



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU



Dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: inżynieria lądowa geodezja i transport

PRACA DOKTORSKA

**Projekt, wykonanie oraz badanie wytwornicy wody ziębniczej,
do zastosowań gospodarczych i przemysłowych pracującej
na ekologicznym czynniku termodynamicznym**

mgr inż. Sebastian Śniegowski

Promotor:
dr hab. inż. Krzysztof Bieńczyk, prof. PP

Poznań, 2025 r.

Spis treści

Oznaczenia	3
1. Wstęp	6
2. Przegląd literatury	8
2.1. Usystematyzowanie dokumentów legislacyjnych i aktów prawnych,	8
2.1.1. Protokoły i Konwencje	8
2.1.2. Akty prawne	10
2.2. Charakterystyka wytwornic wody lodowej,	23
2.2.1. Sprężarki,	24
2.2.2. Skraplacze	30
2.2.3. Parowniki	35
2.3. Czynniki chłodnicze	35
2.4. Podsumowanie przeglądu literatury	45
3. Cel i zakres pracy	49
4. Dobór naturalnego czynnika chłodniczego do wytwornicy wody lodowej	50
4.1. Przegląd naturalnych czynników chłodniczych,	50
4.2. Wielokryterialna procedura wyboru czynnika chłodniczego,	63
5. Projekt stanowiska badawczego wytwornicy wody ziębniczej, do zastosowań gospodarczych i przemysłowych pracującej na ekologicznym czynniku termodynamicznym oraz jego wykonanie,	73
6. Badania na zaprojektowanym stanowisku,	89
7. Porównanie wyników badań własnych z wytwornicami wody lodowej z czynnikami syntetycznymi i naturalnym	109
8. Wnioski	111
9. Kierunek dalszych badań,	114
10. Streszczenie	115
11. Literatura	117

Oznaczenia

Konwencja - umowa międzynarodowa pociągająca skutki prawne

Protokół – międzynarodowe porozumienie państw członkowskich

UNFCCC – Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu

TEWI - całkowity równoważnik tworzenia efektu cieplarnianego

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

CO₂ – Dwutlenek węgla,

O₃ – Ozon,

HCFC – wodorochlorofluorowęglowodory to substancje organiczne, które zawierają chlor, fluor i wodór. Ich stabilność chemiczna jest mniejsza niż CFC, co skutkuje ich szybszym rozkładem w atmosferze, przez co mają mniejszy wpływ na warstwę ozonową.

HFC – to związki chemiczne, które zawierają fluor i wodór, ale nie zawierają atomów chloru ani bromu. W porównaniu do CFC, HFC mają mniejsze zdolności do niszczenia ozonu, a ich wskaźnik ODP wynosi 0.

CFC –chlorofluorowęglowodory, organiczne związki chemiczne, które zawierają atomy chloru, fluoru i węgla. Są one bardzo stabilne chemicznie, co powoduje, że długo utrzymują się w atmosferze, gdzie mogą rozkładać się na związki, które niszczą warstwę ozonową.

HFO – Hydrofluoroolefiny to nowoczesna grupa związków, które są nienasycone, czyli zawierają podwójne wiązanie węgiel-węgiel), co wpływa na ich właściwości chemiczne. HFO są uważane

za substancje bardziej przyjazne środowisku w porównaniu do HFC, ponieważ mają bardzo niski ODP i GWP.

Chiller - pojedynczy układ, którego podstawową funkcją jest schładzanie płynu będącego nośnikiem ciepła (takiej jak woda, glikol, solanka lub CO₂) do celów chłodzenia, przetwarzania, konserwacji lub zapewnienia komfortu;

EER – znamionowy wskaźnik efektywności energetycznej (EER) oznacza wyrażony w kW z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku stosunek „znamionowej wydajności chłodniczej urządzeń przemysłowych wyrażonej w kW” do „znamionowego poboru mocy”

SEER – znamionowy wskaźnik sezonowej efektywności energetycznej (SEER) oznacza całościowy wskaźnik efektywności energetycznej agregatu chłodniczego dla klimatyzacji bytowej, reprezentatywny dla sezonu chłodniczego, obliczany jako stosunek „referencyjnego rocznego zapotrzebowania na chłód” do „rocznego zużycia energii na potrzeby chłodzenia”

SEPR – znamionowy współczynnik sezonowej sprawności energetycznej (SEPR) oznacza współczynnik efektywności wysokotemperaturowego przemysłowego agregatu chłodniczego w warunkach znamionowych znormalizowanych reprezentatywny dla zmian obciążenia i temperatury otoczenia w ciągu roku oraz obliczony jako stosunek rocznego zapotrzebowania na chłodzenie urządzeń przemysłowych do rocznego zużycia energii elektrycznej

R290 – czynnik chłodniczy propan

R1270 – czynnik chłodniczy propylen

R717 – czynnik chłodniczy amoniak

R744 – czynnik chłodniczy dwutlenek węgla

R134a, R32, R404a, R407c, R410a, – syntetyczne czynniki chłodnicze

POE – oleje poliestrowe,

PAG – oleje syntetyczne (ang. Polyalkylene glycol)

PVE – oleje syntetyczne na bazie poliwinylesteru

Retrofit – wykonanie zmiany czynnika chłodniczego z obecnego na nowy w instalacji chłodniczej

1. Wstęp

Aktualny rozwój urządzeń chłodniczych oraz rosnące wymagania związane z ograniczaniem emisji dwutlenku węgla i ochroną środowiska naturalnego egzekwują obowiązek dalszego rozwoju i badań w celu uzyskania nowych, ekologicznych i efektywnych energetycznie rozwiązań w dziedzinie chłodnictwa. Zapotrzebowanie systemów i instalacji chłodniczych w gospodarce przemysłowej i komercyjnej wciąż rośnie, a wybór odpowiednich czynników chłodniczych będzie coraz mniejszy. Dotychczas wykorzystywane syntetyczne czynniki chłodnicze, takie jak CFC i HFC, charakteryzują się wysoką efektywnością chłodzenia lecz posiadają znaczący wpływ na środowisko poprzez wysokie wartości współczynników GWP. Globalne trendy dążą do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz wprowadzania surowszych regulacji prawnych. Konieczne staje się zatem poszukiwanie alternatyw, które będą mogły sprostać rosnącym wymaganiom zarówno technologicznym, jak i ekologicznym.

W odpowiedzi na regulacje i akty prawne jako jedyne i długoterminowe rozwiązania jest stosowanie naturalnych, niskoemisyjnych czynników chłodniczych takich jak węglowodory. Wykorzystywanie ich w instalacjach i systemach chłodniczych pozwala na redukcję emisji dwutlenku węgla, a w konsekwencji ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko. Węglowodory, jako naturalne czynniki chłodnicze, posiadają niskie współczynniki potencjału globalnego ocieplenia (GWP), nie są toksyczne oraz charakteryzują się doskonałymi własnościami termodynamicznymi, co stawia je w atrakcyjnej pozycji jako alternatywy dla tradycyjnych czynników syntetycznych.

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zaprojektowanie, wykonanie oraz przeprowadzenie badań wytwornicy wody żiębniczej dedykowanej dla zastosowań gospodarczych i przemysłowych, wykorzystującej ekologiczny czynnik chłodniczy. W dysertacji zostaną poddane analizie aspekty konstrukcyjne z uwzględnieniem wymagań stawianych nowoczesnym systemom chłodniczym, takie jak efektywność energetyczna, niezawodność pracy oraz wpływ na środowisko.

Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego wytwornicy wody żiębniczej wymaga doboru komponentów uwzględniających specyficzne własności naturalnego czynnika chłodniczego o niskim GWP, gdzie większość ze wspomnianych czynników stanowią łatwopalne węglowodory. Znaczącym elementem rozprawy będzie również wyznaczenie rzeczywistej mocy chłodniczej, badanie efektywności energetycznej zaprojektowanego układu w szerokim zakresie temperatur roboczych, różnych temperatur otoczenia w warunkach zmiennego obciążenia.

Badania te stanowią odpowiedź na konieczność wdrażania ekologicznych instalacji i systemów chłodzenia, które łączą w sobie wydajność energetyczną, oszczędność eksploatacyjną oraz zgodność z regulacjami i aktami prawnymi ochrony środowiska. Wprowadzenie na rynek efektywnej, ekologicznej wytwornicy wody ziębniczej może stanowić istotny krok w kierunku zrównoważonego rozwoju w branży chłodniczej oraz przyczynić się do realizacji celów związanych z redukcją emisji gazów cieplarnianych.

W niniejszej pracy podjęto próbę nie tylko zaprojektowania nowoczesnego urządzenia, ale także przetestowania jego zastosowania w rzeczywistych warunkach pracy, co ma na celu wykazanie potencjału ekologicznych systemów chłodzenia w praktyce przemysłowej i gospodarczej.

2. Przegląd literatury

2.1. Usystematyzowanie dokumentów legislacyjnych i aktów prawnych,

2.1.1. Protokoły i Konwencje

Konwencja wiedeńska została sporządzona w dniu 22 marca 1985 r. i weszła w życie w dniu 22 września 1988 r. Jest pierwszą próbą która zakończyła się sukcesem stworzenia zasad na podstawie wspólnych działań wielu państw w celu ochrony warstwy ozonowej. Konwencja jest umową wielostronną o zasięgu międzynarodowym. W Polsce została ratyfikowana w dniu 25 czerwca 1990 r., lecz weszła w życie od dnia 11 października 1990 r. [1].

Cele konwencji [1] :

- w Konwencji Wiedeńskiej określono zasady które mają na celu ochronę warstwy ozonowej. Konwencja została zawarta na podstawie skierowanych przez naukowców upomnień, że jej zubażanie stwarza zagrożenie dla środowiska oraz zdrowia ludzi,
- podejmowanie stosownych działań oraz współpracy w celu ograniczenia, kontroli, redukcji lub zapobieganiu działalności człowieka, gdyby taka działalność mogła mieć szkodliwe rezultaty w następstwie zmiany bądź przypuszczalnej zmiany warstwy ozonowej,
- współpraca w precyzowaniu uzgodnionych środków, norm i procedur w celu realizacji konwencji mając na uwadze zaakceptowanie należytych protokołów,
- jest konwencją zasad, której celem jest popieranie współpracy międzynarodowej na podstawie wymiany informacji i doświadczeń na temat oddziaływań człowieka na warstwę ozonową. Nie zobowiązuje ona krajów do podejmowania żadnych środków.

Konwencja Wiedeńska która weszła w życie w 1988 r., została pierwszą konwencją w historii podpisaną przez zainteresowane kraje i została powszechnie ratyfikowana w 2009 r. Dzięki wysiłkom środowiska międzynarodowego udało się zmniejszyć globalne zużycie substancji zubażających warstwę ozonową aż o 98%. Na ten moment nie oczekuje się całkowitej regeneracji warstwy ozonowej przed drugą połową stulecia [1].

W ramach Konwencji Wiedeńskiej rozpoznano również substancje pochodzenia antropogenicznego naturalnego które uważa się za niszczące warstwę ozonową [1]:

- substancje chlorowe (CFC, HCFC),
- substancje węglowe (CO, CO₂, CH₄),
- substancje bromowe,
- substancje azotowe (N₂O, NO_x),
- substancje wodorowe (H₂, H₂O),

Protokół montrealjski przyjęty w 1987 r., który wszedł w życie w 1989r. jest jedynym traktatem ONZ ratyfikowanym przez ogół państw na świecie członków ONZ w liczbie 197. Określany jako krok milowy w historii ONZ. Ze względu na ciągły rozwój naukowy, gospodarczy i techniczny poddawany jest ciągłym zmianom. Aktualnie dotyczy on około 100 chemikaliów wytworzonych przez człowieka, które naruszają zdolność warstwy ozonowej do zabezpieczenia ludzi oraz pozostałych form życia przed szkodliwym promieniowaniem ultrafioletowym generowanym przez słońce [2].

Cele protokołu [2] [3]:

- Protokół Montrealski jest światowym porozumieniem do Konwencji Wiedeńskiej o ochronie warstwy ozonowej w ziemskiej stratosferze poprzez stopniowe wycofywanie z obrotu chemikaliów, które ją zubożają,
- gazy cieplarniane są substancjami zubożającymi warstwę ozonową o dużej sile działania. Zasadniczej znaczenie dla łagodzenia zmian klimatycznych ma etapowe redukowanie z obrotu gazów cieplarnianych. Mimo tego, że wodorofluorowęglowodory (HFC) nie zubożają warstwy ozonowej, tenże protokół ma za zadanie etapowe redukowanie ich produkcji i zużycia w celu uniknięcia zamiany substancji zubożających warstwę ozonową wodorofluorowęglowodórami (HFC), które w istotnym znaczeniu mają wpływ na zmianę klimatu,
- zakaz importu substancji kontrolowanych w protokole,
- obowiązek tworzenia raportów dotyczących wytwarzania, importu i eksportu substancji kontrolowanych,
- wspomaganie projektów badawczych, rozwoju, współdzielenie się informacjami, mającymi na celu polepszenie technologii odzysku, regeneracji i utylizacji substancji kontrolowanych, oraz przysposabianie rozwiązań nowatorskich, procentującymi w zmniejszaniu emisji.

Protokół w Kioto, został sporządzony w dniu 11 grudnia 1997 r. w sprawie zmian klimatu. Protokół ten był pierwszym dokumentem dopełniającym Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu (UNFCCC). Główną wytyczną stawianą narodom, które zaakceptowały protokół było zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w latach 2008-2012 o co najmniej 5% w stosunku do roku bazowego 1990. Doprowadzając ten cel do skutku kraje zobligowało się do [3][4]:

- wzrostu efektywności energetycznej w działach gospodarki,
- udostępniania sprawozdań dotyczących antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych,

- wprowadzania nowatorskich i odnawialnych źródeł energii i absorbujących pochłanianie CO₂,
- inicjowania narodowych programów zmniejszania emisji gazów cieplarnianych i zapobieganiu zmianom klimatu,
- współdziałania w zakresie badań naukowo-technicznych opisanie i zminimalizowania skutków środowiskowych, społecznych i ekonomicznych wynikających z niszczenia klimatu.

Protokół podpisany w Kioto zakładał sposób handlowania limitami emisji gazów cieplarnianych w zakresie rynku dwutlenku węgla. Narody które dysponują nadmiarem ekwiwalentu CO₂ mają możliwość sprzedaży innym narodom które wyczerpały własne limity. Został wprowadzony mechanizm czystego rozwoju, którego zadaniem jest wspieranie narodów rozwijających się w dążeniu do celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Dzięki pomocy w dążeniu do celu była możliwość uzyskania większego limitu emisji. Tyczy się to następujących gazów cieplarnianych objętych protokołem [3][4] :

- metan (CH₄),
- fluorowęglowodory (HFC),
- perfluorowęglowodory (PFC),
- dwutlenek węgla (CO₂),
- podtlenek azotu (N₂O),
- sześćciofluorek siarki (SF₆).

Realnie protokół obowiązywał od w 2005 roku, ponieważ była potrzebna ratyfikacja 55 państw, których emisje wynoszą 55% całkowitych emisji dwutlenku węgla w 1990 roku. W Polsce porozumienia nabrało mocy prawnej w 2002 roku, a jego założenia zostały zrealizowane w określonym czasie. Stany Zjednoczone oraz Kanada nie zostały objęte porozumieniem, tymczasem Indie wraz z Chinami przystąpiły do porozumienia lecz nie zostały objęte limitami ograniczającymi emisję gazów cieplarnianych [2][3][4].

2.1.2. Akty prawne

Poniżej zostaną omówione rozporządzenia Parlamentu Europejskiego, Rady Unii Europejskiej oraz Komisji Unii Europejskiej.

Rozporządzenie nr 842/2006 PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych ustanawia zredukowanie, uniemożliwienie, a tym samym zmniejszenie emisji fluorowanych gazów cieplarnianych dotyczących Protokołu

z Kioto. Znormalizowano kwestie dotyczące stosowania, odzysku, niszczenia fluorowanych gazów cieplarnianych, etykietowaniem produktów, urządzeń je zawierającym i zakazem wprowadzania do obiegu określonych urządzeń w tym Protokole. W rozporządzeniu ujęto kwestie związane z szkoleniami, certyfikowaniem techników i firma mających kontakt z fluorowanymi gazami cieplarnianymi. Między wieloma zapisami rozporządzenia znajdowały się [5]:

- bezwzględne przeciwdziałanie wyciekom oraz realizować remonty jakichkolwiek wycieków,
- bezwzględne aplikowanie stałych detektorów wykrywania wycieków dla urządzeń, w których znajduje się co najmniej 300 kg, fluorowanych gazów cieplarnianych,
- świadczenie posiadania certyfikatu personelu i przedsiębiorstwa w przypadku zaangażowania w instalacje, serwisowanie i konserwacje urządzeń zawierających fluorowane gazy cieplarniane,
- bezwzględne wykonywanie okresowych kontroli szczelności urządzeń w których znajduje się co najmniej 3 kg fluorowanych gazów cieplarnianych,
- bezwzględne wykonywanie odzysku fluorowanych gazów cieplarnianych mając na celu zagwarantowanie regeneracji, recyklingu lub utylizacji,
- bezwzględne wykonywanie oznaczania etykietami urządzenia oraz produkty zawierające fluorowane gazy cieplarniane,
- bezwzględne raportowanie rocznych sprawozdań obrotu fluorowanymi gazami cieplarnianymi przez producentów, eksporterów od 2008 r.

Rozporządzenie 842/2006 w znaczącym stopniu zredukowało wykorzystywanie fluorowanych gazów cieplarnianych poprzez wdrożenie zakazu obrotu poniższych produktów[5]:

- opakowań niezdatnych do ponownego napełnienia – od 4 lipca 2017 r.,
- systemów przeciwpożarowych oraz gaśnic zawierających PFC – od 4 lipca 2017 r.,
- otwartych systemów chłodniczych – od 4 lipca 2017 r.,
- pianek jednoskładnikowych, obuwia, okien oraz aerozoli zawierających fluorowane gazy cieplarniane.

Rozporządzenie to zostało w późniejszym czasie zastąpione Rozporządzeniem 517/2014 r.

Rozporządzenie nr 1005/2009 PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 16 września 2009 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych uchwala zapisy odnoszące się do produkcji, wprowadzania do obrotu, stosowania odzysku, przewozu, wywozu, stosowania, recyklingu, odzysku, regeneracji i utylizacji substancji zubażających warstwę ozonową.

Obostrzenia dotyczące substancji kontrolowanych zostały umieszczone w rozporządzeniu. Jednymi z najważniejszych są [6]:

- bezwzględny zakaz produkowania substancji kontrolowanych,
- bezwzględny zakaz używania i wdrażania do obrotu substancji kontrolowanych,
- bezwzględny zakaz wdrażania do obrotu urządzeń oraz produktów zawierających substancje kontrolowane,
- bezwzględne wykonanie kontroli szczelności urządzeń w których znajduje się co najmniej 3 kg substancji kontrolowanych i bezwzględny obowiązek naprawy wszystkich nieszczelności bez zwłoki w przeciągu 14 dni,
- bezwzględny odzysk substancji kontrolowanych znajdujących się w urządzeniach chłodniczych, klimatyzacyjnych, pompach ciepła, podczas konserwacji bądź serwisowania urządzeń lub przed ich demontażem lub usunięciem w celu utylizacji, recyklingu lub regeneracji,
- obowiązkowe stosowanie pojemników spełniających właściwości do ponownego napełnienia,
- bezwzględne prowadzenie raportów ilości oraz rodzaju substancji odzyskanych oraz dodanych w urządzeniach zawierających co najmniej 3 kg substancji kontrolowanych,
- bezwzględne przeprowadzenie dodatkowej kontroli szczelności w czasie do jednego miesiąca po naprawie nieszczelności w celu potwierdzenia, że naprawa została wykonana prawidłowo,
- bezwzględne raportowanie przez przedsiębiorstwa w zakresie produkcji, eksportu, importu i utylizacji substancji kontrolowanych,
- możliwość używania wodorochlorofluorowęglowodorów (HCFC) pochodzących z procesu recyklingu do działań konserwacji bądź serwisowania zainstalowanych dotąd urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych, pomp ciepła maksymalnie do 31.12.2014 r.

Z dniem 1 stycznia 2015 r. weszło w życie Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w temacie fluorowanych gazów cieplarnianych wraz z uchyleniem 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. Rozporządzenie to uchwała nowelizację prawa europejskiego w zakresie fluorowanych gazów cieplarnianych oraz wdraża nowe powinności dla operatorów urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych, pomp ciepła, agregatów samochodów ciężarowych chłodni i naczep chłodni zawierających fluorowane gazy cieplarniane. Obowiązujące

rozporządzenie zastąpiło wcześniejsze rozporządzenie 842/2006 PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie niektórych fluorowanych gazów cieplarnianych. Po zestawieniu rozporządzeń, nowe 517/2014 wdraża wiele nowości wraz z programem zmniejszenia używania fluorowanych gazów cieplarnianych, następne ograniczenia dotyczące wprowadzenia do obrotu urządzeń zawierających F-gazy oraz zmieniony wykaz monitorowanych substancji. Najważniejsza zmiana to przekształcenie warunków z masy czynnika na tony ekwiwalentu CO₂ przy charakteryzowaniu ładunku substancji chłodniczej w obiegu chłodniczym [6].

Wprowadzanie do obrotu nowych urządzeń i produktów chłodniczych zestawionych w tabeli numer 1 zostało zakazane. Obostrzenie to zostało uzależnione od rodzaju urządzenia, produktu oraz współczynnika globalnego ocieplenia wybranego fluorowanego gazu cieplarnianego. Nasuwa się wniosek, że ceny czynników o wysokich wartościach współczynnika GWP będą wzrastać [6].

ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych, zmieniające dyrektywę (UE) 2019/1937 i uchylające rozporządzenie (UE) nr 517/2014. [25]

W ramach Europejskiego Zielonego Ładu określonego w komunikacie Komisji z dnia 11 grudnia 2019 r. zapoczątkowano nową unijną strategię na rzecz wzrostu, której celem jest przekształcenie Unii w sprawiedliwe i dobrze prosperujące społeczeństwo żyjące w nowoczesnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej gospodarce. W strategii tej potwierdzono, że ambicją Komisji jest, by do 2050 r. Europa stała się pierwszym kontynentem neutralnym dla klimatu i wolnym od zanieczyszczeń, a celem strategii jest również ochrona zdrowia i dobrostanu obywateli przed zagrożeniami i negatywnymi skutkami związanymi ze środowiskiem, przy jednoczesnym zapewnieniu inkluzywnej, uczciwej i sprawiedliwej transformacji, tak by nikt nie został wykluczony. Ponadto Unia zobowiązała się do zapewnienia pełnego wdrożenia rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 oraz 8 programu działań w zakresie środowiska ustanowionego decyzją Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2022/591, a także do realizacji Agendy ONZ na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030 i określonych w niej celów zrównoważonego rozwoju [25].

Tabela 1 Wyciąg z Rozporządzenia nr 517/2014 określający zakazy dotyczące wprowadzania do obrotu poszczególnych produktów i urządzeń z obszaru chłodnictwa [6]

Produkty i urządzenia W stosownych przypadkach współczynnik ocieplenia globalnego (GWP) mieszanin zawierających fluorowane gazy cieplarniane oblicza się zgodnie z załącznikiem IV, jak określono w art. 2 pkt 6		Data wprowadzenia zakazu
1. Pojemniki nienadające się do ponownego napełnienia, zawierające fluorowane gazy cieplarniane stosowane do serwisowania, konserwacji lub napełnienia urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych lub pomp ciepła, systemów ochrony przeciwpożarowej lub rozdzielnic, lub stosowane jako rozpuszczalniki		4 lipca 2007 r.
2. Otwarte systemy wykorzystujące bezpośrednie odparowywanie, zawierające HFC i PFC jako czynniki chłodnicze		4 lipca 2007 r.
3. Urządzenia ochrony przeciwpożarowej	zawierające PFC	4 lipca 2007 r.
	zawierające HFC-23	1 stycznia 2016 r.
4. Okna do użytku domowego zawierające fluorowane gazy cieplarniane		4 lipca 2007 r.
5. Pozostałe okna zawierające fluorowane gazy cieplarniane		4 lipca 2008 r.
6. Obuwie zawierające fluorowane gazy cieplarniane		4 lipca 2006 r.
7. Opony zawierające fluorowane gazy cieplarniane		4 lipca 2007 r.
8. Pianki jednoskładnikowe (z wyjątkiem sytuacji, gdy są wymagane po to, by można było spełnić krajowe normy bezpieczeństwa), które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym		4 lipca 2008 r.
9. Pojemniki aerosolowe wprowadzane do obrotu i przeznaczone do powszechnej sprzedaży w celach rozrywkowych i dekoracyjnych, wymienione w pkt 40 załącznika XVII do rozporządzenia (WE) nr 1907/2006, oraz rogi sygnałowe, które zawierają HFC o GWP równym 150 lub większym		4 lipca 2009 r.
10. Domowe chłodziarki i zamrażarki zawierające HFC o GWP równym 150 lub większym		1 stycznia 2015 r.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
Produkty i urządzenia W stosownych przypadkach współczynnik ocieplenia globalnego (GWP) mieszanin zawierających fluorowane gazy cieplarniane oblicza się zgodnie z załącznikiem IV, jak określono w art. 2 pkt 6		Data wprowadzenia zakazu
14. 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.
15. 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.
16. Pianki, które zawierają HFC o GWP równym 150 lub większym, z wyjątkiem, gdy są wymagane, by można było spełnić krajowe normy bezpieczeństwa	Polistyren ekstrudowany (XPS)	1 stycznia 2020 r.
	Inne pianki	1 stycznia 2023 r.
17. Aerosole techniczne, które zawierają HFC o GWP równym 150 lub większym, z wyjątkiem, gdy są wymagane, by można było spełnić krajowe normy bezpieczeństwa lub gdy są używane do zastosowań medycznych		1 stycznia 2018 r.

ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych jest najbardziej aktualnym rozporządzeniem które wprowadziło wiele nowych definicji, rozszerzono definicję regeneracji, zakwalifikowano jako F-gazy fluorowane substancje (w tym HFO i HCFO). Zdefiniowano w rozporządzeniu nazwę chiller oraz kategorię urządzenia chłodniczego, klimatyzacyjnego którym jest chiller, co w temacie tej rozprawy zostało nazwane wytwornicą wody ziębniczej [25].

Wprowadzono nowy harmonogram wycofywania wodorofluorowęglowodorów który przyjmuje ich maksymalne ilości jakie można wprowadzić do obrotu w Uni Europejskiej w danym roku co zawarte jest w tabeli 2. Obecne rozporządzenie (UE) 2024/573 względem Rozporządzenia 517/2014 przedstawia wycofywanie HFC, już w 2025 roku do 24% gdzie dotychczasowe rozporządzenie mówiło o 31% a w 2027 do 12% względem 2015 roku. W kolejnych latach od 2030 zgodnie z tabelą 2 będą wycofywane aż do całkowitego zakazu wodorofluorowęglowodorów w 2050 roku [25].

Tabela 2 Wyciąg z rozporządzenia (UE) 2024/573 względem Rozporządzenia 517/2014 przedstawiający wycofywanie HFC od 2025 do 2050 roku na podstawie maksymalnej ilości wprowadzanej na rynek europejski. [25]

Lata	Maksymalna ilość w tonach ekwiwalentu dwutlenku węgla
2025 – 2026	42 874 410
2027 – 2029	21 665 691
2030 – 2032	9 132 097
2033 – 2035	8 445 713
2036 – 2038	6 782 265
2039 – 2041	6 136 732
2042 – 2044	5 491 199
2045 – 2047	4 845 666
2048 – 2049	4 200 133
2050 i kolejne lata	0

Rozporządzenie (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. zaktualizowane zostało również o ograniczenie wprowadzania do obrotu produktów i urządzeń, w tym ich części, wymienionych w załączniku IV (tabela 3), z wyłączeniem sprzętu wojskowego, jest zakazane od dnia określonego tym załącznikiem, przy dokonaniu w stosownych przypadkach rozróżnienia w zależności od typu lub współczynnika globalnego ocieplenia gazów [25].

Tabela 3 Wyciąg z Rozporządzenia nr 2024/573 określający zakazy dotyczące wprowadzania do obrotu poszczególnych produktów i urządzeń z obszaru chłodnictwa [25]

ZAKAZY DOTYCZĄCE WPROWADZANIA DO OBROTU, O KTÓRYCH MOWA W ART. 11 UST. 1 Rozporządzenia (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r.

Produkty i urządzenia		Data wprowadzenia zakazu
(1) Puste, częściowo lub całkowicie napełnione pojemniki nienadające się do ponownego napełnienia, przeznaczone do fluorowanych gazów cieplarnianych wymienionych w załączniku I stosowanych do serwisowania, konserwacji lub napełnienia urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych lub pomp ciepła, systemów ochrony przeciwpożarowej lub rozdzielnic elektrycznych, lub stosowanych jako rozpuszczalniki.		4 lipca 2007 r.
STACJONARNE CHŁODNICTWO		
(2) Chłodziarki i zamrażarki domowe:	a) zawierające HFC o GWP równym 150 lub większym;	1 stycznia 2015 r.
	b) zawierające fluorowane gazy cieplarniane, chyba że są one wymagane ze względu na wymogi bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji.	1 stycznia 2026 r.
(3) Chłodziarki i zamrażarki do zastosowań komercyjnych (urządzenia samodzielne):	a) zawierające HFC o GWP równym 2 500 lub większym;	1 stycznia 2020 r.
	b) zawierające HFC o GWP równym 150 lub większym;	1 stycznia 2022 r.
	c) zawierające inne fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym.	1 stycznia 2025 r.
(4) Wszelkie samodzielne urządzenia chłodnicze, z wyjątkiem chillerów, zawierające fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji.		1 stycznia 2025 r.
(5) Urządzenia chłodnicze, z wyjątkiem chillerów i urządzeń, o których mowa w punktach (4) i (6), które zawierają lub których działanie jest uzależnione od:	a) HFC o GWP równym 2 500 lub większym, z wyjątkiem urządzeń przeznaczonych do zastosowań służących schładzaniu produktów do temperatur poniżej -50 °C;	1 stycznia 2020 r.
	b) fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP równym 2 500 lub większym, z wyjątkiem urządzeń przeznaczonych do zastosowań służących schładzaniu produktów do temperatur poniżej -50 °C;	1 stycznia 2025 r.
	c) fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP równym 150 lub większym, chyba że są wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji.	1 stycznia 2030 r.
(6) Wieloagregatowe scentralizowane układy chłodnicze do zastosowań komercyjnych o mocy znamionowej 40 kW lub większej, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I 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 poniżej 1 500.		1 stycznia 2022 r.

Produkty i urządzenia		Data wprowadzenia zakazu
STACJONARNE CHILLERY		
(7) Chillery, które zawierają lub których działanie jest zależne od:	a) HFC o GWP równym 2 500 lub większym, z wyjątkiem urządzeń przeznaczonych do zastosowań służących schładzaniu produktów do temperatur poniżej -50 °C;	1 stycznia 2020 r.
	b) fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP równym 150 lub większym w przypadku chillerów o mocy znamionowej do 12 kW włącznie, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji;	1 stycznia 2027 r.
	c) fluorowanych gazów cieplarnianych dla chillerów o mocy znamionowej do 12 kW włącznie, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji;	1 stycznia 2032 r.
	d) fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP równym 750 dla chillerów o mocy znamionowej powyżej 12 kW, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji.	1 stycznia 2027 r.
STACJONARNE URZĄDZENIA KLIMATYZACYJNE I STACJONARNE POMPY CIEPŁA		
(8) Samodzielne urządzenia klimatyzacyjne i pompy ciepła, z wyjątkiem chillerów:	a) pokojowe urządzenia klimatyzacyjne typu plug-in, które użytkownik końcowy może przemieszczać między pomieszczeniami, zawierające HFC o GWP równym 150 lub większym;	1 stycznia 2020 r.
	b) pokojowe urządzenia klimatyzacyjne, monoblokowe urządzenia klimatyzacyjne, inne samodzielne urządzenia klimatyzacyjne i samodzielne pompy ciepła typu plug-in, o maksymalnej mocy znamionowej do 12 kW włącznie, zawierające fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa. Jeśli wymogi bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji nie pozwalają na stosowanie fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP poniżej 150, limit GWP wynosi 750;	1 stycznia 2027 r.
	c) pokojowe urządzenia klimatyzacyjne, monoblokowe urządzenia klimatyzacyjne inne samodzielne urządzenia klimatyzacyjne i samodzielne pompy ciepła typu plug-in, o maksymalnej mocy znamionowej do 12 kW włącznie, zawierające fluorowane gazy cieplarniane, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa. Jeśli wymogi bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji nie pozwalają na stosowanie alternatyw dla fluorowanych gazów cieplarnianych, limit GWP wynosi 750;	1 stycznia 2032 r.
	d) monoblokowe i inne samodzielne urządzenia klimatyzacyjne i pompy ciepła o maksymalnej mocy znamionowej większej niż 12 kW, ale nieprzekraczającej 50 kW, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa. Jeśli wymogi bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji nie pozwalają na stosowanie fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP poniżej 150, limit GWP wynosi 750;	1 stycznia 2027 r.
	e) inne samodzielne urządzenia klimatyzacyjne i pompy ciepła zawierające fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa. Jeżeli wymogi bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji nie pozwalają na stosowanie fluorowanych gazów cieplarnianych o GWP poniżej 150, limit GWP wynosi 750.	1 stycznia 2030 r.

Produkty i urządzenia		Data wprowadzenia zakazu
(9) Urządzenia klimatyzacyjne typu split i pompy ciepła typu split (*):	a) pojedyncze układy typu split zawierające mniej niż 3 kg fluorowanych gazów cieplarnianych wymienionych w załączniku I, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I o GWP równym 750 lub większym lub których działanie jest od nich zależne;	1 stycznia 2025 r.
	b) układy powietrze-woda typu split o mocy znamionowej 12kW lub mniejszej, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym lub których działanie jest od nich zależne, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji;	1 stycznia 2027 r.
	c) układy powietrze-powietrze typu split o mocy znamionowej 12 kW lub mniejszej, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym lub których działanie jest od nich zależne, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji;	1 stycznia 2029 r.
	d) układy typu split o mocy znamionowej 12 kW lub mniejszej, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane lub których działanie jest od nich zależne, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji;	1 stycznia 2035 r.
	e) układy typu split o mocy znamionowej powyżej 12 kW, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 750 lub większym lub których działanie jest od nich zależne, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji;	1 stycznia 2029 r.
	f) układy typu split o mocy znamionowej powyżej 12 kW, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym lub których działanie jest od nich zależne, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji.	1 stycznia 2033 r.
INNE PRODUKTY I URZĄDZENIA		
(10) Otwarte systemy wykorzystujące bezpośrednio odparowywanie, zawierające HFC i PFC jako czynniki chłodnicze		4 lipca 2007 r.
(11) Urządzenia ochrony przeciwpożarowej:	a) zawierające PFC;	4 lipca 2007 r.
	b) zawierające HFC-23;	1 stycznia 2016 r.
	c) zawierające inne fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I, lub których działanie jest od nich zależne, z wyjątkiem sytuacji, gdy jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa w miejscu eksploatacji.	1 stycznia 2025 r.
(12) Okna do użytku domowego zawierające fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I.		4 lipca 2007 r.
(13) Pozostałe okna zawierające fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I.		4 lipca 2008 r.
(14) Obuwie zawierające fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I.		4 lipca 2006 r.

Produkty i urządzenia		Data wprowadzenia zakazu
(15) Opony zawierające fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I.		4 lipca 2007 r.
(16) Pianki jednoskładnikowe (z wyjątkiem sytuacji, gdy są wymagane po to, by można było spełnić krajowe normy bezpieczeństwa), które zawierają fluorowane gazy cieplarniane wymienione w załączniku I o GWP równym 150 lub większym.		4 lipca 2008 r.
(17) Pianki:	a) Polistyren ekstrudowany (XPS), który zawiera HFC o GWP równym 150 lub większym, chyba że jest to wymagane do spełnienia krajowych norm bezpieczeństwa;	1 stycznia 2020 r.
	b) Pianki inne niż polistyren ekstrudowany (XPS), które zawierają HFC o GWP równym 150 lub większym, chyba że jest to wymagane do spełnienia krajowych norm bezpieczeństwa;	1 stycznia 2023 r.
	c) Pianki zawierające fluorowane gazy cieplarniane, chyba że jest to wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa.	1 stycznia 2033 r.
(18) Pojemniki aerosolowe oferowane na rynku i przeznaczone do powszechnej sprzedaży w celach rozrywkowych i dekoracyjnych, wymienione w pkt 40 załącznika XVII do rozporządzenia (WE) nr 1907/2006, oraz rogi sygnałowe, które zawierają HFC o GWP równym 150 lub większym.		4 lipca 2009 r.
(19) Aerosole techniczne:	a) które zawierają HFC o GWP równym 150 lub większym, chyba że są one wymagane do spełnienia krajowych norm bezpieczeństwa lub gdy są używane do zastosowań medycznych;	1 stycznia 2018 r.
	b) które zawierają fluorowane gazy cieplarniane, chyba że są one wymagane do spełnienia wymogów bezpieczeństwa lub gdy są używane do zastosowań medycznych.	1 stycznia 2030 r.
(20) Produkty higieny osobistej (tj. pianki, kremy, płyny lub spreje), które zawierają fluorowane gazy cieplarniane		1 stycznia 2025 r.
(21) Urządzenia wykorzystywane do chłodzenia skóry, które zawierają fluorowane gazy cieplarniane o GWP równym 150 lub większym lub których działanie jest od nich zależne, chyba że wykorzystuje się je do zastosowań medycznych.		1 stycznia 2025 r.

Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/2281 z dnia 30 listopada 2016 r. dotyczące zrealizowanej dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE wprowadzającej powszechne zasady określania warunków dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów wysokotemperaturowych agregatów chłodniczych, produktów chłodzących, klimakonwektorów wentylatorowych, do produktów ogrzewania powietrznego. Na podstawie tego rozporządzenia można obrać metodę badawczą dotyczącą wyznaczania współczynnika efektywności energetycznej badanego agregatu. Zdefiniowano trzy takie współczynniki wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych EER, SEER i SEPR [30]:

- EER – znamionowy wskaźnik efektywności energetycznej (EER) oznacza wyrażony w kW z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku stosunek „znamionowej wydajności chłodniczej urządzeń przemysłowych wyrażonej w kW” do „znamionowego poboru mocy” [30].

- SEER – znamionowy wskaźnik sezonowej efektywności energetycznej (SEER) oznacza całosciowy wskaźnik efektywności energetycznej agregatu chłodniczego dla klimatyzacji bytowej, reprezentatywny dla sezonu chłodniczego, obliczany jako stosunek „referencyjnego rocznego zapotrzebowania na chłód” do „rocznego zużycia energii na potrzeby chłodzenia” [30].
- SEPR – znamionowy współczynnik sezonowej sprawności energetycznej (SEPR) oznacza współczynnik efektywności wysokotemperaturowego przemysłowego agregatu chłodniczego w warunkach znamionowych znormalizowanych reprezentatywny dla zmian obciążenia i temperatury otoczenia w ciągu roku oraz obliczony jako stosunek rocznego zapotrzebowania na chłodzenie urządzeń przemysłowych do rocznego zużycia energii elektrycznej [30].

Zgodnie z rozporządzeniem Komisji (UE) 2016/2281 rozróżnia się trzy rodzaje agregatów chłodniczych w zależności od zastosowania i temperatury chłodzonego medium które pokazano w tabeli 4 [30].

Tabela 4 Rozróżnienie agregatów chłodniczych w zależności od temperatury schładzanej wody

Lp.	ZASTOSOWANIE		
	Wysokotemperaturowy przemysłowy agregat chłodniczy	Średniotemperaturowy przemysłowy agregat chłodniczy	Klimatyzacja bytowa
1.	Temperatura wylotowa schłodzonej wody między +2°C a 12°C (w warunkach znamionowych przy +7°C)	Temperatura wylotowa schłodzonej wody przy -8°C (w warunkach znamionowych)	Temperatura wylotowa schłodzonej wody min. +2°C
2.	Może, ale nie musi być wyposażony w skraplacz i inne urządzenia pomocnicze.	Może, ale nie musi być wyposażony w skraplacz i inne urządzenia pomocnicze.	Skraplacz oddający ciepło do rozpraszacza, jak powietrze, woda lub grunt
3.	Sprężarka z silnikiem elektrycznym oraz co najmniej jednym parowaczem	Sprężarka z silnikiem elektrycznym oraz co najmniej jednym parowaczem	Wyposażenie w źródło chłodu (z silnikiem elektrycznym lub spalinowym)
4.	Chłodzenie pomieszczenia nie służy zapewnieniu ludziom komfortu termicznego	Chłodzenie pomieszczenia nie służy zapewnieniu ludziom komfortu termicznego	W celu osiągnięcia komfortu termicznego człowieka w pomieszczeniach i jego utrzymania
5.	Wartość SEPR z ErP	Wartość SEPR z ErP	Wartość η_{sc} (SEER) z ErP

Rozporządzenie określa metodologię badania w zdefiniowanych warunkach i pod określonym obciążeniem zaprezentowanych w tabeli 5. Wartości określają wskaźniki obciążenia względem badanego punktu znamionowego A, B, C lub D względem wlotowej temperatury powietrza i temperatur wlotowych i wylotowych wody w parowaczu.

Tabela 5 Warunki obciążenia częściowego służące do obliczania SEPR dla wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych chłodzonych powietrzem

Punkt znamionowy	Wskaźnik obciążenia częściowego dla wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych	Wskaźnik obciążenia częściowego (%)	Zewnętrzny wymiennik ciepła	Wewnętrzny wymiennik ciepła
			temperatura wlotowa powietrza (°C)	Parowacz temperatury wlotowe/wylotowe wody (°C)
				Stała temperatura wylotowa
A	$80 \% + 20 \% \times (T_A - T_D) / (T_A - T_D)$	100	35	12/7
B	$80 \% + 20 \% \times (T_B - T_D) / (T_A - T_D)$	93	25	(*)/7
C	$80 \% + 20 \% \times (T_C - T_D) / (T_A - T_D)$	87	15	(*)/7
D	$80 \% + 20 \% \times (T_D - T_D) / (T_A - T_D)$	80	5	(*)/7

(*) Przy natężeniu przepływu wody określonym podczas badania „A” dla urządzeń o stałym natężeniu przepływu wody lub o zmiennym natężeniu przepływu.

Gdzie:

T_A , T_B , T_C , T_D – są to składowe do obliczenia wskaźnika obciążenia częściowego.

W badaniach uwzględniono zmienny przepływ względem wskaźnika obciążenia częściowego w celu zachowania stałej temperatury wejścia +12°C w punktach znamionowych B, C, D jak zapisane w punkcie A tabela 5.

Stawiane wymogi współczynników wysokotemperaturowych agregatów chłodniczych zależnych od czynnika przekazującego ciepło oraz znamionowych wydajności chłodniczych urządzeń przemysłowych podano w tabelach 6 i 7 w zależności od daty wejścia w życie:

- od dnia 1 stycznia 2018 r. współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych nie może być niższy niż wartości określone w tabeli 6.
- od dnia 1 stycznia 2021 r. współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych nie może być niższy niż wartości określone w tabeli 7.

Ustawodawca stwierdza, że w momencie wejścia w życie niniejszego Rozporządzenia Komisji Uni Europejskiej 2016/2281 z dnia 31 listopada 2016 roku najlepsza dostępna na rynku technologia dla wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych pod względem współczynnika sezonowej sprawności energetycznej jest zestawiona tabela 8 i można domniemywać, że to te lub przybliżone wartości współczynników będą kolejnym wyzwaniem dla branży [30].

Tabela 6 Współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych pierwszego stopnia (od dnia 1 stycznia 2018 r.)

Czynnik przekazujący ciepło po stronie skraplacza	Znamionowa wydajność chłodnicza urządzeń przemysłowych	Minimalna wartość SEPR (*)
Powietrze	$P_A < 400 \text{ kW}$	4,5
	$P_A \geq 400 \text{ kW}$	5,0
Czynnik przekazujący ciepło po stronie skraplacza	Znamionowa wydajność chłodnicza urządzeń przemysłowych	Minimalna wartość SEPR (*)
Woda	$P_A < 400 \text{ kW}$	6,5
	$400 \text{ kW} \leq P_A < 1\,500 \text{ kW}$	7,5
	$P_A \geq 1\,500 \text{ kW}$	8,0

(*) Należy zgłosić w odpowiednich tabelach w niniejszym załączniku i w dokumentacji technicznej, w zaokrągleniu do dwóch miejsc po przecinku.

Tabela 7 Współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych pierwszego stopnia (od dnia 1 stycznia 2021 r.) [30]

Czynnik przekazujący ciepło po stronie skraplacza	Znamionowa wydajność chłodnicza urządzeń przemysłowych	Minimalna wartość SEPR (*)
Powietrze	$P_A < 400 \text{ kW}$	5,0
	$P_A \geq 400 \text{ kW}$	5,5
Woda	$P_A < 400 \text{ kW}$	7,0
	$400 \text{ kW} \leq P_A < 1\,500 \text{ kW}$	8,0
	$P_A \geq 1\,500 \text{ kW}$	8,5

(*) Należy zgłosić w odpowiednich tabelach w niniejszym załączniku i w dokumentacji technicznej, w zaokrągleniu do dwóch miejsc po przecinku.

Tabela 8 Poziomy współczynniki sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych (przewidywane)

Wysokotemperaturowe przemysłowe agregaty chłodnicze	Chłodzone powietrzem, $P_A < 200$ kW	6,5 SEPR
	Chłodzone powietrzem, $200 \text{ kW} \leq P_A < 400$ kW	8,0 SEPR
	Chłodzone powietrzem, $P_A \geq 400$ kW	8,0 SEPR
	Chłodzone wodą, $P_A < 200$ kW	8,5 SEPR
	Chłodzone wodą, $200 \text{ kW} \leq P_A < 400$ kW	12,0 SEPR
	Chłodzone wodą, $400 \text{ kW} \leq P_A < 1\,000$ kW	12,5 SEPR
	Chłodzone wodą, $P_A \geq 1\,000$ kW	13,0 SEPR

2.2. Charakterystyka wytwornic wody lodowej

Definicja wytwornicy wody lodowej zgodnie z europejską normą PN-EN 14511-1 brzmi: ziębiarka cieczy jest to fabrycznie wykonany zespół do oziębiania cieczy składający się z parowacza, sprężarki pary czynnika ziębniczego, integralnego lub oddzielnego skraplacza i odpowiedniego układu sterowania. Zespół ten może być wyposażony w środki umożliwiające realizowanie funkcji grzania np. przez odwrócenie obiegu czynnika ziębniczego jako pompa ciepła. Ziębiarki cieczy potocznie nazywane „Chillerami” występują we wszystkich grupach przemysłu, centrach logistycznych i dystrybucyjnych, klimatyzowanych budynkach, szpitalach, serwerowniach, obiektach handlowych [7].

Istnieją dwa podstawowe typy systemów chłodniczych wykorzystywanych w wytwornicach wody lodowej: z bezpośrednim odparowaniem (DX) oraz parowniki zalane. W obu występuje bezpośrednia wymiana ciepła pomiędzy medium chłodzonym, a czynnikiem chłodniczym. Agregat wody lodowej może wykorzystywać sprężone pary w cyklu chłodzenia lub cykl chłodzenia absorpcyjnego (z wykorzystaniem roztworu bromku litu lub amoniaku). Sprężarki chłodnicze sprężają pary poprzez ruch posuwisto-zwrotny, spiralny, śrubowy lub odśrodkowy z napędem elektrycznym lub silniki napędzane gazem. Ciepło odebrane przez dowolny agregat wody lodowej musi zostać odprowadzone do atmosfery bądź wykorzystane jako odzysk ciepła przegania [7][8][9].

To ciepło odpadowe można odprowadzić poprzez chłodzenie powietrzem w procesie przenoszenia ciepła bezpośrednio z czynnika chłodniczego do otaczającego powietrza zewnętrznego lub poprzez chłodzenie płynem gromadzącym ciepło z czynnika chłodniczego, a następnie oddawanie tego ciepła również do atmosfery [8][9].

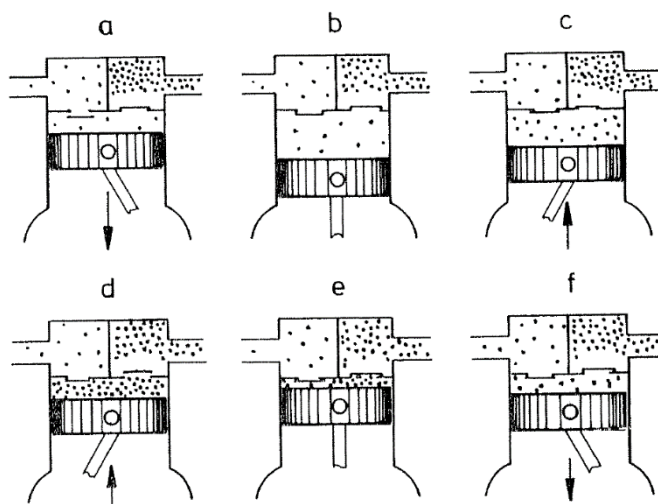
2.2.1. Sprężarki,

Najważniejszym elementem każdego parowego sprężarkowego urządzenia chłodniczego, a zarazem ziębiarki cieczy, jest sprężarka utrzymująca jego pracę.

Sprężarki tłokowe występują dziś w małych wytwornicach wody lodowej rzędu do 50 kW lub pozostałych pracujących na bazie czynników łatwo palnych. Składają się z cylindra uzbrojonego w samoczynne zawory: ssawny oraz tłoczy umieszczone w głowicy i tłoka wykonującego ruch posuwisto-zwrotny w cylindrze.

Podczas przemieszczenia ssawnego tłoka, poprzez zawór ssawny zasysane są pary czynnika chłodniczego o niskim ciśnieniu. W trakcie suwu wytłaczania, tłok powracający spręża czynnik, który w efekcie jest tłoczony przez zawór tłoczny. Aktualne sprężarki tłokowe konstruowane są dla szerokiego zakresu zastosowań od małych jednostłokowych rzędu paru wat mocy chłodniczej do wielkich wielocylindrowych przeznaczonych do wytwornic dużych mocy [8][9][10][11].

Tłokowe, hermetyczne sprężarki chłodnicze znalazły zastosowanie z naturalnymi czynnikami chłodniczymi w pracujących już układach chłodniczych, lecz głównie w bardzo małych, takich jak lodówki. Zaczynają pojawiać się wytwornice wody ziębniczej pracujące na naturalnych czynnikach z tłokowymi, hermetycznymi sprężarkami chłodniczymi, oraz agregaty o mocach powyżej 50kW z tłokowymi sprężarkami pół hermetycznymi. Zasadę działania sprężarki tłokowej pokazano na rysunku 1. Pół hermetyczne sprężarki tłokowe tworzące wielosprężarkowe obiegi chłodnicze pracujące z naturalnymi czynnikami chłodniczymi, węglowodorami mogą generować do ok. 350kW mocy chłodniczej w jednym przemysłowym wysokotemperaturowym agregacie chłodniczym [8][9][10][11].



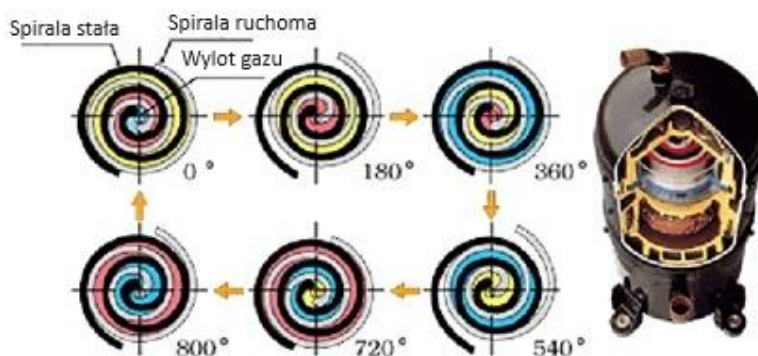
Rysunek 1 Zasada działania sprężarki tłokowej: (a) ssanie, (b) dolny martwy punkt, (c) sprężanie, (d) tłoczenie, (e) górny martwy punkt, (f) rozprężanie powrotne [9]

Sprężarki spiralne to rodzaj sprężarki wyporowej, rotacyjnej o ruchu orbitalnym, które wykorzystują dwa spiralne elementy, jeden nieruchomy, a drugi obracający się w celu sprężania par czynnika chłodniczego. Elementy spiralne stanowią zazwyczaj profile spiralne w postaci ewolwenty lub spirali Archimedesesa przy czym kąty zwinięcia zawierają się w granicach $720 \div 1400^\circ$. Kąt zwinięcia spirali określa w tych sprężarkach długość pełnego cyklu pracy. Każdy z dwóch spiralnych elementów jest otwarty na jednym końcu i ograniczony płytą podstawy. Obydwa są dopasowane tak, aby tworzyć komory pomiędzy odpowiednimi płytami podstawowymi i różne linie styku pomiędzy ich ścianami. Boki spirali pozostają w kontakcie, ale punkt styku przesuwają się stopniowo do wewnątrz, sprężając pary czynnika chłodniczego w miarę przesuwania się jednej spirali. Sprężanie następuje poprzez uszczelnienie par czynnika chłodniczego w komorach o określonej objętości i stopniowe zmniejszanie wielkości przestrzeni komory, w miarę jak względny ruch spirali przesuwają je do wewnątrz, w kierunku otworu wylotowego [8][11][12].

Dostępne są dwie możliwości regulacji wydajności chłodniczej. Najbardziej powszechnym jest sterowanie ze zmienną prędkością, wykorzystujące przemiennik częstotliwości do sterowania prędkością obrotową ruchomej spirali. Wydajność chłodzenia zmienia się w zależności od prędkości. Inną metodą sterowania jest zmienne przemieszczenie, które obejmuje otwory „przenoszące” w nieruchomym ślimaku. Sterowanie wydajnością odbywa się poprzez odłączanie lub łączenie komór sprężania po stronie ssawnej poprzez zamykanie lub otwieranie tych otworów przyłączeniowych [8][11][12].

Sprężarki spiralne są dostępne w wydajnościach od 2,0 kW do około 140,00 kW i są stosowane w układach chłodniczych zarówno w konfiguracjach z jedną, jak i wieloma sprężarkami. Moc agregatów wody żiębniczej wysokiej mocy waha się między 1200 a 1500 kW z uwzględnieniem zastosowania układów wielosprężarkowych przy współpracy z skraplaczem powietrznym. Naturalne czynniki chłodnicze, węglowodory wraz z sprężarkami spiralnymi od paru lat znalazły głównie zastosowanie w komercyjnych pompach ciepła pracujących z propanem jako czynnik chłodniczy. Właściwości termodynamiczne czynnika oraz konstrukcja sprężarki współgrają bardzo dobrze. W wyniku zmiany kierunku przepływu czynnika chłodniczego, czyli odwrócenia obiegu termodynamicznego z urządzenia funkcjonującego jako pompa ciepła uzyskać można wytwornicę wody żiębniczej. Cykl pracy sprężarki spiralnej scroll pokazano na rysunku 2. Idąc za tym sprężarki te wraz z naturalnymi czynnikami chłodniczymi, węglowodorami znajdują coraz częstsze zastosowanie w pierwszych dostarczanych na rynek agregatach wody żiębniczej. Tak jak dotychczasowe

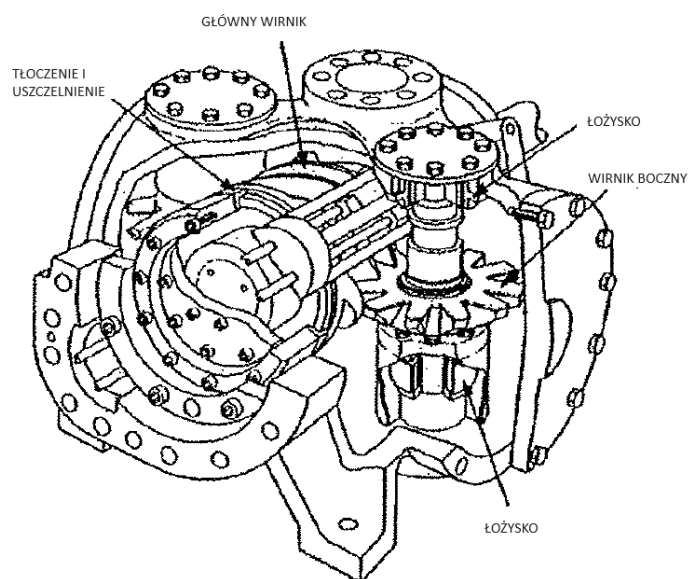
układy budowane są wielosprężarkowe obiegi pozwalające zbudowanie wytwornic wody lodowej nawet dużych mocy sięgających ok 350 kW [8][11][12].



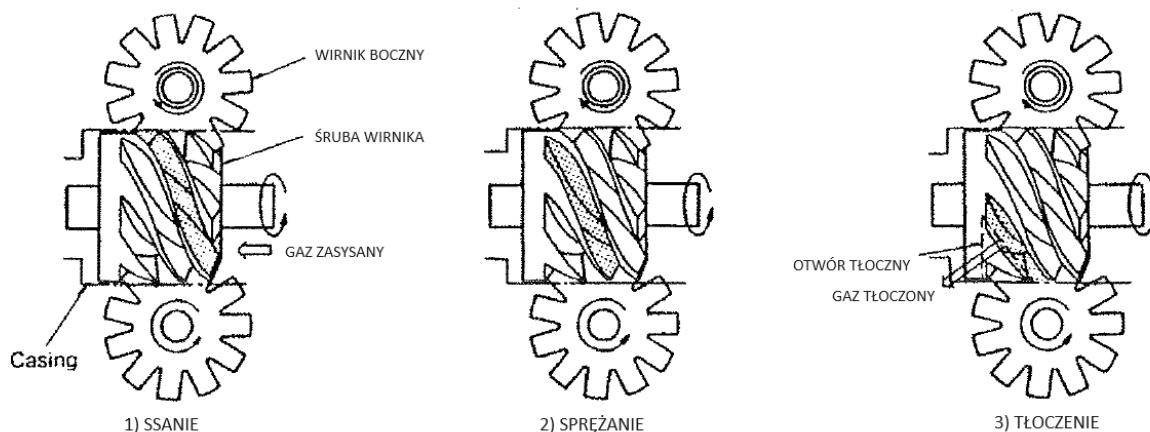
Rysunek 2 Budowa sprężarki spiralnej scroll [12]

Sprężarki śrubowe pracują w zakresie mocy chłodniczych od 150 do około 1000kW co daje możliwość konstruowania agregatów wielosprężarkowych o łącznej mocy nawet 4 MW stosowanych w dużych instalacjach przemysłowych. Sprężarka śrubowa jest maszyną wyporową i występuje w dwóch możliwych wariantach konstrukcyjnych jako sprężarka jednośrubowa i dwuśrubowa [11][12][13].

Sprężarka jednośrubowa składa się z pojedynczego cylindrycznego wirnika głównego, który współpracuje z parą wirników bocznych jak na rysunku 3. Sprężarka napędzana jest przez wał głównego wirnika, a za nim podążają wirniki boczne. Pary czynnika chłodniczego przedostają się do komory ssącej. Gdy główny wirnik się obraca, para jest zatrzymywana w przestrzeni utworzonej przez wolne boki rowków, obudowy i zęba wirnika bocznego jak pokazano na rysunku 3 i 4 [11][12][13].



Rysunek 3 Sprężarka jednośrubowa [13]



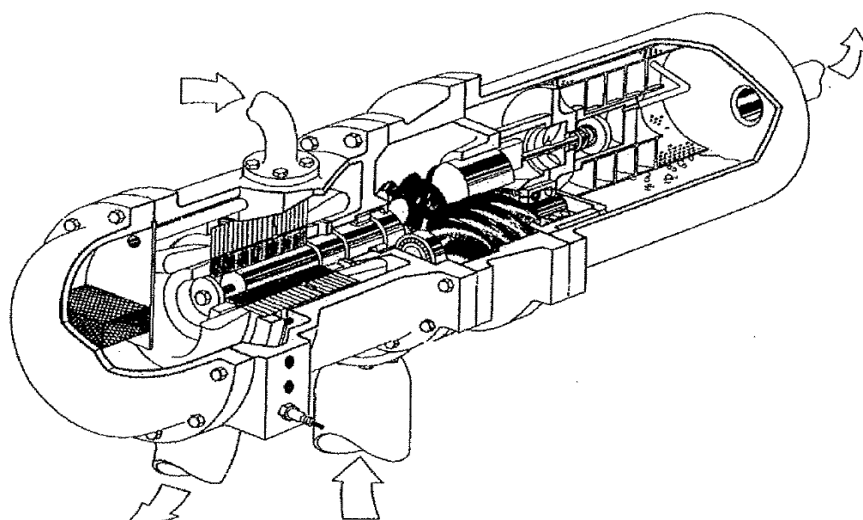
Rysunek 4 Sprężarka jednośrubowa, sekwencje pracy [13]

Sprężarki dwuśrubowe wykorzystują podwójnie współpracujące wirniki z rowkami śrubowymi z „męskimi” występami i „żeńskimi” rowkami lub wpustami w nieruchomej obudowie. Spręż uzyskuje się poprzez bezpośrednie zmniejszenie objętości w wyniku ruchu obrotowego. Gdy wirniki zaczynają się rozłączać, po stronie męskiej i żeńskiej tworzy się pustka, umożliwiając zasysanie par czynnika chłodniczego do sprężarki. Dalszy obrót rozpoczyna zazębianie się kolejnego płata męskiego z rowkiem żeńskim, zmniejszając zajmowaną objętość i sprężając czynnik chłodniczy. W punkcie określonym przez projektowy stosunek objętości otwór wylotowy zostaje odsłonięty i para przegrzana zostaje uwolniona do skraplacza. Sprężarka dwuśrubowa została pokazana na rysunku 5 [11][12][13].

Sterowanie wydajnością sprężarek śrubowych odbywa się zazwyczaj poprzez otwieranie i zamykanie zaworu suwakowego na ssaniu sprężarki w celu ograniczenia natężenia przepływu par czynnika chłodniczego do sprężarki. Do sterowania wydajnością sprężarki można także zastosować sterowanie zmienną prędkością [11][12][13].

Sprężarki śrubowe często występują w przemysłowych agregatach wody ziębniczej pracując na syntetycznych jak i naturalnych czynnikach chłodniczych. Stosowane są w agregatach wody ziębniczej od mocy ponad 200 kW pracując z naturalnymi czynnikami chłodniczymi, dotychczas amoniakalnymi, a od około 2022 roku również węglowodorami takimi jak propan czy propylen [11][12][13].

Projekt sprężarki odśrodkowej do zastosowań chłodniczych opracował dr Willis Carrier tuż po I wojnie światowej. Sprężarka odśrodkowa podnosi ciśnienie par czynnika chłodniczego poprzez zwiększenie jego energii kinetycznej która jest następnie przekształcana w ciśnienie statyczne, gdy czynnik chłodniczy w postaci par opuszcza sprężarkę. Rysunek 6 ilustruje typową konfigurację odśrodkowego agregatu chłodniczego. Sprężarka i silnik są zamknięte w jednej obudowie, a do chłodzenia uzwojeń silnika podczas pracy wykorzystywany jest gaz.



Rysunek 5 Sprężarka dwuśrubowa [13]

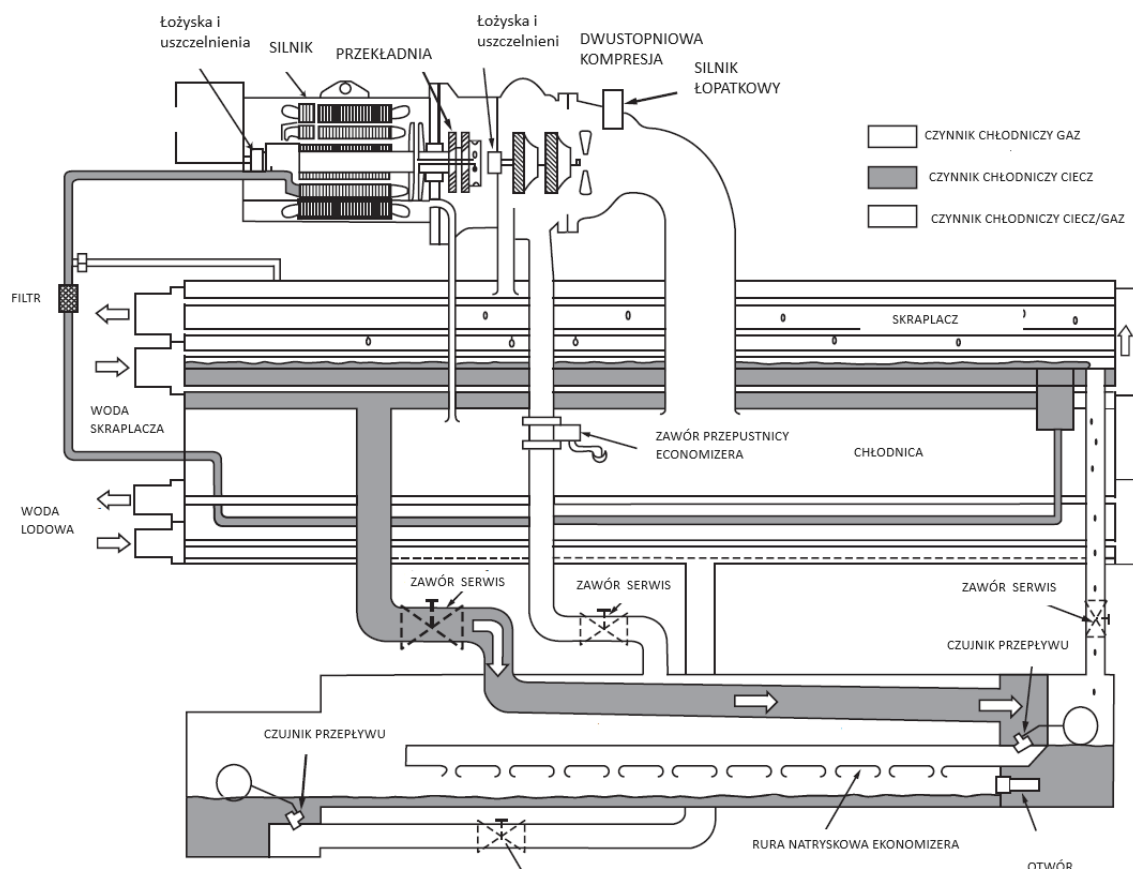
Czynnik chłodniczy z niskim ciśnieniem przepływa z chłodnicy do sprężarki. Natężenie przepływu czynnika jest kontrolowane przez zestaw łopatek wlotowych zawirowania wstępnego lub regulator prędkości o zmiennej częstotliwości, który reguluje natężenie przepływu czynnika chłodniczego z postaci par do sprężarki w odpowiedzi na obciążenie chłodnicze wywierane na agregat chłodniczy [8][10][11][13].

Zwykle moc agregatu chłodniczego jest w pełni zmienna w zakresie 15–100% wydajności przy pełnym obciążeniu. Pary czynnika chłodniczego pod wysokim ciśnieniem są dostarczane do skraplacza, gdzie woda odbiera ciepło, a czynnik chłodniczy zmienia fazę z pary przegrzanej w ciecz, która na zaworze rozprężnym przechodzi w mącą korą i wpływa do parownika, gdzie ulega odparowaniu, chłodząc w ten sposób chłodzoną wodę [8][10][11][13].

Sprężarki odśrodkowe są projektowane w dwóch odmianach: z opcjonalnymi napędami o zmiennej częstotliwości (VFD) dla zapewnienia wysokiej sprawności działania przy częściowych obciążeniach w przypadku jednostek z jedną lub dwiema sprężarkami, albo z łożyskami magnetycznymi, umożliwiającymi pracę bez używania oleju. Zakresy mocy chłodniczych dla sprężarek odśrodkowych są bardzo szerokie, ponieważ od 0,2MW do nawet 14,00 MW [8][10][11][13].

Występowanie sprężarek odśrodkowych w wytwornicach wody ziębniczej jest bardzo rzadkie z względu na bardzo duże moce chłodnicze, wysokie nakłady inwestycyjne oraz ograniczone zasoby wsparcia technicznego. W wytwornicach wody lodowej wyposażonych już w sprężarki odśrodkowe czynnikiem chłodniczym najczęściej

są syntetyczne czynniki chłodnicze o GWP wyższym od 5 lub naturalny czynnik chłodniczy jakim jest amoniak [10][11][13].



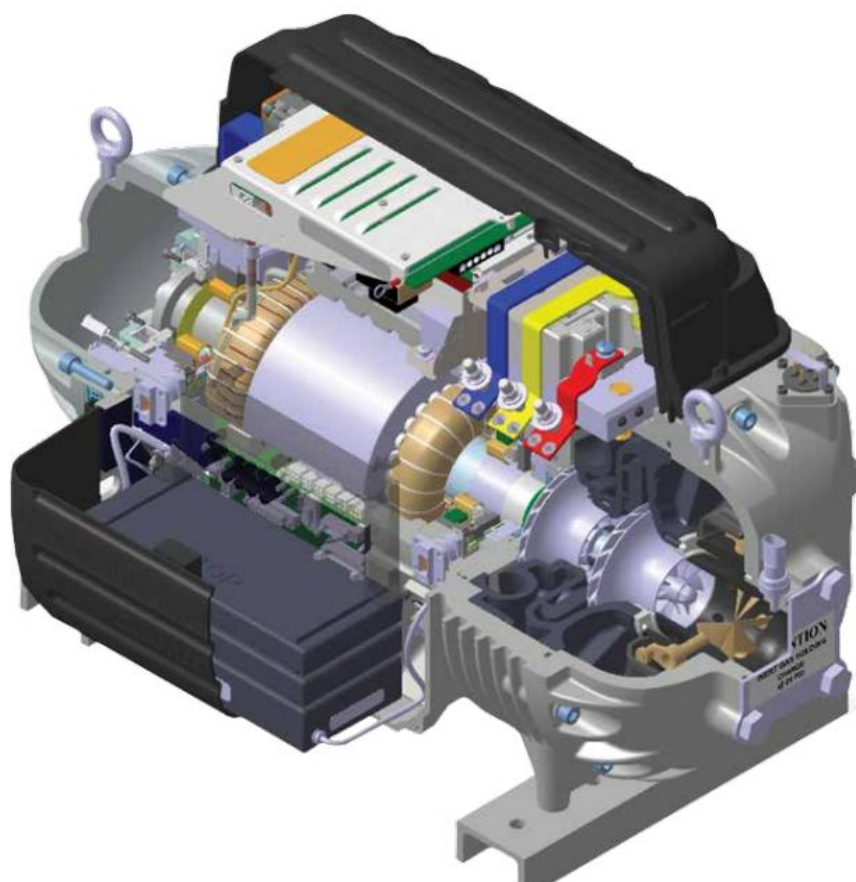
Rysunek 6 Odśrodkowa sprężarka w przekroju, zastosowana w agregacie owdy ziębniczej [13]

Odśrodkowe bezolejowe sprężarki Turbocor są rozwiązaniem stosowanym od kilku lat, wykorzystują zaawansowaną technologię, aby zapewnić wysoką wydajność i niski poziom hałasu w kompaktowej obudowie. Dużą wydajność osiąga się dzięki zastosowaniu bezolejowych łożysk magnetycznych, które zapewniają zerową utratę wydajności przez cały okres eksploatacji sprężarki. Silniki z magnesami trwałymi i napędy o zmiennej prędkości zapewniają dużą wydajność przy pełnym i częściowym obciążeniu. Wpływ na ich sprawność ma brak oporów tarcia, co pozwala na uzyskanie wymaganych mocy chłodniczych przy niższym zużyciu energii i brak oleju w układzie, który pogarsza wymianę ciepła w wymiennikach oraz zanieczyszcza czynnik chłodniczy. Uzyskanie dużej mocy z silnika o niewielkich gabarytach możliwe jest dzięki użyciu łożysk z poduszką magnetyczną i zastosowaniu bardzo dużych do 48 000 obr/min obrotów silnika. Dzięki temu masa sprężarki jest 6 razy mniejsza niż odpowiadającej jej sprężarki śrubowej. System sterowania i zasilania takiego silnika jest bardzo złożony. Bezolejowe sprężarki odśrodkowe można stosować w agregatach chłodniczych chłodzonych powietrzem, wodą lub wyparnie, pracujących

w szerokim zakresie zastosowań. Zakres mocy chłodniczych sprężarek Turbocor wynosi od 200kW do 1500kW.

Sprężarki Turbocore nie znalazły jeszcze zastosowania z naturalnymi czynnikami chłodniczymi. Nie powiedziane jest, że w przyszłości konstrukcyjnie nie zostaną dostosowane do prac z tymi czynnikami dla zastosowań wytwornic wody ziębniczej o mocach chłodniczych powyżej 200 kW [14][15].

Sprężarkę turbocore w otwartym przekroju pokazano na rysunku 7.



Rysunek 7 Sprężarka odśrodkowa Turbocore [14]

2.2.2. Skraplacze

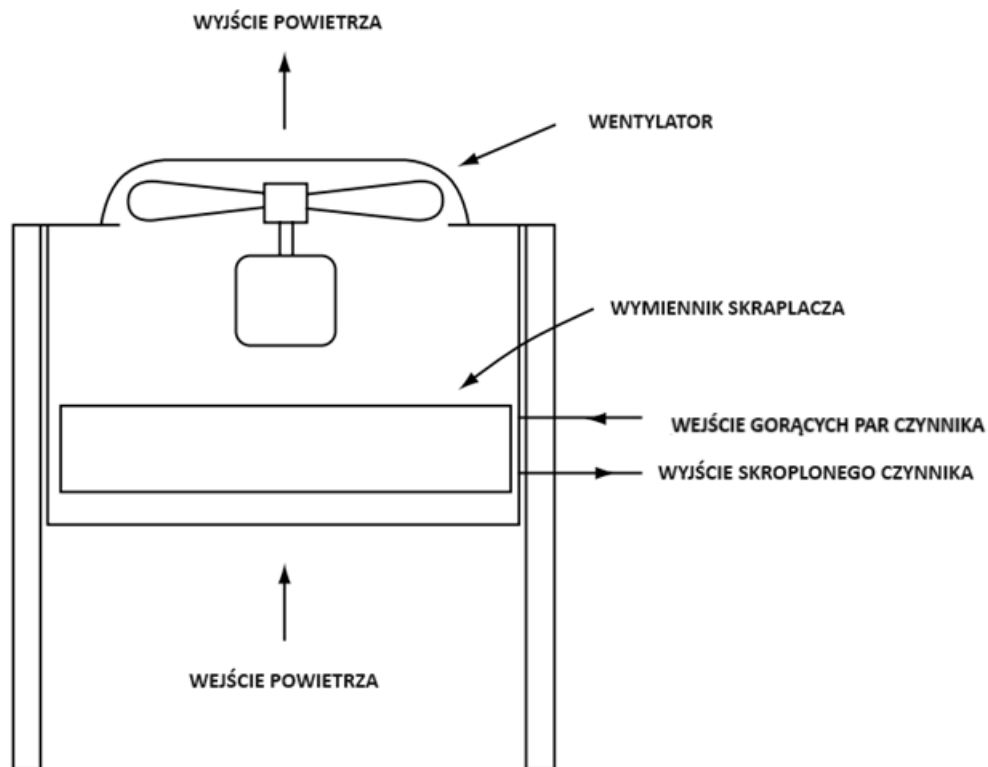
Skraplacz jest wymiennikiem ciepła, w którym zachodzi proces odprowadzenia ciepła z sprężonych par czynnika chłodniczego do medium chłodzącego w celu ochłodzenia do temperatury nasycenia i skroplenia. Skraplacze dzielą się na trzy rodzaje z względu na medium chłodzące: chłodzone powietrzem, chłodzone wodą, cieczą procesową i natryskowo wyparne w których do chłodzenia wykorzystuje się wodę oraz powietrze.

Zazwyczaj w systemach o małych mocach stosuje się skraplacze chłodzone powietrzem. Duże systemy wykorzystują skraplacze chłodzone wodą lub wyparne. Rzadko stosuje się duże skraplacze chłodzone powietrzem. Inwestycyjnie powietrzne skraplacze są tańsze jako pierwszy koszt lecz mają niższą sprawność względem skraplaczy chłodzonych wodą lub natryskowo wyparnych. Wydajność wytwornicy wody lodowej jest większa, gdy proces skraplania odbywa się w niższych temperaturach uzyskanych przy chłodzeniu wodą lub skraplaczach wyparnych niż chłodzeniu powietrzem. Wydajność cieplna skraplacza powinna być zgodna z ilością ciepła które należy odebrać poprzez medium chłodzące, chociaż przewymiarowanie jest lepsze niż niedowymiarowanie, jeśli sprawność sprężarki ma być maksymalizowana [8][15] [18].

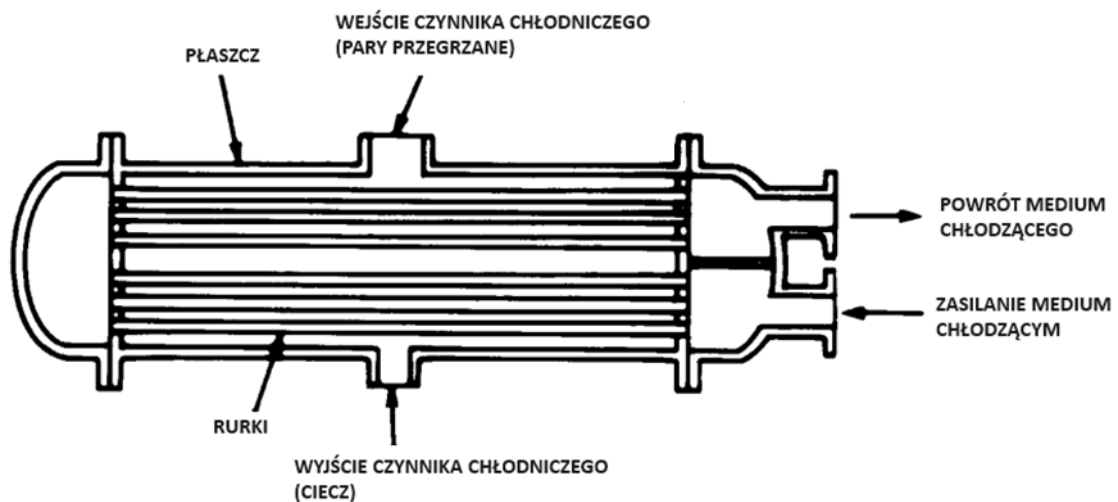
Skraplacze chłodzone powietrzem są zwykle zbudowane z rurek o powierzchni żebrowanej bądź z lamelami z czynnikiem chłodniczym w rurkach i powietrzem tłoczonym na zewnątrz rurki i lamel przez wentylator jak na rysunku 8. Sterowanie wydajnością, jeśli jest stosowane, odbywa się poprzez włączania i wyłączanie wentylatora, używanie wentylatora wielobiegowego lub płynne modulowanie przepływu powietrza względem ciśnienia lub temperatury skraplania. Prędkości przepływu czynnika chłodniczego muszą być zaprojektowane tak, aby zapobiegać osadzaniu się oleju w rurkach. Moc skraplacza powietrznego zależy od powierzchni czynnej węzownicy, natężenia przepływu powietrza przez wymiennik, pożądanej temperaturze skraplania i projektowej temperaturze otoczenia termometru suchego. Należy pamiętać, że przy obniżonych temperaturach otoczenia wzrasta wydajność skraplaczy chłodzonych powietrzem i czasami zbliża się do wydajności systemów chłodzonych wodą [8][15] [18].

Skraplacze płaszczowo rurowe zbudowane są z płaszcza w formie walca lub sześcianu obustronnie zamkniętego z układem rur wewnątrz, którymi przepływa medium chłodzące czynnik. Do wnętrza wpuszczana jest przegrzana para czynnika chłodniczego, która skrapla się na rurach i jest obierana w dolnej części płaszcza [8][15] [18].

Skraplacze chłodzone wodą lub cieczą procesową są zazwyczaj typu płaszczowo-rurowego gdzie medium przepływa w rurkach a czynnik chłodniczy w płaszczu jak prezentuje rysunek 9. Sterowanie wydajnością skraplacza zwykle odbywa się poprzez sterowanie objętościowym przepływem medium. Jednakże temperatura medium powinna być stała, jeśli jest dostarczana z chłodnicy wody lub wieży chłodniczej, a większość producentów agregatów chłodniczych takie preferuje rozwiązanie. Nie należy obniżać temperatury skraplania czynnika chłodniczego poniżej 20°C, ponieważ może to spowodować zatrzymanie oleju w skraplaczu [8][15] [18].



Rysunek 8 Skraplacz powietrzny [15]



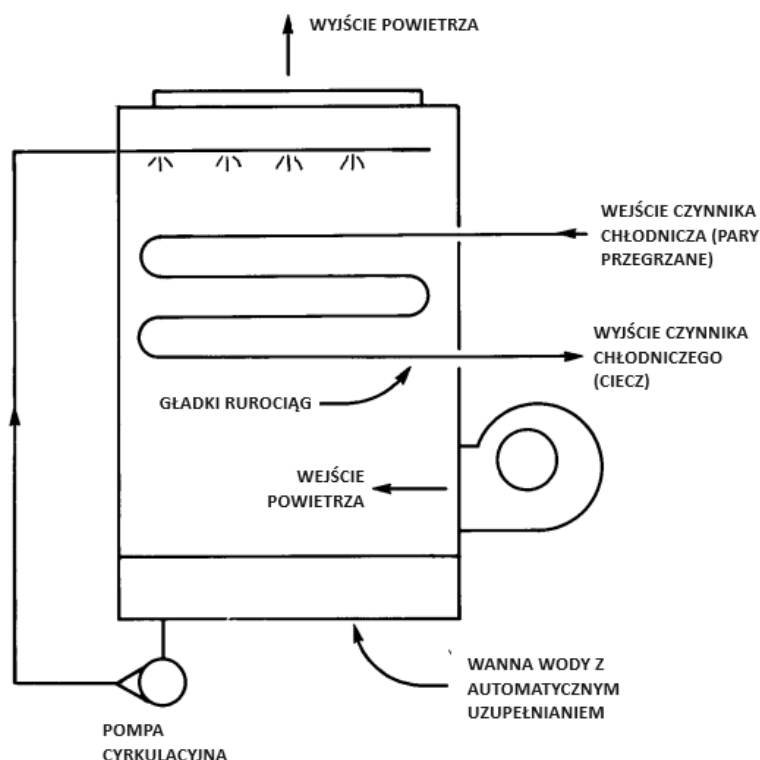
Rysunek 9 Skraplacz płaszczowo rurowy [15]

Skraplacz natryskowo wyparny pokazany na rysunku 10 składa się z takich elementów jak: obudowa, wężownica dla czynnika chłodniczego, wentylator, kolektor rurowy z dyszami do natrysku wody, wanna dla wody, tłumik dźwięku (opcjonalnie) oraz wbudowane urządzenie do podgrzewania wody lub osobny zbiornik wody z pompą wtórną w celu zapobiegania

zamarzaniu. Para przegrzana czynnika chłodniczego przepływa przez zamknięty układ wymiennika ciepła o gładkich rurach, którego zewnętrzna powierzchnia jest na stałe zraszana wodą obiegową. Powietrze przepływa przez wymiennik, co umożliwia obniżenie temperatury jego powierzchni i częściowe odparowanie wody [9][15] [18].

Proces chłodzenia powietrzem oraz odparowywania wody powoduje przekazywanie ciepła z pary czynnika chłodniczego, co prowadzi do jej skraplania. Dzięki odparowaniu wody, nawet w wysokich temperaturach otoczenia, możliwe jest osiągnięcie temperatury skraplania czynnika chłodniczego niższej o około 10 K niż w przypadku skraplacza chłodzonego powietrzem [9][15] [18].

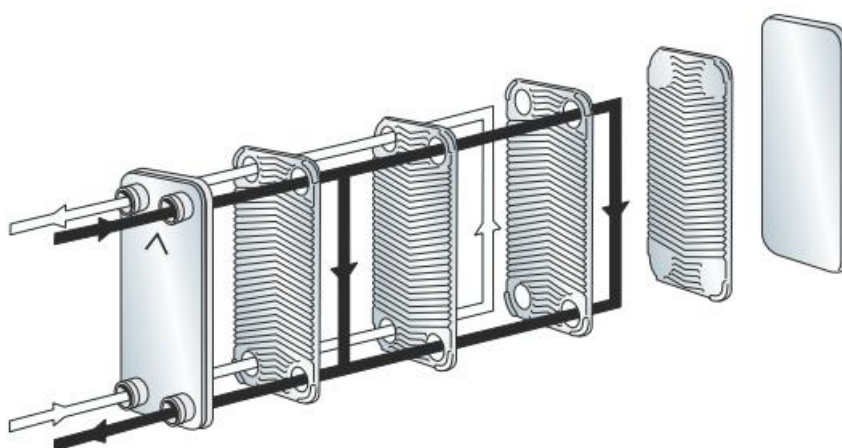
W skraplaczach tego typu powietrze przedmuchiwane jest z dołu do góry przy użyciu wentylatora w przeciwnym kierunku do opadającej grawitacyjnie wody. W celu zminimalizowania podczas eksploatacji korozji, konieczne jest uzdatnianie wody i usuwanie zabrudzeń. Również by zminimalizować gromadzenie kamienia kotłowego ułatwić czyszczenie, stosuje się gładkie rury [9][15] [18].



Rysunek 10 Skraplacz natryskowo wyparny [15]

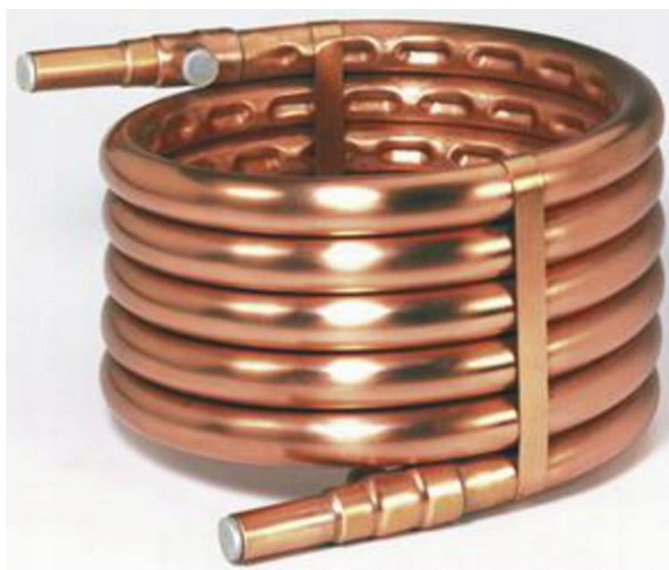
Płytowe skraplacze lutowane zbudowane są z profilowanych płyt wykonanych ze stali szlachetnej w ilościach dowolnych, lecz nie przekraczających 200 sztuk. Co druga z nich obrócona jest o 180° co prezentuje rysunek 11. Odpowiednie profilowanie tych płyt sprawia, że istnieją między nimi punkty styku. Oblutowując je, otrzymuje się ostatecznie, wytrzymały na wysokie ciśnienie wymiennik ciepła. Prawie cały użyty w jego konstrukcji materiał jest

wykorzystany jako powierzchnia wymiany ciepła. Płyty rozdzielają dwie przestrzenie przepływowe, przez które w przeciwnym kierunku przepływają płyny biorące udział w przenoszeniu ciepła. Zakres mocy wymienników waha się od 0,3kW do 1MW w zależności od wielkości i ilości płyt. Maksymalne ciśnienia robocze sięgają 45bar. Coraz częściej ten rodzaj skraplaczy zastępuje płaszczowo rurowe wymienniki ciepła z względu na koszt inwestycyjny i wysoką sprawność przy zachowaniu niskich oporów przepływu [9] [18].



Rysunek 11 Płytowy przeciwprądowy skraplacz [16]

Skraplacze współosiowe zbudowane są z połączonych współosiowo jedna w drugiej zwiniętych kołowo rur, co pokazano na rysunku 12. W zewnętrznej rurze będącej płaszczem przebiega proces skraplania czynnika chłodniczego. W rurze ożebrowanej będącej wewnątrz wymiennika płynie medium chłodzące w przeciwnym kierunku. Skonstruowane są głównie z miedzi a w specjalistycznych układach ze stali szlachetnej. Zakres wydajności cieplnej wynosi od 1 do 60 kW i stosowany jest głównie w pompach ciepła i odzysku ciepła [9][17] [18].



Rysunek 12 Wymiennik współosiowy [17]

2.2.3. Parowniki

Parowniki to wymienniki ciepła w których zachodzi proces odparowywania czynnika chłodniczego dzięki ciepłu doprowadzonemu z chłodzonego medium. Parowniki ze względu na proces odparowania dzieli się na suche i zalane. Parowniki suche opuszcza para przegrzana. Parowniki mokre opuszcza para mokra o niskim stopniu suchości. Objętość parownika zalanego jest wypełniona do danego poziomu ciekłym czynnikiem chłodniczym. Aby stworzyć odpowiednie warunki wymiany ciepła podczas odparowania czynnika chłodniczego stosuje się zróżnicowane rozwiązania konstrukcyjne oraz różne sposoby zasilania parownika.

2.3. Czynniki chłodnicze

Czynniki chłodnicze to substancje biorące udział w procesie wymiany ciepła w urządzeniu chłodniczym które pobiera ciepło przez odparowanie w niskiej temperaturze oraz przy niskim ciśnieniu, zaś oddaje ciepło w procesie skraplania przy odpowiednio wyższej temperaturze i wyższym ciśnieniu. Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki proces transportu ciepła nie zachodzi samoistnie i należy do przeprowadzenia procesu sprężania doprowadzić odpowiednią ilość energii.

Przy doborze odpowiedniego czynnika chłodniczego do zastosowania w układzie chłodniczym należy wziąć pod uwagę szereg kryteriów. Oczekuje się, że współczesne czynniki chłodnicze będą spełniać następujące wymagania [9][11][19][21][22][23]:

a) przyjazne i nieszkodliwe dla środowiska,

- zerowy potencjał efektu cieplarnianego (GWP),

GWP (*ang.* Global Warming Potential) – współczynnik tworzenia efektu cieplarnianego w odniesieniu do dwutlenku węgla (GWP=1). Należy zauważyć, że wartość wskaźnika GWP dla dwutlenku węgla jest bardzo mała, to ze względu na ogromną emisję tego gazu do atmosfery szacuje się, że jest on odpowiedzialny za powstawanie efektu cieplarnianego w około 50%. Czynniki chłodnicze należące do grup HFC, CHFC oraz CFC w porównaniu do całkowitej masy atmosfery pojawiają się w śladowych ilościach, to mając o kilka tysięcy razy większy wskaźnik GWP, wpływają aż w ok. 20% na tworzenie zjawiska efektu cieplarnianego,

- zerowy potencjał niszczenia stratosferycznej warstwy ozonowej (ODP),

ODP (*ang.* Ozone Depletion Potential – jest to potencjał niszczenia warstwy ozonowej) – wskaźnik, który ma na celu ilościową ocenę wpływu poszczególnych substancji na warstwę ozonową. Wskaźnik został odniesiony do czynnika R11 (CFC-11) uznanego za wartość jednostkową (ODP=1).

- najniższy równoważnik ekwiwalentu TEWI,

TEWI – (*ang.* Total Equivalent Warming Impact) – to całkowity równoważnik tworzenia efektu cieplarnianego, w którym uwzględniono wpływ bezpośredni (bierze się pod uwagę zastosowanie instalacji, jej szczelność, wielkość napełnienia zbiornikiem, zagrożenie dla środowiska), danego czynnika oraz wpływ pośredni związany z wytworzeniem energii elektrycznej zużywanej przez eksploatowane urządzenie chłodnicze. Współczynnik TEWI pozwala ocenić wpływ poszczególnych instalacji chłodniczych na globalne ocieplenie a metodykę i przykład jego obliczania pokazano na rysunkach 13 i 14.

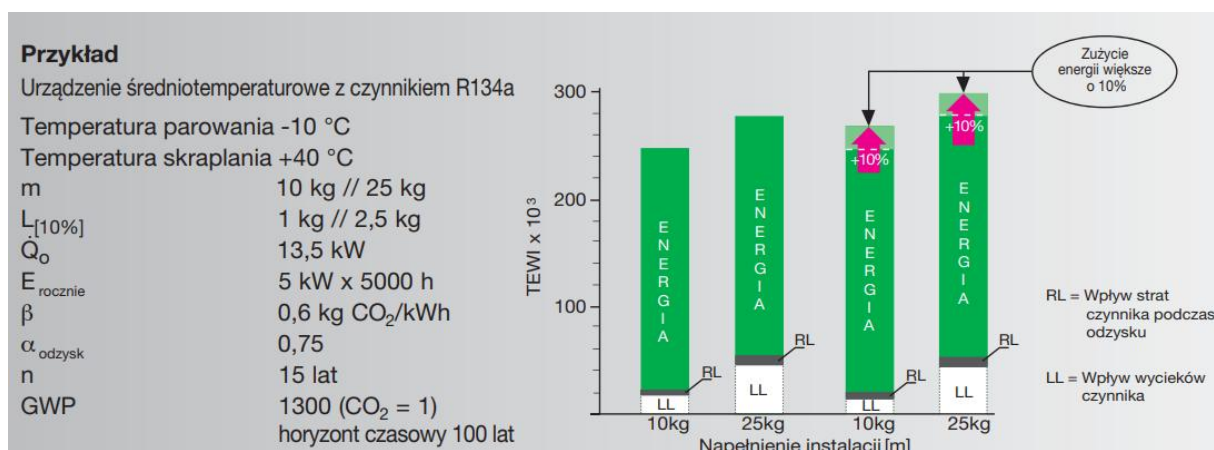
TEWI = TOTAL EQUIVALENT WARMING IMPACT

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

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

Rysunek 14 Metodyka obliczeniowa wskaźnika TEWI [22]



Rysunek 13 Przykładowe porównanie wskaźnika TEWI w zależności od napełnienia instalacji i zużycia energii napędowej, [22]

Wpływ czynników chłodniczych na środowisko naturalne jest różnorodny. Najważniejszym zjawiskiem wywołanym obecnością czynników chłodniczych w atmosferze jest niszczenie warstwy ozonowej która jest warstwą stratosfery gdzie występuje największe stężenie ozonu (O_3). Ozon tworzy ochronę wszystkich żyjących organizmów przed nadmiernym, szkodliwym oddziaływaniem promieniowania UV-B pochodzącego z kosmosu. Miejscowe znaczące zmniejszenie stężenia ozonu w stratosferze nazywa się dziurą ozonową. Zjawisko to zaczęto obserwować od końca lat siedemdziesiątych XX wieku, kiedy to zaobserwowano wielkie ubytki ozonu w stratosferze nad Antarktydą, które przekraczały ponad 50% i trwające na wielkim obszarze nawet do aż dwóch miesięcy. Występowały również obszary nad tym kontynentem gdzie ilość ozonu została zredukowana nawet do 95%. Udowodniono, że podczas powstawania dziury ozonowej sprzyjającymi warunkami jest wysokie stężenie chloru oraz niskie temperatury sięgające $-80^{\circ}C$. Na podstawie wieloletnich badań naukowych można dostrzec, że główną przyczyną destrukcji warstwy ozonowej są emitowane do atmosfery syntetyczne czynniki chłodnicze wchodzące do grupy HCFC i CFC. Wodorochlorofluorowęglowodory i chlorofluorowęglowodory mają znacznie większą gęstość od powietrza, jednak z biegiem czasu mogą przemieszczać się naturalnie ku stratosferze. Odbywa się tak przede wszystkim z powodu ich aktywności chemicznej w troposferze, gdzie swobodnie mieszają się z powietrzem. Czynniki te gdy dotrą do stratosfery ulegają rozpadowi wskutek oddziaływania promieniowania ultrafioletowego UV-B. Wtedy zostaje zapoczątkowany proces niszczenia ozonu [11].

Występowanie czynników chłodniczych w atmosferze jest też przyczyną tzw. efektu cieplarnianego. Naturalny efekt cieplarniany polega na zatrzymaniu dużej części promieniowania podczerwonego emitowanego z powierzchni Ziemi przez część gazów atmosferycznych w troposferze oraz na powtórny zawracaniu ich w kierunku Ziemi. Gazami odpowiedzialnymi za zatrzymywanie promieniowania podczerwonego są głównie: metan, dwutlenek węgla, znaczna większość syntetycznych czynników chłodniczych oraz ozon stratosferyczny [11].

W tabeli 9 pokazano własności czynników zastępowanych.

Tabela 9 Własności czynników chłodniczych zastępujących. [21][22]

RODZAJ CZYNNIKA	SKŁAD (WZÓR CHEMICZNY)		CZYNNIK ZASTĘPOWANY	OD dla
Czynniki z grupy HCFC				
R22	CHClF ₂		R502 (R12) R114 , R12B1	0.
R124	CHClFCF ₃		R114 , R12B1	0.
R142b	CClF ₂ CH ₃			0.
Czynniki jednorodne z grupy HFC				
R134a	CF ₃ CH ₂ F		R12 (R22) głównie stosowane jego składniki	
R152a	CHF ₂ CH ₃			
R125	CF ₃ CHF ₂			
R143a	CF ₃ CH ₃			
R32	CH ₂ F ₂			
R227ea	CF ₃ -CHF-CF ₃		R12B1, R114	
R236fa	CF ₃ -CH ₂ -CF ₃		R114	
R23	CHF ₃		R13 (R503) R22 (R502)	
Mieszaniny HFC				
R404A	R143a/125/134a		R22 (R502)	
R507A	R143a/125			
R407A	R32/125/134a			
R407F	R32/125/134a			
R422A	R125/134a/600a			
R437A	R125/134a/600/601		R12 (R500)	
R407C	R32/125/134a		R22	
R417A	R125/134a/600			
R417B	R125/134a/600			
R422D	R125/134a/600a			
R427A	R32/125/143a/134a			
R438A	R32/125/134a/600/601a		R22 (R13B1)	
R410A	R32/125			
ISCEON MO89	R125/218/290		R13B1	
R508A	R23/116		R503	
R508B	R23/116			
Mieszaniny HFO i HFO / HFC				
R1234yf	CF ₃ CF=CH ₂		R134a	
R1234ze(E)	CF ₃ CH=CHF			
R513A (XP10)	R1234yf/134a			
R450A (N-13)	R1234ze(E)/134a			
R448A (N-40)	R32/125/1234yf/1234ze(E)/134a		R404A, R507A	
R449A (XP40)	R32/125/1234yf/134a			
Czynniki bezfluorowe				
R717	NH3		R404A (R22)	
R723	NH3/R-E170		R404A (R22)	
R600a	C4H10		R134a	
R290	C3H8		R404A (R22)	
R1270	C3H6		R404A (R22)	
R170 ³	C ₂ H ₆		R23	
R744	CO ₂		różne	

b) bezpieczeństwo użytkowania, eksploatacji i serwisowania.

Bezpieczeństwo jest jednym z najważniejszych kryteriów stosowania czynników chłodniczych. Niezależnie od konsekwencji dla środowiska naturalnego, w każdym jednym przypadku producenci, instalatorzy i użytkownicy urządzeń chłodniczych mają obowiązek zdawać sobie sprawę z zagrożeń wynikających z zastosowania tych substancji.

Mając na względzie potrzebę szerokiego uświadamiania producentom, instalatorom i użytkownikom urządzeń ciśnieniowych wypełnionych czynnikami chłodniczymi, uwzględnia się trzy najważniejsze dokumenty, w których znajdują się wytyczne dotyczące zagadnień, projektowania, eksploatacji i serwisowania urządzeń chłodniczych. Dokumentami tymi są: Dyrektywa Urządzenia ciśnieniowe PED, Norma Międzynarodowa ISO 817 i Norma Europejska wieloczęściowa PN-EN 378 części od 1 do 3 z 2016 oraz EN 378-4:2016+A1:2019 [23][24][27][28].

Głównym dokumentem normalizacyjnym kwestie bezpieczeństwa i ochrony środowiska w instalacjach chłodniczych jest wieloczęściowa norma PN-EN 378 – Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements (pol. Instalacje chłodnicze i pompy ciepła – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska). Norma ta dotyczy zasad bezpieczeństwa i ochrony środowiska w zakresie projektowania, konstrukcji, produkcji, montażu, konserwacji, naprawy, likwidacji i eksploatacji, instalacji chłodniczych oraz ich wyposażenia w stosunku do globalnych przepisów. Intencją jej stosowania jest zredukowanie zagrożeń dla osób, środowiska, mienia ze strony instalacji chłodniczych i czynników chłodniczych. Niebezpieczeństwa te są powiązane z właściwościami chemicznymi i fizycznymi czynników chłodniczych oraz z temperaturami i ciśnieniami występującymi w obiegach chłodniczych. Norma PN-EN 378 jest dostosowane częściowo, skorelowanie z dyrektywą ciśnieniową PED dotyczy jej drugiej części (obejmującej swym zakresem projektowanie, konstruowanie, badanie, znakowanie i udokumentowanie). Wymagania podstawowe, definicje, klasyfikacja i kryteria wyboru. [23][24][27][28]

Norma PN-EN 378 określa grupy bezpieczeństwa czynników chłodniczych wyznaczone na podstawie palności i toksyczności jak przedstawia tabela 10. [23][24][27][28]

Klasyfikacja bezpieczeństwa czynnika chłodniczego jest jedną z najważniejszych klasyfikacji opisanych w części 1 PN-EN 378. Została zaadaptowana z ISO 817 i zbudowana jest z oznaczeń kodowych. Pierwszy znak jest literą (A bądź B) i cechuje toksyczność czynnika chłodniczego zaś drugie oznaczenie jest cyfrą (1, 2 bądź 3) i cechuje stopień palności. W 2014 roku w ISO-817:2014 dołożono dodatkową klasę palności tzw. czynniki o obniżonej palności cechowane kodem 2L, w odróżnieniu do łatwopalnych oznaczanych cechą 2 i nie palnych

cechą 1. Ta klasyfikacja została ujęta w PN-EN 378- 1:2016. Rozróżniono więc klasy [23][24][27][28]:

- klasa 1 (brak rozprzestrzeniania się płomienia) Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które nie wykazują rozprzestrzeniania się płomienia przy badaniu w powietrzu w temperaturze 60°C i ciśnieniu 101,3 kPa.
- klasa 2L (obniżona palność) Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które spełniają wszystkie następujące warunki:
 - a) wykazują rozprzestrzenianie się płomienia podczas badania w temperaturze 60°C i ciśnieniu 101,3 kPa;
 - b) mają dolną granicę palności (LFL) $> 3,5\%$ objętości,
 - c) mają ciepło spalania mniejsze niż 19 000 kJ/kg,
 - d) mają maksymalną prędkość spalania ≤ 10 cm/s przy badaniu w temperaturze 23°C i ciśnieniu 101,3 kPa.
- klasa 2 (łatwopalna) Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które spełniają wszystkie następujące warunki:
 - a) wykazują rozprzestrzenianie się płomienia podczas badania w temperaturze 60°C i ciśnieniu 101,3 kPa,
 - b) mają dolną granicę palności (LFL) $> 3,5\%$ objętości, oraz
 - c) mają ciepło spalania,
 - c) mają ciepło spalania mniejsze niż 19 000 kJ/kg.
- klasa 3 (wyższa palność) Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które spełniają następujące warunki:
 - a) wykazują rozprzestrzenianie się płomienia podczas badania w temperaturze 60°C i ciśnieniu 101,3 kPa,
 - b) mają dolną granicę palności (LFL) $\leq 3,5\%$ objętości lub mają ciepło spalania wynoszące ≥ 19000 kJ/kg,

Czynniki chłodnicze są przypisane do jednej z dwóch klas toksyczności, A lub B, na podstawie dopuszczalnej ekspozycji [23][24][27][28]:

- klasa A (niska toksyczność) oznacza czynniki chłodnicze, dla których limit ekspozycji wynosi 400 ppm lub więcej;
- klasa B (wysoka toksyczność) oznacza czynniki chłodnicze, dla których limit ekspozycji wynosi mniej niż 400 ppm.

Kombinacja klasyfikacji toksyczności i palności daje osiem oddzielnych klas bezpieczeństwa dla pojedynczych związków chłodniczych lub mieszanin czynników chłodniczych, co przedstawiono w tabeli nr 10.

	Niska toksyczność	Wysoka toksyczność
Wysoka palność	A3	B3
Palność	A2	B2
Niska Palność	A2L	B2L
Brak propagacji płomienia	A1	B1

Tabela 10 Kombinacja klasyfikacji toksyczności i palności [23]

c) wysoka efektywność urządzenia chłodniczego i szeroki zakres zastosowania.

Własności termodynamiczne czynników chłodniczych mają bezpośredni wpływ na uzyskanie wysokiej efektywności chłodniczej przy jednoczesnym zapewnieniu stabilnej pracy urządzenia. Istotny wpływ ma:

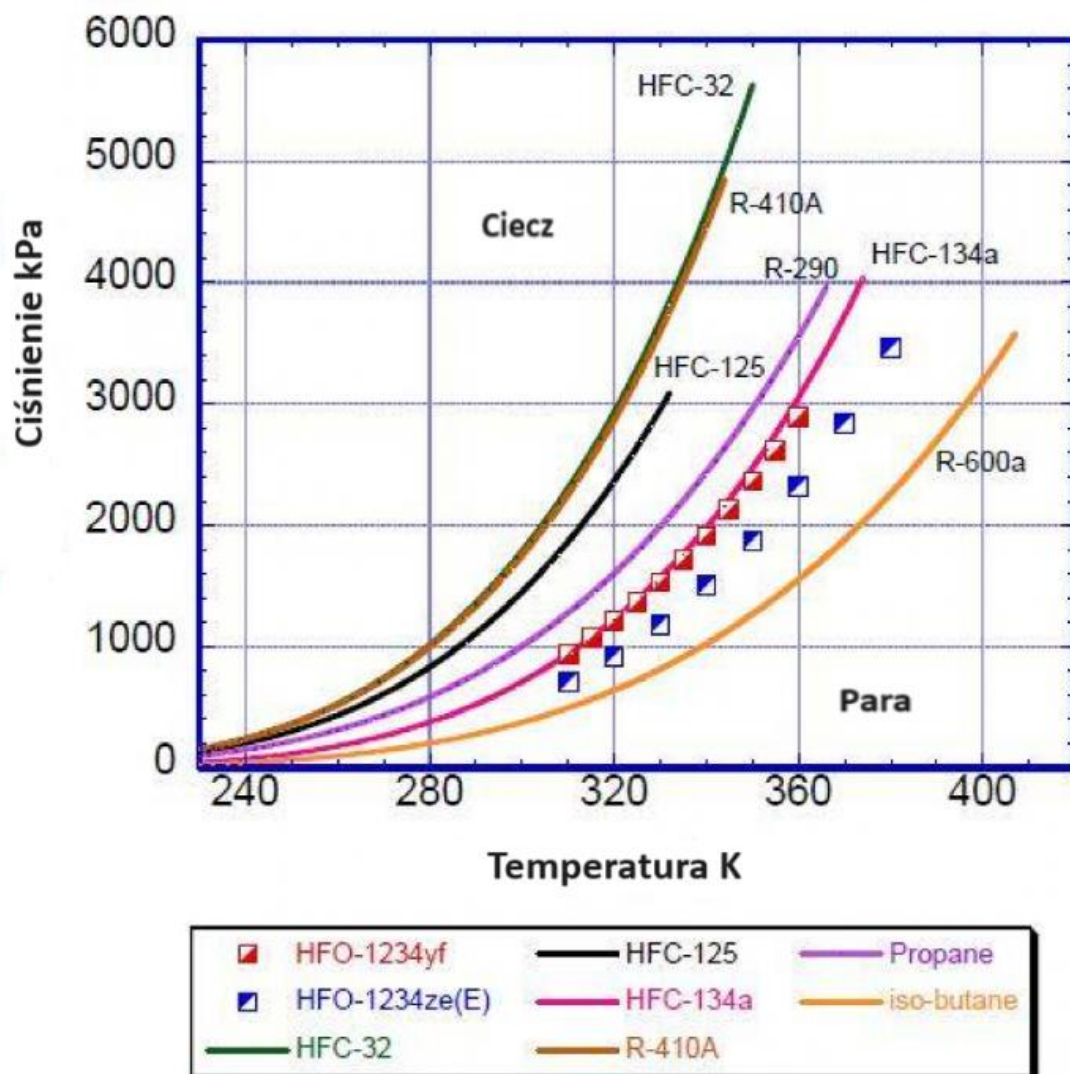
- ciśnienie i temperatura w punkcie krytycznym,
- objętość właściwa,
- entalpia właściwa,
- entropia właściwa,
- krzywa ciśnienia pary w funkcji temperatury,
- niski punkt krzepnięcia,
- niska temperatura wrzenia,
- wysoka przewodność cieplna,
- niska lepkość,
- ciśnienie parowania niższe od ciśnienia atmosferycznego,
- dużą jednostkową wydajność chłodniczą, zapewniającą mniejszy strumień krążącego w układzie czynnika, co umożliwia zastosowanie sprężarki o mniejszym wydatku przepływu,
- niskie ciśnienie skraplania.

d) niewchodzący w reakcje z elementami konstrukcyjnymi,

e) brak własności niszczących, olej smarny nie powinny wchodzić w reakcje chemiczne,

- f) nie kwasowy w przypadku mieszaniny z wodą,
- g) stabilny chemicznie,
- h) dostępny w sprzedaży,
- i) łatwo wykrywalny w przypadku wycieku,
- j) tani inwestycyjnie,
- k) zgodny z obowiązującymi dyrektywami, rozporządzeniami i normami,

Zależność ciśnienia nasycenia w funkcji temperatury pokazana na rysunku 15 wskazuje zakres temperatur i ciśnienia, dla wybranych czynników chłodniczych które mają postać cieczy i pary.

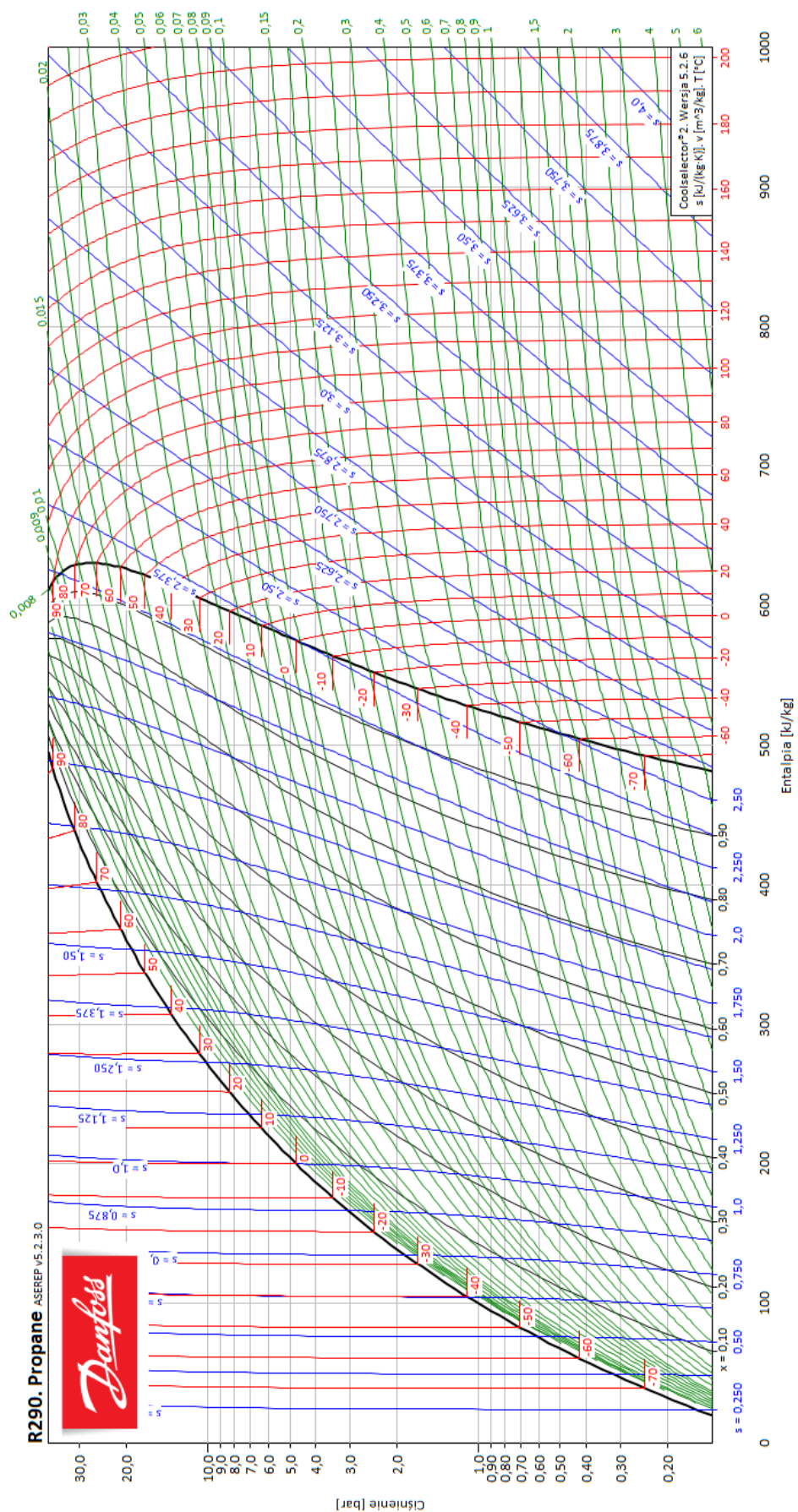


Rysunek 15 Porównanie temperatury i ciśnienia nasycenia dla wybranych czynników chłodniczych [26]

Część wartości termodynamicznych podczas wyboru czynnika chłodniczego można odczytać i przeanalizować na rysunku 16 który pokazuje wykres Mollier'a ($\log p$, h). Wykres ciśnienia i entalpii czynnika chłodniczego obrazuje nam krzywą linie nasycenia, która zbiega się z krawędzią krzywej dzwonowej dla zmiany fazy i jest linią o dużym znaczeniu. W rzeczywistości linia ta jest odpowiedzialna za oddzielenie strefy przegrzanej pary od strefy nasyconej cieczy. W dzwonie przemiany fazowej izotermy mają ten sam punkt odniesienia co izobary [20][21][22][23][26][29]:

Wykres ciśnienie-entalpia dla czynnika chłodniczego jest tworzony na pokazanym rysunku 16, wykres Molliera. Na tym diagramie zmienne parametry termodynamiczne są przedstawione wzdłuż trzech linii [20][21][22][23][26][29]:

- Linie izobar - poziome linie wskazujące stałe ciśnienie.
- Linie izoentalpii – pionowe linie, w których entalpia jest przedstawiona w postaci stałej.
- Linie izotermiczne - linie przedstawiające stałą temperaturę w zależności od obszaru, w którym się znajdują. Gdy znajdują się w obszarze mieszania cieczy i pary (wewnątrz dzwonu), ponieważ temperatura będzie zmieniać się w taki sam sposób, jak ciśnienie, linie izotermiczne będą poziome i równoległe do izobar. W przypadku strefy cieczy i strefy pary przegrzanej (po bokach dzwonu) zmiany ciśnienia i entalpii będą zależeć od ciepła właściwego płynu. W przypadku cieczy ciepło właściwe nie będzie związane z ciśnieniem. Dlatego linie izotermiczne będą się zmieniać tylko w odniesieniu do entalpii i będą wykreślane pionowo.



Rysunek 16 Wykres Mollier'a (log p, h) czynnika chłodniczego R290a [29]

2.4. Podsumowanie przeglądu literatury

Analiza aktów prawnych i literatury przedstawia cele ograniczania i wycofywania czynników związanych z negatywnym wpływem na niszczenie warstwy ozonowej, zwiększeniem emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększeniem sprawności energetycznej wytwornic wody ziębniczej. Ograniczenia te dotyczą dotychczas i aktualnie stosowanych czynników chłodniczych w wytwornicach pracujących na czynnikach chłodniczych R134a, R410a, R407c, które w 2027 roku zostaną zabronione do stosowania w nowych urządzeniach, oraz R513a, R454b które zostaną wycofane z dniem 1 stycznia 2032 roku zgodnie z ROZPORZĄDZENIEM PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych, zmieniające dyrektywę (UE) 2019/1937 i uchylające rozporządzenie (UE) nr 517/2014 na którym pierwotnie doktorant opierał swoje założenia [6].

ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych jest najbardziej aktualnym rozporządzeniem, które wprowadziło wiele nowych definicji. Rozszerzono definicję regeneracji, zakwalifikowano jako F-gazy fluorowane substancje (w tym HFO i HCFO). Zdefiniowano w rozporządzeniu nazwę chiller oraz kategorię urządzenia chłodniczego, klimatyzacyjnego którym jest chiller, co w temacie tej rozprawy zostało nazwane wytwornicą wody ziębniczej [25].

W ostatnim roku wprowadzono zmiany w regulacjach dotyczących fluorowanych gazów cieplarnianych, w tym rozporządzenie Komisji (UE) 2016/2281 i zmiany w rozporządzeniu (UE) nr 517/2014, mające na celu dalszą redukcję ich emisji. Z kolei rozporządzenie (UE) 2024/573 stanowi kolejny krok w dostosowywaniu polityki unijnej do wyzwań związanych z ochroną klimatu [6][25].

Dodatkowym wymogiem jest, aby zastosowany czynnik w wysokotemperaturowej wytwornicy wody ziębniczej spełniał wymagania energetyczne w celu uzyskania wysokiego współczynnika energetycznego SEPR, który został zdefiniowany w oznaczeniach i punkcie 6. Wartości te zostały określone zgodnie z Rozporządzeniem Komisji (UE) 2016/2281 z dnia 30 listopada 2016 r. dotyczące zrealizowanej dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE wprowadzającej powszechne zasady określania warunków dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów wysokotemperaturowych agregatów chłodniczych [30]:

- a) od dnia 1 stycznia 2018 r. współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych SEPR nie może być niższy niż 4,5 dla założonej mocy badawczej,
- b) od dnia 1 stycznia 2021 r. współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych SEPR nie może być niższy niż 5,0 dla założonej mocy badawczej.

Zestawiono również rozwiązania przedstawione przez Autorów [8][9][10][11][12][13][14][15] [16][17][18] głównych komponentów stosowanych w wytwornicach wody żiębniczej, oraz scharakteryzowano je pod kątem zastosowania i doboru dla wybranej aplikacji, przy różnych mocy chłodniczych z zachowaniem najwyższej sprawności energetycznej.

Przedstawiono szczegółowe informacje na temat konstrukcji i eksploatacji urządzeń chłodniczych sprężarkowych. Zawierają one także omówienie różnych typów systemów chłodniczych, w tym agregatów z różnymi systemami skraplania czynników chłodniczych, oraz ich zastosowań w różnych gałęziach przemysłu.

Literatura wskazuje na rosnącą rolę nowoczesnych technologii w chłodnictwie, a także na ich wpływ na zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko. W szczególności urządzenia te muszą być projektowane z uwzględnieniem efektywności energetycznej oraz minimalizacji wykorzystania szkodliwych czynników chłodniczych.

Akty prawne uwzględniają również aspekty norm bezpieczeństwa i standardów technicznych stosowania czynników chłodniczych ich palności oraz toksyczności określone w Normie PN-EN 378. W kontekście nowoczesnych urządzeń chłodniczych, w literaturze podkreślano znaczenie dla eksploatujących, szczególnie w odniesieniu do klasy bezpieczeństwa czynników chłodniczych które jest jedną z najważniejszych klasyfikacji opisanych w części 1 PN-EN 378 [24][27].

Wnioski z przeprowadzonych badań są następujące [24][27]:

- a) węglowodorowe naturalne czynniki chłodnicze posiadają bardzo dobre własności termodynamiczne, niskie ciśnienia pracy w odniesieniu do wspomnianego czynnika chłodniczego R410a, posiadają szeroki zakres możliwości stosowania nisko jak i wysokotemperaturowego chłodzenia,
- b) węglowodorowe naturalne czynniki chłodnicze pozwalają na zmniejszenie GWP o nawet 99,95% względem najpopularniejszego czynnika R410a,
- c) od 2026 do 2049 roku maksymalna ilość w tonach ekwiwalentu dwutlenku węgla ma zostać ograniczona o ponad 10 razy a od 2050 roku ma wynieść 0 zgodnie z Wyciąg

z rozporządzenia (UE) 2024/573 względem Rozporządzenia 517/2014 przedstawiający wycofywanie HFC od 2025 do 2050 roku na podstawie maksymalnej ilości wprowadzanej na rynek europejski pokazane w tabeli 11,

- d) gęstość naturalnego czynnika R290 jest o ponad połowę mniejsza w porównaniu do węglodwutlenku R410,
- e) dzięki niskiej gęstości i wysokiej wydajności wymiany ciepła, ilość napełnienia propanem jest bardzo niska.

Tabela 11 Wyciąg z rozporządzenia (UE) 2024/573 względem Rozporządzenia 517/2014 przedstawiający wycofywanie HFC od 2025 do 2050 roku na podstawie maksymalnej ilości wprowadzanej na rynek europejski [6][25]

Lata	Maksymalna ilość w tonach ekwiwalentu dwutlenku węgla
2025 – 2026	42 874 410
2027 – 2029	21 665 691
2030 – 2032	9 132 097
2033 – 2035	8 445 713
2036 – 2038	6 782 265
2039 – 2041	6 136 732
2042 – 2044	5 491 199
2045 – 2047	4 845 666
2048 – 2049	4 200 133
2050 i kolejne lata	0

Podsumowując, literatura omawia złożony i interdyscyplinarny charakter działań mających na celu ochronę warstwy ozonowej, ograniczenie ekwiwalentu dwutlenku węgla oraz uzyskanie wysokich sprawności energetycznych wysokotemperaturowych wytwornic wody żebniczej. Przepisy międzynarodowe oraz regulacje unijne, w tym rozporządzenia dotyczące fluorowanych gazów cieplarnianych, stanowią fundamenty działań prawnych. Z kolei rozwój technologii chłodniczych, innowacje w zakresie bezpieczeństwa i certyfikacji oraz wdrażanie nowych norm i standardów technicznych stanowią kluczowe elementy zapewnienia efektywności energetycznej i ochrony środowiska.

W przyszłości dalsza integracja działań legislacyjnych i technologicznych będzie niezbędna do osiągnięcia zrównoważonego rozwoju i minimalizacji negatywnego wpływu na klimat i warstwę ozonową.

Literatura nie przedstawia badań dotyczących wysokotemperaturowych wytwornic wody ziębniczej pracujących na naturalnych czynnikach chłodniczych.

3. Cel i zakres pracy

Przegląd literatury w tym aktów prawnych wskazuje kierunki rozwoju wytwornic wody ziębniczej. Większość opracowań literaturowych skupia się na dotychczasowych rozwiązaniach konstrukcyjnych agregatów wody ziębniczej pracujących głównie z syntetycznymi czynnikami chłodniczymi. Literatura nie uwzględnia w tak szerokim zakresie naturalnych węglowodorowych czynników chłodniczych, ich własności termodynamicznych, sprawności energetycznych, wpływu na otoczenie. Na podstawie studiów literatury stwierdzono potrzebę uzupełnienia wiedzy z zakresu oceny stosowania naturalnych czynników ziębniczych w wytwornicach wody ziębniczej.

Celem pracy jest wykazanie, że istnieje możliwość zbudowania efektywnie działającej wytwornicy wody ziębniczej z naturalnym czynnikiem chłodniczym. Wytwornica winna być przyjazna dla środowiska i użytkownika a do jej wytworzenia winny zostać wykorzystane dostępne na rynku komponenty. Uwzględniając cel pracy, autor sformułował hipotezę.

Hipoteza

Występuje naturalny czynnik chłodniczy, zastosowany w przemysłowej wytwornicy wody ziębniczej zapewniający skonstruowanie urządzenia zgodnie z obowiązującymi przepisami i wymaganymi sprawnościami energetycznymi z dostępnych na rynku komponentów zapewniając:

- a) maksymalną wartość współczynnika efektywności energetycznej SEPR, lecz nie mniejszą niż 5,00,
- b) współczynnik GWP czynnika chłodniczego poniżej 5,
- c) obniżenie kosztów eksploatacji wynikających z obligatoryjnych kontroli szczelności agregatów wody ziębniczej,
- d) obniżenie zużycia energii elektrycznej w porównaniu do rynkowych agregatów pracujących z użyciem syntetycznych czynników chłodniczych.

Realizacja przyjętego celu wymagała wykonania kolejnych zadań:

- a) dobór naturalnego czynnika chłodniczego do wytwornicy wody ziębniczej,
- b) projekt stanowiska badawczego wytwornicy wody ziębniczej, do zastosowań gospodarczych i przemysłowych pracującej na ekologicznym czynniku chłodniczym,
- c) budowa stanowiska,
- d) wykonanie badań sprawności energetycznej wytwornicy wody ziębniczej,
- e) porównanie własnych badań z wytwornicami wody lodowej z czynnikami syntetycznymi i naturalnymi,

4. Dobór naturalnego czynnika chłodniczego do wytwornicy wody lodowej

Naturalne czynniki chłodnicze to związki chemiczne powstające w wyniku procesów biochemicznych zachodzących w przyrodzie, czyli substancje te naturalnie występują w biosferze. Ponadto nie są szkodliwe dla warstwy ozonowej ($ODP = 0$) i mają bardzo niski lub zerowy potencjał globalnego ocieplenia ($GWP \approx 0$). Co więcej, wysoka wydajność tych czynników chłodniczych oznacza, że mają one mniejszy pośredni udział w globalnym ociepleniu planety. Produkty te były stosowane jako czynniki chłodnicze już w XIX wieku, a obecnie zaczęto je ponownie stosować ze względu na ich niewielki negatywny wpływ na środowisko.

4.1. Przegląd naturalnych czynników chłodniczych,

Głównymi naturalnymi czynnikami chłodniczymi stosowanymi obecnie w chłodnictwie są: amoniak, dwutlenek węgla i węglowodory (propan, izobutan i propylen ale w szczególności, propan). Poniżej przedstawiono charakterystykę tych czynników chłodniczych, ich zastosowania oraz porównanie ich zalet i wad.

Amoniak R-717 / NH_3

Amoniak posiada zerowy potencjał niszczenia warstwy ozonowej ($ODP = 0$) oraz zerowy potencjał globalnego ocieplenia ($GWP = 0$). Dzięki swoim doskonałym właściwościom termodynamicznym jest właściwym środkiem do stosowania jako czynnik chłodniczy w układach chłodniczych sprężających pary czynnika chłodniczego zapewniający niższe zużycie energii elektrycznej w porównaniu z innymi czynnikami chłodniczymi [20][21][22][23][29].

R-717 był wykorzystywany jako naturalny czynnik chłodniczy przed opracowaniem czynników syntetycznych, kiedy to zaczęto go użytkować w zastosowaniach przemysłowych dużych mocy chłodniczych, co ma również miejsce obecnie. Charakteryzuje się dobrą efektywnością energetyczną i niskim kosztem dla tych zastosowań. Głównym obszarem zastosowania jest spożywcze chłodnictwo przemysłowe ze sprężarkami śrubowymi, choć wykorzystuje się go również jako czynnik chłodniczy w instalacjach absorpcyjnych NH_3-H_2O w zastosowaniach agregatów wody ziębnej [20][21][22][23][29].

Jego zalety jako czynnika chłodniczego są dobrze znane i jest on stosowany jako czynnik chłodniczy od ponad stulecia, osiągając temperatury parowania tak niskie, jak $-75^\circ C$. Jest to alternatywny czynnik chłodniczy do urządzeń klimatyzacyjnych i układów

chłodniczych. Ponadto można go zastosować w nowych i istniejących jednostkach. Ma niską temperaturę parowania (-33°C) i wysokie ciepło utajone parowania (1371 kJ/kg). Porównując amoniak do powszechnie stosowanego syntetycznego czynnika R404a którego ciepło utajone parowania wynosi $202,1\text{ kJ/kg}$ obrazuje ponad sześciokrotne większe ciepło utajone. Czynnik ten utrzymuje się w atmosferze przez kilka dni, dlatego zalicza się go do gazów biodegradowalnych [20][21][22][23][29]..

Ten czynnik chłodniczy został sklasyfikowany jako „klasa bezpieczeństwa = B2L”, jest to gaz „niskopalny” i „wysoko toksyczny” [20][21][22][23][29]..

Pod względem bezpieczeństwa, amoniak można w łatwy sposób wykryć, ponieważ ma on specyficzny zapach. Niestety jest wysoce toksyczny, więc wszystkie instalacje wykorzystujące amoniak muszą zostać zbudowane według międzynarodowych specyfikacji i przepisów bezpieczeństwa oraz zapewniać, że wszyscy operatorzy muszą być wysoko wykwalifikowani oraz bezustannie korzystać ze środków ochrony indywidualnej.

Wykres $\log(p)$ -h dla amoniaku przedstawiono na rysunku 17 [20][21][22][23][29].

Główne zastosowania amoniaku [20][21][22][23][29]:

- Przemysłowe agregaty dużych mocy chłodniczych,
- Wytwornice wody ziębniczej dużych mocy,
- Układy kaskadowe z innymi czynnikami chłodniczymi np. CO_2 ,
- Głównie układy ze sprężarkami śrubowymi i odśrodkowymi,

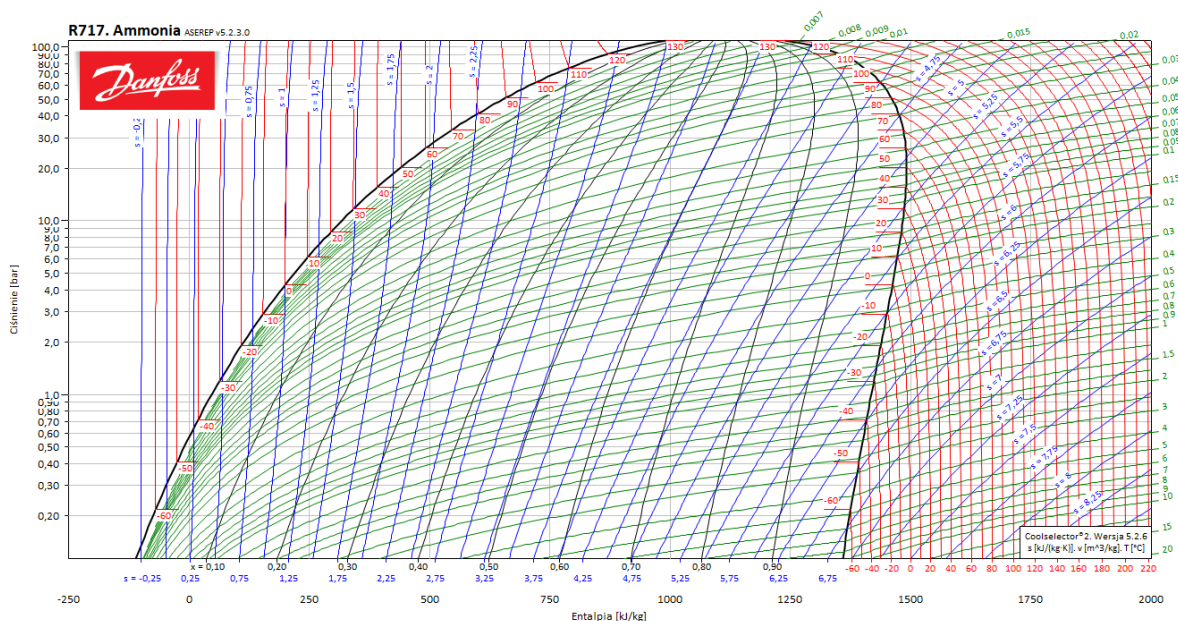
Zalety [20][21][22][23][29]:

- Bardzo wysokie ciepło utajone parowania (1371 kJ/kg), czyli wyższa wydajność chłodnicza niż w przypadku innych czynników chłodniczych,
- $\text{ODP} = 0$, $\text{GWP} = 0$,
- Niekosztowny w zakupie,
- Brak ryzyka starzenia się,
- Mieszalny z wodą,
- Dobre własności przenoszenia ciepła,
- Można mieszać go z olejami mineralnymi,
- Mniejsza średnica rur w porównaniu z syntetycznymi czynnikami chłodniczymi,

Wady [20][21][22][23][29]:

- Toksyczny,
- Lekko łatwopalny,
- Ryzyko zapalenia się w określonych warunkach,
- Zastosowanie czynnika tylko do określonych zastosowań,

- Wysokie koszty inwestycyjne instalacji i utrzymania wykwalifikowanych operatorów,



Rysunek 17 Wykres log (p) – h dla naturalne czynnika chłodniczego R717 – Amoniak [29]

Właściwości fizyczne amoniaku przedstawiono w tabeli 12.

Tabela 12 Właściwości fizyczne naturalnego czynnika chłodniczego R717 - Amoniak [29]

R717	Rosa, min	Rosa, max	Wrzenie, min	Wrzenie, max	Gaz, min	Gaz, max	Ciecz, min	Ciecz, max	Punkt Krytyczny
T [°C]	-75	130	-75	130	-75	300	-75	130	132,4
p [bar]	0,075	108,9	0,075	108,9	0,075	108,9	0,075	108,9	113,6
d [kg/m ³]	0,07759	156,7	313,5	730,8	0,02669	156,7	313,5	734,7	233,3

Dwutlenek węgla R744 / CO₂

Dwutlenek węgla CO₂, (R744), wykorzystywany jako czynnik chłodniczy, jest dobrą alternatywą dla zastąpienia HFC (fluorowęglowodorów), ponieważ nie jest szkodliwy dla warstwy ozonowej (ODP = 0), a jego potencjał tworzenia efektu cieplarnianego jest równy jeden (GWP = 1), przyjmując tę ostatnią wartość jako odniesienie do określenia GWP innych gazów. Jest to bezwonny, bezbarwny i o większej gęstości od powietrza gaz, wykorzystywany jako czynnik chłodniczy od ponad stu lat. Mimo tego, że dwutlenek węgla jest potrzebny do życia na Ziemi, jest to także gaz cieplarniany, który spowoduje przekształcenie środowiska, jeżeli jego stężenie w atmosferze wysoce wzrośnie. CO₂ jako czynnik chłodniczy został sklasyfikowany w „Klasa bezpieczeństwa = A1”, tj. jest „niepalny” i ma „niską toksyczność” [20][21][22][23][29].

Dwutlenek węgla sięga swoją historią w chłodnictwie jeszcze przed czynnikami syntetycznymi, lecz niezadługo ze względu na wymagającą i złożoną konstrukcję układu chłodniczego. Posiada bardzo dobre właściwości termofizyczne, aczkolwiek powoduje trudności eksploatacyjne ze względu na bardzo niską wartość temperatury krytycznej ($30,978^{\circ}\text{C}$) i wysokie ciśnienia pracy. Ma znacznie większą wydajność objętościową niż konwencjonalne czynniki chłodnicze. W przypadku funkcjonowania układów chłodniczych w temperaturach otoczenia poniżej $+25^{\circ}\text{C}$, pracuje w cyklu podkrytycznym, a w wyższych temperaturach pracuje w trybie transkrytycznym. Należy nadmienić, że w przypadku zastosowania układów transkrytycznych, wymagane dla prawidłowego funkcjonowania jest stosowanie złożonych obiegów (dochładzanie mechaniczne podczas postoju, sprężarka równoległa, eżektory i inne) [20][21][22][23][29].

Dwutlenek węgla cechuje się wysoką przewodnością cieplną oraz dużą gęstością w fazie gazowej, co umożliwia dobre przenoszenie ciepła w parownikach, skraplaczach i chłodnicach gazu (gas cooler). Pozwala to na wybór mniejszych jednostek w porównaniu z jednostkami wykorzystującymi HCFC, CFC i HFC. Dodatkowo, dzięki niskiemu spadkowi ciśnienia, wymagane średnice rur są mniejsze. Niestety, CO_2 podczas spadku z ciśnienie wydostając się z układu w przypadku nieszczelności może spowodować eksplozję z rozrzuconiem czynnika chłodniczego w postaci suchego lodu. Obowiązkowo należy pamiętać, że dwutlenku węgla w żadnej sytuacji nie należy uzupełniać do instalacji w postaci ciekowej, kiedy w układzie występuje ciśnienie poniżej punktu potrójnego (5,2 bara). W konsekwencji takiego działania czynnik chłodniczy w postaci ciekłej włączany do układu gwałtownie zmieniłby stan, w suchy lód tworząc korek w instalacji [20][21][22][23][29].

Dwutlenek węgla jest odpowiednią alternatywą zarówno dla chłodnictwa komercyjnego oraz przemysłowego, lecz wymagane jest zapewnienie środków bezpieczeństwa. Operatorzy i użytkownicy muszą zostać przeszkoleni, że dwutlenku węgla nie można wyczuć, więc, poprzez większą gęstość od powietrza, prawdopodobnie będzie wypierał tlen do limitów szkodliwych dla zdrowia. Ze względu na fakt, że nie wydzielą zapachu, może dojść do sytuacji, że w przypadku wycieku technik nie będzie w stanie go wykryć. Takie właściwości sprawiają, że kluczowe jest zwrócenie szczególnej uwagi na detekcję nieszczelności, dysponowanie systemu alarmowego, który ma za zadanie wykryć i w porę zaalarmować o nadmiernej obecności CO_2 oraz posiadanie systemu wentylacji awaryjnej [20][21][22][23][29].

Wykres lg p-h dla dwutlenku węgla przedstawiony jest na rysunku 18, właściwości termodynamiczne zebrane w tabeli 13, a jego charakterystykę jako czynnika chłodniczego w tabeli nr 14.

Ten czynnik chłodniczy został sklasyfikowany jako „klasa bezpieczeństwa = A1”, jest to gaz „niepalny” i „niska toksyczność” [20][21][22][23][29].

W odróżnieniu do pozostałych naturalnych czynników chłodniczych, zastosowanie CO₂ nie jest możliwe dla urządzeń już eksploatowanych pracujących na naturalnych czy też syntetycznych czynnikach chłodniczych. Agregaty muszą być skonstruowane zgodnie z właściwościami CO₂ i przystosowane do wysokich ciśnień, przy jakich będą pracować. Jedną zaletą nad węglowodorami jest to, że można go stosować w instalacjach bez ograniczeń napełnienia ilością czynnika [20][21][22][23][29].

Główne zastosowania dwutlenku węgla [20][21][22][23][29]:

- Chłodnictwo przemysłowe,
- Chłodnictwo komercyjne, np. sklepy mięsne, cukiernicze,
- Systemy monoblokowe,
- Wytwornice wody ziemniczej – zaczynają się pojawiać w ofertach producentów,
- Supermarkety,
- Mroźnie i chłodnie składowe, centra logistyczne,

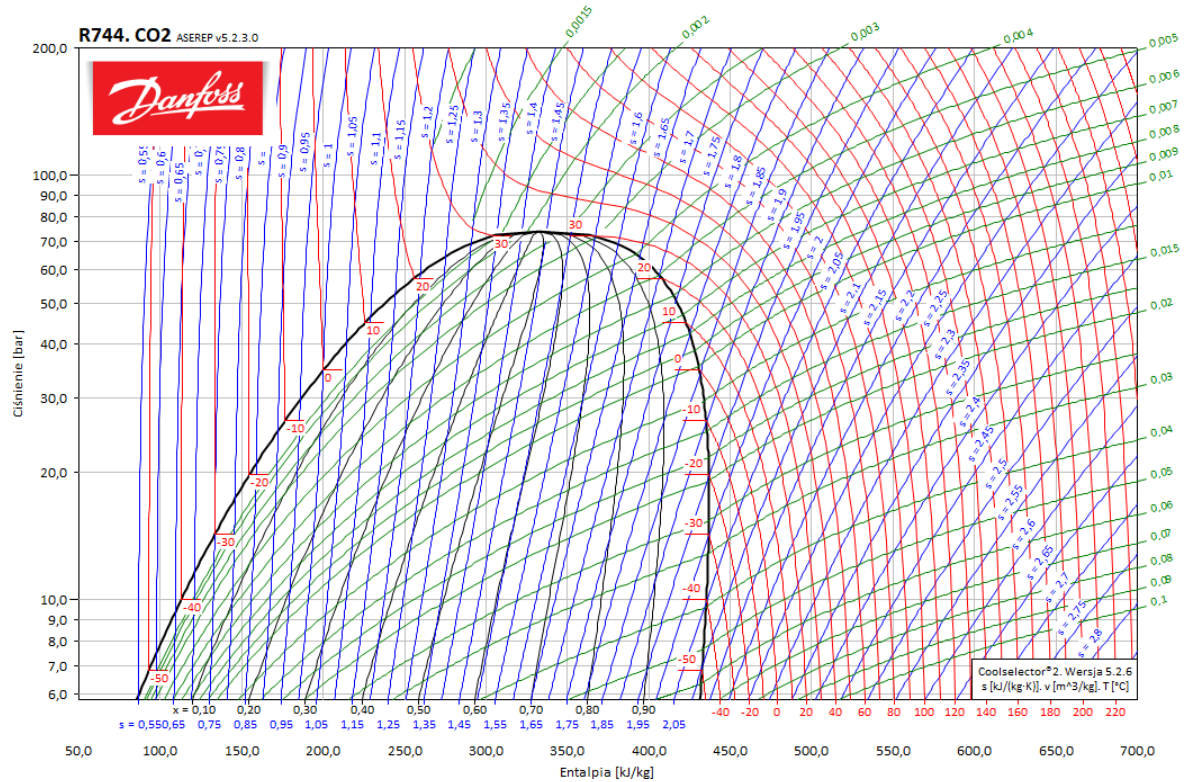
Zalety [20][21][22][23][29]:

- Nie palny,
- ODP = 0, GWP = 1
- Niska toksyczność (niebezpieczny w wysokich stężeniach),
- Można stosować z olejami POE, PAG i PVE,
- Łatwa dostępność, ponieważ jest uzyskiwana jako produkt uboczny różnych procesów,
- Niekosztowny w zakupie,
- Wysoka wydajność,
- Wysoki współczynnik przenikania ciepła,
- Posiada niską temperaturę parowania,

Wady [20][21][22][23][29]:

- Bardzo niska wartość temperatury krytycznej (30,978°C) i wysokie ciśnienia pracy,
- Pracuje w wyższych temperaturach i ciśnieniach niż inne czynniki chłodnicze,
- Nie ma możliwości retrofitu, zastosowanie tylko w nowych systemach,
- Wysokie nakłady inwestycyjne,

- Podczas nieszczelności, dwutlenek węgla akumuluje się przy posadce, wypychając powietrze,
- Bezwonny, nie można go wyczuć,



Rysunek 18 Wykres log (p) – h dla naturalnego czynnika chłodniczego R744 - Dwutlenek węgla [29]

Właściwości fizyczne dwutlenku węgla przedstawiono w tabeli 13.

Tabela 13 Właściwości fizyczne naturalnego czynnika chłodniczego R744 - Dwutlenek węgla [29]

R744	Rosa, min	Rosa, max	Wrzenie, min	Wrzenie, max	Gaz, min	Gaz, max	Ciecz, min	Ciecz, max	Punkt Krytyczny
T [°C]	-55	30,9	-55	30,9	-55	300	-55	102,8	31
p [bar]	5,54	73,67	5,54	73,67	5,54	200	5,54	200	73,77
d [kg/m ³]	14,67	415,5	522,3	1174	5,126	467,6	467,6	1201	467,6

Tabela 14 Właściwości naturalnego czynnika chłodniczego R744 - Dwutlenek węgla [29]

Lp.	Właściwości	Wartość
1.	Wzór chemiczny	CO ₂
2.	Klasa bezpieczeństwa	A1
3.	Palność	Niepalny
4.	Toksyczność	Niska toksyczność
5.	Zapach	Bezzapachowy
6.	Kolor	Bezbarwny

Węglowodory

Węglowodory są globalnie wykorzystywane w wielu działach chłodnictwa dzięki przyjaznym dla środowiska właściwościom. Są bezwonne, bezbarwne, współczynnik ODP = 0 oraz $GWP \leq 6$. Wykorzystywane są zwłaszcza w układach kaskadowych oraz wtórnych, takich jak systemy chłodnicze w supermarketach, w wytwornicach wody ziębniczej od niedawna z systemami bezpieczeństwa oraz w urządzeniach kompaktowych. Warto również podkreślić, że ze względu na ich wysoką palność, muszą być spełnione określone wymagania bezpieczeństwa, a ich zastosowanie ogranicza się do szczelnych obiegów chłodniczych z niewielkimi obciążeniami, gdy urządzenia są instalowane w zamkniętych pomieszczeniach [20][21][22][23][29].

Wykorzystując węglowodory jako czynniki chłodnicze należy zadbać, aby w lokalizacji instalacji nie znajdowały się źródła ciepła mogące wywołać płomienie oraz wyłączniki lub urządzenia wytwarzające iskry. Także występuje zakaz palenia w obrębie pracy zainstalowanego urządzenia. Dodatkowo należy zadbać o nie występowanie elektryczności statycznej, oraz zapewnić odpowiednią wentylację miejsca instalacji a także zabezpieczyć, aby w pobliżu nie znajdowały się osoby nieuprawnione wykonujące prace instalacyjne oraz konserwacyjne. Węglowodory nie mogą przedostawać się do piwnic i systemów kanalizacyjnych, ponieważ węglowodory mają większą gęstość od powietrza, co może stanowić problem, jeśli nie zostaną podjęte odpowiednie środki [20][21][22][23][29].

Monterzy oraz technicy serwisujący urządzenia zawierające węglowodory obowiązkowo muszą zostać przeszkoleni z zakresu zasad montażu, serwisu, bezpieczeństwa prac oraz z zakresu szczególnego obchodzenia się z węglowodorami. Eksploatujący, obsługa techniczna zakładu koniecznie musi posiadać wiedzę z zakresu stosowania środków bezpieczeństwa, w przypadku wystąpienia wycieku węglowodorów z instalacji [20][21][22][23][29].

W urządzeniach i instalacjach wykorzystujących węglowodory trzeba zachować szczególną ostrożność, aby upewnić się, że w obwodzie nie ma wycieków; podobnie należy upewnić się, że nie ma elementów tworzących iskry [20][21][22][23][29].

Propan R290

Propan jest stosowany w wielu różnych urządzeniach, takich jak pompy ciepła lub kompaktowe komercyjne agregaty chłodnicze.

Jest to gaz nietoksyczny, lecz wysoce łatwopalny gaz kwalifikowany w kategorii A3, o $ODP = 0$ i $GWP = 0,072$, zatem jest w pełni zgodny z limitami określonymi w rozporządzeniach w sprawie F-gazów. Jego właściwości termodynamiczne są podobne do R404a, chociaż ma niższe ciśnienia robocze i wydajności. Ma dobre właściwości termofizyczne. Stosowany jest także jako składnik podczas mieszania czynników chłodniczych. Posiada ograniczenia napełnienia które należy obliczyć zgodnie z obowiązującymi normami: EN 378-1:2016, ISO 5149:2014 i dyrektywą 2014/68/EU [20][21][22][23][29][45].

Przy zastosowaniu tego czynnika chłodniczego należy sprawdzić stopień czystości, ponieważ zanieczyszczenia mogą spowodować zniszczenie oleju smarowego w instalacjach lub przyczynić się do awarii niektórych części i szybkiego zużycia. W niektórych przypadkach węglowodory o niskiej czystości można mieszać z innymi węglowodorami, uzyskując duże różnice we właściwościach fizycznych i termodynamicznych pierwotnego węglowodoru.

Propan jest odpowiednią alternatywą chłodniczą. Jednostki wykorzystujące ten czynnik osiągają wyższą efektywność energetyczną i pracują przy niższych kosztach w porównaniu do jednostek zasilanych czynnikami fluorowanymi [20][21][22][23][29].

Podobnie jak w przypadku czynników chłodniczych typu węglowodorowego, również propan jest bardzo dobrze mieszalny z każdym rodzajem oleju. W niektórych przypadkach może być konieczne zastosowanie olejów o wyższej lepkości, aby zrekompensować tę nadmierną rozpuszczalność. Warto również podkreślić, że propan jest bezwonny, dlatego trudno jest wykryć wycieki po zapachu [20][21][22][23][29].

Główne zastosowania propanu [20][21][22][23][29].:

- Początkuje w wytwornicach wody ziębniczej,
- Pompy ciepła,
- Zakłady skraplania gazów,
- Układy kaskowe,
- Obiegi wtórne pętli agregatów w supermarketach,

- Kompaktowe jednostki chłodnicze z niewielką ilością czynnika chłodniczego,
- Wytwornice lodu,
- Meble chłodnicze

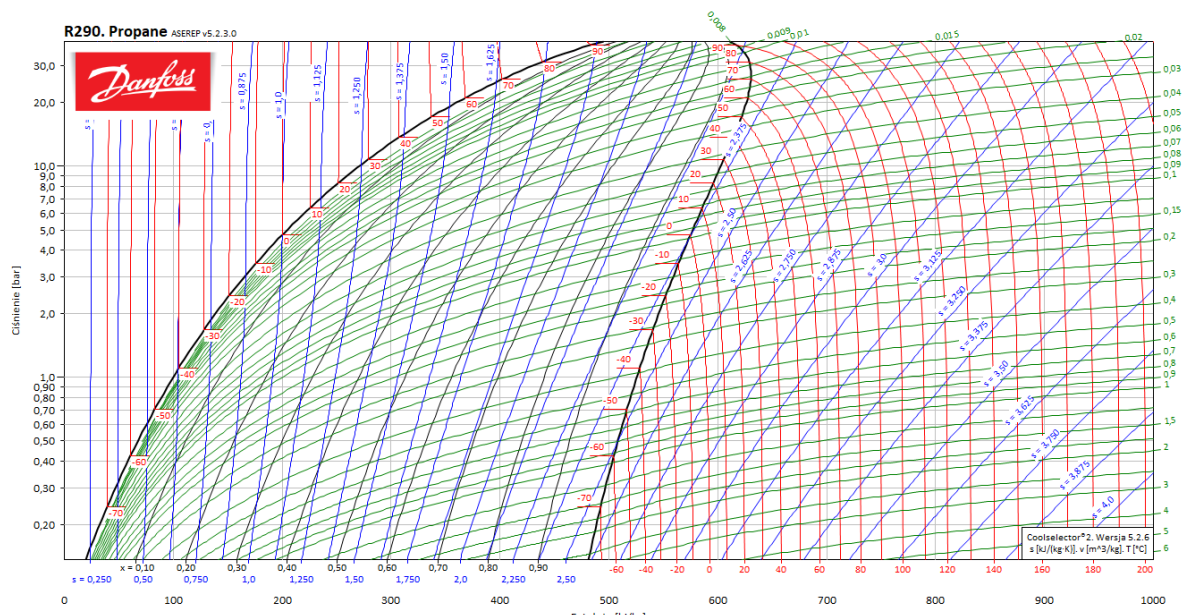
Zalety [20][21][22][23][29][45].:

- ODP = 0, GWP = 0,072,
- Nietoksyczny,
- Małe wartości sprężu (p_k / p_o),
- Niskie temperatury parowania do -40°C ,
- Niekosztowny w zakupie,
- Średnio-niski koszt układu chłodniczego
- Dobra kompatybilność z innymi materiałami (plastikiem i metalem)
- Można mieszać ze olejami POE,

Wady [20][21][22][23][29]:

- Łatwopalny,
- Dodatkowe koszty w zakresie środków bezpieczeństwa wymaganych dla sprzętu i personelu.

Wykres lg p-h dla propanu przedstawia na rysunku 19 właściwości termodynamiczne zebrane w tabeli 15 a jego charakterystykę jako czynnika chłodniczego w tabeli nr 16.



Rysunek 19 Wykres log (p) – h dla naturalnego czynnika chłodniczego R290 - Propan [29]

Tabela 15 Własności fizyczne naturalnego czynnika chłodniczego R290 - Propan [29]

R290	Rosa, min	Rosa, max	Wrzenie, min	Wrzenie, max	Gaz, min	Gaz, max	Ciecz, min	Ciecz, max	Punkt Krytyczny
T [°C]	-80	92	-80	92	-90	300	-90	92	96,7
p [bar]	0,131	39,03	0,131	39,03	0,131	39,03	0,131	39,03	42,51
d [kg/m ³]	0,3613	130,3	315,6	622,8	0,1208	130,3	315,6	636	220,5

Tabela 16 Właściwości naturalnego czynnika chłodniczego R290 - Propan [29]

Lp.	Właściwości	Wartość
1.	Wzór chemiczny	CH ₃ CH ₂ CH ₃
2.	Klasa bezpieczeństwa	A3
3.	Palność	Łatwopalny
4.	Toksyczność	Nietoksyczny
5.	Zapach	Bezzapachowy
6.	Kolor	Bezbarwny

Izobutan R600a

Czynnik chłodniczy R600 jest jednym z najdłużej wykorzystywanych czynników chłodniczych. Od momentu wprowadzenia do układów chłodniczych syntetycznych czynników, izobutan został czynnikiem bardzo rzadko stosowanym. Aktualnie w związku z obostrzeniami dotyczącymi syntetycznych czynników, wraca do chłodnictwa, jako czynnik nie jest szkodliwy dla warstwy ozonowej (ODP = 0), a jego potencjał tworzenia efektu cieplarnianego jest równy trzy (GWP = 0,022), jest uznawany za perspektywiczny do urządzeń o małej i średniej wydajności chłodniczej [20][21][22][23][29][45].

Izobutan jest bezzapachowym i bezbarwnym węglowodorem nasyconym, posiada większą gęstość od powietrza [20][21][22][23][29].

Ten czynnik chłodniczy został sklasyfikowany jako „klasa bezpieczeństwa = A3”, jest to gaz „palny” i „niska toksyczność”.

W małych instalacjach chłodniczych, w urządzeniach domowych lub gastronomicznych, biorąc pod uwagę ich znikome napełnienie izobutanem (10-100 g), nie występuje ryzyko pożarowe nawet dla bardzo małych pomieszczeń [20][21][22][23][29].

Główne zastosowania izobutanu [20][21][22][23][29]:

- Chłodziarki domowe i gastronomiczne,
- Klimatyzatory przenośne,

- Pompy ciepła o małych mocach,
- Kompaktowe jednostki chłodnicze z niewielką ilością czynnika chłodniczego,
- Małe urządzenia handlowe,

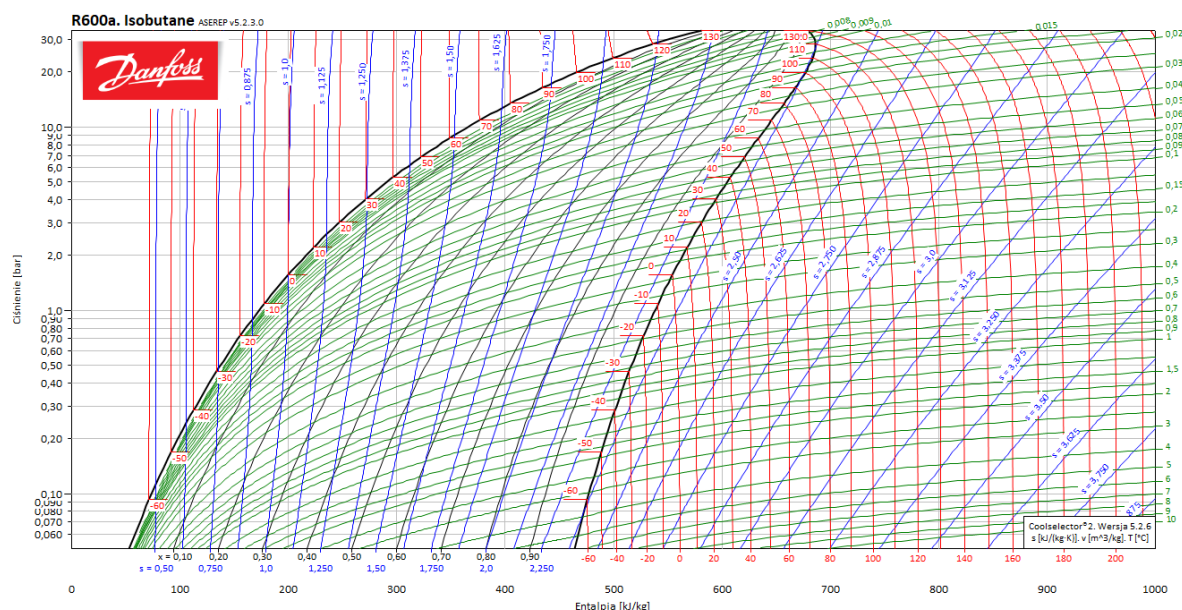
Zalety [20][21][22][23][29][45]:

- ODP = 0, GWP = 0,022,
- Wysoka wartość współczynnika przejmowania ciepła,
- Nietoksyczny,
- Małe wartości sprężu (p_k / p_o),
- Niekosztowny w zakupie,
- Średnio-niski koszt układu chłodniczego ze względu na niskie ciśnienia w układzie,
- Dobra kompatybilność z innymi materiałami (plastikiem i metalem)
- Wysoka zdolność do mieszania się z olejami mineralnymi,

Wady[20][21][22][23][29]:

- Łatwopalny,
- Dodatkowe koszty w zakresie środków bezpieczeństwa wymaganych dla sprzętu i personelu,
- Mała objętościowa wydajność chłodnicza,
- Niska lepkość dynamiczna oraz masa molowa,
- Zastosowanie w małych układach chłodniczych,

Wykres lg p-h dla izobutanu przedstawia na rysunku 20, właściwości termodynamiczne zebrane w tabeli 17, a jego charakterystykę jako czynnika chłodniczego w tabeli 18.



Rysunek 20 Wykres log (p) – h dla naturalnego czynnika chłodniczego R600 - Izobutan [29]

Tabela 17 Własności fizyczne naturalnego czynnika chłodniczego R600 - Izobutan [29]

R600a	Rosa, min	Rosa, max	Wrzenie, min	Wrzenie, max	Gaz, min	Gaz, max	Ciecz, min	Ciecz, max	Punkt Krytyczny
T [°C]	-70	130	-70	130	-90	250	-90	130	134,7
p [bar]	0,048	33,58	0,048	33,58	0,048	33,58	0,048	33,58	36,29
d [kg/m ³]	0,165	134,7	321	654,6	0,06382	134,7	321	676,4	225,5

Tabela 18 Właściwości naturalnego czynnika chłodniczego R600 - Izobutan [29]

Lp.	Właściwości	Wartość
1.	Wzór chemiczny	CH(CH ₃) ₃
2.	Klasa bezpieczeństwa	A3
3.	Palność	Łatwopalny
4.	Toksyczność	Nietoksyczny
5.	Zapach	Bezzapachowy
6.	Kolor	Bezbarwny

Propylen R1270

Propylen, czynnik chłodniczy z grupy węglowodorów nie jest szkodliwy dla warstwy ozonowej (ODP = 0), a jego potencjał tworzenia efektu cieplarnianego jest równy dwa (GWP = 2). Stosowany w chłodnictwie nisko i średnio temperaturowym.

Ten czynnik chłodniczy został sklasyfikowany jako „klasa bezpieczeństwa = A3”, jest to termodynamiczny czynnik „palny” i „niska toksyczność” [20][21][22][23][29].

Główne zastosowania propylenu [20][21][22][23][29]:

- Chłodziarki domowe i gastronomiczne,
- Automaty sprzedające,
- Nisko i średniotemperaturowe układy chłodnicze,
- Wytwornice wody ziębniczej – bardzo rzadko spotykane,
- Kompaktowe jednostki chłodnicze z niewielką ilością czynnika chłodniczego,
- Chłodnictwo przemysłowe,

Zalety [20][21][22][23][29]:

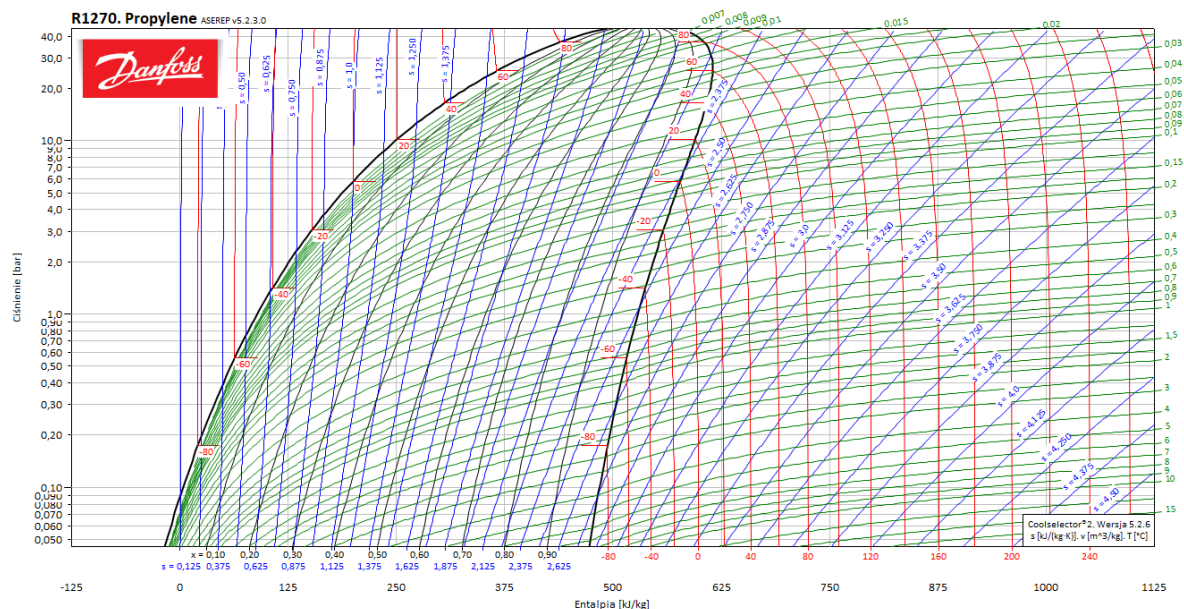
- ODP = 0, GWP = 2,
- Wysoka wartość współczynnika przejmowania ciepła,
- Nietoksyczny,

- Niekosztowny w zakupie,
- Średnio-niski koszt układu chłodniczego ze względu na niskie ciśnienia w układzie,
- Dobra kompatybilność z innymi materiałami (plastikiem i metalem)
- Wysoka zdolność do mieszania się z olejami mineralnymi,

Wady [20][21][22][23][29]:

- Łatwopalny,
- Dodatkowe koszty w zakresie środków bezpieczeństwa wymaganych dla sprzętu i personelu,

Wykres lg p-h dla propylenu przedstawia na rysunku 21, właściwości termodynamiczne zebrane w tabeli 18, a jego charakterystykę jako czynnika chłodniczego w tabeli 20.



Rysunek 21 Wykres log (p) – h dla naturalnego czynnika chłodniczego R1270 – Propylen [29]

Tabela 19 Własności fizyczne naturalnego czynnika chłodniczego R1270 - Propylen [29]

R1270	Rosa, min	Rosa, max	Wrzenie, min	Wrzenie, max	Gaz, min	Gaz, max	Ciecz, min	Ciecz, max	Punkt Krytyczny
T [°C]	-100	89,6	-100	89,6	-120	250	-120	89,6	91,1
p [bar]	0,04	44,32	0,04	44,32	0,04	44,32	0,04	44,32	45,55
d [kg/m ³]	0,1177	164	296,9	671,7	0,03882	164	296,9	696,5	229,6

Tabela 20 Właściwości naturalnego czynnika chłodniczego R1270 - Propylen [29]

Lp.	Właściwości	Wartość
1.	Wzór chemiczny	$\text{CH}(\text{CH}_3)_3$
2.	Klasa bezpieczeństwa	A3
3.	Palność	Łatwopalny
4.	Toksyczność	Niska toksyczność
5.	Zapach	Bezzapachowy
6.	Kolor	Bezbarwny

4.2. Wielokryterialna procedura wyboru czynnika chłodniczego,

Wielokryterialna metoda wspomagania podejmowania decyzji to kluczowy proces, stosowany w przypadkach, w których istnieje wiele dostępnych alternatyw, a wybór optymalnego wariantu zobowiązuje do uwzględnienia różnych, wielokrotnie sprzecznych kryteriów. Procedury tego typu są globalnie stosowane w różnych dziedzinach, takich jak ekonomia, inżynieria, i zarządzanie ponieważ pozwalają na racjonalne podejmowanie decyzji w zawiłych warunkach, gdzie ważne jest rozważenie wielu różnych kryteriów.

Wielokryterialna analiza decyzji opiera się na ocenie alternatyw na podstawie wielokrotnie rozbieżnych, wymagań. W tym kontekście kryteria mogą być ilościowe (np. masa, czas, moc, wydajność) lub jakościowe (np. toksyczność, wybuchowość, komfort użytkowania, wpływ na środowisko), a każdą z nich może mieć różną rangę w zależności od priorytetów decydenta. Występują sytuacje w których spotykamy się z okolicznościami, w których jedno kryterium może być sprzeczne z innym – na przykład, koszt inwestycyjny rozwiązania może być niski, ale jego efektywność nie spełnia oczekiwań lub rozwiązanie będzie stwarzało ryzyko wybuchu ale będzie miało najniższy współczynnik GWP [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40].

Podział problemów związanych ze wspomaganiem podejmowania decyzji na trzy różne klasy posiadające własne charakterystyczne cechy [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40]:

- problem wyboru – gdzie decydent ma za zadania wyselekcjonować jeden wariant spośród wielu kategorii,
- przyporządkowanie analizowanych wariantów, jak osoba decyzyjna posegreguje dany zbiór działań wśród pozostałych działań,
- problem klasyfikacji, łatwiejszy gdzie zgodnie z przyjętymi pierwotnie założeniami, decydent separuje warianty na części.

W literaturze przyjęto głównie dwie szkoły podejmowania decyzji amerykańską i francuską. Obie wykorzystują różne techniki i narzędzia w celu sprostania trudnością

powstałych z różnorodnych kryteriów. Metody amerykańskie z reguły skupiają się na bardziej obiektywnych oraz matematycznych warunkach analizy decyzyjnej, zaś metody francuskie koncentrują się bardziej na obiektywnych oraz jakościowych kryteriach, które uwzględniają nie łatwe do określenia warunki [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40].

Przykładami metody amerykańskiej są min. SMART(Simple Multi-Attribute Ranking Technique), SAW (Simple Additive Weighting Method), AHP(Analytical Hierarchy Process), a francuskiej: Electre(ELimination Et Choix Traduisant la Realia) i Promethee(Preference Ranking Organisation METHOD for Enrichment Evaluations) [34, 35, 36, 27, 28, 39, 40].

Literatura [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40] która omawia i odnosi się do metod wspomagania podejmowania decyzji w kontekście wielokryterialnym przedstawia ciąg zasad, które umożliwiają rozwiązywanie zagadnień:

- z różnych punktów widzenia różne rozwiązania mogą być uznawane za najlepsze, w zależności od wartości, preferencji oraz priorytetów decydenta.
- istnieją czynniki zewnętrzne lub wewnętrzne, które mogą wpływać na proces podejmowania decyzji kryteria oceny rozwiązań mogą ulegać zmianie w czasie,
- z perspektywy naukowej, wielokryterialne wspomaganie podejmowania decyzji powinno uwzględniać analizę ryzyka. Pozwoli to na określenie potencjalnych konsekwencji różnych opcji i wątpliwości, umożliwiając lepsze zrozumienie ewentualnych wyników decyzji oraz ich wpływu na cele decydenta,
- z uwagi na zmieniające się warunki
- z perspektywy metod decyzyjnych zakłada się, że decydent może nie dysponować pełną, idealną wiedzą o warunkach,
- metody decyzyjne są podstawą dla wielokryterialnego wspomagania podejmowania decyzji. Określa to, że obowiązkowo należy używać metod pozwalających na porównanie i ocenę różnych wariantów w kontekście wielu kryteriów.

Przykładem zagadnienia do podjęcia decyzji może być wybór optymalnego czynnika chłodniczego, który wymaga uwzględnienia różnych kryteriów, takich jak efektywność energetyczna, wpływ na środowisko, koszt, bezpieczeństwo i inne aspekty techniczne. W tym przypadku, wielokryterialne metody wspomagania podejmowania decyzji pomagają zidentyfikować najlepszą opcję spośród dostępnych czynników chłodniczych, które najlepiej odpowiadają zdefiniowanym wymaganiom.

Aby wybrać czynnik doktorant zdecydował się wesprzeć metodą decyzyjną i na podstawie studialnej analizy z dostępnych metod ich wad i zalet przedstawionych w tabeli 21 wybrał kolejno: ELECTRE, MAUT, AHP i SAW [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40].

Tabela 21 Przegląd zalet i wad wybranych metod wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji

Lp.	Metoda	Zalety metody	Wady metody
1.	ELECTRE (fr. ELimination Et Choix Traduisant la REalité)	- daje szanse uwzględnienia wagi kryteriów, - daje możliwość obsługi danych niepełnych lub nieprecyzyjnych, - ocena zgodna z warunkami rzeczywistymi,	- pośrednie wykorzystywanie podkryteriów, - trudna analiza progów, - po uzyskaniu hierarchi brak możliwości analizy między poszczególnymi wariantami
2.	MAUT (ang. Multi- Attribute Utility Theory)	- elastyczne dostosowanie względem specyficznych warunków, - możliwość starannej analizy preferencji oraz dostosowanie należytych wag kryterium	- może być niejasna i zawiła w implementacji, - precyzyjne określenie funkcji użyteczności i wag.
3.	AHP (ang. Analytic Hierarchy Process)	- możliwość uwzględnienia subiektywnych ocen i opinii decydenta, - sklasyfikowana metoda zobrazowania zadania, - kontrola zgodności ocen poprzez współczynnik niespójności,	- czasochłonna w przypadku wielu kryteriów, - trudność ustalenia wag do różnych kryteriów, nawet małe zmiany w przydzieleniu wag mogą prowadzić do dużych zmian w wynikach analizy
4.	SAW (ang. Simple Additive Weighting Method)	- prosta, przejrzysta i elastyczna metoda dostępna dla osób bez zaawansowanej wiedzy w zakresie analizy decyzyjnej, - przeistoczenie problemu wielokryterialnego na jednokryterialny - możliwość uwzględnienia preferencji decydenta,	- niezbędne są dane porównywalne, bez miary danych mogą wystąpić trudności w funkcji tej metody, - subiektywność podczas przypisywania wag do kryteriów,

Analizując zalety, wady, różnice pomiędzy metodami, określone warunki i przyjęte kryteria, uznano, że wybór metody SAW będzie najbardziej odpowiednim.

Opis metody SAW

Metoda sumy ważonej (SAW, ang. Simple Additive Weighting) to jest jedną z wielu metod wielokryterialnego wspomagania decyzji, której zadaniem jest ocena różnych możliwości na podstawie kryteriów. Uznana za najbardziej znaną i najczęściej stosowaną metodę dyskretną. Jej zaletami są intuicyjność oraz prostota w modelowaniu preferencji decydenta. Znajdujemy macierz znormalizowanych ocen i wariant decyzyjny, dla którego suma ważona ocen jest największa.

Jest to metoda, w której każdemu kryterium przypisuje się wagę, a następnie oblicza się sumę ważoną dla każdej z alternatyw, aby uzyskać ranking oparty na preferencjach decydenta. Można przedstawić metodę SAW przy użyciu funkcji [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40]:

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

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1, \quad (2)$$

Gdzie:

$w_i \in [0,1]$ – wskaźnik wagi,

W głównej mierze wagi kryteriów oznaczają istotność wybranego kryterium dla danej trudności. W przeglądzie metod normalizacji, kryteriów oraz wyboru wag występuje stosunek do wag kryteriów umożliwiającą normalizację wartości wybranych warunków. Najczęściej stosowaną metodą normowania zmiennych mającą na celu ocenę wariantów jest metoda unitaryzacji zerowej [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40].

Metoda ta inaczej nazywana normalizacją zerową jest jednym z popularniejszych podejść w procesie oceny wielu wariantów na podstawie kilku kryteriów, zwłaszcza gdy wartości poszczególnych zmiennych różnią się między sobą. Celem tej metody jest przekształcenie danych do postaci, która pozwala na łatwiejsze porównanie różnych wariantów, niezależnie od jednostek miary czy skali poszczególnych zmiennych. Dla tej metody w celu normalizacji oraz agregacji funkcji, zmienne używane podczas oceny kryteriów klasyfikowane są na trzy klasy [34, 35, 36, 27, 28, 39, 40]:

- Stymulanty – są to zmienne, których wzrost wartości wiąże się z poprawą oceny wariantu (np. wzrost wydajności). Dla stymulantów wartość zmiennej powinna rosnąć, aby ocena wariantu również rosła.
- Destymulanty – są to zmienne, których wzrost wartości wiąże się z pogorszeniem oceny (np. wzrost zanieczyszczenia środowiska, wzrost kosztów). W przypadku destymulantów, wartość zmiennej powinna maleć, aby poprawić ocenę wariantu.

- Nominanty – to zmienne, które mają określoną optymalną wartość (może to być wartość minimalna lub maksymalna). Każda wartość większa lub mniejsza od tej optymalnej wartości pogarsza ocenę. Na przykład, może to dotyczyć zmiennych takich jak temperatura.

Proces wspomaganie decyzji w zakresie wyboru optymalnego czynnika chłodniczego

Powyższa metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji (SAW) została zastosowana w celu wyboru optymalnego czynnika chłodniczego dla projektowanego stanowiska badawczego wytwornicy wody ziębniczej. Do analizy przyjęto zarówno czynniki naturalne jak i syntetyczne. Takie działanie ma pozwolić wybrać najlepszy czynnik i wykazać, że ten czynnik jest najlepszy niezależnie jakiego jest pochodzenia (naturalnego czy syntetycznego). Wybrano syntetyczne czynniki chłodnicze do analizy na podstawie najczęściej stosowanych aktualnie w wytwornicach wody ziębniczej [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40].

Przyjęto założenie, że najkorzystniejsza możliwość to ta, która charakteryzuje się najniższą wartością dla danego kryterium, co oznacza, że minimalna suma końcowego wyniku stanowi funkcję celu. Aby przeprowadzić wielokryterialną ocenę wybranych czynników chłodniczych, dokonano selekcji odpowiednich kryteriów decyzyjnych. Wśród tych kryteriów znalazły te, które można łatwo przedstawić w postaci liczb, jak i takie, które są trudne do wyrażenia w liczbach [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40].

Aby dokonać optymalnego wyboru czynnika chłodniczego, warto wziąć pod uwagę kilka kluczowych kryteriów, które pomogą w podjęciu decyzji w zależności od specyfiki zastosowania.

Zakwalifikowane czynniki chłodnicze do analizy wielokryterialnej zostały na podstawie aktualnie wykorzystywanych syntetycznych i naturalnych czynników o największym potencjale [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40]:

- R290 - propan,
- R32,
- R717 – amoniak,
- R410a,
- R407c,

Wybrane powyżej czynniki są wariantami decyzyjnymi a aby dokonać optymalnego wyboru czynnika chłodniczego, warto wziąć pod uwagę kilka kluczowych kryteriów, które pomogą w podjęciu decyzji w zależności od specyfiki zastosowania. Oto kilka

najważniejszych aspektów, które należy rozważyć przy wyborze czynnika chłodniczego [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40]:

- a) wartość współczynnika GWP (KR1) potencjału tworzenia efektu cieplarnianego w odniesieniu dla dwutlenku węgla, którego GWP wynosi 1,
- b) koszt inwestycyjny zakupu czynnika w odniesieniu do jednostki 1 kg (KR2) – po względem ekonomicznym napełnienia nowego urządzenia lub naprawy po wycieku, ujęto mierzalne kryterium,
- c) ciśnienie dla temperatury parowania $+5^{\circ}\text{C}$ (KR3) - parametr mający wpływ na spręż sprężarki - im jego wartość będzie bliższa ciśnienia skraplania tym mniejsze opory ma do pokonania sprężarka,
- d) ciśnienie dla temperatury skraplania $+45^{\circ}\text{C}$ (KR4) - bardzo ważna właściwość pod względem konstruktorskim w celu doboru i zaprojektowania odpowiednich materiałów odpornych na wysokie ciśnienia pracy,
- e) palność i toksyczność (KR5) - zgodnie z określeniem grup bezpieczeństwa czynników chłodniczych na podstawie normy PN-EN 378, W celu przeprowadzenia optymalizacji przy użyciu niemierzalnych danych trzeba kryteria jakościowe przeobrazić na kryteria ilościowe. Kryterium „e” zostało przekształcone w tabeli 22.

Tabela 22 Kryterium palności i toksyczności wg normy PN-EN 378 przekształcone z kryterium jakościowego na ilościowe

Opis jakościowy			Opis ilościowy
	Niska toksyczność	Wysoka toksyczność	
Wysoka palność	A3	B3	4
Palność	A2	B2	3
Niska palność	A2L	B2L	2
Brak propagacji płomienia	A1	B1	1

W tabeli 23 wykonano zestawienie obranych kryteriów dla pięciu wariantów, które przedstawia różne wartości decyzyjne wykorzystywane w procesie oceny wielokryterialnej. Wartości ocen dla kryteriów mierzalnych można uzyskać na podstawie danych dostarczonych w kartach katalogowych oraz materiałowych, zaś oceny kryterium jakościowego zostały określone przy zastosowaniu skali ocen przedstawionej w tabeli 23 [34, 35, 36, 27, 28, 36, 39, 40].

Tabela 23 Przypisane wartości kryteriów decyzyjnych dla różnych pięciu wariantów

Lp.	Opis kryterium	Wariant 1 – R290	Wariant 2 – R32	Wariant 3 – R744	Wariant 4 – R410a	Wariant 4 – R407C
KR1 (kryterium)	Współczynnik GWP	3	675	1	2088	1774
KR2 (kryterium)	Koszt zakupu 1 kg czynnika (PLN NETTO)	55,00	88,00	78,00	147,00	166,00
KR3 (kryterium)	Ciśnienie parowania dla +5 °C [bar]	5,51	8,5	38,68	8,32	4,46
KR4 (kryterium)	Ciśnienie skraplania dla +45 °C [bar]	15,34	26,96	109,2	26,25	16,52
KR5 (kryterium)	Bezpieczeństwo Palność i toksyczność	4	2	1	1	1

Tabela 24 zawiera stopnie wagi przypisane poszczególnym kryteriom, z uwzględnieniem bardzo szczególnej wagi współczynnika GWP, ciśnienia dla temperatury parowania i skraplania. Ze względu na założenie naturalnego czynnika chłodniczego o jak najniższym GWP, najwyższa waga została przypisana kryterium 1. Z tego powodu w następnym etapie pomija się proces przekształcania tabeli z wartościami kryteriów decyzyjnych i od razu traktuje się je jako macierz P przedstawioną na rysunku 22.

Tabela 24 Wektor wag wybranych kryteriów

Lp.	Waga	Kryterium
1.	0,4	1
2.	0,1	2
3.	0,2	3
4.	0,2	4
5.	0,1	5

M=	3	55	5,51	15,34	4
	675	88	8,5	26,96	2
	1	95,2	38,68	109,2	1
	2088	147	8,32	26,25	1
	1774	166	4,46	16,52	1

Rysunek 22 Macierz wejściowa dla oceny wielokryterialnej M

Kolejnym krokiem jest obliczenie elementów macierzy znormalizowanej M^* z wykorzystaniem wzoru (2) :

$$[M_{ij}^*] = \frac{M_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m M_{ij}^2}} \quad (3)$$

Gdzie:

$i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$, [n=liczba kryteriów, m= liczba wariantów]

Macierz znormalizowana została przedstawiona na rysunku 23 poniżej.

$M^* =$	0,0011	0,2094	0,1341	0,1304	0,8341
	0,2392	0,3350	0,2069	0,2291	0,4170
	0,0004	0,3624	0,9415	0,9279	0,2085
	0,7400	0,5596	0,2025	0,2231	0,2085
	0,6287	0,6320	0,1086	0,1404	0,2085

Rysunek 23 Macierz znormalizowana M^*

Następnym krokiem jest wykonanie macierzy znormalizowanych rozwiązań M^* , uwzględniając przypisane wagi. Zestawienie to zostało przedstawione w tabeli 25.

Tabela 25 Znormalizowana macierz wejściowa M^* z określonymi wagami

Wariant	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5
1	0,0011	0,2094	0,1341	0,1304	0,8341
2	0,2392	0,3350	0,2069	0,2291	0,4170
3	0,0004	0,3624	0,9415	0,9279	0,2085
4	0,7400	0,5596	0,2025	0,2231	0,2085
5	0,6287	0,6320	0,1086	0,1404	0,2085
Waga [w]	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1

W celu rozwiązania problemu, należy pomnożyć wartość każdego kryterium dla danego wariantu przez przypisaną mu wagę, zgodnie z przedstawionym równaniem 3:

$$W_{ij} = M_{ij}^* * w_{ij} \quad (4)$$

Gdzie:

M_{ij}^* – znormalizowana wartość i-tego wariantu, j-tego kryterium

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

Po przemnożeniu zgodnie z równaniem 4 w tab. 25 zaprezentowano sumy wyników.

Wyniki oceny oraz uporządkowane wyniki oceny wielowariantowej przy użyciu sumy ważonej przedstawiono w tabelach 26 i 27.

Tabela 26 Wyniki oceny z wykorzystaniem metody sumy ważonej

Wariant	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	SUMA WYNIKÓW
1	0,00043	0,02094	0,02682	0,02607	0,08341	<u>0,15766</u>
2	0,09568	0,03350	0,04138	0,04582	0,04170	0,25809
3	0,00014	0,03624	0,18830	0,18559	0,02085	0,43112
4	0,29598	0,05596	0,2025	0,04461	0,02085	0,45791
5	0,25147	0,06320	0,1086	0,02802	0,02085	0,38531

Tabela 27 Uporządkowane pozycje wyników oceny wielowariantowej przy użyciu sumy ważonej

Lp.	Wariant	Suma wyników	Pozycje
1.	1 – R290	<u>0,15766</u>	1
2.	2 – R32	0,25809	2
3.	3 – R744	0,43112	5
4.	4 – R410a	0,45791	4
5.	5 – R407c	0,38531	3

Przeprowadzenie procesu wielowariantowego wyboru optymalnego czynnika chłodniczego umożliwiło wytypowanie najlepszego czynnika chłodniczego do zastosowania w projektowanym stanowisku badawczym. Korzystając z tabeli 27 najlepszą pozycję uzyskał czynnik R290, kolejni R32, R407C, R410a i R744.

Główną przyczyną uzyskania pierwszej pozycji był bardzo niski wskaźnik GWP oraz stosunkowo niskie ciśnienia parowania i skraplania czynnika chłodniczego. Jednak najbardziej niekorzystnym dla niego było kryterium palności i toksyczności które względem pozostałych wariantów wypadło najgorzej.

Drugą pozycję zajął czynnik R32 ukłasyfikował swoje miejsce jako syntetyczny czynnik, i względem pozostałych trzech wariantów również uzyskał wysoki wynik za kryterium palności i toksyczności.

Kolejną, trzecią pozycję zyskał czynnik R407c, dzięki swojemu średniemu współczynnikowi GWP oraz nie wielkim ciśnieniom parowania i skraplania czynnika chłodniczego.

Czwarta pozycja została objęta przez czynnik R410a który posiada już wyższe ciśnienia parowania i skraplania, więc kryteria nie są mu sprzyjające. Dodatkowo wartość współczynnika GWP jest bardzo wysoka względem pozycji 1.

Ostatnią i piątą pozycję zajął czynnik R744, który pomimo najniższego współczynnika globalnego ocieplenia charakteryzuje się bardzo wysokimi ciśnieniami pracy.

Proces ten wyselekcjonował optymalny naturalny czynnik chłodniczy o stosunkowo niskich ciśnieniach pracy, który wyeliminował czynniki wycofywane w 2027 i 2032 roku z nowych urządzeń (R410a, R407c, R32).

5. Projekt stanowiska badawczego wytwornicy wody ziębniczej, do zastosowań gospodarczych i przemysłowych, pracującej na ekologicznym czynniku termodynamicznym oraz jego wykonanie.

W trakcie wykonywania dysertacji, doktorant nadzorował wiele realizacji inwestycji dla przemysłu, podczas których dostrzegł ogromne zapotrzebowanie na wytwornice wody ziębniczej, w czasie, gdy rozporządzenia i akty prawne dynamicznie ograniczają zastosowanie konwencjonalnych rozwiązań. Pierwotnym założeniem dysertacji było zaprojektowanie stanowiska badawczego pracującego na naturalnym czynniku chłodniczym. Na podstawie wielokryterialnej procedury wyboru naturalnego czynnika chłodniczego wybrano propan R290. Obowiązujące w przyszłości dyrektywny dotyczące energooszczędności oraz zakazu stosowania syntetycznych czynników chłodniczych przyczynią się do zmiany dzisiejszej rzeczywistości, gdzie ponad 80% wytwornic wody lodowej pracuje na syntetycznych czynnikach chłodniczych. Dowodzi to jak wiele zmian konstrukcyjnych czeka ten dział i gałęzie zastosowań przemysłowych oraz gospodarczych. Do budowy stanowiska wybrano jedno z najnowocześniejszych systemów sterowania układem chłodniczym, funkcjonującym na programowaniu, sterowaniu przy użyciu telefonu i aplikacji dające możliwości weryfikowania parametrów pracy, działań serwisowych w częściowym obszarze bez ingerencji zewnętrznych narzędzi pomiarowych. Zastosowano elektroniczny zawór rozprężny z silnikiem krokowym, którego zadaniem jest utrzymanie stałej temperatury parowania, oraz stałego, precyzyjnego przegrzania czynnika chłodniczego co pozwala również na obniżenie zużycia energii. Kolejnym elementem instalacji wpływającym na płynną pracę układu względem zewnętrznej temperatury otoczenia, znaczące obniżenie zużycia energii, wydłużenie żywotności wentylatora skraplacza jest regulator płynnej prędkości obrotowej skraplacza, a zarazem stałego ciśnienia skraplania. W celu zachowania stałego objętościowego przepływu medium chłodzonego zastosowano elektroniczną pompę wyposażoną w pomiar natężenia przepływu, ciśnień pracy, która pozwala wraz z zaworem równoważącym zachować przepływ na stałym poziomie. Stanowisko badawcze w zbiorniku buforowym zostało wyposażone w grzałki o łącznej mocy 3500 W. Natężenie przepływu, temperatury medium chłodzonego i efektywna moc chłodnicza archiwizowane są przy pomocy licznika energii termicznej, który pozwala z dużą dokładnością przeprowadzić badanie. W szafie zasilająco-sterującej został umieszczony licznik zużycia energii elektrycznej, który w trakcie przeprowadzanych badań archiwizował wyniki.

Doktorant podjął decyzję o wykonaniu projektu oraz badaniu wytwornicy wody ziemniczej. Wymagało to również wielu doborów części, elementów, zespołu urządzenia. Wytwornice wody ziemniczej potraktowano jako urządzenie badawcze i założono, że moc chłodnicza ma wynosić około 2500W, a możliwość budowania większych urządzeń i dalszych badań nastąpi po uzyskaniu potwierdzenia przyjętej hipotezy.

Sprężarka chłodnicza została wybrana do pracy z naturalnym i palnym czynnikiem chłodniczym jakim jest propan. Założono, aby sprężarka była ogólnodostępną rynkowo, a jej konstrukcja była prosta. Wybrano zatem hermetyczną sprężarkę NX21TBa o nominalnej mocy chłodniczej 2268 W. Warunki jakie założono dla dokonanego doboru przy niekorzystnych warunkach temperatury otoczenia skraplacza tj. +35 °C:

- temperatura parowania czynnika chłodniczego: +5°C,
- przegrzanie czynnika chłodniczego: 5K,
- temperatura skraplania czynnika chłodniczego: +45 °C,
- dochłodzenie ciekłego czynnika chłodniczego: 2K,

Według tabeli (28) doborowej producenta, dla powyższych parametrów, moc chłodnicza sprężarki wynosi 2620 W, a pobór mocy zgodnie z tabelą 29 wynosi 970 W.

Tabela 28 Wydajność chłodnicza sprężarki NX21TBa dla projektowanych warunków brzegowych [46]

Wydajność chłodnicza [W] ⓘ

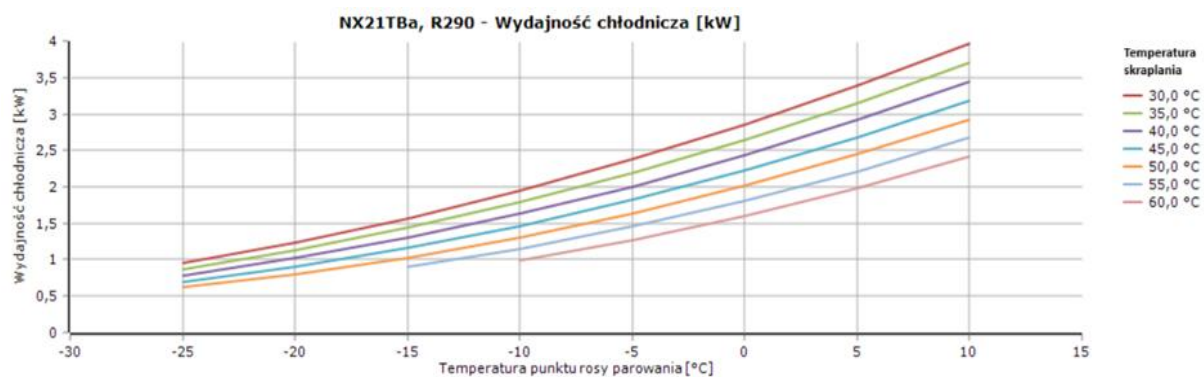
		Temperatura parowania [°C]							
Temperatura skraplania [°C]		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
	40	768	996	1 270	1 593	1 964	2 385	2 855	3 375
	45	685	887	1 136	1 433	1 779	2 175	2 621	3 118
	50	604	780	1 003	1 274	1 595	1 965	2 387	2 861
	55			872	1 117	1 411	1 757	2 154	2 604
	60				961	1 229	1 549	1 921	2 348

Tabela 29 Pobór mocy elektrycznej sprężarki NX21TBa dla projektowanych warunków brzegowych [46]

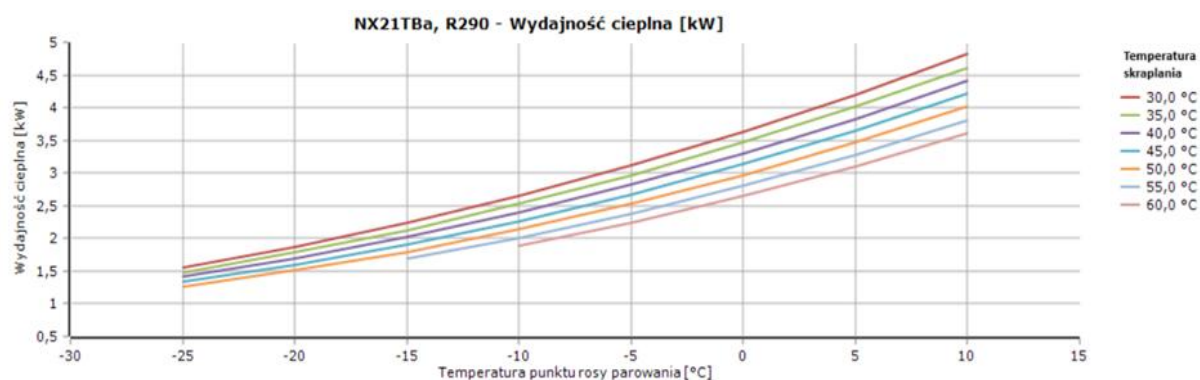
Pobór mocy [W] ⓘ

		Temperatura parowania [°C]							
Temperatura skraplania [°C]		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
	40	625	671	719	768	817	868	919	972
	45	637	690	744	799	855	912	970	1 029
	50	649	709	769	831	893	956	1 020	1 086
	55			794	862	931	1 000	1 071	1 143
	60				893	969	1 044	1 121	1 199

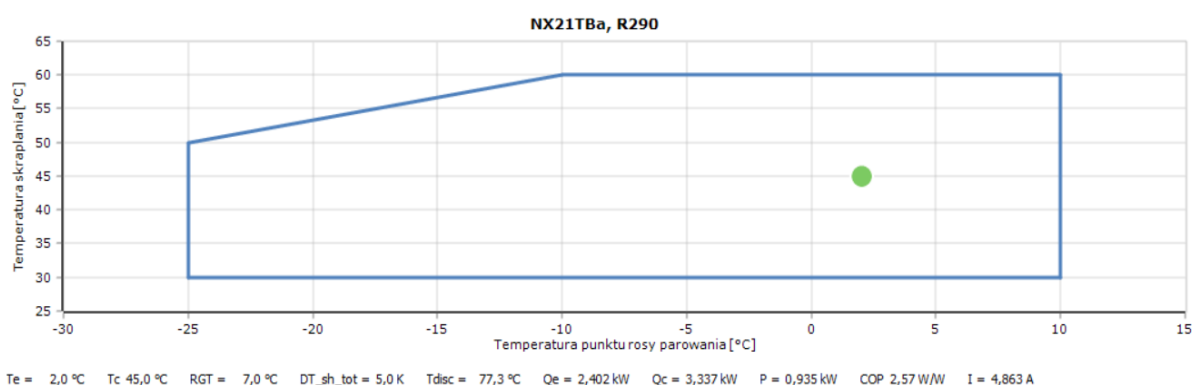
Suma mocy chłodniczej sprężarki oraz poboru mocy sprężarki, daje teoretyczną moc cieplną, którą należy odebrać w procesie skraplania od układu chłodniczego, a jej wartość wynosi 3591 W. Należy jednak uważnie przyjrzeć się bardziej niekorzystnym warunkom mającym wpływ na odbiór ciepła skraplania. Celem jest zapobieganie przekroczenia maksymalnej temperatury skraplania przy założonej temperaturze otoczenia $+35^{\circ}\text{C}$. Analizując rysunek 24 i 25 można zauważyć, że wraz z wzrostem temperatury punktu rosy parowania wzrasta wydajność chłodnicza i w konsekwencji wydajność cieplna. Nie można, więc pozwolić na to, aby skraplacz nie posiadał odpowiedniej mocy dla zmiennych niekorzystnych warunków oraz możliwości zmiany nastaw temperatury zadanej w urządzeniu przez użytkownika. Odczytując z wykresu założenie, że elektroniczny zawór rozprężny będzie miał ustawienie MOP (Maksymalne Ciśnienie Parowania) na poziomie odpowiadającej temperatury nie większe niż $+5^{\circ}\text{C}$ i temperaturze skraplania $+45^{\circ}\text{C}$ to ilość ciepła jaką należy odprowadzić do otoczenia wynosi 3650W. Dobierając wymiennik ciepła skraplacz należy wziąć pod uwagę zanieczyszczenie jego w najbliższym czasie, które ograniczy współczynnik przejmowania ciepła. Dla tego rozwiązania przyjęto skraplacz powietrzny z wentylatorem o mocy 5,00kW dla różnicy temperatury otoczenia i skraplania $dT = 10\text{K}$. Skraplacz został przewymiarowany o 37% uwzględniając możliwości testów przy wyższych temperaturach parowania oraz zmiany chłodziwa. Rysunek 24 przedstawia wydajność chłodniczą od temperatury punktu rosy parowania. Pokazuje jaka jest dla danej temperatury skraplania czynnika chłodniczego dokładna wydajność chłodnicza. Na kolejnym wykresie (24) zaprezentowano wydajność cieplną, czyli wydajność chłodniczą z uwzględnionym poborem mocy elektrycznej przez sprężarkę, zależną od temperatury skraplania i temperatury punktu rosy parowania. Cały zakres możliwości temperaturowej pracy sprężarki przedstawiono na rysunku 26, który określa ściśle dopuszczalne przez producenta temperatury punktu rosy parowania oraz temperatury skraplania czynnika chłodniczego.



Rysunek 24 Wydajność chłodnicza sprężarki NX21TBa dla zmiennych temperatur parowania i skraplania czynnika chłodniczego R290 [46]



Rysunek 25 Wydajność cieplna sprężarki NX21TBa dla zmiennych temperatur parowania i skraplania czynnika chłodniczego R290 [46]



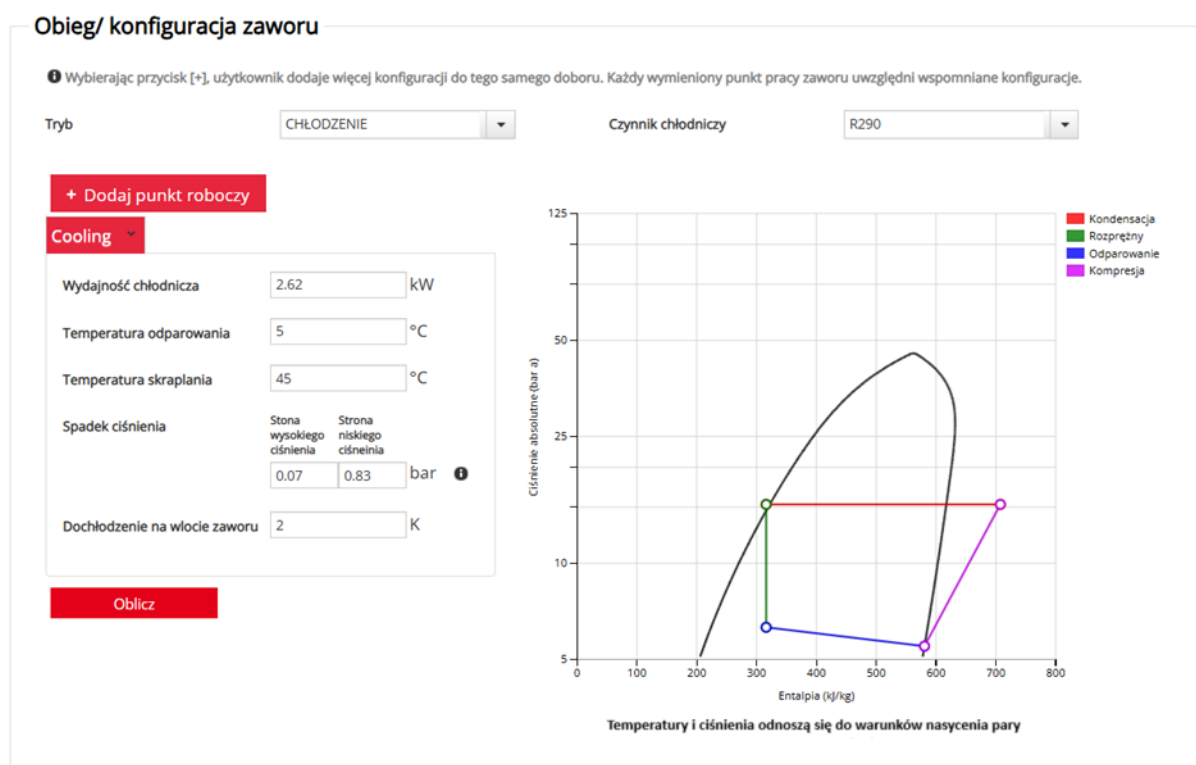
Rysunek 26 Koperta pracy dla sprężarki NX21TBa dla zmiennych temperatur parowania i skraplania czynnika chłodniczego R290 [46]

Stabilność ciśnienia i temperatury skraplania zależna jest od obciążenia cieplnego parownika, temperatury parowania i przegrzania czynnika chłodniczego oraz temperatury otoczenia skraplacza. Stabilne parametry pozwalają na zrównoważone dostarczanie czynnika chłodniczego w stanie płynnym o stałej temperaturze do zaworu rozprężnego. Aby zapewnić płynny proces skraplania czynnika uwzględniający parametry mające wpływ na stabilność ciśnienia i temperatury skraplania dobrano regulator płynnej prędkości wentylatora skraplacza. Jego zadaniem jest pomiar ciśnienia skraplania poprzez przetwornik ciśnienia Carel 0-5V o zakresie, 0-35bar bar który zbiera sygnał analogowy i przekazuje do płyty regulatora Carel FCSM042300, gdzie zadane jest stałe ciśnienie skraplania na poziomie 14,3 bar. Wraz z spadkiem temperatury otoczenia podczas badań ciśnienie to będzie redukowane w celu obniżenia zużycia energii. Regulator swoją logiką dostosowuje napięcie zasilające wentylator, które steruje płynną regulacją wentylatora skraplacza poprzez płynne sterowanie objętościowym przepływem powietrza względem zmieniającego się ciśnienia skraplania i dążenia do zadanego.

Na linii cieczowej dobrano lutowany filtr odwadniacz jednokierunkowy Castel DF305/M10S o objętości 80cm³ dobrany dla przepływu masowego 32,05kg/h zgodnie z nominałem sprężarki dla przyjętych warunków pracy. Dodatkowo linia cieczowa została wyposażona w wziernik cieczy lutowany Castel 3940/M10 z indykatorem wilgotności czynnika chłodniczego w celu weryfikacji prawidłowego procesu skraplania gazu oraz, czy nie występują w układzie ślady wilgoci.

Zawór rozprężny dobrano z precyzją dla założonych warunków pracy przedstawionych na rysunku nr 27, uwzględniając możliwości różnych regulacji układu, zwiększając ciśnienie parowania do 5,0 bar lub zmniejszając do 2 bar. Dokładność parametrów rozprężania, parowania i przegrzania czynnika chłodniczego na najwyższym poziomie może zapewnić jedynie elektroniczny zawór rozprężny z wbudowanym silnikiem krokowym oraz z rozbudowanym sterownikiem nadzorującym jego prace na podstawie zebranych sygnałów, parametrów pracy układu chłodniczego. Zatem dobrano elektroniczny zawór rozprężny Carel E2V11FSFC1 współpracujący z sterownikiem zarządzającym Carel UCHBDE0001150. Sterownik odczytuje sygnał temperatury rury ssącej poprzez czujnik temperatury Carel NTC030WF00 o zakresie pomiarowym -50 do +105 °C oraz ciśnienie parowania czynnika chłodniczego poprzez przetwornik ciśnienia SPKT0013P0 o zakresie pomiarowym -1,0 do 9,4 bar. Zebrane parametry pozwalają sterownikowi na nadzorowanie dozowania ilości czynnika chłodniczego do parownika poprzez sygnał do silnika krokowego elektronicznego zaworu rozprężnego, który steruje otwarciem i zamknięciem w zakresie 500

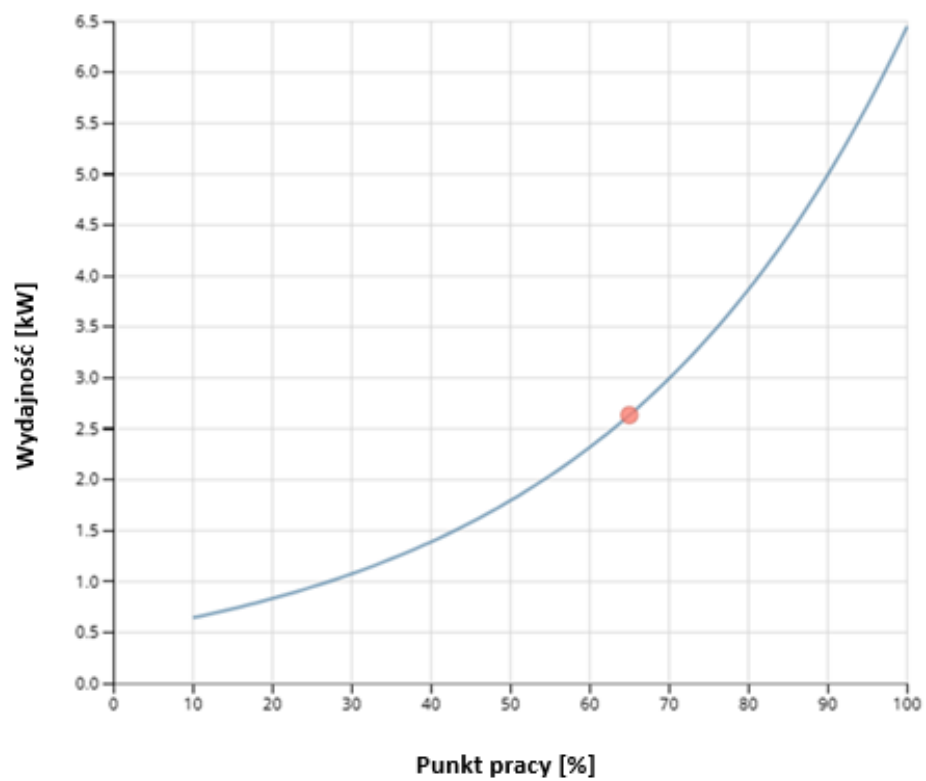
kroków, czyli co 0,2%. Jest to bardzo precyzyjne sterowanie w czasie dzięki szybkiemu przepływowi informacji z układu względem termostaticznych zaworów rozprężnych, gdzie wszystko odbywa się mechanicznie i z opóźnieniem w czasie. Dobrany zawór rozprężny w punkcie pracy został dobrany dla 65% obciążenia na rysunku 28 pracy swojej możliwości co daje nam możliwości regulacji i zmiany parametrów pracy wytwornicy wody ziębniczej.



Rysunek 27 Dobór elektronicznego zaworu rozprężnego Carel z silnikiem krokowym E2V11FSFC1

Dobry parowacz jest konstrukcji płytowej, lutowanej najczęściej stosowany w aktualnych wytwornicach wody ziębniczej oraz pompach ciepła. Wybór konstrukcji parowacza był podyktowany stosunkowo niską mocą chłodniczą i łatwą dostępnością rynkową. Moc chłodnicza parowacza została przewymiarowana ze względu na możliwości zmiany parametrów pracy oraz chłodziwa. W wyniku przeglądu dobrany został parownik GBS 418M-20/40bar dla mocy chłodniczej przyjętej według projektowych parametrów lecz o mocy 3,50kW - co zaprezentowano na rysunku 28, karcie doborowej parowacza. Parowacz GBS 418M-20/40bar został zweryfikowany, czy możliwe jest zastosowanie go dla niższych temperatur parowania oraz chłodziw nisko krzepliwych jak roztwory glikolu etylenowego lub propylenowego. Wymiennik spełnia możliwości pracy do temperatury parowania punktu rosy propanu do -10°C. Oryginalną kartę doborową przedstawiono na rysunku 29.

Wykres wydajności



Rysunek 28 Wykres wydajności chłodniczej względem obciążenia elektronicznego zaworu rozprężnego Carel E2V11FSFC1

Evaporator: Dry Expansion (brazed plate heat exchanger)
GBS 418M-20 / 40bar

Thermal Data	Side A	Side B		
	in	out		
Media:		R290 (Propan)	Water	
Heat exchanged:		3,50		kW
Mass flow:		0,02	0,17	kg/s
Volume flow:	1,74	8,05	0,61	m³/h
Vapour fraction:	0,237	1,000		
Temperature Inlet:		2,27	12,00	°C
Temperature Outlet:		7,00	7,00	°C
Saturating temperature:		2,00		°C
Calculated pressure drop:		5,319	10,118	kPa
Fill volume:		0,00049	0,00055	m³
Working pressure inlet:		5,08	5,01	bara
LMTD:			6,62	K
O.H.T.C. (needed):			1468	W/m²K

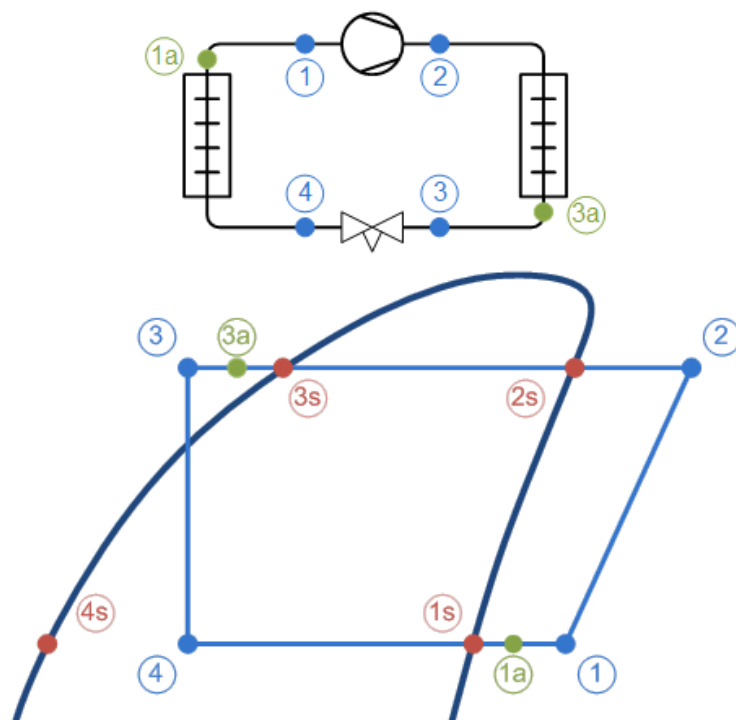
Product properties				
Density:	526,21	10,67	999,69	kg/m³
Heat capacity:	2523,11	1760,92	4196,35	J/kgK
Thermal conductivity:	0,10511	0,01650	0,57766	W/mK
Dyn. viscosity inlet:		0,1235	1,2341	cP
Dyn. viscosity outlet:		0,0076	1,4272	cP

Unit Data				
Total heat transfer area:		0,72		m²
Total number of plates:		20		
Surface margin:		27,75		%
Fouling factor:		148		m²K/W E-6
Plate material:		AISI316L		
Soldering material:		Copper		
Flow arrangement:		pure counter flow		
Internal flow (passes x channels):	1 x 9		1 x 10	
No. of units (par. / ser. / total):	1		1	1
Material front- and end plate:		Stainless steel		

Rysunek 29 Karta doborowa wymiennika - parownika WTT GBS 418M-20

Przy użyciu programu doborowego Coolstore 2 został zaprezentowany szczegółowy lewobieżny wykres Lindego na rysunku 30 dla przyjętych warunków pracy wytwornicy wody ziębniczej. Oznaczenia punktów, dla których prowadzono badania, pokazano na rysunku 30.

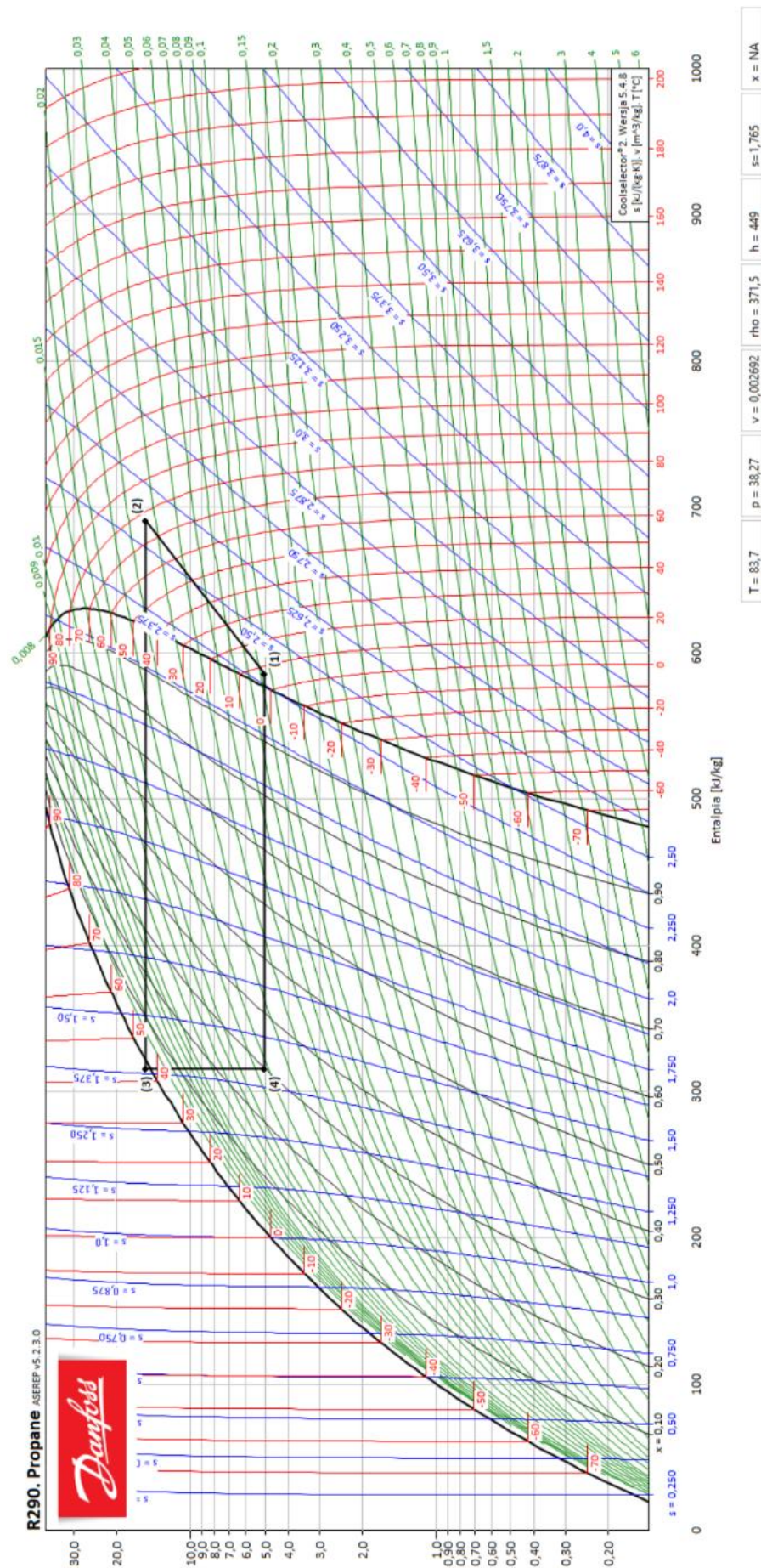
Dane przyjęte do obliczeń zestawiono w tabeli 30, która wraz z rysunkiem 30 z przedstawiają ideowe parametry pracy dla przedstawionych założeń.



Rysunek 30 Teoretyczne warunki pracy układu chłodniczego według założeń projektowych

Tabela 30 Teoretyczne warunki pracy układu chłodniczego według założeń projektowych

Punkt	Opis	Temperatura [°C]	Ciśnienie (a) [bar]	Gęstość [kg/m ³]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/(kg·K)]
1	Ssanie sprężarki	10,0	5,511	11,66	589,1	2,399
2	Tłoczenie sprężarki (szacowane)	76,1	15,34	28,02	687,9	2,546
2s	Temperatura punktu rosy skraplania	45,0	15,34	34,15	618,1	2,336
3s	Temperatura wrzenia skraplania	45,0	15,34	458,4	321,8	1,405
3a	Wylot ze skraplacza	43,0	15,34	462,4	315,8	1,386
3	Łączenie z dodatkowym dochłodzeniem	43,0	15,34	462,4	315,8	1,386
4	Za zaworem rozprężnym	5,0	5,511	40,26	315,8	1,416
4s	Temperatura wrzenia	5,0	5,511	521,8	212,6	1,045
1s	Punkt rosy odparowywania	5,0	5,511	11,97	580,3	2,367
1a	Wylot parownika	10,0	5,511	11,66	589,1	2,399



Rysunek 31 Szczegółowy wykres Log(p)-h dla założeń projektowych

Strona pierwotna

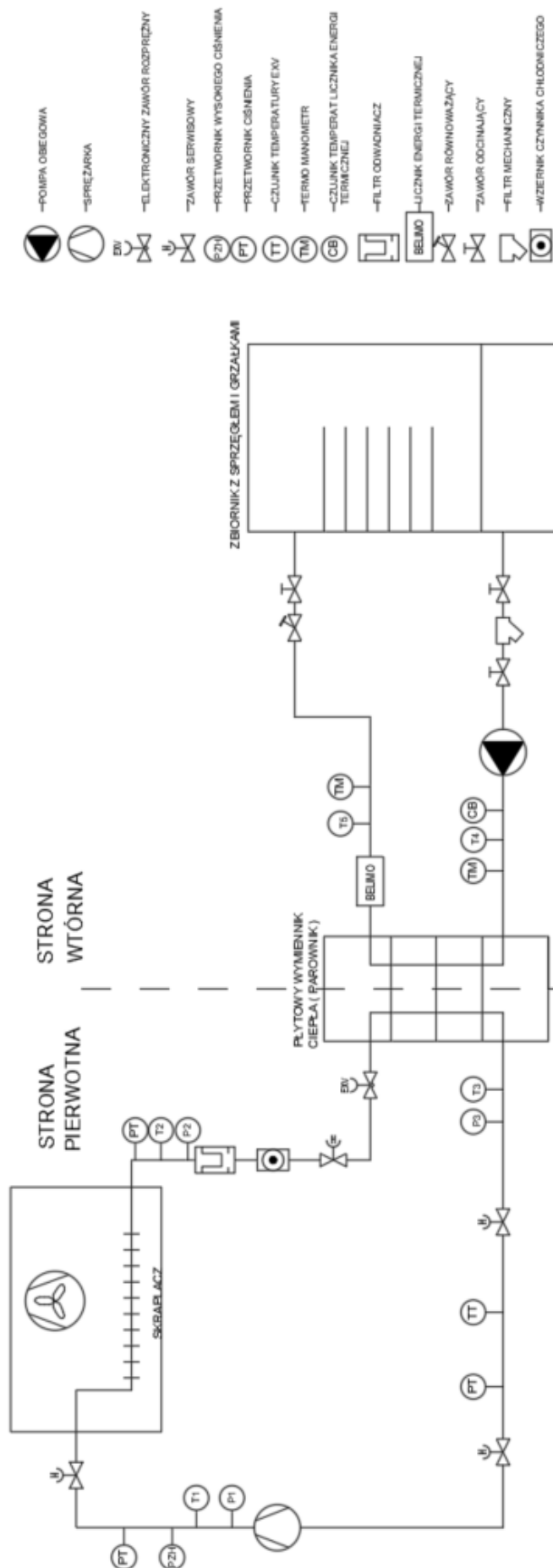
Czynnik chłodniczy, propan w postaci sprężonych par o parametrach T_1 , P_1 , (oznaczenia pokazane na rysunku 32) tłoczony jest do powietrznego skraplacza czynnika chłodniczego z wymuszonym przepływem powietrza wyposażonego w płynną regulację ciśnienia skraplania. W skraplaczu następuje schłodzenie par czynnika chłodniczego do temperatury nasycenia, skroplenie oraz dochłodzenie. Proces ten zachodzi przy stałym ciśnieniu dzięki regulatorowi wyposażonemu w przetwornik ciśnienia oraz falownik sterujący płynną prędkością obrotową wentylatora. Odebrane ciepło przegrzania, skraplania oraz dochłodzenia czynnika chłodniczego oddawane jest do otoczenia.

Skroplony czynnik chłodniczy o parametrach T_2 i P_2 przepływa przez filtr odwadniacz pokazany na rysunku 32, wziernik czynnika aż do elektronicznego zaworu rozprężnego. Zawór rozprężny sterowany jest elektronicznie, a jego stopniem otwarcia steruje silnik krokowy. Sterownik zbiera sygnały z przetwornika ciśnienia i czujnika temperatury rurociągu ssawnego, zadając odpowiednie otwarcie elektronicznego zaworu rozprężnego w celu utrzymania stabilnego przegrzania czynnika chłodniczego.

Czynnik chłodniczy za zaworem rozprężnym przyjmuje postać pary mokrej, gdzie w wymienniku ciepła występuje parowanie czynnika chłodniczego odbierającego ciepło od przepływającej przeciwnie do cieczy. Po odparowaniu czynnika chłodniczego następuje jego przegrzanie par, a pary zasysane są przez sprężarkę i sprężane do parametrów T_1 P_1 .

Strona wtórna

Woda w otwartym układzie hydraulicznym zasysana jest przez pompę sterowaną elektronicznie o temperaturze T_6 pokazanej na rysunku 32, gdzie dalej pod wyższym ciśnieniem jest tłoczona. Obmywa czujnik temperatury licznika energii termicznej przed procesem schładzania. Następnie czynnik o temperaturze T_4 trafia do wymiennika, gdzie oddaje ciepło do odparowującego czynnika chłodniczego. Po wyjściu z wymiennika ciecz jest już schłodzona do temperatury T_5 gdzie przepływa przez licznik energii termicznej. Licznik energii termicznej dokonuje ultradźwiękowy pomiar przepływu objętościowego oraz temperatury $T_4(T_M)$ i T_5 . Licznik ten dzięki pomiarowi różnicy temperatur cieczy i objętościowego natężenia przepływu, dzięki swojej logice oblicza rzeczywistą moc chłodniczą wytwornicy wody żiębniczej. Ochłodzona woda przepływa do bufora z wbudowanym sprzęgłem, gdzie ponownie jest podgrzewana do temperatury T_6 przy użyciu grzałek elektrycznych uruchamianych skokowo.



Rysunek 32 Schemat projektowanego i wykonanego stanowiska badawczego wytwornicy wody ziębniczej

Pomiar zużycia energii elektrycznej wytwornicy lodowej odbywa się w szafie zasilająco sterującej, przy użyciu monitora energii elektrycznej z archiwizacją danych poprzez Wi-Fi.

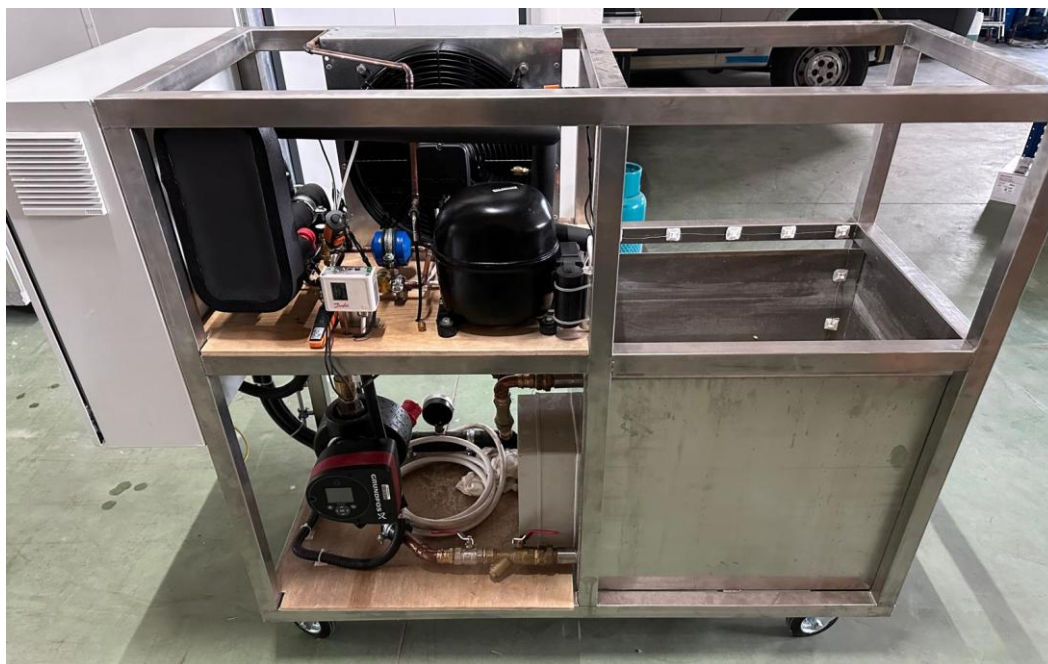
Stanowisko badawcze zostało wyposażone w aparaturę pomiarową służącą do odczytu, regulacji, pomiarów oraz archiwizacji wyników badań w:

- sonda do pomiaru niskiego ciśnienia czynnika chłodniczego kontrolowana za pomocą telefonu komórkowego o: zakres pomiarowy -1 do +60 bar; dokładność $\pm 0,5\%$ pełnego zakresu; rozdzielczość 0,01bar,
- termometr zaciskowy do pomiaru temperatury rury niskiego ciśnienia o: zakres pomiarowy -40 do +150 °C; dokładność $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$ (-20 do +85 °C); rozdzielczość 0,1 °C,
- sonda do pomiaru wysokiego ciśnienia czynnika chłodniczego kontrolowana za pomocą telefonu komórkowego o: zakres pomiarowy -1 do +60 bar; dokładność $\pm 0,5\%$ pełnego zakresu; rozdzielczość 0,01bar,
- licznik energii termicznej Belimo 22PE-1UD wyposażonego w:
 - ultradźwiękowy czujnik przepływu o dokładności pomiaru przepływu $\pm 2\%$ (20...100% wartości) w temp. 20°C / 0% obj. Glikolu,
 - czujnik temperatury Pt1000; Błąd pomiaru temperatury bezwzględnej $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ - *, 10°C (Pt1000 EN60751 Class B) $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$, 60°C (Pt1000 EN60751 Class B)
Błąd pomiaru różnicy temperatur $\pm 0.22\text{ K}$ @ $\Delta T = 10\text{ K}$ $\pm 0.32\text{ K}$ @ $\Delta T = 20\text{ K}$
- monitor energii elektrycznej WI-FI ZAMEL 3F+N MEW-01 o: zakres pomiarowy 0 do 100 amper; dokładność $\pm 2\%$; rozdzielczość 0,1 mA,
- ratiometryczny przetwornik niskiego ciśnienia SPKT0013R0 czynnika chłodniczego o: zakres pomiarowy -1 do 9,3bar; dokładność $\pm 1,2\%$,
- ratiometryczny przetwornik wysokiego ciśnienia SPKT0033R0 czynnika chłodniczego o: zakres pomiarowy 0 do 34,5bar; dokładność $\pm 1,3\%$,
- czujnik temperatury NTC030WF00 regulatora temperatury o: zakres pomiarowy -50 do +105 °C; dokładność $\pm 1\%$ przy +25°C; rozdzielczość 0,1 °C.

Przygotowano dokumentację zdjęciową przedstawiającą eksperymentalną wytwornicę wody ziębniczej na rysunkach 33, 34, 35, 36, 37.



Rysunek 33 Stanowisko badawcze wytwornicy wody ziębniczej -
widok szafy zasilająco-sterującej



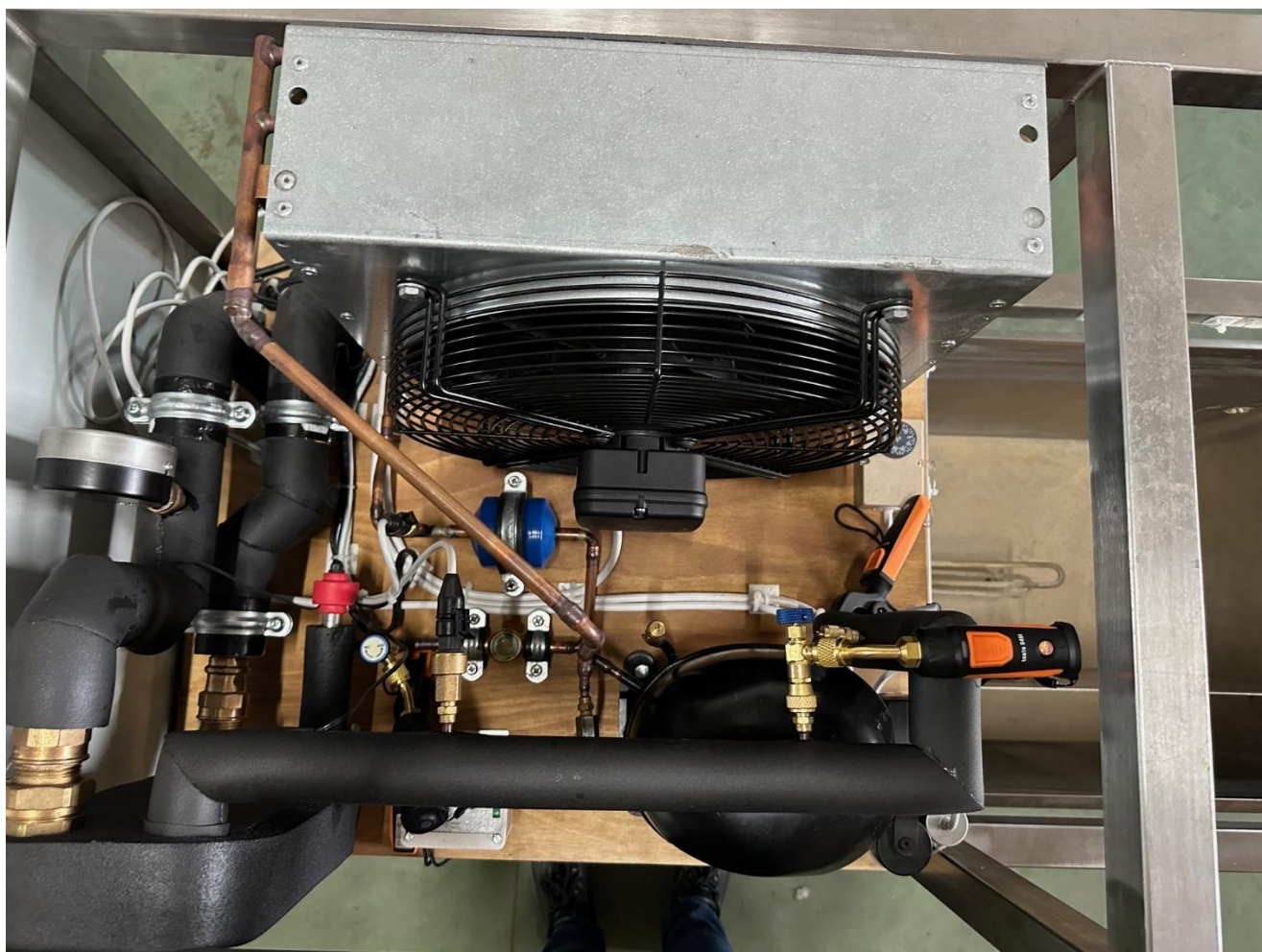
Rysunek 34 Stanowisko badawcze wytwornicy wody ziębniczej - widok z boku



Rysunek 35 Stanowisko badawcze wytwornicy wody ziemnej - widok od zbiornika-bufora ciepła



Rysunek 36 Stanowisko badawcze wytwornicy wody ziemnej - widok strony wtórnej - modułu hydraulicznego



Rysunek 37 Stanowisko badawcze wytwornicy wody ziębniczej - widok z góry - strony wtórnej - układu termodynamicznego czynnika chłodniczego R290

6. Badania na zaprojektowanym stanowisku,

Metodykę badawczą opracowano w oparciu o Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/2281 z dnia 30 listopada 2016 r. dotyczące zrealizowanej dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE wprowadzającej powszechne zasady określania warunków dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią w odniesieniu do wymogów dotyczących wysokotemperaturowych agregatów chłodniczych. Na podstawie tego rozporządzenia obrano metodę badawczą wyznaczania współczynnika efektywności energetycznej badanego agregatu. Zdefiniowano współczynnik efektywności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych SEPR. Według wymagań Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/2281 z dnia 30 listopada 2016 r współczynnik SEPR dla wytwornic wody ziębicznej chłodzonych powietrzem o mocy mniejszej niż 400 kW powinien wynosić więcej niż 5,0 od dnia 1 stycznia 2021r.

Na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym przeprowadzono badania dla czterech warunków bloków temperaturowych zgodnie z założeniami zaprezentowanymi w tabeli 26. Wykonano pomiary ciśnień pracy, temperatur, pomiar mocy chłodniczej oraz pomiar zużycia energii elektrycznej. Wytwornica wody ziębicznej została zbadana podczas pracy z naturalnym czynnikiem chłodniczym R290.

Współczynnik sezonowej sprawności energetycznej (SEPR) oblicza się jako referencyjne roczne zapotrzebowanie na chłodzenie urządzeń przemysłowych podzielone przez roczne zużycie energii elektrycznej, wzór (5):

$$SEPR = \frac{\sum_{j=1}^n [h_j \cdot P_C(T_j)]}{\sum_{j=1}^n \left[h_j \cdot \frac{P_C(T_j)}{EER_{PL}(T_j)} \right]} \quad (5)$$

$$EER_{PL}(T_j) = \frac{Q_{chl,A}}{E_A} \quad (6)$$

gdzie:

- SEPR – znamionowy współczynnik sezonowej sprawności energetycznej (SEPR) oznacza współczynnik efektywności wysokotemperaturowego przemysłowego agregatu chłodniczego w warunkach znamionowych znormalizowanych reprezentatywny dla zmian obciążenia i temperatury otoczenia w ciągu roku oraz obliczony jako stosunek rocznego zapotrzebowania na chłodzenie urządzeń przemysłowych do rocznego zużycia energii elektrycznej. [30]

- $EER_{PL}(T_j)$ - wartość EER jednostki w odpowiedniej temperaturze T_j . Obejmuje ona warunki obciążenia częściowego, równa jest $EER_{DC,A}$, $EER_{DC,B}$, $EER_{DC,C}$, $EER_{DC,D}$, dla punktów znamionowych (numerów bloków) A, B, C, D tabeli 31, wzór 6,

$Q_{chl, A}$ - Moc chłodnicza wytwornicy wody ziębicznej dla wskaźnika obciążenia częściowego, A, B, C, D,

E_A - zużycie energii elektrycznej podczas badania dla punktu znamionowego(bloku) A, B, C, D,

- $P_C(T_j)$ - zapotrzebowanie danego zastosowania na chłodzenie urządzeń przemysłowych w odniesieniu do określonej temperatury T_j , w wierszu A, B, C, D tabeli 31

- h_j - czas bloku w odpowiedniej temperaturze T_j przedstawiony w tabeli 32,

- T_j - temperaturę bloku,

- n - liczba bloków równa 4 A, B, C, D tabeli 31,

- j - numer bloku, punkt znamionowy A, B, C, D tabeli 31.

Tabela 31 Wytyczne obciążenia oraz warunki temperaturowe pracy wytwornicy wody ziębicznej służące do obliczania SEPR dla wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych chłodzonych powietrzem

Punkt znamionowy	Wskaźnik obciążenia częściowego dla wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych	Wskaźnik obciążenia częściowego (%)	Zewnętrzny wymiennik ciepła	Wewnętrzny wymiennik ciepła
			temperatura wlotowa powietrza (°C)	Parowacz temperatury wlotowe/wylotowe wody (°C)
				Stała temperatura wylotowa
A	$80 \% + 20 \% \times (T_A - T_D) / (T_A - T_D)$	100	35	12/7
B	$80 \% + 20 \% \times (T_B - T_D) / (T_A - T_D)$	93	25	(*)/7
C	$80 \% + 20 \% \times (T_C - T_D) / (T_A - T_D)$	87	15	(*)/7
D	$80 \% + 20 \% \times (T_D - T_D) / (T_A - T_D)$	80	5	(*)/7

(*) Przy natężeniu przepływu wody określonym podczas badania „A” dla urządzeń o stałym natężeniu przepływu wody lub o zmiennym natężeniu przepływu.

Tabela 32 Europejski sezon chłodniczy odniesienia dla wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych

Lp.	blok _j	T _j [°C]	h _j [h/rok]
1.	A (55)	35	2,09
2.	B (45)	25	104,46
3.	C (35)	15	370,45
4.	D (25)	5	336,48

Przeprowadzono badania współczynnika $EER_{PL}(T_j)$ dla czterech bloków badawczych A, B, C, D, kolejno $EER_{DC,A}$, $EER_{DC,B}$, $EER_{DC,C}$, $EER_{DC,D}$, na podstawie warunków tabeli 31. Do wyznaczenia współczynnika SEPR uwzględniono przyjęte średnie czasy pracy dla bloków A,B,C,D z tabeli 32.

W pierwszym bloku badawczym dla punktu znamionowego A na przygotowanym stanowisku wykonano badanie zgodnie z wytycznymi przy temperaturze otoczenia +35 °C, zachowaniu temperatur zasilania wytwornicy wody ziębicznej +12 °C i wyjścia +7 °C z zachowaniem delty 5K oraz obciążeniem 100%. Przepływ objętościowy przez wymiennik wyniósł średnio 0,444m³/h. Współczynnik efektywności chłodniczej $EER_{DC,A}$ równa się 3,48. W trakcie przebiegającego badania trwającego czas 60 minut, rysunek nr 35 przedstawia wyniki poboru mocy elektrycznej, mocy chłodniczej obliczonej na podstawie wzoru 6 oraz współczynnika wydajności chłodniczej $EER_{DC,A}$ dla punktu znamionowego A.

$$Q_{chl} = q V c (T_4 - T_5) \quad (6)$$

Gdzie:

Q_{chl} – Moc chłodnicza,

q – gęstość ziębiwa,

V – objętościowe natężenie przepływu ziębiwa,

c – ciepło właściwe ziębiwa,

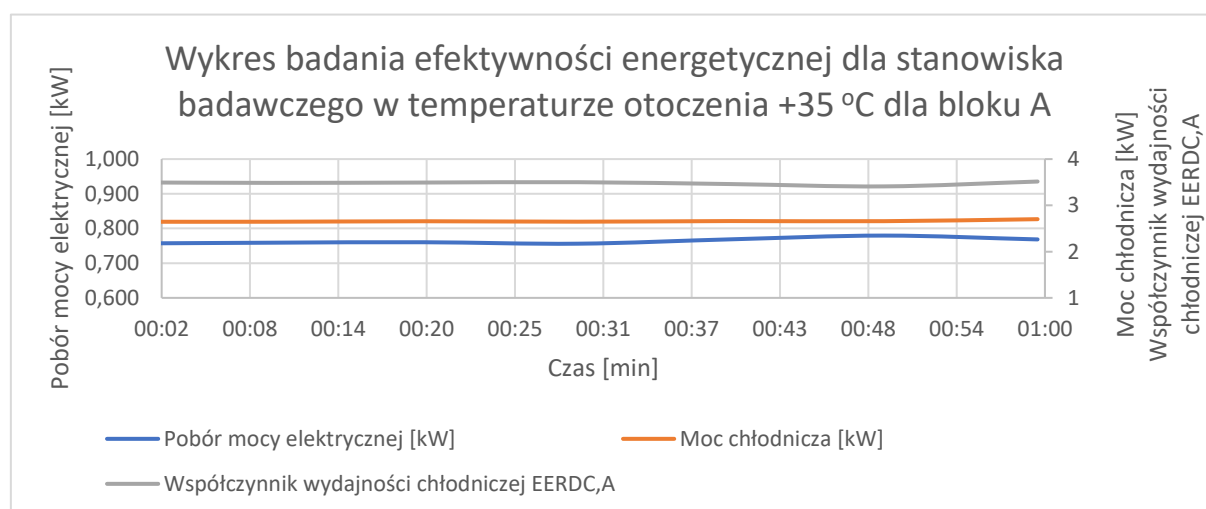
T₄ – Temperatura ziębiwa na wejściu do parowacza,

T₅ – Temperatura ziębiwa na wyjściu z parowacza.

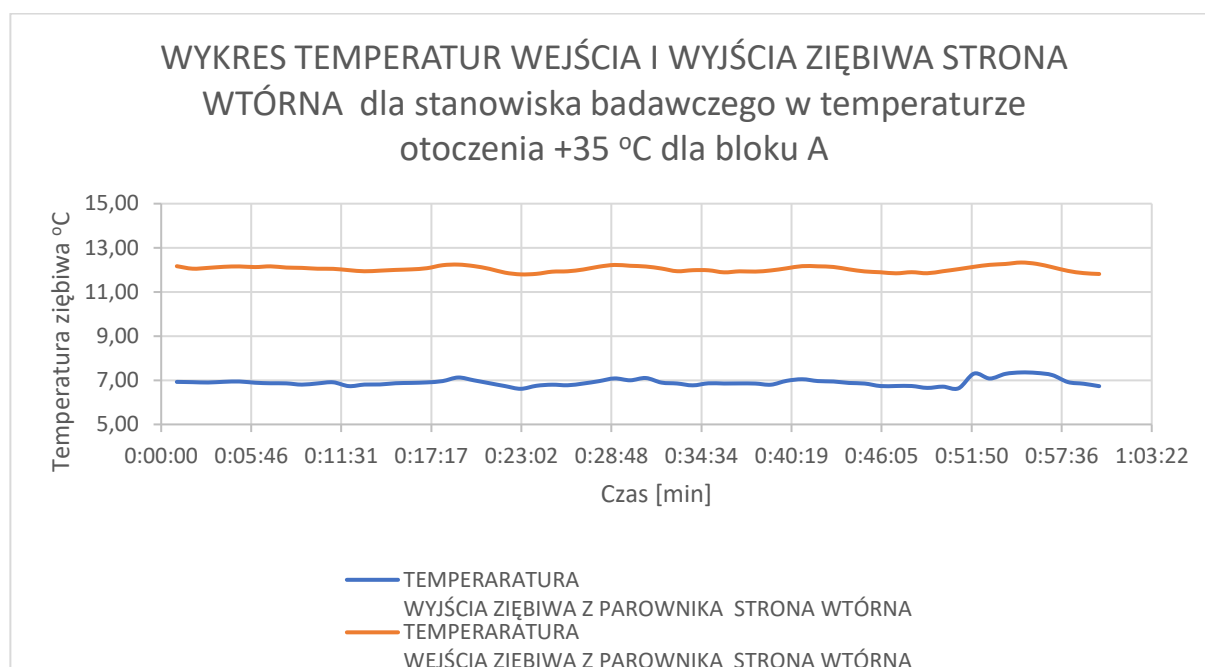
$EER_{DC,A}$ - deklarowany wskaźnik efektywności energetycznej ($EER_d(T_j)$) oznacza wskaźnik efektywności energetycznej przy ograniczonej liczbie określonych bloków (j) przedstawionych w tabeli 32 w temperaturze zewnętrznej (T_j)

Moc chłodnicza utrzymuje się stabilnie ze średnią wartością 2661,2W dzięki zrównoważonemu przepływowi wody oraz stałemu obciążeniu cieplnemu generowanemu przez grzałki elektryczne. Zauważyć można, że układ chłodniczy również pracował stabilnie a pobór mocy elektrycznej wahał się od 757W do 780W w okresie pomiarowym 60 minut, co pokazano na rysunku 38, a całkowity pobór energii wyniósł 765,4Wh. Zarówno linia współczynnika $EER_{DC,A}$ wykazuje przebieg ciągły a odchylenie standardowe wynosi 0,035.

Podczas przeprowadzonego badania dużą uwagę zwrócono na temperatury wejścia i wyjścia ziębiwa strony wtórnej, zaprezentowane na rysunku 39. Ich wartości, stabilność oraz różnica pomiędzy temperaturą wejścia i wyjścia mają główny wpływ na moc chłodniczą wytwornicy podczas badania. Zaobserwować można stabilność temperatury wejścia jak również wyjścia, które powinny kolejno wynosić $+12^{\circ}\text{C}$ i $+7^{\circ}\text{C}$, a odchylenia standardowe wynoszą tylko $0,16^{\circ}\text{C}$ i $0,13^{\circ}\text{C}$.



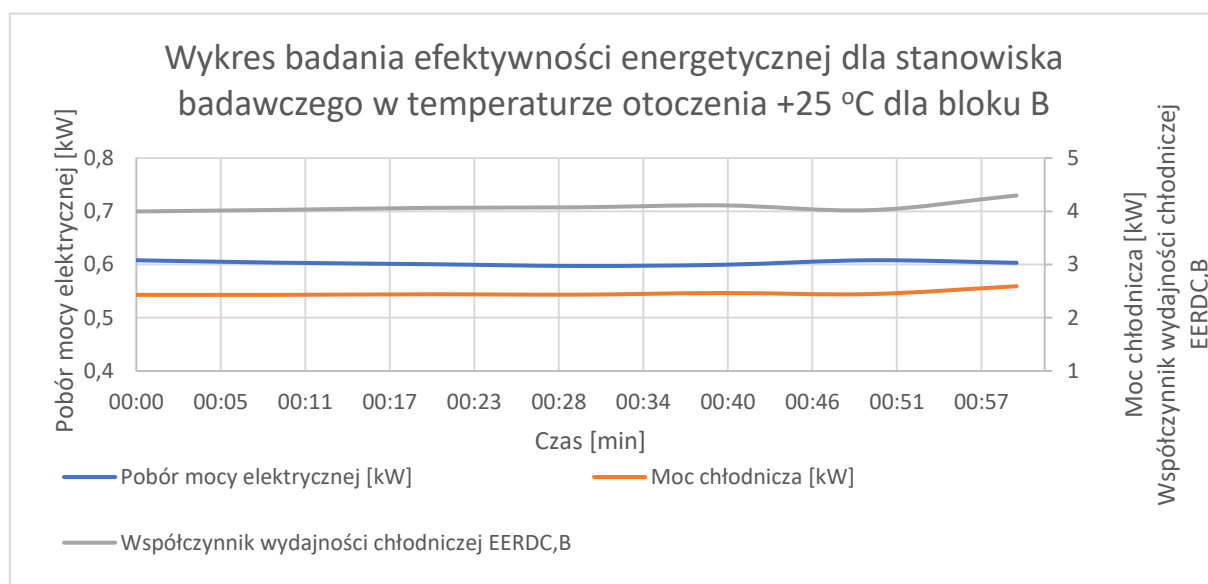
Rysunek 38 Wykres badania efektywności energetycznej dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia $+35^{\circ}\text{C}$



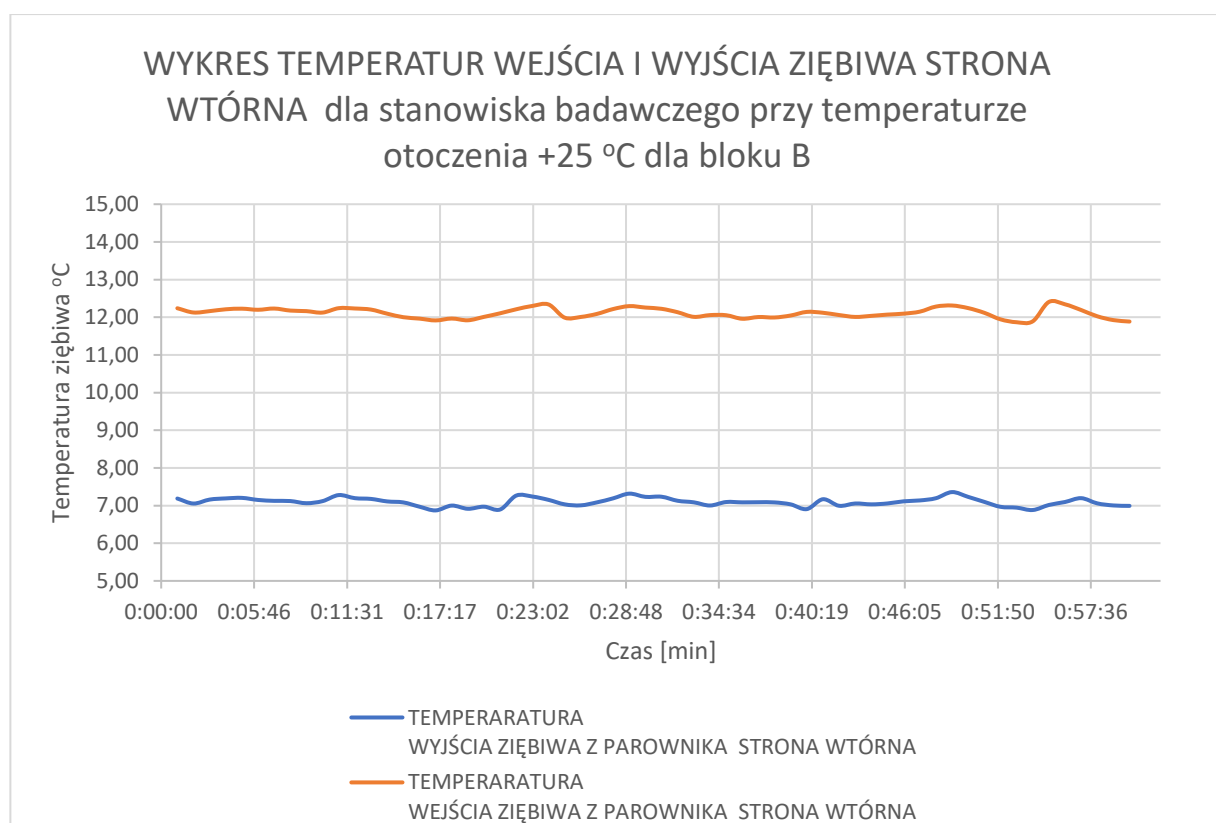
Rysunek 39 WYKRES TEMPERATUR WEJŚCIA I WYJŚCIA ZIĘBIWA STRONA WTÓRNA dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +35 °C dla bloku A

W kolejnym bloku badawczym dla punktu znamionowego B przeprowadzono badanie zgodnie z wytycznymi w temperaturze otoczenia +25 °C, zachowaniu temperatur zasilania wytwornicy wody ziębniczej +12°C i wyjścia +7°C z zachowaniem delty 5K. Obciążenie cieplne układu wyniosło 93% poprzez zmianę objętościowego natężenia przepływu ziębiwa. Obliczeniowe obciążenie agregatu dla bloku badań B powinno wynieść 2 474,9W a w warunkach badań rzeczywistych wyniosło 2 468,9W.

Przepływ objętościowy przez wymiennik wyniósł średnio 0,422m³/h przy dążeniu do obliczeniowego 0,412 m³/h. Współczynnik efektywności chłodniczej $EER_{DC,B}$ równa się 4,10. Na rysunku 40 przedstawiono wyniki poboru mocy elektrycznej, mocy chłodniczej oraz współczynnika wydajności chłodniczej $EER_{DC,B}$ dla badania trwającego 60 minut. Zauważyć można, że układ chłodniczy również pracował stabilnie a pobór mocy elektrycznej wahał się od 597W do 608W w czasie jednej godziny, a całkowity pobór energii wyniósł 602Wh. Zużycie energii elektrycznej jest mniejsze niż w bloku pierwszym ze względu na obniżony spręż sprężarki i niższe ciśnienia skraplania czynnika chłodniczego. Zarówno linia współczynnika $EER_{DC,B}$ wykazuje przebieg ciągły a odchylenie standardowe wynosi 0,100. Temperatury wejścia i wyjścia ziębiwa strony wtórnej, zaprezentowano na rysunku 41, który obrazuje temperatury wejścia jak i wyjścia, które powinny kolejno wynosić +12°C i +7°C, a odchylenia standardowe wynoszą tylko 0,13°C i 0,10°C.



Rysunek 40 Wykres badania efektywności energetycznej dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +25 °C

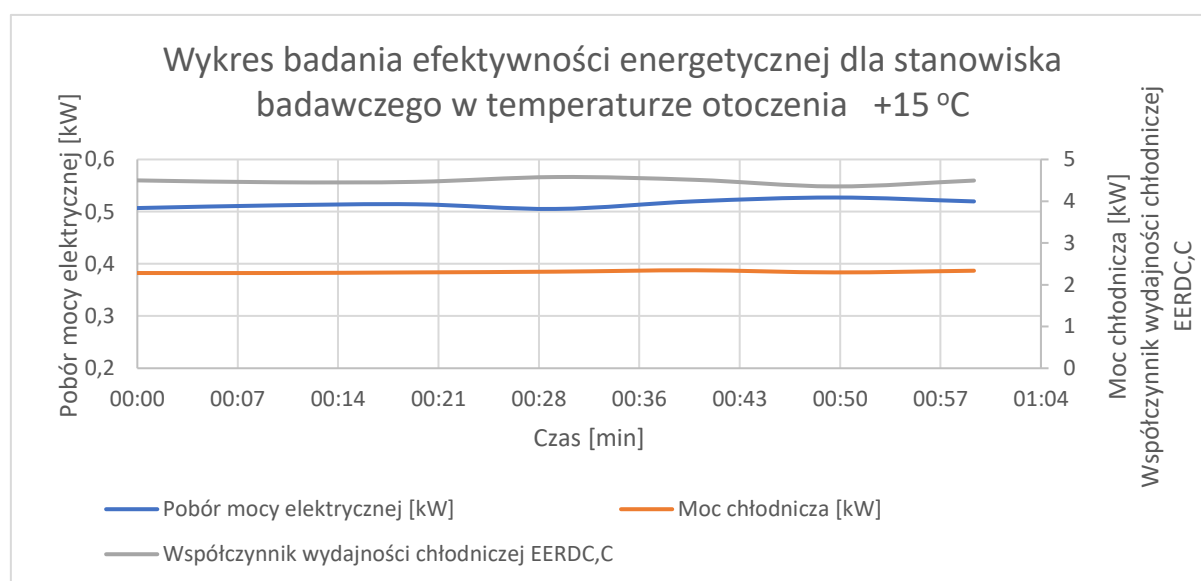


Rysunek 41 WYKRES TEMPERATUR WEJŚCIA I WYJŚCIA ZIĘBIWA STRONA WTÓRNA dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +25 °C dla bloku B

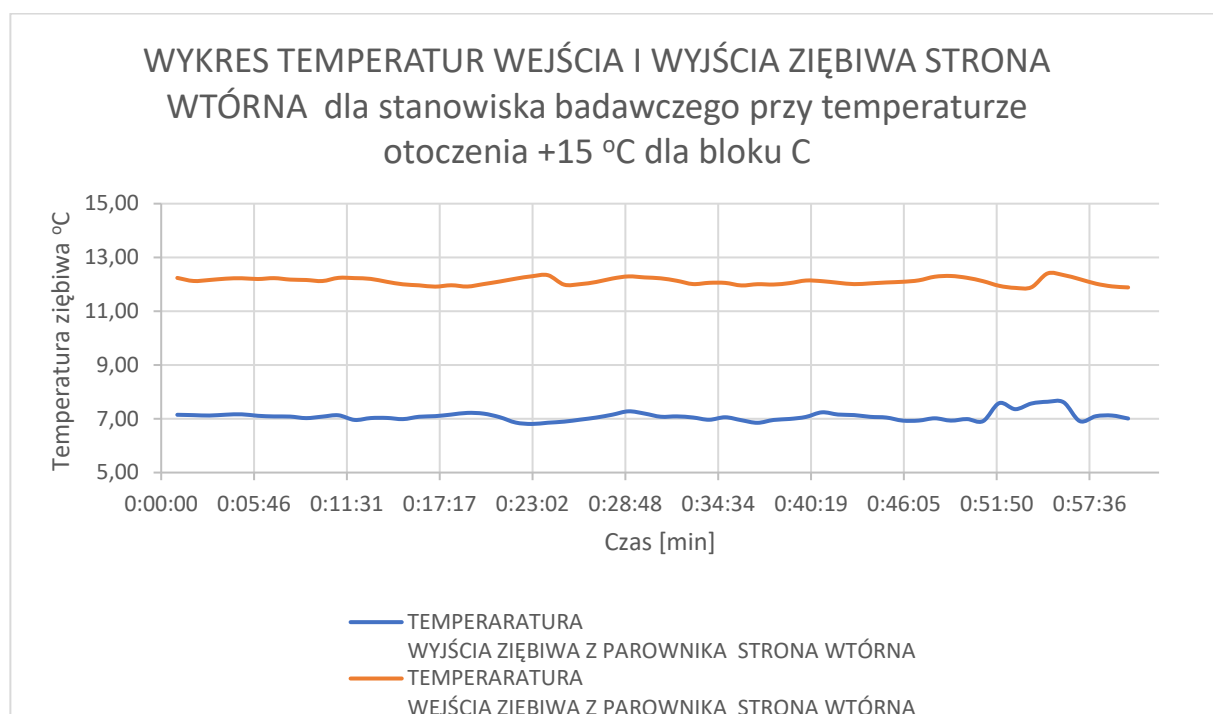
W bloku badawczym dla punktu znamionowego C przeprowadzono badanie zgodnie z wytycznymi przy temperaturze otoczenia +15 °C, zachowaniu temperatur zasilania wytwornicy wody ziębicznej +12 °C i wyjścia +7 °C z zachowaniem delty 5K. Obciążenie cieplne układu wyniosło 87% poprzez zmianę objętościowego natężenia przepływu ziębiwa.

Obliczeniowe obciążenie agregatu dla bloku badań C powinno wynieść 2 315,2W a w warunkach badań rzeczywistych wyniosło 2 310,W.

Przepływ objętościowy przez wymiennik wyniósł średnio 0,396m³/h przy dążeniu do obliczeniowego 0,386 m³/h. Współczynnik efektywności chłodniczej EER_{DC,C} równa się 4,48. W trakcie badania trwającego 60 minut, Wyniki poboru mocy elektrycznej, mocy chłodniczej oraz współczynnika wydajności chłodniczej EER_{DC,C} pokazano na rysunku 42. Zauważyć można na rysunku 42, że układ chłodniczy również pracował stabilnie pobór mocy elektrycznej wahał się od 505 do 527W w czasie jednej godziny, a całkowite zużycie energii elektrycznej wyniosło 516,3Wh. Zużycie energii elektrycznej jest mniejsze niż w bloku pierwszym i drugim ze względu na obniżony spręż sprężarki i niższe ciśnienia skraplania czynnika chłodniczego. Zarówno linia współczynnika EER_{DC,C} wykazuje przebieg stały a odchylenie standardowe wynosi 0,074. Temperatury wejścia i wyjścia ziębiwa strony wtórnej, zaprezentowano na rysunku 43 który obrazuje temperatury wejścia jak i wyjścia +12°C i +7°C, a odchylenia standardowe wynoszą tylko 0,17°C i 0,13°C.



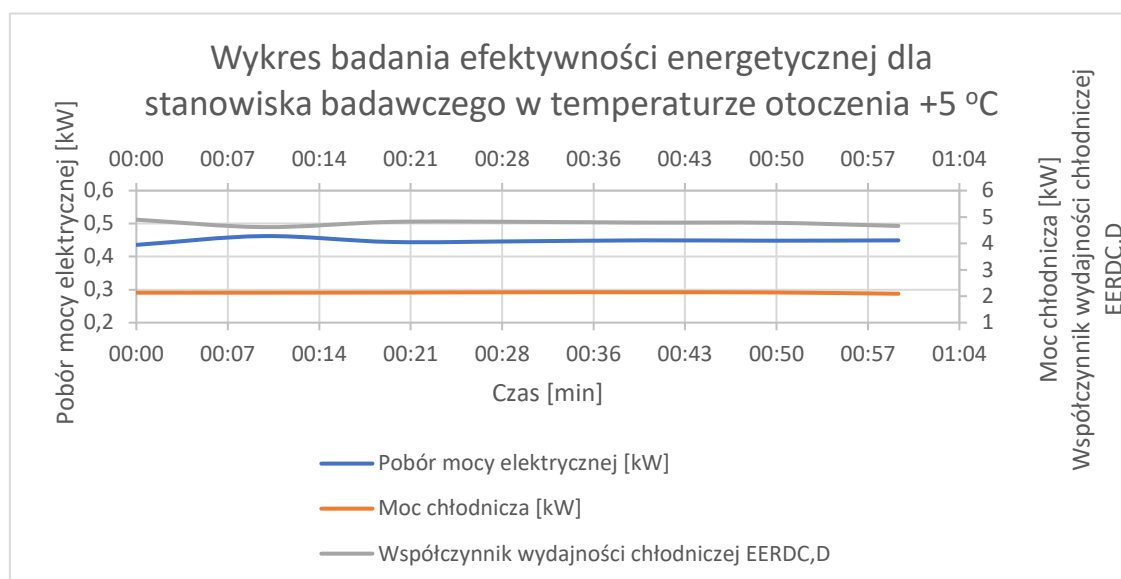
Rysunek 42 Wykres badania efektywności energetycznej dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +15 °C



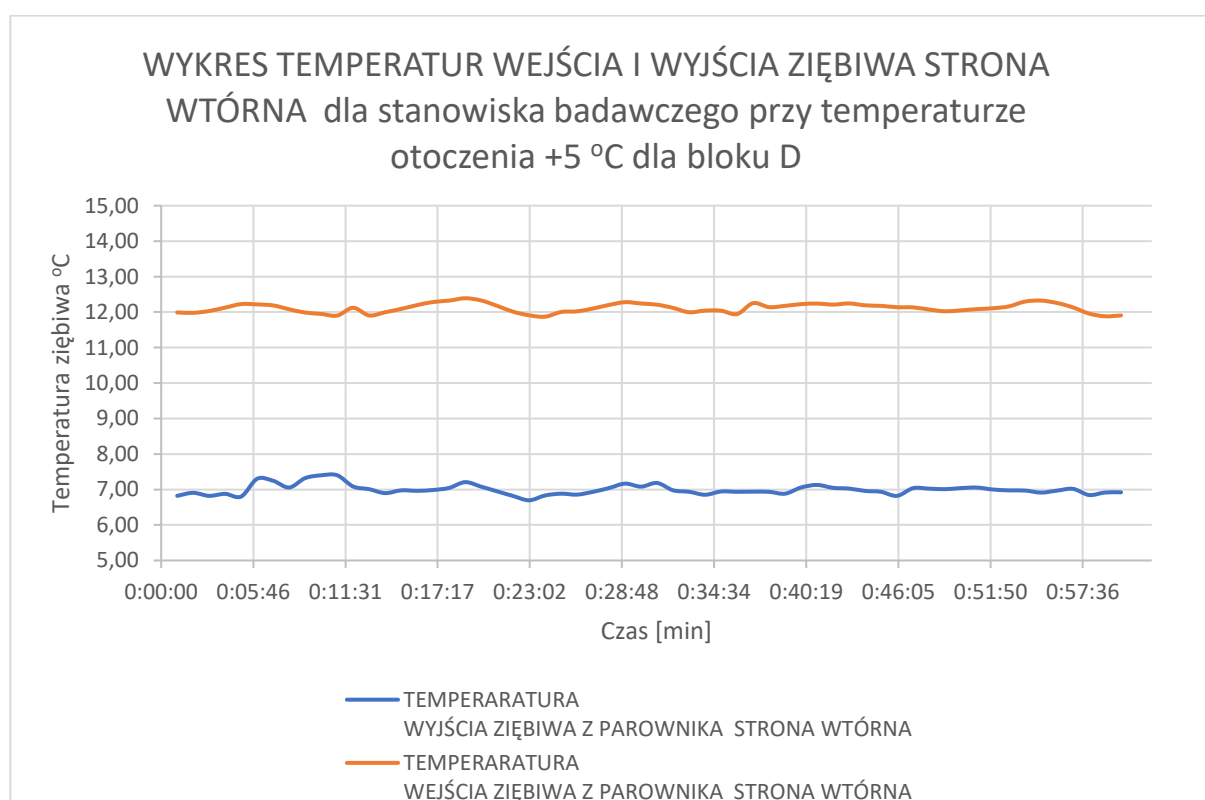
Rysunek 43 Wykres temperatur wejścia i wyjścia ziębiwa strona wtórna dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +15 °C dla bloku C

W czwartym i ostatnim bloku badawczym dla punktu znamionowego D przeprowadzono badanie zgodnie z wytycznymi przy temperaturze otoczenia +5 °C, zachowaniu temperatur zasilania wytwornicy wody ziębicznej +12 °C i wyjścia +7 °C z zachowaniem delty 5K. Obciążenie cieplne układu wyniosło 80% poprzez zmianę objętościowego natężenia przepływu ziębiwa. Obliczeniowe obciążenie agregatu dla bloku badań D powinno wynieść 2 128,9W a w warunkach badań rzeczywistych wyniosło 2 135,9W.

Przepływ objętościowy przez wymiennik wyniósł średnio 0,358m³/h przy dążeniu do obliczeniowego 0,355 m³/h. Współczynnik efektywności chłodniczej $EER_{DC,D}$ równa się 4,74. W trakcie badania trwającego 60 minut, wyniki poboru mocy elektrycznej, mocy chłodniczej oraz współczynnika wydajności chłodniczej $EER_{DC,D}$ przedstawia rysunek 44. Zauważyć można, że układ chłodniczy również pracował stabilnie pobór mocy elektrycznej wahał się od 435 do 465W w czasie 60 minut a całkowity pobór energii elektrycznej wyniósł 449,9Wh. Zużycie energii elektrycznej jest mniejsze niż w bloku pierwszym, drugim i trzecim ze względu na obniżony spręż sprężarki i niższe ciśnienia skraplania czynnika chłodniczego. Zarówno linia współczynnika $EER_{DC,D}$ wykazuje przebieg stały, a odchylenie standardowe wynosi 0,085. Temperatury wejścia i wyjścia ziębiwa strony wtórnej, zaprezentowano na rysunku 45, który obrazuje temperatury wejścia jak i wyjścia +12°C i +7°C, a odchylenia standardowe wynoszą tylko 0,12°C i 0,14°C.



Rysunek 44 Wykres badania efektywności energetycznej dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +5 °C



Rysunek 45 WYKRES TEMPERATUR WEJŚCIA I WYJŚCIA ZIĘBIWA STRONA WTÓRNA dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +5 °C dla bloku D

Tabela 33 pokazuje obliczone współczynniki $EER_{PL}(T_j)$ dla badanych bloków badawczych A, B, C i D oraz przypisanych im warunkom temperaturowym T_j , współczynnikom obciążeniowym $P_R(T_j)$ oraz h_j czyli czasu bloku w odpowiedniej temperaturze T_j .

Tabela 33 Wartości współczynników $EER_{PL}(T_j)$ dla badanych bloków T_j

Blok	A	B	C	D
T_j	+35°C	+25°C	+15°C	+5°C
$P_R(T_j)$	1	0,93	0,87	0,80
h_j	2,09	104,46	370,45	336,48
$EER_{PL}(T_j)$	$EER_{DC,A} = 3,48$	$EER_{DC,B} = 4,10$	$EER_{DC,C} = 4,48$	$EER_{DC,D} = 4,74$

Obliczono wartości współczynników $EER_{PL}(T_j)$ zaprezentowanych w tabeli 33 na podstawie badań dla poszczególnych bloków temperaturowych. Wykonano obliczenia współczynnika sezonowej sprawności energetycznej (SEPR) dla wysokotemperaturowej wytwornicy wody ziębicznej pracującej na naturalnym czynniku chłodniczym jakim jest propan. Uzyskany współczynnik SEPR osiągnął wartość 4,51.

Przygotowano tabelę 34, w której zawarto informacje dotyczące parametrów energetycznych badanej wytwornicy wody ziębicznej zgodnie z obowiązkiem umieszczania informacji o wysokotemperaturowych przemysłowych agregatach chłodniczych z Rozporządza komisji (UE) 2016/2281 z dnia 30 listopada 2016 r. Od dnia 1 stycznia 2018 r. wymagane jest, aby instrukcje obsługi dla instalatorów i użytkowników końcowych oraz ogólnodostępne strony internetowe producentów, ich autoryzowanych przedstawicieli i importerów, zawierały następujące informacje o produkcie jak w tabeli 34.

Tabela 34 Wymagania w zakresie informacji dotyczących badanego wysokotemperaturowego agregatu chłodniczego

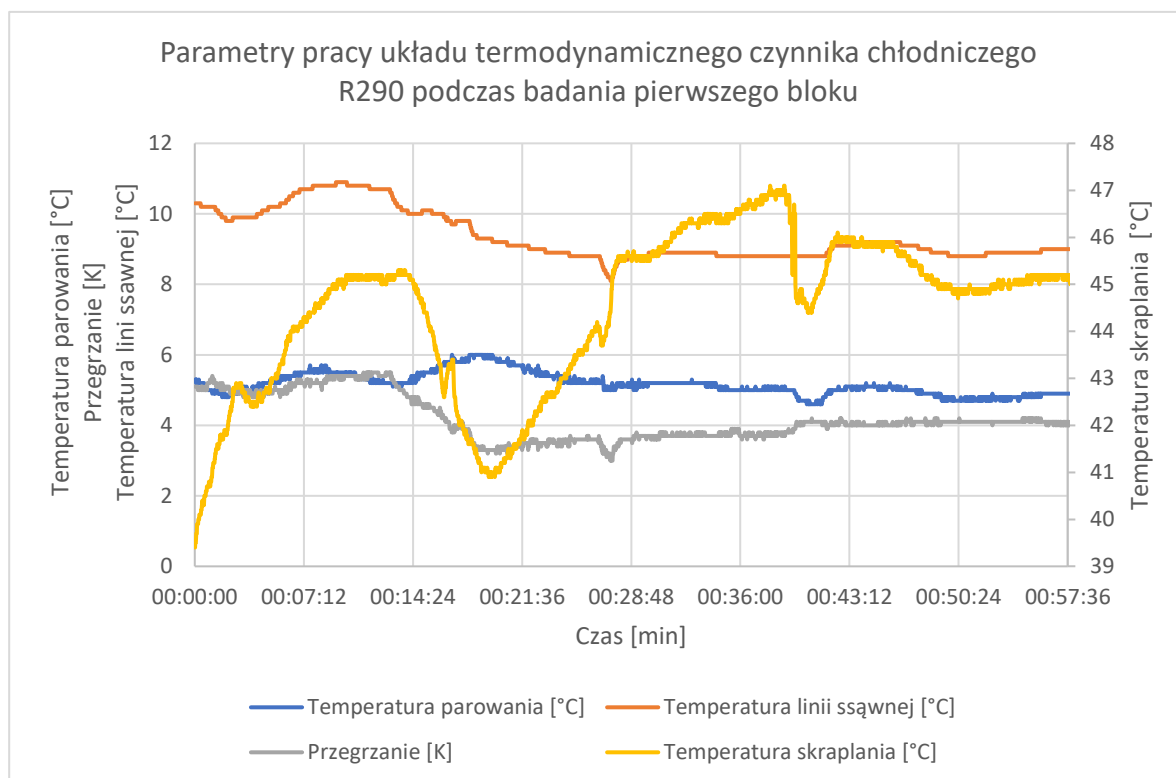
Stanowisko Laboratoryjne wytwornicy wody ziębicznej 1/2024/R290			
Rodzaj skraplania: chłodzone powietrzem			
Płyn stanowiący czynnik chłodniczy: R290 Propan			
Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Temperatura robocza	t	7	°C
Współczynnik sezonowej sprawności energetycznej	SEPR	4,51	[-]
Roczne zużycie energii elektrycznej	Q	36 598	kWh/a
Parametry przy pełnym obciążeniu i referencyjnej temperaturze otoczenia w punkcie znamionowym A			
Znamionowa wydajność chłodnicza urządzeń przemysłowych	P _A	2,661	kW
Znamionowy pobór mocy	D _A	0,765	kW
Znamionowy wskaźnik efektywności energetycznej	EER _{DC,A}	3,48	[-]
Parametry przy pełnym obciążeniu i referencyjnej temperaturze otoczenia w punkcie znamionowym B			
Znamionowa wydajność chłodnicza urządzeń przemysłowych	P _B	2,474	kW
Znamionowy pobór mocy	D _B	0,602	kW
Znamionowy wskaźnik efektywności energetycznej	EER _{DC,B}	4,10	[-]
Parametry przy pełnym obciążeniu i referencyjnej temperaturze otoczenia w punkcie znamionowym C			
Znamionowa wydajność chłodnicza urządzeń przemysłowych	P _C	2,315	kW
Znamionowy pobór mocy	D _C	0,516	kW
Znamionowy wskaźnik efektywności energetycznej	EER _{DC,C}	4,48	[-]
Parametry przy pełnym obciążeniu i referencyjnej temperaturze otoczenia w punkcie znamionowym D			
Znamionowa wydajność chłodnicza urządzeń przemysłowych	P _D	2,128	kW
Znamionowy pobór mocy	D _D	0,449	kW
Znamionowy wskaźnik efektywności energetycznej	EER _{DC,D}	4,74	[-]
Inne parametry			
Sterowanie wydajnością	Stałe		
Współczynnik strat dla agregatów chłodniczych (*)	C _{DC}		[-]
GWP czynnika chłodniczego		1	kg CO ₂ eq(100lat)
(*) Jeżeli C _{DC} nie wyznacza się przez pomiar, wówczas domyślny współczynnik strat dla agregatów chłodniczych wynosi 0,9			

W trakcie przeprowadzanych badań pierwszego bloku temperaturowego dla wyznaczenia współczynnika SEPR wykonano archiwizację pomiarów układu termodynamicznego czynnika chłodniczego, propanu. Wzięto pod uwagę cztery parametry, temperaturę odpowiadającą ciśnieniu parowania, temperaturę po stronie ssącej sprężarki, przegrzanie czynnika chłodniczego oraz temperaturę odpowiadającą ciśnieniu skraplania. Rysunek 46 przedstawia, że w godzinnym badaniu temperatura ciśnienia parowania wahała się od $+4,6^{\circ}\text{C}$ do $+6,0^{\circ}\text{C}$ a odchyłka standardowa wyniosła $0,3^{\circ}\text{C}$.

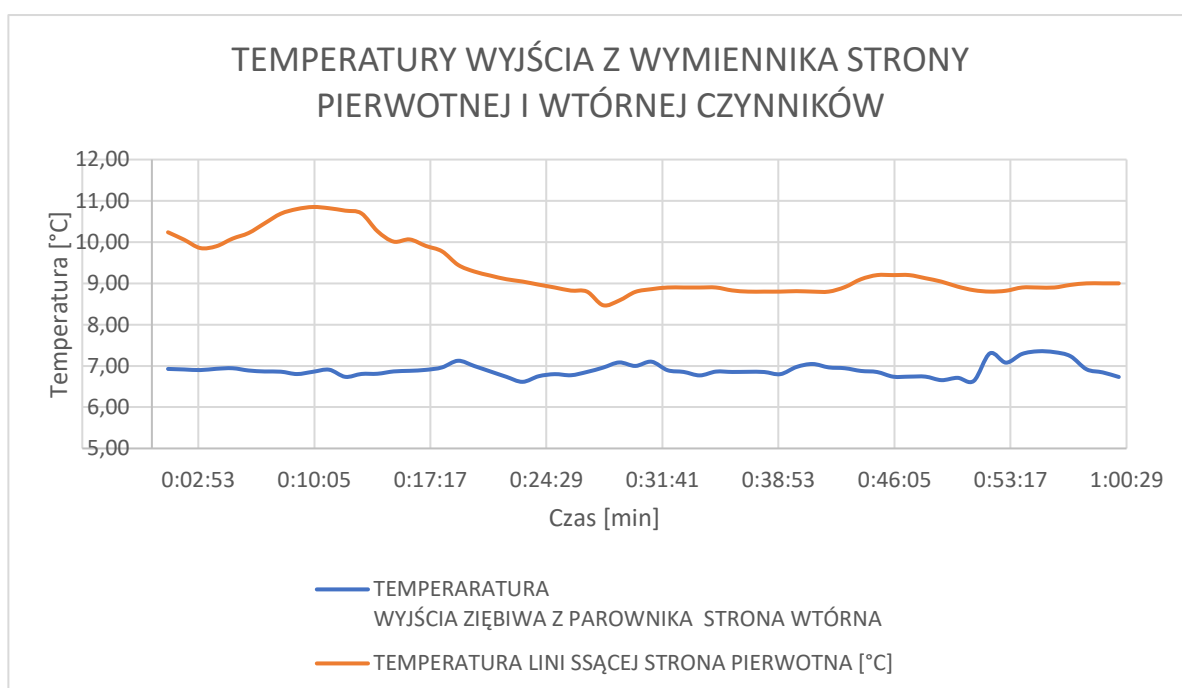
Temperatura linii ssącej równa się od $+8,8^{\circ}\text{C}$ do $+10,9^{\circ}\text{C}$, a odchyłka standardowa wyniosła $0,68^{\circ}\text{C}$. Przegrzanie czynnika chłodniczego to różnica pomiędzy temperaturą linii ssącej, a temperaturą ciśnienia parowania i wynosi od 3,0 do 5,5K. Odchyłka standardowa wyniosła 0,62K. Analizując wyniki może wysunąć wniosek, że proces parowania i przegrzania czynnika chłodniczego przebiegł stabilnie dla zadanej temperatura, która na wyjściu z wytwornicy wody żiębniczej wynosiła $+7^{\circ}\text{C}$. Stabilność przegrzania możemy zawdzięczyć zastosowanemu elektronicznemu zaworowi rozprężnemu z silnikiem krokowym i sterownikiem, które umożliwiają podtrzymanie stabilnej i stałej różnicy temperatur czynnika chłodniczego pomiędzy wlotem i wylotem parownika.

Dokładna temperatura wyjścia medium chłodzonego z wymiennika zilustrowana jest na rysunku 47. W odniesieniu do temperatury czynnika chłodniczego opuszczającego wymiennik i waha się od $+6,61^{\circ}\text{C}$ do $+7,35^{\circ}\text{C}$ a odchylenie standardowe wynosi $0,15^{\circ}\text{C}$.

Temperatura odpowiadająca ciśnieniu skraplania w okresie 60 minut badania przy temperaturze otoczenia przyjmuje minimalną wartość $+39,4^{\circ}\text{C}$ i maksymalną $47,1^{\circ}\text{C}$. Są to wartości bardzo stabilne dla termodynamicznego czynnika chłodniczego mimo stałej temperatury otoczenia i stałego obciążenia układu. Zakres tych wartości utrzymany jest dzięki zastosowaniu płynnej regulacji ciśnienia skraplania. Regulator natychmiast reaguje na zadane ciśnienie skraplania i dostosowuje prędkość obrotową wentylatora do występujących warunków. Ciśnie w układzie, a wraz z nim temperatura zmienia się dynamicznie i ustabilizowanie ciśnienia skraplania z odchyłką standardową 1,61bar w czasie 60 minut pracy jest wynikiem bardzo satysfakcjonującym i dużo lepszym od zastosowania skokowej regulacji skraplania czynnika chłodniczego.

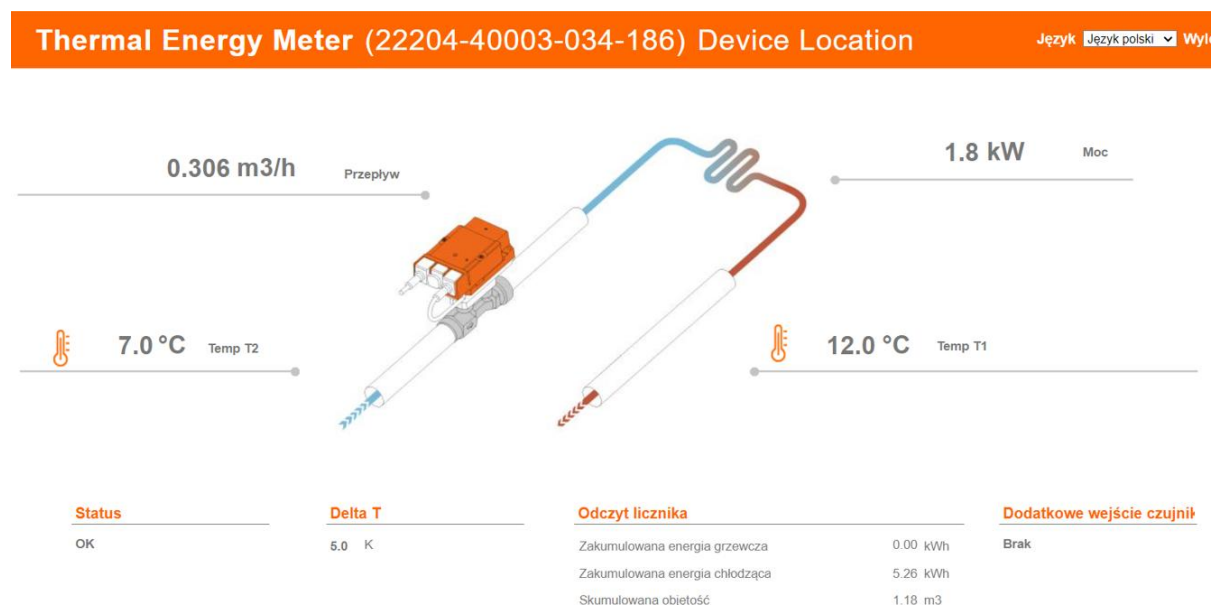


Rysunek 46 Parametry pracy układu termodynamicznego czynnika chłodniczego R290 podczas badania pierwszego bloku



Rysunek 47 Temperatuty wyjścia i z wymiennika strony pierwotnej i wtórnej czynników

Podczas przeprowadzania badań i pełnego pomiaru mocy chłodniczej wykonana została archiwizacja parametrów strony wtórnej (hydraulicznej): temperatur ziębiwa wejścia (T_4) i wyjścia (T_5), delty T ziębiwa, objętościowego natężenia przepływu i moc chłodniczej co prezentuje rysunek 48 wizualizujący przykład w trakcie pomiarów przy użyciu licznika energii termicznej Belimo 22PE-1UD.



Rysunek 48 Wizualizacja przykładowego pomiaru licznika energii termicznej Belimo 22PE-1UD

Dodatkowo wykonano badania sprawności energetycznej istniejącego już stanowiska badawczego dla ziębników o innych charakterystykach fizyko-chemicznych oraz innych temperaturach pracy.

Zastosowania przemysłowe jak i komercyjne wymagają użycia cieczy niezamarzających w określonych warunkach temperaturowych pracy jak i otoczenia instalacji. Wybrane zostały dwa najbardziej popularne ziębniki, roztwory glikolu propylenowego i etylenowego. Płyny niezamarzające pełnią ważną rolę w wielu branżach, głównie w systemach grzewczych i chłodniczych. Ich główną zaletą jest możliwość wzrostu temperatury wrzenia oraz obniżenia temperatury krzepnięcia. Dają szerokie możliwości zastosowania w procesach wymagających utrzymania temperatur w trudnych warunkach.

Wodny roztwór glikolu propylenowego[20]:

Zalety:

- obniża temperaturę krzepnięcia oraz zwiększa temperaturę wrzenia,
- nie jest toksyczny,
- bezpieczny do stosowania w instalacjach narażonych na kontakt z żywnością, farmaceutykami lub wodą pitną,
- zabezpiecza instalację przez korozją.

Zastosowanie:

- przemysł farmaceutyczny, spożywczy,
- instalacje, gdzie substancje toksyczne nie są dopuszczalne,
- ekologiczne rozwiązania.

Wady:

- względem roztworu glikolu etylenowego wymaga większych stężeń do zapewnienia tych samych temperatur krzepnięcia,
- w porównaniu do roztworu glikolu etylenowego jest mniej wydajny.

Wodny roztwór glikolu etylenowego[20]:

Zalety:

- obniża temperaturę krzepnięcia oraz zwiększa temperaturę wrzenia,
- jest bardziej wydajny od roztworu glikolu propylenowego i częściej stosowany dla wysokich mocy grzewczych jak i chłodniczych,
- tańszy od roztworu propylenowego.

Zastosowanie:

- przemysł motoryzacyjny,
- systemy chłodzenia przemysłowego, układy chłodnic powietrznych,
- chłodzenia urządzeń,
- chłodzenie systemów energetycznych,
- systemy ogrzewania,
- chłodzenie maszyn produkcyjnych, obrabiarek,
- chłodzenie urządzeń elektronicznych.

Wady:

- toksyczny,
- wymaga szczególnej ostrożności przy w trakcie przechowywania, eksploataowania i utylizacji,

- nie można stosować w procesach którym towarzyszy żywność, farmaceutyki i woda pitna,

Roztwory glikolowe są wszechstronnymi substancjami, które umożliwiają pracę w szerokim zakresie temperatur w różnorodnych systemach. Głównie ich wybór odbywa się ze względu na preferowane zastosowanie. Roztwory glikolu etylenowego do instalacji, gdzie wymagana jest wysoka wydajność w skrajnych temperaturach, zaś roztwory glikolu propylenowego gdzie mamy styczność z produktami spożywczymi, farmaceutycznymi i wodą pitną. W tabeli 35 przedstawiono parametry użytkowe dla badanych roztworów.

Tabela 35 Cechy charakterystyczne dla roztworów glikoli [20]

Lp.	Nazwa	Roztwór glikolu propylenowego	Roztwór glikolu etylenowego
1.	Temperatura stosowania	-20°C	-20°C
2.	Stężenie [%]	37	35
3.	Barwa	zielona	niebieska
4.	Temperatura krzepnięcia [°C]	$\leq -20/ \leq -26$	$\leq -20/ \leq -25$
5.	Temperatura wrzenia [°C]	104	106

Teoretyczna moc chłodnicza sprężarki dla obranego niskotemperaturowego bloku badawczego została zweryfikowana na podstawie tabeli 36 doborowej producenta dla temperatury parowania -12°C oraz temperatury skraplania +45 °C i wyniosła 1 308,0W. Czynnikiem chłodniczym był również propan jak w poprzednich badaniach. Określono również teoretyczny pobór mocy sprężarki w tabeli 37 dla tych samych parametrów pracy, który wyniósł 777W.

Tabela 36 Wydajność chłodnicza dla przyjętych warunków badania według tabeli producenta [46]
Wydajność chłodnicza [W] ①

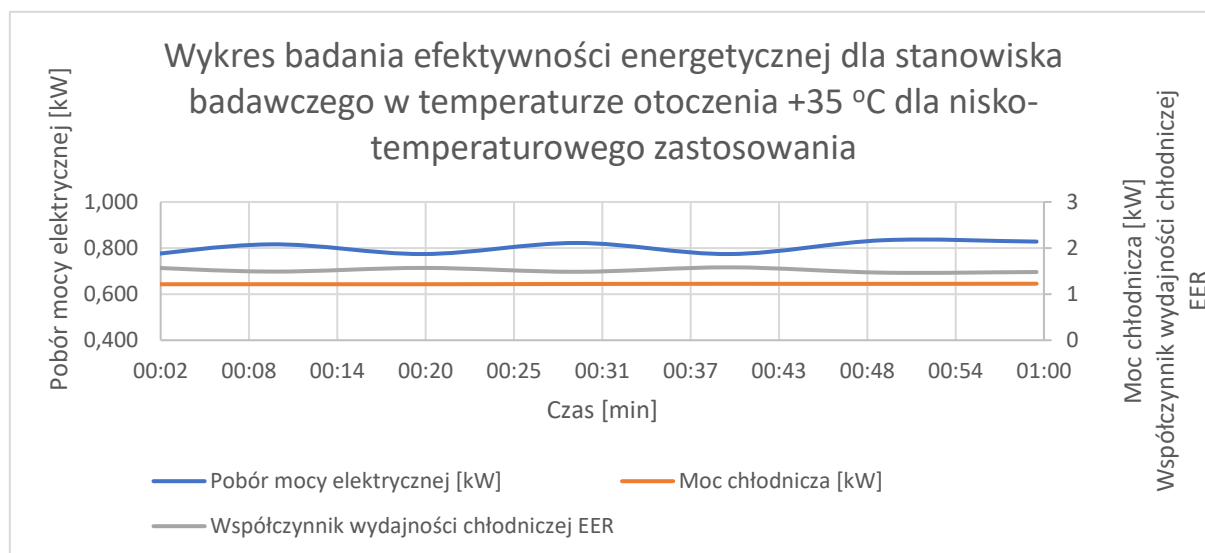
Temperatura skraplania [°C]	Temperatura parowania [°C]								
	-25	-20	-15	-12	-10	-5	0	5	10
40	768	996	1 270	1 458	1 593	1 964	2 385	2 855	3 375
45	685	887	1 136	1 308	1 433	1 779	2 175	2 621	3 118
50	604	780	1 003	1 160	1 274	1 595	1 965	2 387	2 861
55			872	1 013	1 117	1 411	1 757	2 154	2 604
60					961	1 229	1 549	1 921	2 348

Tabela 37 Pobór mocy elektrycznej dla przyjętych warunków badania według tabeli producenta [46]
Pobór mocy [W] ①

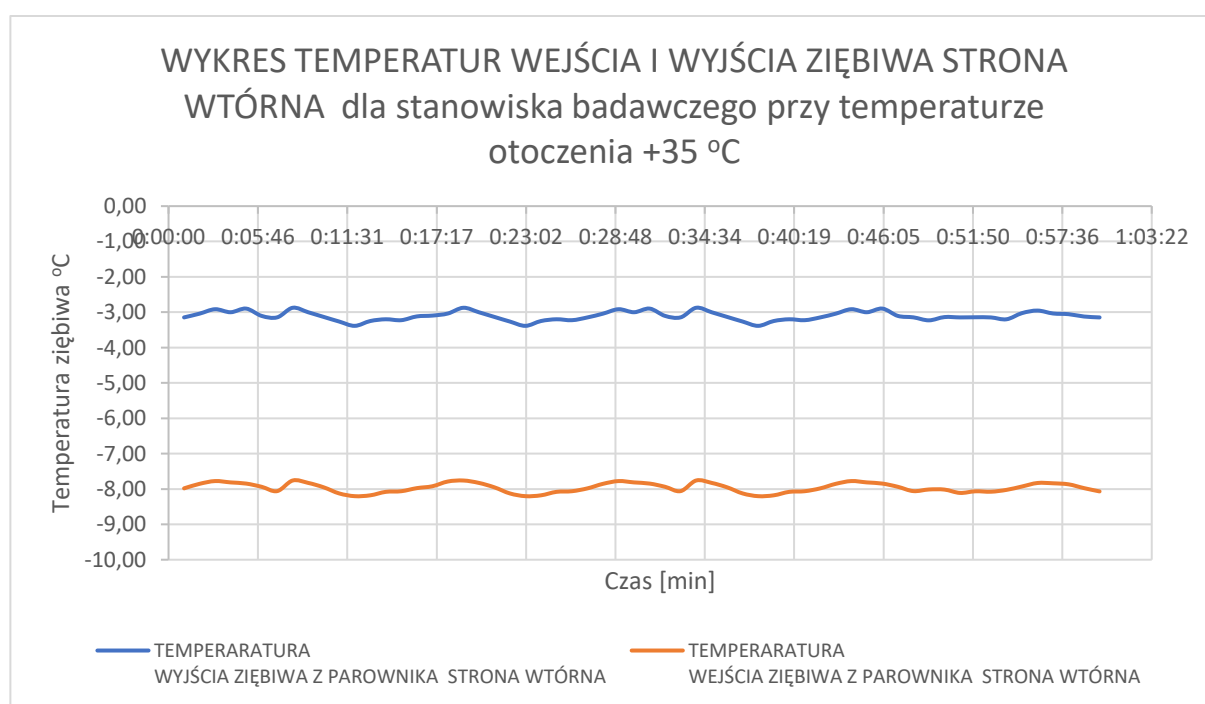
Temperatura skraplania [°C]	Temperatura parowania [°C]								
	-25	-20	-15	-12	-10	-5	0	5	10
40	625	671	719	748	768	817	868	919	972
45	637	690	744	777	799	855	912	970	1 029
50	649	709	769	806	831	893	956	1 020	1 086
55			794	835	862	931	1 000	1 071	1 143
60					893	969	1 044	1 121	1 199

W niskotemperaturowym bloku badawczym na przygotowanym stanowisku wykonano badanie zgodnie z wykorzystaniem chłodziwa, wodnego roztworu propylenowego o stężeniu 37% przy temperaturze otoczenia +35 °C, zachowaniu temperatur zasilania wytwornicy wody żiębniczej -2 °C i wyjścia -8 °C z zachowaniem delty 6K oraz obciążeniem wynikowym dla zachowania stałego przepływu i stałej delty. Natężenie przepływu objętościowego przez wymiennik wyniosło średnio 0,209m³/h. Współczynnik efektywności chłodniczej EER równa się 1,6. Wyniki pokazane na rysunku 49 dla badania trwającego 60 minut: pobór mocy elektrycznej, moc chłodnicza oraz współczynnik wydajności chłodniczej EER. Moc chłodnicza utrzymuje się stabilnie z średnią wartością 1223,0W dzięki zrównoważonemu przepływowi chłodziwa oraz stałemu obciążeniu cieplnemu generowanemu przez grzałki elektryczne. Zauważyć można, że układ chłodniczy mimo stałego obciążenia cieplnego stabilnie odbierał ciepło z układu, lecz pobory mocy elektrycznej wahały się od 757 do 834W a pobór energii elektrycznej podczas godzinnego badania wyniósł 808Wh. Zarówno linia współczynnika EER wykazuje przebieg delikatnej fali a odchylenie standardowe wynosi 0,062. Podczas przebiegu przeprowadzonego badania zwrócono uwagę na temperatura wejścia i wyjścia żiębiwa strony wtórnej, zaprezentowane na rysunku 50. Ich wartości, stabilność oraz różnica pomiędzy temperaturą wejścia i wyjścia mają główny wpływ na chwilową i absolutną moc chłodniczą wytwornicy podczas badania. Zaobserwować można stabilność temperatury wejścia jak wyjścia, które powinny kolejno wynosić -2°C i -8°C.

Temperatura ziębiwa na wyjściu waha się od $-8,20^{\circ}\text{C}$ do $-7,76^{\circ}\text{C}$, a odchylenie standardowe wynosi $0,13^{\circ}\text{C}$ zaś na wejściu waha się od $-2,39^{\circ}\text{C}$ do $-1,88^{\circ}\text{C}$, a odchylenie standardowe wynosi $0,13^{\circ}\text{C}$. Można zaobserwować, na podstawie danych pokazanych na rysunku 50, że obie temperatury przebiegały stabilnie a ich odchylenie względem średniej jest niskie.



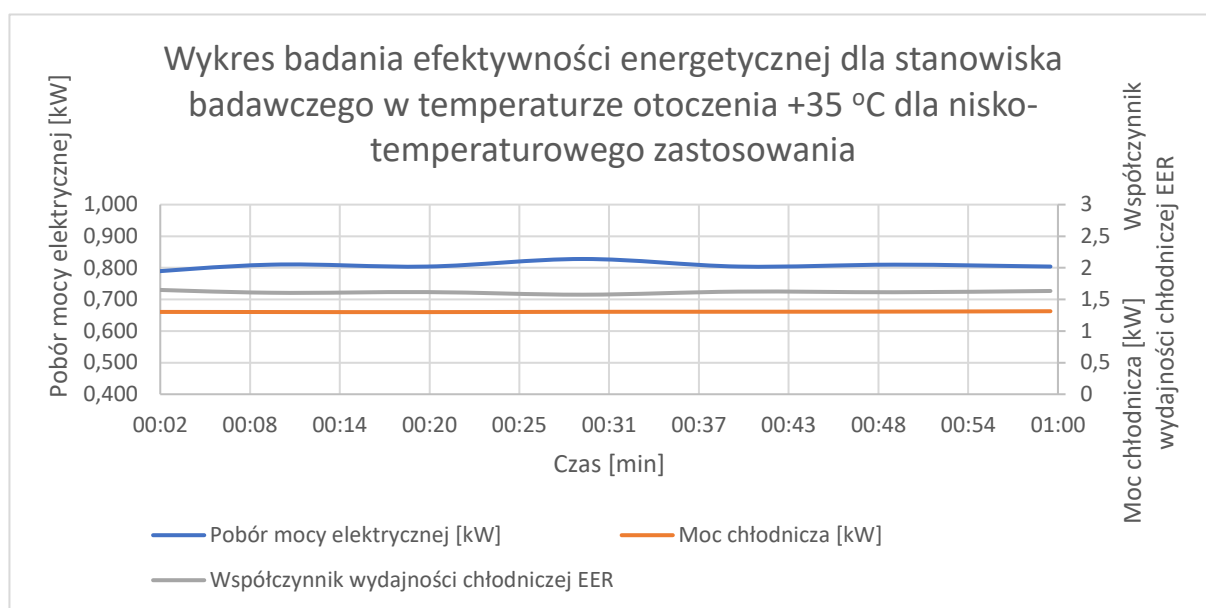
Rysunek 49 Wykres badania efektywności energetycznej dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia $+35^{\circ}\text{C}$, zastosowaniu roztworu glikolu propylenowego,



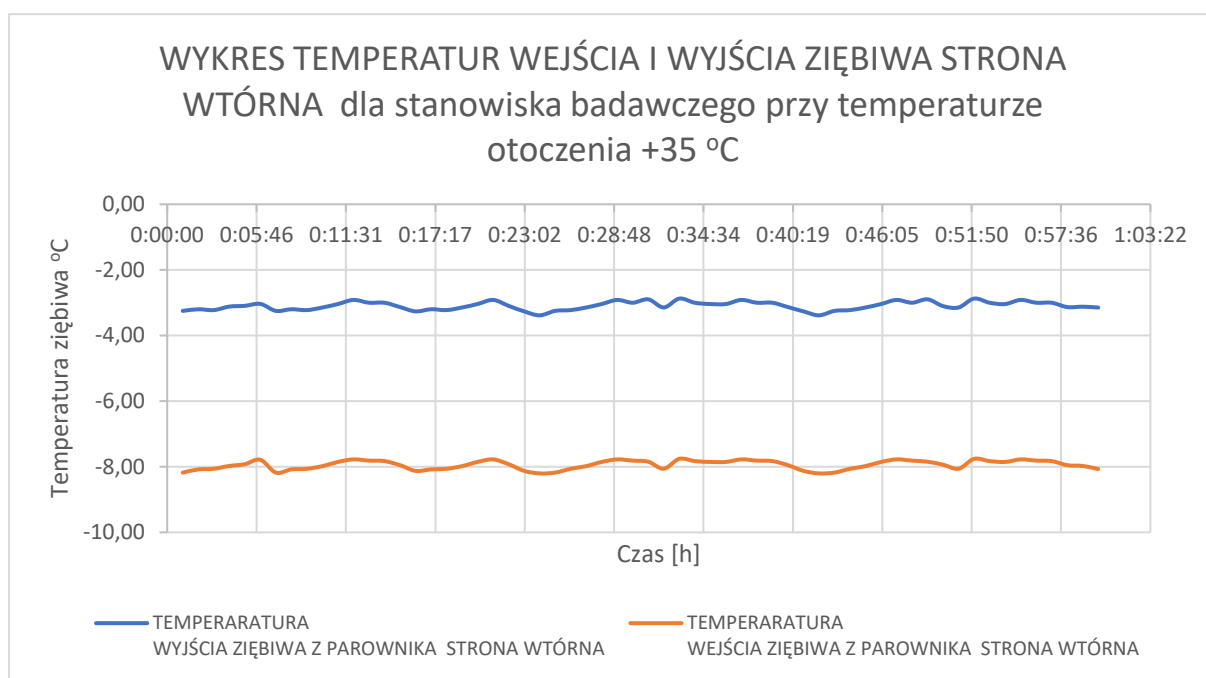
Rysunek 50 Wykres temperatur wejścia i wyjścia ziębiwa strona wtórna dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia $+35^{\circ}\text{C}$, z zastosowaniem roztworu glikolu propylenowego

W kolejnym niskotemperaturowym bloku badawczym, na przygotowanym stanowisku, wykonano badanie z wykorzystaniem chłodziwa, wodnego roztworu etylenowego o stężeniu 35% przy temperaturze otoczenia $+35^{\circ}\text{C}$, zachowaniu temperatur zasilania wytwornicy wody żiębniczej -8°C i wyjścia -2°C z zachowaniem delty 6K oraz obciążeniem wynikowym dla zachowania stałego natężenia przepływu i stałej delty temperatury. Przepływ objętościowy przez wymiennik wyniósł średnio $0,258\text{m}^3/\text{h}$. Współczynnik efektywności chłodniczej EER równa się 1,71. W trakcie przebiegającego badania trwającego 60 minut, mierzono pobór mocy elektryczną, moc chłodniczą oraz współczynnik wydajności chłodniczej EER, wyniki pokazano na rysunku 51. Moc chłodnicza utrzymuje się stabilnie z średnią wartością 1305,0W dzięki zrównoważonemu przepływowi żiębiwa oraz stałemu obciążeniu cieplnemu generowanemu przez grzałki elektryczne. Zauważyć można, że układ chłodniczy mimo stałego obciążenia cieplnego stabilnie odbierał ciepło z układu, lecz pobory mocy elektrycznej wahały się od 780 do 828W a całkowity pobór energii wyniósł 810Wh. Zarówno linia współczynnika EER wykazuje przebieg delikatnej fali a odchylenie standardowe wynosi 0,028. Podczas przeprowadzonego badania skupiono się na temperaturach wejścia i wyjścia żiębiwa strony wtórnej, zaprezentowane na rysunku nr 52. Ich wartości, stabilność oraz różnica pomiędzy temperaturą wejścia i wyjścia mają znaczący wpływ na chwilową i moc chłodniczą wytwornicy podczas badania. Zaobserwować można stabilność temperatury wejścia jak wyjścia, które powinny kolejno wynosić -2°C i -8°C .

Temperatura żiębiwa na wyjściu waha się od $-8,18^{\circ}\text{C}$ do $-7,78^{\circ}\text{C}$, a odchylenie standardowe wynosi $0,13^{\circ}\text{C}$ zaś na wejściu waha się od $-2,25^{\circ}\text{C}$ do $-1,85^{\circ}\text{C}$, a odchylenie standardowe wynosi $0,12^{\circ}\text{C}$. Można zaobserwować na podstawie danych pokazanych na rysunku 53, że obie temperatury przebiegały stabilnie a ich odchylenie względem średniej jest niskie.



Rysunek 51 Wykres badania efektywności energetycznej dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +35 oC, zastosowaniu roztworu glikolu etylenowego,



Rysunek 52 WYKRES TEMPERATUR WEJŚCIA I WYJŚCIA ZIĘBIWA STRONA WTÓRNA dla stanowiska badawczego przy temperaturze otoczenia +35 oC, z zastosowaniem roztworu glikolu etylenowego

7. Porównanie wyników badań własnych z wytwornicami wody lodowej z czynnikami syntetycznymi i naturalnym

Wykonano porównanie badawczej wytwornicy wody ziębniczej pracującej z naturalnym czynnikiem chłodniczym, propanem z wytwornicami wody ziębniczej pracujących z syntetycznymi czynnikami chłodniczymi oraz wprowadzonym już na rynek przez włoską firmę Euroklimat wytwornicą pracującą również na propanie. Dane, na których oparto porównanie, znajdują się w tabeli 38.

Poniżej przedstawiono na podstawie tabeli 38 szczegółowe porównanie badawczej wytwornicy wody ziębniczej z czterema wytwornicami rynkowymi: Carrier 30RB-040R, Trane RTAD 085 HE SN, EUROKLIMAT EKS BS i EUROKLIMAT HERA 035-1-1 PE. Porównanie uwzględnia najważniejsze parametry techniczne, takie jak moc chłodnicza, współczynnik SEPR, typ czynnika chłodniczego, sterowanie mocą chłodniczą oraz typ konstrukcji sprężarki.

Badawcza wytwornica wody ziębniczej posiada najmniejszą nominalną moc chłodniczą (2,66 kW) w porównaniu do pozostałych, co jest naturalne dla urządzeń testowych lub eksperymentalnych. Wszystkie współczynniki EER były zbadane dla tych samych warunków pracy, wejście(+12°C), wyjście(+7°C), medium: woda, a temperatura otoczenia +35°C. Przyjęto do porównania urządzenia które znacząco różnią się mocą chłodniczą, aby względem tego ważnego parametru technicznego porównać pozostałe cechy. Rozbieżność wartości jest znacząca, ponieważ pomiędzy najmniejszą (2,66kW) a największą (273,00kW) mocą chłodniczą jest różnica ponad sto-krotna.

Pozwoliło to na porównanie współczynników SEPR dla mniejszych i większych mocy chłodniczych. Punkt 2 tabeli 38 prezentuje, że badana wytwornica wody ziębniczej nie osiągnęła tak wysokiego współczynnika jak agregaty Carrier i Trane. Wprowadzane na rynek wytwornice wody ziębniczej pracujące z propanem nie mają określonego przez producentów jeszcze współczynnika SEPR, nie znajduje się w dokumentacji.

W punkcie 4 tabeli 38 przedstawiono współczynniki EER dla porównywanych wytwornic wody ziębniczej, gdzie badawcza wytwornica z współczynnikiem 3,48 osiągnęła bardzo dobry wynik. Zestawiono w punkcie 4 tabeli 38 czynniki chłodnicze pracujące z wytwornicami wody ziębniczej. Wnioskować można, że od 2027 roku wystąpi zakaz stosowania czynników dla agregatu Trane RTAD oraz Euroklimat EKS B, od 2032 roku dla agregatu Carrier. Propan i inne czynniki chłodnicze - węglowodory będą mogły być stosowane bez ograniczenia czasowego. Sterowanie mocą chłodniczą w wytwornicach wody ziębniczej pokazane w punkcie 5 tabeli 38 jest różnorodne od typowego włącz wyłącz, poprzez

skokowe co 33% do płynnego od 30 do 100%. Konstrukcje sprężarek w punkcie 6 tabeli 38 są aż cztery na pięć wytwornic wody żiębniczej. Główne zastosowanie dla czynników syntetycznych znalazły sprężarki typu scroll hermetyczne, a dla propanu tłokowe hermetyczne i pół-hermetyczne. Producenci starają się dostosować konstrukcyjnie sprężarki do stawianych im wymagań technicznych jak i bezpieczeństwa. W trakcie przeprowadzanych badań pojawiły się dostępne na rynku sprężarki typu scroll do pracy z propanem i węglowodorami.

Tabela 38 Porównanie parametrów technicznych wybranych wytwornic wody żiębniczej [41] [42] [43] [44]

Lp.	Opis	Badawcza wytwornica wody żiębniczej	Wytwornica wody żiębniczej Carrier 30RB-040R	Wytwornica wody żiębniczej Trane RTAD 085 HE SN	Wytwornica wody żiębniczej EUROKLIMAT EKS BS 090-3-1	Wytwornica wody żiębniczej EUROKLIMAT HERA 035-1-1 PE
1.	Nominalna moc chłodnicza [kW]	2,66	41,8	273	241,00	25,2
2.	Współczynnik SEPR	4,51	6,3	3,16	5,26	B.D.
3.	Współczynnik EER	3,48	2,95	2,76	2,90	2,60
4.	Czynnik chłodniczy	R290	R32	R134a	R410a	R290
5.	Sterowanie mocą chłodniczą	Stałe 0/100%	Stopniowe 50/50%	Płynne 30-100%	Stopniowe 33/33/33%	Płynne 30-100%
6.	Typ konstrukcji sprężarki	Tłokowa hermetyczna,	Scroll hermetyczna	Śrubowa półhermetyczna	Scroll hermetyczna	Wielotłokowa półhermetyczna

8. Wnioski

Przeprowadzone badania w pełni potwierdziły, że zaprojektowana wytwornica wody ziębniczej, działająca na ekologicznym czynniku chłodniczym jakim jest propan, spełnia wszystkie podstawowe wymagania założenia hipotezy. Urządzenie wykazuje stabilność w funkcjonowaniu, a także skutecznie wytwarza wodę w określonym zakresie temperatur i wydajności. Realizacja założeń projektowych obejmujących aspekty techniczne systemu, była skuteczna. Należy jednak podkreślić, że projekt nie osiągnął zamierzonych wartości wymaganego współczynnika sezonowej sprawności energetycznej jak przedstawiono w tabeli 39 co stanowi istotny obszar do dalszego rozwoju. Eksperymentalne stanowisko badawcze z założenia posiadało niewielką moc chłodniczą, gdzie uwzględniając możliwości konstrukcyjne, pewne możliwości optymalizacji i sterowania ze względu na małe komponenty były ograniczone. Zakłada się, że dla zastosowań o większych mocach chłodniczych, a co za tym idzie zastosowaniu innych typów sprężarek i systemów sterowania, optymalizacją zużycia energii założony cel wartości współczynnika SEPR jest do osiągnięcia. Dodatkowo w trakcie trwania rozprawy doktorskiej pojawiły się na rynku wytwornice wody ziębniczej pracujące z naturalnym czynnikiem chłodniczym, propanem osiągające bardzo wysokie współczynniki EER względem aktualnie stosowanych rynkowo zaprezentowano w tabeli 37, a badany współczynnik EER na stanowisku eksperymentalny był wyższy od porównywanych agregatów. Producenci prowadzą jeszcze badania współczynników SEPR dla wprowadzanych wytwornic, nie są jeszcze publikowane.

Tabela 39 Zestawienie wymaganych i wyników obliczonego współczynnika SEPR

Lp.	Opis warunków	Wartość współczynnika SEPR
1.	Wymagany współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych pierwszego stopnia (od dnia 1 stycznia 2018 r.) chłodzonych powietrzem do 400kW	4,5
2.	Wymagany współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych pierwszego stopnia (od dnia 1 stycznia 2021 r.) chłodzonych powietrzem do 400kW	5,0
3.	Obliczony uzyskany współczynnik sezonowej sprawności energetycznej wysokotemperaturowych przemysłowych agregatów chłodniczych pierwszego stopnia chłodzonych powietrzem do 400kW	4,51

Dodatkowo przeprowadzono badanie na stanowisku z niezamarzającymi ziębiwami w określonych warunkach temperaturowych pracy jak i otoczenia, dokładnie roztworami wodno-glikolowymi. Wyniki sprawności EER dla zastosowania niskotemperaturowego są równie obiecujące lecz wymagające dalszych badań.

Główne wyniki badań wskazują na pozytywną stronę działania wytwornicy, jeśli chodzi o jej zdolność do produkcji wody ziębniczej, a także efektywność energetyczną EER dla danego punktu badawczego przy niższych temperaturach otoczenia i niższych obciążeniach. Jednak w kontekście pracy uwzględniającym sezonowy współczynnik sprawności wytwornicy osiągnięcie oczekiwanego współczynnika SEPR okazało się niemożliwe. Urządzenie nie osiągnęło wymaganej wartości współczynnika SEPR, co może wynikać z kilku czynników. Nieosiągnięcie zakładanego celu wskazuje na konieczność głębszej analizy i optymalizacji poszczególnych komponentów układu, aby sprostać wymaganiom technologicznym.

Osiągnięto cel doboru czynnika o niskim ekwiwalencie GWP, poniżej 5 a dokładnie 0,072. Historycznie zakładano, że R290 ma GWP równy 3 aż do czasu gdy w raporcie „Climate Change 2021 – The Physical Science Basis opublikowano po raz pierwszy dane dotyczące współczynników dla węglowodorów. [45] W konsekwencji informacji o zmniejszeniu współczynnika GWP dla propanu realizuje się hipoteza dotycząca obniżenia kosztów eksploatacji wynikających z obligatoryjnych kontroli szczelności agregatów wody ziębniczej, nawet przy wysokich wartościach napełnia układów chłodniczych propanem.

Wytwornica wody ziębniczej, oparta na ekologicznym czynniku termodynamicznym, stanowi istotny krok w kierunku zrównoważonego rozwoju technologii chłodniczych. Dzięki zastosowaniu ekologicznych czynników, system zmniejsza negatywny wpływ na środowisko naturalne w porównaniu do tradycyjnych urządzeń opartych na czynnikach chemicznych szkodliwych dla atmosfery. Niemniej konieczne jest dalsze doskonalenie efektywności energetycznej, aby urządzenie mogło konkurować z tradycyjnymi systemami pod względem kosztów eksploatacji i wydajności. W przyszłości takie rozwiązanie może mieć szerokie zastosowanie w przemyśle, szczególnie w obszarach, gdzie ekologiczne podejście do technologii chłodniczych zyskuje na znaczeniu.

Wytwornica, mimo pewnych ograniczeń w zakresie efektywności energetycznej, wykazuje znaczący potencjał w zastosowaniach gospodarczych i przemysłowych, szczególnie w branżach, gdzie istotne jest podejście proekologiczne. Może znaleźć zastosowanie m.in. w chłodnictwie przemysłowym, gospodarczym, komercyjnym, klimatyzacji budynków użyteczności publicznej i głównie w procesach technologicznych, które wymagają precyzyjnej kontroli temperatury. Takie wykorzystanie technologii może przyczynić się do zmniejszenia

negatywnego wpływu na środowisko. Aby wytwornica mogła konkurować na poziomie rynkowych rozwiązań wymaga to dalszych badań w celu jej ulepszenia. niezbędne będzie dalsze inwestowanie w badania, które poprawią jej efektywność energetyczną i niezawodność. Zwiększenie współczynnika efektywności energetycznej będzie możliwe dzięki dalszym badaniom mającym na celu zarówno optymalizację konstrukcji wytwornicy, jak i jej przystosowanie do pracy w szerszym zakresie temperatur roboczych. Ważnym obszarem będzie rozwój nowych materiałów o lepszej przewodności cieplnej oraz doskonalenie technologii odzysku ciepła, co może znacząco wpłynąć na poprawę ogólnej efektywności systemu. Należy także kontynuować badania nad ekologicznymi czynnikami termodynamicznymi, które charakteryzują się lepszymi właściwościami w wyższych temperaturach otoczenia co umożliwi ekspansję na rynki gdzie występują wysokie temperatury otoczenia jak Afryka, Azja, Południowa i Północna Ameryka. W dłuższej perspektywie takie działania mogą prowadzić do opracowania bardziej zaawansowanych technologii, które zaspokoją potrzeby przemysłu chłodniczego, jednocześnie pozostając przyjaznymi dla środowiska.

Powyższe wnioski stanowią zachętę do dalszego rozwoju technologii wytwarzania energooszczędnych wytwornic wody żelaznej przy zastosowaniu naturalnego, zarazem ekologicznego czynnika chłodniczego, przyjaznego środowisku, a także zgodnego z aktami prawnymi.

Kluczowym elementem tego procesu jest uwzględnienie aspektów technologicznych i środowiskowych, co pozwoli na dalszy rozwój tej technologii w kierunku większej efektywności i opłacalności w skali przemysłowej i gospodarczej.

9. Kierunek dalszych badań

Kierunek dalszych badań wytwornicy wody żiębniczej pracującej z naturalnym czynnikiem chłodniczym R290 powinien koncentrować się na badaniu urządzeń o różnych mocach chłodniczych oraz zwiększeniu efektywności energetycznej. Głównym celem będzie osiągnięcie wysokich wskaźników współczynnika efektywności energetycznej SEPR wysokotemperaturowego przemysłowego agregatu chłodniczego. Kolejnym kierunkiem badań wytwornicy wody żiębniczej jest zwiększanie efektywności energetycznej dla niskotemperaturowych rozwiązań. Można to uzyskać dzięki:

- różnorodności wytwornic pod względem mocy chłodniczych,
- stosowaniu różnorodnych rozwiązań komponentów dostępnych na rynku w różnych konfiguracjach,
- zwiększeniu efektywności energetycznej dla wysokotemperaturowych przemysłowych wytwornic wody żiębniczej przez badania nad zmniejszeniem zużycia energii przez cały agregat,
- badaniu nad cyklem chłodzenia, dostosowaniem parametrów pracy urządzenia do właściwości czynnika chłodniczego R290 oraz jego zachowań w różnych warunkach,
- poprawie efektywności wymienników ciepła,
- rozwojowi i doborowi bezpiecznych komponentów dla łatwopalnego czynnika chłodniczego,
- rozwojowi technologii sterowania i automatyki – wdrażanie zaawansowanych systemów monitorowania i regulacji pracy urządzenia w czasie rzeczywistym, co może pozwolić na dynamiczne dostosowanie pracy wytwornicy do optymalnych warunków warunków.

Powyższe działania znacząco poprawią sprawność energetyczną zespołu urządzeń, zwiększą moc chłodniczą oraz rozszerzą możliwości zastosowania palnych czynników chłodniczych. Przyczynia się to do bardziej zrównoważonego i efektywnego wykorzystania naturalnych czynników chłodniczych.

10. Streszczenie

Zrealizowana analiza aktów prawnych i literatury ujawniła brak szerokiej dostępności informacji dotyczących wytwornic wody ziębniczej pracujących z naturalnymi i ekologicznymi czynnikami chłodniczymi. Dotychczas autorzy skupiali się na komponentach używanych do agregatów chłodniczych, przeglądzie dostępnych czynników chłodniczych lecz nie z uwzględnieniem stosowania ekologicznych czynników chłodniczych w połączeniu z wysoce sprawnymi energetycznie układami chłodniczymi. Przedstawiono główne komponenty układów wytwornic wody ziębniczej uwidaczniając wady i zalety ze względu na zastosowanie. Przedstawiono dostępne czynniki pochodzenia naturalnego mogące stawić czoła aktualnym wymaganiom pod względem energetycznym, prawnym oraz użytkowym. Rozwinięto aspekty bezpieczeństwa stosowania czynników chłodniczych według kryterium toksyczności i palności. Zgromadzono aktualne wytyczne dotyczące projektowania wytwornic wody ziębniczej zgodnie z aktualnymi aktami prawnymi, wymaganiami sprawności energetycznych oraz uwzględniając plany wycofywania nie ekologicznych czynników chłodniczych do 2050 roku.

Zrealizowane studia z zakresu literatury pozwoliły precyzyjnie określić cel oraz zakres pracy. W kolejnej części dokonano przeglądu zalet i wad wybranych metod wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji. Wykonano analizę zalet, wad, różnic pomiędzy metodami, określonymi warunkami i przyjętymi kryteriami w celu doboru odpowiedniej metody. Za pomocą wielokryterialnej metody wspomaganie decyzji dokonano wyboru optymalnego i ekologicznego czynnika chłodniczego R290(propan). Czynnik ten ma na celu zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne, eliminując tradycyjne, szkodliwe substancje stosowane w wytwornicach wody ziębniczej.

Następnie opisano proces projektowania eksperymentalnej wytwornicy wody ziębniczej uwzględniając parametry termodynamiczne oraz optymalizację konstrukcji wytwornicy, aby zapewnić wysoką efektywność energetyczną i bezpieczeństwo. Wykonano eksperymentalne stanowisko zgodnie z wytycznymi projektu oraz dokonano jego optymalnej regulacji dla założonego celu.

Eksperymentalną wytwornicę wody ziębniczej poddano badaniom laboratoryjnym, a wyniki tych badań stanowią istotny element pracy. Przeprowadzono wiele prób i testów w wyniku których dostosowano parametry pracy, napełnienie układu odpowiednią ilością czynnika chłodniczego, propanu dla pracy w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Skoncentrowano się na ocenie efektywności procesu wytwarzania wody ziębniczej w różnych warunkach operacyjnych zgodnie z obraną metodologią badawczą oraz na analizie parametrów termodynamicznych, takich jak temperatura, ciśnienie i przepływ chłodziwa.

Dokonano zestawienia najczęściej stosowanych roztworów wodno-glikolowych (cieczy niezamarzających) w określonych warunkach pracy instalacji. Wykonano badania sprawności energetycznej istniejącego już stanowiska badawczego dla ziębników o innych charakterystykach fizyko-chemicznych oraz innych temperaturach pracy. Porównano wyniki badań z aktualnymi rynkowymi odpowiednikami.

W końcowej części pracy przedstawiono wyniki badań, które wykazały dużą efektywność energetyczną z zachowaniem wymagań ekologicznych na najbliższe lata. Przeanalizowano również potencjalne kierunki rozwoju oraz możliwość komercjalizacji opracowanego urządzenia w przemyśle chłodniczym, klimatyzacyjnym oraz w innych dziedzinach wymagających wytwarzania wody ziębniczej.

11. Literatura

- [1] KONWENCJA WIEDENSKA O OCHRONIE WARSTWY OZONOWEJ, 1988.
- [2] Protokół Montrealski w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową sporządzony w Montrealu dnia 16 września 1987 r.. (Dz.U. 1992 nr 98 poz. 490).
- [3] A. Hamera, M. Kowacz. B. Gil, Certyfikat F-Gaz Prozon Fundacja Ochrony Klimatu, 2018.
- [4] 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).
- [5] ROZPORZĄDZENIE (WE) NR 842/2006 PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 17 maja 2006 r.
- [6] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych.
- [7] Polski Komitet Normalizacyjny PN-EN 14511-1:2023-02 Klimatyzatory, agregaty chłodzące ciecz i pompy ciepła do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń oraz agregaty procesowe, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym -- Część 1: Terminy i definicje.
- [8] Hebert W. Stanford III, HVAC Water Chillers and Cooling Towers Fundamentals, Application and Operation, Second Edition, 2011,
- [9] H. J. Ullrich, Technika chłodnicza. Poradnik, Gdańsk: IPPU MASTA, 1998.
- [10] T. Bohdal, H. Charun and M. Czapp, Urządzenia chłodnicze sprężarkowe, parowe, Warszawa: WNT, 2003.
- [11] K.M. Gutkowski, Chłodnictwo i klimatyzacja, Warszawa: WNT, 2003.
- [12] "Elementy pomp ciepła kształtujące COP.," [Online]. Available: <https://instalreporter.pl> [Accessed 13 01 2023].
- [13] A. Bhatia, HVAC Chiller Systems Course No: M04-006 Available: <https://www.cedengineering.com> [Accessed 13 01 2023].
- [14] Turbocore Available: <https://www.danfoss.com> [Accessed 13 01 2023].
- [15] Roger W. Haines, Michael E. Myers, HVAC Systems Design Handbook, Fifth Edition, McGraw-Hill Education - Europe, 2009
- [16] Swep Available: <https://www.swep.net> [Accessed 17 02 2023].
- [17] Wieland Available: <https://www.wieland.com> [Accessed 17 02 2023].
- [18] Ramesh K. Shah, Dusan P. Sekulić, Fundamentals of Heat Exchanger Design John Wiley & Sons Inc, 2003
- [19] Ibrahim Dincer, Mehmet Kanoglu, REFRIGERATION SYSTEMS AND APPLICATIONS Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2010

- [20] Z. Bonca, D. Butrymowicz, D. Dambek, A. Depta and W. Targański, Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła: właściwości cieplne, chemiczne i eksploatacyjne, Gdańsk: IPPU MASTA, 1997.
- [21] Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Czynniki chłodnicze – Raport, Wydanie 18, 2014
- [22] Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Czynniki chłodnicze – Raport, Wydanie 21, 2020
- [23] B. ZAJĄCZKOWSKI, T. HAŁON, S. RESZEWSKI Czynniki chłodnicze – ograniczenia napełnienia i bezpieczeństwo użytkowników według dyrektywy Urządzenia ciśnieniowe, ISO 817 i PN-EN 378, Czasopismo INSTAL7/2020
- [24] PN-EN 378: Instalacje ziębnicze i pompy ciepła. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska, części od 1 do 3, 2016,
- [25] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych zmieniające dyrektywę (UE) 2019/1937 i uchylające rozporządzenie (UE) nr 517/2014
- [26] Wieland Available: <https://www.klimatyzacja.pl> [Accessed 20 04 2024].
- [27] PN-EN 378-4+A1:2019-12: Instalacje chłodnicze i pompy ciepła -- Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska -- Część 4: Obsługa, konserwacja, naprawa i odzysk, 2019,
- [28] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/68/UE, 15 maja 2014,
- [29] Program obliczeniowy Danfoss Coolstore,
- [30] ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2016/2281 z dnia 30 listopada 2016 r.
- [31] Mitsubishi Electric Available <https://www.my-ecodesign.com/> [Accessed 29 09 2024].
- [32] Available <https://www.intarcon.com/> [Accessed 29 09 2024].
- [33] Roy B.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1990.
- [34] T. Trzaskalik, "Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań," Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2014.
- [35] R. Steuer, Multiple criteria optimization and computation, Athens: Univeristy of Georgia, 2004.
- [36] T. Bernat, Badanie wybranych układów chłodniczych mebli gastronomicznych przyjaznych dla środowiska i użytkownika, Poznań, 2023 r.
- [37] T. Bernat, K. Bieńczak and K. Górny, "The methodology of multiple criteria decision making for selecting the refrigeration system of gastronomic furniture," Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, pp. 15-18, 2019.

- [38] Mirosław Kruszyński , Metodyka wielokryterialnego wspomagania decyzji w problematyce zarządzania transportem miejskim , Poznań, luty 2014
- [39] Y. Shi, S. Wang, G. Kou and J. Wallenius, New State of MCDM in the 21st Century. Selected paper of the 20th International Conference on Multiple Criteria Decision Making 2009., Berlin: Springer, 2011.
- [40] Vanderpooten D. The Use of Preference Information in Multiple Criteria Interactive Procedures. W: Locket A., Islei G.(red.): Improving Decision Making in Organizationa, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [41] Karta katalogowa Carrier 30RB-040R, <https://www.carrier.com/> [Accessed 15 10 2024].
- [42] Karta katalogowa Trane RTAD 085 HE SN, <https://trane.eu/> [Accessed 15 10 2024].
- [43] Karta katalogowa EUROKLIMAT EKS BS, <https://www.euroklimat.it/> [Accessed 15 10 2024].
- [44] Karta katalogowa EUROKLIMAT HERA 035-1-1 PE, <https://www.euroklimat.it/> [Accessed 15 10 2024].
- [45] IPCC Intergovernmental panel on climate change, Climate Change, The Physical Science Basis , 2021.
- [46] <https://www.elektronika-sa.com.pl/> [Accessed 15 10 2024].