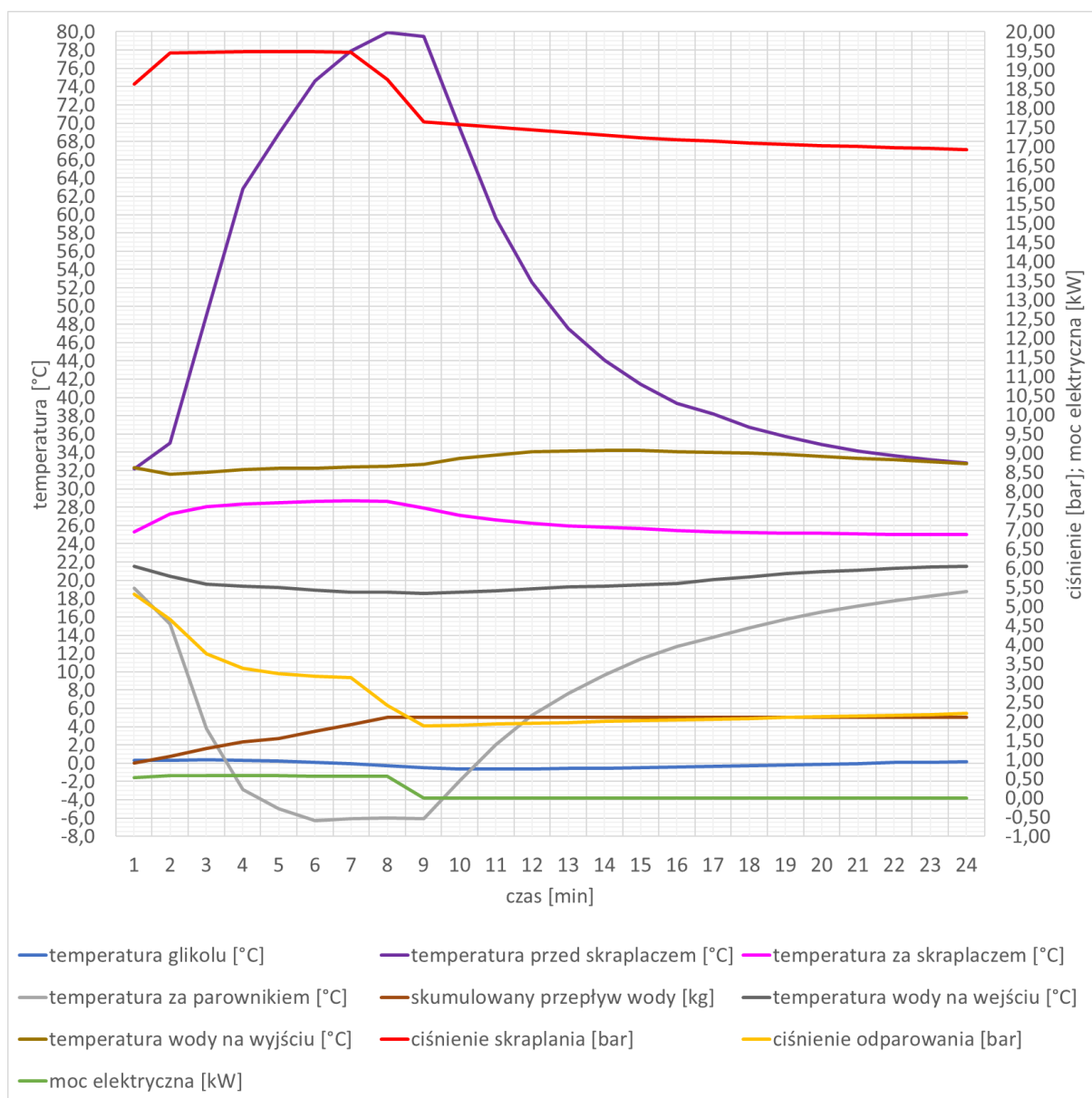
Kolejny obiekt poddany badaniom to **skraplacz 3 (wymiennik ciepła – skraplacz wodny)**. Tak samo jak w poprzednich przypadkach wykonano pomiary parametrów instalacji dla 10 powtórzeń cykli pracy układu chłodniczego. Każde 10 cykli pracy wykonano z uwzględnieniem różnej temperatury wody użytkowej na wyjściu ze skraplacza.

Próba wykonana została dla temperatury wody wyjściowej 32,1°C, przy temperaturze zewnętrznej 23°C. Rzeczywiste cykle pracy dla tej temperatury przedstawiono na rys. 5.33.



Rys. 5.33 Rzeczywiste wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3 z czynnikiem chłodniczym R455a

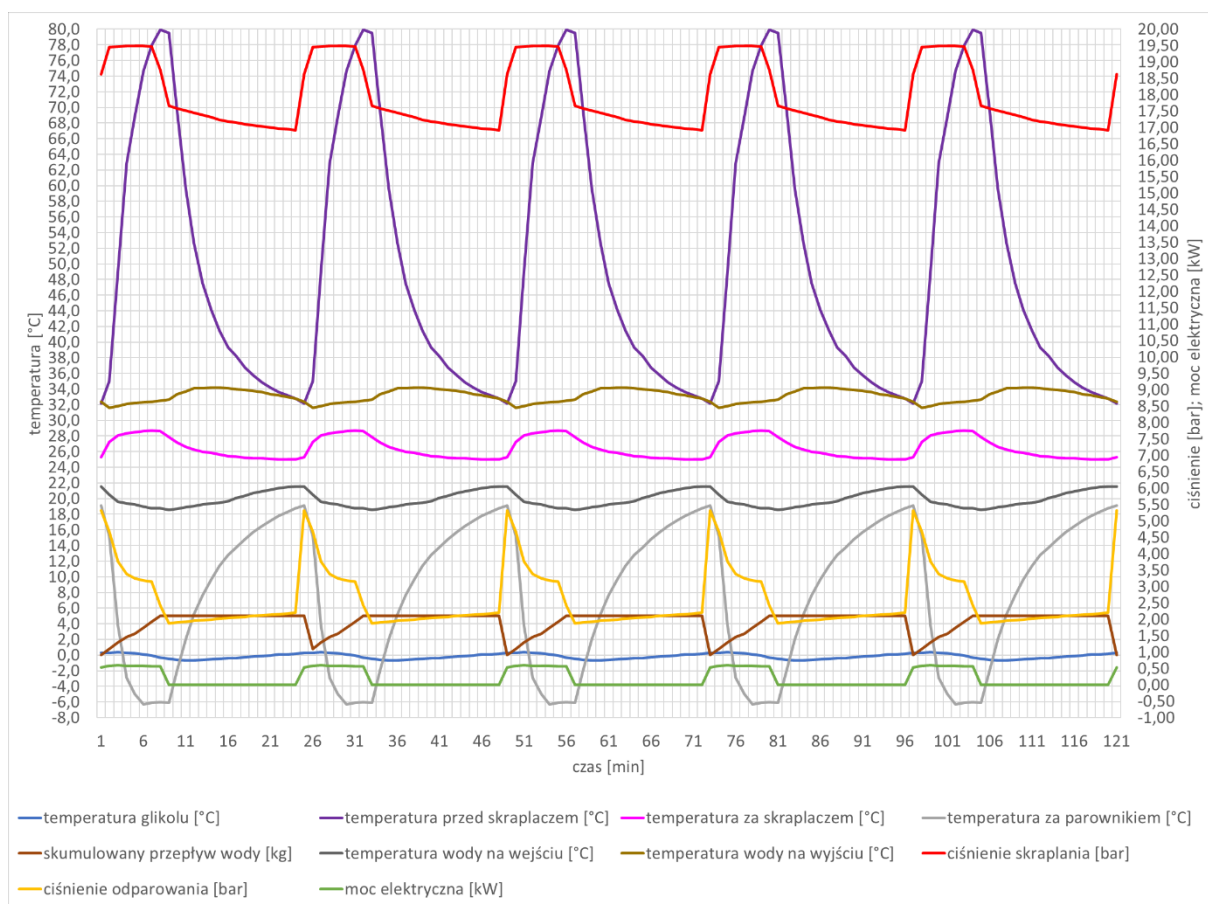
W dalszej kolejności otrzymane wyniki z 10 prób poddano uśrednieniu. W ten sposób otrzymano uśrednione wyniki pomiarów, które przedstawiono na rys. 5.34.



Rys. 5.34 Uśrednione wyniki pomiarów układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3 z czynnikiem chłodniczym R455a

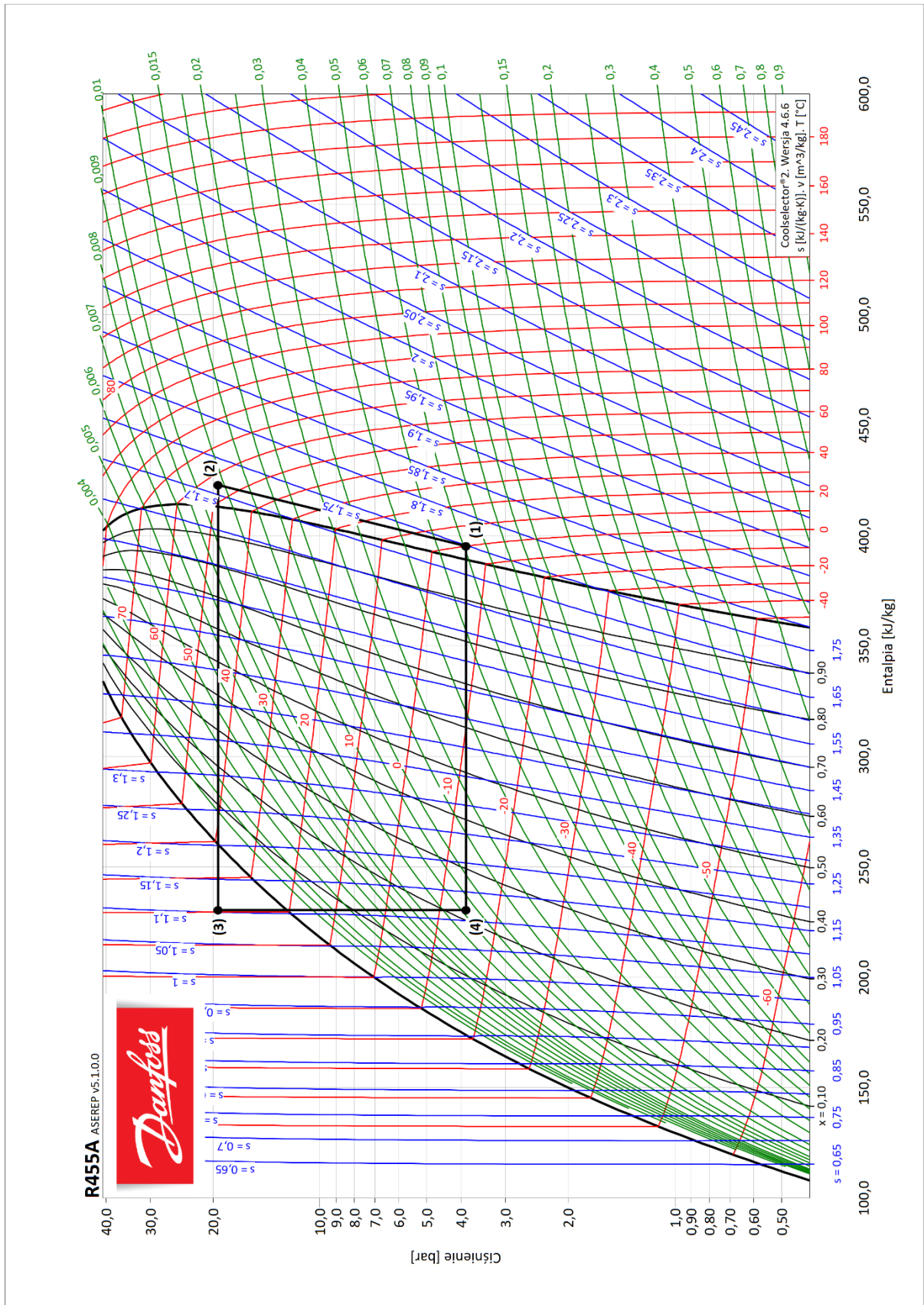
Układ chłodniczy osiąga stabilizację po 2 minutach pracy, gdzie osiąga stałe ciśnienie skraplania. Ciśnienie odparowania ma tendencję spadkową, jednakże pod koniec cyklu pracy sprężarki dąży do stałej wartości. Temperatura za skraplaczem, temperatura wody na wejściu oraz na wyjściu w całym cyklu są prawie na stabilnym poziomie. Temperatura przed skraplaczem rośnie w całym cyklu pracy sprężarki. Temperatura za parownikiem ma tendencję spadkową, jednak pod koniec cyklu sprężania osiąga stałą wartość i jest zależna od ciśnienia odparowania.

W celu zobrazowania ciągłości pracy instalacji, uśrednione wyniki zestawiono w 5 cyklach pracy układu chłodniczego na rys. 5.35.



Rys. 5.35 Uśrednione cykle pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3 z czynnikiem chłodniczym R455a

Uzyskane parametry eksploatacyjne instalacji dla powyższego przykładu naniesiono na wykres ciśnienia – entalpii, który pokazano na rys. 5.36, natomiast w tab. 5.10 przedstawiono warunki pracy wyznaczone przy pomocy programu Coolselector2. Zarówno poniższy rysunek jak i tabela dotyczą uśrednionych parametrów podczas pracy sprężarki.



Rys. 5.36 Wykres $\log(p) - h$ układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3 z czynnikiem chłodniczym R455a [33]

Tab. 5.10 Warunki pracy układu chłodniczego z załączonym skraplaczem 3 z czynnikiem chłodniczym R455a [33]

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg K)]
1	Ssanie sprężarki	0,1	3,88	16,42	395,2	1,749
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	55,9	19,33	83,89	422,9	1,714
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	48,7	19,33	89,75	413,1	1,683
3s	Temperatura wrzenia skraplania	39,2	19,33	969,6	260,1	1,201
3a	Wylot ze skraplacza	20,6	19,33	1057	230,4	1,103
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	20,6	19,33	1057	230,4	1,103
4	Za zaworem rozprężnym	-14,6	3,88	63,69	230,4	1,122
4s	Temperatura wrzenia	-18,7	3,88	1191	173,8	0,9019
1s	Punkt rosy odparowywania	-6,4	3,88	17	389,1	1,726
1a	Wylot parownika	0,1	3,88	16,42	395,2	1,749

Zestawienie średnich wyników uzyskanych dla poszczególnych parametrów układu chłodniczego przy różnej konfiguracji pokazano w tab. 5.11.

Tab. 5.11 Zestawienie średnich wyników badań podczas pracy z czynnikiem chłodniczym R455a

Instalacja pracująca z czynnikiem chłodniczym R455a (GWP=146)	ilość energii potrzebnej do podgrzania 10 l wody	<i>kJ</i>	-	-	517
	ilość energii potrzebnej do podgrzania wody z 1 cyklu	<i>kJ</i>	-	-	259
	różnica temperatur wody	<i>°C</i>	-	-	12,3
	temperatura wody wyjściowej	<i>°C</i>	-	-	32,1
	temperatura wody wejściowej	<i>°C</i>	-	-	19,8
	masa ogrzanej wody w 1 cyklu pracy	<i>kg</i>	-	-	5,0
	zużycie energii elektrycznej	<i>kWh/1000 h</i>	220	258	187
	moc elektryczna	<i>kW</i>	0,696	0,709	0,572
	przegrzania czynnika	<i>K</i>	6,8	5,9	6,5
	dochłodzenie czynnika	<i>K</i>	21,3	19,0	18,6
	temperatura odparowania	<i>°C</i>	-4,9	-4,8	-3,2
	temperatura skraplania	<i>°C</i>	45,9	44,1	46,3
	ciśnienie odparowania	<i>bar</i>	3,65	3,67	3,88
	ciśnienie skraplania	<i>bar</i>	19,15	18,40	19,33
	temperatura za parownikiem	<i>°C</i>	1,9	1,1	3,3
	temperatura za skraplaczem	<i>°C</i>	24,6	25,1	27,7
	temperatura przed skraplaczem	<i>°C</i>	48,3	60,7	55,9
	temperatura glikolu	<i>°C</i>	0,2	0,2	0,2
	wartość	<i>jednostka</i>	skraplacz 1	skraplacz 2	skraplacz 3

Analizując powyższe dane tabelaryczne zauważyć można, że temperatura przed skraplaczem lamelowym jest o 12,4°C niższa niż dla skraplacza bezlamelowego. Dla skraplacza wodnego wartość osiągniętej temperatury przed skraplaczem wynosi 55,9°C i nie odbiega od temperatur osiągniętych skraplaczami powietrznymi. Temperatury osiągnięte za dwoma rodzajami skraplaczy powietrznych są zbliżone, natomiast w przypadku skraplacza wodnego temperatura za skraplaczem jest większa o ok. 3°C. Wartość dochłodzenia za skraplaczami jest wysoka dla wszystkich badanych konfiguracji i mieści się w granicach 18,6 – 21,3 K. Wysoka wartość tego parametru daje pewność, iż czynnik uległ całkowitemu skropleniu, a jednocześnie umożliwia wysnucie wniosków, o możliwość zastosowania mniejszego skraplacza przy zachowaniu prawidłowych warunków pracy. Przegrzanie czynnika za parownikiem dla badanych przypadków mieści się w granicach 5,9 – 6,8 K, co odpowiada prawidłowej wartości przegrzania. Oba parametry informują o całkowitym skropleniu czynnika chłodniczego w skraplaczach oraz o całkowitym odparowaniu czynnika chłodniczego w parowniku. Moc pobierana przez urządzenie w trakcie pracy ze skraplaczem 2 jest wyższa niż w przypadku pracy ze skraplaczem 1. W przeliczeniu na 1000 godzin pracy daje to wartość zużycia energii elektrycznej o 15% większą. W przypadku pracy instalacji z załączonym skraplaczem wodnym, zużycie energii elektrycznej spada w stosunku do pracy ze skraplaczem 1 i 2, odpowiednio o 15% oraz 27%. Ponadto ciepło poprocesowe nie jest wyrzucane do otoczenia, lecz jest wykorzystane do ogrzania wody, którą można zagospodarować, przez co instalacja klimatyzacyjna odprowadza mniejszą ilość ciepła na zewnątrz pomieszczenia.

5.4. Ocena możliwości wykorzystania ciepła poprocesowego ze skraplacza

Przeprowadzone w rozdziałach 5.2 i 5.3 badania dotyczące pracy układu chłodniczego mebli gastronomicznych w różnej konfiguracji, umożliwiły ocenę możliwości wykorzystania ciepła odpadowego ze skraplaczy. Jak wykazano w rozdziałach 5.2 i 5.3, odzysk ciepła jest istotnym zabiegiem stosowanym w urządzeniach chłodniczych. Wykazano, iż stosowanie skraplaczy wodnych, poza możliwością odzysku ciepła oraz braku jego zrzutu do otoczenia, zmniejsza zużycie energii elektrycznej pobieranej przez układ chłodniczy. Na ten fakt bezpośrednio wpływa rezygnacja z konieczności instalowania wentylatorów na skraplaczach, a także utrzymanie bardziej stabilnych warunków pracy niż w przypadku instalacji ze skraplaczami powietrznymi.

W przypadku instalacji chłodniczej pracującej z czynnikiem chłodniczym R404a wykazano, że w ciągu jednego cyklu pracy, możliwe jest podgrzanie 14 kg wody o 9,7°C. W tym przypadku temperatura wody na wyjściu osiągnęła wartość 28,6°C. Kolejne próby wykonywano przy coraz większych ciśnieniach skraplania, co skutkowało zwiększeniem temperatury wody na wyjściu. W jednej z nich przy ciśnieniu skraplania wynoszącym 18,03 bar, podgrzano 7,8 kg wody o 15,7°C. Dzięki temu temperatura wody na wyjściu osiągnęła wartość 37,3°C.

W przypadku instalacji pracującej z czynnikiem chłodniczym R455a, wykonano jedną próbę z pracującym skraplaczem wodnym, z uwagi na wyższe ciśnienie robocze tego czynnika chłodniczego. W ciągu jednego cyklu pracy uzyskano 5 kg wody podgrzanej o 12,3°C do temperatury 32,1°C.

W celu określenia oszczędności z wykorzystania ciepła poprocesowego, w porównaniu do podgrzewania wody konwencjonalną grzałką elektryczną wyznaczono zużycie energii elektrycznej z wykorzystaniem równania 4, a otrzymane wyniki zestawiono w tab. 5.12.

$$Q = \frac{m_w \cdot C_p \cdot \Delta T}{3600000} [kWh] \quad (4)$$

gdzie,

m_w – masa podgrzanej wody [kg]

C_p – ciepło właściwe wody [J/kgK]

ΔT – różnica temperatury końcowej i początkowej [K]

Tab. 5.12 Zapotrzebowanie energii elektrycznej do równoważnego podgrzania wody jak w przypadku podgrzewania w skraplaczu

czynnik chłodniczy	skraplacz	masa wody/cykl [kg]	różnica temperatur [K]	zużycie energii elektrycznej [kWh]
R404a	3.1	14	9,7	0,1580
	3.2	9,7	12,4	0,1399
	3.3	9,6	14,4	0,1608
	3.4	7,8	15,7	0,1307
R455a	3	5	12,3	0,0715

Przy wykorzystaniu obu czynników chłodniczych, pod względem zużycia energii elektrycznej, słuszność ma zastosowanie skraplacza wodnego. Dla nowych układów chłodniczych z czynnikiem R455a istnieje konieczność zaprojektowania instalacji chłodniczej rozbudowanej w komponenty odpowiedzialne za odzysk ciepła skraplania. Natomiast dla instalacji będących już w użyciu należy taką instalację przeprojektować oraz doposażyć w odpowiednie komponenty. W przypadku mebli gastronomicznych odzyskane ciepło można wykorzystać do podgrzewania talerzy w dystrybutorze lub jako woda użytkowa dla obsługi. Ponadto należy przeprowadzić analizę ekonomiczną opłacalności inwestycji.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, iż możliwe jest zastosowanie alternatywnego czynnika chłodniczego w istniejącym układzie chłodniczym bez dokonywania wymiany komponentów. Jedyną czynnością na którą należy zwrócić uwagę zgodnie z instrukcją producenta to korekta nastawy wstępnej termostaticznego zaworu rozprężnego. W tab. 6.1 zestawiono najistotniejsze wyniki z przeprowadzonych badań. Aktualną cenę za 1 kWh energii elektrycznej przyjęto zgodnie z porównywarką cen energii elektrycznej dla firm [80].

Tab. 6.1 Zestawienie najważniejszych wyników

wartość	jednostka	R404a						R455a		
		skraplacz 1	skraplacz 2	skraplacz 3.1	skraplacz 3.2	skraplacz 3.3	skraplacz 3.4	skraplacz 1	skraplacz 2	skraplacz 3
ciśnienie skraplania	bar	15,46	15,44	15,27	16,44	16,93	18,03	19,15	18,40	19,33
zużycie energii elektrycznej	kWh/ 1000 h	386	342	283	303	327	364	220	258	187
koszt energii elektrycznej, przyjęto 1,1060zł/kWh	zł	426,75	377,71	312,56	335,21	361,75	402,77	242,91	285,18	206,98
ciśnienie skraplania	%	0 czynnik odniesienia						+18		
zużycie energii elektrycznej	%	0 czynnik odniesienia						-34		
zużycie energii elektrycznej przez skraplacz bezlamelowy w porównaniu do skraplacza lamelowego	%	-11						+17		
zużycie energii elektrycznej przez skraplacz wodny w porównaniu do skraplacza powietrznych (przy takiej samej nastawie ciśnienia skraplania)	%	-22		nie dotyczy				-22		

- 1) Układ chłodniczy z czynnikiem R455a pracuje o ok. 15% wyższym ciśnieniem skraplania względem instalacji z czynnikiem R404a.
- 2) Zmniejszenie czasu niezbędnego do osiągnięcia temperatury nastawionej w komorze chłodniczej powoduje zmniejszenie zużycia energii elektrycznej średnio o 34%.
- 3) Zastosowanie skraplacza powietrznego w formie bezobsługowej powoduje w przypadku czynnika odniesienia zmniejszenie zużycia energii elektrycznej o 11%, natomiast w przypadku nowoczesnego czynnika chłodniczego zwiększenie o 17%.

- 4) W przypadku zastosowania skraplacza wodnego, przy zachowaniu tych samych ciśnień roboczych jak dla skraplaczy powietrznych, w obu przypadkach następuje zmniejszenie zużycia energii elektrycznej o 22%.
- 5) Istotnym atutem w przypadku skraplacza wodnego jest możliwość dalszego zagospodarowania odzyskanej energii oraz fakt braku zrzutu ciepła do pomieszczenia, w którym znajduje się urządzenie chłodnicze.
- 6) Dzięki zmniejszeniu zużycia energii elektrycznej instalacje te prowadzą do zmniejszenia śladu węglowego wyznaczonego na podstawie ogólnodostępnego kalkulatora śladu węglowego [81, 82] dla skraplacza lamelowego o 0,13 tony CO₂/rok, dla skraplacza bezlamelowego o 0,05 tony CO₂/rok i dla wodnego wymiennika ciepła o 0,12 tony CO₂/rok.
- 7) Stosując czynnik chłodniczy R455a zamiast R404a koszt energii elektrycznej dla 1000 roboczogodzin zmniejszy się średnio o 34%.

Biorąc pod uwagę powyższe informacje, potwierdza się słuszność tezy.

Istnieje alternatywny czynnik chłodniczy, pracujący w układzie chłodniczym mebli gastronomicznych, który umożliwia budowę układu chłodniczego w oparciu o dostępne na rynku komponenty, a także:

- a) zapewnia większą o 34% efektywność energetyczną układu niż czynnik chłodniczy odniesienia R404a,
- b) zapewnia mniejsze o 34% koszty energii,
- c) powoduje mniejszy ślad węglowy.

Jednocześnie stwierdza się, iż zrealizowano założony cel badawczy.

Wykazano możliwość zastosowania przyjaznego środowiska i użytkownikom czynnika chłodniczego R455a dla powszechnie stosowanych składowych układu chłodniczego mebli gastronomicznych.

7. Kierunki dalszych badań

Badania przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej umożliwiły dostrzeżenie braku prac dotyczących tychże układów chłodniczych. W ramach dalszej działalności badawczej można wykorzystać zbudowane stanowisko badawcze do kontynuacji badań nad stosowalnością alternatywnych czynników chłodniczych. Jednym spośród wytypowanych alternatywnych czynników chłodniczych mogących spełnić obecne wymagania jest łatwopalny czynnik chłodniczy R290. Wykorzystanie tego czynnika chłodniczego powoduje konieczność zastosowania odpowiednich środków bezpieczeństwa, dlatego należy w pewnym stopniu zmodyfikować istniejące stanowisko badawcze.

Ciepło odzyskane podczas skraplania posiada w zależności od warunków nastawy układu zmienne parametry, takie jak temperatura oraz jego ilość. W dalszej pracy badawczej warto pochylić się nad problemem związanym ze stosunkowo niską temperaturą wody wyjściowej.

Powyższe rozważania stanowią istotną rolę w pozyskiwaniu grantów badawczych lub mogą być podstawą do prowadzenia dalszych prac w ramach badań własnych autora niniejszej rozprawy.

Literatura

- [1] Protokół Montrealski w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową, sporządzony w Montrealu dnia 16 września 1987 r. (Dz. U. z dnia 23 grudnia 1992 r.).
- [2] Protokół z Kioto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzony w Kioto dnia 11 grudnia 1997 r. (Dz.U. 2005 nr 203 poz. 1684).
- [3] Park W. Y., Shah N., Vine E., Blake P., Holuj B., Hyungkwan K. J., Hoon K. D., "Ensuring the climate benefits of the Montreal Protocol: Global governance architecture for cooling efficiency and alternative refrigerants," *Energy Research & Social Science*, 2021.
- [4] Jonasson P., *Consequences of the new F-gas regulation*, Warszawa, 2015.
- [5] Alba C. G., Alkhatib I. I., Llovel F., Vega L. F., "Assessment of Low Global Warming Potential Refrigerants for Drop-In Replacement by Connecting their Molecular Features to Their Performance," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, s. 17034–17048, 2021.
- [6] Kim C.H., Kim N.H., "Evaporation heat transfer and pressure drop of low GWP R-404A alternative refrigerants in a multiport tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021.
- [7] Kim C.H., Kim N.H., "Evaporation heat transfer and pressure drop of the interim (R-448A, R-449A) and long term (R-455A, R-454C) low GWP R-404A alternative refrigerants in a smooth tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021.
- [8] Kim C.H., Kim N.H., "Evaporation heat transfer of the low GWP alternative refrigerants (R-448A, R-449A, R-455A, R-454C) for R-404A in a microfin tube," *International Journal of Refrigeration*, s. 118-128, 2021.
- [9] Skrzyniowska D., Sikora-Bączek R., "Czynniki ziębnicze naturalne jako proekologiczne w instalacjach klimatyzacyjnych inżynierii środowiska," *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, s. 183-203, 2007.
- [10] Calleja-Anta D., Nebot-Andrés L., Catalán-Gil J., Sánchez D., Cabello R., Llopis R., "Thermodynamic screening of alternative refrigerants for R290 and R600a," *Results in Engineering*, 2020.

- [11] Neksa P., Walnum H. T., Hafner A., "CO₂ - a refrigerant from the past with prospects of being one of the main refrigerants in the future," in 9th IIR Gustav Lorentzen Conference, Sydney, 2010.
- [12] Ashok Babu T. P., Mahapatra D., Shaik S., Goranta K. K., Sai Siva Subramanyam V., "Analytical Computation of Thermodynamic Performance of Various New Eco-friendly Alternative Refrigerants Applicable for Air Conditioners," in Advances in Air Conditioning and Refrigeration, Singapore, Springer, 2020, s. 317-327.
- [13] Yang Z., Feng B., Ma H., Zhang L., Duan C., Liu B., Zhang Y., Chen S., Yang Z., "Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants," International Journal of Refrigeration, s. 12-22, 2021.
- [14] Gaziński B., Cooling systems and law regulations (in polish), Poznań: Systherm Technik, 2010.
- [15] Czapp M., Charun H., Bohdal T., Wielostopniowe sprężarkowe urządzenia chłodnicze, Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszlińskiej, 1997.
- [16] Bohdal T., Charun H., Czapp M., Urządzenia chłodnicze sprężarkowe, parowe, Warszawa: WNT, 2003.
- [17] Bella B., "Jaki jest najlepszy czynnik chłodniczy?," Chłodnictwo, no. 2, 2013.
- [18] PN-EN 378: Instalacje ziębnicze i pompy ciepła. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska..
- [19] Bitzer, "Refrigerant Report 21," Sildenafil, 2020.
- [20] Muller C. F., Poradnik klimatyzacji, Poznań: SYSTHERM, 2010.
- [21] Danfoss, "Możliwości i ograniczenia czynników chłodniczych A2L i A3," in Refrigerant Week 2018, Online, 2018.
- [22] Bonca Z., Butrymowicz D., Dambek D., Depta A., Targański W., Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła: właściwości cieplne, chemiczne i eksploatacyjne, Gdańsk: IPPU MASTA, 1997.
- [23] Ullrich H. J., Technika chłodnicza. Poradnik, Gdańsk: IPPU MASTA, 1998.
- [24] Sovacool B., Griffiths S., Kim J., Bazilian M., "Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions," Renewable and Sustainable Energy Reviews, s. 110759, 2021.

- [25] Grzebielec A., Pluta Z., Ruciński A., Rusowicz A., Czynniki chłodnicze i nośniki energii, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
- [26] Devecioğlu A. G., Oruç V., "On the satisfaction of EU F-Gas regulation using R455A as an alternative to R404A in refrigeration systems," *Materials Today: Proceedings*, s. 1865-1869, 2022.
- [27] Honeywell International Inc, "Honeywell Refrigerants Genetron® 404A (R-404A)," [Online]. <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/genetron-404a/>. [Dostęp 27.01.2022].
- [28] Honeywell International Inc, "Honeywell Refrigerants Solstice® 452A (R-452A)," [Online]. <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/solstice-452a/>. [Dostęp 27.01.2022].
- [29] Honeywell International Inc, "Honeywell Refrigerants Solstice® L40X (R-455A)," [Online]. <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/solstice-l40x/>. [Dostęp 27.01.2022].
- [30] Dz.U. 1992 nr 98 poz. 490 Protokół Montrealski w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową sporządzony w Montrealu dnia 16 września 1987 r..
- [31] Bonca Z., Butrymowicz D., Hajduk T., Targański W., Nowe czynniki chłodnicze i nośniki ciepła, Gdańsk: IPPU MASTA, 2004.
- [32] Sánchez D., Andreu-Nácher A., Calleja-Anta D., Llopis R., Cabello R., "Energy impact evaluation of different low-GWP alternatives to replace R134a in a beverage cooler. Experimental analysis and optimization for the pure refrigerants R152a, R1234yf, R290, R1270, R600a and R744," *Energy Conversion and Management*, s. 115388, 2022.
- [33] Danfoss Poland Sp. z o.o., "Coolselector®2 Wersja 4.7.0," Danfoss, 2022.
- [34] Rogstam J., Bolteau S., Makhnatch P., Khodabandeh R., "Evaluation of a potential R404A replacement - field test with R449A," KYS, Sztokholm, 2016.
- [35] Devecioğlu A. G., Oruc V., "Experimental comparison of R404A and R452A in refrigeration systems," *Science and Technology for the Built Environment*, s. 61-69, 2021.
- [36] Devecioğlu A. G., Oruç V., "Experimental comparison of R404A and R452A in refrigeration systems," *Science and Technology for the Built Environment*, s. 61 - 69, 2021.

- [37] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych.
- [38] Devocioğlu A. G., Oruc V., "On the satisfaction of EU F-Gas regulation using R455A as an alternative to R404A in refrigeration systems," *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [39] ISO 5149-1:2014 Instalacje chłodnicze i pompy ciepła — Wymagania bezpieczeństwa i ochrony środowiska — Część 1: Definicje, klasyfikacja i kryteria wyboru.
- [40] Mota-Babiloni A., Haro-Ortuño J., Navarro-Esbrí J., Barragán-Cervera Á., "Experimental drop-in replacement of R404A for warm countries using the low GWP mixtures R454C and R455A," *International Journal of Refrigeration*, s. 136 - 145, 2018.
- [41] Tryjanowski M., Mazurkiewicz P., Ratajczak W., "Praktyczne aspekty w projektowaniu instalacji chłodniczych w supermarketach," *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, s. 54-60, 2018.
- [42] PN-EN ISO 22041:2019-09 Szafy i lody chłodnicze do profesjonalnego użytku - Wydajność i zużycie energii.
- [43] Bernat T., Bieńczak K., Bogusławski L., "Description of energy balance for selected refrigeration furniture," *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, s. 11-14, 2019.
- [44] Bernat T., "Evaluation of thermal insulation of the gastronomic refrigeration furniture prototype," *Agricultural Engineering*, s. 83-98, 2021.
- [45] Bieńczak K., Kaczmarek R., Rochatka T., Stachowiak A., "Niektóre problemy chłodniczego transportu owoców i warzyw w stanie świeżym," in *II Konferencja Transportu Żywności PTTŻ*, Warszawa, 1996.
- [46] Chițaniuc M., Bianca M., Adrian I., "FoodAR-An augmented reality application used in gastronomy," in *Proceedings of the 15th Conference on Human Computer Interaction-RoCHI*, 2018.
- [47] Spang R. L., Gopnik A., *The Invention of the Restaurant-Paris and Modern Gastronomic Culture*, with a New Preface, Harvard University Press, 2019.
- [48] PN-EN 631-1:1996 Materiały i przedmioty stykające się z żywnością -- Pojemniki na żywność -- Wymiary pojemników.
- [49] AiFO, "8 problemów przy budowie układu chłodniczego w meblu chłodniczym," *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, s. 62-63, 2021.

- [50] Krzyżaniak G., "Meble chłodnicze do przechowywania wyrobów cukierniczych," *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, s. 64-65, 2006.
- [51] Eren E., Melike N. Ş., "Evaluation of Gastronomical and Architectural Formations of Restaurants in Touristic Regions: The Case of Alanya," *Journal of Tourism Intelligence and Smartness*, s. 230-242, 2022.
- [52] Pilar Hurtado-Yugcha J., Quisimalin-Santamaría H., Mancheno-Saá M., Gamboa-Salinas J., Castro-Analuiza J. C., "Tourist routes, a link between economic and cultural development in the modern marketplace," *Journal of Positive School Psychology*, s. 1562-1572, 2022.
- [53] "LADEX Chłodnictwo-Klimatyzacja Schwarz Mydlarz Sp. J.," [Online]. <https://www.eladex.com.pl>. [Dostęp 17.02.2022].
- [54] ROZPORZĄDZENIE WYKONAWCZE KOMISJI (UE) NR 2015/2067 z dnia 17 listopada 2015 r. spełniające wymagania zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014.
- [55] ROZPORZĄDZENIE WYKONAWCZE KOMISJI (UE) NR 2015/2066 z dnia 17 listopada 2015 r. ustanawiające warunki zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014.
- [56] Mota-Babiloni A., Navarro-Esbrí J., Barragán A., Molés F., Peris B., "Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline," *International Journal of Refrigeration*, s. 81 - 90, 2014.
- [57] Altinkaynak M., "Exergetic Performance Analysis of HFO Based Refrigerants," *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, s. 245 -254, 2021.
- [58] Sethi A., Pottker G., Motta S. Y., "Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration," *Science and Technology for the Built Environment*, s. 1175 - 1184, 2016.
- [59] Altinkaynak M., "Exergetic performance analysis of low GWP alternative refrigerants for R404A in a refrigeration system," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, s. 842 - 850, 2021.
- [60] Mauro A. W., Naploli G., Pelella F., Viscito L., "Flow boiling heat transfer and pressure drop data of non-azeotropic mixture R455A in a horizontal 6.0 mm stainless-steel tube," *International Journal of Refrigeration*, s. 195 - 205, 2020.

- [61] Saengsikhiao P., Taweekun J., Maliwan K., Sae-Ung S., Theppaya T., "Investigation and analysis of R463A as an alternative refrigerant to R404A with lower global warming potential," *Energies*, s. 1514 - 2352, 2020.
- [62] Llopis R., Calleja-Anta D., Maiorino A., Nebot-Andrés L., Sánchez D., Cabello R., "TEWI analysis of a stand-alone refrigeration system using low-GWP fluids with leakage ratio consideration," *International Journal of Refrigeration*, s. 279 - 289, 2020.
- [63] Devecioğlu A. G., Oruç V., "Drop-in assessment of plug-in R404A refrigeration equipment using low-global warming potential mixtures," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2022.
- [64] Llopis R., Calleja-Anta D., Sánchez D., Nebot-Andrés L., Catalán-Gil J., Cabello R., "R-454C, R-459B, R-457A and R-455A as low-GWP replacements of R-404A: Experimental evaluation and optimization," *International Journal of Refrigeration*, s. 133 - 143, 2019.
- [65] Aprea C., Greco A., Maiorino A., "HFOs and their binary mixtures with HFC134a working as drop-in refrigerant in a household refrigerator: Energy analysis and environmental impact assessment," *Applied Thermal Engineering*, s. 226 - 236, 2018.
- [66] Heredia-Aricapaa Y., Belman-Flores J. M., Mota-Babilonib A., Serrano-Arellanoc J., García-Pabón J. J., "Overview of low GWP mixtures for the replacement of HFC refrigerants: R134a, R404A and R410A," *International Journal of Refrigeration*, s. 113 - 123, 2020.
- [67] Cui Z., Qian S., Yu J., "Performance assessment of an ejector enhanced dual temperature refrigeration cycle for domestic refrigerator application," *Applied Thermal Engineering*, s. 114826, 2020.
- [68] Oruç V., Devecioğlu A. G., "Experimental investigation on the low-GWP HFC/HFO blends R454A and R454C in a R404A refrigeration system," *International Journal of Refrigeration*, s. 242 - 251, 2021.
- [69] Nowacki B., "Instalacje chłodnicze w supermarkecie," *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, s. 64-71, 2016.
- [70] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 2019/2024 z dnia 1 października 2019 r. ustanawiające wymogi dotyczące ekoprojektu dla urządzeń chłodniczych z funkcją sprzedaży bezpośredniej na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE.
- [71] Polak E., "Mrożenie i schładzanie wyrobów kulinarnych i mięsa," *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, s. 60-62, 2006.

- [72] Trzaskalik T., "Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań.," Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2014.
- [73] Roy B., Wielokryterialne wspomaganie decyzji, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1990.
- [74] Steuer R., Multiple criteria optimization and computation, Athens: Univeristy of Georgia, 2004.
- [75] Shi Y., Wang S., Kou G., Wallenius J., New State of MCDM in the 21st Century. Selected paper of the 20th International Conference on Multiple Criteria Decision Making 2009., Berlin: Springer, 2011.
- [76] Bieńczak K., Bieńczak M. and Kiciński M., "The methodology of multiple criteria decision making for selecting the heating medium or multifunctional sterilizer," Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, s. 10-12, 2016.
- [77] Bernat T., Bieńczak K. and Górny K., "The methodology of multiple criteria decision making for selecting the refrigeration system of gastronomic furniture," Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, s. 15-18, 2019.
- [78] Memariania A., Aminib A. and Alinezhadc A., "Sensitivity Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW): The Results of Change in the Weight of One Attribute on the Final Ranking of Alternatives," Journal of Industrial Engineering, s. 13-18, 2009.
- [79] Memariania A., Aminib A. and Alinezhadc A., "Sensitivity Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW): The Results of Change in the Weight of One Attribute on the Final Ranking of Alternatives.," Journal of Industrial Engineering, 2009.
- [80] Rachuneo, "Porównywarka cen prądu dla firm," [Online]. <https://www.rachuneo.pl/prad-dla-firm?subpage=energy-offers-list>. [Dostęp 19.02.2023].
- [81] C. F. Ltd, "Carbon Footprint," 2022. [Online]. <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>. [Dostęp 19.02.2023].
- [82] PN-EN ISO 14064-3:2019-07 Gazy cieplarniane -- Część 3: Specyfikacja i wytyczne weryfikacji oraz walidacji oświadczeń dotyczących gazów cieplarnianych.
- [83] ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (WE) NR 1005/2009 z dnia 16 września 2009 r. w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową.

- [84] "Komat Mieczysław Kozłowski Producent mebli i urządzeń ze stali nierdzewnej," [Online]. <https://komat.com.pl>. [Dostęp 16.02.2022].
- [85] Seyoung C., Jinwoo O., Yunho H., Hoseong L., "Life cycle climate performance evaluation (LCCP) on cooling and heating systems in South Korea," *Applied Thermal Engineering*, s. 88 - 98, 2017.
- [86] Naeem A., Ali Raza K., Nasrullah K., Aun H., Zahid S., Muhammad Shoaib S., "Natural and synthetic refrigerants, global warming: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, s. 557 - 569, 2018.
- [87] Mota-Babiloni A., Makhnatch P., "Predictions of European refrigerants place on the market following F-gas regulation restrictions," *International Journal of Refrigeration*, s. 101 -110, 2021.
- [88] Llopis R., Sánchez D., Cabello R., Nebot-Andrés L., Catalán-Gil J., "R-407H as drop-in of R-404A. Experimental analysis in a low temperature direct expansion commercial refrigeration system," *International Journal of Refrigeration*, s. 11 - 23, 2017.
- [89] Bortolini M., Gamberi M., Gamberini R., Graziani A., Lolli F., Regattieri A., "Retrofitting of R404a commercial refrigeration systems using R410a and R407f refrigerants," *International Journal of Refrigeration*, s. 142 - 152, 2015.
- [90] ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 304/2008 z dnia 2 kwietnia 2008 r. ustanawiające, na mocy Rozporządzenia (WE) nr 842/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady, minimalne wymagania i warunki dotyczące wzajemnego uznawania certyfikacji.
- [91] ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 306/2008 z dnia 2 kwietnia 2008 r. ustanawiające na mocy Rozporządzenia (WE) nr 842/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady minimalne wymagania i warunki wzajemnego uznawania certyfikacji.

Testing of selected refrigeration systems of environmentally and user-friendly gastronomic furniture

The analysis of the literature made it possible to notice the absence of widely available information on refrigeration systems operating in gastronomic furniture. It was noticed that in most cases, researchers dealt with gastronomic furniture only from the point of view of keeping food at a controlled temperature, often say nothing of important facts regarding the operation of the refrigeration system.

The completed research work referred to the gaps in the available literature. Therefore, the focus was on refrigeration installations in gastronomic furniture. In the first part, a literature review was made. In modern solutions, it is expected that the devices and all cooperating elements have the least harmful impact on the environment and the user, while at the same time the highest possible energy efficiency. The available refrigerants that can meet the modern requirements in terms of utility and law are presented. The characteristics of the discussed refrigerants concerned substances of natural origin and modern synthetic substances. In the next part, the characteristics of gastronomic furniture are presented in order to be introduced to the further part of the work.

The studies of the literature made it possible to clearly define the purpose and scope of the work. The following section presents the methodology to support decision-making in the optimal selection of an alternative refrigerant. Then, one of the multi-criteria support methods was selected in order to analyze the selection of an alternative refrigerant that could meet difficult requirements.

After selecting the optimal refrigerant in order to carry out the necessary research with its use in refrigeration systems of gastronomic furniture, a project was developed and then a test stand was made and tested. The tests made it possible to refine the design solutions of the station by equipping it with a time switch as well as condensing pressure and suction pressure regulators. After confirming the correct operation of the stand, the proper tests were started. On the test stand, tests were carried out on the operation of the refrigeration system in various operating conditions. In order to benchmark the alternative refrigerant to the refrigerant used in previous years, R404a was first tested. Then, the working medium was replaced without changing any element of the refrigeration system with the modern R455a refrigerant.

The system was tested in terms of achieved operating parameters, such as condensing and evaporating pressure, temperature after and before the condenser, temperature after the

evaporator, as well as in terms of energy consumption and, in selected cases, the possibility of recovering condensation heat as energy for further use. At the end of the thesis, directions for further research were indicated.