



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav energetiky**

Analýza chladícího zařízení

The Analysis of the cooling system

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Energetika

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Petrák, CSc.

Kateřina Chalupská

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chalupská** Jméno: **Kateřina** Osobní číslo: **419994**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza chladicího zařízení

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of the cooling system

Pokyny pro vypracování:

Proměřte a vyhodnoťte chladicí zařízení distribučního nábytku s chladivem R404A a následně novým chladivem R448A. Získané hodnoty porovnejte z hlediska jak provozního, tak i vlivu na životní prostředí a plnění legislativních požadavků EU. Proveďte výběr dalších chladiv, která by v současné době mohla přicházet v úvahu pro takovéto chladicí zařízení. Popište jejich základní vlastnosti a parametry tepelného oběhu použitelného u obdobného zařízení, jaké jste měřila.

Seznam doporučené literatury:

ISO 23953-2:2015 Refrigerated display cabinets — Part 2: Classification, requirements and test conditions
EN 378-1, Refrigerating systems and heat pumps — Safety and environmental requirements — Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria
NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 517/2014 ze dne 16. dubna 2014 o fluorovaných skleníkových plynech

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

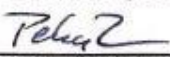
prof. Ing. Jiří Petrák, CSc., ústav energetiky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

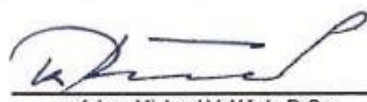
Datum zadání diplomové práce: **12.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


prof. Ing. Jiří Petrák, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

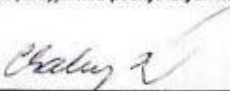

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studentky



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením prof. Ing. Jiřího Petráka, CSc., s použitím zdrojů a literatury uvedených v seznamu.

V Praze dne 5. června 2019

.....

Kateřina Chalupská



Anotační list

Jméno autora:	Bc. Kateřina Chalupská
Název DP:	Analýza chladicího zařízení
Anglický název:	The Analysis of the cooling system
Akademický rok:	2018/2019
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí DP:	prof. Ing. Jiří Petrák, CSc.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 66 Počet obrázků: 34 Počet tabulek: 20 Počet příloh: 2 Počet grafů: 12
Klíčová slova:	Chladivo, teplotní skluz, výparník, potenciál globálního oteplování, poškozování ozónové vrstvy, R404A, R448A
Keyword:	Refrigerant, temperature glide, evaporator, global warming potential, ozone depletion potential, R404A, R448A
Anotace:	Tato práce se zabývá analýzou chladicího zařízení. V důsledku stále se zpříšňujících požadavků na ekologickou nezávadnost chladiv byla na chladícím nábytku testována dvě chladiva R404A a následně R448A. Získané hodnoty byly porovnány z hlediska provozního, vlivu na životní prostředí a plnění legislativních požadavků. Pro testované zařízení je dále vytvořen model v interním programu firmy Carrier Refrigeration Operation Czech Republic s.r.o.. Výsledky z programu jsou vyhodnoceny a je navržena optimalizace výparníku.

**Abstract:**

This thesis discusses analysis of the cooling system. In the result of more stricter ecological safety requirements the two refrigerants were tested in the cooling systém, R404A and consequently R448A. The gained values were compared in terms of operating state, environmental impact and compliance with legislative requirements. The tested equipment is then medelled in the internal programm of Carrier Refrigeration Operation Czech Republic s.r.o.. The results of the programm are evaluated and optimizing of evaporator is designed.



Poděkování

Ráda bych poděkovala společnosti Carrier Refrigeration Operation Czech Republic s.r.o. za příležitost pracovat na tomto tématu diplomové práce a kolegům ze zkušebny za cenné rady. Dále mému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Jiřímu Petrákovi, CSc. za přínosné rady a v neposlední řadě svým rodičům za podporu.



Obsah

1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Chladiva	12
2.2 Vliv na životní prostředí.....	14
2.3 Klasifikace chladiv [4]	15
2.4 Skluz [5].....	16
2.5 Legislativní omezování	19
2.6 Vybraná chladiva	23
2.7 Metody změny chladiva	27
3 Praktická část	29
3.1 Schéma okruhu.....	29
3.2 Komponenty	30
3.3 Nábytek	39
3.4 Měření	40
3.5 Výpočty	41
4 Výsledky	44
4.1 Teplotní skluz.....	44
4.2 Chladicí faktor EER	44
4.3 Energetický parametr REC	47
4.4 Teplota na výtlaku.....	48
4.5 Součinitel přestupu tepla	49
4.6 Total Equivalent Warming Impact.....	54
4.7 Optimalizace výparníku	55
5 Závěr	58
Seznam použité literatury	60
Seznam obrázků	62
Seznam příloh	63



Seznam použitých symbolů a indexů

Symboly

Δ	(-)	rozdíl
a	(-)	míra asymetričnosti
h	(kJ·kg ⁻¹)	měrná entalpie
\dot{m}	(kg·h ⁻¹)	měrný hmotnostní průtok
p	(bar)	tlak
P	(W)	příkon
Q	(kJ)	teplo
R	(-)	řídící čidlo
t	(°C)	teplota
t	(h)	čas
W	(kWh)	spotřeba elektrické energie
α	(W·m ⁻² K ⁻¹)	součinitel přestupu tepla
Φ	(kW)	chladicí výkon



Dolní indexy

1	týkající se nízkotlaké strany
2	týkající se vysokotlaké strany
12	časový úsek 12 hodin
c	kondenzátor
d	rosný bod (ležící na horní mezní křivce)
deft	odtávání
DIS	na výtlaku kompresoru
e	na vstupu do výparníku
f	bod vzniku bublin (ležící na dolní mezní křivce)
IN	na vstupu
k	kondenzátor
m	střední hodnota
max	maximální hodnota
min	minimální hodnota
o	výparník
run	v době běhu kompresoru
stop	stání
SUC	na sání kompresoru
TEV	týkající se tykavky
tot	totální, celkový

Horní indexy

"	palce
*	skutečná hodnota



Seznam použitých zkratk

ASHRAE	Americká společnost inženýrů v oboru vytápění, chlazení a klimatizace (American Society of Heating, Refrigerating and AC Engineers)
CFC	chlor-fluorovaný uhlovodík
COP	topný faktor (Coefficient of Performance)
EER	chladičí faktor (Energy Efficiency Ratio)
ekv	ekvivalentní
F-plyny	plyny obsahující flor
GWP	potenciál globálního oteplování (Global Warming Potential)
HC	uhlovodík
HCFC	hydro-chlorofluoruhlovodík
HFC	fluoruhlovodík
HFO	hydrofluoro-olefin
IEC	mezinárodní elektrotechnická komise (International Electrotechnical Commission)
M-balíčky	měřicí balíček
NTC	termistor s negativním teplotním koeficientem
ODP	potenciál poškozování ozónové vrstvy (Ozone Depletion Potential)
REC	spotřeba elektrické energie pro tvorbu chladu (Refrigeration electrical energy consumption)
TEV	termostatický expanzní ventil
TEWI	celkový ekvivalentní potenciál globálního oteplování (Total Equivalent Warming Impact)



1 Úvod

Ve své diplomové práci se zabývám analýzou chladicího zařízení. Téma bylo zadáno společností Carrier Refrigeration Operation Czech Republic s.r.o.. Ve firmě byla k dispozici zkušební laboratoř, kde se odehrávalo testování. Společnost Carrier žádá označit tuto práci za neveřejnou.

V teoretické části se zabývám chladiv, jejich rozdělením, složením, značením, vlastnostmi, mezi které patří problematika teplotního skluzu. Dále v souvislosti s ovlivňováním životního prostředí při používání chladiv se věnuji legislativě vycházející z požadavků EU. Jsou uvedeny již platné mezinárodní dohody a dále nařízení upravující budoucí vývoj a záměr, kam je snaha směřovat v oblasti chladicí a klimatizační techniky. Následuje úzký výběr z běžně používaných chladiv a porovnání jejich vlastností. Blíže jsou představeny chladiva R404A a R448A, se kterými probíhalo následné testování. Na závěr jsou popsány metody záměny chladiva v chladicím systému.

Praktická část popisuje schéma a jednotlivé komponenty zapojené do okruhu a samotný chladicí nábytek použitý pro testování. Dále je uveden postup a podmínky měření. Testování bylo provedeno pro tři různé kondenzační teploty a tři různé vypařovací teploty, to vše pro dvě různá chladiva. Následují výpočty a vyhodnocení dat, pro které byl použit software Refrigerant, Coil PC for Simtools 6.33 a TSO.net. Porovnávám vlastnosti daných chladiv R404A a R448A a vliv změny chladiva na chladicí výkon, chladicí faktor, spotřebu elektrické energie, součinitel přestupu tepla, energetický parametr TEWI aj. Na závěr byla diskutována optimalizace výparníku se snahou snížit investiční náklady za materiál. Výsledky jsou zhodnoceny v závěru.



2 Teoretická část

2.1 Chladiva

Chladivo je pracovní teplotonosná látka, která cirkuluje v tepelném oběhu a prochází řadou termodynamických změn, při nichž mění své skupenství. Změna z plynného na kapalné je uskutečněna v kondenzátoru, kde předává své teplo ohřívané látce a přechod zpět z kapalného na plynné skupenství probíhá ve výparníku, kde teplo přijímá z ochlazované látky. Chladiva mohou být dělena dle nejrůznějších kritérií. [1]

2.1.1 Rozdělení chladiv

- Podle chemického složení [1,2]
 - a) Halogenované uhlovodíky
 - CFC - chlor-fluorované uhlovodíky jsou plně halogenované uhlovodíky, též nazývány tvrdými freony. Atomy vodíku jsou zde nahrazeny atomy chloru a fluoru. S počátkem 90. let byly zakázány kvůli jejich škodlivému vlivu na životní prostředí, neboť látky s obsahem chloru, unikající do ovzduší, výrazně poškozují ozónovou vrstvu.
 - HCFC - hydrochlorofluoruhlovodíky jsou částečně halogenované uhlovodíky neboli měkké freony. Tyto látky ve své molekule obsahují atomy C, H, F i Cl. Obsahují méně chlórů, a tak i hodnota jejich ODP je menší.
 - HFC - fluoruhlovodíky jsou látky, které neobsahují žádný chlor a nepředstavují tak nebezpečí pro ozónovou vrstvu (ODP=0). Avšak jejich dopad na globální oteplování je velký (GWP velké).
 - HFO - hydrofluoro-olefiny jsou látky na bázi alkenů, což jsou nenasycené uhlovodíky s alespoň jednou dvojnou vazbou. Charakteristické pro ně je nulové ODP a velmi nízké GWP.
 - b) Uhlovodíky
 - HC - uhlovodíky neobsahují žádné halové prvky, ale jsou opět omezeným řešením pro otázku životního prostředí. Jsou neškodné pro ozónovou vrstvu a nemají téměř žádný podíl na zvyšování skleníkového efektu, ale jsou extrémně hořlavé. Jejich používání je vymezeno normou a přesto že byly v mnoha zemích zakázány, v Evropě je jejich použití povoleno.



c) Přírodní látky

- Do této skupiny spadají látky, které se volně vyskytují v přírodě, hlavně voda, čpavek, oxid uhličitý.

- Podle nebezpečnosti [3]

Tuto klasifikaci zaštiťuje norma ISO 817 (ASHRAE 34), která poskytuje systém označení jednotlivých chladiv podle jejich toxicity a hořlavosti. Viz tabulka.

Tabulka 1 Rozdělení chladiv podle nebezpečnosti [3]

	Rychlost hoření	Nízká toxicita	Vysoká toxicita
Nehořlavé		A1	B1
Málo hořlavé	< 10 cm/s	A2L	B2L
Hořlavé	≥ 10 cm/s	A2	B2
Vysoce hořlavé		A3	B3

- Podle působení na životní prostředí [1]

- a) Silně narušující ozonovou vrstvu Země a způsobující globální oteplování

Do této skupiny patří především plně halogenované uhlovodíky, které obsahují jeden nebo více atomů chlóru, popřípadě atom brómu, které velmi poškozují ozonovou vrstvu. Nová zařízení tyto látky nesmí používat, ale náplně některých starých zařízení je stále mohou obsahovat.

- b) Mírně narušující ozonovou vrstvu Země a způsobující globální oteplování

Těmito vlastnostmi se vyznačují zejména částečně halogenované uhlovodíky.

- c) Způsobující globální oteplování s GWP > 150

Jedná se hlavně o halogenované uhlovodíky obsahující fluor. Protože neobsahují chlor, nenarušují tak ozonovou vrstvu, ale obsah fluoru způsobuje velký podíl na globálním oteplování.

- d) Způsobující globální oteplování s GWP < 150

Tyto látky jsou propagovány kvůli jejich nízkému potenciálu globálního oteplování, a to i přesto, že většina z nich je hořlavá.



e) Bez negativních vlivů na životní prostředí

Tyto vlastnosti vykazují pouze čpavek, voda a vzduch.

2.2 Vliv na životní prostředí

Při provozování zařízení pracujících s chladivý je stále kladen větší důraz na jejich ekologičnost. Počátkem 80. let se začalo více upozorňovat na jejich negativní vlivy na životní prostředí. Byly zavedeny tři parametry hodnotící chladiva z ekologického hlediska. [1]

2.2.1 ODP – Ozone Depletion Potential

Potenciál poškození ozonové vrstvy je relativní číslo, udávající míru degradace hladiny ozonu stejným množstvím zkoumaného chladiva vzhledem k referenčnímu chladivu R11. Tento plně halogenovaný uhlovodík má stanovenou hodnotu ODP=1 a jeho použití je současně zakázáno. Mezi přední opatření patří kontroly těsností. [2]

2.2.2 GWP – Global Warming Potential

Hodnota GWP udává možný vliv skleníkového plynu na zvyšování teploty klimatu (neboli globální oteplování), a to v porovnání s účinkem čistého oxidu uhličitého. Hodnota GWP vyjadřuje, kolikrát více dané chladivo přispívá ke skleníkovému efektu než CO₂ při časovém horizontu 100 let. Velikost závisí na radiačních vlastnostech i na jeho životnosti v atmosféře. [2]

$$GWP_X = \frac{\int_0^{TH} a_x[x(t)]}{\int_0^{TH} a_r[r(t)]} \quad (1)$$

TH - délka počítaného časového intervalu [s];

a_x - radiační účinnost látky x [$W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$];

a_r - radiační účinnost referenční látky (CO₂) [$W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$];

x(t) - časově závislý rozklad počítané látky [-];

r(t) - časově závislý rozklad referenční látky [-].

2.2.3 TEWI – Total Equivalent Warming Impact

Ukazatel TEWI vyplývá z přesvědčení, že nelze posuzovat energetické a ekologické vlastnosti chladiv odděleně, neboť chladivo s nízkým GWP, ale menším EER může mít v důsledku horší dopad na životní prostředí, kvůli nutnosti větší spotřeby energie. Vyjadřuje souhrnnou ekvivalentní produkci oxidu uhličitého během životnosti



zařízení. Zohledňuje přímé i nepřímé vlivy. Přímé vlivy jsou dány vlastnostmi konkrétního chladiva, a jeho množstvím uniklého do atmosféry. Pro nepřímé vlivy hraje klíčovou roli množství pohonné energie (nejčastěji elektrické) potřebné k provozu chladicího zařízení, což závisí na místě instalace, na zdroji energie pro provoz zařízení a mění se tak stát od státu. [1]

$$TEWI = \text{přímý vliv} + \text{nepřímý vliv} \quad [kg \text{ CO}_2] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{přímý vliv} = & GWP \text{ chladiva} * \text{únik chladiva} \left(\frac{kg}{rok} \right) * \text{životnost zařízení (rok)} + GWP \text{ chladiva} \\ & * \text{náplň chladiva (kg)} * (1 - \text{faktor recyklace}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{nepřímý vliv} = & \text{životnost zařízení (rok)} * \text{roční spotřeba energie} \left(\frac{kWh}{rok} \right) \\ & * \text{měrná emise CO}_2 \text{ při výrobě pohonné energie (kgCO}_2 \cdot kWh^{-1}) \end{aligned}$$

2.3 Klasifikace chladiv [4]

Každé chladivo je označeno identifikačním číslem, které se skládá z písmenné předpony a číselné přípony.

Předpona je vyjádřena písmenem R, z anglického názvu Refrigerant. Někdy se jako předpony používají písmena prvků, které jsou přítomny v chladivu, např. HCFC22, HFC134a. Tyto předpony ale nesmí být použity v oficiálních technických dokumentech.

Přípony pro čisté uhlovodíky a jejich halogenované deriváty se skládají ze tří čísel. První číslice za písmenem R (řády stovek) označuje počet atomů uhlíků mínus jeden, druhé číslo (desítky) vyjadřují počet atomů vodíku plus jeden a poslední číslo (jednotky) je počet atomů fluoru. Pokud je přípona čtyřmístné číslo, značí to nenasycené uhlovodíky. Počet atomů chloru může být stanoven odečtením všech atomů H a F navázaných na čtyřvázný uhlík. Pro cyklické deriváty se přidává písmeno C za písmeno R.

Příklad:

R290 – propan (C_3H_8)

$$2 = C - 1$$

$$9 = H + 1$$

$$0 = F$$



Přípona u vícesložkových chladiv je přidělena americkou asociací ASHRAE. Chladiva tvořená ze směsí se rozdělují na azeotropní a zeotropní.

Zeotropní chladiva jsou směsí více látek. Charakteristické pro ně je, že se stále chovají jako směs samostatných látek a ty mohou být jednoduchým technickým procesem rozděleny. Při vypařování se nejdříve vypaří látky, které jsou nejvíce těžké až po složky s nejvyšší vypařovací teplotou. Tento rozptyl se nazývá teplotní skluz. Zeotropní chladiva jsou označovány řadou R4xx.

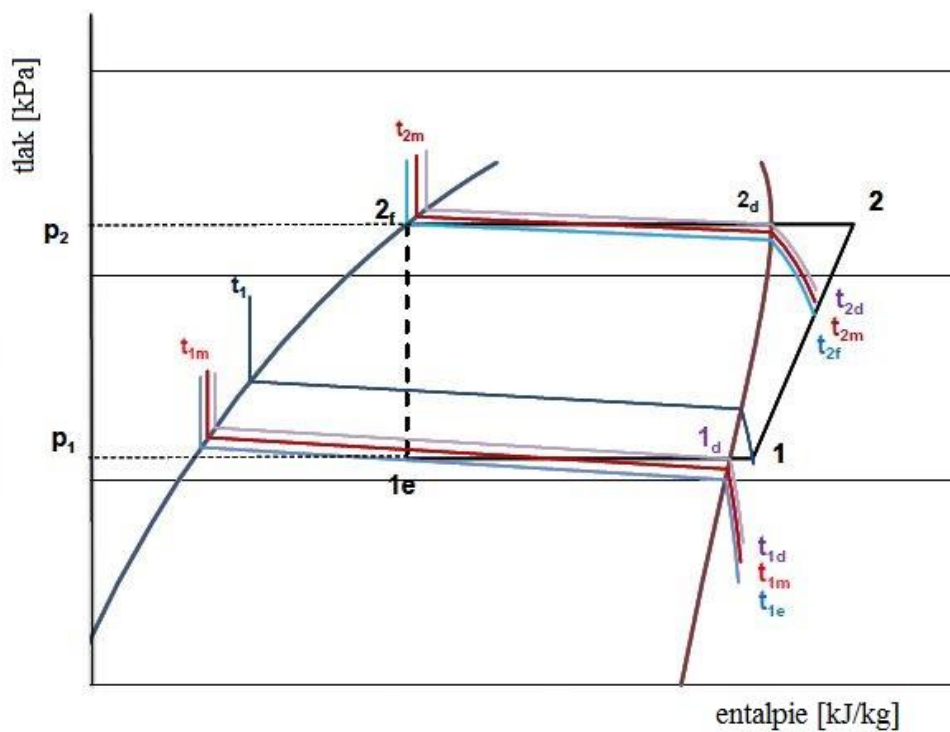
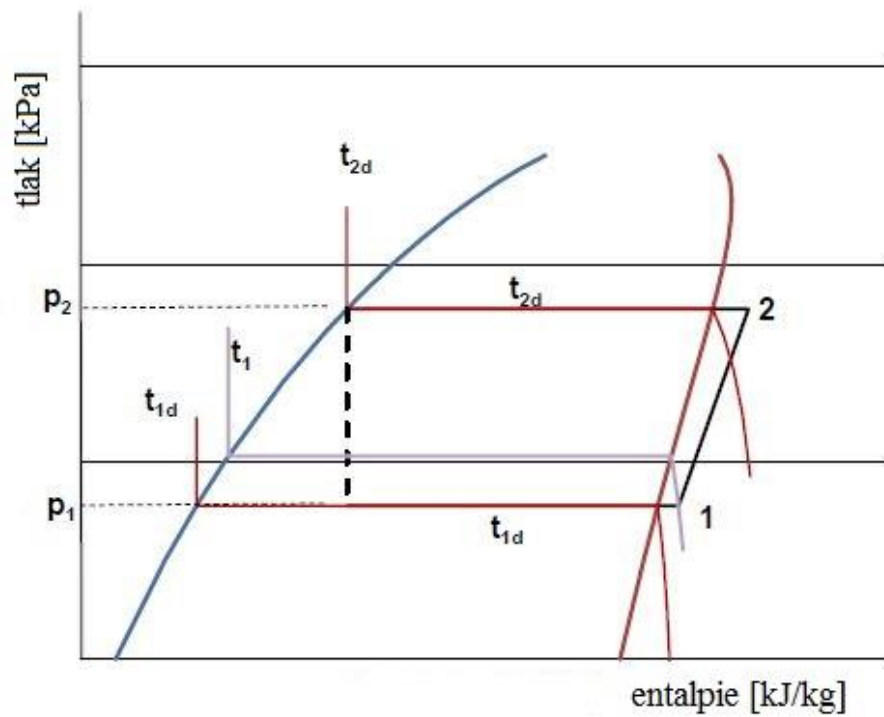
Azeotropní směs se chová jako jediná látka a má konstantní teplotu vypařování při určitém tlaku, tzn. nemají teplotní skluz. Označují se řadou R5xx.

Ostatní přírodní anorganické sloučeniny sloužící jako chladiva jsou značeny řadou R7xx, kde za číslem 7 následuje jejich molární hmotnost. Různé další organické sloučeniny se označují řadou R6xx.

Za číselnou příponou může někdy následovat ještě písmeno. Malé písmeno a, b, c, vyjadřuje určité prostorové uspořádání neboli míru asymetričnosti. Velké písmeno se vyskytuje za vzorcem směsi a udává určité poměry jednotlivých složek ve směsi.

2.4 Skluz [5]

Zatímco azeotropní směsi se vypařují i kondenzují za určitého konstantního tlaku a teploty, zeotropní směsi se vyznačují podstatně proměnlivou teplotou během změny skupenství, tzv. teplotním skluzem. Samotné složení směsi v plynné a kapalné fázi je variabilní. První graf na obrázku 2-1 znázorňuje chování azeotropní směsi. Druhý p-h diagram popisuje zeotropní látky. Kondenzační a vypařovací tlaky považujeme za konstantní během fázové změny. Teplota, při níž začíná kondenzace, se nazývá dew point neboli rosný bod ležící na horní mezní křivce, zde bod t_{2d} . Během kondenzace teplota padá až na bod t_{2f} , bubble point neboli bod vzniku prvních bublin ležící na dolní mezní křivce. Při vypařování se teplota mění od vstupní hodnoty na výparníku t_{1e} do rosného bodu t_{1d} . Po dokončení vypařování je zde naznačeno přehřátí chladiva na hodnotu t_1 , což je vstupní teplota chladiva do sání kompresoru.



Obrázek 2-1 Graf závislosti tlaku na entalpii pro azeotropní chladiva (nahore),
Graf závislosti tlaku na entalpii pro zeotropní chladiva (dole) [5]



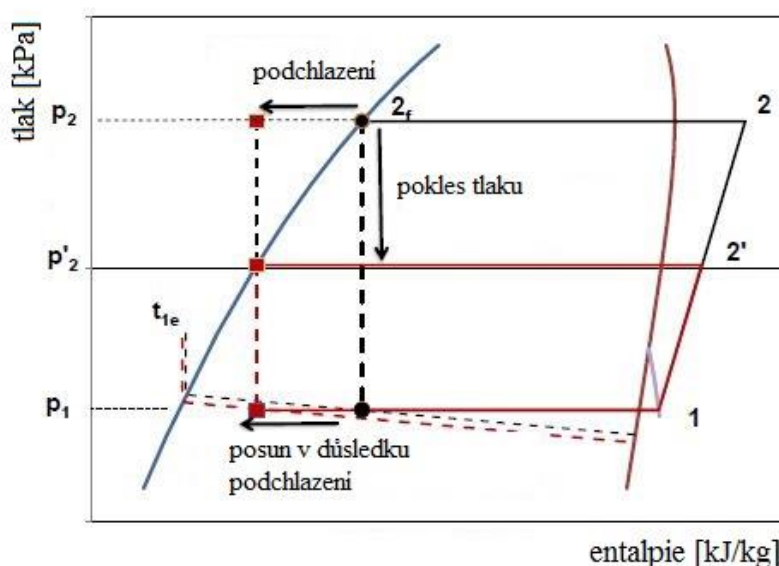
Při navrhování chladicího okruhu pracujícího se zeotropním chladivem je nutné zvolit konkrétní jednu hodnotu t_o a t_k . Různé teorie preferují různé teploty.

- Dew point – teplota rosného bodu

Vypařovací a kondenzační teplota jsou definovány jako teploty rosných bodů t_{1d} a t_{2d} . Přehřátí je stanoveno rozdílem mezi teplotou na sání kompresoru a teplotou vypařovací.

- Průměrná teplota

Kondenzační teplota je stanovena jako aritmetický průměr z teploty rosného bodu a bodu vzniku bublin, tedy t_{2d} a t_{2f} . Obdobně je určena vypařovací teplota, jako aritmetický průměr z t_{1e} a t_{1d} . Protože jsou teploty t_{2d} a t_{2f} při kondenzaci dány konkrétním tlakem na výtlaku z kompresoru, průměrná teplota kondenzace je závislá pouze na tlaku. Teplota na vstupu do výparníku, a současně i průměrná vypařovací teplota, jsou závislé na kondenzačním tlaku a na velikosti podchlazení chladiva, jak ukazuje následující graf. Vypařovací teplota tudíž nezávisí už pouze na vypařovacím tlaku, ale je funkcí kondenzačního tlaku p_2 , vypařovacího tlaku p_1 a velikosti podchlazení, $t_{1e} = fce(p_1, p_2, \text{podchlazení})$.



Obrázek 2-2 Graf závislosti tlaku na entalpii a daném podchlazení pro zeotropní chladiva [5]

Je doporučováno použít variantu s průměrnými hodnotami teplot t_{1m} a t_{2m} , neboť střední hodnoty udávají lépe skutečnou teplotu výměníku. Vzorce pro stanovení teplot:



$$t_{2m} = \frac{t_{2f} + t_{2d}}{2} \quad (3)$$

$$t_{1m} = \frac{t_{1e} + t_{1d}}{2} \quad (4)$$

2.5 Legislativní omezování

Mezi důležité cíle Evropské Unie patří snížení produkce emisí CO₂. Jedním z mnoha regulovaných sektorů je i obor chladiv. Snahou EU je snížit tyto emise o 20% od referenčního roku 1990 do roku 2020. Mezinárodní dohody a nařízení Evropského parlamentu a Rady upravují používání chladiv. [2]

Vídeňská úmluva na ochranu ozonové vrstvy z roku 1985 byla ujednána se záměrem ochraňovat lidské zdraví a životní prostředí kvůli negativním vlivům, které mění ozonovou vrstvu, způsobených lidským faktorem. Jedná se spíše o spolupráci smluvních stran při pozorování, výzkumu a výměny informací. K plnění stanovených cílů se strany zavazují až v prováděcím Montrealském protokole. [7]

Montrealský protokol o látkách, které porušují ozónovou vrstvu z roku 1987, stanovuje postupné omezování výroby a spotřeby těchto látek, zejména tvrdých freonů (CFC) a halonů (obsahují kromě F a Cl také B). Umožňuje státům zavést taková opatření, která sníží negativní efekty, způsobené regulací, do ekonomiky státu. Byl tak adekvátně přijat a zrealizován přechod na chladiva s nulovým ODP. Následovaly zpřísnující dodatky. [2]

Kodaňský dodatek z roku 1992 zakazuje úplnou výrobu a použití halonů do roku 1994, tvrdých freonů do 1996 a u vyspělých zemí pozvolné omezování látek tzv. měkkých freonů s úplným zákazem po roce 2030. [2]

Montrealský protokol se stal velmi populárním, podepsalo ho už 197 zemí a díky jeho úspěchu je stále doplňován o dodatky.

Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách z roku 1997 nabyl platnosti až roku 2005, neboť se dlouho čekalo na splnění dvou podmínek. První podmínka požadovala přijetí minimálně 55 států. Druhá podmínka uvádí, že protokol musí podepsat tolik států, aby celkový součet jejich účasti na emisích byl nejméně 55%. Jelikož USA, jejichž podíl činil asi 36%, odmítlo ratifikovat Protokol, čekalo se dlouho



na vyjádření Ruska, které nakonec přijalo Protokol. Prvním cílem bylo stanoveno snížení emisí skleníkových plynů o 5,2%. Redukce se týká průměrných emisí šesti plynů za první kontrolní období 2008-2012 v jednotkách uhlíkového ekvivalentu. Patří sem oxid uhličitý, metan, oxid dusný, hydrogenované fluorovodíky, polyfluorovodíky a fluorid sírový. Současně se používá vztah pro přepočet: [2,6]

$$1\text{t NO}_2 = 310\text{ t CO}_2\text{ekv}$$

$$1\text{t CH}_4 = 21\text{ t CO}_2\text{ekv}$$

Ostatní plyny mají sice závažnější účinky na skleníkový efekt, ale CO₂ zůstává nejdůležitějším, protože je vypouštěn v daleko větším množství.

Protokol umožňuje diferencování snížení emisí na základě jednání mezi jednotlivými zeměmi a to tak, že některé země sníží emise např. o 8-7%, jiné země mohou jen stabilizovat své emise na hodnotě z roku 1990 a jiné země mohou dokonce zvýšit své emise. [6]

Nařízení Evropského parlamentu a Rady č.517/2014 o fluorovaných skleníkových plynech orientuje svou pozornost na HFC chladiva, které mají přímý vliv na globální oteplení Země. Toto nařízení navazuje a ruší nařízení (ES) č. 842/2006. Zavádí změny z hlediska omezování úniků, znovuzískávání, ukončování používání a zákazů. Nařízení se vztahuje na: [8,18]

- Stacionární chladicí zařízení – chladicí i mrazicí zařízení pro domácnost i komerční a průmyslové využití
- Mobilní chladicí zařízení – chladírenská vozidla – dodávky, nákladní vozidla, přívěsy, lodě apod.
- Stacionární klimatizační zařízení a tepelná čerpadla – z oblasti bydlení, obchodu, veřejného sektoru i průmyslu
- Mobilní klimatizační zařízení – v automobilech, lehčích dodávkách, větších silničních vozidlech, vlacích, lodích, letadlech.

Méně přísná nařízení platí pro hermeticky uzavřené systémy, což jsou systémy továrně pevně smontované a nerozebíratelné. Patří sem většina zařízení, které jsou



napájeny z elektrické zásuvky, tj. domácí chladničky a mrazničky, samostatná chladicí zařízení pro supermarkety, přenosné domácí klimatizační jednotky. [8]

Dále je v nařízení konzultována náplň systému, která je vyjádřena v ekvivalentech CO₂. Provozovatel musí znát GWP dané látky a množství v kg, pak je schopen přepočítat velikost náplně na kg ekvivalentního CO₂. Na množství náplně dále závisí povinnost zavádění systémů pro detekci úniků, a kontroly těsností. Pro všechny aplikace s náplní nad 500 t ekv. CO₂ je nezbytné disponovat vybavením na detekci úniků. Povinnost pravidelných kontrol se nevztahuje na zařízení s náplní menší než 5 t ekv. CO₂ (nebo pro hermeticky uzavřená zařízení s náplní menší než 10 t ekv. CO₂). Pravidelné kontroly musí být prováděny dle následující tabulky. [8]

Tabulka 2 Pravidelné kontroly podle množství náplně chladiva [8]

Kategorie vybavení	Stacionární chladicí a klimatizační zařízení			Mobilní chladicí zařízení
	≥ 5t < 50t ekvCO ₂	< 500 t ekvCO ₂	≥500 t ekvCO ₂	≥ 5 t ekvCO ₂
Bez správně fungujícího vhodného systému detekce úniků	12 měsíců	6	3	12
Se správně fungujícím vhodným systémem detekce úniků	24	12	6	24

Osoby nebo podniky vykonávající instalaci, údržbu, opravy, kontroly musí být náležitě proškoleny a certifikovány. Dále jsou povinni zamezovat únikům a opravovat poškozená místa okamžitě po zaznamenání úniku. [8]

Provozovatel je povinen znovuzískat a recyklovat F-plyny z oběhů pro jejich další regeneraci, nebo zneškodnění. Po dobu 5 let je nutné vést záznamy o zařízení, pokud je jeho náplň 5 t ekv. CO₂ a více. Pokud je systém hermeticky uzavřen, záznamy se vedou jen pro náplně větší než 10 t ekv. CO₂. Neplatí pro mobilní klimatizační zařízení a pro chladírenská vozidla jiná než nákladní a přívěsy. Kromě kontroly náplně na 5, 50 a 500t ekv. CO₂ se uvádí ještě další důležitá hranice 40t ekv. CO₂. Stanovuje hranici, kdy nebude možné použít fluorované plyny s GWP ≥ 2500 ani při servisu nebo



údržbě. Označení zařízení, a to že obsahuje F-plyny, musí být uvedeno na štítku. Kromě typu plynu zde musí být od 1. ledna 2017 také informace o množství náplně v ekvivalentech CO₂ a GWP. Stanovení velikosti náplně podle určeného GWP a dané mezní hodnoty v t ekv. CO₂ se určí následovně: [8]

$$\frac{\text{mezní hodnota v tunách ekvivalentu CO}_2}{\text{GWP chladiva}} = \text{kg náplně chladiva}$$

Tabulka 3 Množství náplně v ekvivalentech CO₂ pro vybraná chladiva

chladivo	GWP	40 t ekv.CO ₂
	[-]	[kg]
R134a	1430	28
R290	3	13333
R404A	3922	10
R407F	1825	22
R410A	2088	19
R448A	1386	29
R449A	1397	29
R744	1	40000

Nařízení zadává pozvolné upouštění od užívání HFC chladiv. V období 2015-2030 se mají tato chladiva z trhu stáhnout o 79%. Jejich prodej tímto není zakázán, ale protože se zpřísní limity CO₂ ekvivalentů, nebude už jejich použití žádoucí, hlavně u chladiv s vysokým GWP. Očekává se nárůst jejich cen, což musí uživatelé brát v potaz.[8]



Od určitých termínů bude zavádění některých fluorovaných chladiv na trh zakázáno. Následující obrázek uvádí přehled nových zákazů.

Popis zakazu		Datum zakazu
Chladicí a mrazicí zařízení pro domácnost, která obsahují HFC s GWP 150 nebo vyšším		1. ledna 2015
Chladicí a mrazicí zařízení pro komerční použití (hermeticky uzavřené systémy)	obsahující HFC s GWP 2 500 nebo vyšším	1. ledna 2020
	obsahující HFC s GWP 150 nebo vyšším	1. ledna 2022
Stacionární chladicí zařízení, která obsahují nebo fungují na fluorované skleníkové plyny s GWP 2 500 nebo vyšším, s výjimkou zařízení určených pro aplikace navržené k chlazení výrobků na teploty nižší než $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$		1. ledna 2020
Sdružené centrální chladicí systémy pro komerční použití o jmenovitém výkonu 40 kW nebo vyšším, které obsahují nebo fungují na fluorované skleníkové plyny s GWP 150 nebo vyšším, s výjimkou primárního chladicího okruhu kaskádových systémů, kde lze použít fluorované skleníkové plyny s GWP nižším než 1 500		1. ledna 2022
Přenosná pokojová klimatizační zařízení (hermeticky uzavřené systémy, které koncový uživatel může přemísťovat z místnosti do místnosti), která obsahují HFC s GWP 150 nebo vyšším		1. ledna 2020
Dělené klimatizační systémy s jednou vnitřní jednotkou s obsahem méně než 3 kg fluorovaných skleníkových plynů, které obsahují nebo fungují na fluorované skleníkové plyny s GWP 750 nebo vyšším		1. ledna 2025

Obrázek 2-3 Tabulka zákazů podle Nařízení Evropského parlamentu a Rady č.517/2014 [8]

Zákazy slouží jako doporučení, kam se dál v oblasti chladiv posouvat, také k podpoře vývoje dalších alternativních chladiv, které by neměly potenciál ohrožovat životní prostředí. V oblasti nových osobních automobilů a lehkých nákladních vozidel se od roku 2017 zavádí chladiva s $\text{GWP} < 150$.

Pro fluorované plyny s $\text{GWP} < 2500$ není stanoveno žádné omezení použití při servisu či údržbě.

Nově vyrobené F-plyny s $\text{GWP} \geq 2500$ budou od roku 2020 zakázány i při servisu a údržbě. To se vztahuje na aplikace s náplní 40 t ekv. CO_2 a více. Výjimku tvoří zařízení příslušná k chlazení výrobků za teplot nižších než -50°C . Co se ale týče regenerovaných a recyklovaných F-plynů s $\text{GWP} \geq 2500$, ty jsou povoleny při servisu a údržbě až do roku 2030. [8,18]

2.6 Vybraná chladiva

V následující kapitole jsou blíže představena některá chladiva. Jedná se o běžná a nejrozšířenější chladiva, která používá firma Carrier Refrigeration Operation v chladicích a mrazicích aplikacích. Z přírodních látek je zástupcem oxid uhličitý R744,



z uhlovodíků pak propan R290. Zbytek tvoří halogenované uhlovodíky, většinou zeotropní směsi.

Tabulka 4 Vlastnosti vybraných chladiv [16]

chladio	skluz ΔT [K]	třída nebezpečnosti	ODP	GWP	hořlavost	toxicita
R134a	0	A1	0	1430	ne	ne
R290	0	A3	0	3	ano	ne
R404A	0.54	A1	0	3922	ne	ne
R407F	5.73	A1	0	1825	ne	ne
R410A	0.10	A1	0	2088	ne	ne
R448A	5.73	A1	0	1386	ne	ne
R449A	3.93	A1	0	1397	ne	ne
R744	0	A1	0	1	ne	ne

Z tabulky je patrné, že z hlediska ekologického, podle ukazatele GWP, je nejlepší variantou např. oxid uhličitý R744 nebo propan R290. Oxid uhličitý je nehořlavý a netoxický. Problém je, že s jeho použitím se dosáhne nadkritických parametrů a vysokých tlaků. Jeho provozování vyžaduje speciální, složité konstrukce chladících okruhů. Propan spadá do třídy A3, je velmi hořlavý a výbušný, a tak množství jeho náplně je limitováno normou IEC 60335-2-89:2010, která specifikuje bezpečnostní požadavky pro elektricky řízené komerční chladicí aplikace. Chladiva spadající do skupiny A3 mají omezené množství náplně na 150g. Velké chladicí jednotky na propan jsou konstruovány často složitě s několika menšími chladicími okruhy, z nichž každý má povolené množství náplně jen 150g. Současně, 12. dubna 2019, proběhlo hlasování Mezinárodní elektrotechnické komise (IEC), které završilo pětiletý proces snahy o zvýšení povoleného množství náplně chladiv skupiny A3 ze 150g na 500g. Návrh byl nakonec přijat, a tak pro propan a další hořlavé uhlovodíky skupiny A3 bude platit povolené množství náplně 500g. [9]

Současně jedním z nejpoužívanějších chladiv je R404A.



2.6.1 R404A

Toto chladivo patří do skupiny halogenovaných uhlovodíků. Je zeotropní směsí tří chladiv 44% R125, 52% R143a a 4% R134a. Při atmosférickém tlaku má teplotu varu $-46,6^{\circ}\text{C}$ (bod na dolní mezní křivce), kritickou teplotu $72,1^{\circ}\text{C}$, kritický tlak $3,74\text{ MPa}$ a molární hmotnost $97,6\text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$. Z hlediska bezpečnosti se řadí do třídy A1, což vyjadřuje, že je nehořlavé a netoxické. Neobsahuje chlor, a tak nevykazuje žádné známky poškozování ozonové vrstvy, $\text{ODP}=0$. Avšak ukazatel GWP dosahuje hodnoty 3922. S novým zákazem od 1. ledna 2020 nebude možné uvádět na trh nová zařízení s chladivy s $\text{GWP} \geq 2500$, a tak pro chladivo R404A je potřeba najít vhodnou alternativu. [10]

2.6.2 R448A

Nové chladivo uvedené na trh v důsledku nařízení 517/2014 o F-plynech, od firmy Honeywell nese obchodní název Solstice N40. Řadí se do skupin na pomezí fluorovaných uhlovodíků (HFC), a fluorovaných olefinů (HFO), které se svou pozměněnou molekulární strukturou vyznačují hlavně krátkou životností v atmosféře. Zamýšlené použití je jako náhrada za chladivo R404A v oblasti komerčního chlazení. Chladivo je zeotropní směsí chladiv 26% R32, 26% R125, 20% R1234yf, 7% R1234ze a 21% R134a. Není hořlavé ani výbušné, řadí se do kategorie A1 a je bezbarvé. Kritická teplota je $83,7^{\circ}\text{C}$, kritický tlak $4,6\text{ MPa}$. Při atmosférickém tlaku je teplota varu $-45,9^{\circ}\text{C}$, molární hmotnost $86,3\text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$. Příznivé jsou nízké hodnoty $\text{ODP}=0$ a $\text{GWP}=1386$. Oproti chladivu R404A má značný teplotní skluz. Podle stávající legislativy bude možné používat recyklované nebo regenerované R448A až do roku 2030. [11]

Dnes je trh s chladivy velmi rozmanitý a výrobci stále představují nová chladiva. Snahou výrobců je plnit současné legislativní požadavky, hlavně z hlediska ekologického, které se ale stále zpřísňují. Z pohledu ekologického by na první pohled přicházely v úvahu chladiva s nulovým ODP a velmi nízkým GWP, např. R515B, R445A.

2.6.3 R515B

Chladivo R515B od firmy Honeywell je azeotropní směsí dvou chladiv, 91,1% R1234ze a 8,9% R227ea. Patří do skupiny A1 a GWP je 387. Je to chladivo pro



nízkotlaké aplikace, neboť pracuje při tlaku nižším než je atmosférický tlak, přibližně pod -18°C na sání. [16]

2.6.4 R445A

Chladivo R445A od firmy Mexichem je zeotropní směsí chladiv 6% CO_2 , 9% R134a, 85% R1234ze(E). Kritická teplota je $104,7^{\circ}\text{C}$ a kritický tlak 4,5 MPa. GWP má velmi nízkou hodnotu 142, a tak by bylo vhodným kandidátem i pro budoucí zákaz od roku 2022. Jeho hlavní nevýhodou ale je, že patří do skupiny A2L, což znamená, že je hořlavé a u zákazníků tak ztrácí na atraktivitě. Dále pak jeho velký teplotní skluz, který dosahuje na vysokotlaké straně $18,3^{\circ}\text{C}$ a na nízkotlaké straně 25°C a žádá si tak speciální konstrukční řešení. [16]

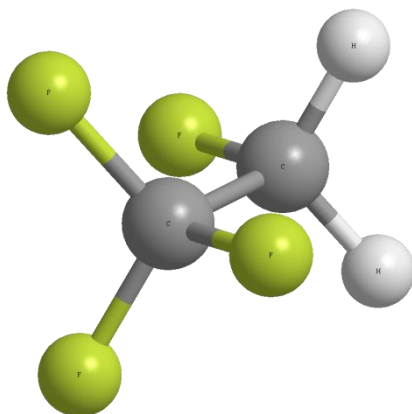
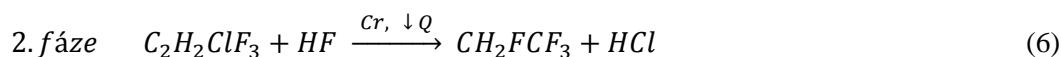
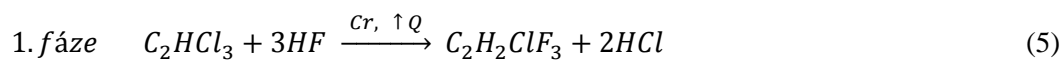
2.6.5 Složení vybraných chladiv

Mezi vybranými chladivy je několik zástupců, jejichž složení vzniklo přesným smíšením několika jiných chladiv. Stejně jako oxid uhličitý a propan, které nejsou složeny ze směsí, je chladivo R134a tvořeno molekulou 1,1,1,2-tetrafluorethan. Následující tabulka popisuje složení vybraných chladiv. [16]

Tabulka 5 Složení vybraných chladiv [16]

	R134a	R290	R744	R404A	R407F	R410A	R448A	R449A
molekula	1,1,1,2-tetrafluorethan	C_3H_8	CO_2	%	%	%	%	%
R134a				4	40	-	20	25.7
R125				44	30	50	26	24.7
R143a				52	-	-	-	-
R32				-	30	50	26	24.3
R1234yf				-	-	-	21	25.3
R1234ze(E)				-	-	-	7	-

Chladivo R134a je hojně využíváno také jako jedna ze složek tvořící směsi chladiv. Je vyráběno z trichloretylenu (TCE) a kyseliny fluorovodíkové (HF). V první fázi dochází k reakci TCE s HF a produktem je R133a a kyselina chlorovodíková. Je to exotermická reakce probíhající za vysoké teploty a tlaku a za přítomnosti katalyzátoru na bázi chromu. Kyselina chlorovodíková je dále odstraněna destilací. Ve druhé fázi reaguje R133a s přídatným HF za vzniku R134a a HCl. Tato endotermická reakce opět probíhá za vysokého tlaku a teploty a působení chromu jako katalyzátoru. Rovnice popisující výrobu R134a: [12]



Obrázek 2-4 3D model molekuly 1,1,1,2-tetrafluoretan

2.7 Metody změny chladiva

Termíny Retrofit a Drop-In označují metody k přeměně stávajícího chladicího zařízení pracujícího s CFC chladivem na zařízení s novějšími ekologičtějšími chladivem. Hlavní výhodou je možnost výměny pouze pár dílčích komponent, ale celkový původní chladicí okruh může zůstat zachován. [13]

2.7.1 Retrofit

Význam slova retrofit lze popsat jako výměna stávající funkční technologie za modernější, novější, účinnější. V oblasti chladicí techniky je tato metoda hojně využívána. Podstatou je, že se provádí výměna chladiva za nové, ekologičtější, které lépe plní požadavky aktuální legislativy, a spolu s chladivem se mění navíc také olej, filtrdehydrátor, popř. tryska expanzního ventilu. Není tak potřeba instalace nového chladicího systému. V některých případech se jedná o velmi jednoduchý proces s minimálními změnami v chladicím okruhu. Mezi nejčastější problémy patří rozdílný chladicí výkon, vyšší teplota par na výtlaku, nekompatibilita těsnění nebo jiný teplotní skluz chladiv. Podle této metody se v této diplomové práci postupovalo, při testování chladicího zařízení se dvěma různými chladivem. Výměna proběhla mezi chladivem R404A za R448A. [13]



2.7.2 Drop-In

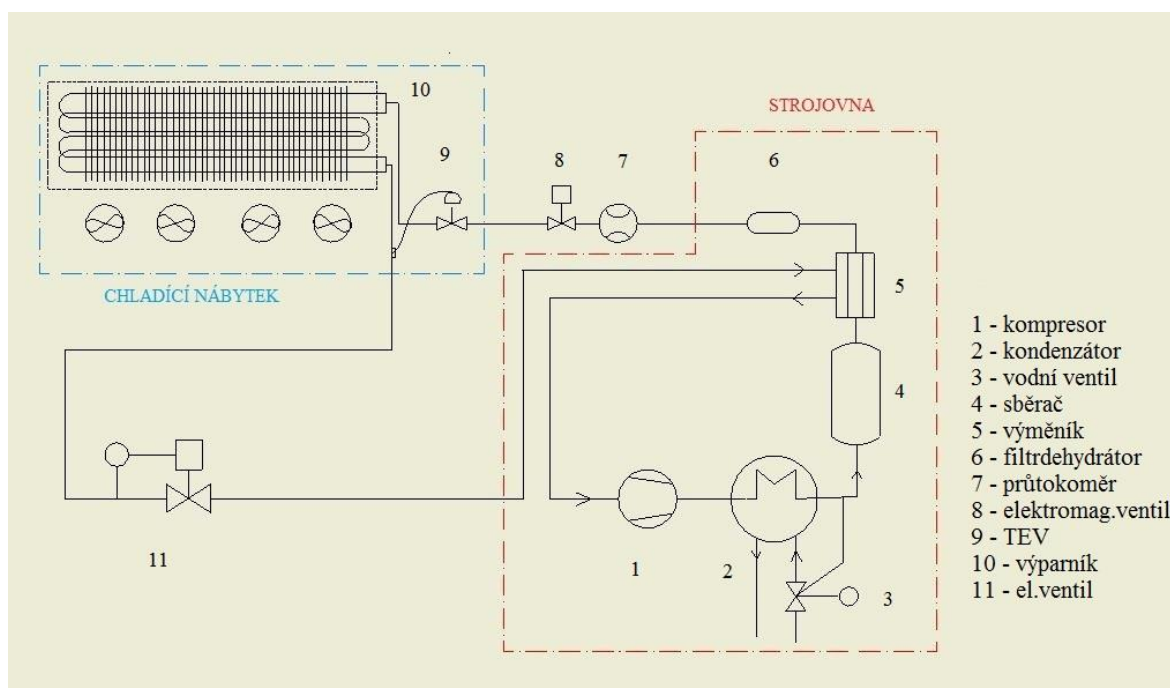
Při metodě Drop-In je vyměněno pouze chladivo, nikoli olej. Nové chladivo musí být dostatečně podobné svými vlastnostmi stávajícímu chladivu. Zejména pak jeho mísitelnost s použitým olejem, tak aby nebylo nutné měnit žádnou další komponentu. [13]



3 Praktická část

3.1 Schéma okruhu

Pro testování chladiv byl použit chladicí nábytek Maxis od firmy Carrier Refrigeration Operation Czech Republic s.r.o.. Schéma celého okruhu je znázorněno na obrázku 3-1. Ve strojovně je umístěn kompresor, kondenzátor, tepelný výměník, filtrdehydrátor a tlaková nádoba – sběrač. Dále chladivo putuje potrubním systémem do přílehlé zkušební komory. Zde se odehrávají všechna měření za konstantních podmínek. Chladivo postupně prochází průtokoměrem, magnetickým ventilem, termostatickým expanzním ventilem, výparníkem, elektronickým ventilem (pro řízení sacího tlaku) a zpět do výměníku. Na okruhu bylo provedeno měření s 6,35 kg chladiva R404A a poté s 6,1 kg chladiva R448A. Rozdílné hmotnosti chladiv vychází ze snahy nastavit přehřátí a podchlazení u obou testovaných chladiv na stejnou hodnotu. Množství chladiva R404A bylo zvoleno a poté odpovídající množství chladiva R448A bylo experimentálně stanoveno.



Obrázek 3-1 Schéma chladicího okruhu



3.2 Komponenty

3.2.1 Kompresor

Jeho úkolem je nasávat páry chladiva z výparníku při tlaku vypařovacím a stlačovat je na tlak kondenzační. Kompresor je použit od značky Bitzer. Je pístový, polohermetický, což znamená, že kompresor spolu s motorem jsou umístěny v jednotném uzavřeném, ale rozebíratelném obalu. [14]

Tabulka 6 Specifikace kompresoru Bitzer pro aplikace s chladivem R404A [14]

typ	4EC-4.2Y-40S	
vypařovací teplota [°C]	-5°C ~ -40°C	
kondenzační teplota [°C]	30°C ~ 50°C	
Otáčky [min ⁻¹]; frekvence [Hz]	1450; 50	1750; 60
Výkonnost [m ³ /hod]	22,7	27,4



Obrázek 3-2 Kompresor Bitzer

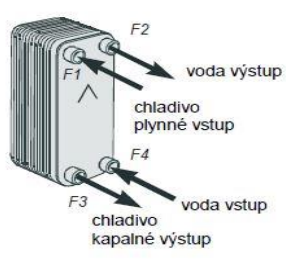
3.2.2 Kondenzátor

Kondenzátor je tepelný výměník, kde chladivo mění své skupenství z plynného na kapalné, přičemž předává teplo do okolí, zde směsi tvořené vodou a polypropylenglykolem. Kondenzátor je deskový od firmy Swep. Desky jsou z nerezové oceli pájené mědí. Do desek jsou vylisovány kanálky. Chladivo proudí jednou skupinou těchto kanálků, voda pak ostatními kanálky a desky tak tvoří teplosměnnou plochu. [16]



Tabulka 7 Specifikace kondenzátoru [16]

typ	B25THx40/1p-SC-M	
okruh	primární	sekundární
T_{\max} [°C]	135	135
p_{\max} [bar]	45	36
Objem [l]	2,109	2,22



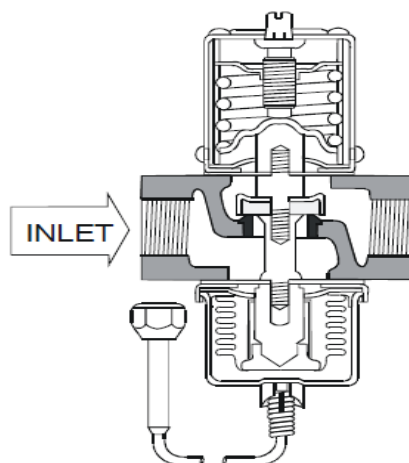

Obrázek 3-3 Kondenzátor Swep

3.2.3 Vodní ventil

Ventil je použit od firmy Johnson Controls. Slouží k udržení nastaveného kondenzačního tlaku. Reguluje množství směsi přiváděné k chlazení kondenzátoru. Je řízený tlakem, zaznamenává tlakové změny v chladicím systému a podle toho reguluje průtok směsi. Tlakovou rovnováhu zajišťuje gumová těsnicí membrána ve ventilu. Při daném nastavitelném tlaku ventil otevírá, pokud tlak poklesne, ventil uzavírá. [16]

Tabulka 8 Specifikace vodního ventilu

Typ	V46AC-9300
T_{\max} vody [°C]	90
p_{\max} vody [bar]	10
Provozní rozsah [bar]	5~23



Obrázek 3-4 Vodní ventil Johnson Controls (vlevo), řez ventilem (vpravo) [16]

3.2.4 Sběrač

Je tlaková nádoba sloužící ke sběru kapalného chladiva. Kondenzátním potrubím je dopravován kondenzát z kondenzátoru do sběrače. Mělo by mít mírný sklon a nejkratší možnou cestu, aby byl zajištěn pohodlný výtok kondenzátu do sběrače. Páry chladiva proudí zpět do kondenzátoru. Kapalinovým potrubím odtéká směs kapalného chladiva a oleje do expanzního ventilu. Tlumí změny hmotnostního průtoku chladiva. Tlaková nádoba je od firmy OCS Cold innovation & technologies. [16]

Tabulka 9 Specifikace tlakové nádoby

Typ	6910020
Provozní tlak [bar]	32
T_{\max} [°C]	100
T_{\min} [°C]	-10
Objem [l]	22



Obrázek 3-5 Tlaková nádoba OCS Cold innovation & technologies

3.2.5 Výměník

Výměník typu trubka v trubce od firmy Danfoss je umístěn za sběračem a slouží k podchlazování kapalně fáze chladiva. Uspořádání je protiproudé, ve vnitřní trubce proudí kapalina, ve vnější trubce pára. Vnitřní trubka je opatřena žebry, to zvyšuje teplosměnnou plochu a napomáhá tak turbulentnímu režimu proudění páry. [15]

Tabulka 10 Specifikace výměníku

typ	HE 1.5
Rozsah teplot [°C]	-60 ~ +120
p_{\max} [bar]	28



Obrázek 3-6 Výměník trubka v trubce Danfoss v dolní části, průhledítko a filtrdehydrátor Danfoss v horní části



3.2.6 Filtrdehydrátor a průhledítko

Filtrdehydrátor od firmy Danfoss je umístěn za výměník, prochází jím kapalné chladivo a má za úkol vysoušet a filtrovat. Před ním je umístěno průhledítko, které ukazuje podíl vlhkosti v chladivu. Zelená barva indikátoru uvnitř průhledítka značí suchost, žlutá barva by značila přítomnost vody. [15]

Tabulka 11 Specifikace filtrdehydrátoru

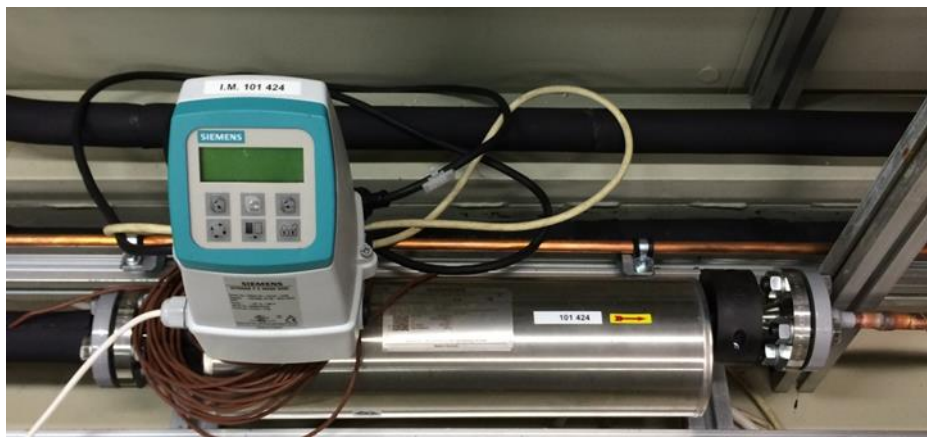
typ	DML 083S
Rozsah teplot [°C]	-40 ~ +70

3.2.7 Průtokoměr

Zařízení k měření hmotnostního průtoku kapalného chladiva je Coriolisův průtokoměr od firmy Siemens. Vyznačuje se především výbornou přesností, kterou výrobce udává jako 0,10% naměřené hodnoty. Kromě hmotnostního průtoku měří také objemový průtok, hustotu, frakční průtok a teplotu. Chladivo proudí potrubím a je zde urychlováno. Vzniká tak Coriolisova síla, která způsobuje vibrace a ty jsou přímo úměrné průtoku. [16]

Tabulka 12 Specifikace průtokoměru

Typ	Sitrans F C MASSFLO MASS 2100
T_{\min} [°C]	-50
T_{\max} [°C]	180



Obrázek 3-7 Průtokoměr Siemens



3.2.8 Elektromagnetický ventil

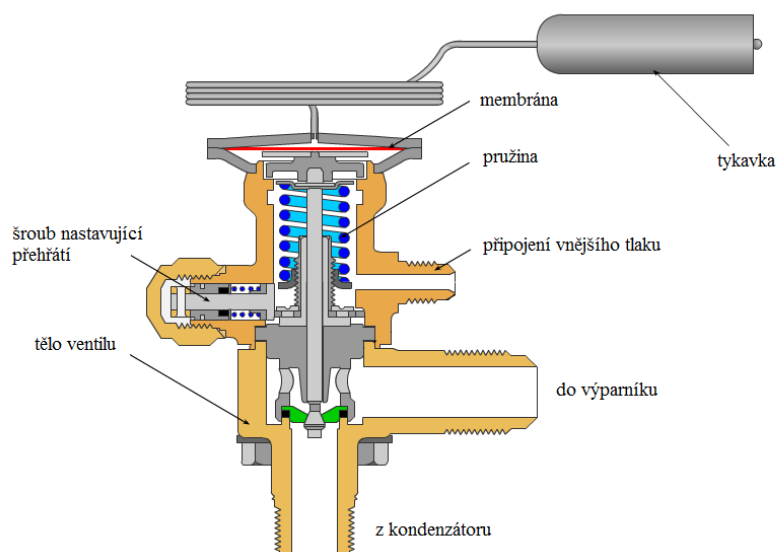
Připojením elektromagnetického ventilu ke zdroji se generuje elektromagnetické pole v cívce, která vtahuje kovové jádro a s ním spojené šoupátko, které zavírá nebo otevírá. Ventil je od firmy Danfoss, typ BE230CS. Je řízen elektronickým regulátorem na základě teplot čidel. [16]



Obrázek 3-8 Elektromagnetický ventil Danfoss

3.2.9 Termostatický expanzní ventil

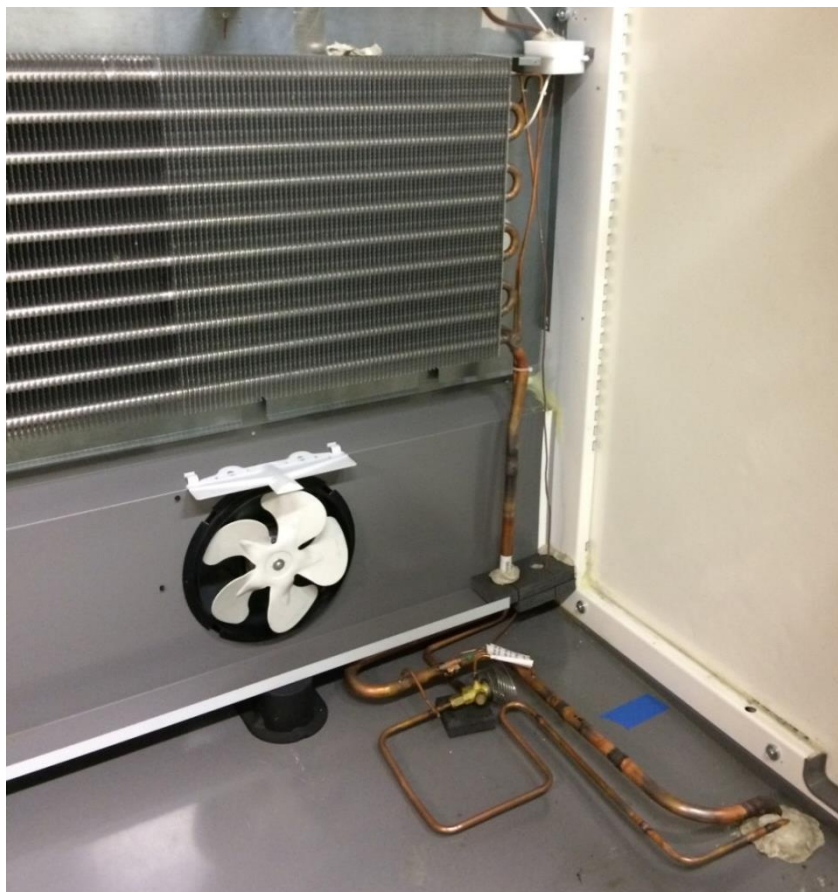
V oběhu je použit termostatický expanzní ventil s vnějším vyrovnáním tlaku od firmy Danfoss. Jeho funkcí je regulovat zaplavení výparníku chladivem. Ventil kontroluje přehřátí par chladiva na výstupu z výparníku, za účelem ochrany kompresoru. Pokud by kompresor nasál kapalnou fází chladiva, hrozil by vznik kapalinového rázu, dále zředění oleje kapalným chladivem vstupujícím do kompresoru a mohlo by dojít k vytváření námrazy na jeho povrchu. Snímacím prvkem je tykavka s kapilárou připojené k potrubí na výstupu z výparníku. Tykavka snímá teplotu, tím se mění tlak a pomocí tykavky propojené s hlavou ventilu působí na kuželku a tím je regulován vstřík chladiva. Pokud je přehřátí na tykavce větší než požadované, ventil se více otevře a zvětší se průtok chladiva do výparníku. Ventil otvírá rovněž, pokud je tlak na konci výparníku příliš nízký. Nastavení ventilu na určité přehřátí se provádí pomocí regulačního šroubu. Ventil pracuje se spojitou regulací, což znamená, že nikdy neuzavírá úplně, jen přivírá a otevírá. Termostatický expanzní ventil vyžadoval úpravu kvůli změně chladiva. Kvůli nastavení požadovaného přehřátí musela být vyměněna tryska ve ventilu za menší model. Výhodou ventilů Danfoss je, že umožňují právě výměnu jen dílčí části ventilu a není potřeba nový ventil na každou aplikaci zvlášť. [15]



Obrázek 3-9 Řez termostatickým expanzním ventilem [16]

3.2.10 Výparník

Výparník je tepelný výměník, kde chladivo přijímá teplo z okolního vzduchu a mění tak své skupenství z kapalného na plynné. Okolní vzduch odevzdává teplo a tím se ochlazuje. Proudění vzduchu výparníkem zajišťují 4 ventilátory. Výparník je sestaven z měděných trubek o průměru 5/8" (15,8 mm) a hliníkových lamel o tloušťce 0,2 mm. Velký počet lamel zvyšuje teplosměnnou plochu a zlepšuje tak přenos tepla oproti nízkému součiniteli přestupu tepla vzduchu. Výparník má dva nástřiky a trubky jsou uspořádány za sebou v deseti řadách. Rozteče mezi trubkami jsou 50 x 50 mm, rozteč mezi lamelami je 8 mm. [16]



Obrázek 3-10 Část výparníku

3.2.11 Elektronický ventil

Do sacího potrubí kompresoru je umístěn ventil, který slouží jako regulátor sacího tlaku. Za výstupem z výparníků snižuje vypařovací tlak na nižší hodnotu. Jeho použití znamená jisté maření energie a je v tomto případě použit pouze kvůli zabudovaným kompresorovým jednotkám. Ty jsou určeny k technologii mražení. Ventil je elektronicky řízený od firmy Danfoss. [15]

Tabulka 13 Specifikace elektronického ventilu [15]

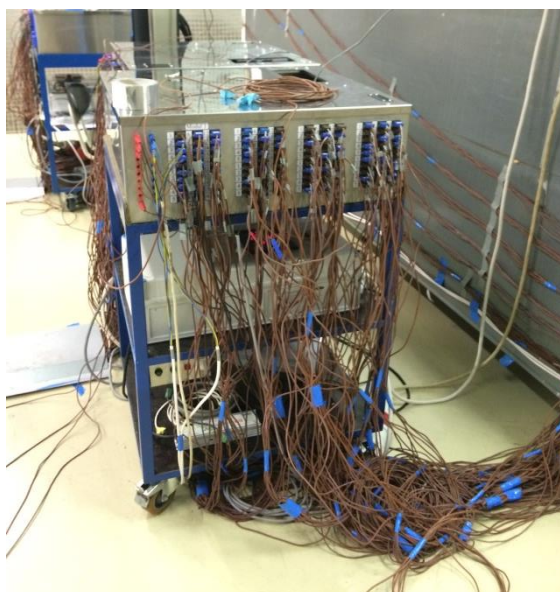
typ	KVS 15
p_{\max} [bar]	45,5
T_{\min} [°C]	- 40
T_{\max} [°C]	60



Obrázek 3-11 Elektronický ventil Danfoss s izolací

3.2.12 Měřicí zařízení

Měřicí centrála je od firmy Delphin Technology. Modul typu ADVT umožňuje měřit na 15 kanálech. Vstupují do něj signály milivoltové a miliampérové. Data jsou zpracována pomocí softwaru Profisignal, který umožňuje sledovat online charakteristiky všech měřených veličin. Následně jsou data převedena do formátu pro program Excel a vyhodnocena pomocí programu Refrigerant. [16]



Obrázek 3-12 Měřicí centrála Delphin Technology



3.3 Nábytek

K měření dat byl použit chladicí nábytek typu Maxis 83.C4 DL. Jedná se o vertikální otevřený nábytek. Délka je 3,75 m, hloubka je 1,18 m a výška 2,22 m. Podle technických dat je možné tento nábytek provozovat ve dvou teplotních třídách. Tak aby uvnitř byla teplota vzduchu mezi 0 až 2°C, čemuž odpovídá vypařovací teplota -9°C a chladicí výkon 7,54 kW. Používá se pro produkty, které vyžadují nižší teplotu, například masné výrobky. Nebo s teplotou vzduchu mezi 2 až 4°C, při vypařovací teplotě -7,5°C a chladícím výkonu 6,56 kW, například pro mléčné produkty. Na obrázku 3-13 je vidět naložení nábytku M-balíčky. V některých z nich je umístěn termočlánek, jejich rozmístění v nábytku se řídí normou ČSN EN ISO 23952-2. Nábytek posloužil jako zátěžové zařízení pro měření vlastností dvou různých chladiv, a tak při testování nemusel být kladen důraz na dodržování normy, ale na zachování stejných konstantních podmínek při zkoušení obou chladiv. [16]



Obrázek 3-13 Chladicí nábytek Maxis 83.C4 DL



3.4 Měření

Chladicí okruh je osazen měřicí technikou, která pomocí milivoltových a miliampérových signálů převádí a zaznamenává požadované veličiny. Další hodnoty se kalkulují z naměřených veličin pomocí softwaru Refrigerant.

Tlak měříme na sání a výtaku kompresoru, a dále tlak kondenzační a vypařovací těsně před a za chladicím nábytkem.

Teploty chladiva měříme před a za kompresorem, před a za expanzním ventilem. Dále na vstupu a výstupu do výparníku, kde se vždy měří na prvním a posledním koleni, a protože jsou dva nástřiky chladiva, měříme vždy dvě teploty, které se následně průměrují, dále měříme také teplotu na tykavce kvůli přehřátí chladiva. Teplotu vzduchu měříme na pěti pozicích před a za výparníkem, dále ochlazený vzduch vystupující z voštiny a vratný ohřátý vzduch proudící zpět do mřížky. Na kondenzátoru měříme teplotu směsi vody a polypropylenglykolu na vstupu a výstupu.

Příkony měříme u elektrických spotřebičů, tedy u kompresoru, osvětlení a ventilátorů. U kompresoru měříme také proud a napětí. Coriolisův průtokoměr měří průtok chladiva. Na nábytku jsou hlavní teplotní řídicí čidla R1, R2 a R4, která jsou teplotní odporová NTC čidla. R1 je čidlo, které ukončuje odtávání, R2 čidlo měří teplotu přívodního vzduchu z výparníku a R4 měří teplotu vratného vzduchu před výparníkem.

Měření bylo provedeno za konstantních podmínek okolního vzduchu. Všem měřením odpovídá teplota a relativní vlhkost ve zkušební komoře 26°C a 55,5%. Plán měření znázorňuje následující tabulka. Nejprve se měřilo s chladivem R404A a poté proběhla výměna za R448A. Obě chladiva byla proměřena se třemi vypařovacími a třemi kondenzačními teplotami.

Tabulka 14 Harmonogram měření

	-8/30	-8/35	-8/40	-7/30	-7/35	-7/40	-6/30	-6/35	-6/40
R404A	6.2.	7.2.	9.2.	13.2.	14.2.	15.2.	16.2.	20.2.	21.2.
R448A	11.3.	4.3.	6.3.	12.3.	13.3.	15.3.	19.3.	18.3.	17.3.

Data jsou sbírána po 20 sekundách. Každý test trval 12 hodin. Začátek byl zvolen do poloviny doby mezi dvěma odtáváním, začal v 16:00 odpoledne a trval do



4:00 ráno. Při každém nastavení požadované kondenzační a vypařovací teploty se přibližně 12 hodin čekalo na ustálení stavu. Během měření došlo několikrát k pozastavení výkonu z důvodu odtávání. Chladicí nábytek je nastaven, tak aby vypnul každou hodinu přibližně na 5 minut, jako opatření proti vytváření námrazy na výparníku a po šesti hodinách vypíná přibližně na 20 minut z důvodu odtávání. Z naměřených hodnot byly dále počítány veličiny jako entalpie, přehřátí, podchlazení, chladicí výkon, doba běhu, kompresní teplo atd. Data filtrujeme na základě průtoku, k další kalkulaci jsou přeneseny jen ty hodnoty, které splňují podmínku, že zároveň je naměřen určitý průtok, tudíž kompresor pracuje, nábytek je v chodu a chladí.



Obrázek 3-14 Výměna chladiva

3.5 Výpočty

3.5.1 Chladicí výkon

Z naměřených dat je počítáno několik výkonů vycházející z normy ČSN EN ISO 23953-2. [19]

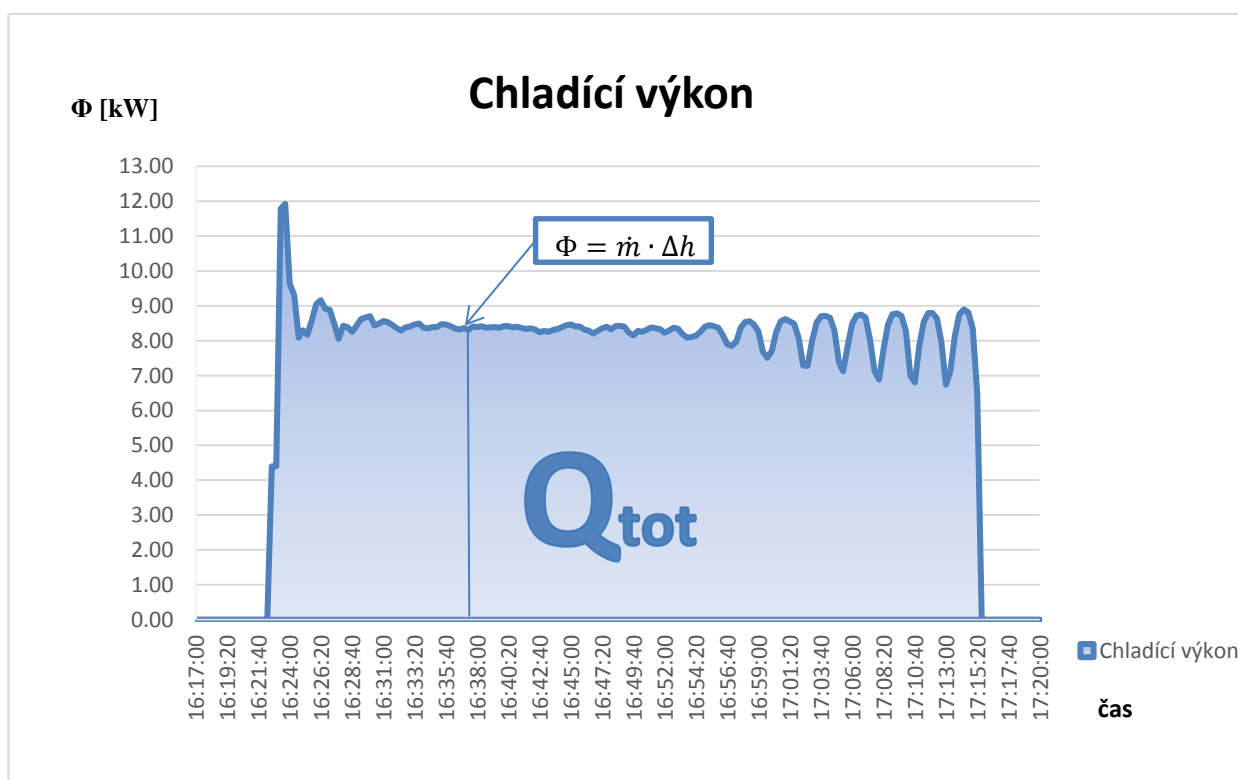
- Φ_{run} [kW] – chladicí výkon vypočítaný pouze z hodnot, kdy běží kompresor, tzn. nábytek chladí, nejvyšší hodnota.

$$\Phi_{run} = \frac{Q_{tot}}{t_{run}} = \frac{Q_{tot}}{12 - t_{deft} - t_{stop}} \quad (7)$$

$$Q_{tot} = \sum_{n=1}^{n=N_{max}} \Phi_n \times \Delta t \quad (8)$$



Následující graf názorně popisuje příklad stanovení chladicího výkonu. Byla vybrána data pro chladivo R404A, s vypařovací teplotou -8°C , kondenzační teplotou 30°C v čase, kdy byl naměřen průtok chladiva, tedy chladicí okruh byl v provozu, mezi 16:20 a 17:15. Jednotlivé body křivky, jednotlivé výkony, jsou stanoveny z aktuálního naměřeného průtoku a vypočtených entalpií pro daný čas. Plocha pod křivkou znázorňuje celkové odvedené teplo. Podílem celkového tepla a doby provozu dostaneme chladicí výkon Φ_{run} .



Obrázek 3-15 Graf závislosti chladicího výkonu na čase

- Φ_{12} [kW] – chladicí výkon, přičemž se započítávají i hodnoty, kdy kompresor stojí, pro dobu 12 hodin

$$\Phi_{12} = \frac{Q_{tot}}{12} = \frac{Q_{tot}}{t_{run} + t_{deft} + t_{stop}} \quad (9)$$

- Φ_{12-def} [kW] - započítává i hodnoty, kdy kompresor stojí, ale ne kvůli odtávání

$$\Phi_{12-def} = \frac{Q_{tot}}{12 - t_{deft}} = \frac{Q_{tot}}{t_{run} + t_{stop}} \quad (10)$$



3.5.2 Energetický parametr REC

Výpočet REC, z anglického refrigeration electrical energy consumption, vychází opět z normy ČSN EN ISO 23953-2 a vyjadřuje spotřebu elektrické energie pro tvorbu chladu, tedy spotřebu kompresoru. Závisí na množství předaného tepla, na kondenzační a vypařovací teplotě. Je dána vzorcem: [19]

$$REC = Q_{tot} \times \frac{(T_K - T_{m run})}{(0,34 \times T_{m run})} \quad [\text{kWh}] \quad (11)$$

3.5.3 Chladicí a topný faktor

Parametr COP z anglického Coefficient of Performance dříve označován za chladicí faktor. Dnes pro přehlednost je používán jako topný faktor pro zdroje tepla, a pro zdroje chladu byl zaveden koeficient EER, z anglického Energy Efficiency Ratio.

$$EER = \frac{\text{chladicí výkon}}{\text{elektrický příkon}} = \frac{(h_{TEV} - h_{IN})}{(h_{DIS} - h_{SUC})} \quad [-] \quad (12)$$

$$COP = \frac{\text{topný výkon}}{\text{elektrický příkon}} = \frac{(h_{DIS} - h_{IN})}{(h_{DIS} - h_{SUC})} \quad [-] \quad (13)$$

3.5.4 Spotřeba kompresoru

Na kompresoru je umístěn wattmetr, který zaznamenává aktuální elektrický příkon ve wattech. Dále jednoduchým přepočtem podle doby běhu kompresoru je vypočtena spotřeba elektrické energie v kWh.

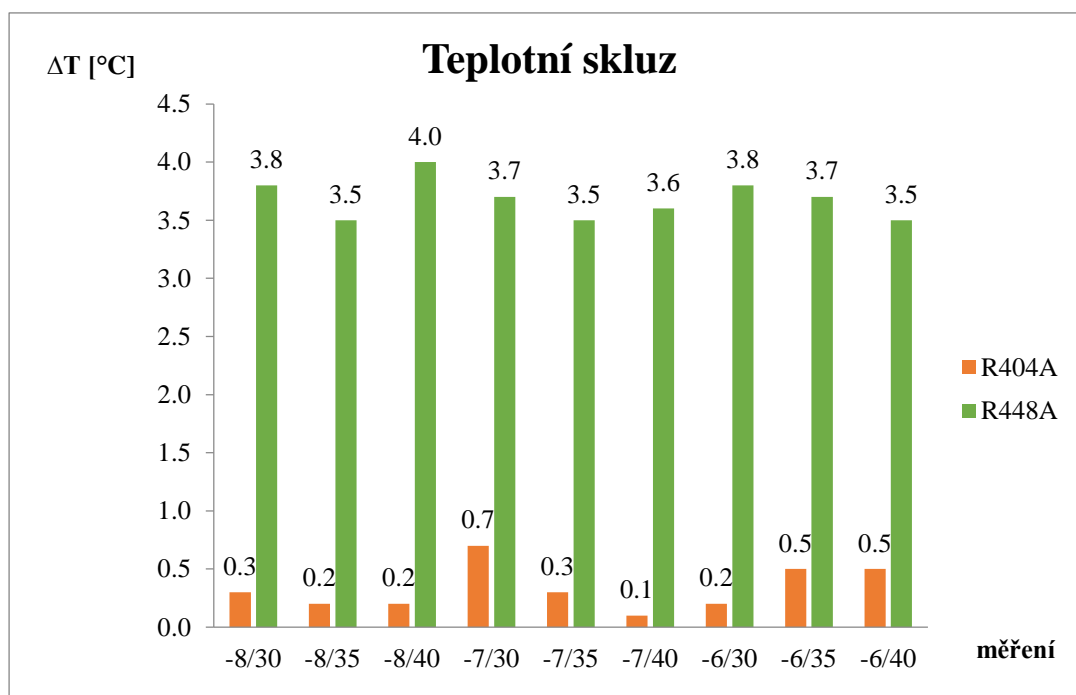
$$W = \frac{P_i}{t} \quad [\text{kWh}] \quad (14)$$



4 Výsledky

4.1 Teplotní skluz

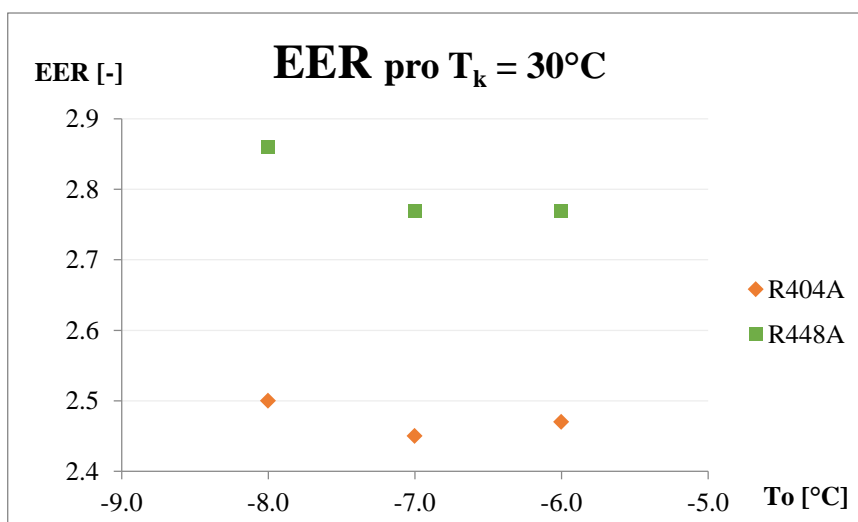
Obě chladiva jsou zeotropní směsi, tudíž se u nich objevuje určitý teplotní skluz v průběhu kondenzace a vypařování. Výrobci chladiv ve svých technických datech uvádějí u chladiva R404A malý, zanedbatelný teplotní skluz. Oproti chladivu R448A, jehož teplotní skluz se pohybuje okolo 5,73°C. Následující graf tuto teorii potvrzuje. Teploty chladiv byly naměřeny na vstupu do výparníku, kde se po seškrčení nacházíme v oblasti mokrých par, a na konci výparníku. Rozdíl je teplotní skluz.



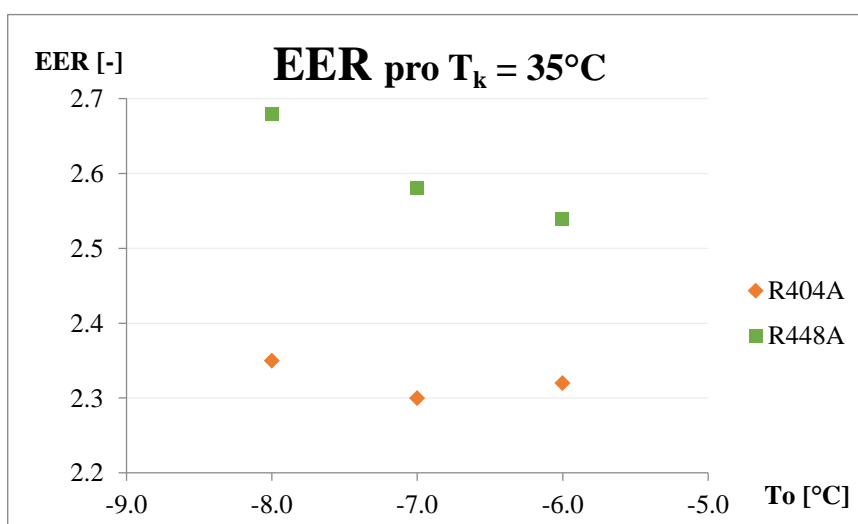
Obrázek 4-1 Graf závislosti teplotního skluzu na druhu chladiva a podmínkách měření

4.2 Chladicí faktor EER

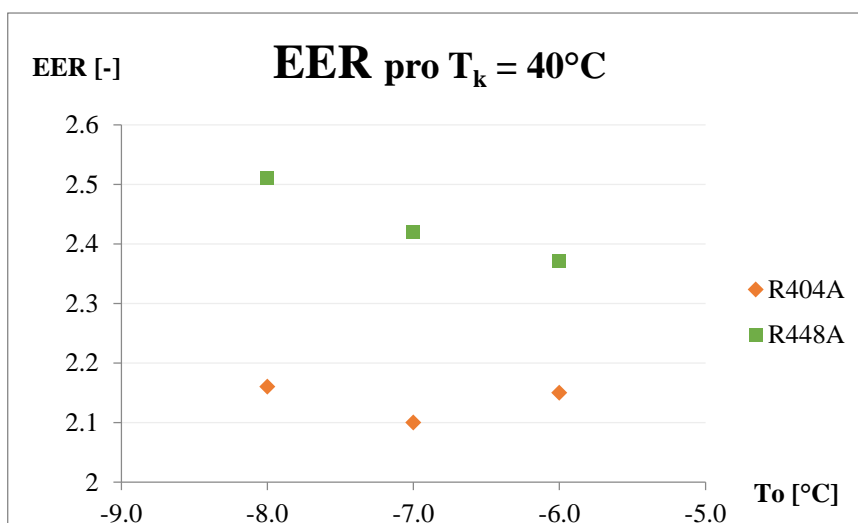
Z následujících grafů je patrné, že hodnoty chladicího faktoru pro chladivo R448A dosahují jednoznačně lepších výsledků než pro chladivo R404A. Chladicí faktor je poměr chladicího výkonu k elektrickému příkonu. Při porovnávání chladicích výkonů nedosahovalo ani jedno chladivo jednoznačně lepších výsledků. Chladicí výkony byly velmi podobné. Vliv na lepší EER tedy měl hlavně rozdílný elektrický příkon.



Obrázek 4-2 Graf závislosti EER na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=30^\circ\text{C}$



Obrázek 4-3 Graf závislosti EER na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=35^\circ\text{C}$



Obrázek 4-4 Graf závislosti EER na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=40^\circ\text{C}$



V tabulce 15 jsou hodnoty příkonů pro jednotlivá měření. Příkony byly změřeny přímo wattmetrem na kompresoru. Hodnoty pro zařízení s chladivem R448A jsou přibližně o 7 až 10% nižší, než při použití chladiva R404A. Chladicí faktor vychází tedy vyšší pro chladivo R448A průměrně o 13%, což odpovídá technickým údajům z katalogu od firmy Honeywell, kde je mezi hlavními výhodami chladiva R448A uveden lepší chladicí faktor asi o 5-10% než chladicí faktor chladiva R404A. [17]

Tabulka 15 Hodnoty elektrických příkonů pro jednotlivá měření

T _k [°C]		30			35			40		
T _o [°C]		-8	-7	-6	-8	-7	-6	-8	-7	-6
R404A	P _i [kW]	3,67	3,66	3,46	3,98	3,98	3,75	4,31	4,26	4,07
R448A	P _i [kW]	3,32	3,28	3,20	3,60	3,52	3,51	3,80	3,76	3,74

Obvyklý způsob, jak vyjádřit efektivnost chladicího systému, je použití parametru chladicí faktor, jehož vzorec je poměrem změny entalpie ve výparníku ke změně entalpie v kompresoru. Tato metoda ale nezahrnuje žádné ztráty. Ve skutečnosti bychom měli uvažovat ztrátu kompresoru, neboť ne všechno teplo vyprodukované při stlačování par chladiva kompresorem je předáno chladivu, ale část tepla je uvolněna do okolí. U většiny kompresorů tato tepelná ztráta činí asi 5-7% z celkového tepla kompresoru. Důsledkem je nižší hodnota entalpie za kompresorem, tudíž i nižší rozdíl entalpií a vyšší hodnota EER. Přesnější hodnota EER tedy nebude kalkulována pomocí entalpií, ale byly využity hodnoty, které naměřil wattmetr umístěný na kompresoru a udává přesný elektrický příkon kompresoru.

První chladicí faktor (značen EER) je počítán na základě rozdílu entalpií počítaných z naměřených hodnot tlaků a teplot před a za výparníkem a kompresorem.

Druhý chladicí faktor (značen EER*) je počítán jako poměr chladicího výkonu spočteného z naměřených tlaků, teplot a hmotnostního průtoku a změřeného příkonu kompresoru.

$$EER = \frac{\text{chladicí výkon}}{\text{elektrický příkon}} = \frac{(h_{TEV} - h_{IN})}{(h_{DIS} - h_{SUC})} [-] \quad (15)$$

$$EER^* = \frac{\text{chladicí výkon}}{\text{elektrický příkon}} = \frac{\Phi_{run}}{P_i} [-] \quad (16)$$



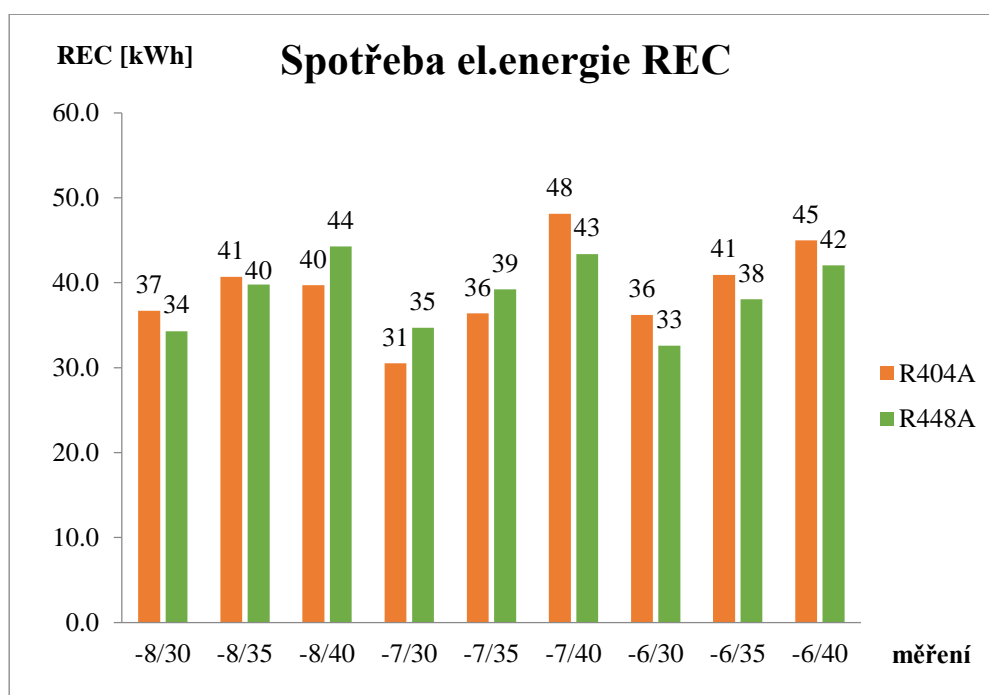
Tabulka 16 Porovnání vypočtených hodnot EER a naměřených hodnot EER*

T_k [°C]	30			35			40		
T_o [°C]	-8	-7	-6	-8	-7	-6	-8	-7	-6
EER R404A	2,50	2,45	2,47	2,35	2,30	2,32	2,16	2,12	2,15
EER* R404A	2,26	2,02	2,55	2,13	1,96	2,38	1,78	2,10	2,17
EER R448A	2,86	2,77	2,77	2,68	2,58	2,54	2,51	2,42	2,37
EER* R448A	2,42	2,58	2,55	2,37	2,40	2,35	2,29	2,23	2,20

Hodnoty chladicího faktoru EER* počítaného ze skutečného elektrického příkonu kompresoru dosahují téměř vždy menší hodnoty než chladicí faktor stanovený na základě změny entalpií. Chladivo R448A dosahuje opět vyšších hodnot EER*.

4.3 Energetický parametr REC

Následující graf hodnotí spotřebu elektrické energie kompresoru chladicího zařízení, která vychází z normy ČSN EN ISO 23953-2. Použitím chladiva R448A bylo převážně vždy dosaženo úspory elektrické energie oproti použití chladiva R404A.



Obrázek 4-5 Graf závislosti REC na vypařovací a kondenzační teplotě



Spotřeba elektrické energie připadající na tvorbu chladu dle EN23953 (REC) vypočtená z Q_{tot} dále závisí také na množství předaného tepla, na kondenzační a vypařovací teplotě.

Oproti tomu byla hodnocena skutečná spotřeba elektrické energie (W), vypočtená ze střední hodnoty příkonu kompresoru a doby běhu kompresoru. Výsledky se rozcházejí většinou o pár procentních bodů. V případě výsledků s chladivem R448A jsou naměřené hodnoty vždy optimističtější a spotřeba energie je menší než vypočítaná spotřeba z normy. Procenta uvádí, o kolik se liší skutečná spotřeba W oproti hodnotě REC.

Tabulka 17 Porovnání spotřeby elektrické energie

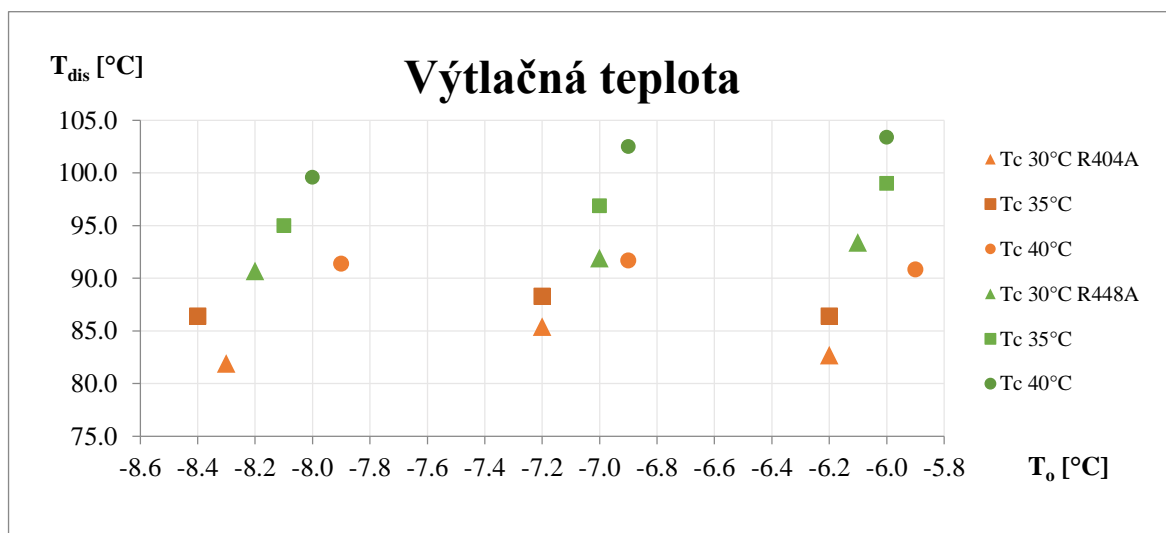
T_k [°C]	30			35			40		
T_o [°C]	-8	-7	-6	-8	-7	-6	-8	-7	-6
REC [kWh] R404A	36,7	30,5	36,2	40,7	36,4	40,9	39,7	48,1	45
W [kWh] R404A	37,8	36,4	34,8	39,8	39,6	37,5	42,8	42,3	40,9
Skutečná [%]	+3	+19	-4	-2	+9	-8	+8	-12	-9
REC [kWh] R448A	34,3	34,7	32,6	39,8	39,2	38	44,3	43,4	42
W [kWh] R448A	33,2	32,7	32,5	35,2	35,3	35,6	37,6	37,8	38
Skutečná [%]	-3	-6	0	-12	-10	-6	-15	-13	-10

4.4 Teplota na výtlaku

Za konstantní kondenzační teploty a se snižující se vypařovací teplotou by se měl zvyšovat kompresní poměr $\varepsilon = p_{\text{dis}}/p_{\text{suc}}$ a měla by růst teplota na výtlaku. Naše data tento trend ale nevykazují. Možnou příčinou jsou pravděpodobně odchylky v měření. Nábytek je běžně provozován ve dvou režimech, podle potřeby zboží. Požadovaná teplota uvnitř nábytku je buď mezi 0~2°C pro masné výrobky, nebo mezi 2~4°C pro mléčné výrobky. Tomu odpovídají vypařovací teploty -9°C a -7,5°C. Proto byl zvolený tak malý rozptyl vypařovacích teplot a měření byla provedena se třemi teplotami -6,-7 a -8 °C. Takto úzký rozsah vypařovacích teplot mohl ovlivnit výsledky a výsledný trend. Při nastavování požadované kondenzační a vypařovací teploty často nebyla dodržena přesná hodnota, ale teploty se liší o pár desetín. Také hodnoty přehřátí a podchlazení chladiva se nepodařilo držet vždy přesně na stejné hodnotě. Jelikož nábytek je otevřený, je ovlivněn nejrůznějšími vlivy proudění vzduchu a je citlivý i na malé odchylky.



Při porovnání chladiv dosahuje chladivo R448A jednoznačně vždy vyšších teplot na výtlačku než chladivo R404A, přibližně o 10 K. Vysoká teplota na výtlačku znamená určité výhody i nevýhody. Vyšší teplota je užitečná kvůli většímu předanému teplo v kondenzátoru, kde ohřejeme chladicí vodu na vyšší hodnotu a teplo ve vodě může být dál zužitkováno. Nevýhodou vysoké teploty je velké teplotní namáhání částí kompresoru a také oleje cirkulujícího s chladivem.



Obrázek 4-6 Graf závislosti výtlačné teploty na teplotě vypařovací a kondenzační

4.5 Součinitel přestupu tepla

Všechna experimentální měření byla také simulována v programu Coil PC 6.33, který umožňuje sestavit model výparníku a ten následně vyhodnotí. Mezi vstupní parametry patří geometrické uspořádání, stav přívodního vzduchu, použité chladivo a jeho vstupní a výstupní stav, požadovaná hodnota přehřátí apod. Výsledky se s malou odchylkou shodovaly s naměřenými hodnotami. Obrázek 4-7 znázorňuje geometrické uspořádání trubek ve výparníku. Trubky mají vstup i výstup na stejné straně.



Obrázek 4-7 Geometrické uspořádání trubek ve výparníku



Program vyhodnotil hodnoty součinitele přestupu tepla α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$] v jednotlivých trubkách. Vyšší hodnoty součinitele α znamenají lepší podmínky pro přestup tepla, a mohla by se tak volit vyšší vypařovací teplota. Na obrázku 4-8 jsou výsledky z programu Coil PC.

TUBE	AIR TEMPS ENT	LVG	REFRIG TEMPS LVG	LVG SAT	VAP QUAL LVG	REFRIG COEF	REF PRES DROP	HEAT TRANS.
	C	C	C	C		W/m2-K	kPa	W
CIRCUIT NUMBER 1								
19	-1.16	-1.73	-6.46	-6.46	0.3407	1486.3	0.896	236.
17	-0.51	-1.16	-6.51	-6.51	0.3935	1604.7	1.310	273.
15	0.24	-0.51	-6.57	-6.57	0.4547	1743.4	1.448	316.
13	1.09	0.24	-6.64	-6.64	0.5255	1902.8	1.793	366.
11	2.08	1.09	-6.72	-6.72	0.6075	2076.0	2.068	425.
9	3.20	2.08	-6.82	-6.82	0.7023	2225.7	2.551	492.
7	4.47	3.20	-6.94	-6.94	0.8108	2206.6	3.034	564.
5	5.84	4.47	-7.02	-7.02	0.9289	1705.9	2.827	617.
3	6.94	5.71	-7.05	-7.05	1.0000	756.8	1.331	373.
ALL VAPOR FLOW AT 2.363 METERS INTO TUBE 3								
3	6.94	6.15	-3.48	-7.08		317.3	2.068	103.
1	7.44	6.95	3.06	-7.21		320.5	1.931	190.
CIRCUIT NUMBER 2								
20	-1.16	-1.73	-6.45	-6.45	0.3407	1486.3	0.896	236.
18	-0.51	-1.16	-6.51	-6.51	0.3935	1604.5	1.241	272.
16	0.24	-0.51	-6.57	-6.57	0.4546	1743.2	1.448	315.
14	1.09	0.24	-6.64	-6.64	0.5254	1902.8	1.793	366.
12	2.07	1.09	-6.72	-6.72	0.6074	2075.5	2.068	424.
10	3.20	2.08	-6.82	-6.82	0.7022	2225.6	2.551	492.
8	4.47	3.20	-6.93	-6.93	0.8106	2207.0	3.034	564.
6	5.84	4.47	-7.02	-7.02	0.9287	1707.3	2.896	617.
4	6.94	5.71	-7.05	-7.05	1.0000	757.6	1.338	374.
ALL VAPOR FLOW AT 2.370 METERS INTO TUBE 4								
4	6.94	6.15	-3.49	-7.08		317.3	2.068	103.
2	7.44	6.95	3.06	-7.20		320.5	1.931	190.

Obrázek 4-8 Výsledky z programu Coil PC 6.33, pro R404A $t_o = -7^\circ\text{C}$, $t_k = 35^\circ\text{C}$

První sloupec označuje číslo trubky, dále jsou teploty vzduchu před a za výparníkem, teploty chladiva, kvalita páry, součinitel přestupu tepla, tlaková ztráta a množství předaného tepla.

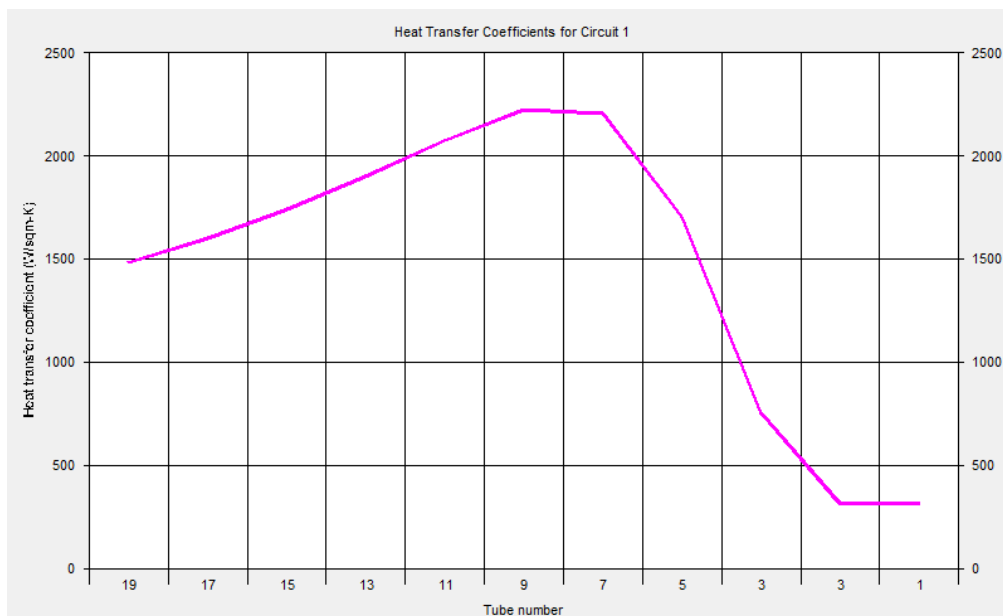
Výparník má dva nástřiky, tedy dva okruhy, které jsou hodnoceny samostatně. Trubky číslo 19 a 20 jsou první dvě trubky za termostatickým expanzním ventilem, poslední trubky výparníku jsou čísla 1 a 2. Výsledky jsou pro chladivo R404A, vypařovací teplotu -7°C a kondenzační teplotu 35°C . Ve čtvrtém sloupci jsou uvedeny teploty chladiva v jednotlivých trubkách. Během vypařování, které probíhá v prvním okruhu mezi 19. a 3. trubkou a v druhém okruhu mezi 20. a 4. trubkou, se mění teplota chladiva od $-6,4^\circ\text{C}$ do -7°C . Klesající teplota je způsobena narůstající tlakovou ztrátou v trubkách a klesá až do místa, kde je 100% pára. Od třetí a čtvrté trubky už je chladivo zcela vypařeno, dál proudí jen v plynné fázi, jeho teplota se zvyšuje, dochází k přehřátí



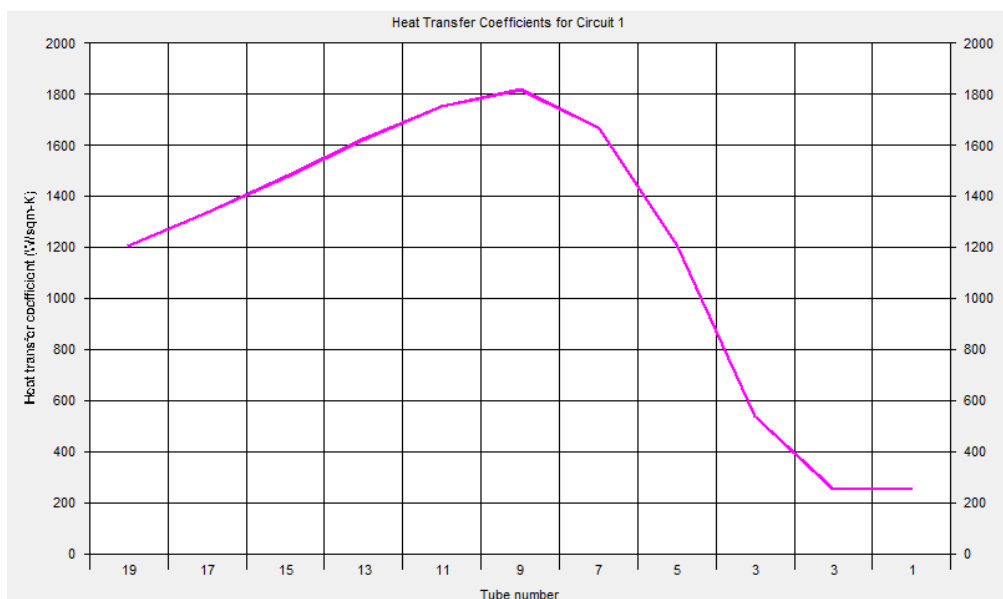
chladiwa. V sedmém sloupci jsou uvedeny hodnoty součinitele α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$]. Jeho hodnota ze začátku narůstá s rostoucím podílem páry proudící v trubkách. Maximální hodnoty dosahuje, když je podíl páry v chladiwu přibližně 70%. S postupným varem chladiwa se vytvářejí bubliny, to vyvolává intenzivnější pohyb kapaliny a součinitel narůstá. Později dochází ke spojování bublin v parní blány a ta odděluje povrch od vroucí kapaliny a omezuje tak přestup tepla, součinitel přestupu tepla klesá. Následující obrázky 4-3 a 4-4 znázorňují grafy z programu Coil PC, který vyhodnocuje součinitel α v závislosti na kvalitě páry při postupném průchodu jednotlivými trubkami. Vyhodnocen je vždy jen první okruh chladiwa, neboť součinitel se chová téměř stejně při průchodu oběma okruhy. Vyšších hodnot součinitele α dosahuje vždy okruh s chladiwem R404A, maximální hodnoty se pohybují mezi 2000~2650 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$]. Pro okruh s chladiwem R448A jsou maximální hodnoty v rozmezí 1670~1900 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$]. Výsledky z programu Coil PC pro chladiwo R448A, vypařovací teplotu -7°C a kondenzační teplotu 35°C jsou na obrázku 4-9. Všechny maximální hodnoty součinitele alfa pro jednotlivá měření jsou uvedeny v příloze 1,2.

TUBE	AIR TEMPS ENT	REFRIG TEMPS LVG	REFRIG TEMPS LVG	REFRIG TEMPS LVG SAT	VAP QUAL LVG	REFRIG COEF	REF PRES DROP	HEAT TRANS.
	C	C	C	C		$\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$	kPa	W
CIRCUIT NUMBER 1								
19	-0.62	-1.35	-7.92	-7.92	0.2942	1208.8	0.758	338.
17	0.17	-0.63	-7.60	-7.60	0.3628	1338.5	0.965	371.
15	1.02	0.16	-7.24	-7.24	0.4388	1478.5	1.241	406.
13	1.94	1.02	-6.84	-6.84	0.5230	1623.4	1.586	443.
11	2.93	1.94	-6.40	-6.40	0.6158	1754.6	1.862	482.
9	3.98	2.92	-5.91	-5.91	0.7170	1817.5	2.275	518.
7	5.07	3.97	-5.39	-5.39	0.8248	1672.4	2.620	542.
5	6.16	5.07	-4.87	-4.87	0.9301	1214.2	2.413	522.
3	6.98	6.10	-4.53	-4.53	1.0000	540.6	1.379	343.
ALL VAPOR FLOW AT			2.825 METERS	INTO TUBE	3			
3	6.98	6.41	-2.57	-4.54		256.1	1.793	46.
1	7.36	6.98	3.74	-4.66		257.5	1.724	148.
CIRCUIT NUMBER 2								
20	-0.62	-1.35	-7.92	-7.92	0.2942	1208.8	0.689	338.
18	0.17	-0.63	-7.60	-7.60	0.3627	1338.4	1.034	371.
16	1.02	0.16	-7.24	-7.24	0.4387	1478.3	1.241	406.
14	1.94	1.02	-6.84	-6.84	0.5229	1623.4	1.517	443.
12	2.93	1.94	-6.39	-6.39	0.6156	1754.2	1.862	481.
10	3.98	2.92	-5.91	-5.91	0.7169	1817.5	2.275	517.
8	5.07	3.97	-5.39	-5.39	0.8247	1673.0	2.689	542.
6	6.16	5.06	-4.87	-4.87	0.9299	1215.3	2.413	522.
4	6.98	6.10	-4.52	-4.52	1.0000	541.1	1.386	344.
ALL VAPOR FLOW AT			2.833 METERS	INTO TUBE	4			
4	6.98	6.40	-2.59	-4.54		256.1	1.793	46.
2	7.36	6.98	3.73	-4.65		257.5	1.724	149.

Obrázek 4-9 Výsledky z programu Coil PC pro R448A, $t_o = -7^\circ\text{C}$, $t_k = 35^\circ\text{C}$

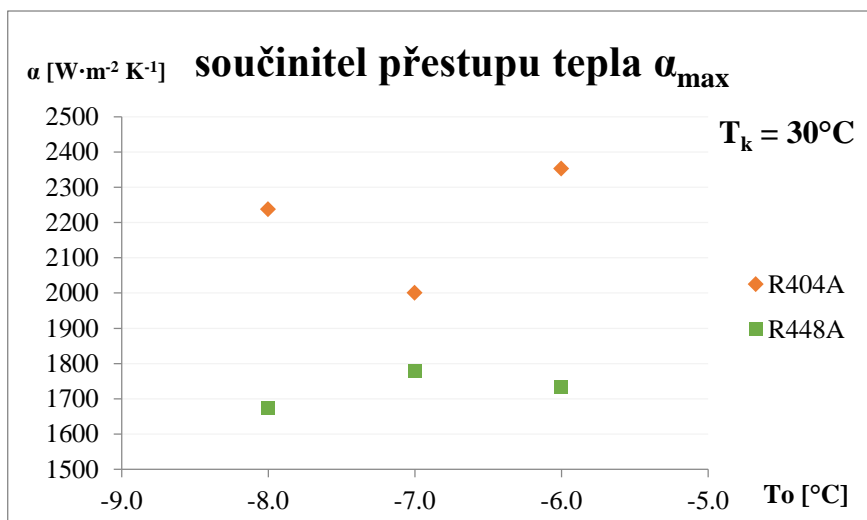


Obrázek 4-10 Graf součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici v trubkách, chladivo R404A, $t_o = -7^\circ\text{C}$, $t_k = 35^\circ\text{C}$

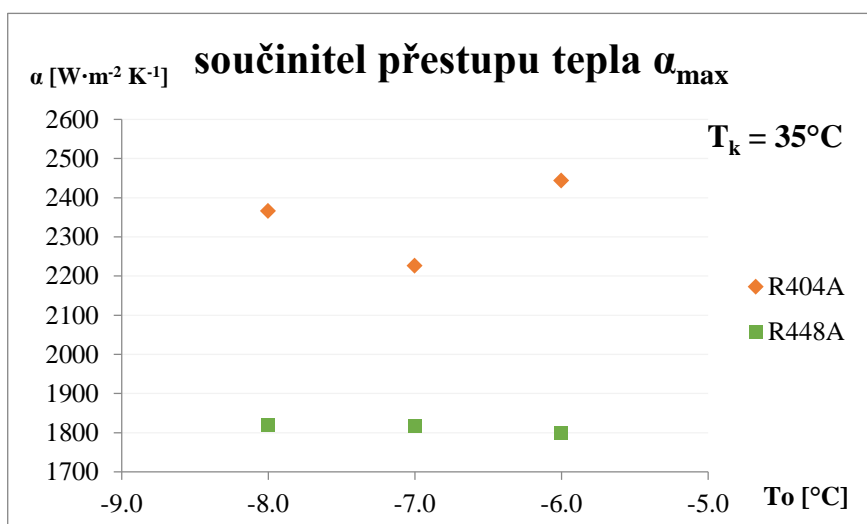


Obrázek 4-11 Graf součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici v trubkách, chladivo R448A, $t_o = -7^\circ\text{C}$, $t_k = 35^\circ\text{C}$

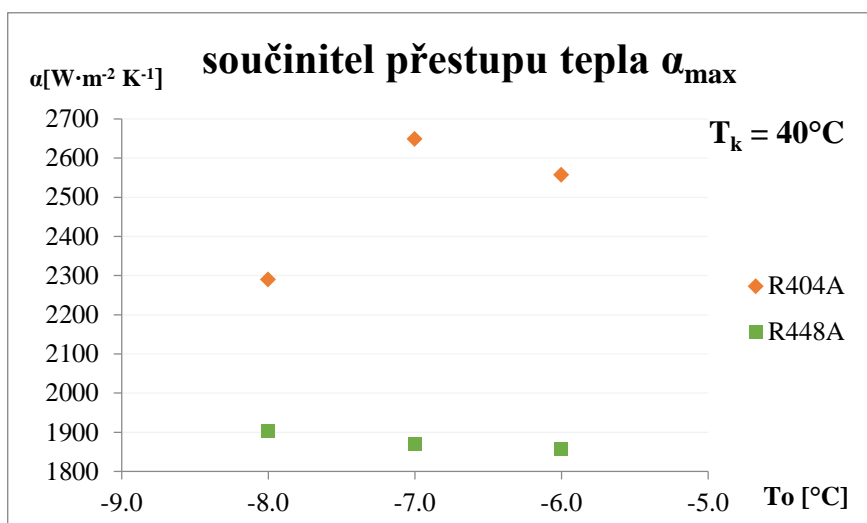
Dále byla zjišťována závislost součinitele přestupu tepla α_{\max} na vypařovací a kondenzační teplotě. Vzhledem k malému rozptylu vypařovací teplot se nedá jednoznačně určit trend, ale hodnoty α_{\max} dosahují výrazně lepších, vyšších hodnot pro chladivo R404A než pro chladivo R448A. Také s rostoucí kondenzační teplotou rostou hodnoty α_{\max} .



Obrázek 4-12 Graf závislosti součinitele α_{max} na vypařovací teplotě při konstantní $T_k = 30^\circ\text{C}$



Obrázek 4-13 Graf závislosti součinitele α_{max} na vypařovací teplotě při konstantní $T_k = 35^\circ\text{C}$



Obrázek 4-14 Graf závislosti součinitele α_{max} na vypařovací teplotě při konstantní $T_k = 40^\circ\text{C}$



4.6 Total Equivalent Warming Impact

Faktor TEWI hodnotí souhrnně energetické i ekologické vlastnosti chladiv z hlediska vlivu na životní prostředí. Výpočet se skládá ze dvou částí. První část obsahuje přímé vlivy, které jsou dány vlastnostmi konkrétního chladiva a použitého zařízení. Druhá část zahrnuje nepřímé vlivy, kam se řadí emise CO₂ při výrobě energie potřebné k pohonu zařízení během jeho životnosti. Faktor TEWI vystihuje kompletní ekvivalentní produkci oxidu uhličitého během životnosti zařízení. Platí vždy pouze pro konkrétní zařízení. V tomto případě, kdy bylo použito totéž zařízení a došlo pouze k změně chladiva, budou výsledky vystihovat především vlastnosti chladiv. Vzorce pro jeho výpočet: [1]

$$\text{přímý vliv} = GWP \text{ chladiva} * \text{únik chladiva} \left(\frac{\text{kg}}{\text{rok}} \right) * \text{životnost zařízení (rok)} + GWP \text{ chladiva} * \text{náplň chladiva (kg)} * (1 - \text{faktor recyklace})$$

$$\text{nepřímý vliv} = \text{životnost zařízení (rok)} * \text{roční spotřeba energie} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right) * \text{měrná emise CO}_2 \text{ při výrobě pohonné energie (kgCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1})$$

Roční spotřeba energie chladicího zařízení byla stanovena z naměřených dat, tedy z průměrné hodnoty příkonu kompresoru a předpokládané doby běhu za celý rok. Životnost zařízení předpokládáme 15 let. Náplň chladiva a příslušné GWP známe. Zbylé hodnoty byly stanoveny podle doporučení z portálu TZB-info. Běžné hodnoty úniku chladiva pro chlazení v supermarketu se pohybují okolo 12% hmotnosti náplně za rok. Faktor recyklace se volí 0,7 pro zařízení s náplní menší než 100 kg chladiva. Velikost emisního faktoru CO₂ pro výrobu pohonné energie je pro ČR přibližně 0,95 kg·kWh⁻¹. [2]

Výsledky ukazují příznivější hodnotu TEWI [kg CO₂] pro chladivo R448A, a to přibližně o 16% menší. Velký rozdíl mezi chladivy lze pozorovat u výsledku přímého vlivu produkce CO₂, který závisí hlavně na vlastnostech daného chladiva. Díky menšímu GWP a menší náplně chladiva R448A je přímá produkce kg CO₂ o 66% nižší při použití chladiva R448A. Chladivo R448A je jednoznačně ekologičtější variantou v porovnání s chladivem R404A.



Tabulka 18 Porovnání chladiv R404A a R448A podle faktoru TEWI [2,16]

Zadané hodnoty	R404A	R448A
GWP [-]	3922	1386
Únik chladiva [kg/rok]	0,762	0,732
Životnost zařízení [rok]	15	15
Náplň chladiva [kg]	6.35	6.1
Faktor recyklace [-]	0,7	0,7
Spotřeba energie [kWh/rok]	28 543	25 785
Měrná emise CO ₂ při výrobě energie [kg·kWh ⁻¹]	0,95	0,95
Přímý vliv [kg CO₂]	52 300	17 755
Nepřímý vliv [kg CO₂]	406 738	367 439
TEWI [kg CO₂]	459 038	385 194

4.7 Optimalizace výparníku

Použitý výparník o rozměrech 3425 x 103 x 500 je sestaven z měděných trubek o průměru 15,8 mm a hliníkových lamel o tloušťce plechu 0,2 mm. Vzdálenost trubek ve výparníku je 50 x 50 mm. Pro kontrolu naměřených dat byl proveden také model výparníku v programu Coil PC 6.33 a data byla ověřena výpočtem. Pomocí volby různého průtoku vzduchu přes výparník byla provedena optimalizace na stejný chladicí výkon a hodnoty teploty ochlazeného vzduchu se shodovaly s malou odchylkou s hodnotami naměřenými termočlánky. V oblasti chladicí a klimatizační techniky se tlaková ztráta běžně vyjadřuje změnou teploty v Kelvinech a za přijatelnou hodnotu se považuje ztráta přibližně 2-3 K. Současná konstrukce výparníku dosahuje ztráty menší než 1 K.

V rámci této práce byla provedena optimalizace výparníku za účelem snížení investičních nákladů za materiál výparníku. K použitému výparníku byly navrženy konstrukční úpravy tak, aby jednotlivé varianty dosahovaly stejných hodnot chladicího výkonu a následně byly ekonomicky zhodnoceny pomocí softwaru TSO.net. Konstrukční úpravy se týkají hlavně zvoleného průměru trubek, tloušťky a rozteče lamel, počtu nástřiků a geometrického uspořádání trubek ve výparníku.



Tabulka 19 Varianty výparníku

	varianta 1	varianta 2	varianta 3	varianta 4
Trubka	Ø 15 mm	Ø 12 mm	Ø 12 mm	Ø 12 mm
Počet trubek	20	24	24	16
Tloušťka stěny [mm]	0,4	0,32	0,32	0,33
povrch trubky	hladký	hladký	hladký	rýhovaný
Tloušťka lamely [mm]	0,2	0,25	0,18	0,25
Rozteč lamel [mm]	8	8,7	7,3	7,6
Uspořádání v trubkovnici [mm]	50x50	50x40	50x40	50x40
Počet nástřiků	2	4	4	4
tlaková ztráta vzduch [mbar]	0,227	0,228	0,247	0,183

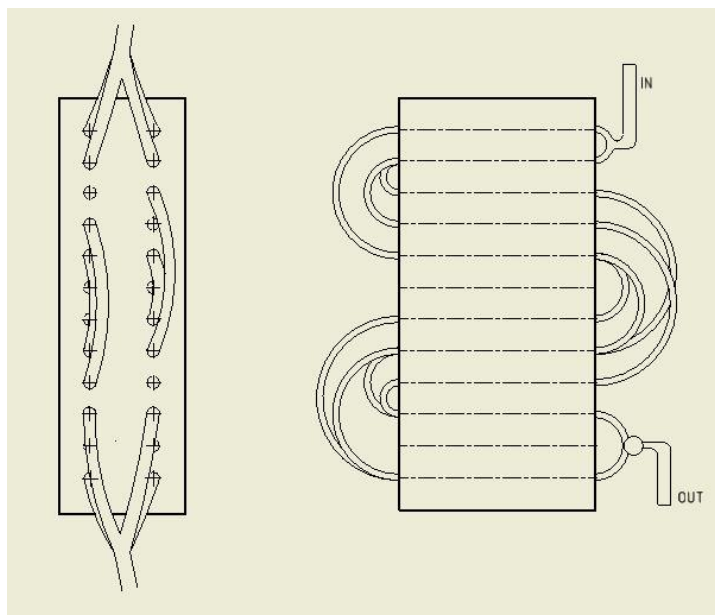
Varianta 1 je původní použitý výparník skládající se z měděných trubek o průměru 15,8 mm a hliníkových lamel o tloušťce 0,2 mm a s roztečí 8 mm.

Varianta 2 je navržena s trubkami o průměru 12 mm. S takovými trubkami se mění uspořádání v trubkovnici a vyrábí se s roztečí 50 x 40 mm. Aby bylo dosaženo požadovaného chladicího výkonu, musel být zvětšen počet nástřiků na 4 a tím se zvětšil počet trubek na 24. Rozteč lamel je 8,7 mm a tloušťka lamel je 0,25 mm.

Varianta 3 navazuje na variantu 2 a mění se zde tloušťka lamel na 0,18 mm a rozteč lamel na 7,3 mm. Zmenšení rozteče lamel působí negativně na tlakovou ztrátu vzduchu, která se zvětšila.

Varianta 4 navazuje na variantu 2 a 3. Mění se zde geometrické uspořádání trubek ve výparníku, viz obrázek 4-13. Jsou ponechány 4 nástřiky, ale některé pozice ve výparníku jsou vynechány a tak celkový počet trubek se zmenší na 16, ale musí tak být použity rýhované trubky pro lepší přestup tepla. Rozteč lamel je 7,6 a tloušťka lamel je zvětšena na 0,25 mm. Oproti variantě 3 zde klesne tlaková ztráta vzduchu.

Zmenšením průměru trubky bylo předpokládáno snížení ceny za materiál na výrobu výparníku. Použitím menších trubek by ale nebyl dosažen požadovaný výkon, a tak musely být použity 4 nástřiky a tím se zvedl počet trubek, až na variantu 4, kde ale musely být použity rýhované trubky místo hladkých. Cenu mědi a hliníku má firma Carrier Refrigeration Operation stanovenou s dodavatelem podle celkové hmotnosti mědi a hliníku. Konečné kalkulace vyšly následovně.



Obrázek 4-15 Geometrické uspořádání trubek ve výparníku se 4 nástřiky a 16 trubkami

Tabulka 20 Ekonomické zhodnocení jednotlivých variant výparníku [16]

	varianta 1	varianta 2	varianta 3	varianta 4
trubka	Ø 15 mm	Ø 12 mm	Ø 12 mm	Ø 12 mm
hmotnost mědi [kg]	13,8	8,6	8,6	6,9
cena mědi [€/kg]	5,9			
náklady měď [€]	81,5	51,1	51,1	40,6
lamela	0,2 mm	0,25 mm	0,18 mm	0,25 mm
hmotnost hliníku [kg]	12,5	13,8	11,8	15,8
cena hliníku [€/kg]	3,2			
náklady hliník [€]	40,2	44,3	38,0	50,7
Celkem [€]	121,7	95,4	89,1	91,2
	100%	78%	73%	75%

Ekonomicky nejvýhodnější je varianta 3, která konstrukčními úpravami dosahuje největší úspory za materiál, oproti původní variantě je o 27% levnější. Nevýhodou je velká tlaková ztráta vzduchu kvůli malé rozteči lamel. Ve variantě 4 je tlaková ztráta snížena díky větší rozteči lamel. I přesto, že náklady na hliník jsou ve variantě 4 oproti ostatním návrhům nejvyšší, rozhodující jsou náklady na měď, která je dražší než hliník. Hlavní úspory je zde dosaženo použitím rýhovaných trubek, kterých je pouze 16. Oproti původní variantě je varianta 4 o 25% levnější.



5 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo zanalyzovat chladicí zařízení s chladivem R404A a následně s chladivem R448A, výsledky porovnat jak z hlediska provozního tak vlivu na životní prostředí a plnění legislativních požadavků EU. Představit další chladiva a jejich vlastnosti.

Teoretickou část jsem věnovala popisu chladiv, jejich vlastnostem a představení legislativních dokumentů upravující použití chladiv. Chemické složení chladiv značně ovlivňuje jejich působení na životní prostředí. Legislativa se snaží o postupné omezování použití halogenovaných uhlovodíků jako chladiv. Tyto chladiva obsahující fluor mají vysoký potenciál globálního oteplování. Podle nařízení Evropského parlamentu a Rady EU č.517/2014 bude pro komerční chladicí a mrazicí zařízení platit od 1. ledna 2020 zákaz použití chladiv s $GWP \geq 2500$, které jsou nově vyrobené a jejich náplň je 40 t ekv. CO_2 a více. Chladivo R404A má $GWP=3922$ a hranice 40 t ekv. CO_2 odpovídá náplni o hmotnosti 10 kg. Toto chladivo je jedním z nejrozšířenějších v oblasti komerčního chlazení, ale s blížícím se termínem zákazu použití je snaha o jeho nahrazení jiným ekologičtějším zástupcem. Chladivo R448A má $GWP=1386$ a mezní hodnotě náplně 40 t ekv. CO_2 odpovídá množství 29 kg. Současně je běžnou náhradou za R404A a s jeho použitím je možné počítat bezpečně do roku 2022, a ve formě recyklovaných a regenerovaných chladiv by mělo být možné použití do roku 2030. Legislativní dokumenty se v tomto odvětví stále mění a doplňují. Trh s chladivy je velmi rozmanitý, výrobci stále představují nové směsi. Příznivě nízkých hodnot GWP dosahují např. čisté uhlovodíky nebo hydrofluoro-olefiny, které ale většinou ztrácí na popularitě u veřejnosti kvůli hořlavosti.

V praktické části je nejprve představeno chladicí zařízení. Je uvedeno schéma okruhu a popis jednotlivých komponent a měřicího zařízení. Všechna měření byla provedena nejprve s náplní 6,35 kg chladiva R404A a poté s 6,1 kg chladiva R448A. Rozdílná hmotnost náplně vychází ze snahy nastavit přehřátí a podchlazení u obou chladiv na stejnou hodnotu a bylo zjištěno experimentálně. Testování probíhalo pro tři kondenzační teploty 30, 35 a 40°C, a tři vypařovací teploty -8, -7 a -6°C ve zkušební klimatické komoře, ve které byla nastavena teplota na 26°C. Malý rozptyl vypařovacích teplot odráží nejčastější vypařovací teploty nastavené pro provoz daného nábytku Maxis



83.C4 DL v reálném provozu. Po nastavení požadovaných teplot a ustálení hodnot se provedl 12 hodinový test.

Pomocí teplotních, voltových, ampérových čidel a wattmetru rozmístěných v chladicím okruhu jsou zaznamenány měřené veličiny programem Profisignal a následně vyhodnoceny pomocí softwaru Refrigerant a Coil PC 6.33.

Obě chladiva jsou zeotropní směsi, u kterých je běžný nežádoucí teplotní skluz v průběhu kondenzace a vypařování. Oproti chladivu R404A, který má téměř zanedbatelný teplotní skluz o velikosti přibližně 0,5 K, má chladivo R448A podstatně větší skluz přibližně 5,7 K. Vyšších hodnot chladicího faktoru EER dosahuje pro všechna měření chladivo R448A, což je způsobeno hlavně nižší potřebou elektrického příkonu. Hodnoty změřené wattmetrem na kompresoru udávají přibližně o 7-10% nižší příkon při použití chladiva R448A než pro chladivo R404A. Spotřeba elektrické energie kompresoru v kWh byla kalkulována jak pomocí hodnot z wattmetru tak pomocí vzorce vycházejícího z normy ČSN EN ISO 23953-2, ale v obou případech je výsledkem nižší spotřeba u chladiva R448A. Teplota na výtlaku kompresoru dosahuje vyšších hodnot pro chladivo R448A. Vyšší hodnoty součinitele přestupu tepla má chladivo R404A, ty se pohybují mezi 2000~2650 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$], zatímco chladivo R448A dosahuje pouze hodnot 1670~1900 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$]. Kalkulace faktoru TEWI podává souhrnné ekologické zhodnocení chladiv. Vystihuje kompletní ekvivalentní produkci oxidu uhličitého během životnosti zařízení. Výsledky hodnotí chladivo R448A jako lepší variantu z hlediska vlivu na životní prostředí, faktor TEWI vychází přibližně o 16% menší než u chladiva R404A. Na závěr je porovnán model použitého výparníku s alternativními variantami se záměrem použití menších trubek a dosažení tak úspory za materiál. Povedlo se zhotovit model, který by dosahoval velmi podobných výkonů, a zároveň jeho konstrukcí by se ušetřilo okolo 25% nákladů za materiál.



Seznam použité literatury

- [1] PETRÁK, Jiří a Miroslav PETRÁK. *Tepelná čerpadla*. Praha: České vysoké učení technické v Praze - fakulta strojní, 2004. ISBN 80-01-03126-8.
- [2] Chladiva - úvod, definice, historie. In: *TZBinfo* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/13626-chladiva-uvod-definice-historie>
- [3] BROŽ, Jiří. *Svaz chladicí a klimatizační techniky: Nová chladiva*. Praha: Odborná konference SCHKT, 2014.
- [4] Classification of refrigerants. In: *International Institute of refrigeration* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://www.iifir.org/userfiles/file/webfiles/summaries/Refrigerant_classification_EN.pdf
- [5] Refrigerant Glide and Effect on Performances Declaration. *Asercom* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.asercom.org/sites/default/files/en_guideline_glide_effect_sept_2015.pdf
- [6] Co přináší Kjótský protokol. *Ekolist* [online]. [cit. 2019-04-23]. ISSN 1802-9019. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/co-prinasi-kjotsky-protokol>
- [7] Vídeňská úmluva na ochranu ozonové vrstvy a Montrealský protokol o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/videnska_umluva_montrealsky_protokol_dokument
- [8] Informace pro techniky a uživatele chladicích a klimatizačních zařízení a tepelných čerpadel obsahujících fluorované skleníkové plyny. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/chladici_klimatizacni_technika_erpada_informace/\\$FILE/OOO_E_Guidance%20RAC_CZ_20150420.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/chladici_klimatizacni_technika_erpada_informace/$FILE/OOO_E_Guidance%20RAC_CZ_20150420.pdf)
- [9] GARRY, Michael. In reversal, IEC approves increase of charge limit for flammable refrigerants. *Hydrocarbons21* [online]. 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://hydrocarbons21.com/articles/8994/in_reversal_iec_approves_increase_of_charge_limit_for_flammable_refrigerants
- [10] Genetron R404A. *Honeywell* [online]. 2007 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2013/03/honeywell-genetron-404a-technical-datasheet.pdf>



-
- [11] Solstice N40. *Honeywell* [online]. 2014 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2015/03/Solstice-N40-TDS-141216-vF.pdf>
- [12] PACILLO, John. U.S. International Trade Commission Staff Conference [online]. In: . 2016 [cit. 2019-05-2]. Dostupné z: https://www.usitc.gov/press_room/documents/testimony/731_1313_005.pdf
- [13] BUCHWALD, Dr.H., J. HELLMANN, H. KÖNIG a C. MEURER. *Solkane - Pocket Manual: Refrigeration and Air-Conditioning Technology*. Hannover. Dostupné také z: https://lms.i-know.com/pluginfile.php/28923/mod_resource/content/158/Solvay%20Pocket%20Manual.pdf
- [14] Bitzer Output Data. Bitzer Software [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.hosbv.com/data/specifications/6930_6930.pdf
- [15] Katalog 2000: Komponenten für Gewerbekälte- und Klimaanlageanlagen. Dänemark: Danfoss.
- [16] Interní podklady firmy Carrier Refrigeration Operation Czech Republic s.r.o.
- [17] HONEYWELL. *Katalog Honeywell: Smart refrigerants selection*. 2016.
- [18] *Nářízení Evropského parlamentu a Rady EU: O fluorovaných skleníkových plynech a o zrušení nařízení (ES) č. 842/2006*. In: . 2014, ročník 2014, číslo 517.
- [19] ČSN EN ISO 23953-2: Distribuční chlazený nábytek - Část 2: Klasifikace, požadavky a zkušební podmínky. 2016.



Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Graf závislosti tlaku na entalpii pro azeotropní chladiva (nahore),.....	17
Obrázek 2-2 Graf závislosti tlaku na entalpii a daném podchlazení pro zeotropní chladiva [5]...	18
Obrázek 2-3 Tabulka zákazů podle Nařízení Evropského parlamentu a Rady č.517/2014 [8]	23
Obrázek 2-4 3D model molekuly 1,1,1,2-tetrafluoretan	27
Obrázek 3-1 Schéma chladicího okruhu	29
Obrázek 3-2 Kompresor Bitzer.....	30
Obrázek 3-3 Kondenzátor Swep	31
Obrázek 3-4 Vodní ventil Johnson Controls (vlevo), řez ventilem (vpravo) [16]	32
Obrázek 3-5 Tlaková nádoba OCS Cold innovation & technologies	32
Obrázek 3-6 Výměník trubka v trubce Danfoss v dolní části, průhledítka a filtrdehydrátor Danfoss v horní části.....	33
Obrázek 3-7 Průtokoměr Siemens	34
Obrázek 3-8 Elektromagnetický ventil Danfoss	35
Obrázek 3-9 Řez termostatickým expanzním ventilem [16].....	36
Obrázek 3-10 Část výparníku	37
Obrázek 3-11 Elektronický ventil Danfoss s izolací.....	38
Obrázek 3-12 Měřicí centrála Delphin Technology.....	38
Obrázek 3-13 Chladicí nábytek Maxis 83.C4 DL.....	39
Obrázek 3-14 Výměna chladiva.....	41
Obrázek 3-15 Graf závislosti chladicího výkonu na čase	42
Obrázek 4-1 Graf závislosti teplotního skluzu na druhu chladiva a podmínkách měření	44
Obrázek 4-2 Graf závislosti EER na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=30^\circ\text{C}$	45
Obrázek 4-3 Graf závislosti EER na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=35^\circ\text{C}$	45
Obrázek 4-4 Graf závislosti EER na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=40^\circ\text{C}$	45
Obrázek 4-5 Graf závislosti REC na vypařovací a kondenzační teplotě	47
Obrázek 4-6 Graf závislosti výtlačné teploty na teplotě vypařovací a kondenzační.....	49
Obrázek 4-7 Geometrické uspořádání trubek ve výparníku.....	49
Obrázek 4-8 Výsledky z programu Coil PC 6.33, pro R404A $t_o=-7^\circ\text{C}$, $t_k=35^\circ\text{C}$	50
Obrázek 4-9 Výsledky z programu Coil PC pro R448A, $t_o=-7^\circ\text{C}$, $t_k=35^\circ\text{C}$	51
Obrázek 4-10 Graf součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici v trubkách, chladivo R404A, $t_o=-7^\circ\text{C}$, $t_k=35^\circ\text{C}$	52
Obrázek 4-11 Graf součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici v trubkách, chladivo R448A, $t_o=-7^\circ\text{C}$, $t_k=35^\circ\text{C}$	52
Obrázek 4-12 Graf závislosti součinitele α_{\max} na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=30^\circ\text{C}$...	53
Obrázek 4-13 Graf závislosti součinitele α_{\max} na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=35^\circ\text{C}$...	53
Obrázek 4-14 Graf závislosti součinitele α_{\max} na vypařovací teplotě při konstantní $T_k=40^\circ\text{C}$	53
Obrázek 4-15 Geometrické uspořádání trubek ve výparníku se 4 nástřiky a 16 trubkami	57



Seznam příloh

Příloha 1: Výsledky testů s chladivem R404A

Příloha 2: Výsledky testů s chladivem R448A



Příloha 1: Výsledky testů s chladivem R404A

		R404A								
vypařovací teplota	°C	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-6	-6	-6
kondenzační teplota		30	35	40	30	35	40	30	35	40
teplota v místnosti	°C	26.4	26.4	26.4	26.0	26.0	26.0	26	26.0	26.0
vlhkost v místnosti	%rH	55.4	55.8	55.5	55.1	55.5	55.5	55.4	55.5	55.4
řídící čidla										
R2	°C	-1.3	-1.1	-0.5	-0.2	-0.3	-0.2	0.2	0.0	0.1
R4	°C	5.2	5.6	5.9	5.9	5.9	5.9	6.1	6.2	6.2
R1	°C	12.2	13.8	13.8	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.8
TEV										
Teplota in	°C	23.6	27.8	32.3	24.2	28.4	33.7	22.7	27.1	32.1
Teplota out	°C	1.9	4.0	6.3	2.2	4.2	6.4	1.3	3.3	5.2
rozdíl tlaků	Bar	9.7	11.5	13.2	9.5	9.5	14.1	9.6	9.5	9.5
entalpie škrčení	kJ·kg ⁻¹	87	93	100	88	94	103	86	92	100
kvalita páry	---	0.27	0.31	0.35	0.26	0.30	0.35	0.24	0.28	0.33
výparník										
tlak vypařovací	bar	4.6	4.6	4.7	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	5
teplotní skluz	K	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
teplota vypařovací - střední	°C	-8.3	-8.4	-7.9	-7.2	-7.2	-6.9	-6.2	-6.2	-5.9
vlhkost in	% rH	91	91	91	91	91	91	91	91	91
teplota chladiva in	°C	-7.2	-7.1	-6.5	-6.3	-6.2	-5.7	-5.3	-5.5	-5.1
teplota chladiva out	°C	-6.9	-6.9	-6.3	-5.6	-5.9	-5.6	-5.1	-5.0	-4.6
ΔT chladiva	K	0.3	0.2	0.2	0.7	0.3	0.1	0.2	0.5	0.5
teplota na tykavce	°C	1.9	2.9	3.2	3.7	3.4	3.1	2.9	2.9	3.5
přehřátí	K	9.9	11.0	10.9	10.7	10.3	9.7	8.9	8.9	9.2
entalpie in	kJ·kg ⁻¹	89	95	103	89	94	105	87	94	102
entalpie na tykavce	kJ·kg ⁻¹	224	222	225	225	225	225	224	224	225
Δh chladiva	kJ·kg ⁻¹	135	127	123	136	131	120	137	130	122
průtok chladiva	kg·h ⁻¹	225	240	229	199	221	245	211	223	234
chladicí výkon	kW	8.3	8.5	7.7	7.4	7.8	9.0	8.8	8.9	8.8
teplota vzduchu in	°C	7.3	7.6	7.7	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.1
teplota vzduchu out	°C	-2.7	-2.5	-2.0	-1.6	-1.6	-1.4	-0.9	-1.0	-1.2
ΔT vzduchu	K	10.0	10.1	9.7	9.4	9.5	9.3	8.9	9.0	9.3
α _{max}	W·m ⁻² ·K ⁻¹	2238	2366	2289	2001	2226	2648	2353	2443	2557
kvalita páry při α _{max}	---	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7



Příloha 2: Výsledky testů s chladivem R448A

		R448A								
vypařovací teplota	°C	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-6	-6	-6
kondenzační teplota		30	35	40	30	35	40	30	35	40
teplota v místnosti	°C	26.1	26.1	26.2	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1
vlhkost v místnosti	%rH	55.4	55.5	55.6	55.5	55.4	55.5	55.4	55.4	55.5
řídící čidla										
R2	°C	-0.9	-0.8	-0.4	0	0.1	0.2	0.6	0.6	0.7
R4	°C	5.6	5.6	5.9	6	6	6.2	6.5	6.6	6.7
R1	°C	13.7	13.7	13.8	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7
TEV										
Teplota in	°C	22.2	25.9	29.3	22.3	26.5	31	21.8	27.4	31.2
Teplota out	°C	-2.0	-0.5	0.9	-1.7	-0.2	1.4	-1.8	0.2	1.6
rozdíl tlaků	Bar	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
entalpie škrcení	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	87	93	98	87	94	101	87	95	101
kvalita páry	---	0.22	0.25	0.27	0.22	0.25	0.28	0.21	0.25	0.28
výparník										
tlak vypařovací	bar	4.2	4.2	4.2	4.4	4.4	4.4	4.5	4.5	4.5
teplotní skluz	K	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
teplota vypařovací - střední	°C	-8.2	-8.1	-8	-7	-7	-6.9	-6.1	-6	-6
vlhkost in	% rH	91	91	91	91	91	91	91	91	91
teplota chladiva in	°C	-8.5	-8.2	-7.9	-7.4	-7.2	-6.9	-6.7	-6.4	-6.1
teplota chladiva out	°C	-4.7	-4.7	-3.9	-3.8	-3.7	-3.2	-2.8	-2.7	-2.6
ΔT chladiva	K	3.8	3.5	4.0	3.6	3.5	3.7	3.8	3.7	3.5
teplota na tykavce	°C	3.8	3.5	3.8	3.4	3.7	5	5.2	5.1	4.9
přehřátí	K	9.6	9.3	9.5	8	8.3	9.6	9	8.9	8.6
entalpie in	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	89	95	100	89	96	104	88	97	104
entalpie na tykavce	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	261	261	261	261	261	262	262	262	262
Δh chladiva	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	173	166	161	172	165	158	174	164	158
průtok chladiva	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	156	172	179	165	172	176	157	167	173
chladicí výkon	kW	8.0	8.5	8.6	8.5	8.5	8.4	8.2	8.2	8.2
teplota vzduchu in	°C	7.6	7.7	7.8	7.8	7.8	8	8.3	8.3	8.3
teplota vzduchu out	°C	-2.4	-2.3	-2	-1.4	-1.3	-1.1	-0.4	-0.4	-0.4
ΔT vzduchu	K	10.0	10.0	9.8	9.2	9.1	9.1	8.7	8.7	8.7
α_{\max}	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	1674	1818	1904	1778	1818	1869	1734	1798	1855
kvalita páry při α_{\max}	---	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.72	0.7	0.7

