



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE KLIMATICKÉ KOMORY

DESIGN OF CLIMATIC CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF FRÝZA

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Novák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce klimatické komory

v anglickém jazyce:

Design of climatic chamber

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh klimatické komory s nucenou cirkulací vzduchu. Požadovaný objem komory je přibližně 10 l. Zařízení musí umožňovat plynule regulovat teplotu v rozsahu -10 °C až +50 °C a relativní vlhkost vzduchu od 10 % do 90 %.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Návrh konstrukčních řešení
5. Výsledné konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkres sestavení, digitální data

Typ práce: konstrukční; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

- [1] Pavelek, M. a kol., Termomechanika. Učební texty vysokých škol. VUT FSI, Brno, 2011.
- [2] BERGMAN, T a Frank P INCROPERA. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011, xxiii, 1048 p. ISBN 9780470501979.
- [3] BARNES, I a Krzysztof J RUDZINSKI. Environmental simulation chambers: application to atmospheric chemical processes. 7th ed. Dordrecht: Springer, 2006, xiii, 457 p. NATO science series. ISBN 14-020-4232-9.
- [4] SHIGLEY, J. E, MISCHKE, Ch. R, BUDYNAS, R. G. KONSTRUOVÁNÍ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ. VUTIUM, 2008. 1300 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Frýza

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 8.11.2013

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí klimatické komory, která umožňuje plynulou změnu teploty vzduchu v rozmezí -10 až 50 °C a plynulou změnu relativní vlhkosti vzduchu v rozmezí 10 až 90 %. Komora bude napojena na optický tribometr nebo na Mini Traction Machine (MTM). Obě tyto zařízení slouží pro zkoumání tribologických procesů v laboratorních podmínkách. Klimatická komora bude tyto laboratorní podmínky více přibližovat těm reálným, a to změnou teploty a vlhkosti vzduchu. V práci je uveden návrh jednotlivých klimatických jednotek, návrh uspořádání těchto jednotek a následné konstrukční řešení celého zařízení s důrazem na jednoduchou konstrukci, nízké náklady výroby, smontovatelnost a malé rozměry celé konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Klimatická komora, konstrukce, ohřívač, chladič, zvlhčovač, odvlhčovač

ABSTRAKT

This bachelor thesis deals with the construction of climatic chamber, which allows continual change of temperature of air within the range of -10 to 50 °C and continual change of relative humidity of air within the range of 10 to 90 %. The chamber is going to be connected to optical tribometer or to Mini Traction Machine (MTM). Both these devices serve for observation of tribological processes in laboratory conditions. Climatic chamber is going to approximate these laboratory conditions more to the real ones by the modification of temperature and air humidity. In the thesis there is stated a concept of particular climatic units, a concept of the arrangement of these units and consecutive constructional solving of the whole device with the emphasis on simple construction, low charges of production, assembly and small proportions of the whole construction

KEY WORDS

Climatic chamber, construction, heater, cooler, humidifier, dehumidifier

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, P. *Konstrukce klimatické komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 75 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Frýza.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Konstrukce klimatické komory* vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Josefa Frýzy a v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Josefu Frýzovi za cenné rady a trpělivost v průběhu řešení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu a trpělivost nejen při řešení bakalářské práce, ale i v průběhu celého studia.

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	13
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
1.1 Klimatická komora	14
1.1.1 Použití	14
1.1.2 Princip funkce	15
1.2 Druhy klimatických komor	15
1.2.1 Tepelná komora	15
1.2.2 Vlhkostní komora	15
1.2.3 Stolová testovací komora	15
1.2.4 Teplotní komora šoková	16
1.2.5 Vibrační komora	17
1.2.6 Tlaková komora	17
1.2.7 Klimatická komora Walk-in	17
1.2.8 Klimatická komora Drive-in	17
1.3 Ohřev vzduchu	19
1.3.1 Druhy ohřivačů vzduchu	19
1.4 Chlazení vzduchu	20
1.4.1 Suché chlazení	20
1.4.2 Mokrý chlazení	20
1.4.3 Druhy chladičů vzduchu	21
1.4.4 Peltierův článek	21
1.5 Vlhčení vzduchu	22
1.5.1 Parní zvlhčovače vzduchu	23
1.5.2 Ultrazvukové zvlhčovače vzduchu	24
1.5.3 Zvlhčovače vzduchu se studeným odparem	24
1.6 Odvlhčování vzduchu	24
1.6.1 Kondenzační odvlhčovač	25
1.6.2 Adsorpční odvlhčovač	26
1.7 Vzduchotechnika	27
1.7.1 Přirozená cirkulace	27
1.7.2 Nucená cirkulace	28
1.7.3 Kombinovaná cirkulace	28
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	29
3 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ	33
3.1 Výběr ventilátoru pro nucenou cirkulaci vzduchu	33
3.1.1 Průmyslový ventilátor do potrubí 100 VKO L	33
3.1.2 Ventilátor NOCTUA NF-A4x10 FLX	33
3.2 Návrh ohřivače	34
3.2.1 Výpočet minimálního výkonu bez tepelných ztrát	34
3.2.2 Výpočet tepelných ztrát při ohřevu	35
3.2.3 Výpočet celkového výkonu ohřivače	40
3.2.4 Volba ohřivače	40
3.3 Návrh chladiče	43
3.3.1 Výpočet minimálního výkonu chladiče bez ztrát	43
3.3.2 Výpočet tepelných ztrát při chlazení	43

3.3.3 Výpočet celkového výkonu chladiče	43
3.3.4 Volba chladiče	43
3.3.5 Pasivní chladič na studené straně	44
3.3.6 Aktivní chladič na teplé straně	46
3.4 Návrh zvlhčovače	47
3.4.1 Výpočet minimálního vodního výkonu	48
3.4.2 Výpočet potřebného množství vodní páry přivedené do vzduchu	48
3.4.3 Výpočet minimálního výkonu topného tělesa zvlhčovače	48
3.4.4 Volba topného tělesa zvlhčovače	49
3.5 Návrh odvlhčovače	49
3.5.1 Výpočet minimálního výkonu odvlhčovače	49
3.5.2 Volba odvlhčovače článku	50
3.6 Návrh uspořádání jednotlivých komponent	50
3.6.1 Varianta 1	50
3.6.2 Varianta 2	51
3.6.3 Varianta 3	51
4 VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	52
4.1 Volba nejvhodnější varianty	52
4.2 Konstrukce klimatického zařízení	52
4.3 Konstrukce klimatické komory pro optický tribometr	53
4.4 Konstrukce klimatické komory pro MTM	53
4.5 Uspořádání klimatických jednotek	54
4.6 Řešení izolace	55
4.7 Konstrukční řešení ohřívací jednotky	56
4.8 Konstrukční řešení chladící (odvlhčovací) jednotky	57
4.9 Konstrukční řešení zvlhčovací jednotky	58
4.10 Konstrukční řešení jednotky s ventilátorem	60
4.11 Rozsah dosažitelných hodnot	60
4.12 Skutečné časy potřebné k úpravě vzduchu	61
4.12 Ekonomická rozvaha	62
5 DISKUZE	63
6 ZÁVĚR	64
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	68
9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	72
10 SEZNAM TABULEK	74
11 PŘÍLOHY	75

ÚVOD

S rozvojem průmyslu rostly také nároky na výrobky z hlediska jejich životnosti a spolehlivosti. Výrobce takových výrobků, které podléhají těmto nárokům, je ze zákona povinen udávat jejich minimální životnost, a po tuto dobu je povinen zákazníkovi garantovat kvalitu a spolehlivost těchto výrobků. Aby si byl výrobce schopen ověřit životnost a spolehlivost svých výrobků, začaly se vyrábět zkušební zařízení, ve kterých se výrobky testují. Toto testovací zařízení se nazývá klimatická komora, která slouží k vytvoření určitých klimatických podmínek v daném prostoru a následnému udržení těchto podmínek po daný čas.

Nejtypičtější klimatické komory se používají ke změně teploty a vlhkosti vzduchu. Mohou však simulovat i jiné podmínky než je teplota a vlhkost vzduchu, a to např. vliv slunečního záření, vítr, vibrace, déšť, nadmořskou výšku (změnu tlaku), vliv prachu apod. Navození těchto podmínek se využívá při testování životnosti, spolehlivosti a funkčnosti různých druhů zařízení. Objem klimatizovaného prostoru může být různý, odvíjí se od rozměrů zkoušeného zařízení. Objem se pohybuje řádově od několika litrů až po komory, do kterých se vejde celý osobní automobil. Klimatická komora je tedy zkušební zařízení, ve kterém probíhají zrychlené zkoušky různých druhů zařízení, díky kterým je možno analyzovat vady těchto zařízení a následně tyto vady odstranit.

V této bakalářské práci budeme řešit konstrukci klimatické komory, která bude umožňovat plynulou změnu teploty a vlhkosti vzduchu. Tato komora bude umožňovat zkoumání probíhajících procesů mezi mazanými kontaktními tělesy při změně klimatických podmínek, což nám umožní se více přiblížit reálným provozním podmínkám.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Klimatická komora

Klimatické testovací komory se používají k zajištění spolehlivosti průmyslových produktů, hlavně elektronických předmětů, které jsou vystaveny jednomu nebo více klimatickým parametrům po určitou dobu. Klimatická komora umožňuje změnu klimatických podmínek, zejména změnu teploty a změnu vlhkosti vzduchu. Často obsahují analogový výstup, digitální výstup nebo video display s výsledky testů.

Některé klimatické komory vystavují testované součásti teplotám a vlhkostem v daném rozsahu a také jejich změnám, jiné monitorují emise ze zařízení, jako spalovací motory, za přísně stanovených klimatických podmínek. Také se vyrábějí komory pro elektro-dynamické a mechanické zkoušky vibrační strojních zařízení. Dalším typem klimatických komor jsou komory pro měření koroze, které monitorují vliv proměnných podmínek, jako je teplota, vlhkost, solná mlha a dešťová mlha. [1]

Parametry používané k určení výkonnosti klimatických komor:

- teplotní rozsah a rychlost změny teploty za jednotku času
- přesnost regulace teploty (udávaná ve stupních nebo v procentech)
- vlhkostní rozsah a rychlost změny relativní vlhkosti za jednotku času
- přesnost regulace vlhkosti (udávaná v procentech)
- kapacita komory (objem komory, který je k dispozici pro testování produktů) [1]

1.1.1 Použití

Klimatické komory se používají pro různé druhy testování, jako vyhodnocování prototypů, testování při výzkumu a vývoji, testování při výrobě, zrychlené zátěžové testování, testování spolehlivosti, analýza poruch a jiné zkoušky, kde je potřeba klimatické simulace.

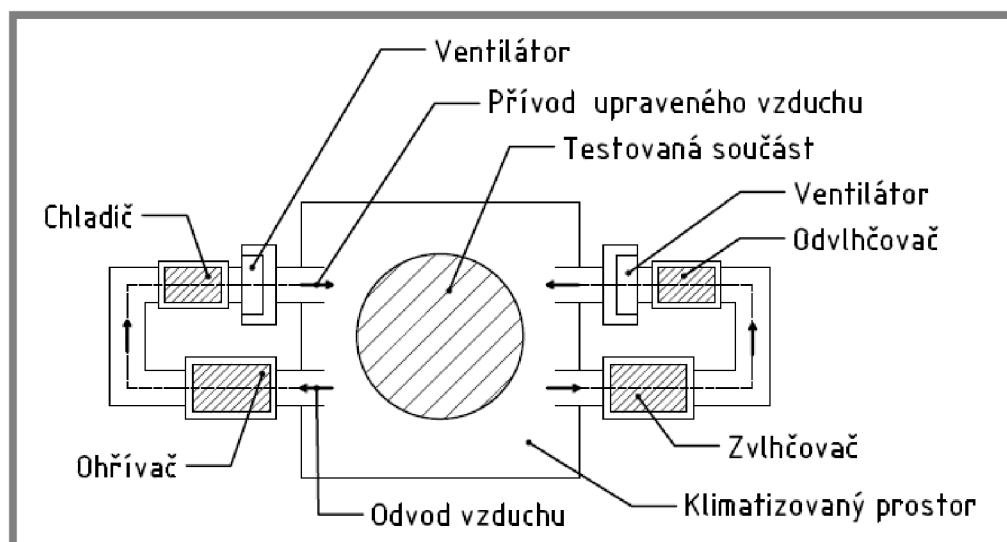
Komora může simulovat prakticky jakékoliv klimatické podmínky, jako je teplota, vlhkost, nadmořská výška (změna tlaku), vibrace, sluneční záření, vítr, déšť, prach apod.

Při vývoji produktů je důležité, aby výrobci byli schopni lokalizovat vady produktů ještě předtím, než se produkty dostanou na trh. Testováním produktů v klimatické komoře je možno:

- snížit potřebný čas k vývoji produktu
- zvýšit důvěru zákazníků
- zajištění kvality výrobků a spolehlivosti
- předpovědět životnost produktu
- snížit náklady
- zvýšit zisky
- snížit poruchovost výrobku [2]

1.1.2 Princip funkce

Na Obr. 1-1 je znázorněn princip funkce klimatické komory, která umožňuje plynulou změnu teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Z obrázku je patrné, že úprava vzduchu (chlazení/ohřev a vlhčení/odvlhčování) probíhá mimo pracovní prostor komory. Průtok vzduchu jednotlivými klimatickými jednotkami (chladič, ohřivač, zvlhčovač, odvlhčovač) je zajištěn pomocí ventilátorů, které v komoře vyvolávají nucenou cirkulaci vzduchu.



Obr. 1-1 Pracovní schéma klimatické komory [3]

1.2 Druhy klimatických komor

1.2.1 Tepelná komora

Reguluje teplotu a zkoumá efekty na produkt v rozsahu tepelných podmínek. Cyklování teploty může být provedeno v kombinaci se změnou vlhkosti, nadmořské výšky a vibrací.

1.2.2 Vlhkostní komora

Reguluje vlhkost a zkoumá vlivy této vlhkosti na produkt v rozsahu vlhkostních podmínek. Testování vlhkosti může být prováděno buď se změnou teploty, anebo bez změny teploty. [2]

1.2.3 Stolová testovací komora

Tyto komory se používají zejména v případech, kdy není k dispozici mnoho místa (laboratoře), nebo v případech, kdy je potřeba testovat malé předměty. Pro tyto komory jsou charakteristické malé rozměry, malá hmotnost, nízká hlučnost a možnost jednofázového připojení (230 V). Vyrábějí se do vnitřního objemu přibližně 160 litrů. Stolní testovací komory umožňují regulaci teploty a vlhkosti. Teplotní

rozsah bývá od -70 °C do 180 °C a vlhkostní rozsah bývá obvykle od 10 % do 95 %. [2], [4], [5]

Příklad komerční komory:

Jako příklad je uvedena stolová komora od firmy Thermotron, Model SM-1.0. Stolové komory od firmy Thermotron nabízejí flexibilitu, jednotnost a přesnost řízení potřebné pro efektivní testování různých výrobků. Tyto komory jsou ideální pro testování menších výrobků, jako jsou počítačové komponenty, automobilové senzory nebo mobilní telefony. Tyto komory kombinují dobrý výkon při malých rozměrech. Komory od firmy Thermotron jsou k dispozici v několika velikostech. Tyto komory lze namontovat do stojanu nebo mohou být jednoduše upevněny na laboratorní stůl.

Parametry komory SM-1.0:

Objem: 25 litrů

Rozsah vlhkosti: 20 – 95 %RH (relativní vlhkost vzduchu)

Rozsah teploty: -40 – 130 °C [6]



Obr. 1-2 Komora od firmy Thermotron, model SM-1.0 [6]

1.2.4 Teplotní komora šoková

Zatěžuje testované vzorky teplotním šokem, což znamená, že součást je zatěžována rychlými změnami teplot (do 10 sekund), v teplotním rozsahu od -80 do +220 °C. [7]

Existují dva základní typy šokových komor:

Typ vzduch-vzduch

Dvouzónová komora, ve které se testovaný vzorek pohybuje mezi horkou a studenou částí pomocí speciální zdviže („výtahu“).

Typ kapalina-kapalina

Komora je vybavena horkou a studenou lázní, mezi kterými je vzorek přesouván pomocí speciálního koše.[8]

1.2.5 Vibrační komora

1.2.5

Tyto komory mají vyjímatelné podlahy a jsou kompatibilní s různými elektrodynamickými budiči vibrací – vibrátory, které mohou generovat vibrace ve směru horizontálním i vertikálním. Testovaný vzorek je vystaven změně teploty a vlhkosti ve spojení s vibracemi.

1.2.6 Tlaková komora

1.2.6

Vytváří efekt nízkého tlaku (vysoké nadmořské výšky). Může nasimulovat tlak v nadmořské výšce až 61 000 m.n.m. [2]

1.2.7 Klimatická komora Walk-in

1.2.7

Je to klimatizovaná místnost, která může mít téměř jakékoliv rozměry. Komora Walk-in se používá pro testování rozměrných vzorků, které se nevejdou do komory standardní velikosti. Běžný rozsah vlhkosti je 10 až 90 % R.H. a běžný rozsah teplot je od -60 do +95 °C. [9]



Obr. 1-3 Walk-in komora [9]

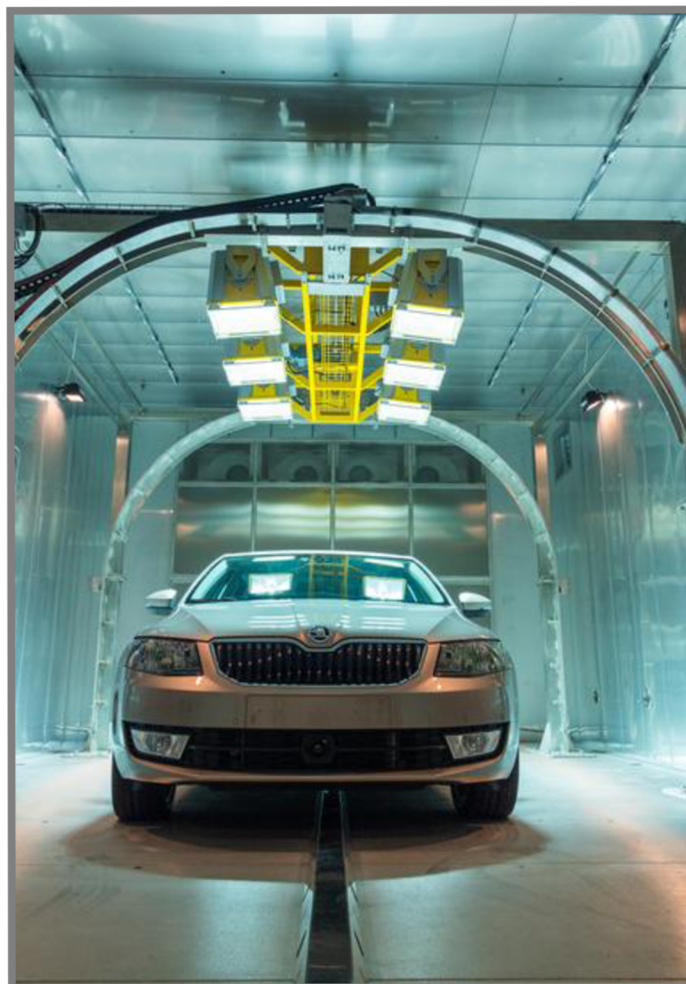
1.2.8 Klimatická komora Drive-in

1.2.8

Tato komora je podobná Walk-in komoře, ale je určena výhradně pro testování vozidel. V této komoře se může simulovat teplota, vlhkost, vibrace a sluneční záření. Jedna taková komora je přímo na FSI, VUT v Brně. [2]

Tab. 1-1 Základní technické parametry Drive-in komory na FSI [10]

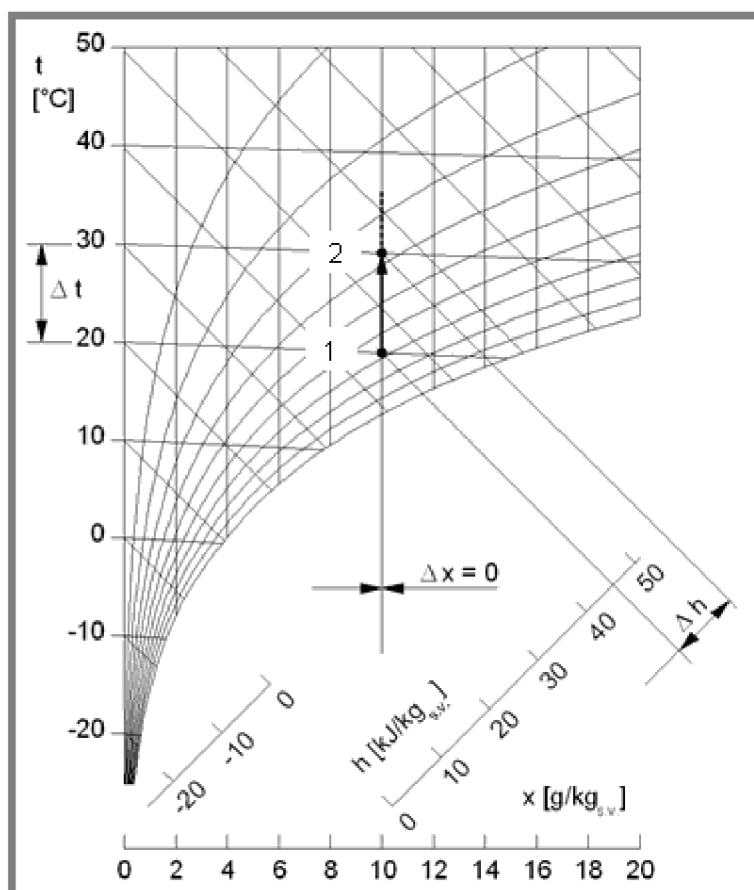
Teplotní rozsah (se solární simulací)	-10° - 50 °C
Teplotní rozsah (bez solární simulace)	-40° - 85 °C
Rychlost teplotní změny (IEC 60068-35-5)	+ - 1 °C
Vlhkostní rozsah (se solární simulací)	30 - 95 %RH
Vlhkostní rozsah (bez solární simulace)	30 - 60 %RH
Stabilita udržování vlhkosti	+ - 5 RH
Rosný bod	5° - 49 °C
Solární simulace	10 kW /1000 W/m ²



Obr. 1-4 Drive-in komora na FSI [10]

1.3 Ohřev vzduchu

Ohřev vzduchu probíhá za konstantní měrné vlhkosti (měrná vlhkost nám udává hmotnost vodní páry, která připadá na 1 kilogram suchého vzduchu). Mění se však relativní vlhkost vzduchu, která s rostoucí teplotou klesá (relativní vlhkost nám udává poměr hmotnosti vodní páry obsažené ve vzduchu a hmotnosti vodní páry, kterou by měl stejný objem vzduchu při stejné teplotě a tlaku, kdyby byl vodní párou plně nasycen, tj. kdyby obsahoval sytou vodní páru). [11]



Obr. 1-5 Průběh změny stavu vzduchu při ohřevu [12]

1.3.1 Druhy ohříváčů vzduchu

- **Vodní ohříváče** – Jsou to výměníky voda-vzduch. Nejčastěji bývají konstruovány jako lamelové (měděné trubky a hliníkové lamely), buď jako jednořadé, nebo víceřadé. Teplonosná látka je voda.
- **Parní ohříváče** – používají se zejména tam, kde je k dispozici pára. Jsou vhodné pro ohřev na vysoké teploty – mají velký výkon. Jsou více namáhány než vodní ohříváče (vyšší tlaky), a proto se většinou vyrábějí z ocelových trubek
- **Elektrické ohříváče** – používají se u malých zařízení, kde stačí mále výkony. Jako topné tělesa se používají různé tvary tyčí nebo spirál, jejichž tvary a rozměry se dají přizpůsobit dle potřeby. Regulace se dá provádět změnou

napětí, či proudu. Elektrické ohřivače nepotřebují mrazovou ochranu, což je velkou výhodou.

- **Chladivové ohřivače**
- **Plynové ohřivače** [13]

1.4 Chlazení vzduchu

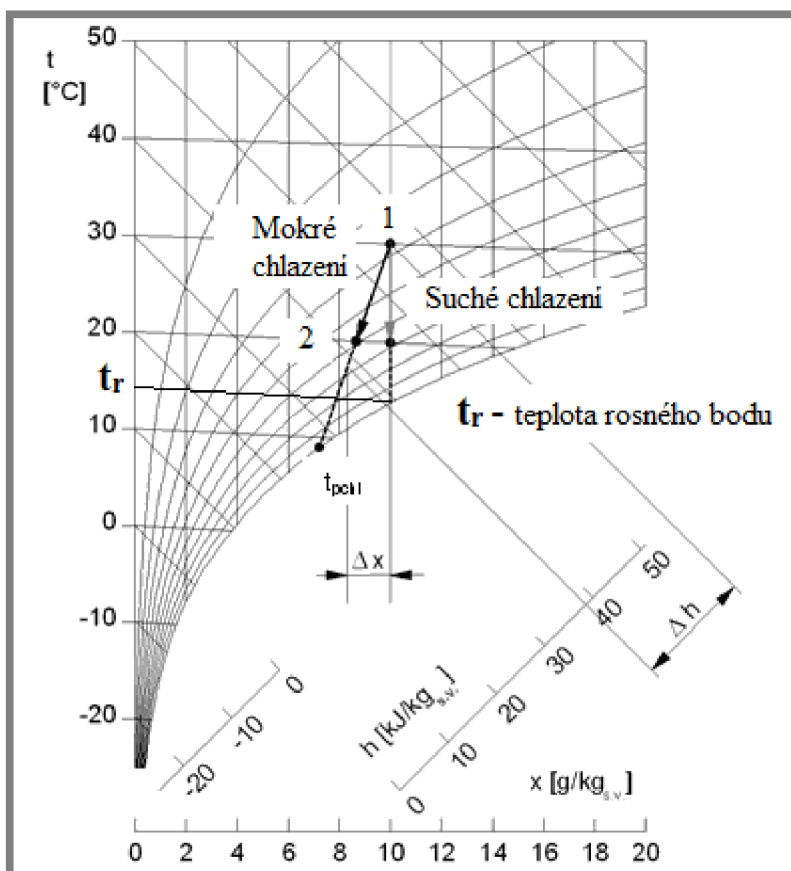
Rozlišujeme dva základní principy chlazení vzduchu. Chlazení suché a chlazení mokré (záleží na tom, jestli dochází, nebo nedochází ke kondenzaci).

1.4.1 Suché chlazení

Při suchém chlazení nedochází ke kondenzaci vodní páry, jelikož povrchová teplota výměníku je **vyšší** než teplota rosného bodu. Teplota rosného bodu je teplota, při které začíná kondenzovat vodní pára ze vzduchu, tj. teplota, při které je vzduch nasycen. Teplota rosného bodu je různá pro různé absolutní vlhkosti (hmotnost vodní páry v objemové jednotce vlhkého vzduchu). Čím je vyšší absolutní vlhkost, tím je i vyšší teplota rosného bodu a naopak. Jelikož při suchém chlazení nedochází ke kondenzaci vodní páry, tak měrná vlhkost je během chlazení konstantní.

1.4.2 Mokrý chlazení

Při mokřím chlazení dochází ke kondenzaci vodní páry, protože povrchová teplota chladiče je **nižší** než teplota rosného bodu. Jelikož dochází ke kondenzaci vodní páry, tak se mění i měrná vlhkost vzduchu. [11]



Obr. 1-6 Průběh změny stavu vzduchu při chlazení [12]

1.4.3 Druhy chladičů vzduchu

1.4.3

- **Vodní chladiče** – jsou to výměníky voda-vzduch (měděné trubky s hliníkovými lamelami). Nejčastěji bývají konstruovány jako lamelové (měděné trubky a hliníkové lamely), víceřadé (obvykle dvou až pětiřadé). Teplonosnou látkou je voda nebo nemrznoucí kapalina.
- **Přímé výparníky** – jsou to výměníky chladivo-vzduch. Před přímým výparníkem bývá umístěn škrtící ventil. Chladivo, které se vstříkuje do výparníku, se odpařuje a přes stěny výparníku odebírá teplo z chlazeného prostoru. Tyto výparníky dosahují vyšších chladičích výkonů a mohou dosahovat nízkých teplot. Jsou však náchylné k namrznání a jejich výkon se obtížně reguluje. Chladivo je chemická látka, nebo směs látek, která se používá v chladičím okruhu. Teplo odebírá při fázových přeměnách z plynného skupenství na kapalné a zpět. Při vypařování chladivo přijímá skupenské teplo z chlazeného prostoru a při kondenzaci toto teplo odevzdává v jiném místě chladičím okruhu. [13], [14]

1.4.4 Peltierův článek

1.4.4

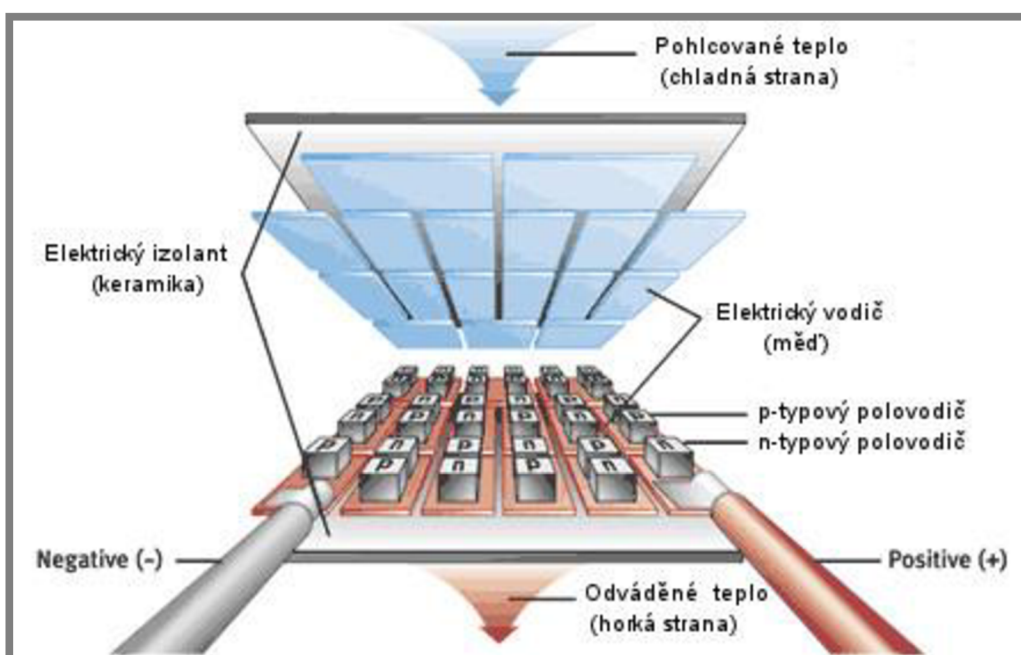
Pro chlazení prostoru o malém objemu je dostačující malý chladičící výkon chladiče. V těchto případech se používá chlazení pomocí Peltierových článků,

protože použití jiných chladičů je složité a neekonomické. Tento chladič pracuje na stejném principu jako všechny ostatní chladiče, a to tak, že přemísťuje teplo z jednoho místa na druhé (ze studené strany na teplou). Mezi výhody chlazení pomocí Peltierových článků patří nízká hlučnost, snadná a přesná regulace teploty, téměř neomezená životnost chladiče. Další výhodou je snadná a rychlá změna z chlazení na topení (změnou směru průchodu stejnosměrného proudu). Nevýhodou tohoto chlazení je vyšší spotřeba elektrické energie a nižší účinnost chlazení, proto se nevyužívají pro chlazení, kde je potřeba vyšších výkonů.

Princip funkce:

Peltierovy články využívají Peltierova jevu. Peltierův jev je jev, při kterém vzniká teplotní rozdíl ve spoji dvou různých vodičů při průchodu stejnosměrného proudu. Proudí-li proud jedním směrem, spoj se ochlazuje, proudí-li opačným směrem, spoj se ohřívá.

Peltierův článek se skládá ze dvou stran (chladné a teplé). Mezi těmito stranami jsou umístěny dva druhy polovodičů typu P a N, které jsou na jedné straně spojeny spojovacím můstkem. Z druhé strany je k nim přiváděn elektrický proud přes kontaktní plošky. Kontaktní plošky a spojovací můstek vyzařují nebo absorbují teplo (podle směru průchodu stejnosměrného proudu). [15]



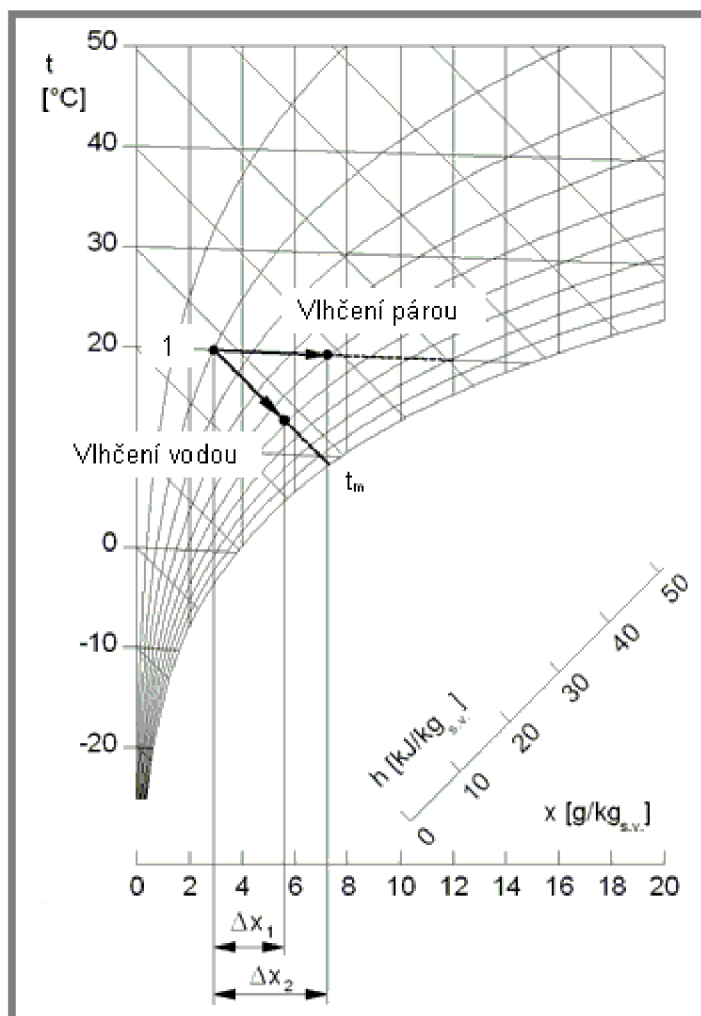
Obr. 1-7 Schematické znázornění Peltierova článku [16]

1.5 Vlhčení vzduchu

Vlhčení vzduchu se může provádět dvěma způsoby, a to buď vodou, anebo párou.

Vlhčení vzduchu vodou probíhá za konstantní entalpie ($h = konst.$). Jedná se tedy o adiabatický proces. Jestliže měrná vlhkost vzduchu roste, tak teplota vzduchu klesá. Tento jev lze v některých případech využít i ke chlazení.

Vlhčení vzduchu párou probíhá za teoreticky konstantní teploty (ve skutečnosti se teplota vzduchu mírně zvyšuje, ale z praktického hlediska je tato změna zanedbatelná). [12]



Obr. 1-8 Průběh změny stavu vzduchu při vlhčení vzduchu vodou a párou [12]

1.5.1 Parní zvlhčovače vzduchu

1.5.1

Jedná se o jednoduché, dobře regulovatelné zvlhčování vzduchu vodní parou (pára téměř neovlivňuje teplotu vzduchu). Ve větších klimatizačních zařízeních se pára přivádí z centrálního zdroje (parního kotle), v menších klimatizačních zařízeních je pára vyráběna přímo (elektrický ohřev). Skládá se z redukčního ventilu a z trubky s tryskami, kterými se pára vhná do zvlhčovací komory klimatizačního zařízení nebo přímo do vzduchovodu. Pára se dobře rozpouští ve vzduchu, z tohoto pohledu se tedy jedná o efektivní vlhčení, avšak při vysoké spotřebě elektrické energie. [17], [18]

1.5.2 Ultrazvukové zvlhčovače vzduchu

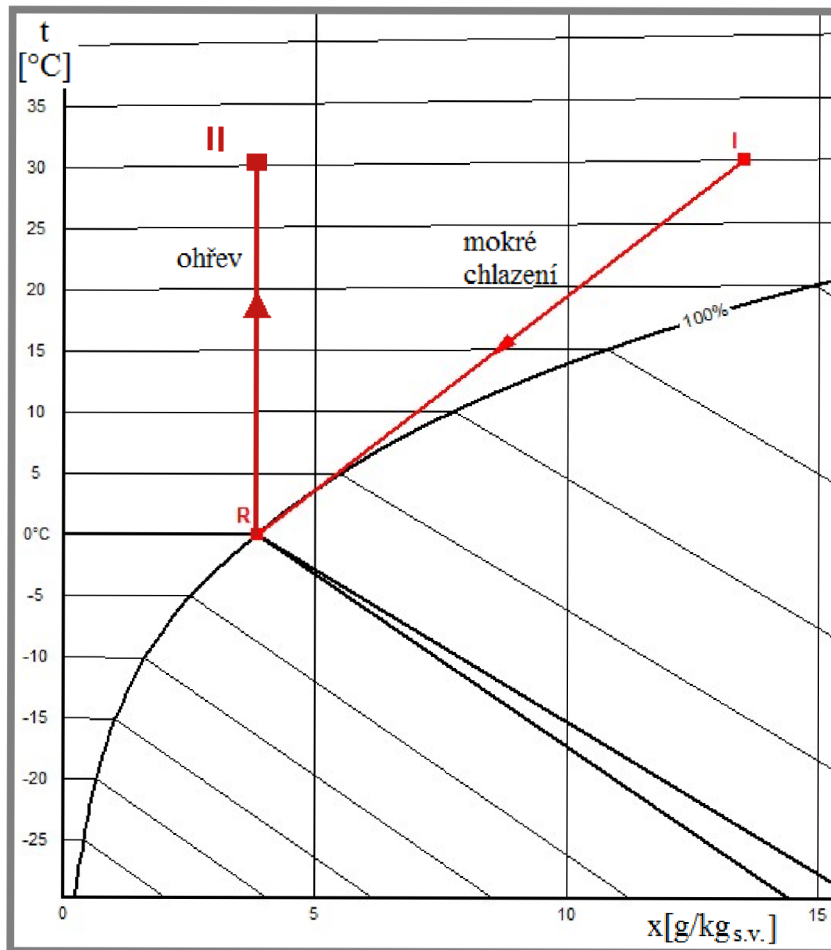
Hlavním komponentem ultrazvukového zvlhčovače je zvlhčovací jednotka. Z nádržky zvlhčovací jednotky je voda uvolněna v podobě mikroskopických kapek (o velikosti 1 až 3 μm) pomocí ultrazvukových vibrací. Ventilací systém tyto uvolněné mikroskopické kapky vhání do zvlhčovaného prostoru. Tyto zvlhčovače mají schopnost dosáhnout nejvyšších zvlhčovacích výkonů mezi zvlhčovači při nízké spotřebě energie. Jsou ovšem náchylné na tvrdou vodu (nutnost zařízení na změkčování vody). Pokud zvlhčovač neobsahuje bakteriální zařízení, je třeba měnit starou vodu za novou, aby se případné bakterie obsažené ve staré vodě nedostaly do zvlhčovaného prostoru. [18], [19]

1.5.3 Zvlhčovače vzduchu se studeným odparem

K odparu dochází pomocí filtračního tělesa (buď rotující kotouč – diskový zvlhčovač, nebo filtrační kazeta – deskový zvlhčovač), které nasává vodu z nádržky. Voda se z něj pak odpařuje a za pomoci ventilátoru se vhání do zvlhčovaného prostoru. Tyto zvlhčovače částečně čistí vzduch (jen od větších prachových částic a některých pylů). Jedná se o nejpřirozenější princip zvlhčování, a tak nemůže dojít k převlhčení vzduchu. Při zanedbaném čištění dochází ke vzniku bakterií v nádržce a jejich následné rozptýlení ve zvlhčováném prostoru. Proto je lepší, když zvlhčovač obsahuje antibakteriální zařízení. [18], [20]

1.6 Odvlhčování vzduchu

Odvlhčování vzduchu se může provádět dvěma způsoby. Buď kombinací mokrého chlazení a následným ohřevem na původní teplotu (kondenzační odvlhčování), nebo pomocí sorpčních vysoušečů. Nevýhodou kondenzačního odvlhčování je vysoká spotřeba energie. [12]

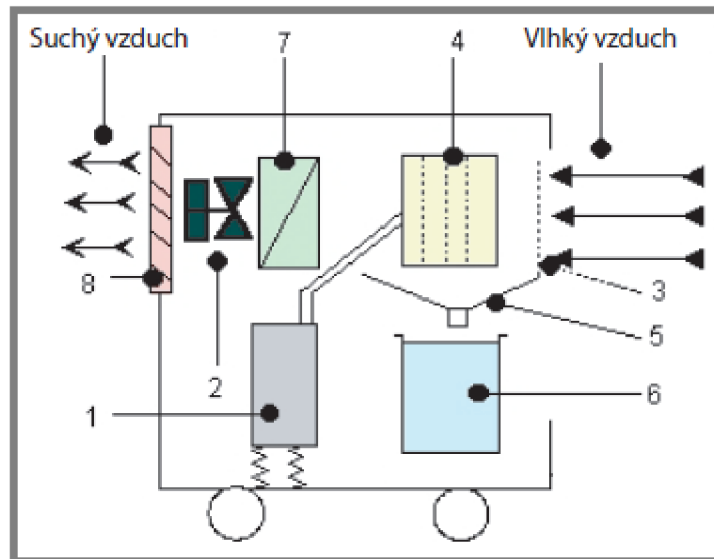


Obr. 1-9 Kondenzační odvlhčování [21]

1.6.1 Kondenzační odvlhčovač

1.6.1

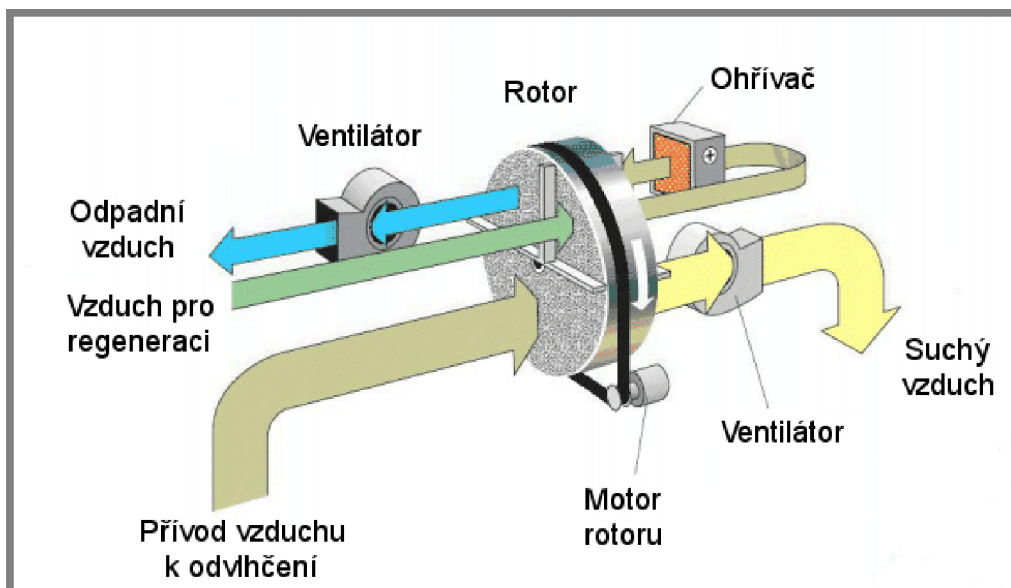
Vlhký vzduch je nasáván ventilátorem přes výparník, kde je ochlazen pod rosny bod, a proto kondenzuje na povrchu výparníku. Kondenzát odkapává do kondenzační vany, ze které dále stéká do zásobníku, který je umístěn přímo pod kondenzační vanou. Kondenzát je automaticky odčerpáván ze zásobníku pomocí čerpadla. Takto odvlhčený a ochlazený vzduch dále prochází kondenzátorem, kde je ohříván a následně vháněn zpět do vysušovaného prostoru. Teplota odvlhčeného vzduchu je vždy vyšší než teplota vzduchu v odvlhčovaném prostoru. Odvlhčování vzduchu o nižší teplotě než 10 °C je tímto kondenzačním způsobem neekonomické z důvodu snížení chladicího výkonu (sníží se rozdíl teplot mezi vzduchem a výparníkem). [22]



Obr. 1-10 Schéma kondenzačního odvlhčovače. 1-Kompresor, 2-ventilátor, 3-filtr, 4-výparník, 5-kondenzační vana, 6-zásobník na kondenzát, 7-ohřívač, 8-výpustní mřížka [22]

1.6.2 Adsorpční odvlhčovač

Vlhký vzduch je nasáván ventilátorem přes filtr a je veden přes rotující sorpční kolo, které na sebe váže vodu obsaženou ve vzduchu (dochází k adsorpci vody). Jako materiál sorpčního kola, který na sebe váže vodu, se nejčastěji používá silikagel (granulovitá, pórovitá forma oxidu křemičitého). Aby tento princip vysoušení mohl fungovat po delší dobu, je třeba sorpčního tělesa regenerovat, aby nebyla vyčerpána jeho sorpční kapacita. Regenerace probíhá současně s adsorpcí, takže se jedná o nepřetržité odvlhčování. Regenerace probíhá pomocí horkého vzduchu, který na sebe váže vlhkost obsaženou v sorpčním kole. Regenerační vzduch je nasáván z vnějšího prostředí a také je do něj následně odváděn. Adsorpční vysoušeč je schopen pracovat i za nízkých teplot a dosahovat při nich nízké hodnoty vlhkosti vzduchu. [23]



Obr. 1-11 Schéma adsorpčního vysoušeče [23]

1.7 Vzduchotechnika

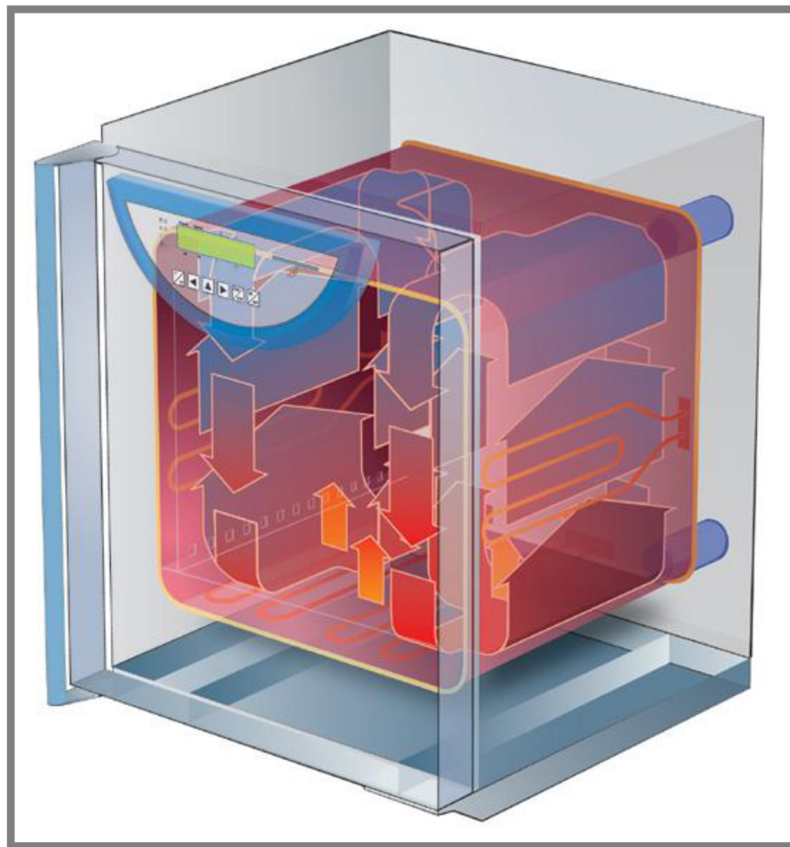
Vzduchotechnika nám zajišťuje přívod a odvod vzduchu (cirkulaci vzduchu) v daném prostoru.

1.7

1.7.1 Přirozená cirkulace

Přirozená cirkulace vzduchu funguje na principu fyzikálních jevů, jako je například rozdílná teplota (hustota) vzduchu v daném prostoru. Teplý vzduch má nižší hustotu než chladný, proto má teplý vzduch v uzavřeném prostoru tendenci stoupat a studený klesat, a díky tomuto jevu nám vzduch začne přirozeně cirkulovat.

1.7.1



Obr. 1-12 Znáornění přirozené cirkulace vzduchu [24]

1.7.2 Nucená cirkulace

Proudění vzduchu je zajištěno pomocí ventilátorů, které nám zaručují neustálé proudění vzduchu v daném prostoru.

1.7.3 Kombinovaná cirkulace

Kombinace nucené a přirozené cirkulace. Jedná se buď o přirozený přívod a nucený odvod vzduchu, nebo o nucený přívod a přirozený odvod vzduchu.

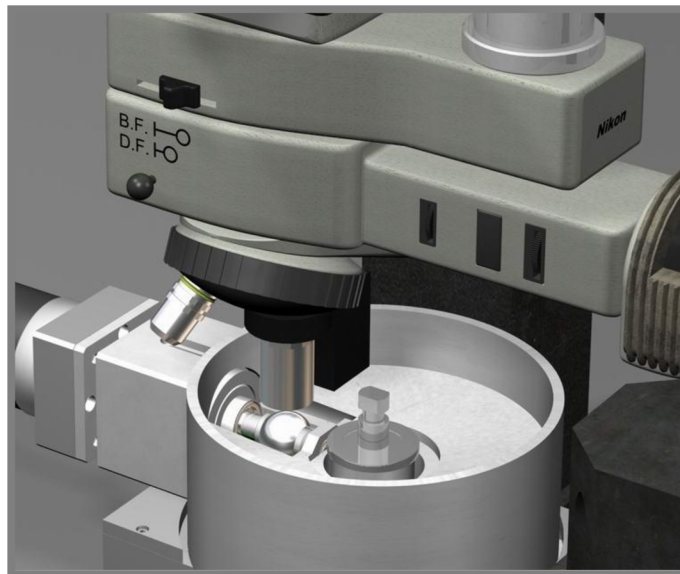
1.7.4 Ventilátory

Slouží k dopravě vzduchu do požadovaného prostoru. Podle směru průtoku plynu ventilátorem se ventilátory dělí na axiální, radiální, diagonální a diametrální. Jako pohon se nejčastěji používá elektromotor. Ventilátor může být spojen s motorem buď přes spojku, nebo přes převod (nejčastěji řemenový), nebo u malých ventilátorů může být spojen přímo s hřídelí elektromotoru. [17]

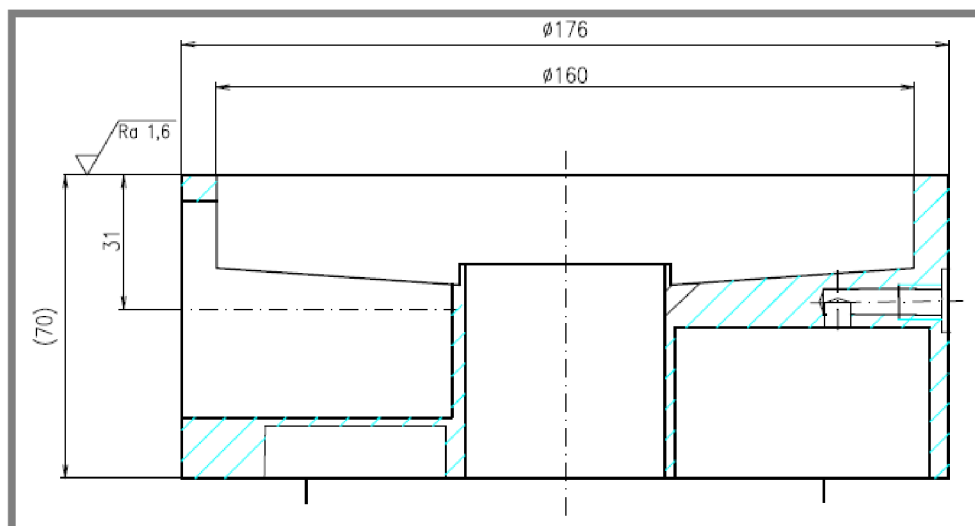
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

V současné době se v laboratořích Ústavu konstruování (ÚK) nacházejí zařízení pro zkoumání probíhajících procesů mezi mazanými kontaktními tělesy. Tribologické procesy tření, mazání a opotřebení jsou zde studovány při širokém spektru kontaktních a provozních podmínek. Tato práce se dotýká dvou typů laboratorních zařízení. Jedním z nich je optický tribometr vyvinutý na ÚK, který umožňuje pozorovat chování mazacího filmu a měřit tloušťku tohoto filmu pomocí metody kolorimetrické interferometrie. Pro funkci této metody je potřebné, aby jedno z kontaktních těles bylo transparentní a druhé mělo odrazivý povrch. Zařízení lze rozdělit na mikroskopový systém pro sledování kontaktu těles a mechanický tribologický simulátor, jenž realizuje vlastní kontakt těles v konfiguraci Ball-on-disk. Kontaktními tělesy jsou tedy skleněný disk a leštěná ocelová kulička, popř. soudeček. Druhým laboratorním zařízením je produkt firmy PCS Instruments s obchodním názvem Mini Traction Machine (MTM). MTM neobsahuje žádnou optickou soustavu, ale jak již název napovídá, slouží pro měření trakčních a třecích sil v mazaných či suchých kontaktech. Kontaktní tělesa jsou zpravidla z tradičních konstrukčních materiálů (hliník, oceli o různé jakosti). Kromě konfigurace Ball-on-disk disponuje i uspořádáním Pin-on-disk, kdy je valivé těleso nahrazeno pinem (válcem), který se svou čelní plochou smýká po disku. Obě zařízení mají nezávislý pohon disku a valivého tělesa pro nastavení vzájemné rychlosti kontaktních ploch. Optický tribometr a MTM také umožňují řídit teplotu vaničky s mazivem. V případě tribometru se valivé těleso brodí v mazivu a vtahuje ho tak do kontaktu s diskem. Naopak u MTM je v mazivu ponořen disk. Zde ale u obou zařízení nastává problém. Kontaktní tělesa vlivem okolního prostředí mají jinou povrchovou teplotu než ohřívané mazivo. V důsledku toho pak dochází ke změně teploty maziva, a tím i ke změně jeho viskozity, což vede k nežádoucímu ovlivnění výsledků měření. Z tohoto důvodu je potřebné řídit i teplotu prostředí, ve kterém experimenty probíhají. Druhou motivací řešení je rozšíření experimentů o možnost studia vlivu provozních podmínek zahrnujících změnu vzdušné vlhkosti. Tím by se laboratorní měření více přiblížila reálným provozním podmínkám. Jako vhodné řešení problému se jeví použití stolové klimatické komory jako doplňku ke zmíněným laboratorním zařízením.

Ze současného stavu poznání jsem zjistil, že komerčně vyráběné klimatické komory rozměrově nevyhovují našim požadavkům. Existují výrobci, kteří vyrábějí klimatické komory tzv. „na míru“, kdy zákazník zadá přesné požadavky na rozměry a výkon klimatické komory a výrobce poté tuto speciální komoru vyrobí. Tyto speciální komory však bývají příliš drahé. Proto je třeba zkonstruovat vlastní klimatickou komoru, která poslouží našim účelům.



Obr. 2-1 Detailní pohled na optický tribometr [25]



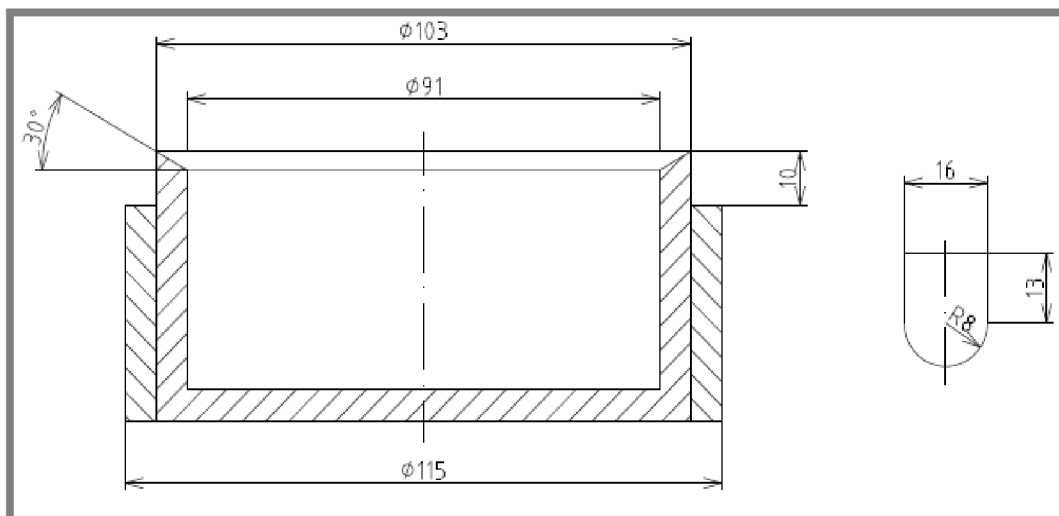
Obr. 2-2 Rozměry vany optického tribometru

Při návrhu komory pro optický tribometr jsme limitováni rozměry samotné vany tribometru. Dále jsme limitováni vzdáleností objektivu mikroskopu od pozorovaného vzorku. Vezmeme-li do úvahy tento fakt, tak maximální výška komory bude 10 mm od horní hrany vany.



Obr. 2-3 Detailní pohled na MTM

Při návrhu komory pro MTM jsme limitováni rozměry vany tohoto zařízení a rozměry tělesa vedeného přes stěnu vany. Rozměry vany i výřezu jsme zjistili měřením pomocí posuvného měřidla.



Obr. 2-4 Tvar a rozměry vany + tvar a rozměry výřezu v komoře pro těleso viz Obr. 2-3

Cílem práce je konstrukční návrh klimatické komory pro optický tribometr a MTM s nucenou cirkulací vzduchu. Požadovaný objem komory je přibližně 10 l. Zařízení musí umožňovat plynule regulovat teplotu v rozsahu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu od 10 % do 90 %.

3 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ

3

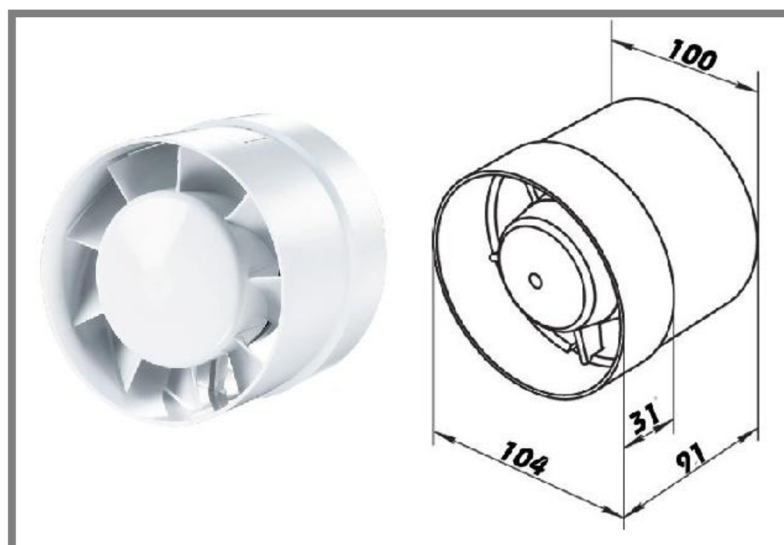
3.1 Výběr ventilátoru pro nucenou cirkulaci vzduchu

3.1

3.1.1 Průmyslový ventilátor do potrubí 100 VKO L

3.1.1

Nejmenší průmyslové ventilátory jsou ventilátory určené do potrubí.



Obr. 3-1 Průmyslový ventilátor 100VKO L [26]

Parametry a specifikace:

Průměr:	100 mm
Průtok vzduchu:	105 m ³ /h
Hlučnost:	37 dB
Cena:	410 Kč

3.1.2 Ventilátor NOCTUA NF-A4x10 FLX

3.1.2

Tento ventilátor se používá pro zlepšení oběhu vzduchu v počítačové skříni, avšak díky jeho malým rozměrům, dostačujícímu výkonu a nízké ceně a hlučnosti je vhodný i pro naše použití.



Obr. 3-2 Ventilátor NOCTUA, typ NF-A4x10 FLX [27]

Parametry a specifikace:

Rozměry:	40x40x10 mm
Průtok vzduchu:	8,2 m ³ /h
Maximální hlučnost:	17,9 dB
Cena:	339 Kč

3.2 Návrh ohřivače

3.2.1 Výpočet minimálního výkonu bez tepelných ztrát

Předpokládaný objem vzduchu v klimatické komoře je 20 l (pracovní objem s objemem potrubí a objem potřebný pro uložení klimatických jednotek). Požadovaná doba na ustálení klimatických podmínek je 15 min. Z toho vyplývá, že požadovaný vzduchový výkon $\dot{V} = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$.

Čím nižší teplota, tím má vzduch vyšší hustotu a naopak. Pro výpočet tedy budeme uvažovat střední hodnotu hustoty. Jelikož je maximální teplota v komoře $t_{MAX} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ a minimální $t_{MIN} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$. Střední hodnotu hustoty tedy budeme uvažovat při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$, která je rovna $\rho_{20} = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

$$\Delta t = t_{MAX} - t_{MIN} = 50 - (-10) = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_{ohř} = \dot{V} \cdot \rho_{20} \cdot c_p \cdot \Delta t = \frac{0,08}{3600} \cdot 1,2 \cdot 1010 \cdot 60 = 1,616 \text{ W}$$

Kde:

$Q_{ohř}$ [W]	-výkon potřebný k ohřátí vzduchu v komoře
\dot{V} [m ³ /s]	-vzduchový výkon
ρ_{20} [kg/m ³]	-hustota vzduchu při 20 °C
c_p [J/kg·K]	-měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku
Δt [°C]	-maximální rozdíl teplot v komoře

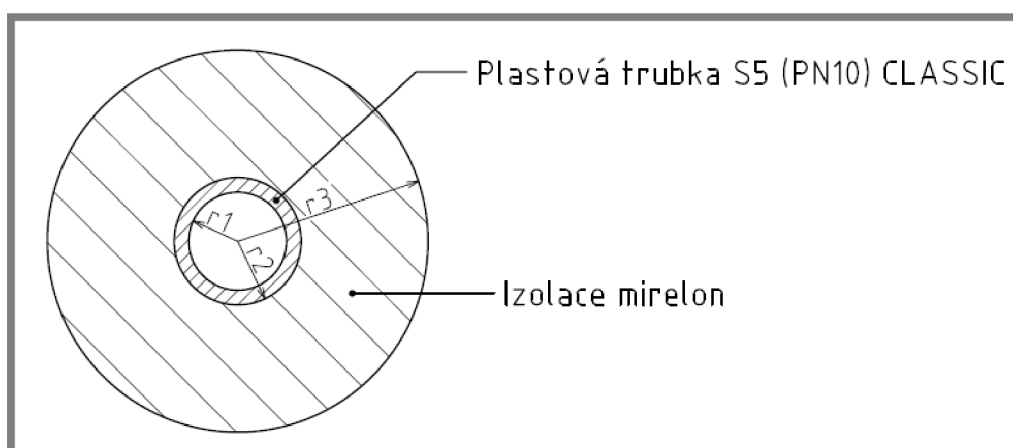
3.2.2 Výpočet tepelných ztrát při ohřevu

3.2.2

Pro výpočet tepelných ztrát při ohřevu budeme opět uvažovat nejhorší možný případ, jedná se tedy o tepelné ztráty při teplotě uvnitř komory 50 °C. Teplotu okolí budeme uvažovat 20 °C. Rozdíl teplot je tedy roven $\Delta T_{OHŘEV} = 50 - 20 = 30$ °C.

Abychom mohli vypočítat tepelné ztráty, je potřeba znát rozměry a materiál potrubí a izolace, dále je potřeba znát rozměry a materiál přípojovacích hadic s izolací mezi klimatickou jednotkou a samotným klimatizovaným prostorem, a dále je třeba znát rozměry a materiál samotného pláště s izolací klimatizovaného prostoru.

Výpočet tepelných ztrát v potrubí:



Obr. 3-3 Průřez potrubím

$$\begin{aligned}
 r_1 &= 7,7 \text{ mm} & \lambda_1 &= 0,22 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 r_2 &= 10 \text{ mm} & \lambda_2 &= 0,038 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 r_3 &= 30 \text{ mm} & \alpha_{OUT} &= 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 L_{potr} &= 2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Výpočet součinitele přestupu tepla mezi klimatizovaným vzduchem a vnitřním povrchem trubky:

$$\begin{aligned}
 P_r &= 0,727 \\
 v_{50} &= 1,8245 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \\
 \dot{V}_{PRUT} &= 8,2 \text{ m}^3/\text{h} \\
 \lambda_{VZ} &= 2,725 \cdot 10^{-2} \text{ W/mK}
 \end{aligned}$$

$$w_p = \frac{\dot{V}_{PRUT}}{S_p} = \frac{8,2}{\pi \cdot 0,0077^2} = 12,23 \text{ m/s}$$

$$R_{e_p} = \frac{w_p \cdot 2 \cdot r_1}{\nu_{50}} = \frac{12,23 \cdot 2 \cdot 0,0077}{1,8245 \cdot 10^{-5}} = 10\,323$$

Jelikož $R_e > 4\,000$ jedná se o turbulentní proudění vzduchu v potrubí.

$$N_{u_p} = 0,023 \cdot R_{e_p}^{0,8} \cdot P_r^{0,4} = 0,023 \cdot 10323^{0,8} \cdot 0,727^{0,4} = 32,9$$

$$\alpha_{IN_p} = \frac{N_{u_p} \cdot \lambda_{VZ}}{2 \cdot r_1} = \frac{32,9 \cdot 2,725 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0,0077} = 58,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Kde:

P_r	-Prandtlovo číslo pro vzduch
$\nu_{50} [\text{m}^2/\text{s}]$	-kinematická viskozita vzduchu při 50 °C
$\dot{V}_{PRUT} [\text{m}^3/\text{s}]$	-objemový průtok vzduchu
$\lambda_{VZ} [\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$	-součinitel tepelné vodivosti vzduchu
$w_p [\text{m}/\text{s}]$	-rychlost proudění vzduchu v potrubí
$S_p [\text{m}^2]$	-průřez potrubí
R_{e_p}	-Reynoldsovo číslo vztažené k potrubí
N_{u_p}	-Nusseltovo číslo vztažené k potrubí
$\alpha_{IN_p} [\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$	-součinitel přestupu tepla mezi vzduchem a vnitřní stěnou trubky

$$R_{\alpha_{IN_p}} = \frac{1}{2\pi r_1 \alpha_{IN_p}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,0077 \cdot 58,22} = 0,355 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_{trubka} = \frac{1}{2\pi \lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,22} \cdot \ln \frac{10}{7,7} = 0,189 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_{Izolace\ P} = \frac{1}{2\pi \lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,038} \cdot \ln \frac{30}{10} = 4,6 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_{\alpha_{OUT}} = \frac{1}{2\pi r_3 \alpha_{OUT}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,03 \cdot 5} = 1,061 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_{potrub\ i} = R_{\alpha_{IN_p}} + R_{trubka} + R_{Izolace} + R_{\alpha_{OUT}} = 0,355 + 0,189 + 4,6 + 1,061 = 6,205 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$$

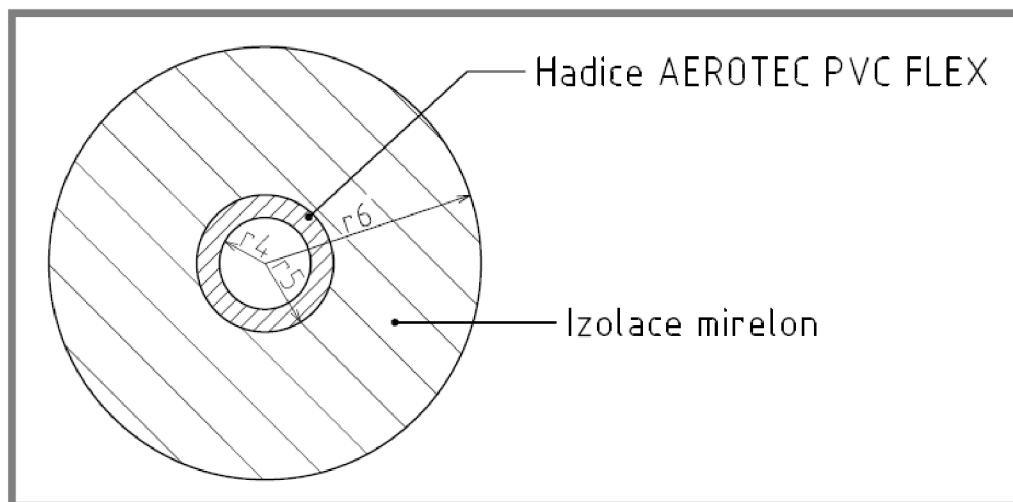
$$\Delta t_{OH\check{r}ev} = t_{MAX} - t_{20} = 50 - 20 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{potrub\ i} = L_{potr} \cdot \frac{\Delta t_{OH\check{r}ev}}{R_{potrub\ i}} = 2 \cdot \frac{30}{6,205} = 9,67 \text{ W}$$

Kde:

λ_1 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti plastové trubky
λ_2 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti izolace mirelon
α_{OUT} [W/m ² ·K]	-součinitel přestupu tepla mezi izolací a vnějším prostředím
$R_{\alpha_{IN P}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění uvnitř trubky
R_{trubka} [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v trubce
$R_{izolace P}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v izolaci potrubí
$R_{\alpha_{OUT}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění vně izolace
$R_{potrubí}$ [m·K/W]	-celkový tepelný odpor potrubí
$\dot{Q}_{potrubí}$ [W]	-tepelné ztráty v potrubí

Výpočet tepelných ztrát v hadicích:



Obr. 3-4 Průřez hadicí

$$\begin{aligned}
 r_4 &= 6,35 \text{ mm} & \lambda_3 &= 0,19 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 r_5 &= 9,5 \text{ mm} & \lambda_4 &= \lambda_2 = 0,038 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 r_6 &= 30 \text{ mm} & \alpha_{OUT} &= 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 L_{hadic} &= 2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Výpočet součinitele přestupu tepla mezi klimatizovaným vzduchem a vnitřním povrchem hadice:

$$w_H = \frac{\dot{V}_{PRUT}}{S_H} = \frac{8,2}{\pi \cdot 0,00635^2} = 17,98 \text{ m/s}$$

$$R_{eH} = \frac{w_H \cdot 2 \cdot r_4}{\nu_{50}} = \frac{17,98 \cdot 2 \cdot 0,00635}{1,8245 \cdot 10^{-5}} = 12\,515,5$$

Jelikož $Re > 4\,000$ jedná se o turbulentní proudění vzduchu v potrubí.

$$Nu_H = 0,023 \cdot Re_H^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot 12515,5^{0,8} \cdot 0,727^{0,4} = 38,4$$

$$\alpha_{IN_H} = \frac{Nu_H \cdot \lambda_{VZ}}{2 \cdot r_4} = \frac{38,4 \cdot 2,725 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0,00635} = 82,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_{\alpha_{IN_H}} = \frac{1}{2\pi r_4 \alpha_{IN_H}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,00635 \cdot 82,4} = 0,304 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

$$R_{Hadice} = \frac{1}{2\pi \lambda_3} \cdot \ln \frac{r_5}{r_4} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,19} \cdot \ln \frac{9,5}{6,35} = 0,337 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

$$R_{Izolace\ H} = \frac{1}{2\pi \lambda_4} \cdot \ln \frac{r_6}{r_5} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,038} \cdot \ln \frac{30}{9,5} = 4,816 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

$$R_{\alpha_{OUT}} = \frac{1}{2\pi r_6 \alpha_{OUT}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,03 \cdot 5} = 1,061 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

$$R_{hadic} = R_{\alpha_{IN_H}} + R_{Hadice} + R_{Izolace\ H} + R_{\alpha_{OUT}} \\ = 0,304 + 0,337 + 4,816 + 1,061 = 6,518 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

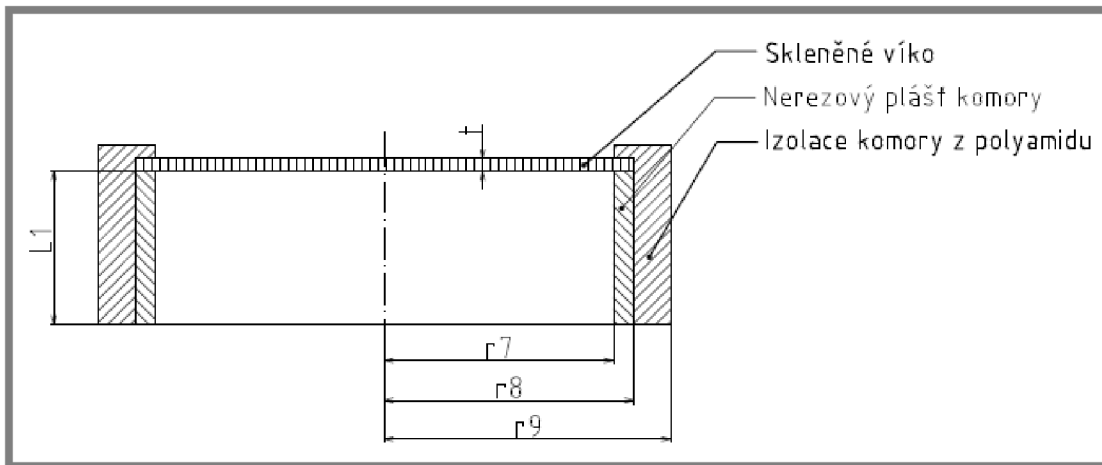
$$\dot{Q}_{hadic} = L_{hadic} \cdot \frac{\Delta t_{OH\check{r}ev}}{R_{hadic}} = 2 \cdot \frac{30}{6,518} = 9,2 \text{ W}$$

Kde:

λ_3 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti PVC hadice
λ_4 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti izolace mirelon
$R_{\alpha_{IN_H}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění uvnitř hadice
R_{Hadice} [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v hadici
$R_{Izolace\ H}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v izolaci hadice
R_{hadic} [m·K/W]	-celkový tepelný odpor hadic
\dot{Q}_{hadic} [W]	-tepelné ztráty v hadicích

Výpočet tepelných ztrát v komoře:

Pro zjednodušení výpočtu zanedbáme přestup tepla prouděním v komoře, jelikož rychlost proudění bude malá v porovnání s tou v potrubí. Pro výpočet budeme uvažovat komoru jako válec.



Obr. 3-5 Průřez komory

$$\begin{aligned}
 r_7 &= 80 \text{ mm} & \lambda_5 &= 16 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 r_8 &= 88 \text{ mm} & \lambda_6 &= 0,33 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 r_9 &= 100 \text{ mm} & \lambda_7 &= 0,96 \text{ W/m} \cdot \text{K} \\
 L_1 &= 60 \text{ mm} & \alpha_{OUT} &= 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 t &= 5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Prostup tepla válcovou stěnou:

$$R_{VS_{PLÁŠŤ}} = \frac{1}{2\pi\lambda_5} \cdot \ln \frac{r_8}{r_7} = \frac{1}{2\pi \cdot 16} \cdot \ln \frac{88}{80} = 9,48 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

$$R_{VS_{IZOLACE}} = \frac{1}{2\pi\lambda_6} \cdot \ln \frac{r_9}{r_8} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,33} \cdot \ln \frac{100}{88} = 0,062 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

$$R_{VS_{\alpha}} = \frac{1}{2\pi r_9 \alpha_{OUT}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,1 \cdot 5} = 0,318 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

$$\begin{aligned}
 R_{VS} &= R_{VS_{PLÁŠŤ}} + R_{VS_{IZOLACE}} + R_{VS_{\alpha}} = 9,48 \cdot 10^{-4} + 0,062 + 0,318 \\
 &= 0,381 \text{ m} \cdot \text{K/W}
 \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{VS} = L_1 \cdot \frac{\Delta t_{OH\check{r}ev}}{R_{VS}} = 0,06 \cdot \frac{30}{0,381} = 4,72 \text{ W}$$

Kde:

λ_5 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti válcové stěny komory
λ_6 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti izolace komory
λ_7 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti skleněného víka
$R_{VS_{PLÁŠŤ}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení ve válcové stěně komory
$R_{VS_{IZOLACE}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v izolaci válcové stěny

$R_{VS\alpha}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění vně izolace válcové stěny
R_{VS} [m·K/W]	-celkový tepelný odpor válcové stěny
\dot{Q}_{VS} [W]	-tepelné ztráty ve válcové stěně komory

Prostup tepla rovinnou stěnou (skleněným víkem):

$$R_{RS_{SKLO}} = \frac{t}{\lambda_7} = \frac{0,005}{0,96} = 5,208 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{RS\alpha} = \frac{1}{\alpha_{OUT}} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{RS} = R_{RS_{SKLO}} + R_{RS\alpha} = 5,208 \cdot 10^{-3} + 0,2 = 0,2052 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$\dot{Q}_{RS} = S_{RS} \cdot \frac{\Delta t_{OH\check{r}ev}}{R_{RS}} = \pi \cdot 0,08^2 \cdot \frac{30}{0,2052} = 2,94 \text{ W}$$

Kde:

$R_{RS_{SKLO}}$ [m ² ·K/W]	-tepelný odpor vedení rovinné stěny (skleněného víka)
$R_{RS\alpha}$ [m ² ·K/W]	-tepelný odpor proudění vně skleněného víka
R_{RS} [m ² ·K/W]	-celkový tepelný odpor rovinné stěny
\dot{Q}_{RS} [W]	-tepelné ztráty v rovinné stěně komory

Celkové tepelné ztráty při ohřevu:

$$\dot{Q}_{celk.OH} = \dot{Q}_{potrub\ i} + \dot{Q}_{hadic} + \dot{Q}_{VS} + \dot{Q}_{RS} = 9,67 + 9,2 + 4,72 + 2,94 = 26,53 \text{ W}$$

3.2.3 Výpočet celkového výkonu ohřivače

$$Q_{O_{MIN}} = \dot{Q}_{celk.OH} + Q_{oh\check{r}} = 26,53 + 1,616 = 28,146 \text{ W}$$

3.2.4 Volba ohřivače

Jako ohřivač vzduchu se jeví jako nejlepší volba elektrický odporový ohřivač, protože jeho užití je vhodné v malých prostorech, kde není potřeba velkého výkonu, což je přesně náš případ klimatické komory. Dále je tichý a cenově výhodný.

Jako elektrický ohřivač volím odporový topný drát z Kanthalu (slitina železa obsahující chrom, hliník a cobalt), který bude zkrácen na délku 40 cm a následně bude stočen do spirály, aby zabíral co nejméně prostoru. Průměr drátu $d = 0,5 \text{ mm}$, odpor drátu $R_0 = 6,976 \text{ } \Omega/\text{m}$. Maximální teplota $t_{OH} = 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$. Cena 29 Kč/m.



Obr. 3-6 Odporový drát z Kanthalu [28]

Skutečný výkon ohřivače:

Nejvyšší vstupní napětí do odporového drátu bude 12 V, odpor drátu při uvažované délce drátu $L_{OH} = 40 \text{ cm}$ bude:

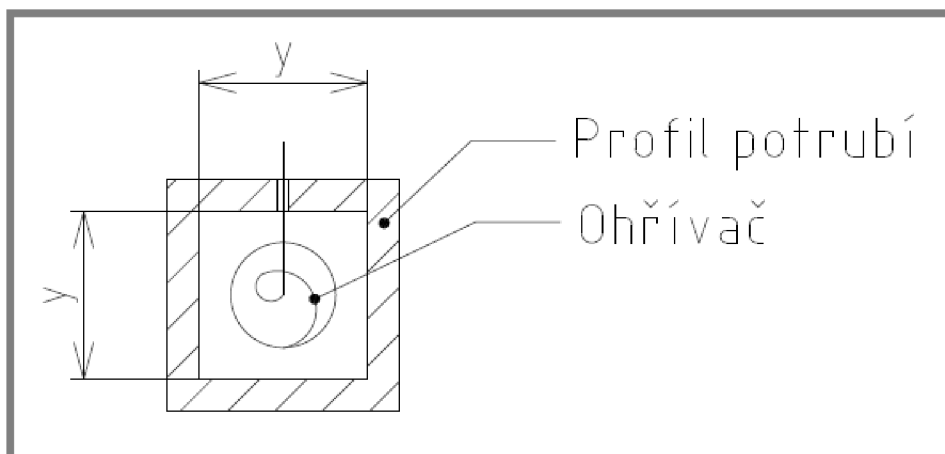
$$R_{OH} = R_0 \cdot L_{OH} = 6,976 \cdot 0,4 = 2,7904 \Omega$$

$$P_{OH_{SKUT}} = \frac{U_{OH}^2}{R_{OH}} = \frac{12^2}{2,7904} = 51,6 \text{ W}$$

Kde:

$P_{OH_{SKUT}}$ [W]	-skutečný výkon ohřivače
U_{OH} [V]	-vstupní napětí do ohřivače
R_{OH} [Ω]	-elektrický odpor ohřivače

Výpočet součinitele přestupu tepla mezi ohřivačem a ohřívaným vzduchem:



Obr. 3-7 Průřez potrubím s ohřivačem

$$y = 16 \text{ mm}$$

$$w_{OH\check{R}} = \frac{\dot{V}_{PRUT}}{S_{OH\check{R}}} = \frac{8,2}{0,016^2} = 8,9 \text{ m/s}$$

$$Re_{OH\check{R}} = \frac{w_{OH\check{R}} \cdot y}{\nu_{50}} = \frac{8,9 \cdot 0,016}{1,8245 \cdot 10^{-5}} = 7\,803$$

Jelikož $Re > 4\,000$ jedná se o turbulentní proudění vzduchu v potrubí.

$$Nu_{OH\check{R}} = 0,26 \cdot Re_{OH\check{R}}^{0,6} \cdot Pr^{0,37} = 0,26 \cdot 7803^{0,6} \cdot 0,727^{0,37} = 50$$

$$\alpha_{OH\check{R}} = \frac{Nu_{OH\check{R}} \cdot \lambda_{VZ}}{y} = \frac{50 \cdot 2,725 \cdot 10^{-2}}{0,016} = 85,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Výpočet minimální plochy ohřivače:

$$\Delta t_{OH} = t_{OH} - t_{MIN} = 1200 - (-10) = 1210 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$S_{O_{MIN}} = \frac{|Q_{O_{MIN}}|}{\alpha_{OH\check{R}} \cdot \Delta t_{OH}} = \frac{23,306}{85,2 \cdot 1210} = 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 2,26 \text{ cm}^2$$

Kontrola minimální plochy ohřivače:

$$S_{O_{SKUT}} = \pi \cdot d \cdot L = \pi \cdot 0,05 \cdot 40 = 6,283 \text{ cm}^2$$

$$S_{O_{SKUT}} > S_{O_{MIN}}$$

Kontrolní výpočet povrchové zátěže:

Koeficient povrchové zátěže nám udává namáhání odporového drátu. Obvykle se pohybuje v rozmezí 1,5 až 50 W/cm². Čím je koeficient nižší, tím má drát vyšší životnost. S přihlédnutím na provozní podmínky a na způsob odvádění tepla volím $K_s \leq 10 \text{ W/cm}^2$. [29]

$$K_s = \frac{P}{S_{O_{SKUT}}} = \frac{51,6}{\pi \cdot 0,05 \cdot 40} = 8,21 \text{ W/cm}^2$$

Kde: K_s – Koeficient povrchové zátěže [W/cm²]

P – výkon ohřivače [W]

$S_{O_{SKUT}}$ – povrch ohřivače [cm²]

3.3 Návrh chladiče

3.3

3.3.1 Výpočet minimálního výkonu chladiče bez ztrát

3.3.1

Při stanovení minimálního výkonu chladiče budeme uvažovat energeticky nejnáročnější případ, který může v komoře nastat. Jedná se o ochlazení z teploty $t_{MAX} = 50\text{ °C}$ při relativní vlhkosti $\varphi_{MAX} = 90\%$, na teplotu $t_{MIN} = -10\text{ °C}$ při relativní vlhkosti $\varphi_{MIN} = 10\%$. Budeme uvažovat, že po celou dobu chlazení bude kondenzovat vodní pára, bude se tedy jednat o mokré chlazení. Hodnoty entalpií v počátečním a konečném stavu vzduchu jsem zjistil pomocí programu Vlhký vzduch 3.0 [21]. $h_{MAX} = 252\,263\text{ J/kg}_{sv}$, $h_{MIN} = -9\,698\text{ J/kg}_{sv}$. Vzorec pro výpočet minimálního výkonu chladiče při mokřém chlazení:

$$Q_{Chl} = \dot{V} \cdot \rho_{20} \cdot \Delta h_{chl} = \frac{0,08}{3600} \cdot 1,2 \cdot [(-9\,698) - 252\,263] = -7\text{ W}$$

Kde: Q_{Chl} – výkon potřebný k ochlazení vzduchu [W]
 Δh_{chl} – rozdíl entalpií při chlazení [J/kg_{sv}]

3.3.2 Výpočet tepelných ztrát při chlazení

3.3.2

Pro výpočet tepelných ztrát při chlazení budeme opět uvažovat nejhorší možný případ, jedná se tedy o tepelné ztráty při teplotě uvnitř komory -10 °C . Teplotu okolí budeme uvažovat 20 °C . Rozdíl teplot je tedy roven:

$$\Delta t_{CHLAZENÍ} = -10 - 20 = -30\text{ °C}$$

Tepelné odpory budou stejné jako při výpočtu tepelných ztrát u ohřivače. Jelikož se celková změna teploty změnila pouze ve znaménku, budou celkové ztráty při chlazení stejné jako při ohřívání, akorát s jiným znaménkem.

$$\dot{Q}_{celk. CH} = -\dot{Q}_{celk} = -26,53\text{ W}$$

3.3.3 Výpočet celkového výkonu chladiče

3.3.3

$$Q_{CHL_{MIN}} = \dot{Q}_{celk. CH} + Q_{Chl} = -26,53 - 7 = -33,53\text{ W}$$

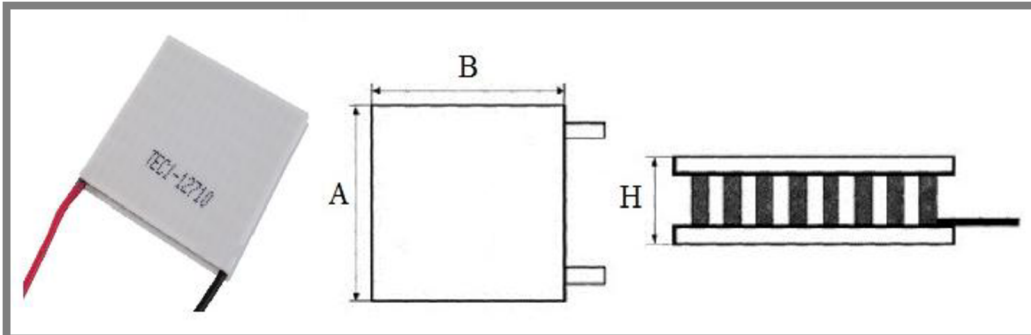
3.3.4 Volba chladiče

3.3.4

Jako chladič použijeme Peltierův článek, který je vhodný pro chlazení malých prostorů, kde je potřeba malých výkonů. Jeho výhodou jsou malé rozměry a snadná regulace teploty. Tento článek se používá např. v autochladičkách nebo při chlazení počítačů.

Jako chladič volím Peltierův článek M-TEC1-12710 s maximálním výkonem $P_{MAX} = 89\text{ W}$ při nulovém rozdílu teplot mezi teplou a studenou stranou. Rozměry tohoto článku jsou $40 \times 40 \times 3,3\text{ mm}$ (AxBxH). Maximální jmenovité napětí

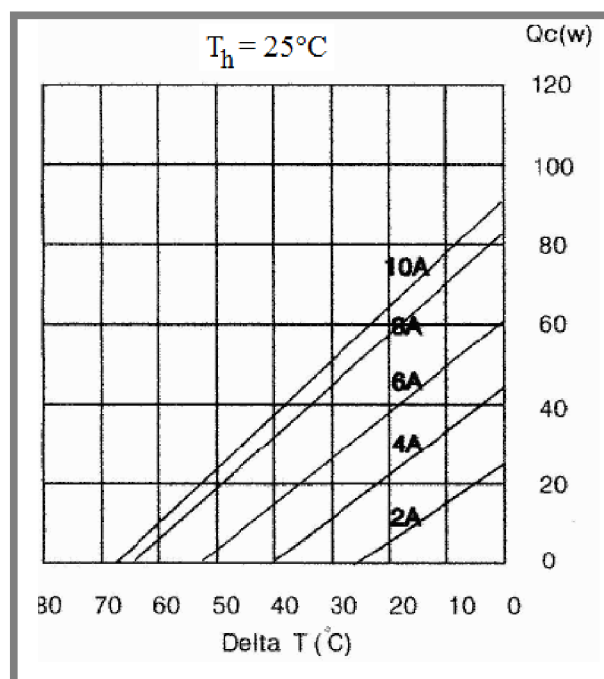
$U_{MAX} = 15,8 \text{ V}$, maximální proud $I_{MAX} = 10 \text{ A}$. Největší možný rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou článku $\Delta t_{MAX} = 68 \text{ }^\circ\text{C}$. Odpor článku $R_{\text{el}} = 1,08 \text{ } \Omega$.



Obr. 3-8 Peltierův článek M-TEC1-12710 [30]

Na obou stranách Peltierova článku musí být umístěny chladiče. Na chladné straně musí být umístěn pasivní chladič z důvodu lepšího přestupu tepla mezi chladičem a chlazeným vzduchem (zvýší se plocha) a na teplé straně musí být umístěn aktivní chladič z důvodu lepšího odvodu tepla, aby se Peltierův článek nepřehříval. Navíc je v našem zájmu, aby teplota na teplé straně byla co nejnižší, jelikož Peltierův článek je limitován maximálním rozdílem teplot mezi teplou a studenou stranou. Čím vyšší je tedy teplota na teplé straně, tím vyšší je teplota i na studené straně při stejném výkonu.

3.3.5 Pasivní chladič na studené straně

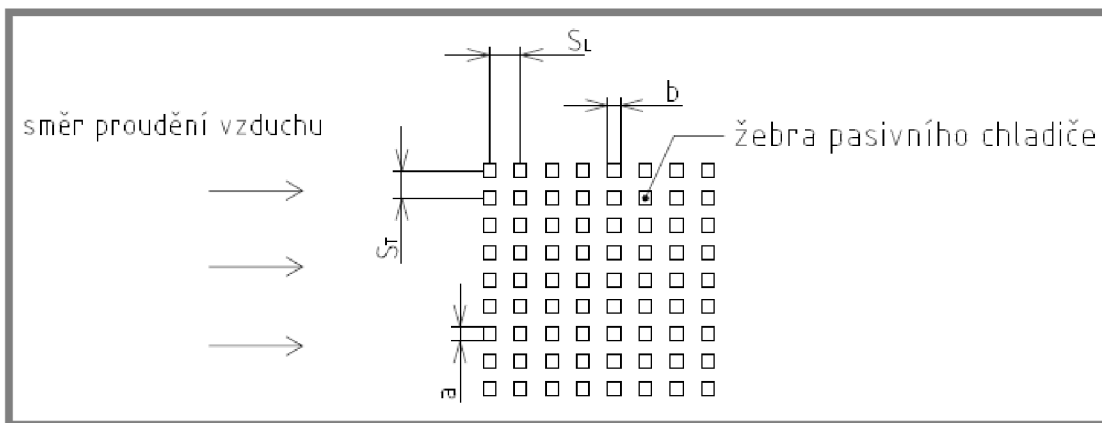


Obr. 3-9 Závislost chladicího výkonu na rozdílu teplot obou stran Peltierova článku, pro teplotu teplé strany $T_h = 25^\circ\text{C}$ [31]

Vypočtený minimální výkon chladiče je 33,53 W, z grafu vyplývá, že pro chladičí výkon 33 W, při maximální hodnotě proudu 10 A, bude rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou přibližně $\Delta t_{PELT} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$. To nám udává, že při udržení teplé strany na teplotě $t_h = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ bude hodnota teploty studené strany při výkonu 33 W:

$$t_s = t_h - \Delta t_{PELT} = 25 - 45 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Výpočet přestupu tepla chladiče:



Obr. 3-10 Schéma obtékání vzduchu pasivního chladiče

$$\begin{aligned} S_L &= 5 \text{ mm} \\ S_T &= 4,35 \text{ mm} \\ a &= 2,2 \text{ mm} \\ b &= 2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Pasivní chladič bude uložen v trubce o průměru 60mm.

$$w_{CHL} = \frac{\dot{V}_{PRUT}}{S_{CHL}} = \frac{8,2}{\pi \cdot 0,03^2} = 0,806 \text{ m/s}$$

$$w_{CHL \text{ MAX}} = \frac{S_t}{S_t - a} \cdot w_{CHL} = \frac{0,00435}{0,00435 - 0,0022} \cdot 0,806 = 1,63 \text{ m/s}$$

$$Re_{CHL} = \frac{w_{MAX} \cdot a}{\nu_{50}} = \frac{1,63 \cdot 0,0022}{1,8245 \cdot 10^{-5}} = 196,5$$

Jelikož $Re < 4\,000$ jedná se o laminární proudění vzduchu v potrubí.

$$Nu_{CHL} = 0,95 \cdot 0,26 \cdot Re_{CHL}^{0,6} \cdot Pr^{0,37} = 0,95 \cdot 0,26 \cdot 196,5^{0,6} \cdot 0,727^{0,37} = 5,22$$

$$\alpha_{CHL} = \frac{Nu_{CHL} \cdot \lambda_{VZ}}{a} = \frac{5,22 \cdot 2,725 \cdot 10^{-2}}{0,0022} = 64,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\Delta t_{CHL} = t_{MAX} - t_s = 50 - (-20) = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

Výpočet minimální plochy pasivního chladiče:

$$S_{CHL_{MIN}} = \frac{|Q_{CHL_{MIN}}|}{\alpha_{CHL} \cdot \Delta t_{CHL}} = \frac{28,69}{64,6 \cdot 70} = 6,345 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 63,45 \text{ cm}^2$$

Kde:

$S_{CHL_{MIN}}$ [m ²]	-minimální plocha pasivního chladiče
$Q_{CHL_{MIN}}$ [W]	-minimální výkon chladiče
α_{CHL} [W/m ² ·K]	-součinitel přestupu tepla mezi pasivním chladičem a chlazeným vzduchem
Δt_{CHL} [°C]	-rozdíl teplot mezi pasivním chladičem a chlazeným vzduchem

Jako pasivní chladič na studenou stranu Peltierova článku volím PRIMECOOLER PC-NB1. Rozměry jsou 37x37.6x47 mm. Chladič je vyroben z hliníku. Přibližná plocha chladiče $S_{CHL_{SKUT}} = 170 \text{ cm}^2$.

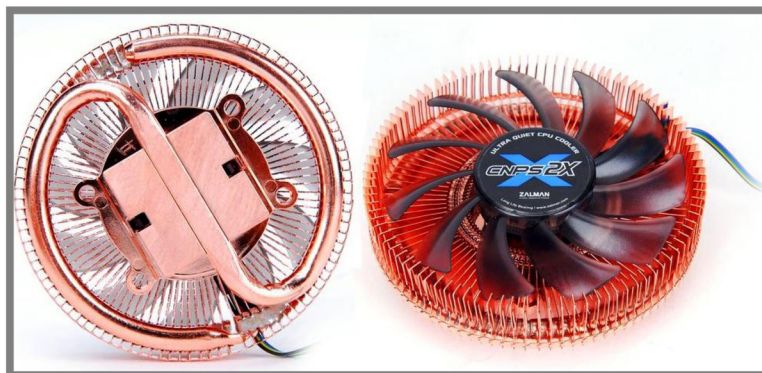


Obr. 3-11 Pasivní chladič
PRIMECOOLER PC-NB1[32]

Při návrhu minimální plochy chladiče jsme zanedbávali tepelný odpor vedením uvnitř chladiče, jelikož je chladič vyroben z hliníku o vysoké tepelné vodivosti a průřez jednotlivých žebér je dostatečně malý.

3.3.6 Aktivní chladič na teplé straně

Jako chladič teplé strany Peltierova článku volím aktivní chladič Zalman CNPS2X. Tento chladič se používá pro chlazení procesorů v PC. Výrobce udává chladicí výkon až 120 W, což s dostatečnou rezervou uchladí náš Peltierův článek o výkonu 89 W.

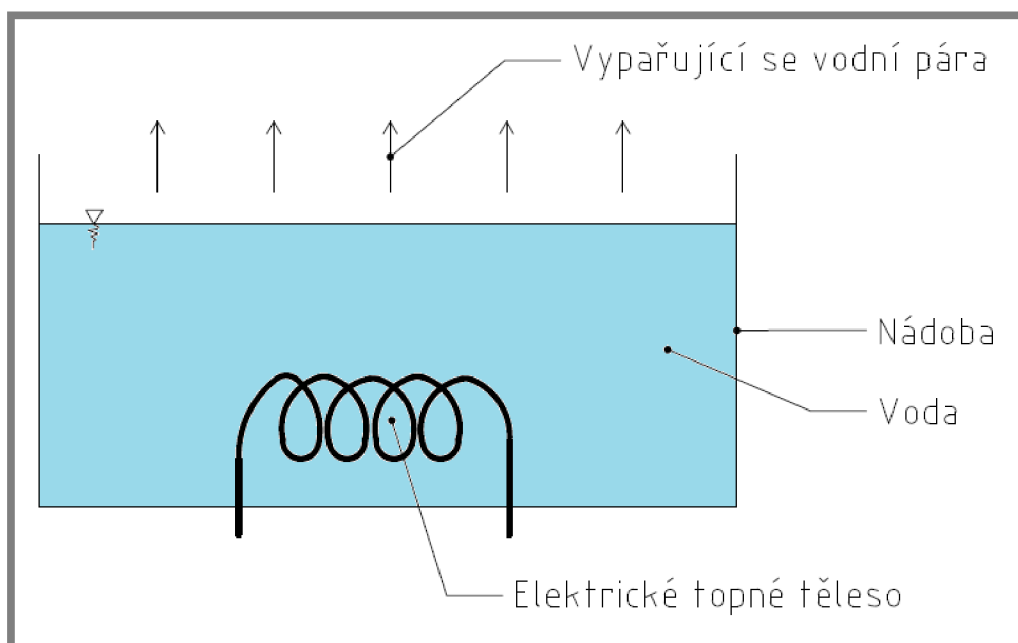


Obr. 3-12 Aktivní chladič Zalman CNPS2X [33]

3.4 Návrh zvlhčovače

3.4

V klimatické komoře bude použit parní zvlhčovač díky jeho jednoduchosti a nízké ceně. Bude se jednat o topné těleso ponořené do nádoby s vodou. Při zvlhčování přivede topné těleso vodu k varu, na její hladině se začne vypařovat vodní pára, která bude vháněna pomocí ventilátoru do pracovního prostoru klimatické komory. Nádoba bude snadno přístupná pro obsluhu komory, jelikož bude občas potřeba doplňovat vodu v nádobě. Objem nádoby bude 0,25 l.



Obr. 3-13 Schéma parního zvlhčovače

3.4.1 Výpočet minimálního vodního výkonu

Při návrhu výkonu zvlhčovače budeme opět uvažovat nejhorší možné podmínky, které mohou nastat. Jedná se tedy o zvlhčení vzduchu z teploty $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti 10 % (měrná vlhkost $x_1 = 0,16\text{ g/kg}_{\text{sv}}$) na teplotu $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ s relativní vlhkostí 90 % (měrná vlhkost $x_2 = 77,81\text{ g/kg}_{\text{sv}}$). Objem nádoby bude 0,25 l a povolená doba na zvlhčení je 15 min. Z toho vyplývá, že vodní výkon: [21]

$$\dot{V}_{H_2O} = \frac{0,25}{1000} \cdot \frac{60}{15} = 0,001\text{ m}^3/\text{h}$$

3.4.2 Výpočet potřebného množství vodní páry přivedené do vzduchu

$$m_{w1} = \frac{\dot{V} \cdot \rho_{20}}{1000} \cdot (x_2 - x_1) = \frac{0,08 \cdot 1,2}{1000} \cdot (77,81 - 0,16) = 0,00745\text{ kg/h}$$

Kde:

m_{w1} [kg/s]	-potřebné množství vodní páry přivedené do vzduchu
x_1 [g/kg _{sv}]	-měrná vlhkost při stavu 1
x_2 [g/kg _{sv}]	-měrná vlhkost při stavu 2

3.4.3 Výpočet minimálního výkonu topného tělesa zvlhčovače

Jelikož při ohřevu vody z $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází ke změně skupenství dvakrát (z ledu na vodu a z vody na páru), je potřeba do návrhu minimálního výkonu zahrnout i teplo potřebné ke změně skupenství. Hustota ledu $\rho_{LED} = 917\text{ kg/m}^3$, měrná tepelná kapacita ledu $c_{LED} = 2100\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, měrné skupenské teplo tání $l_T = 334\,000\text{ J/kg}$. Hustota vody $\rho_{H_2O} = 1000\text{ kg/m}^3$, měrná tepelná kapacita vody $c_{H_2O} = 4180\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, měrné skupenské teplo varu $l_V = 2\,257\,000\text{ J/kg}$. Změna teploty při ohřevu ledu na bod tání $\Delta t_1 = 0 - (-10) = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Změna teploty při ohřevu vody na bod varu $\Delta t_2 = 100 - 0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$Q_{zvlh} = Q_{LED} + Q_{LED \rightarrow VODA} + Q_{VODA} + Q_{VODA \rightarrow PÁRA}$$

$$Q_{zvlh} = \dot{V}_{H_2O} \cdot \rho_{LED} \cdot c_{LED} \cdot \Delta t_1 + \dot{V}_{H_2O} \cdot \rho_{LED} \cdot l_t + \dot{V}_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta t_2 + m_w \cdot l_v$$

$$Q_{zvlh} = \frac{0,001}{3\,600} \cdot 917 \cdot 2\,100 \cdot 10 + \frac{0,001}{3\,600} \cdot 917 \cdot 334\,000 + \frac{0,001}{3\,600} \cdot 1\,000 \cdot 4\,180 \cdot 100 + \frac{0,00745}{3\,600} \cdot 2\,257\,000$$

$$Q_{zvlh} = 5,35 + 85,08 + 116,11 + 4,67 = 211,21\text{ W}$$

Kde:

Q_{zvlh} [W]	-minimální výkon topného tělesa zvlhčovače
Q_{LED} [W]	-výkon potřebný k ohřátí ledu na teplotu tání

$Q_{LED \rightarrow VODA}$ [W]	-výkon potřebný ke změně skupenství z ledu na vodu
Q_{VODA} [W]	-výkon potřebný k ohřátí vody na teplotu varu
$Q_{VODA \rightarrow PÁRA}$ [W]	-výkon potřebný ke změně skupenství z vody na páru

3.4.4 Volba topného tělesa zvlhčovače

3.4.4

Jako topné těleso volím topnou spirálu o výkonu 300 W. Délka spirály je 300 mm, průměr spirály je 3,1 mm. Napětí topné spirály je 230 V. Jelikož je spirála poměrně dlouhá v porovnání s velikostí nádoby, ve které bude uložena, bude muset být vytvarována tak, aby zabírala co nejmenší prostor.



Obr. 3-14 Topná spirála o výkonu 300W [34]

3.5 Návrh odvlhčovače

3.5

Při návrhu odvlhčovače budeme uvažovat, že odvlhčování bude probíhat na principu mokrého chlazení a následného ohřevu vzduchu. Bude tedy docházet ke kondenzaci vody na chladiči, a tak se bude snižovat relativní i měrná vlhkost vzduchu. Zkondenzovaná voda bude stékat do sběrné nádoby, která bude umístěna pod odvlhčovačem. Vzduch se poté ohřeje na požadovanou teplotu.

3.5.1 Výpočet minimálního výkonu odvlhčovače

3.5.1

Pro výpočet minimálního výkonu budeme opět uvažovat nejhorší možné podmínky pro odvlhčení. Jedná se tedy o odvlhčení vzduchu o relativní vlhkosti $\varphi = 90\%$ a teplotě $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ (stav 1), na hodnotu relativní vlhkosti $\varphi = 10\%$ a teplotu $t = -10\text{ }^\circ\text{C}$ (stav 2). Teplota rosného bodu ve stavu 2 je $t_r = -33,6\text{ }^\circ\text{C}$. Povrchová teplota chladiče tedy musí být nižší, než teplota rosného bodu ve stavu 2. Entalpie ve stavu 1 je rovna $h_1 = 252\,263\text{ J/kg}_{\text{sv}}$, entalpie při teplotě rosného bodu je rovna $h_1 = -33\,541\text{ J/kg}_{\text{sv}}$. [21]

$$Q_{odvl} = \dot{V} \cdot \rho_{20} \cdot \Delta h_{odvlh} = \frac{0,08}{3600} \cdot 1,2 \cdot [-33\,541 - 252\,263] = -7,62\text{ W}$$

Kde:

Q_{odvl} [W] -minimální výkon odvlhčovače
 Δh_{odvlh} [J/kg_{sv}] -rozdíl entalpií při odvlhčování

Výpočet potřebného množství zkondenzované vody:

$$m_{w2} = \frac{\dot{V} \cdot \rho_{20}}{1000} \cdot (x_2 - x_1) = \frac{0,08 \cdot 1,2}{1000} \cdot (77,81 - 0,16) = 0,00745 \text{ kg/h}$$

Kde:

m_{w2} [kg/s] -potřebné množství zkondenzované vody
 x_1 [g/kg_{sv}] -měrná vlhkost při stavu 1
 x_2 [g/kg_{sv}] -měrná vlhkost při stavu 2

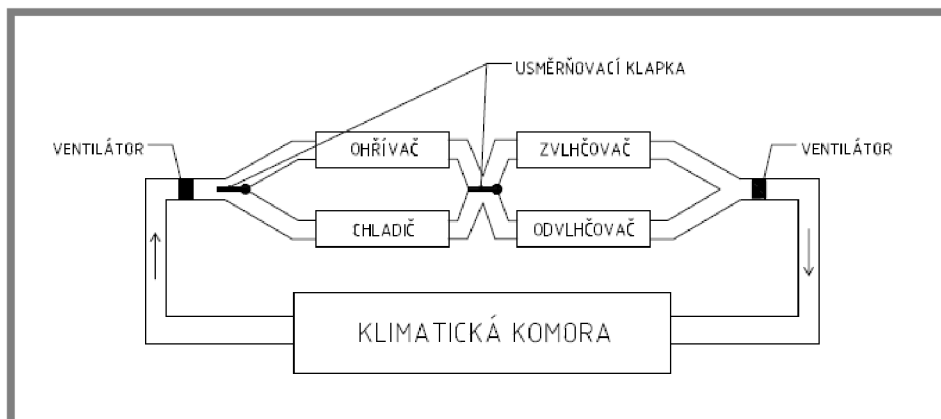
3.5.2 Volba odvlhčovače článku

Odvlhčování bude zajišťovat Peltierův článek, který je určen na chlazení.

3.6 Návrh uspořádání jednotlivých komponent

3.6.1 Varianta 1

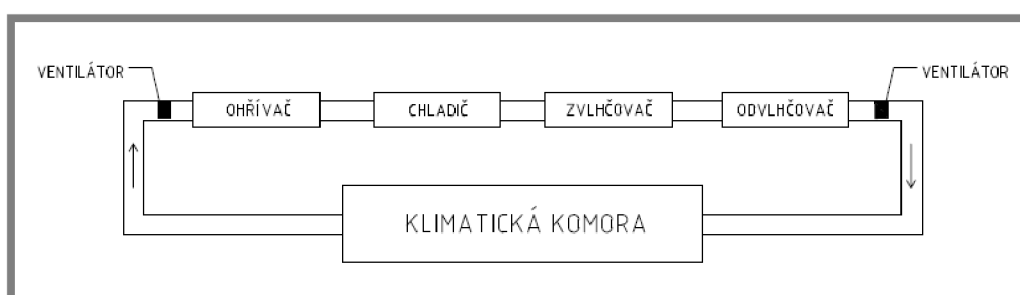
Tato varianta má paralelně propojený ohřívač s chladičem a zvlhčovač s odvlhčovačem. Proud vzduchu do jednotlivých jednotek usměřňují usměřňovací klapky podle požadované operace. Proudění vzduchu je zajištěno dvěma ventilátory. Nevýhodou tohoto uspořádání je nutnost použít usměřňovací klapky.



Obr. 3-15 Schéma varianty 1

3.6.2 Varianta 2

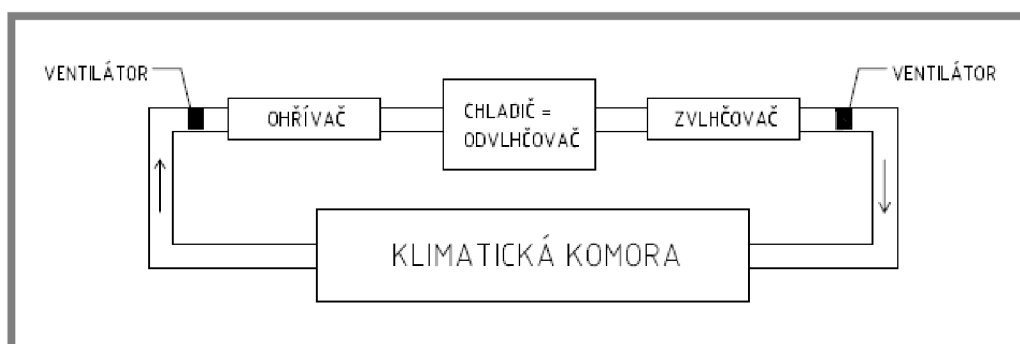
Varianta 2 má všechny jednotky uspořádané sériově za sebou. Proudění vzduchu přes takto uložené jednotky je zajištěno dvěma ventilátory. Dle požadované operace jsou v provozu jednotlivé klimatické jednotky. Např. pokud chceme vzduch ohřát a zvlhčit, bude v provozu ohřívač a zvlhčovač. Chladič s odvlhčovačem budou v tomto případě mimo provoz. Nevýhodou sériového uspořádání klimatických jednotek je pomalá změna smyslu úpravy vzduchu. Např. pokud je vzduch nejdříve ohříván a posléze chlazen, dochází ke ztrátám. Ztráty jsou způsobeny tím, že po vypnutí ohřívání zůstává těleso ohřívače stále ohřáté. Je tedy nutné přivést vyšší chladicí výkon od chladiče, což vede k prodloužení celkové chladicí doby, než kdyby byl okruh chlazení a ohřívání oddělen, jako je znázorněno ve variantě 1.



Obr. 3-16 Schéma varianty 2

3.6.3 Varianta 3

Varianta 3 má opět uspořádané všechny klimatické jednotky sériově za sebou. Rozdíl mezi variantou 2 a variantou 3 je v tom, že v této variantě je spojen chladič a odvlhčovač do jedné jednotky. Tuto variantu je možno použít v případě, kde odvlhčování probíhá na principu mokrého chlazení (dochází ke kondenzaci). Proudění vzduchu přes klimatické jednotky je zajištěno ventilátory. Výhodou této varianty je, že chladič a odvlhčovač je spojen do jedné jednotky. Nevýhodou je opět pomalá změna smyslu úpravy vzduchu, jak je popsáno u varianty 2.



Obr. 3-17 Schéma varianty 3

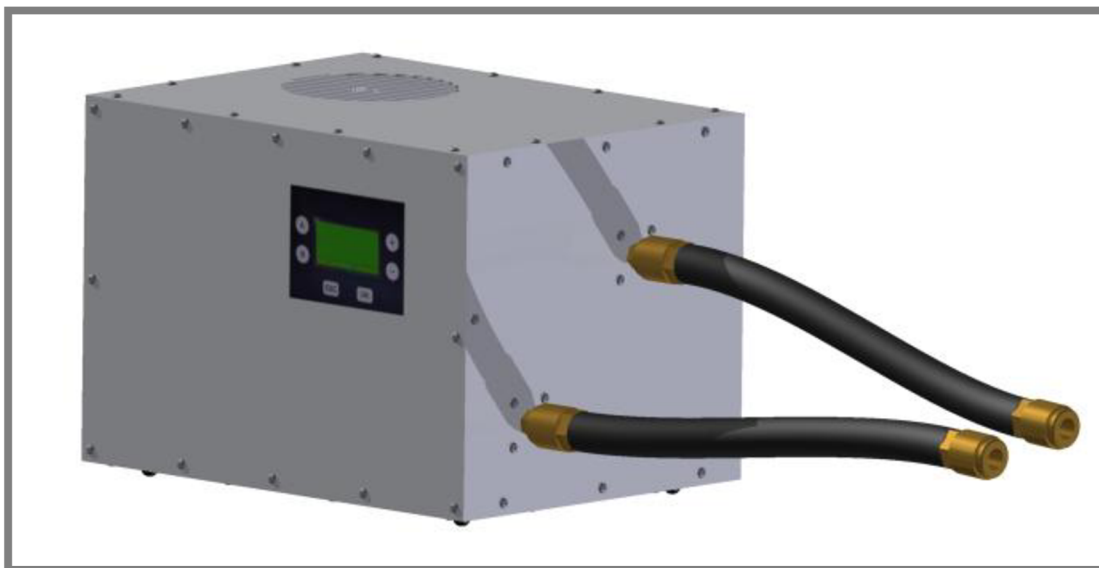
4 VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Volba nevhodnější varianty

Jako nevhodnější varianta uspořádání klimatických jednotek se jeví varianta 3, a to z důvodu, že odpadá nutnost samostatného odvlhčovače. Konstrukce celé klimatické komory se tedy zjednoduší o jednu klimatickou jednotku. Dále v této variantě není potřeba usměřovacích klapek, které jsou jednak konstrukčně složité, a jednak drahé. Varianta 3 je tedy konstrukčně nejjednodušší a ekonomicky nevhodnější, a proto bude použita v našem případě. Nevýhodou této varianty jsou delší časy potřebné k úpravě vzduchu, než u varianty 1. Tato nevýhoda je ovšem převážena konstrukční jednoduchostí a ekonomickou výhodností.

4.2 Konstrukce klimatického zařízení

Konstrukce klimatického zařízení je řešena tak, že vzduch se bude upravovat v klimatických jednotkách odděleně od pracovního prostoru (komory), z důvodu malého prostoru pro nasazení komory jak na optický tribometr, tak na zařízení MTM. Propojení mezi samotnou komorou a klimatickými jednotkami je zajištěno pomocí PVC hadic na tlakový vzduch, jejichž uchycení je zajištěno pomocí rychlospojek. Celkové rozměry komory jsou 319x224x212 mm (dxšxv). Řízení a regulaci teploty a vlhkosti vzduchu bude zajišťovat řídicí jednotka. Vlhkostní a teplotní čidla budou umístěny přímo v komoře a podle údajů z těchto čidel bude řídicí jednotka ovládat jednotlivé klimatické jednotky, které budou upravovat vzduch podle potřeby (ohřev, chlazení, vlhčení, odvlhčování). Řídicí jednotka bude umístěna za displejem nad ohřívací jednotkou.



Obr. 4-1 Klimatické zařízení s připojenými hadicemi pohled zepředu

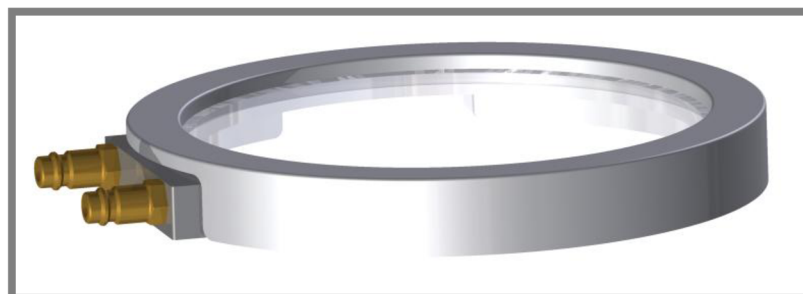


Obr. 4-2 Klimatické zařízení s připojenými hadicemi pohled zezadu

4.3 Konstrukce klimatické komory pro optický tribometr

4.3

Při konstrukci komory pro optický tribometr jsme byli omezeni maximální výškou komory, která činí 10 mm. Připojení hadic je řešeno pomocí rychlospojek. Horní část komory je ze skla, protože při používání optického tribometru je nutné pozorovat testovací vzorek pomocí mikroskopu. Sklo je přilepeno na samotné tělo komory, které je z nerezové oceli. Izolace je z polyamidu a je rovněž přilepena k tělu.

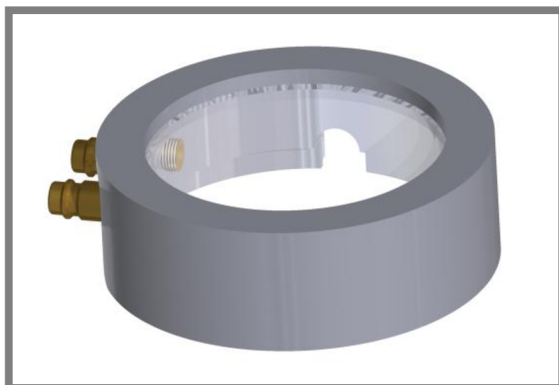


Obr. 4-3 Klimatická komora pro optický tribometr

4.4 Konstrukce klimatické komory pro MTM

4.4

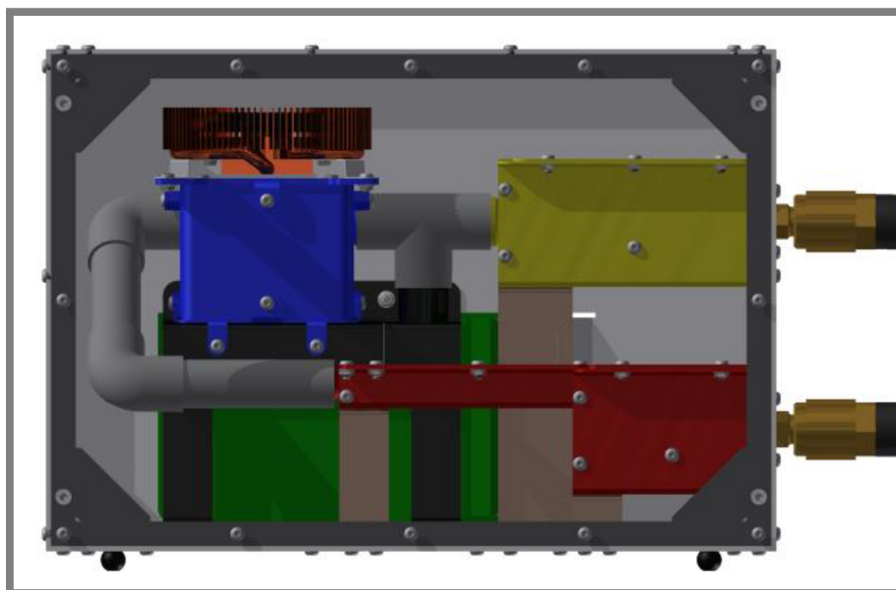
Horní část klimatické komory je z plexiskla, protože má lepší izolační vlastnosti než sklo a u zařízení MTM není potřeba pozorovat testovaný vzorek pomocí mikroskopu. Plexisklo je opět přilepeno k tělu komory, která je z nerezové oceli, polyamidová izolace je poté rovněž přilepena k tělu komory. Připojení vzduchových hadic je zajištěno opět pomocí rychlospojek.



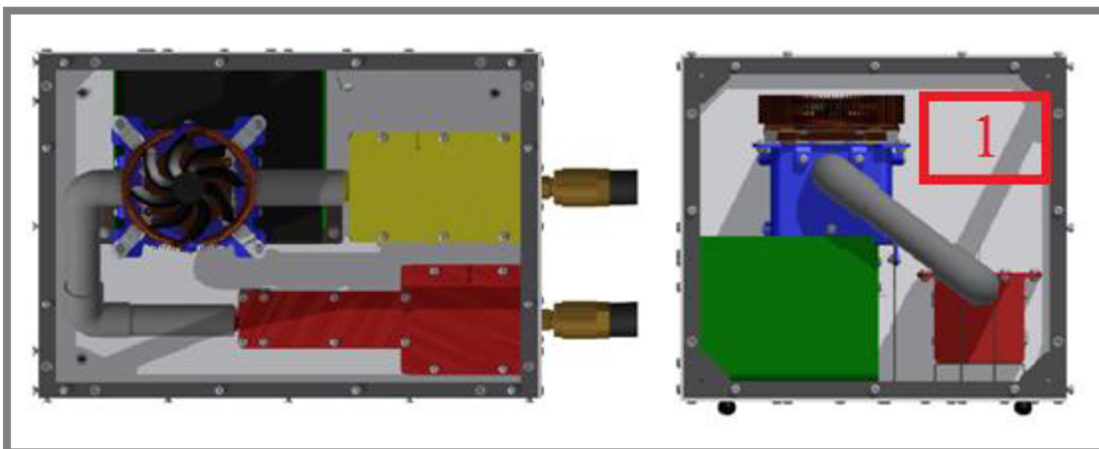
Obr. 4-4 Klimatická komora pro MTM

4.5 Uspořádání klimatických jednotek

Klimatické jednotky jsou uspořádány sériově za sebou. Vzduch je nejprve vháněn 1. ventilátorem přes ohřívací jednotku (červená barva), poté pokračuje potrubím do chladicí jednotky, která zároveň plní funkci odvlhčovací jednotky (modrá barva). Pokud dochází k odvlhčování, tak zkondenzovaná voda odkapává z pasivního chladiče do nádoby, která je umístěna ve zvlhčovací jednotce (zelená barva). Dále proudí vzduch z chladicí jednotky do prostoru s 2. ventilátorem (žlutá barva), a pomocí tohoto ventilátoru je vháněn do klimatické komory přes vzduchové hadice. Vzduch tedy vůbec neprochází zvlhčovací jednotkou (zelená barva). Zvlhčování funguje na principu rozdílných hustot různých teplot vzduchu. Při zvlhčování tedy horká vodní pára stoupá vzhůru a mísí se ve tvarovce tvaru T se vzduchem a dále je s tímto vzduchem vháněna do klimatické komory pomocí ventilátoru.



Obr. 4-5 Uspořádání klimatických jednotek, pohled zepředu (červená - ohříváč s 1. ventilátorem, modrá - chladič a zároveň odvlhčovač, zelená - zvlhčovač, žlutá - krabice s 2. ventilátorem)

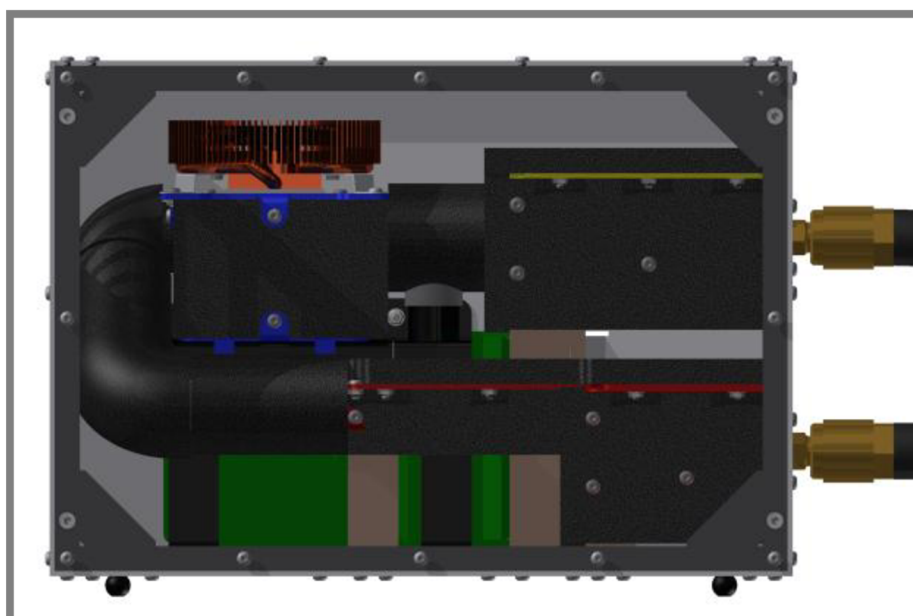


Obr. 4-6 Uspořádání klimatických jednotek, nalevo pohled shora, napravo boční pohled (1-místo určené pro řídicí jednotku)

4.6 Řešení izolace

Jako izolační materiál je použit mirelon. Při izolování rovinných ploch bude mirelon nařezán z pásů o tloušťce 10 mm na požadovaný rozměr a následně bude na rovinnou plochu nalepen. Při izolování potrubí se pouze nasadí. Izolace ohřívače je žáruvzdorná. Izolace hadic bude stejná jako u potrubí.

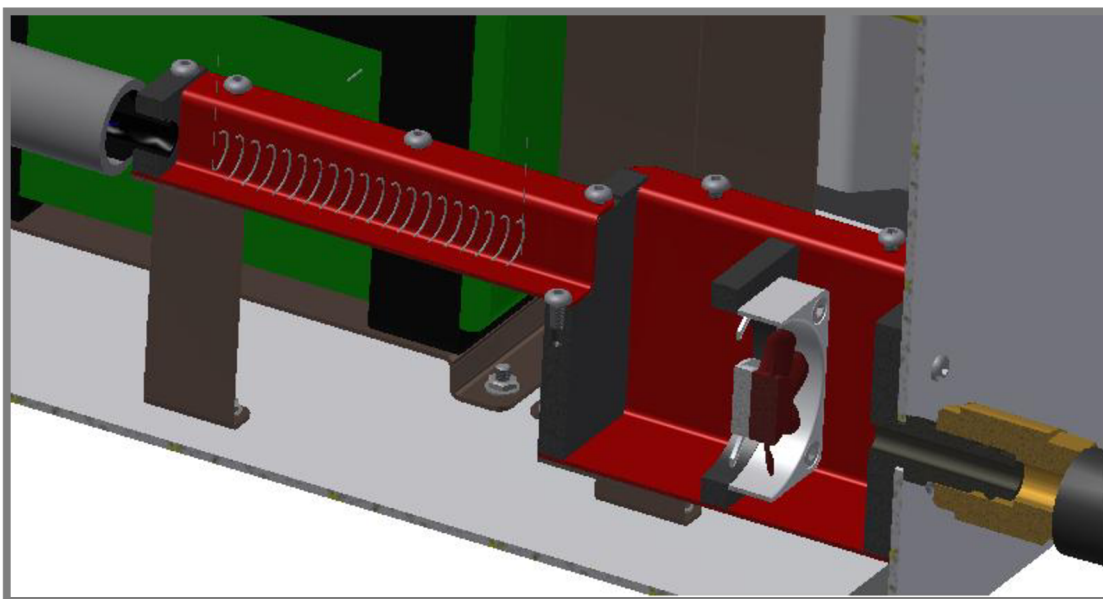
4.6



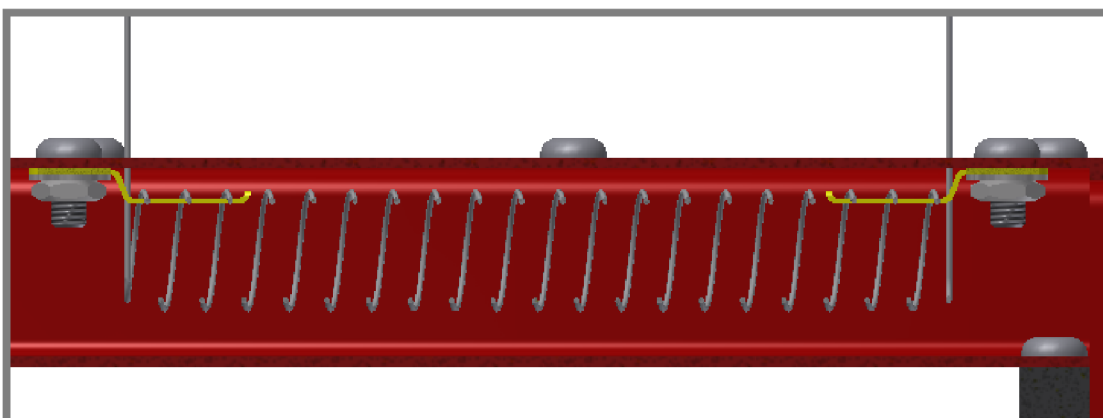
Obr. 4-7 Izolace klimatických jednotek

4.7 Konstrukční řešení ohřivací jednotky

Tělo této jednotky je z ohýbaného plechu, ke kterému jsou přišroubované jednotlivé přepážky. Přívod vzduchu z klimatické komory zajišťuje ventilátor NOCTUA NF-A4x10 FLX. Vzduch nejprve prochází přes rychlospojku, která je spojena s touto jednotkou pomocí závitů. Dále vzduch proudí do prostoru ohřivače. Průtokový průřez je v tomto místě zmenšen, jelikož se tím zvýší rychlost proudění vzduchu a tím pádem se zvýší i součinitel přestupu tepla mezi ohřivačem a proudícím vzduchem. Uložení ohřivače je řešeno tak, že se pověsí na víko této jednotky. Vývod vzduchu z této jednotky je řešen pomocí tvarovky, na kterou už přijde nasadit samotné vzduchové potrubí. Tvarovka je připevněna k jednotce pomocí závitů. Těsnost mezi spoji je zajištěna těsnícím papírem.



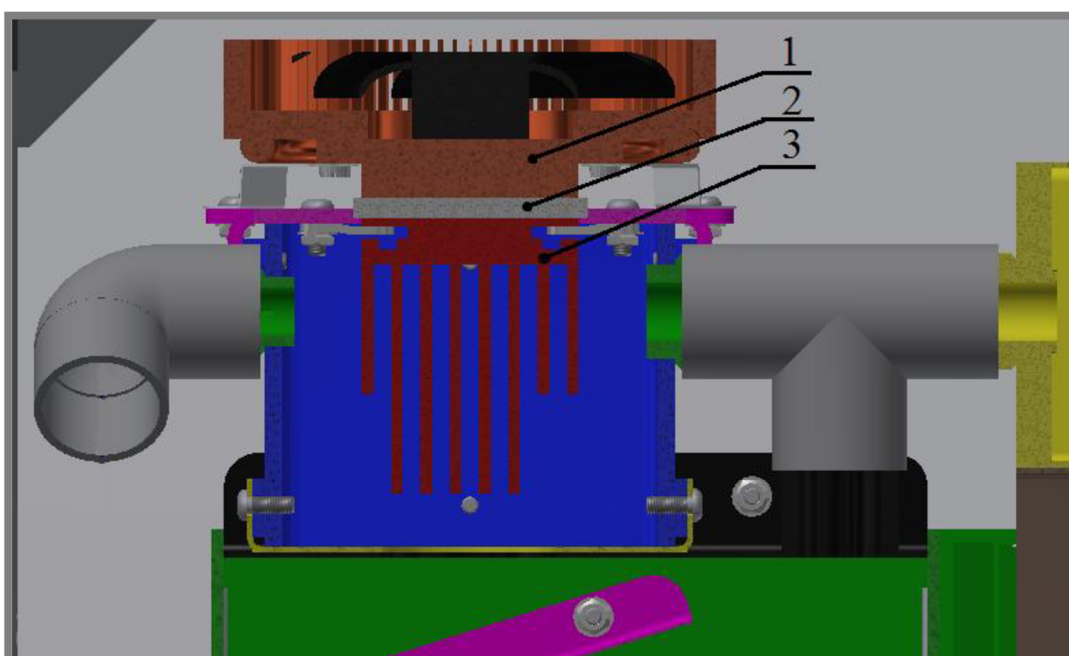
Obr. 4-8 Řez ohřivací jednotkou bez víka



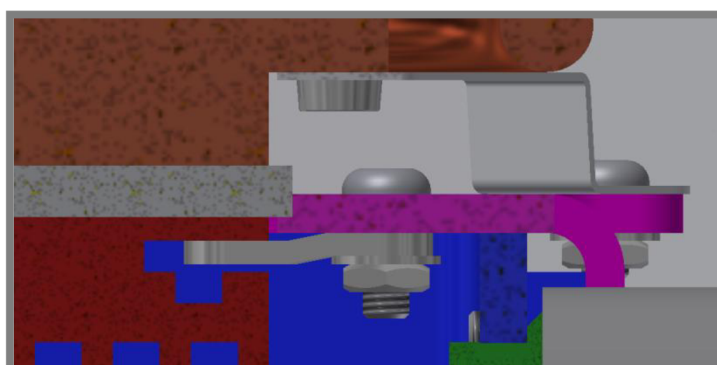
Obr. 4-9 Detail uložení ohřivače

4.8 Konstrukční řešení chladicí (odvlhčovací) jednotky

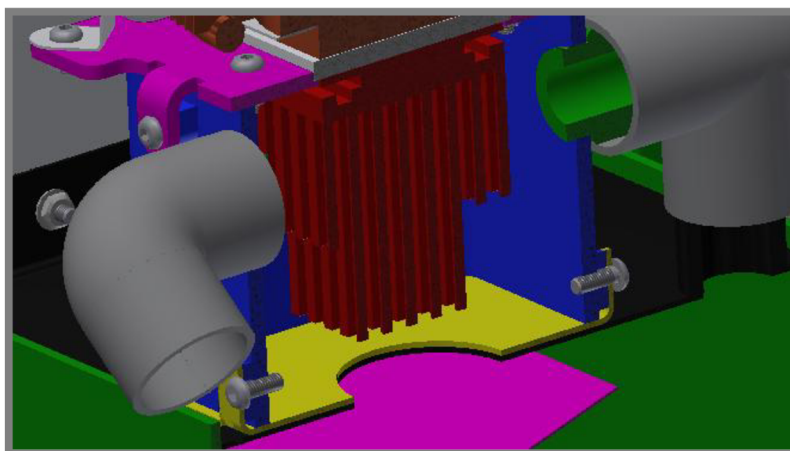
Celá konstrukce je opět šroubovaná. Přiváděný vzduch proudí mezi žebry pasivního chladiče (3), tím je tedy ochlazován, případně odvlhčován. Pasivní chladič je přilepen k chladné straně Peltierova článku (2) pomocí teplovodivé pasty, aby byl co nejlepší přestup tepla mezi pasivním chladičem a Peltierovým článkem. Uložení pasivního chladiče je řešeno pomocí tvarového plechu (šedá barva), který je přišroubován šrouby k víku (fialová barva). Uložení Peltierova článku je řešeno pomocí osazení, které je ve víku vyfrézováno. Na teplou stranu Peltierova článku je pomocí teplovodivé pasty přilepen aktivní chladič (1), který odvádí teplo. Pod pasivním chladičem je vyvrtná díra, která umožňuje odkapávání zkondenzované vody na pasivním chladiči do sběrné nádoby. Sběrná nádoba je umístěna pod chladičem a je to zároveň zásobník vody pro zvlhčovač. Vývod a přívod vzduchu je řešen stejně jako u ohřívací jednotky pomocí přišroubovaných tvarovek, na které přijde nasadit potrubí. Těsnost mezi spoji je zajištěna těsnícím papírem.



Obr. 4-10 Řez klimatickou jednotkou s chladičem



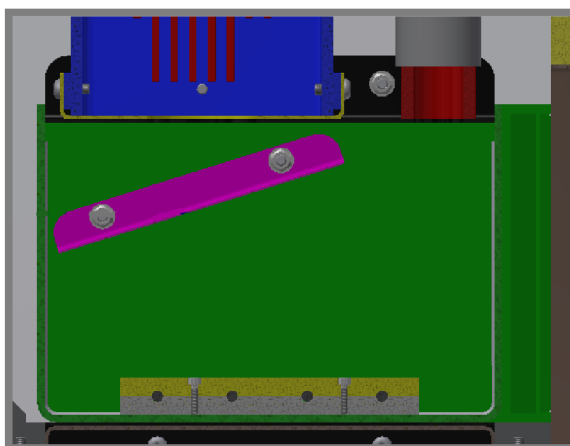
Obr. 4-11 Detail uložení Peltierova článku a pasivního chladiče



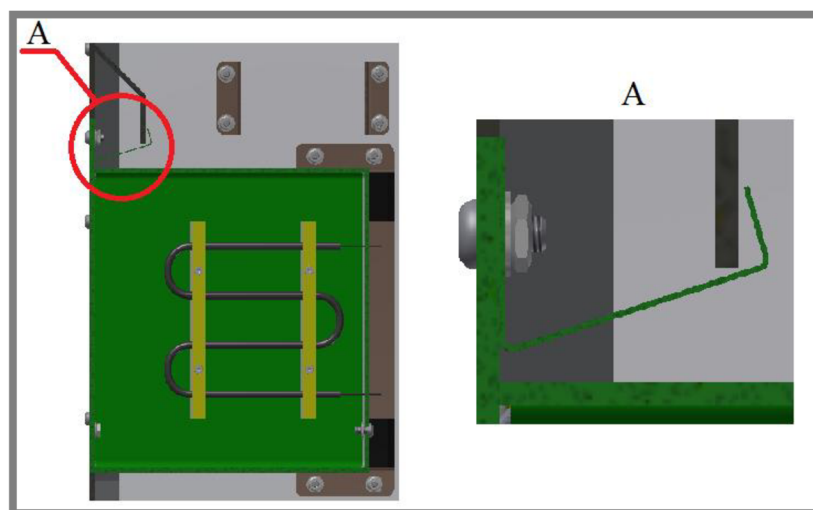
Obr. 4-12 Díra pro odkapávání zkondenzované vody

4.9 Konstrukční řešení zvlhčovací jednotky

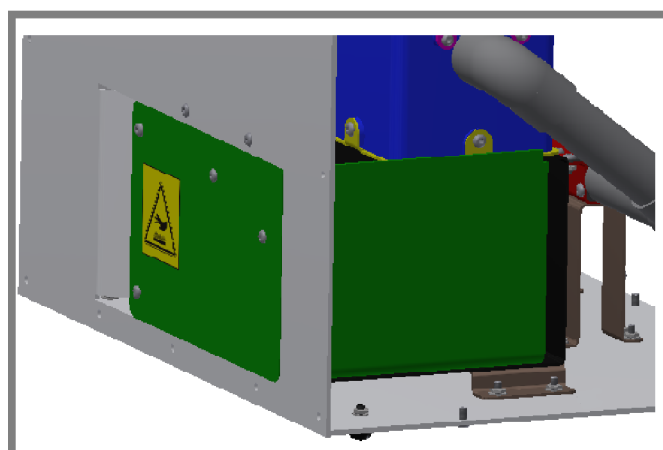
Tato jednotka se skládá z výsuvné vany (zelená barva), která je svařovaná a z vedení této vany (černá barva), které je přišroubováno k rámu a k opláštění celého zařízení. Ke dnu vany je přivařen spodní díl uložení topné spirály, horní díl je ke spodnímu přišroubován a mezi těmito díly je uložena topná spirála. K vaně je přišroubován usměrňovací plech (fialová barva), který slouží k usměrňování vodní páry mimo pasivní chladič, jelikož by na pasivním chladiči docházelo hned ke kondenzaci páry, což je při zvlhčování nežádoucí. Vodní pára tedy bude proudit trubkou (červená barva), která je přilepená k vedení vany. Na tuto trubku je nasazena tvarovka tvaru T, která propojuje zvlhčovací jednotku, chladič jednotku a jednotku s ventilátorem. Díky ventilátoru je vzduch vháněn do prostoru komory. Svařovaná vana je z nerezové oceli stejně jako vedení vany s přilepenou trubkou. Usměrňovací plech je rovněž z nerezové oceli. Těsnost mezi vanou a vedením vany je zajištěna pomocí pryžového těsnění. Zajištění vany proti samovolnému vypadnutí při manipulaci je řešeno pomocí plechu, kde se využívají jeho pružné vlastnosti.



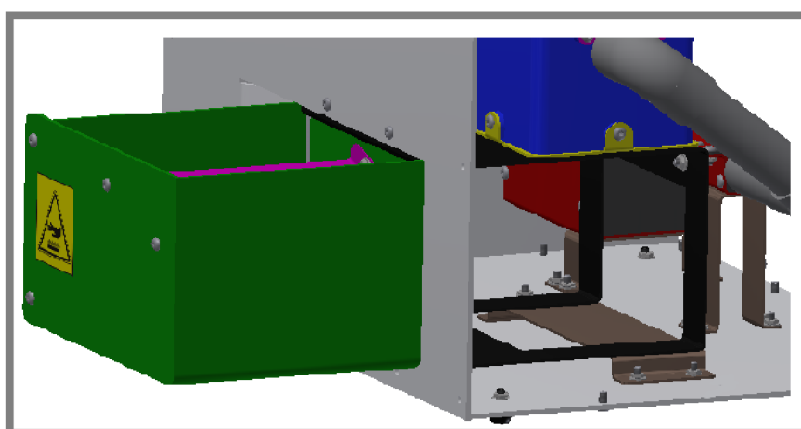
Obr. 4-13 Řez zvlhčovací jednotkou



Obr. 4-14 Pohled na vanu shora a detail zajištění vany



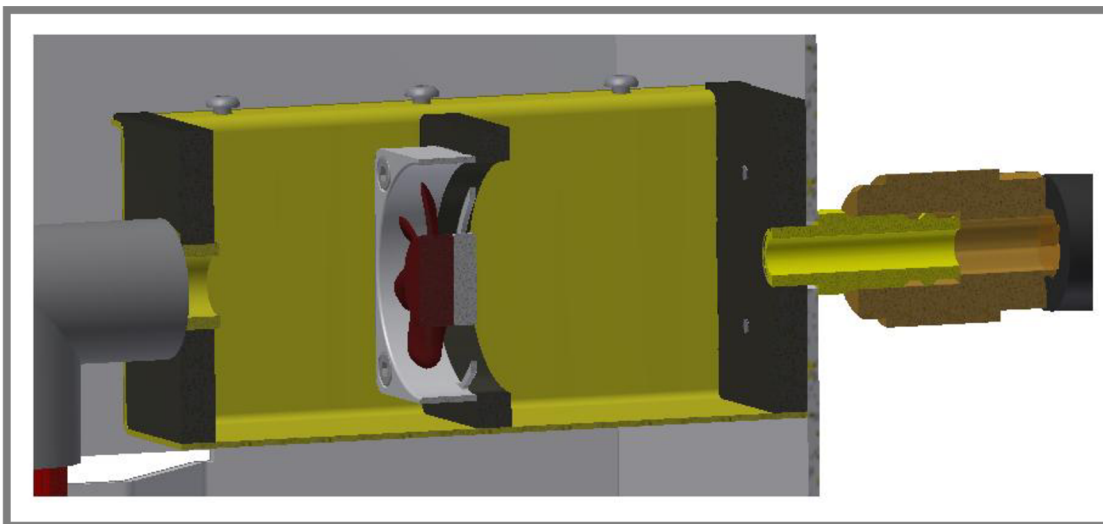
Obr. 4-15 Pohled na zasunutou vanu



Obr. 4-16 Pohled na vysunutou vanu

4.10 Konstrukční řešení jednotky s ventilátorem

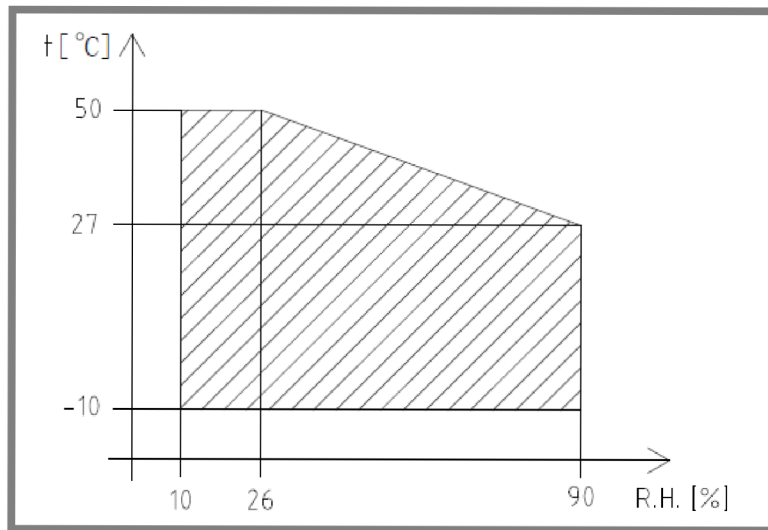
Plášť této jednotky je tvořen z ohnutého plechu z nerezové oceli. Jednotlivé přepážky jsou k tomuto plášti přišroubovány. Přepážky jsou rovněž z nerezové oceli. Tvarovka, která slouží k nasazení potrubí, je do přepážky našroubována. Na druhé straně je našroubována rychlospojka z mosazi, která je určena pro připojení hadice. V této jednotce je umístěn ventilátor NOCTUA NF-A4x10 FLX. Tento ventilátor je přišroubován k přepážce uprostřed a vhání již upravený vzduch do komory. Těsnost mezi jednotlivými spoji je zajištěna těsnícím papírem.



Obr. 4-17 Řez klimatickou jednotkou s ventilátorem

4.11 Rozsah dosažitelných hodnot

V zadání práce je požadovaný rozsah teplot v rozmezí -10 až 50 °C a rozsah relativní vlhkosti od 10 do 90 %. Dosáhnout však vysoké relativní vlhkosti při vysoké teplotě je energeticky náročné, jelikož teplota rosného bodu je vysoká. Např. při teplotě 50 °C a relativní vlhkosti 90 % je teplota rosného bodu kolem $47,5$ °C. Pokud bychom tedy chtěli dosáhnout takového stavu vzduchu, musela by být v celém klimatickém systému nejnižší teplota $47,5$ °C (teplota povrchu uvnitř potrubí, teplota povrchu uvnitř hadic, teplota povrchu stěny uvnitř komory). Tohoto stavu bychom dosáhli jen těžko. Proto tedy budeme uvažovat, že nejvyšší dosažitelná teplota v celém klimatickém systému je 25 °C. Rozsah dosažitelných hodnot stavu vzduchu je znázorněn v následujícím grafu. Z grafu lze vyčíst, že při vysokých teplotách v komoře nedosáhneme vysoké hodnoty vlhkosti.



Obr. 4-18 Graf rozsahu dosažitelného stavu vzduchu

4.12 Skutečné časy potřebné k úpravě vzduchu

4.12

Skutečný objem komory: $V_{skut} = 3 \text{ l}$

$$\tau_{ohř} = \frac{V_{skut} \cdot \rho_{20} \cdot c_p \cdot \Delta t}{P_{OH_{SKUT}} - \dot{Q}_{celk.OH}} = \frac{0,003 \cdot 1,2 \cdot 1010 \cdot 60}{51,6 - 26,53} = 8,7 \text{ s}$$

$$\tau_{chl} = \frac{V_{skut} \cdot \rho_{20} \cdot \Delta h_{chl}}{P_{CH_{SKUT}} - \dot{Q}_{celk.CH}} = \frac{0,003 \cdot 1,2 \cdot [(-9\,698) - 252\,263]}{-30 - (-26,53)} = 271,8 \text{ s}$$

$$\tau_{chl} = 4,53 \text{ min}$$

$$\tau_{zvlh} = \left[V_{H_2O} \cdot \rho_{LED} \cdot c_{LED} \cdot \Delta t_1 + V_{H_2O} \cdot \rho_{LED} \cdot l_t + V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta t_2 + \frac{V_{skut} \cdot \rho_{20}}{1000} \cdot (x_2 - x_1) \cdot l_v \right] \cdot \frac{1}{P_{ZVL_{SKUT}}}$$

$$\tau_{zvlh} = \left[\frac{0,25}{1000} \cdot 917 \cdot 2100 \cdot 10 + \frac{0,25}{1000} \cdot 917 \cdot 334000 + \frac{0,25}{1000} \cdot 1000 \cdot 4180 \cdot 100 + \frac{0,003 \cdot 1,2}{1000} \cdot (77,81 - 0,16) \cdot 2257000 \right] \cdot \frac{1}{300}$$

$$\tau_{zvlh} = 622 \text{ s} = 10,36 \text{ min}$$

$$\tau_{odvlh} = \frac{V_{skut} \cdot \rho_{20} \cdot \Delta h_{odvlh}}{P_{ODV_{SKUT}}} = \frac{0,003 \cdot 1,2 \cdot [(-33\,541) - 252\,263]}{-8} = 129 \text{ s}$$

$$\tau_{odvlh} = 2,14 \text{ min}$$

Skutečné časy potřebné k úpravě vzduchu vyšly poměrně krátké vzhledem k navrhovanému času 15 min. Je to způsobeno tím, že při návrhovém výpočtu jsme uvažovali celkový objem vzduchu v celém zařízení 20 l. Ve skutečnosti se však podařilo navrhnout zařízení tak, že celkový objem vzduchu v něm je pouze 3 l.

4.12 Ekonomická rozvaha

Pro stanovení přibližné ceny klimatické komory je uvedena ekonomická rozvaha, ve které jsou uvedeny odhadované ceny jednotlivých dílů.

Tab. 4-1 Ekonomická rozvaha

Součást	Cena [Kč]
Peltierův článek	180
Pasivní chladič	110
Aktivní chladič ZALMAN	700
Odporový drát (ohřívač)	30
Topná spirála (zvlhčovač)	50
Ventilátor NOCTUA (2ks)	340x2
Rychlospojky	470
Potrubí + tvarovky	150
Hadice	100
Izolace a těsnění	300
Řídící jednotka + elektronika	5000
Výroba jednotlivých dílů	3000
Materiál	3000
Montáž	500
Cena celkem	14 270

5 DISKUZE

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout klimatickou komoru pro zařízení zkoumající tribologické procesy. Díky této komoře se laboratorní měření na těchto zařízeních více přiblíží reálným provozním podmínkám. Při návrhu této komory byla snaha o co nejjednodušší konstrukční řešení. Požadovány byly také malé rozměry celého zařízení. Konstrukce je řešena tak, že samotná klimatická komora je oddělena od jednotlivých klimatických jednotek, které jsou umístěny v klimatickém zařízení. Propojení mezi komorou a klimatickým zařízením je zajištěno pomocí hadic a rychlospojek. Klimatické zařízení má tvar kvádra a jeho rozměry jsou 319x224x212 mm (dxšxv). Dalším požadavkem byla možnost napojení samotné komory na optický tribometr a zároveň na MTM, přičemž komora nijak nemohla omezovat funkci těchto zařízení. Z tohoto důvodu musely být zkonstruovány komory dvě, jedna pro optický tribometr a jedna pro MTM. Všechny tyto požadavky byly splněny.

Dalším požadavkem byla možnost plynulé změny teploty v rozsahu -10 až 50 °C a plynulé změny relativní vlhkosti v rozsahu 10 až 90 %. Tento požadavek byl splněn pouze částečně, jelikož by bylo ekonomicky velice náročné dosáhnout při vysokých teplotách vysokou relativní vlhkost. Rozsah dosažitelných hodnot je znázorněn na Obr. 4-18.

Při návrhu konstrukce byla také snaha o co nejlevnější řešení. Odhadovaná cena celého zařízení je okolo 15 000 Kč. Stolové, komerčně vyráběné komory se cenově pohybují okolo 250 000 Kč. Takto vysoký cenový rozdíl je způsoben vyšším rozsahem teploty a vyšším rozsahem relativní vlhkosti u komerčně vyráběné komory. Také to je způsobeno přesností regulace teploty, kde komerčně vyráběné komory běžně dosahují přesnosti 0,2 K. V našem případě bude přesnost regulace podstatně nižší.

Při návrhu výkonů jednotlivých klimatických jednotek bylo uvažováno s několika zjednodušeními. Asi nejpodstatnějším zjednodušením bylo nahrazení všech klimatických jednotek potrubím s izolací o délce 2 m při výpočtu tepelných ztrát. Toto zjednodušení bylo provedeno z důvodu složité geometrie jednotlivých klimatických jednotek. Dalším zjednodušením bylo zanedbání tepelných ztrát při návrhu výkonu topné spirály zvlhčovače. Tyto ztráty by se pohybovaly okolo 5 % celkového výkonu topné spirály.

6 ZÁVĚR

V této bakalářské práci je řešen konstrukční návrh klimatické komory. První část práce je zaměřena na probíhající procesy při změně stavu vzduchu. Jedná se o proces ohřívání, chlazení, zvlhčování a odvlhčování vzduchu. V této části jsou také zmíněny druhy klimatických komor a druhy klimatických jednotek používaných v klimatických komorách. Další části práce už jsou zaměřeny na samotnou konstrukci. Nejprve byly navrženy přibližné výkony jednotlivých klimatických jednotek. Na základě těchto výkonů se stanovily jejich druhy. Poté byl vytvořen samotný model klimatického zařízení. Při návrhu byla snaha o co nejjednodušší konstrukční řešení. Požadované byly také co nejmenší rozměry a cena.

Všechny tyto požadavky byly splněny. Zařízení má jednoduchou, snadno smontovatelnou konstrukci. Rozměry zařízení jsou 319x224x212 mm (dxšxv). Odhadovaná cena je okolo 15 000 Kč. Komora umožňuje plynulou změnu teploty v rozsahu -10 až 50 °C a plynulou změnu relativní vlhkosti v rozsahu 10 až 90 %, jak bylo v zadání. Problém však nastává u dosažení vysokých relativních vlhkostí při vysokých teplotách. Tento problém je způsoben vysokou teplotou rosného bodu při takovém stavu vzduchu. Dosažení vysokých relativních vlhkostí při vysoké teplotě je energeticky náročné a v našem případě nereálné. Rozsah dosažitelných stavů vzduchu je znázorněn na Obr. 4-18.

Jelikož se jedná pouze o virtuální konstrukci, funkce celé komory by se musela ještě prakticky ověřit. V rámci této práce nebyla řešena řídicí jednotka a elektrické rozvody. Dále se musí vyřešit umístění měřících čidel v komoře, které budou měřit stav vzduchu.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Environmental Test Chambers and Rooms Information. Globalspec [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://www.globalspec.com/learnmore/labware_test_measurement/product_material_testing/environmental_test_chambers
- [2] About Environmental Chambers. CSZINDUSTRIAL [online]. 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.cszindustrial.com/Products/Environmental-Test-Chambers/About-Environmental-Chambers.aspx>
- [3] An Investigation of the Endurance Limit of Hot-Mix Asphalt Concrete Using a New Uniaxial Fatigue Test Protocol. FHWA [online]. 2011 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/fatigue/fatigue2.cfm>
- [4] Stolní zařízení pro zkoušky teplotou. Kaitrade [online]. 2010 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.kaitrade.cz/cz/shop/stolni-zarizeni-pro-zkousky-teplotou/10000020>
- [5] Klimatické a termostatické komory Angelantoni - Sunrise. ANAMET [online]. 2011 [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: http://www.anamet.cz/technika/klimaticke_a_termostaticke_komory_angelantoni_sunrise
- [6] Benchtop Chambers. THERMOTRON [online]. 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.thermotron.com/product/temperature-humidity/benchtop-chambers>
- [7] Teplotní šokové komory TS. Testsysteme [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/zkusebni-komory/zkusebni-komory-pro-rychle-zmeny-teplot-ess/teplotni-sokove-komory-ts.html>
- [8] Teplotní šokové komory (ESPEC). Schoeller [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://www.instruments.cz/index.php?option=com_redshop&view=product&catid=278&pid=141
- [9] Zařízení s regulací vlhkosti. Kaitrade [online]. 2010 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.kaitrade.cz/cz/shop/zarizeni-s-regulaci-vlhkosti/10000034>
- [10] Klimatická komora. Energetické fórum [online]. 2011 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/modules/marwel/index.php?rewrite=fsi-vut-v-brne%2Flaboratore%2Fklimaticka-komora&page=3>
- [11] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [12] Teorie vlhkého vzduchu (III). Tzbinfo [online]. 2016 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3382-teorie-vlhkeho-vzduchu-iii>
- [13] Klimatizace a průmyslová vzduchotechnika. 2009. Dostupné z: https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/KPV/Klim_a_prum_vzd.pdf
- [14] Chladiva. Ebozp [online]. 2010 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php/Coolant>
- [15] Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů. Odborné časopisy [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30765

- [16] Termoelektrické materiály. Upce [online]. 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html>
- [17] JANOTKOVÁ, E.: *Technika prostředí*. 1. vyd. Brno: VUT, 1991. s. 201. ISBN 80-214-0258-X.
- [18] Parní, nebo ultrazvukový zvlhčovač? Kompletní přehled principů zvlhčování. Proalergiky [online]. 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.proalergiky.cz/magazin/clanek/parni-nebo-ultrazvukovy-zvlhcovac-kompletni-prehled-principu-zvlhcovani>
- [19] Ultrazvukové zvlhčovače CONTRONICS. Zvlhčování [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.zvlhcovani.cz/index.php?id=237&lang=CZ>
- [20] Zvlhčovače vzduchu se studeným odparem. Zvlhčovač-vzduchu [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.zvlhcovac-vzduchu.cz/zvlhcovace-vzduchu-se-studenym-odparem.php>
- [21] Vlhký vzduch verze 3.0. Energetické fórum [online]. 2011 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/vlhky-vzduch-verze-3-0>
- [22] Kondenzační odvlhčovače. Odvlhčování [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.odvlhcovani.cz/kondenzacni-odvlhcovace.p8.html>
- [23] Adsorpční odvlhčovače. Odvlhčování [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.odvlhcovani.cz/adsorpcni-odvlhcovace.p13.html>
- [24] Farmaceutické sušárny. BMT [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.bmt.cz/farmaceuticke-susarny>
- [25] Tribologie. Ústav konstruování [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/vyzkum_tribologie/vybaveni/
- [26] Vents 100 VKO L ventilátor do potrubí. COMANDER [online]. 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.comander.cz/male-vnejsi-ventilatory-s-kulickovymi-lozisky/344-vents-100-vko-l-do-potrubi-s-kulickovymi-lozisky.html>
- [27] NOCTUA NF-A4x10 FLX. ALZA [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.alza.cz/noctua-nf-a4x10-flx-d407726.htm>
- [28] ODL 6R976. GES [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/odl-6r976-GES06914582.html>
- [29] Odporové materiály, dráty, plechy, pro výrobu bočníků, resistorů, topných spirál. ELCHEMCo [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://web.elchemco.cz/kanthal-konstantan-manganin-isotan-chromnikl-nikelin-a-dalsi-odporove-materialy-rezani-polystyrenu-vyrobu-rezistoru-a-termoelektricky-clanku.php>
- [30] M-TEC1-12710. GM ELETRONIC [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/m-tec1-12710-p601-012>
- [31] Thermoelectric Cooler. Hebeiltd [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12710.pdf>
- [32] PRIMECOOLER PC-NB1 NORTHBRIDGE HEATSINK. TNTrade [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://shop.tntrade.cz/primecooler-pc-nb1-northbridge-heatsink_d57600.html
- [33] Zalman CNPS2X pro mini-ITX. Grafika [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.grafika.cz/rubriky/zpravy/zalman-cnps2x-pro-mini-itx-161974cz?diskuse>

- [34] TOPNÁ SPIRÁLA 300W 230V l=300mm, d=3,1mm. NADETA [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.nadeta.cz/nahradni-dily/ostatni-topnatelesa/topne-spiraly/topna-spirala-300w-230v-l300mm-d31mm-%5Bid%3D500490150%5D.html?ItemIdx=17>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**8**

t_{MAX} [°C]	-maximální teplota v komoře
t_{MIN} [°C]	-minimální teplota v komoře
t_{20} [°C]	-teplota okolního vzduchu
t_{OH} [°C]	-maximální teplota ohřívače
t_S [°C]	-teplota studené strany Peltierova článku
t_H [°C]	-teplota teplé strany Peltierova článku
Δt [°C]	-maximální rozdíl teplot v komoře
ρ_{20} [kg/m ³]	-hustota vzduchu při 20°C
\dot{V} [m ³ /s]	-vzduchový výkon
c_p [J/kg·K]	-měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku
P_r	-Prandtlovo číslo pro vzduch
ν_{50} [m ² /s]	-kinematická viskozita vzduchu při 50°C
\dot{V}_{PRUT} [m ³ /s]	-objemový průtok vzduchu
r_1 [m]	-vnitřní poloměr trubky
r_2 [m]	-vnější poloměr trubky
r_3 [m]	-vnější poloměr izolace potrubí
r_4 [m]	-vnitřní poloměr hadice
r_5 [m]	-vnější poloměr hadice
r_6 [m]	-vnější poloměr izolace hadice
r_7 [m]	-vnitřní poloměr válcové stěny komory
r_8 [m]	-vnější poloměr válcové stěny komory
r_9 [m]	-vnější poloměr izolace válcové stěny komory
L_{potr} [m]	-délka potrubí
L_{hadic} [m]	-délka hadic
L_1 [m]	-délka válcové stěny komory
t [m]	-tloušťka skla
S_P [m ²]	-průřez potrubí
S_H [m ²]	-průřez hadice
S_{RS} [m ²]	-plocha rovinné stěny (skleněného víka)
w_P [m/s]	-rychlost proudění vzduchu v potrubí
w_H [m/s]	-rychlost proudění vzduchu v hadici
Re_P	-Reynoldsovo číslo vztažené k potrubí
Re_H	-Reynoldsovo číslo vztažené k hadici
Nu_P	-Nusseltovo číslo vztažené k potrubí
Nu_H	-Nusseltovo číslo vztažené k hadici
α_{INP} [W/m ² ·K]	-součinitel přestupu tepla mezi vzduchem a vnitřní stěnou trubky
α_{INH} [W/m ² ·K]	-součinitel přestupu tepla mezi vzduchem a vnitřní stěnou hadice
α_{OUT} [W/m ² ·K]	-součinitel přestupu tepla mezi izolací a vnějším prostředím
λ_{VZ} [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti vzduchu
λ_1 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti plastové trubky
λ_2 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti izolace mirelon
λ_3 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti PVC hadice
λ_4 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti izolace mirelon

λ_5 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti válcové stěny komory
λ_6 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti izolace komory (polyamid)
λ_7 [W/m·K]	-součinitel tepelné vodivosti skleněného víka
$R_{\alpha_{IN P}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění uvnitř trubky
R_{trubka} [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v trubce
$R_{Izolace P}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v izolaci potrubí
$R_{\alpha_{OUT}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění vně izolace
$R_{potrubí}$ [m·K/W]	-celkový tepelný odpor potrubí
$R_{\alpha_{IN H}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění uvnitř hadice
R_{Hadice} [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v hadici
$R_{Izolace H}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v izolaci hadice
$R_{\alpha_{OUT}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění vně izolace
R_{hadic} [m·K/W]	-celkový tepelný odpor hadic
$R_{VS_{PLÁŠT}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení ve válcové stěně komory
$R_{VS_{IZOLACE}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor vedení v izolaci válcové stěny
$R_{VS_{\alpha}}$ [m·K/W]	-tepelný odpor proudění vně izolace válcové stěny
R_{VS} [m·K/W]	-celkový tepelný odpor válcové stěny
$R_{RS_{SKLO}}$ [m ² ·K/W]	-tepelný odpor vedení rovinné stěny (skleněného víka)
$R_{RS_{\alpha}}$ [m ² ·K/W]	-tepelný odpor proudění vně skleněného víka
R_{RS} [m ² ·K/W]	-celkový tepelný odpor rovinné stěny
$\dot{Q}_{potrubí}$ [W]	-tepelné ztráty v potrubí
\dot{Q}_{hadic} [W]	-tepelné ztráty v hadicích
\dot{Q}_{VS} [W]	-tepelné ztráty ve válcové stěně komory
\dot{Q}_{RS} [W]	-tepelné ztráty v rovinné stěně komory
$\dot{Q}_{celk.OH}$ [W]	-celkové tepelné ztráty při ohřevu
$\dot{Q}_{celk.CH}$ [W]	-celkové tepelné ztráty při chlazení
$Q_{ohř}$ [W]	-výkon potřebný k ohřátí vzduchu v komoře
$Q_{O_{MIN}}$ [W]	-minimální výkon ohříváče [W]
Q_{Chl} [W]	-výkon potřebný k ochlazení vzduchu v komoře [W]
$Q_{CHL_{MIN}}$ [W]	-minimální výkon chladiče
$S_{OHŘ}$ [m ²]	-průřez potrubí, ve kterém je uložen ohříváč
$w_{OHŘ}$ [m/s]	-rychlost proudění vzduchu v potrubí, ve kterém je uložen ohříváč
y [m]	-délka strany čtvercového potrubí, ve kterém je uložen ohříváč
$Re_{OHŘ}$	-Reynoldsovo číslo vztažené k ohříváči
$Nu_{OHŘ}$	-Nusseltovo číslo vztažené k ohříváči
$\alpha_{OHŘ}$ [W/m ² ·K]	-součinitel přestupu tepla mezi ohříváčem a ohřívaným vzduchem
S_{CHL} [m ²]	-průřez trubky, ve které je uložen pasivní chladič
w_{CHL} [m/s]	-rychlost proudění vzduchu v trubce, ve které je uložen pasivní chladič
$w_{CHL_{MAX}}$ [m/s]	-rychlost proudění vzduchu mezi žebry pasivního chladiče
Re_{CHL}	-Reynoldsovo číslo vztažené k pasivnímu chladiči
Nu_{CHL}	-Nusseltovo číslo vztažené k pasivnímu chladiči

α_{CHL} [W/m ² ·K]	-součinitel přestupu tepla mezi pasivním chladičem a chlazeným vzduchem
S_L [m]	-rozteč žebor pasivního chladiče ve směru proudění vzduchu
S_T [m]	-rozteč žebor pasivního chladiče ve směru kolmém na proudící vzduch
a [m]	-délka hrany žebra ve směru kolmém na proudící vzduch
b [m]	-délka hrany žebra ve směru proudění vzduchu
\dot{V}_{H_2O} [m ³ /s]	-vodní výkon
m_{w1} [kg/s]	-potřebné množství vodní páry přivedené do vzduchu
m_{w2} [kg/s]	-potřebné množství zkondenzované vody
x_1 [g/kg _{sv}]	-měrná vlhkost při stavu 1
x_2 [g/kg _{sv}]	-měrná vlhkost při stavu 2
Q_{odvl} [W]	-minimální výkon odvlhčovače
Q_{zvlh} [W]	-minimální výkon topného tělesa zvlhčovače
Q_{LED} [W]	-výkon potřebný k ohřátí ledu na teplotu tání
$Q_{LED \rightarrow VODA}$ [W]	-výkon potřebný ke změně skupenství z ledu na vodu
Q_{VODA} [W]	-výkon potřebný k ohřátí vody na teplotu varu
$Q_{VODA \rightarrow PÁRA}$ [W]	-výkon potřebný ke změně skupenství z vody na páru
ρ_{LED} [kg/m ³]	-hustota ledu
ρ_{H_2O} [kg/m ³]	-hustota vody
c_{LED} [J/kg·K]	-měrná tepelná kapacita ledu
c_{H_2O} [J/kg·K]	-měrná tepelná kapacita vody
l_t [J/kg]	-měrné skupenské teplo tání
l_v [J/kg]	-měrné skupenské teplo varu
h_{MAX} [J/kg _{sv}]	-maximální entalpie v komoře (při teplotě 50°C a RH 90%)
h_{MIN} [J/kg _{sv}]	-minimální entalpie v komoře (při teplotě -10°C a RH 10%)
h_r [J/kg _{sv}]	-entalpie rosného bodu v komoře (při teplotě -10°C a RH 10%)
Δh_{chl} [J/kg _{sv}]	-rozdíl entalpií při chlazení
Δh_{odvlh} [J/kg _{sv}]	-rozdíl entalpií při odvlhčování
Δt_{OHRev} [°C]	-rozdíl mezi maximální teplotou v komoře a teplotou okolního vzduchu
Δt_{OH} [°C]	-rozdíl mezi teplotou ohřivače a teplotou v komoře
$\Delta t_{CHLAZENÍ}$ [°C]	-rozdíl mezi minimální teplotou v komoře a teplotou okolního vzduchu
Δt_{PELT} [°C]	-rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou Peltierova článku
Δt_{CHL} [°C]	-rozdíl teplot mezi pasivním chladičem a chlazeným vzduchem
Δt_1 [°C]	-změna teploty při ohřevu ledu z minimální teploty v komoře na teplotu tání
Δt_2 [°C]	-změna teploty při ohřevu vody z teploty tání na teplotu varu
$S_{O MIN}$ [m ²]	-minimální plocha ohřivače
S_{OSKUT} [m ²]	-skutečná plocha ohřivače
$S_{CHL MIN}$ [m ²]	-minimální plocha pasivního chladiče
$S_{CHLSKUT}$ [m ²]	-skutečná plocha pasivního chladiče
R_0 [Ω]	-elektrický odpor jednoho metru drátu ohřivače
R_{OH} [Ω]	-elektrický odpor ohřivače
L_{OH} [m]	-délka drátu ohřivače
P_{OHSKUT} [W]	-skutečný výkon ohřivače

U_{OH} [V]	-vstupní napětí do ohřívače
V_{skut} [m ³]	-celkový objem vzduchu v celém klimatickém zařízení
$\tau_{ohř}$ [s]	-čas potřebný k ohřátí vzduchu při max. výkonu
τ_{chl} [s]	-čas potřebný k ochlazení vzduchu při max. výkonu
τ_{zvlh} [s]	-čas potřebný k zvlhčení vzduchu při max. výkonu
τ_{odvlh} [s]	-čas potřebný k odvlhčení vzduchu při max. výkonu
P_{CHSKUT} [W]	-skutečný výkon chladiče při $\Delta t_{PELT} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$
$P_{ZVLSKUT}$ [W]	-skutečný výkon topné spirály zvlhčovače
$P_{ODVSKUT}$ [W]	-skutečný výkon chladiče při $\Delta t_{PELT} = 62\text{ }^{\circ}\text{C}$

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**9**

Obr. 1-1 Pracovní schéma klimatické komory [3]	15
Obr. 1-2 Komora od firmy Thermotron, model SM-1.0 [6]	16
Obr. 1-3 Walk-in komora [9]	17
Obr. 1-4 Drive-in komora na FSI [10]	18
Obr. 1-5 Průběh změny stavu vzduchu při ohřevu [12]	19
Obr. 1-6 Průběh změny stavu vzduchu při chlazení [12]	21
Obr. 1-7 Schematické znázornění Peltierova článku [16]	22
Obr. 1-8 Průběh změny stavu vzduchu při vlhčení vzduchu vodou a párou [12]	23
Obr. 1-9 Kondenzační odvlhčování [21]	25
Obr. 1-10 Schéma kondenzačního odvlhčovače [22]	26
Obr. 1-11 Schéma adsorpčního vysoušeče [22]	27
Obr. 1-12 Znázornění přirozené cirkulace vzduchu [23]	28
Obr. 2-1 Detailní pohled na optický tribometr [24]	30
Obr. 2-2 Rozměry vany optického tribometru	30
Obr. 2-3 Detailní pohled na MTM	31
Obr. 2-4 Tvar a rozměry vany + tvar a rozměry výřezu v komoře pro těleso	31
Obr. 3-1 Průmyslový ventilátor 100VKO L [25]	33
Obr. 3-2 Ventilátor NOCTUA, typ NF-A4x10 FLX [26]	34
Obr. 3-3 Průřez potrubím	35
Obr. 3-4 Průřez hadicí	37
Obr. 3-5 Průřez komory	39
Obr. 3-6 Odporový drát z Kanthalu [27]	41
Obr. 3-7 Průřez potrubím s ohříváčem	41
Obr. 3-8 Peltierův článek M-TEC1-12710 [29]	44
Obr. 3-9 Závislost chladicího výkonu na rozdílu teplot obou stran Peltierova článku, pro teplotu teplé strany $T_h=25^\circ\text{C}$ [30]	44
Obr. 3-10 Schéma obtékání vzduchu pasivního chladiče	45
Obr. 3-11 Pasivní chladič PRIMECOOLER PC-NB1 [31]	46
Obr. 3-12 Aktivní chladič Zalman CNPS2X [32]	47
Obr. 3-13 Schéma parního zvlhčovače	47
Obr. 3-14 Topná spirála o výkonu 300W [33]	49
Obr. 3-15 Schéma varianty 1	50
Obr. 3-16 Schéma varianty 2	51
Obr. 3-17 Schéma varianty 3	51
Obr. 4-1 Klimatické zařízení s připojenými hadicemi pohled zepředu	52
Obr. 4-2 Klimatické zařízení s připojenými hadicemi pohled zezadu	53
Obr. 4-3 Klimatická komora pro optický tribometr	53
Obr. 4-4 Klimatická komora pro MTM	54
Obr. 4-5 Uspořádání klimatických jednotek, pohled zepředu	54
Obr. 4-6 Uspořádání klimatických jednotek	55
Obr. 4-7 Izolace klimatických jednotek	55
Obr. 4-8 Řez ohřívací jednotkou bez víka	56
Obr. 4-9 Detail uložení ohříváče	56
Obr. 4-10 Řez klimatickou jednotkou s chladičem	57
Obr. 4-11 Detail uložení Peltierova článku a pasivního chladiče	57
Obr. 4-12 Díra pro odkapávání zkondenzované vody	58
Obr. 4-13 Řez zvlhčovací jednotkou	58

Obr. 4-14 Pohled na vanu shora a detail zajištění vany	59
Obr. 4-15 Pohled na zasunutou vanu	59
Obr. 4-16 Pohled na vysunutou vanu	59
Obr. 4-17 Řez klimatickou jednotkou s ventilátorem	60
Obr. 4-18 Graf rozsahu dosažitelného stavu vzduchu	61

10 SEZNAM TABULEK

10

Tab. 1-1 Základní technické parametry Drive-in komory na FSI [10]

18

Tab. 4-1 Ekonomická rozvaha

62

11 PŘÍLOHY

Výkres sestavy

BP-00-00