

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV**



**VLIV NAMRZÁNÍ NA PROVOZ VÝMĚNÍKU  
ZPĚTNÉHO ZÍSKÁVÁNÍ TEPLA**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vypracovala:**

**Bc. Alžběta Svobodová**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.**

**Akademický rok:**

**2021/2022**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Svobodová Jméno: Alžběta Osobní číslo: 468213

Zadávací katedra: katedra technických zařízení budov

Studijní program: Inteligentní budovy

Studijní obor/specializace: Inteligentní budovy

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv namrzání na provoz výměníku zpětného získávání tepla

Název diplomové práce anglicky: The influence of frosting on the performance of heat exchanger in heat recovery

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je popsat vliv námrazy na chování výměníku zpětného získávání tepla ve vzduchotechnickém systému. Zpracujte přehled problematiky prostřednictvím rešerše stávající literatury. Formulujte hypotézu. Stanovte cíle experimentálního ověřování a navrhnete experiment. Proveďte sérii měření a vyhodnoťte získaná data. Formulujte zjištěné vyplývající z výsledků a popište jaké dopady má námraza na chování výměníku, případně jeho účinnost.

Seznam doporučené literatury:

Anisimov, S., Jedlikowski, A., Pandelidis, D. Frost formation in the cross-flow plate heat exchanger for energy recovery, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 90, p. 201-217, 2015.


Ko, J., Park, J., Jeong, J-W. Energy saving potential of a model-predicted frost prevention method for energy recovery ventilators, Applied Thermal Engineering, v. 185, 2021.

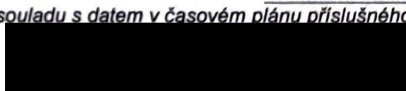
Jméno vedoucího diplomové práce: Daniel Adamovský

Datum zadání diplomové práce: 22.2.2022

Termín odevzdání DP v IS KOS: 15.5.2022

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

  
Podpis vedoucího práce

  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

24.2.2022

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv namrzání na provoz výměníku zpětného získávání tepla“ zpracoval(a) samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Jméno Příjmení

## Poděkování

Hlavní poděkování patří vedoucímu mé diplomové práce Ing. Danielovi Adamovskému, Ph.D. za jeho odborné rady, vstřícnost, trpělivost a ochotu při zpracování práce. Dále děkuji za cenné praktické rady při provádění experimentů Ing. Martinovi Kny, Ph.D.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

## Anotace

Předmětem diplomové práce je vyhodnocení vlivu vzniku námrazy na provoz výměníku zpětného získávání tepla. Byla provedena série experimentálních měření, pro které byl použit entalpický deskový protiproudý výměník tepla. Nejprve byly zjišťovány vlastnosti daného výměníku tepla pro normované podmínky, především teplotní a vlhkostní poměry a vnitřní netěsnosti. Poté byl výměník tepla podroben několika zmrazovacím cyklům. Pro každý cyklus byla naměřená data následně vyhodnocena a byly sledovány změny způsobené přítomností námrazy. Z naměřených dat byly pro daný výměník vyvozeny možnosti detekce námrazy, které byly porovnány s metodami uváděnými v literatuře.

### Klíčová slova:

Výměník zpětného získávání tepla, entalpický deskový výměník, experimentální měření, senzory, námraza, tepelný a vlhkostní poměr, vnitřní netěsnost

## Annotation

The subject of this diploma thesis is the evaluation of the influence of frosting on the performance of a heat exchanger in heat recovery. A series of experimental measurements were performed using an enthalpy plate countercurrent heat exchanger. First, the properties of the heat exchanger for standardized conditions, especially temperature and humidity conditions and internal leaks were determined. The heat exchanger was then subjected to several frosting cycles. For each cycle, the measured data were subsequently evaluated and changes caused by the presence of icing were monitored. From the measured data, the possibilities of icing detection were derived for the given exchanger, which were compared with the methods reported in the literature.

### Key words:

Heat exchanger, enthalpy plate heat exchanger, experimental measurement, sensors, frosting, heat and humidity ratio, internal leakage

# Obsah

1	Úvod .....	7
2	Zařízení pro zpětné získávání tepla .....	8
2.1	Regenerační (entalpické) výměníky .....	9
2.1.1	Rotační výměníky .....	9
2.1.2	Přepínací výměníky .....	12
2.2	Rekuperační výměníky .....	13
2.2.1	Kapalinové okruhy.....	13
2.2.2	Tepelné trubice .....	14
2.2.3	Deskové výměníky.....	15
2.2.4	Entalpické deskové výměníky.....	17
3	Námraza v tepelném výměníku.....	18
3.1	Tvorba námrazy.....	19
3.2	Vlastnosti výměníku tepla vystaveného námraze.....	20
3.2.1	Rekuperační výměníky .....	20
3.2.2	Regenerační výměníky .....	20
3.3	Ochrana proti vzniku námrazy .....	21
3.4	Odstraňování vzniklé námrazy .....	22
3.5	Detekce námrazy.....	22
4	Metodika .....	24
4.1	Metodika dle ČSN EN 308 .....	24
4.2	Stanovení průtoku vzduchu dle ČSN EN 16211.....	26
5	Experiment .....	27
5.1	Vzduchotechnická laboratoř .....	27
5.2	Příprava na měření.....	28
6	Výsledky experimentu a diskuse .....	32
6.1	Počáteční stav měřeného výměníku tepla .....	32

6.1.1	Výpočet teplotního a vlhkostního poměru .....	34
6.1.2	Vnitřní netěsnosti .....	39
6.2	Námraza ve výměníku .....	42
6.2.1	Průběh tvorby námrazy .....	45
6.3	Posouzení způsobů detekce námrazy dle naměřených dat .....	62
6.4	Nejistoty měření .....	64
6.4.1	Nejistota teplotního poměru .....	64
6.4.2	Nejistota vlhkostního poměru .....	66
7	Závěr .....	67
8	Bibliografie .....	69
9	Seznam obrázků .....	75
10	Seznam tabulek .....	77
11	Seznam grafů .....	78
12	Seznam příloh .....	79

## Seznam použitých symbolů

$I_1$		Odváděný proud vzduchu
$I_2$		Odpadní proud vzduchu
$E_1$		Čerstvý proud vzduchu
$E_2$		Přiváděný proud vzduchu
$\dot{V}$	$[m^3/h]$	Objemový průtok vzduchu
$\dot{M}$	$[kg/h]$	Hmotnostní průtok vzduchu
$p_v''$	$[Pa]$	Parciální tlak syté páry
$t$	$[^\circ C]$	Teplota vzduchu
$t_i$	$[^\circ C]$	Teplota vzduchu v laboratoři
$\rho_a$	$[kg/m^3]$	Hustota vzduchu
$c$	$[J/(kg \cdot K)]$	Měrná tepelná kapacita vzduchu
$\varphi$	$[\%]$	Relativní vlhkost vzduchu
$x$	$[g_{v.p.}/kg_{s.v.}]$	Měrná vlhkost vzduchu
$w$	$[m/s]$	Rychlost proudění vzduchu
$p$	$[Pa]$	Celkový tlak vlhkého vzduchu
$p_a$	$[kPa]$	Atmosférický tlak vzduchu
$\Phi$	$[\%]$	Teplotní poměr
$\Psi$	$[\%]$	Vlhkostní poměr
$Q$	$[W \cdot m^3/kg]$	Tepelný tok
$\Delta p$	$[Pa]$	Tlakový rozdíl



# 1 Úvod

Výměníky zpětného získávání tepla jsou dnes již nedílnou součástí systémů větrání obytných budov. V současnosti se v domácnostech využívá pro provoz, včetně úpravy vnitřního prostředí a přípravy teplé vody, 40 % z celkové spotřeby energie v České republice [1]. Použití výměníků pro zpětné získávání tepla v obytných budovách napomáhá snižovat množství energie, které se v budovách spotřebuje. S jejich pomocí je možné využít teplo odpadního vzduchu, které by jinak zůstalo nevyužito a předat ho čerstvému vzduchu. Největší význam má použití výměníku tepla v zimním období, kdy je potřeba energie na ohřátí vzduchu přiváděného do obytných místností na požadovanou teplotu nejvyšší.

V souvislosti s výměníky tepla ve vzduchotechnice je možné se setkat s kondenzací vodní páry a s případným vznikem námrazy. Toto téma je velmi důležité, protože led uvnitř výměníku tepla má negativní vliv na jeho provoz, obzvláště pokud ho vzniká větší množství. Nejen, že jeho přítomnost snižuje schopnost zpětného získávání tepla, v extrémních případech může, kvůli jeho velkému objemu, výměník i poškodit. Vznikem a rozvojem námrazy ve výměníku tepla ve vzduchotechnice se doposud zabývalo několik vědeckých článků včetně menšího počtu experimentálních měření. Stále je ale potřeba v této oblasti provádět další výzkum, aby bylo možné v budoucnu lépe vznik a přítomnost ledu detekovat.

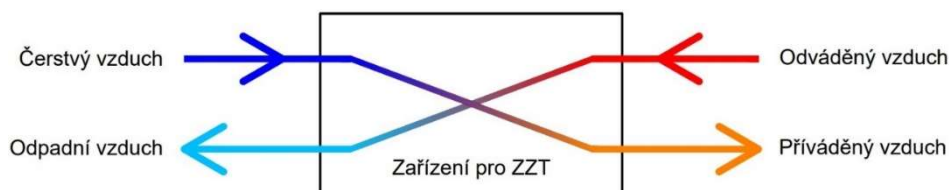
Výrobci často řeší problém vzniku námrazy prevencí, která ale může mít za následek snížení úspory energie, která je dosaženo použitím výměníku. Proto je důležité znát okrajové podmínky, pro které bude s největší pravděpodobností vznikat námraza, a aplikovat je v běžném provozu. Tím může být zamezeno předčasnému spuštění opravných opatření a výměník je využit na maximum.

Cílem této práce je experimentální vyhodnocení tepelně-vlhkostních a dalších změn ve výměníku tepla vystaveného namrzání a jiných dopadů na jeho chování. Bude zjištěn průběh zamrzání pro různé tepelně-vlhkostní stavy vzduchu. Na základě naměřených dat budou posouzeny metody detekce námrazy běžně uváděných v literatuře z hlediska spolehlivosti pro měřený výměník zpětného získávání tepla. V neposlední řadě bude ověřena hypotéza, že vznik většího množství ledu ve výměníku má negativní následky na jeho provoz.

## 2 Zařízení pro zpětné získávání tepla

Ve vzduchotechnice je za zařízení pro zpětné získávání tepla (dále ZZT) považováno taková soustava, která umožňuje předávat energii mezi dvěma proudy vzduchu o rozdílných vlastnostech. Tyto zařízení mohou přenos energie mezi dvěma médii zajišťovat rozdílnými způsoby. Některé výměníky tepla předávají energii s pomocí nehybné akumulární hmoty, jiné pro přenos využívají teplotnosné médium, například kapalinu. Proudů přiváděného a odváděného vzduchu jsou téměř ve všech případech odděleny, neproudí stejnými prostory. Existují ale i výjimky, například rotační výměníky. Tepelné výměníky se ve vzduchotechnice používají primárně pro předehřev nebo předchlazení čerstvého vzduchu a tím snižují celkovou potřebu energie pro docílení požadované teploty přiváděného vzduchu. [2]

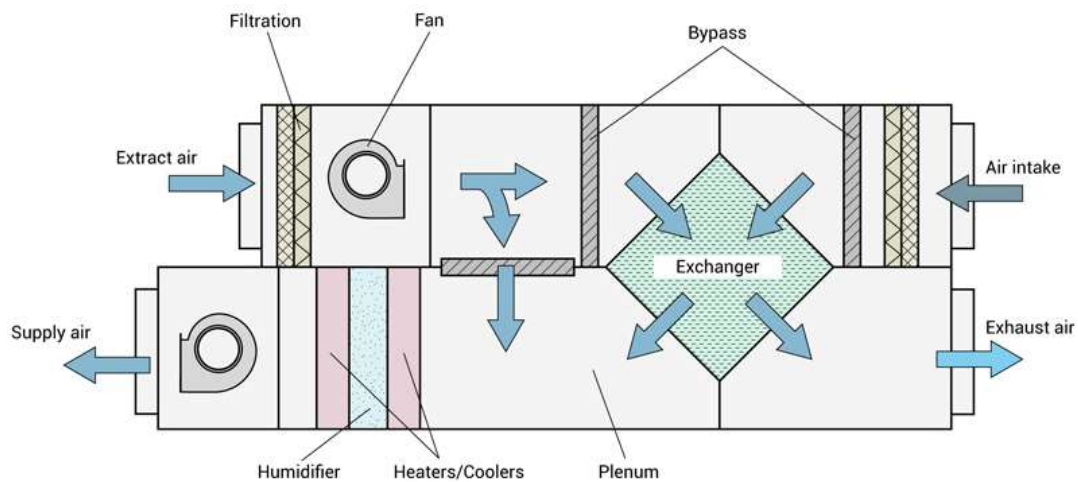
Do zvoleného výměníku tepla je přiváděn z místnosti teplý odváděný vzduch, který předává svoji tepelnou energii studenému čerstvému vzduchu. Ten poté odchází ze vzduchotechnické jednotky jako odpadní vzduch. Již ohřátý čerstvý vzduch se nazývá přiváděný a jeho teplotní a vlhkostní stav je dále upravován ve vzduchotechnické jednotce dle požadavků.



Obrázek 1: Schéma zařízení pro zpětné získávání tepla s vyznačenými názvy jednotlivých proudů vzduchu, zdroj: archiv autora

Výměníky ZZT mohou být použity jako samostatný prvek, umístěný například v potrubí, nebo jako součást vzduchotechnické jednotky. Do běžné vzduchotechnické jednotky se zařízení pro zpětné získávání tepla umísťuje tak, aby přiváděný čerstvý vzduch o nízké teplotě nejprve prošel výměníkem tepla a až poté byl veden ohříváčem vzduchu, který zajistí požadovanou teplotu přiváděného vzduchu. Před vstupem čerstvého vzduchu do zařízení pro ZZT se zpravidla nachází filtr a ventilátor, případně zde může být instalován předehřev vzduchu pro snížení rizika namrzání tepelného výměníku (viz odstavec 3.3).

Odváděný vzduch je, podobně jako čerstvý, veden skrz filtr a s pomocí ventilátoru proudí skrz výměník tepla. Některé vzduchotechnické jednotky také nabízí možnost použití obtoku (tzv. bypassu), při jehož otevření je zamezeno odpadnímu proudu vzduchu procházet skrz výměník tepla a tím ohřívát čerstvý vzduch. Této možnosti je využíváno hlavně v letním období, aby nedocházelo k ohřívání čerstvého vzduchu. Důležité je, aby byl k výměníku tepla umožněn přístup pro provádění kontrol a případné čištění. [3] [4]



Obrázek 2: Schéma vzduchotechnické jednotky, zeleně je označeno zařízení pro ZTZ, v tomto případě deskový výměník, zdroj: [5]

Zřízení pro ZTZ se nejčastěji dělí na dvě skupiny: regenerační a rekuperační. Rozdíl je především v tom, jakým způsobem a jaký druh tepla je výměník schopen předávat. [6]

## 2.1 Regenerační (entalpické) výměníky

Regenerační výměníky se vyznačují tím, že teplý odváděný proud vzduchu nejdříve předá teplo akumulární hmotě a ta ho dále předá studenému přiváděnému proudu vzduchu. Ve většině případů jsou schopné předávat mezi proudy vzduchu jak citelné, tak i latentní teplo. Latentní teplo se uvolní nebo je pohlceno při změně skupenství média, při jeho uvolňování nedochází ke změně teploty látky. Když například zkondenzuje vodní pára, je při tomto procesu latentní teplo uvolněno. Je to tedy energie, kterou získáváme z vlhkého vzduchu. Teplo odebrané tělesem pro zvýšení jeho teploty se nazývá citelné teplo, při tomto procesu neprobíhá žádná změna skupenství. [2]

Regenerační výměníky jsou často v literatuře označovány jako entalpické, protože jsou schopné přenášet mezi dvěma proudy vzduchu i vlhkost. Ve vzduchotechnice entalpie vyjadřuje energii, která je uložena v jednotkovém množství vlhkého vzduchu. Závisí na teplotě vlhkého vzduchu a na jeho měrné vlhkosti. Používá se k popisu energetického stavu vlhkého vzduchu při změně tepelné, vlhkostní nebo tepelně-vlhkostní úrovně. [7] [8]

### 2.1.1 Rotační výměníky

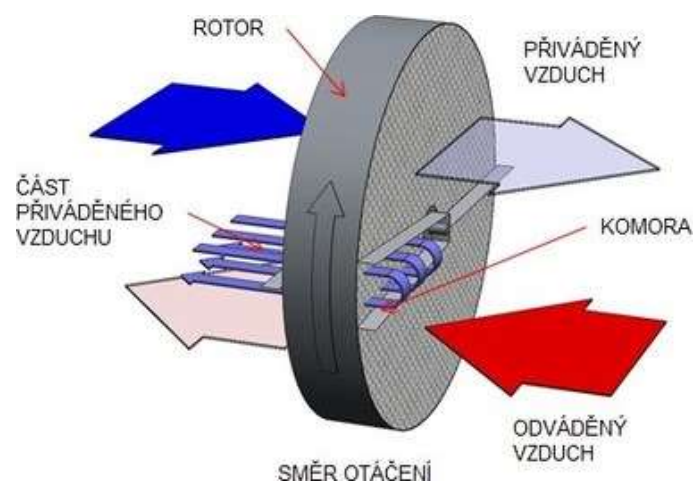
Mezi jedny z nejpoužívanějších regeneračních výměníků patří výměníky rotační. Fungují na principu otáčení akumulární hmoty v rámu, jehož jednou částí prochází čerstvý vzduch a druhou vzduch odváděný. Akumulární hmotu nejčastěji tvoří navinutá zvlněná hliníková fólie tak, aby mezi vrstvami vznikly malé kanálky. Rotor může být rovněž vyroben z plastu nebo z materiálu na

bázi celulózy [9]. Odváděný vzduch odevzdává své citelné teplo kotouči, který se otáčí a při kontaktu s čerstvým proudem vzduchu o nižší teplotě mu získanou energii předává. Rotační výměníky mohou přenášet převážně citelné teplo nebo zároveň citelné i latentní teplo – jsou schopny zpětně získávat i vlhkost. Druhé možnosti nastává v případě, že nanese na kotouč hygroskopickou vrstvu, nebo v situaci, kdy na kotouči kondenzuje vodní pára. Přenos vlhkosti pak může nastat obousměrně (z přiváděného do odváděného nebo naopak) dle aktuálních vlastností proudícího vzduchu. [6]

Pro přenos vlhkosti se v současné době používá především silikagel. Tato látka obsahuje velké množství pórů, které mnohonásobně zvětšují její povrch, což jí umožňuje účinně adsorbovat vodu. Výhodou je, že je inertní a není hořlavý, nehrozí zde nebezpečí reakce s jinou látkou nebo koroze [10]. Existuje zde ale nebezpečí přenosu pachů mezi proudy vzduchu. Druhou možností je opatření rotoru vrstvou zeolitu, který tvoří molekulární síto. Ve vrstvě se nachází velké množství miniaturních dutin, které zachytávají vodní páru. Jeho molekulární struktura je tak malá, že není schopna zachytit molekuly pachu, takže nehrozí nebezpečí jeho šíření. [9]

Akumulační hmota je poháněna elektrickým motorem a její otáčky je možné regulovat nebo dokonce úplně vypnout. Rychlost rotoru je relativně malá, pohybuje se v rozmezí 11-13 otáček za minutu [11]. Na rozdíl od ostatních výměníků je výměník, vzhledem k přítomnosti elektromotoru, potřeba napájet elektrickou energií.

Mezi nevýhody patří kontaminace čerstvého vzduchu nežádoucími látkami (pachy, prachem atd.) z odváděného vzduchu. Oba proudy vzduchu procházejí stejnými kanálky a mohou si škodliviny mezi sebou předávat. Tomuto se předchází použitím tzv. čistící zóny neboli vyplachovací komory. Malý díl rotoru ve tvaru klínu je profukován částí čerstvého vzduchu, která je následně odváděna pryč z budovy se vzduchem odpadním. Použití komory ale znamená snížení účinnosti až o 5 %, proto její aplikace není výhodná ve všech případech. [9]



Obrázek 3: Schéma rotačního výměníku s vyplachovací komorou, zdroj: [9]

Na počátku pandemie nemoci Covid-19 vyvstalo podezření, zda použití rotačních výměníků bez čistící komory nepodporuje šíření koronaviru SARS-CoV-2. V době zpracování této práce nebyl nalezen žádný důkaz, že správně nainstalované a funkční rotační výměníky a obecně systémy větrání napomáhají šíření koronaviru. Nebezpečí nastává, pokud je použita cirkulace vzduchu, kdy je odsávaný vzduch částečně vrácen zpět do interiéru, proto není doporučeno tento způsob větrání používat na potenciálně exponovaných místech, například tam, kde dochází k velkému shromažďování osob. [12]

Další možnost omezení přenosu škodlivých látek je provedení mírného přetlaku čerstvého vzduchu. Docílíme tím toho, že nebudou do přiváděného vzduchu pronikat škodliviny netěsnostmi okolo rotoru [3]. Tímto způsobem ale není zamezeno předávání škodlivin mezi dvěma proudy vzduchu. Proto není vhodné používat tento typ výměníku v nemocnicích a dalších budovách s vysokými požadavky na čistotu vzduchu.

Velkou výhodou je jejich vysoký teplotní poměr, v literatuře [13] je udáváno často více než 80 %, použití i pro velké průtoky vzduchu a bezproblémové použití v praxi.



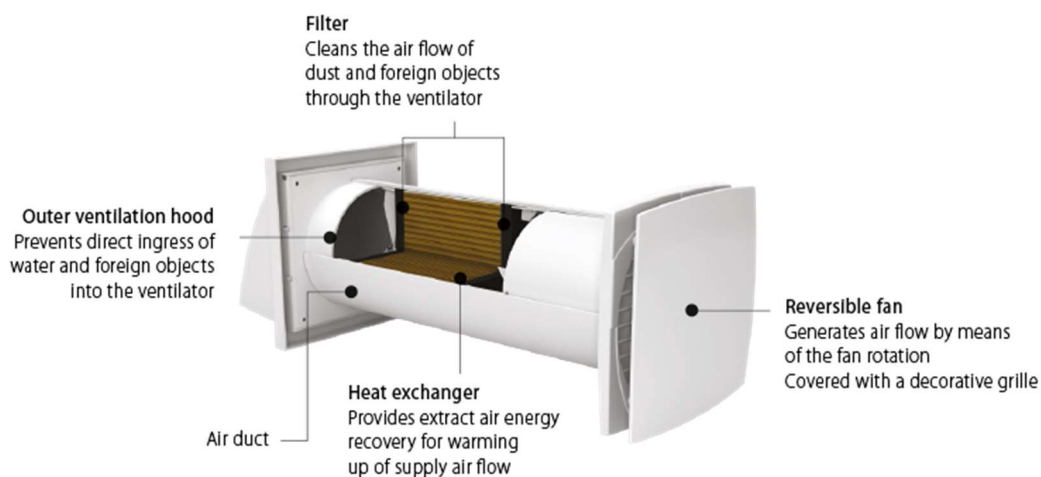
Obrázek 4: Detail teplosměnné plochy rotačního výměníku, zdroj: [14]

## 2.1.2 Přepínací výměníky

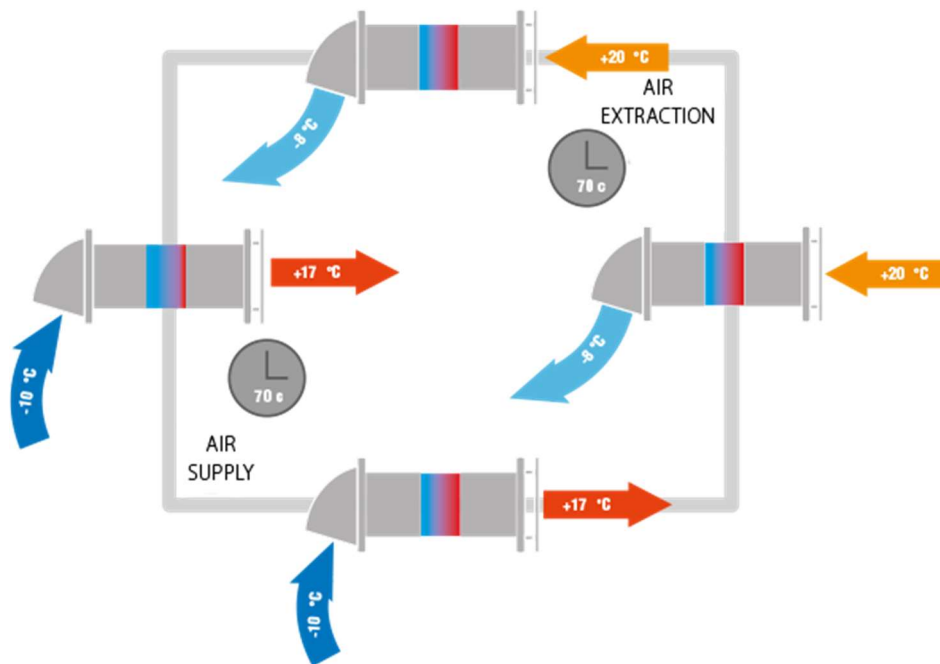
Přepínací výměníky disponují soustavou klapek, které řídí směr přiváděného a odváděného vzduchu tak, aby přes komoru s akumulační hmotou procházel střídavě. Akumulační hmota je nehybná a střídavě se mění směr proudění vzduchu výměníkem. Při přepínání klapek dochází k průniku odpadního vzduchu zpět do místnosti a čerstvého vzduchu zpět do exteriéru, nelze tedy zabránit přenosu škodlivin mezi proudy. [2]

I přesto, že mají vysokou účinnost, se přepínací výměníky skoro nepoužívají. Mají velké rozměry, složitou konstrukci a je potřeba dodatečná elektrická energie na ovládání klapek [3]. V neposlední řadě lze použít jen v budovách, které nemají velké požadavky na čistotu vzduchu kvůli nevyhnutelnému přenosu škodlivin mezi proudy vzduchu.

Tento typ výměníku je ale možné s výhodou použít například pro větrání jednotlivých místností. Zařízení pro ZZT je doplněno o ventilátor a celá soustava je instalována do obvodové stěny. Střídavě je skrz výměník odsáván odváděný vzduch, který předá akumulační hmotě tepelnou energii. Teplo je poté předáno nasávanému čerstvému vzduchu z exteriéru. Výrobce těchto zařízení udává frekvenci změny proudění vzduchu 70 s. Tento způsob větrání se hodí zejména v místnostech, které nejsou uvažovány jako obytné, nebo jako dodatečné řešení větrání ve stávajících budovách. [15]



Obrázek 5: Schématické znázornění malé větrací jednotky s přepínacím výměníkem vyráběné firmou Vents, fasádní výústka vlevo, výměník tepla je vyznačen žlutě, vpravo ventil pro přívod a odvod vzduchu, zdroj: [15]



Obrázek 6: Schématické znázornění větrání malou větrací jednotkou Vents s přepínacím výměníkem, zdroj: [15]

## 2.2 Rekuperační výměníky

Rekuperační výměníky předávají teplo mezi dvěma médii, v tomto případě mezi odváděným a přiváděným proudem vzduchu, přes nějaké další zařízení [16]. Přenos tepla může být zprostředkován nepřímo teplotnosným médiem, například vodou nebo nemrznoucí směsí, nebo k němu může docházet přímo přes teplosměnnou plochu, která odděluje oba proudy. Na rozdíl od regeneračních jsou rekuperační výměníky schopny přenášet hlavně citelné teplo. Latentní teplo dokážou sdílet, když vodní pára kondenzuje na straně ochlazovaného vzduchu. Z tohoto důvodu mají všeobecně nižší účinnost, než výměníky regenerační [6]. S výjimkou entalpických membránových výměníků tepla, rekuperační výměníky neumožňují přenos vlhkosti. [2]

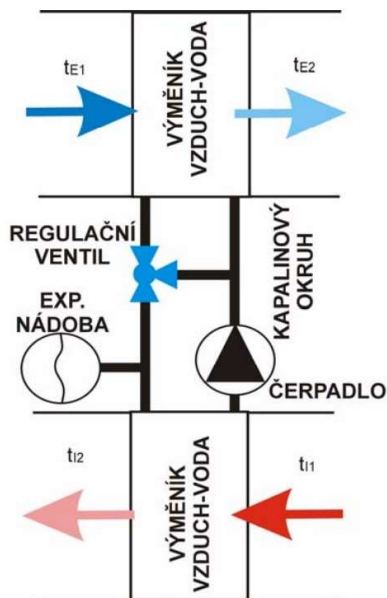
### 2.2.1 Kapalinové okruhy

Toto zařízení pro ZTZ je tvořeno dvěma výměníky tepla, které jsou propojeny kapalinovým okruhem. Jeden výměník je umístěn na odváděném proudu vzduchu a druhý na přiváděném. Ve většině případů se jedná o lamelové výměníky vzduch-voda, ale v případě, že bude výměník pracovat s nízkými teplotami vzduchu, je možné využít také jiné kapaliny, například nemrznoucí směs. [3]

Nespornou výhodou toho typu systému ZTZ je možnost umístění jednotlivých výměníků na různých místech i ve velké vzdálenosti od sebe. Není tedy potřeba navrhovat přívod i odvod vzduchu na stejném místě, mohou být umístěny i na opačných koncích budovy. Nejčastěji se kapalinový okruh používá, když není z nějakého důvodu možné přivést odpadní vzduch ke

vzduchotechnické jednotce, například v historických budovách. Použití tohoto systému nabízí velkou míru flexibility, a proto se kapalinové okruhy v současnosti používají stále častěji. Další předností je nulové riziko přenosu škodlivin mezi proudy vzduchu, i v případě přerušení dodávky elektrické energie, a lze je použít v provozech s vysokým požadavkem na čistotu prostředí. [2] [13]

Pro funkci kapalinového okruhu je potřeba zajistit pohyb teplotně nosné látky čerpadlem. V některých případech může být nutné umístit do systému expanzní nádobu. Nevýhodou jsou ztráty tepla na rozvodech teplotně nosné kapaliny, zvláště při překonávání velkých vzdáleností. Účinnost dosahuje za normálních podmínek 45 až 65 % [13]. Účinností 70 až 80 % lze dosáhnout použitím speciálních výměníků [3]. V současnosti je předmětem výzkumu především vylepšení nebo vývoj nových výměníků vzduch-kapalina, například použití membránového výměníku, který umožní zároveň přenos páry. [6]



Obrázek 7: Schéma ZVT s kapalinovým okruhem, modře je vyznačen přiváděný čerstvý vzduch, červeně vzduch odváděný, zdroj: [17]

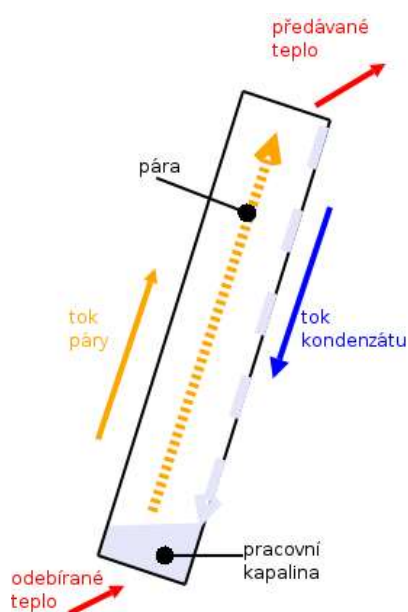
## 2.2.2 Tepelné trubice

Přenos tepla v tepelné trubici je založen na změně skupenství pracovní látky obsažené v hermeticky uzavřené trubici. Nejčastěji se používá čpavek, freony, zkapalněné  $\text{CO}_2$ , případně voda. Chladivo je na spodní straně trubice ohříváno odváděným proudem vzduchu. Kapalina vzduchu odebírá tepelnou energii a postupně se vypařuje. Pára, která má menší hustotu, stoupá vzhůru, kde se setkává s čerstvým proudem vzduchu o nízké teplotě. Chladivové páry předávají energii proudu vzduchu o nižší teplotě, kondenzují a stékají po stěnách zpět na dno trubice. Celý



proces se poté opakuje. Tepelné trubice mohou být umístěny i ve vodorovné rovině, pak je ale nutné použít kapilární trubice, které jsou v mírném spádu. [2] [3]

Použití tepelných trubice je výhodné především v průmyslu, kde se odvádí vzduch o vysoké teplotě – například sušárenství. Oba proudy vzduchu jsou odděleny a nedochází k žádnému přenosu škodlivin. Tepelná trubice funguje jako pasivní prvek, není potřeba žádnou její část napájet elektřinou, a nepoužívá pohyblivé části. Protože je trubice těsně uzavřena, není zpravidla potřeba pracovní látku doplňovat nebo měnit. Tepelná účinnost dosahuje přibližně 65 % [2]. Systém ZZT s tepelnou trubicí je velice spolehlivý a lze ho použít i v prostorech s vysokými požadavky na minimální přenos škodlivin nebo v budovách se systémem přirozeného větrání. [13]

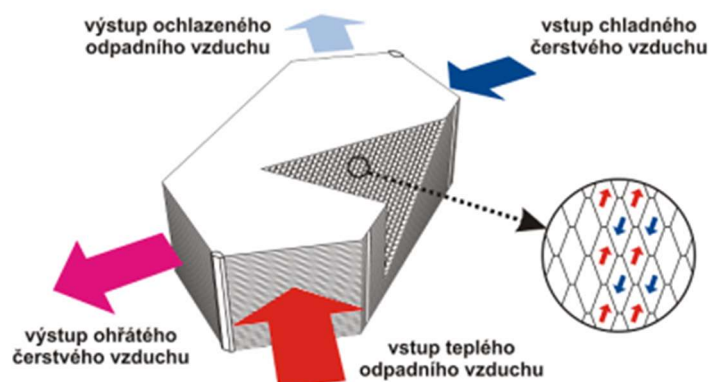


Obrázek 8: Schéma tepelné trubice, zdroj: [18]

### 2.2.3 Deskové výměníky

Deskové výměníky tepla patří mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější zařízení pro ZZT. Nalézají využití hlavně v menších a středně velkých vzduchotechnických jednotkách. Jejich konstrukce je poměrně jednoduchá. U klasických deskových výměníků tvoří teplosměnnou plochu tenké profilované desky, které jsou umístěné blízko sebe. Mezery mezi nimi slouží jako prostor, kterým proudí vzduch tak, aby každá deska měla z jedné strany studený čerstvý a z druhé teplý odváděný proud vzduchu. Desky k sobě mohou být slepené, přivařené, sletované nebo přišroubované [13]. Mezi nejčastěji používané materiály pro výrobu desek patří plasty, ocel, nerezová ocel a jiné kovy. Materiál nedovoluje přenos vlhkosti, proudy si předávají pouze citelné

teplo. Modernější deskové výměníky disponují teplosměnnou plochou tvořenou panelem s 3D kanálky o různých tvarech, například šestiúhelníků. [2] [3]



Obrázek 9: Schéma protiproudého deskového výměníku s kanálky ve tvaru šestiúhelníků, zdroj: [2]

Samotný výměník může mít tvar čtverce, pak se jedná o křížový výměník. Proudění vzduchu v něm směřují kolmo na sebe a obecně tento typ dosahuje menších účinností, zpravidla 50 až 60 %. Šestiúhelníkové výměníky fungují jako protiproudé a jsou schopné dosáhnout účinnosti až 90 % a více [2]. Obecně platí, že čím menší je prostor pro vzduch, tím vyšší dosáhne výměník účinnosti, byť za cenu zvýšení tlakové ztráty. Účinnost dále závisí na velikosti teplosměnné plochy, ta je ale často omezena prostorem ve vzduchotechnické jednotce. Rovněž je možné zapojit více deskových výměníků sériově za sebou, účinnost potom roste, ale s ní roste i tlaková ztráta. [3]

Protiproudé výměníky mají dvě zóny, křížovou a protiproudou. V křížové části proudění probíhá stejně jako v křížovém výměníku, kolmo na sebe. V protiproudé jsou oba proudy v jedné rovině. Účinnost výměníku roste s délkou protiproudé části. [19]



Obrázek 10: Jedna z desek protiproudého výměníku, prostřední část proudí oba proudy vzduchu proti sobě, v okrajových částech kolmo na sebe, zdroj: [20]

Oba proudy vzduchu jsou odděleny a nedochází k přenosu škodlivin. Tyto výměníky nemají žádné pohyblivé části, nespotřebovávají elektrickou energii a z tohoto důvodu je nelze regulovat nebo vypnout. Je možné je odstavit pomocí by-passu neboli obtoku, kdy je jeden z proudů vzduchu veden potrubím mimo samotný výměník.

Mezi hlavní nevýhody deskových tepelných výměníků patří hrozba kondenzace v zimním období a následná tvorba námrazy. Rostoucí led v malých prostorách výměníku způsobuje tlakové ztráty, snižuje účinnost výměny tepla a v extrémních případech může výměník poškodit. Naakumulovaný kondenzát je potřeba odvádět přes zápachovou uzávěrku do kanalizace. Kondenzace vodní páry může ale být i prospěšná, protože při tomto jevu odevzdává latentní teplo, které zvyšuje celkovou účinnost deskového výměníku. Je ale nutné zamezit jejímu namrznání. Tento typ výměníků není vhodné používat v prostorách s velkou produkcí prachu, tuků nebo jiných částic, protože se velmi špatně čistí. [3]

#### 2.2.4 Entalpické deskové výměníky

Entalpické výměníky jsou známé rovněž pod označením membránové. Přenos tepla v tomto případě zprostředkovává tenká propustná membrána, která umožňuje nejen přenos tepelné energie, ale i vodní páry. Je proto výhodné je využít v aplikacích, kdy je žádoucí zpětně získávat i vlhkost, například v bytové výstavbě. Pro výrobu membrány může být použit materiál na bázi papíru nebo speciální mikroporézní polymer [21].

Tento typ výměníků je schopen přenášet jak citelné, tak latentní teplo. Princip výměníku je stejný jako u klasického deskového výměníku. Jednotlivé desky jsou umístěny v těsné blízkosti a mezi nimi prochází střídavě vedle sebe proudy odsávaného a přiváděného vzduchu. Samotný výměník je možné uspořádat do různých tvarů, nejčastěji do čtverce nebo šestiúhelníku. Nejčastěji se používají v protiproudém nebo křížovém provedení. [6]

Účinnost entalpických deskových výměníků je srovnatelná s výkonnými rotačními výměníky. Nemají tak velký problém s namrznáním nebo kondenzováním vodní páry, jako je tomu často u rotačních výměníků [6]. Podle Siegele et al. [22] se se zvyšující se měrnou vlhkostí vzduchu zvětšuje i množství přenesené energie.

Entalpické výměníky se v současnosti používají stále častěji a zároveň probíhá jejich výzkum, obzvláště nových materiálů pro výrobu propustných membrán. Mezi současné trendy ve výzkumu patří například použití zakotvených kapalinových membrán (Supported Liquid Membrane – SLM). Jedná se o druh membrány, kde je kapalná část udržována na místě pomocí kapilárních sil v pórech mikroporézní polymerní fólie. Membrána pak umožňuje přenos nejen tepla ale i hmoty, v tomto případě vlhkosti. [6] [23] [24]

### 3 Námraza v tepelném výměníku

Se snižující se teplotou vzduchu v exteriéru se význam použití výměníku tepla zvyšuje. Zařízení pro ZZT výrazně snižují potřebu energie na ohřívání čerstvého vzduchu na požadovanou teplotu. Zimní měsíce s sebou ale přináší nebezpečí kondenzace vodní páry uvnitř výměníku tepla a případný následný vznik námrazy. Odváděný vzduch z místnosti odevzdává svou tepelnou energii a jeho teplota se tak snižuje. Pokud odváděný vzduch zároveň obsahuje vyšší objem vzdušné vlhkosti, zvyšuje se tím i nebezpečí mrznutí kondenzátu. Zejména u velmi účinných výměníků znamená tato kombinace vysoké nebezpečí vzniku námrazy, protože se odváděný vzduch ochladí na nižší teplotu než u výměníků tepla s nižším teplotním poměrem.

I přesto, že se tomu snažíme různými způsoby zabránit, může při určitých okrajových podmínkách vznikat v tepelném výměníku námraza. Ta může mít za následek tlakovou ztrátu na výměníku způsobenou částečným nebo úplným zablokováním průtočných kanálů výměníku a tím zvýšení potřebného výkonu ventilátorů pro zachování stávajícího průtoku vzduchu. V neposlední řadě se, při použití jednotky bez jakéhokoli ohříváče vzduchu, čerstvý přiváděný vzduch procházející zamrzlým výměníkem ohřeje jen na nízkou teplotu a může způsobovat nekomfortní prostředí v místnosti. [25]

Výměníky vystavené kondenzaci, případně námraze, dokáží stále zajistit v nějaké míře přenos tepla, ale celý proces se stává komplikovanějším než u suchého výměníku. Množství přeneseného tepla v suchém stavu závisí nejen na vlastnostech proudů vzduchu, ale i na geometrických vlastnostech samotného výměníku. [26]

Tepelné výměníky za suchého stavu byly předmětem mnoha různých výzkumů a jejich vlastnosti a princip funkce jsou všeobecně známy [26]. Podle Rafati Nasr et al. [25] bylo do roku 2014 publikováno několik desítek vědeckých článků na téma zamrznutí tepelných výměníků. Většina se zabývala tepelnými výměníky v tepelných čerpadlech nebo chladících systémech, zatímco problematice zamrznutí tepelných výměníků vzduch-vzduch používaných ve vzduchotechnice se věnovalo jen málo publikací. Jednalo se především o výzkum na deskových a rotačních výměnících a většina článků se zabývala pouze výzkumem klasických deskových výměníků, které jsou schopny předávat pouze citelné teplo.

Do současnosti bylo provedeno několik dalších výzkumů. Častěji se v literatuře objevují entalpické deskové výměníky. Bylo publikováno několik matematických modelů, které se snaží proces namrznutí popsat, například [26], [27], [28] nebo [29]. Některé modely a jejich výsledky byly porovnány s experimentálními daty a takto byla ověřena jejich přesnost.

Například Sergey Anisimov et al. [26] vymezil matematický model pro popis přenosu tepla v deskovém výměníku a stanovení hraniční kombinace teploty vzduchu a relativní vlhkosti, kdy začne vznikat ve výměníku námraza. Tento model je ale možné aplikovat pouze na deskový výměník bez schopnosti přenosu vodní páry. Matematický model námrazy na entalpickém deskovém výměníku podložený experimentálními daty publikoval tým Rafati Nasr et al. [27]. Tato oblast je ale stále ještě málo prozkoumaná a je potřeba provádět další výzkum.

### 3.1 Tvorba námrazy

Vodní pára obsažená ve vzduchu kondenzuje ve chvíli, kdy se dostane do kontaktu s tělesem, který má teplotu nižší nebo rovnou teplotě rosného bodu pro daný stav vzduchu. Pokud teplota povrchu klesne pod teplotu tuhnutí, začne se tvořit led. Zpravidla se námraza tvoří nejrychleji na hranách objektů, které jsou orientovány proti směru proudu vzduchu. Intenzita růstu námrazy se rovněž zvyšuje s rychlostí proudu vzduchu. [30]

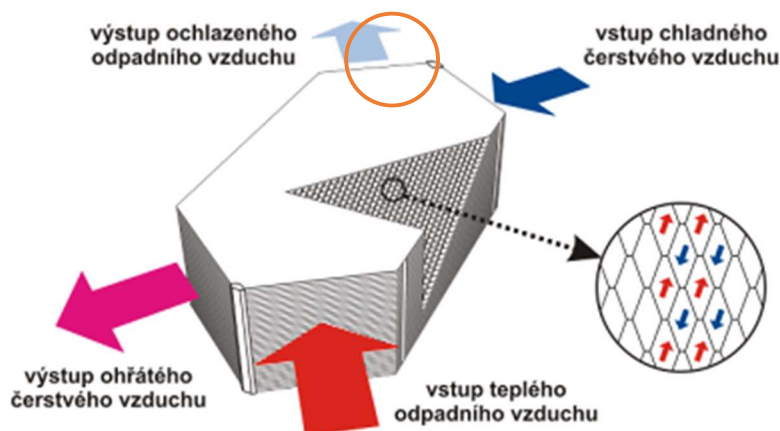
Riziko tvorby námrazy dále závisí na druhu a provedení výměníku tepla a také zda je předáváno primárně citelné teplo nebo i latentní. Důležitou roli také hrají vlastnosti materiálu teplosměnné plochy, například jeho schopnost propouštět vodní páru. [25]

Tvorbu námrazy je možné podle Bilodeau et al. [31] rozdělit do tří fází. Nejprve nastane nukleační fáze, která trvá několik desítek sekund. Voda obsažená ve vzduchu kondenzuje na povrchu, který má teplotu nižší, než je teplota tuhnutí vody, a začíná mrznout. Nejvíce kondenzace probíhá na nerovnostech a nedokonalostech v materiálu. Poté nastane fáze samotné tvorby námrazy. Již zmrzlé útvary na sebe navazují další vzdušnou vlhkost, postupně se zvětšují a tvoří válcovité sloupce. Nakonec se začne tvořit vrstva ledu, jednotlivé útvary se zvětší natolik, že se začnou spojovat a vytvoří tak vrstvičku, která není zcela homogenní – nachází se v ní vzduchové bubliny.

Na vlastnosti výsledné ledové vrstvy, jako například hustotu nebo tloušťku vrstvy, má vliv teplota povrchu, teplota okolního vzduchu, relativní vlhkost vzduchu. Nízká teplota povrchu způsobí, že ledová vrstva bude více pórovitá a tím pádem bude mít menší hustotu. Ledové útvary rostou v tomto případě rychleji a vrstva není tak uniformní, jako u povrchu s vyšší teplotou, kde je růst ledu pomalejší. Naopak vysoká relativní vlhkost vzduchu má za následek tvorbu ledu o vyšší hustotě. [31]

Důležité je mít představu o tom, kde je největší pravděpodobnost výskytu námrazy. Konsenzu ohledně umístění námrazy v různých typech výměníku nebylo zatím z důvodu malého množství publikací na toto téma dosaženo. U deskového výměníku se ale považuje za nejkritičtější místo,

kde z výměníku tepla vychází ochlazený odpadní vzduch. V ploše výstupu odpadního vzduchu pak zpravidla námraza vzniká nejdříve v blízkosti vstupu čerstvého vzduchu (na obrázku níže označeno kroužkem). Toto místo bývá označováno jako „studený roh“. [28]



Obrázek 11: Vyznačení tzv. studeného rohu na protiproudém výměníku, zdroj: [2]

## 3.2 Vlastnosti výměníku tepla vystaveného námraze

### 3.2.1 Rekuperační výměníky

Námraza může výrazně ovlivnit účinnost předávání tepla v tepelném výměníku a další jeho vlastnosti. Je schopna zmenšit účinnost výměníku několika způsoby. Pokud teplosměnnou plochu pokrývá vrstva ledu, zvyšuje se její tepelný odpor a tím se snižuje schopnost přenášet teplo mezi proudy vzduchu [25]. Led v tomto případě funguje jako izolant. Čím větší je tloušťka ledové vrstvy, tím vyšší je tepelný odpor teplosměnné plochy [31]. Zároveň led kontinuálně odebírá tepelnou energii okolí, ať už se jedná o teplosměnnou plochu, nebo kolem proudící vzduch.

Phillips et al. [32] došel k závěru, že vysoce účinné výměníky (v tomto případě kolem 80 %) jsou náchylnější k zamrznutí, protože se námraza tvoří již při vyšších teplotách čerstvého vzduchu než při použití méně účinného výměníku. Předávání tepelné energie mezi oběma proudy vzduchu je tak účinné, že teplota odpadního vzduchu klesne níže než u méně účinného výměníku. Se snižující se teplotou odpadního vzduchu se také zvyšuje nebezpečí vzniku námrazy.

### 3.2.2 Regenerační výměníky

V regeneračním výměníku tepla bývá situace často odlišná, protože kromě citelného zde figuruje ještě teplo latentní. Rotační výměníky opatřené hygroskopickou vrstvou pracují v periodickém cyklu. Voda obsažená v teplém proudu vzduchu s vyšší měrnou vlhkostí vzduchu je zachycena desikantem a poté předána studenému proudu vzduchu s menší měrnou vlhkostí. Protože je

studený vzduch z exteriéru a studený vzduch odcházející z interiéru méně vlhký, obvykle zamrzají rotační a entalpické deskové výměníky při teplotách nižších o přibližně 5 °C (může být až o 5-10 °C [25]) než klasické deskové výměníky nebo výměníky bez hygroskopické vrstvy [33].

Teplota, při které se začíná tvořit námraza je závislá na vlastnostech daného výměníku a stavu procházejícího vlhkého vzduchu. Pro každý výměník tedy dosahuje jiných hodnot. Obecně je vhodné ve studených klimatech používat tepelné výměníky, které dokážou zpětně získávat vlhkost. V obytných budovách navíc bývá často problém s nízkou relativní vlhkostí v zimním období a zpětné získávání vlhkosti může výrazně zlepšit kvalitu vnitřního prostředí. [25]

### 3.3 Ochrana proti vzniku námrazy

Ochrana proti vzniku námrazy je ve většině případů spouštěna automaticky při dosažení nějaké dané mezní hodnoty. Nejčastěji se pro tyto účely používá teplota čerstvého vzduchu přiváděného z exteriéru, případně hodnota tlakové ztráty na výměníku – v tomto případě její zvýšení. Při použití teploty vzduchu se systémy ochrany spouští zpravidla při dosažení teploty čerstvého vzduchu 2–0 °C, aby se maximálně eliminovala možnost vzniku námrazy. Provozovatel je sice na straně bezpečnosti, ochuzuje se ale o množství ušetřené energie v době, kdy je funkce výměníku tepla nějakým způsobem omezena nebo kdy jsou zapnuta přídatná zařízení. [26] [34]

Nejpoužívanější metoda předcházení vzniku námrazy je předehřátí čerstvého vzduchu přiváděného z exteriéru. Pro tyto účely lze použít vodní nebo elektrické ohříváče vzduchu. Nevýhodou tohoto systému je přídatná spotřeba energie ohříváčem vzduchu a snížení celkové úspory energie, které je možné získat pomocí systému ZT. Je také možné pro místní odstranění ledu použít lokální elektrický ohříváč teplosměnné plochy. [25]

Druhou možností předehřevu vzduchu je využití zemního výměníku. Protože teplota zeminy v rámci celého roku kolísá jen minimálně a drží se v hodnotách 8-12 °C, lze tuto vlastnost s výhodou využít pro předehřev (nebo případně pro letní předchlazení) čerstvého vzduchu. Zemní výměník je tvořen potrubím uloženým v zemi v minimální hloubce 1,2 m, kterým prochází čerstvý vzduch. Potrubí je potřeba provést ve spádu, aby případný kondenzát měl kam odtékat a netvořily se uvnitř plísňe nebo řasy. [35]

Pro prevenci vzniku námrazy je možné použít i materiály s fázovým přechodem, tzv. PCM (phase change materials). PCM je umístěn mezi stěny teplosměnné plochy tak, aby byl obtékán z jedné strany studeným čerstvým proudem vzduchu a z druhé teplým odváděným proudem. Materiál je schopný uchovávat teplo odebrané pro fázovou změnu od teplejšího proudu vzduchu a

předchází tak snížení teploty povrchu teplosměnné plochy pod bod mrazu, případně pod bod rosného bodu. [36]

Vzhledem k tomu, že se nebezpečí vzniku námrazy zvyšuje s použitím více účinného výměníku tepla, je v některých situacích na místě posoudit, zda se nevyplatí použít výměník, který má nižší teplotní poměr [26]. Ten je pak schopen fungovat i v nižších teplotách vzduchu v exteriéru a je možné ho provozovat po větší část roku. Tímto způsobem je ve výsledku ušetřeno více energie na ohřev vzduchu než při použití vysoce účinného výměníku, který by bylo potřeba odstavit dříve nebo dříve použít přehřev vzduchu.

### 3.4 Odstraňování vzniklé námrazy

Jednou z metod odstraňování již vzniklé námrazy je cirkulace vzduchu. Čerstvý vzduch je veden obtokem kolem výměníku tepla, kterým prochází jen teplý odváděný vzduch z interiéru. Takto je zvyšována teplota teplosměnné plochy výměníku a je možné posléze znovu obnovit jeho funkci. Trochu extrémním řešením je krátkodobě zcela vypnout ventilátor na přívodu čerstvého vzduchu. Odvádění teplého vzduchu z interiéru stále probíhá, díky kterému se celý výměník tepla prohřeje. Poté může být přívod čerstvého vzduchu znovu spuštěn a celý proces se periodicky opakuje. V tomto případě je ale uživatel vystaven nebezpečí, že nebude dosaženo požadované kvality vnitřního prostředí, především z hlediska koncentrace škodlivin, například CO<sub>2</sub>. Pro odstranění vzniklé námrazy lze rovněž využít elektrického ohřevu, který je umístěn lokálně v místech, kde lze očekávat vznik námrazy. [3] [25]

Někteří výrobci vzduchotechnických jednotek nabízí tzv. sekční odmrazování. Je vždy odmrazována jen jedna z částí tepelného výměníku, přičemž druhá část je stále v provozu. Tímto způsobem je docíleno alespoň poloviční úspory energie v porovnání s použitím obtoku. [37]

### 3.5 Detekce námrazy

V dnešní době je ochrana proti namrzání většinou řešena preventivně, a to podle teploty čerstvého vzduchu. Toto řešení ale není ani zdaleka nejúspornější, maximálního ušetření energie je dosaženo, když je řešení námrazy implementováno až ve chvíli, kdy je potřeba. Detekce pomocí měření teploty odpadního vzduchu není vhodné řešení. Teplota může být stále vyšší než 0 °C, ale teplota povrchu teplosměnné plochy uvnitř výměníku již klesla pod teplotu tuhnutí vody a námraza vzniká. Sledování jen této hodnoty většinou vede k nesprávnému závěru. [26]

Nejspolehlivějším způsobem zjištění přítomnosti vznikající námrazy je vizuální kontrola. Tento způsob detekce je ale pro běžný provoz nevhodný. Je v drtivé většině znemožněn složitou



konstrukcí výměníku a umístěním ve vzduchotechnické jednotce. Při použití endoskopické kamery je možné se vyhnout výše uvedeným překážkám, je ale stále potřeba stav výměníku průběžně kontrolovat – ať už pomocí umělé inteligence nebo za působení lidského faktoru. Obě tyto možnosti znamenají ekonomickou zátěž. Proto se převážně používá průběžné měření a vyhodnocení tlakové ztráty na výměníku, které je považováno za poměrně spolehlivé. Při vzniku námrazy na teplosměnné ploše se při zachování průtoku vzduchu tlaková ztráta zvyšuje. [25]

Ve chvíli, kdy je detekována velká tlaková ztráta, je ale námraza již výrazně rozšířena, ledová vrstva je silná a její roztátí stojí velké množství energie. Proto má smysl mít systém prevence vzniku námrazy, kdy bude možné předvídat kritické vlastnosti čerstvého vzduchu pro dané okrajové podmínky (teplota a relativní vlhkost odváděného vzduchu). Pro tyto účely již bylo stanoveno několik matematických modelů, nicméně stále ještě neexistuje potřebný počet dat, aby bylo možné tento model aplikovat na všechny druhy tepelných výměníků. [26]

Může být sledována měrná vlhkost odváděného vzduchu před a za výměníkem a pokud je zjištěn zvětšující se rozdíl vlhkostí při zachování stejných okrajových podmínek v interiéru, lze uvažovat vznik námrazy. Ještě přesnější detekce je docíleno v kombinaci s měřením tlakové ztráty. [26]

Námrazu je ale možné detekovat i jinými způsoby. Podle Aguiar et al. [38] je možné pro detekci námrazy použít odporový senzor, který se skládá ze dvou měděných elektrod, umístěných rovnoběžně k sobě, omotaných bavlněným provázkem do tvaru znaku nekonečna. Bavlna je velmi savý materiál, v přítomnosti vody se její odpor snižuje, takže je tímto senzorem možné zjišťovat zkondenzovanou vodní páru už při malém množství. Ta je detekována poklesem napětí, který se ještě zvětší v přítomnosti ledu. Tento typ senzoru je stále předmětem výzkumů a zatím se v běžném provozu vzduchotechnických jednotek nepoužívá.

V neposlední řadě je možné využít umělé inteligence pro detekci vzniku námrazy při použití videokamery. Kamera je umístěna tak, aby bylo možné snímat místo, kudy vychází odpadní vzduch z výměníku. Z pořízených snímků je vyhodnoceno, zda došlo ke změně oproti původnímu (suchému) stavu. Tento způsob je považován za poměrně spolehlivý, ale nejedná se o kompaktní ani levné řešení. Je nutné použít kameru, která je odolná vodě nebo mechanickému poškození námrazou. [39]

## 4 Metodika

### 4.1 Metodika dle ČSN EN 308

Norma ČSN EN 308 [40] stanovuje způsob a požadavky na laboratorního zkoušení výměníků tepla vzduch-vzduch. Dále rozděluje výměníky tepla na několik kategorií, podle kterých určuje vstupní podmínky zkoušení. Určují se vnější netěsnosti, pronikání odsávaného vzduchu do vzduchu dodávaného uvnitř zařízení, poměry teplot a vlhkosti, tlakové ztráty na odsávané a přívodní straně vzduchu. Tato práce se bude zabývat pouze teplotními a vlhkostními poměry a bilancí tepelných výkonů.

Pro zkoušení teplotních a vlhkostních poměrů musí být ve zkušební místnosti teplota vzduchu 17–27 °C. Poměry se stanovují pro několik kombinací velikostí průtoků dodávaného a odsávaného vzduchu. Norma dále předpisuje podmínky pro stanovení teplotních a vlhkostních poměrů. Teplota odváděného vzduchu je stanovena na 25 °C a teplota čerstvého vzduchu na 5 °C. Teplota mokrého teploměru odváděného proudu vzduchu by měla být menší než 14 °C.

Teplotní poměr se vypočte podle následujícího vzorce:

$$\Phi = \frac{t_{E2} - t_{E1}}{t_{I1} - t_{E1}} [-] \quad (1)$$

kde  $t_{E2}$  je teplota přívodního vzduchu [°C],  $t_{E1}$  je teplota čerstvého vzduchu [°C] a  $t_{I1}$  je teplota odváděného vzduchu [°C] – viz obrázek 12.

Vlhkostní poměr:

$$\Psi = \frac{x_{E2} - x_{E1}}{x_{I1} - x_{E1}} [-] \quad (2)$$

kde  $x_{E2}$  je měrná vlhkost přívodního vzduchu [g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub>],  $x_{E1}$  je měrná vlhkost čerstvého vzduchu [g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub>] a  $x_{I1}$  je měrná vlhkost odváděného vzduchu [g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub>].

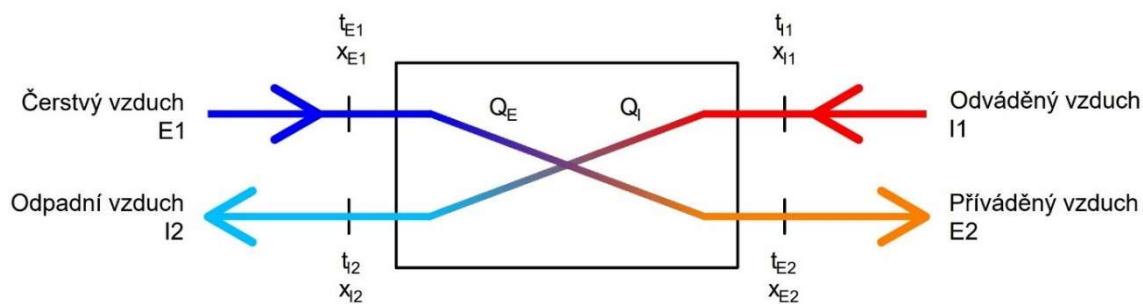
Tepelný výkon se stanoví:

$$Q_{I,E} = c \cdot q_{I,E} \cdot \Delta t_{I,E} \quad (3)$$

kde  $c$  je měrná tepelná kapacita vzduchu [J/(kg.K)],  $q_{I,E}$  je hmotnostní průtok vzduchu [kg/h] a  $\Delta t_{I,E}$  je rozdíl teplot daného proudu před a za výměníkem tepla [K].

Poměr tepelných výkonů je platný, pokud platí:

$$\frac{Q_I}{Q_E} \in (0,95; 1,05) \quad (4)$$



Obrázek 12: Schéma měřeného výměníku tepla s vyznačenými teplotami a měrnými vlhkostmi potřebnými pro výpočet teplotního a vlhkostního poměru, zdroj: archiv autora

Dále norma mimo jiné předepisuje způsob stanovení vnitřní netěsnosti mezi dvěma proudy vzduchu v zařízení pro ZZT. Při provádění zkoušky je odváděný vzduch do výměníku dodáván pod tlakem 250 Pa, zatímco čerstvý vzduch je do výměníku přiváděn při atmosférickém tlaku. Vnitřní netěsnost se rovná hmotnostnímu průtoku, který přefukuje mezi dvěma proudy vzduchu. Pro toto měření se hustota vzduchu musí pohybovat v rozmezí 1,16 – 1,24 kg/m<sup>3</sup>. Před provedením zkoušky je třeba pečlivě utěsnit a zalepit napojení potrubí a všechny další štěrby a netěsnosti. Kontrola správného přetlaku je průběžně kontrolována pomocí odběru statického tlaku.

## 4.2 Stanovení průtoku vzduchu dle ČSN EN 16211

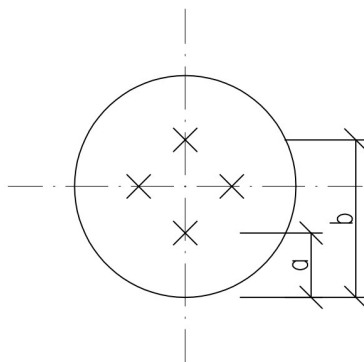
Průtok vzduchu je možné stanovit několika různými způsoby. V tomto případě bude průtok stanoven výpočtem z hodnot změřené rychlosti vzduchu pomocí vrtulkového anemometru. Dle ČSN EN 16211 [41] by neměl být mechanický anemometr použit pro měření rychlostí nižších než 1 m/s, při nižších rychlostech není měření dostatečně přesné a je nutné zvyšovat celkovou nejistotu. Zároveň by neměl průměr anemometru překročit 1/10 průměru potrubí. Norma také uvádí, že standardní nejistota při měření vrtulkovým anemometrem v kruhovém průřezu potrubí odpovídá 4 %.

Před měřením rychlosti je potřeba zajistit, že se před a za rovinou měření nachází přímý úsek potrubí o délce minimálně 5 D před rovinou měření a 2 D za, kde D je průměr potrubí. Pro tento experiment bylo zvoleno potrubí o jmenovitém průměru DN 100. Pro tento průměr norma uvádí, že je třeba použít čtyři měřicí body umístěné ve dvou na sebe kolmých osách potrubí. Umístění bodů je vyznačeno na obrázku níže.

Vzdálenost od okraje potrubí se stanoví výpočtem dle následujících rovnic:

$$a = 0,29 \cdot D \quad (5)$$

$$b = 0,71 \cdot D \quad (6)$$

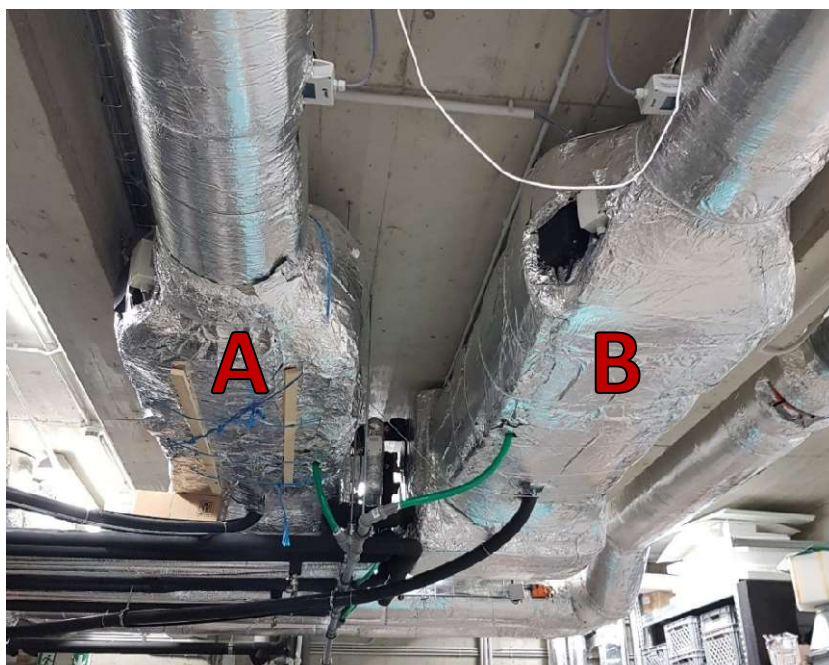


Obrázek 13: Umístění bodů v průřezu potrubí, zdroj: [41]

## 5 Experiment

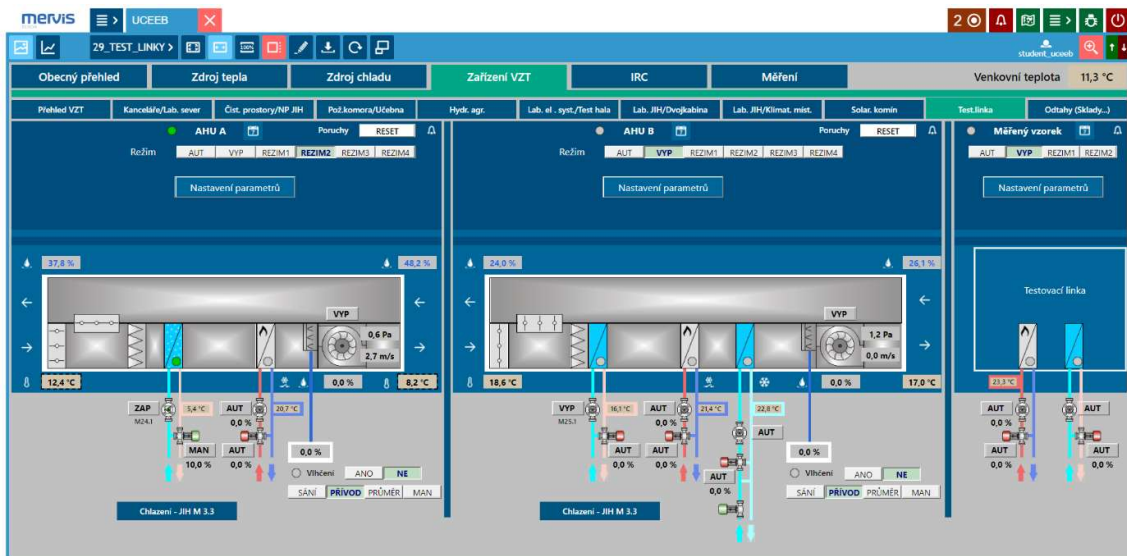
### 5.1 Vzduchotechnická laboratoř

Všechna měření byla provedena na testovací lince v laboratoři vzduchotechniky v Univerzitním centru energeticky efektivních budov UCEEB. Linka se skládá ze dvou vzduchotechnických jednotek, které je možné dálkově ovládat pomocí softwarové platformy Mervis, vzduchotechnického potrubí a dalších komponentů. Jednotka A disponuje teplovodním ohřívačem vzduchu, zvlhčovačem a chladičem, který umožňuje ochladit vzduch na teploty vyšší než 0 °C (dále nadnulový chladič). Vzduchotechnická jednotka B je kromě výše uvedených ještě vybavena druhým chladičem, který ochlazuje vzduch na podnulové teploty (dále podnulový chladič).



Obrázek 14: Vzduchotechnické jednotky v laboratoři vzduchotechniky, zdroj: archiv autora

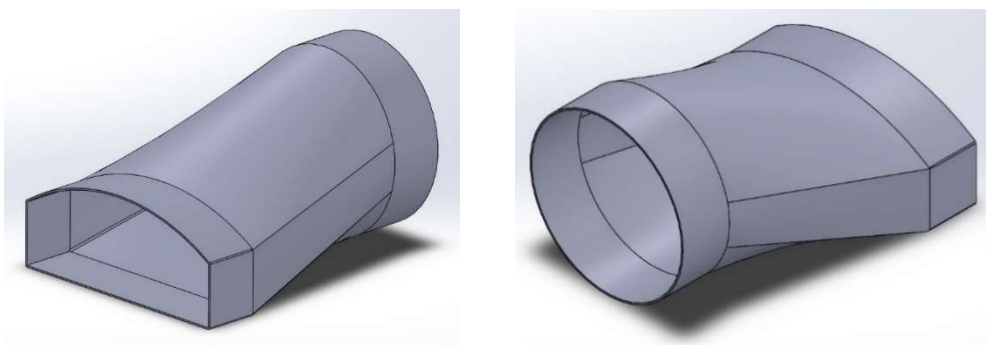
V platformě Mervis je možné nastavovat požadovanou rychlost proudění, zapínat jednotlivé komponenty uvnitř jednotky a rovněž volit požadovanou teplotu a relativní vlhkost vzduchu na výstupu z jednotky. Vlastnosti vzduchu na výstupu z jednotky jsou snímány kombinovaným senzorem vlhkosti a teploty, rychlost proudění je měřena pomocí termického anemometru. V laboratoři je k dispozici několik kalibrovaných senzorů teploty Pt100 a kombinovaný snímač teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Hodnoty ze všech těchto senzorů jsou sbírány v měřicí ústředně DataTaker a lze je zobrazit a dále s nimi pracovat pomocí softwaru dEX-2.



Obrázek 15: Softwarové rozhraní Mervis, zdroj: archiv autora, SW Mervis

## 5.2 Příprava na měření

Pro vlastní měření byl zvolen křížový deskový výměník tepla s membránou propustnou pro vlhkost. Výměník je uložen v obalu z expandovaného polystyrenu, který zajistí, že nebude při měření docházet k nadměrným tepelným ztrátám a výměník tepla nebude ovlivňován okolím. Přívodní a odvodní otvory výměníku mají netypický tvar, jedná se o obdélník, jehož jedna delší strana je provedena jako oblouk. Aby bylo možné napojit výměník na testovací linku, byl v programu SolidWorks vytvořen 3D model redukce. Na straně výměníku se jedná o obdélník o rozměrech 129 x 35 mm, poloměr oblouku na jedné straně obdélníku je 120 mm. Na straně připojení k potrubí byla redukce vymodelována v kruhovém tvaru o vnějším průměru 99 mm tak, aby bylo možné ji napojit k potrubí DN 100. Tloušťka stěny redukce byla zvolena 1 mm. Následně byla redukce vytištěna na 3D tiskárně ve čtyřech kopiích.



Obrázek 16: 3D model redukce, zdroj: archiv autora, SW SolidWorks



Obrázek 17: Měřený výměník tepla s instalovanými vytištěnými redukcemi, zdroj: archiv autora

V Univerzitním centru energeticky efektivních budov, kde byl tepelný výměník proměřován, je kromě kalibrovaných senzorů teploty k dispozici několik dalších teplotních a vlhkostních čidel. Jedná se o kombinovaná čidla teplota-vlhkost vzduchu Ahlborn FHA646-E1 a Ahlborn FHAD46C2. Teplota je v těchto čidlech měřena pomocí NTC termistoru a relativní vlhkost kapacitním snímačem. Bohužel většina z nich není pravidelně kalibrována. Pro přiblížení se skutečným hodnotám byly vzájemně porovnány s kalibrovaným čidlem.

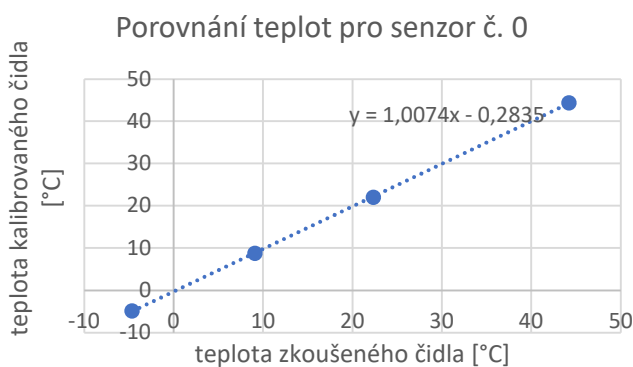
Nejprve byly na všech senzorech měřeny hodnoty pro aktuální teplotu vzduchu a relativní vlhkost v místnosti po dobu 20 minut, data byla zaznamenána. Pro měření dalších teplotních stavů byl použit díl ve tvaru kruhu z expandovaného polystyrenu, aby se snížilo nebezpečí vzájemného teplotního ovlivnění čidel. Sensory byly protaženy skrz polystyrenový díl v těsné blízkosti a celek byl umístěn na výstup jedné vzduchotechnické jednotky. S pomocí ohříváče a chladiče v jednotce byly vytvořeny tři další teplotní stavy: teplota vzduchu nižší než 0 °C, teplota nižší než v místnosti a teplota vyšší. Aritmetické průměry z naměřených hodnot teplot jsou uvedeny v tabulce 1 níže.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty teplot vzduchu

Teplotní stav	číslo senzoru							Kontrolní senzor
	0	1	2	3	4	5	6	
Podnulový [°C]	-4,65	-5,02	-5,32	-4,83	-4,96	-5,14	-5,00	-4,86
Nižší [°C]	9,08	9,01	9,20	9,31	8,95	9,20	8,90	8,82
V místnosti [°C]	22,36	22,39	22,29	22,13	22,15	22,14	22,44	22,06
Vyšší [°C]	44,21	44,64	44,37	43,33	41,13	43,86	44,43	44,36

Pro každý senzor byl vytvořen v softwaru MS Excel graf tak, aby se na ose x nacházely hodnoty naměřené na zkoušeném senzoru a na ose y hodnoty kontrolního kalibrovaného senzoru. Takto vynesené hodnoty byly proloženy přímkou a byla zjištěna její rovnice. Rovnice bude použita pro přepočítání naměřených hodnot nekalibrovanými senzory na hodnotu, která se více blíží správné hodnotě. Rovnice jsou uvedeny v tabulce 2 níže.

Graf 1: Graf naměřených teplot vzduchu pro zkoušený senzor č. 0



Tabulka 2: Rovnice proložené přímkou pro měření teploty

Přepočítání teploty	
Číslo senzoru	Rovnice proložené přímkou
0	$y = 1,0074 \cdot x - 0,2835$
1	$y = 0,9918 \cdot x - 0,0124$
2	$y = 0,9935 \cdot x + 0,0762$
3	$y = 1,0246 \cdot x - 0,3189$
4	$y = 1,0665 \cdot x - 0,3399$
5	$y = 1,0073 \cdot x - 0,0469$
6	$y = 0,9954 \cdot x - 0,0148$

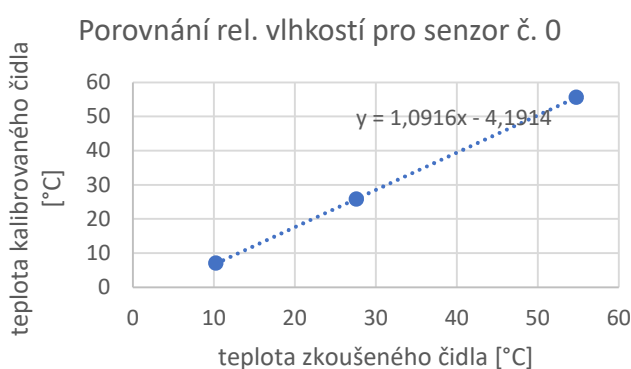
Stejným způsobem byly vyhodnoceny senzory i pro měření vzdušné vlhkosti. Naměřené hodnoty relativních vlhkostí jsou uvedeny v tabulce Tabulka 3 níže. Rovnice proložené přímkou grafem lze nalézt v tabulce Tabulka 4. Grafy teplot a relativních vlhkostí všech senzorů se nachází v příloze 2.



Tabulka 3: Naměřené hodnoty relativních vlhkostí vzduchu

Vlhkostní stav	číslo senzoru							Kontrolní senzor
	0	1	2	3	4	5	6	
Vyšší [%]	54,8	55,7	55,3	56,8	57,4	57,5	55,6	55,6
V místnosti [%]	27,6	28,5	28,6	27,7	27,6	27,9	25,3	25,8
Nižší [%]	10,3	10,2	10,6	9,1	9,5	9,3	6,6	7,1

Graf 2: Graf naměřených relativních vlhkostí pro zkoušený senzor č. 0



Tabulka 4: Rovnice proložené přímkou pro měření relativní vlhkosti

Přepoččet relativní vlhkosti	
Číslo senzoru	Rovnice proložené přímkou
0	$y = 1,0916 \cdot x - 4,1914$
1	$y = 1,0685 \cdot x - 4,0800$
2	$y = 1,0876 \cdot x - 4,7523$
3	$y = 1,0189 \cdot x - 2,2806$
4	$y = 1,0129 \cdot x - 2,3997$
5	$y = 1,0070 \cdot x - 2,3143$
6	$y = 0,9902 \cdot x + 0,6276$

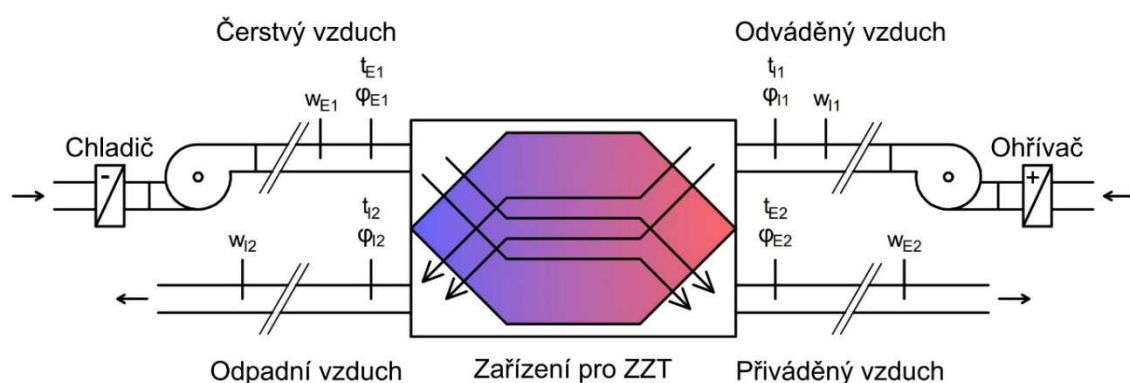
V neposlední řadě bylo potřeba připravit celou sestavu pro vlastní měření. Pro přívod a odvod vzduchu z výměníku bylo použito plastové potrubí DN 100 v délce minimálně 1,2 m, aby byl dodržen požadavek na délku rovného potrubí před a za místem měření průtoku vrtulkovým anemometrem – viz kapitola 4.2. Přívodní potrubí bylo opatřeno návlekovou izolací z pěnového polyethylenu v tl. 9 mm pro snížení tepelných ztrát u teplého proudu vzduchu a tepelných zisků u studeného proudu vzduchu. Zaizolována byla i část potrubí těsně za výstupem výměníku tepla, kde byly měřeny teploty vzduchu. Použití tepelné izolace také sníží nebezpečí ovlivnění senzorů sáláním materiálu potrubí. Spoje byly zatěsněny pomocí hliníkové pásky.

## 6 Výsledky experimentu a diskuse

### 6.1 Počáteční stav měřeného výměníku tepla

V první řadě byly zjišťovány počáteční vlastnosti měřeného výměníku. Byl vypočítán teplotní a vlhkostní poměr pro různé objemové průtoky vzduchu. Dále také vnitřní netěsnost, aby bylo možné porovnat její hodnotu se stavem po několika zmrazovacích cyklech. Pro měření vlastností vzduchu byly použity již dříve uvedené snímače teplot, relativních vlhkostí vzduchu a vrtulkové anemometry Schiltknecht MiniAir64 Micro 0,6 – 20,0 m/s a Schiltknecht MiniAir64 Mini 0,4 – 20 m/s. Umístění senzorů je patrné ze schématu níže.

Senzory teploty a relativní vlhkosti vzduchu jsou umístěny co nejbližší tepelnému výměníku, aby se co nejvíce omezil vliv tepelných ztrát, případně zisků. Rychlost proudění vzduchu byla měřena ve dvou na sebe kolmých osách, na každé ose ve dvou bodech. Na přívodním potrubí byl anemometr umístěn tak, aby se před ním nacházel dostatečně dlouhý rovný úsek potrubí, to znamená v blízkosti tepelného výměníku. Na odvodním potrubí je naopak anemometr umístěn dále od výměníku.



Obrázek 18: Schéma zapojení výměníku tepla pro zjišťování teplotních a vlhkostních poměrů, zdroj: archiv autora

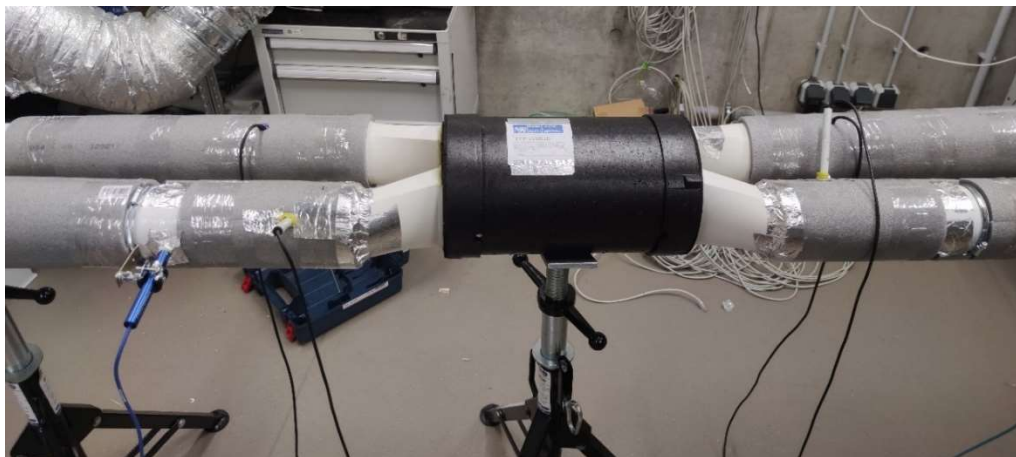
Výměník je navržen na relativně malé objemové průtoky vzduchu (max 40-50 m<sup>3</sup>/h). Na testovací lince v UCEEB není možné nastavit menší objemový průtok než přibližně 35 m<sup>3</sup>/h, proto byly teplotní a vlhkostní poměry měřeny rovněž pro průtoky větší. Na základě této znalosti bylo očekáváno, že se bude se zvyšujícím se objemovým průtokem teplotní poměr snižovat.

Pro správnou funkci měřeného výměníku by měly být proudy vzduchu regulovány dle hmotnostního průtoku. Protože se hustota vzduchu mění v závislosti na jeho teplotě, bude se objemový průtok čerstvého vzduchu, po přepočtu z hmotnostního průtoku, lišit od objemového průtoku odváděného vzduchu. Se zvyšující se teplotou vzduchu se jeho hustota snižuje. Při zachování stejné hodnoty hmotnostního průtoku bude objemový průtok teplejšího proudu

vzduchu větší než objemový průtok chladnějšího proudu. Bylo předpokládáno, že při tomto způsobu provozu bude teplotní poměr vyšší než při chodu, kdy oba proudy mají stejný objemový průtok. Tento předpoklad byl ověřen pro objemový průtok  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Obrázek 19: Měřený výměník tepla napojený na testovací linku, zdroj: archiv autora



Obrázek 20: Detail zapojení měřeného výměníku tepla, zdroj: archiv autora

### 6.1.1 Výpočet teplotního a vlhkostního poměru

Pro výpočet teplotního a vlhkostního poměru byly použity následující rovnice:

Objemový průtok:

$$\dot{V} = w \cdot S \cdot 3600 [m^3/h] \quad (7)$$

kde  $w$  je rychlost proudění [m/s] a  $S$  je plocha průřezu potrubí [m<sup>2</sup>].

Parciální tlak syté páry pro teploty 0 až 80 °C:

$$\ln p_v'' = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6+t} [Pa] \quad (8)$$

$$p_v'' = \exp\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6+t}\right) [Pa] \quad (9)$$

Parciální tlak syté páry pro teploty -20 až 0 °C:

$$\ln p_v'' = 28,926 - \frac{6148}{273,15+t} [Pa] \quad (10)$$

$$p_v'' = \exp\left(28,926 - \frac{6148}{273,15+t}\right) [Pa] \quad (11)$$

kde  $t$  je teplota vzduchu [°C]. [42]

Měrná vlhkost vzduchu:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_v''}{p - \varphi \cdot p_v''} [g_{v.p.}/kg_{s.v.}] \quad (12)$$

kde  $\varphi$  je relativní vlhkost vzduchu [%],  $p_v''$  je parciální tlak syté páry [Pa] a  $p$  je celkový tlak vzduchu [Pa]. [43]

Hustota vzduchu:

$$\rho_a = \frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (2,65 \cdot p + \varphi \cdot p_{vp}'') [kg/m^3] \quad (13)$$

kde  $T$  je termodynamická teplota [K],  $p$  je celkový tlak vlhkého vzduchu [Pa],  $\varphi$  je relativní vlhkost vzduchu [%] a  $p_{vp}''$  je parciální tlak syté páry [Pa].

Výpočet teplotního poměru byl proveden podle rovnice ( 1 ), výpočet vlhkostního poměru dle rovnice ( 2 ) a tepelný výkon dle rovnice ( 3 ).

Pro výpočet byly použity hodnoty získané pomocí aritmetického průměru. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 2.

Vzorový výpočet byl proveden pro odváděný proud vzduchu I1 při objemovém průtoku 74 m<sup>3</sup>/h (měření S1). Použité teploty, relativní vlhkosti a rychlosti proudění se nachází v tabulce níže.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro výpočet – měření S1

$t_i = 22,2 \text{ °C}; p_a = 97,8 \text{ kPa}$	Měření S1			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	2,62	2,58	2,65	2,53
teplota vzduchu [°C]	25,21	12,44	6,11	18,04
relativní vlhkost vzduchu [%]	19,1 %	41,1 %	53,1 %	25,6 %

Hodnoty jsou naměřeny v potrubí s vnitřním průměrem  $d = 100 \text{ mm}$ .

Objemový průtok:

$$\dot{V} = w \cdot S \cdot 3600 = 2,62 \cdot \pi \cdot \frac{0,1^2}{4} \cdot 3600 = \mathbf{74,08 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Parciální tlak syté páry:

$$p_v'' = \exp\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t}\right) = \exp\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 25,21}\right) = \mathbf{3208,9 \text{ Pa}}$$

Měrná vlhkost vzduchu:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_v''}{p - \varphi \cdot p_v''} = 0,622 \cdot \frac{0,191 \cdot 3208,9}{978000 - 0,191 \cdot 3208,9} = \mathbf{3,9 \text{ g}_{v.p.}/\text{kg}_{s.v.}}$$

Teplotní poměr:

$$\Phi = \frac{t_{E2} - t_{E1}}{t_{I1} - t_{E1}} \cdot 100 \% = \frac{18,04 - 6,11}{25,21 - 6,11} \cdot 100 \% = \mathbf{62,46 \%}$$

Vlhkostní poměr:

$$\Psi = \frac{x_{E2} - x_{E1}}{x_{I1} - x_{E1}} \cdot 100 \% = \frac{3,4 - 3,2}{3,9 - 3,2} \cdot 100 \% = \mathbf{24,7 \%}$$

Tepelný tok odváděného proudu vzduchu I:

$$\begin{aligned} Q_I &= c \cdot q_I \cdot \Delta t_I = c \cdot \frac{\dot{V}_{I1} + \dot{V}_{I2}}{2} \cdot \frac{1}{3600} \cdot (t_{I1} - t_{I2}) = \\ &= 1010 \cdot \frac{74,08 + 72,94}{2} \cdot \frac{1}{3600} \cdot (25,21 - 12,44) = \mathbf{263,36 \text{ W} \cdot \text{m}^3/\text{kg}} \end{aligned}$$

Měrná tepelná kapacita je pro teplotu  $t_{I1}$  přibližně 25 °C rovna 1010 J/(kg.K) [44], hodnota  $\dot{V}_{I2}$  je uvedena v tabulce 6 níže.

Poměr tepelných toků:

$$\frac{Q_I}{Q_E} = \frac{263,36}{243,86} = \mathbf{1,08}$$

Přehled naměřených a vypočítaných hodnot pro další průtoky se nachází v tabulkách níže.

Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření S1 a S2, provoz dle objemového průtoku

	Měření S1				Měření S2			
	t <sub>i</sub> = 22,2 °C; p <sub>a</sub> = 97,8 kPa				t <sub>i</sub> = 22,2 °C; p <sub>a</sub> = 97,8 kPa			
	Proud I		Proud E		Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	2,62	2,58	2,65	2,53	2,14	1,98	2,24	2,21
teplota vzduchu [°C]	25,21	12,44	6,11	18,04	25,16	11,36	5,73	18,04
rel. vlhkost vzduchu [%]	19,1 %	41,1 %	53,1 %	25,6 %	18,6 %	42,0 %	52,0 %	24,7 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3208,9	1444,3	942,4	2070,1	3199,0	1345,0	917,8	2070,2
měrná vlhkost [g <sub>v.p.</sub> /kg <sub>s.v.</sub> ]	3,9	3,8	3,2	3,4	3,8	3,6	3,1	3,3
objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	74,08	72,94	74,99	71,46	60,62	56,06	63,44	62,36
teplotní poměr [%]	62,46 % ± 3,66 %				63,37 % ± 3,82 %			
vlhkostní poměr [%]	24,7 % ± 3,6 %				28,0 % ± 3,7 %			
tepelný tok [W.m <sup>3</sup> /kg]	263,36		243,86		225,79		216,19	
Poměr tepelných toků [-]	1,08				1,04			

V tabulce 7 níže se nachází porovnání dvou provozních stavů výměníku. V levém sloupci se nachází naměřené a vypočtené hodnoty při provozu výměníku, kdy mají oba proudy vzduchu stejný objemový průtok. Hodnoty v pravém sloupci byly získány při provozu se shodnými hmotnostními průtoky.

Hmotnostní průtok byl vypočítán dle následujícího vzorce:

$$\dot{M} = \dot{V} \cdot \rho \text{ [kg/h]} \tag{14}$$

kde  $\dot{V}$  je objemový průtok [m<sup>3</sup>/h] a  $\rho$  je hustota vzduchu pro danou teplotu vzduchu [kg/m<sup>3</sup>].

Pokud potřebujeme například hmotnostní průtok 60 kg/h, získáme objemový průtok a také požadovanou rychlost proudění dle následujícího výpočtu. Hustota vzduchu je dle výpočtu podle rovnice ( 13 ) při 5 °C rovna 1,23 kg/m<sup>3</sup>, pro 25 °C je rovna 1,14 kg/m<sup>3</sup>.

Objemový průtok pro studený proud vzduchu:

$$\dot{V} = \frac{60}{1,23} = \mathbf{48,78 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Objemový průtok pro teplý proud vzduchu:

$$\dot{V} = \frac{60}{1,14} = 52,63 \text{ m}^3/\text{h}$$

Rychlost proudění studeného proudu vzduchu dle rovnice ( 7 ):

$$w = \frac{48,78 \cdot 4}{\pi \cdot 0,1^2 \cdot 3600} = 1,73 \text{ m/s}$$

Rychlost proudění teplého proudu vzduchu:

$$w = \frac{52,63 \cdot 4}{\pi \cdot 0,1^2 \cdot 3600} = 1,86 \text{ m/s}$$

Se zvyšující se teplotou se hustota vzduchu snižuje, proto je při zachování shodných hmotnostních průtoků objemový průtok teplejšího vzduchu větší. Bylo tedy nutné zvýšit rychlost teplejšího odváděného proudu vzduchu, v tomto případě o 0,13 m/s. Je patrné, že při přibližně stejných okrajových podmínkách (teplota vzduchu, relativní vlhkost) je při zvýšení objemového průtoku teplého odváděného proudu vzduchu teplotní poměr vyšší než v prvním případě. U měřeného výměníku tepla bylo možné dosáhnout zvýšení teplotního poměru pro objemový průtok 50 m<sup>3</sup>/h o 4,34 %. Aby byl výsledek vypovídající, je nutné pro výpočet tepelné bilance použít shodné hmotnostní průtoky. Vyplatí se tedy provozovat tepelný výměník tak, aby oba proudy vzduchu jím procházející měly stejný hmotnostní průtok. Výpočet nejistot je vysvětlen v kapitole 6.4 a v příloze 1.

Tabulka 7: Porovnání dvou měření při provozu dle objemového a hmotnostního průtoku

	Měření S3 Provoz dle objemového průtoku				Měření S4 Provoz dle hmotnostního průtoku			
	t <sub>i</sub> = 22,2 °C; p <sub>a</sub> = 97,8 kPa				t <sub>i</sub> = 22,2 °C; p <sub>a</sub> = 97,4 kPa			
	Proud I		Proud E		Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	1,74	1,54	1,82	1,80	1,88	1,63	1,65	1,72
teplota vzduchu [°C]	25,49	11,92	7,15	19,33	25,48	11,61	5,80	19,73
relativní vlhkost vzduchu [%]	18,5 %	38,0 %	46,0 %	22,5 %	17,6 %	37,7 %	42,0 %	19,3 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3262,8	1396,1	1012,2	2243,7	3261,3	1367,6	922,6	2299,9
měrná vlhkost [g <sub>v.p.</sub> /kg <sub>s.v.</sub> ]	3,9	3,4	3,0	3,2	3,7	3,3	2,5	2,8
objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	49,15	43,44	51,45	50,92	53,11	45,97	46,66	48,64
teplotní poměr [%]	66,4 % ± 4,11 %				70,74 % ± 2,81 %			
vlhkostní poměr [%]	28,9 % ± 3,5 %				30,2 % ± 2,3 %			
tepelný tok [W.m <sup>3</sup> /kg]	176,21		174,04		192,77		185,19	
Poměr tepelných toků [-]	1,01				1,04			

V neposlední řadě byly zjištěny vlastnosti výměníku pro objemový průtok 35 m<sup>3</sup>/h. Menších průtoků nebylo na testovací lince možné dosáhnout. Naměřené a vypočtené hodnoty se nachází v tabulce níže.

Tabulka 8: Naměřené a vypočtené hodnoty pro průtoky 35 m<sup>3</sup>/h, provoz dle objemového průtoku

	Měření S5			
	t <sub>i</sub> = 22,2 °C; p <sub>a</sub> = 97,4 kPa			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	1,27	1,18	1,29	1,26
teplota vzduchu [°C]	25,85	12,14	6,95	21,63
relativní vlhkost vzduchu [%]	16,9 %	32,0 %	30,9 %	15,6 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3333,6	1416,5	998,8	2585,3
měrná vlhkost [g <sub>v.p.</sub> /kg <sub>s.v.</sub> ]	3,6	2,9	2,0	2,6
objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	35,84	33,25	36,36	35,74
teplotní poměr [%]	77,63 % ± 3,39 %			
vlhkostní poměr [%]	37,0 % ± 2,8 %			
tepelný tok [W.m <sup>3</sup> /kg]	132,86		147,68	
Poměr tepelných toků [-]	0,90			

Shrnutí vypočtených vlastností měřeného výměníku:

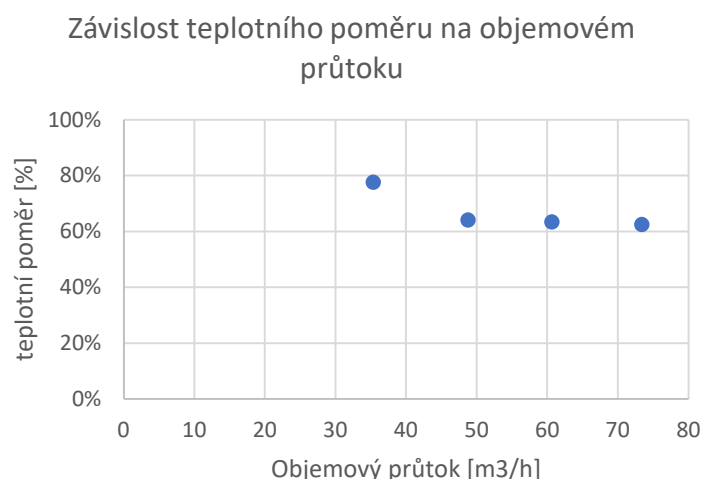
Tabulka 9: Shrnutí vlastností pro všechny měřené stavy výměníku pro provoz dle objemového průtoku

Název měření	prům. objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	teplotní poměr [%]	vlhkostní poměr [%]
S1	73,37	62,46 %	24,7 %
S2	60,62	63,37 %	28,0 %
S3	48,74	66,40 %	28,9 %
S5	35,30	77,63 %	37,0 %

V následujícím grafu je znázorněna závislost teplotního poměru na objemovém průtoku proudů vzduchu, které jsou přiváděny do výměníku. Se snižujícím se průtokem vzduchu se zároveň zvyšuje teplotní poměr. Měřený výměník je určen pro aplikaci do menších bytových větracích jednotek, které pracují s menšími průtoky vzduchu. Lze očekávat, že pro ještě menší průtoky vzduchu se bude teplotní poměr pohybovat blíže hodnoty naměřené pro objemový průtok 35 m<sup>3</sup>/h.



Graf 3: Závislost teplotního poměru měřeného výměníku tepla na objemovém průtoku

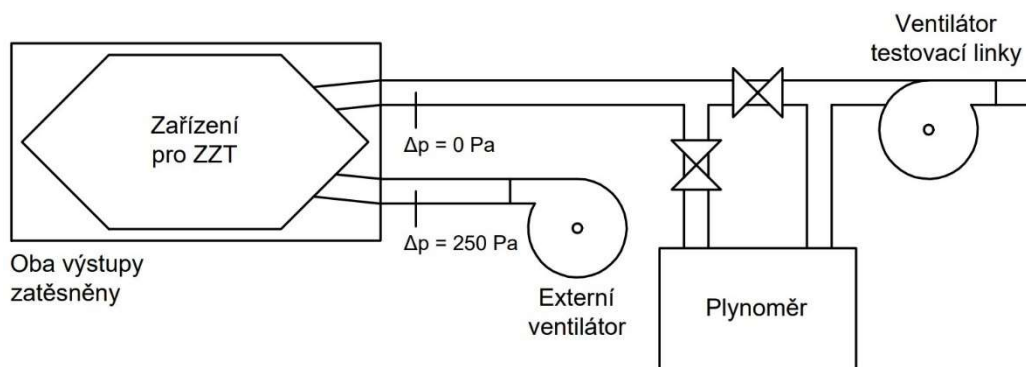


### 6.1.2 Vnitřní netěsnosti

Vnitřní netěsnosti jsou dány velikostí hmotnostního průtoku, který je při podmínkách daných normou ČSN EN 308 [40] přefukován z jednoho proudu vzduchu procházejícím výměníkem do druhého. Pro účely tohoto měření se uvažuje, že měřený výměník má dvě strany. První strana představuje část, kterou prochází odsávaný vzduch z místnosti a druhá přiváděný vzduch do místnosti. Měření vnitřních netěsností probíhá při přetlaku proti okolí 250 Pa na straně odsávaného vzduchu, zatímco na druhé straně musí být zachován rozdíl statického tlaku v potrubí oproti atmosférickému tlaku rovný nule. Výstupy výměníku tepla, které nejsou pro měření použité, a všechny další netěsnosti je nutné pečlivě zalepit a utěsnit.

Vnitřní netěsnosti byly měřeny s pomocí membránového plynoměru Elster BK – G10M. Výstup odsávané strany měřeného výměníku byl připojen na externí ventilátor, který měl za úkol udržovat na straně odsávaného vzduchu výměníku přetlak 250 Pa. Na plášti tvarovky napojené na výměník byl odečítán statický tlak proti atmosférickému tak, že výsledná hodnota na displeji ukazovala rozdíl těchto dvou tlaků. Na druhou stranu výměníku byla připojena aparatura s membránovým plynoměrem. Po dosažení potřebné hodnoty přetlaku byla hadička pro odečet tlaku přepojena do tvarovky na druhé straně výměníku tepla. Protože má potrubí, ale především samotný plynoměr určitou tlakovou ztrátu, je potřeba na této straně vzduch z výměníku mírně odsávat. V opačném případě by se na této straně tvořil mírný přetlak. Toho bylo dosaženo za pomoci ventilátoru vzduchotechnické jednotky v testovací lince v laboratoři, na kterou byla tato strana napojena. Nulový rozdíl tlaku od atmosférického byl ověřen odečtením tlakové difference na plášti potrubí.

Poté, co bylo dosaženo potřebných tlakových poměrů, byla odečtena počáteční hodnota na plynoměru. Po několika minutách byla zaznamenána konečná hodnota. Z jejich rozdílu byl dle rovnice pro výpočet hustoty ( 13 ) a dle rovnice ( 14 ) vypočítán hmotnostní průtok, který přefukuje z odsávané strany výměníku na stranu dodávaného vzduchu neboli vnitřní netěsnost. Výsledná hodnota přefukujícího hmotnostního průtoku je rovna 0,24 kg/h. Výpočet nejistot měření je podrobně popsán v příloze 1.



Obrázek 21: Schéma měření vnitřních netěsností výměníku tepla, zdroj: archiv autora

Tabulka 10: Naměřené hodnoty a výpočet vnitřních netěsností

Vnitřní netěsnost - počáteční stav	
počáteční hodnota [m <sup>3</sup> ]	185,650
konečná hodnota [m <sup>3</sup> ]	185,671
rozdíl [m <sup>3</sup> ]	0,021
doba měření [s]	360
objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	0,21
teplota vzduchu [°C]	21,3
atmosférický tlak [Pa]	97 900
hustota vzduchu [kg/m <sup>3</sup> ]	1,16
hmotnostní průtok [kg/h]	0,24 ± 0,001



Obrázek 22: Použitý ventilátor pro měření vnitřních netěsností výměníku tepla, zdroj: archiv autora



Obrázek 23: Membránový plynoměr použitý pro měření vnitřních netěsností výměníku tepla, zdroj: archiv autora

## 6.2 Námraza ve výměníku

Námraza se uvnitř výměníku začíná tvořit ve chvíli, kdy teplota povrchu, v tomto případě teplosměnné plochy, klesne pod teplotu tuhnutí vody a okolní vzduch obsahuje vzdušnou vlhkost. Množství vzniklé námrazy také závisí na teplotně-vlhkostních vlastnostech odsávaného vzduchu z místnosti, který je ochlazován a může obsahovat zvýšený objem vlhkosti. Představuje tedy největší nebezpečí kondenzace a následného mrznutí kondenzátu. Bylo předpokládáno, že se bude námraza tvořit nejvíce v té části výměníku tepla, kde vychází již ochlazený odpadní vzduch. V tomto místě je teplota teplosměnné plochy nejnižší, protože z jedné strany je obtékána čerstvým vzduchem o teplotě nižší než 0 °C a z druhé strany se již ochlazeným odpadním vzduchem. Dále bylo předpokládáno, že se bude postupně v čase šířit kanálem výměníku až ke vstupu odsávaného vzduchu. Tyto dvě místa jsou vyznačena níže na obrázku 24.

V literatuře je často uváděno, že námrazu lze spolehlivě detekovat pomocí sledování změn diferenčního tlaku [25]. Bylo tedy souzeno, že v průběhu tvorby ledu bude viditelný nárůst diferenčního tlaku a bude možné takto zjistit počátek namrzání. Dále bylo předpokládáno, že bude možné zjistit kondenzaci vodní páry a následný vznik námrazy vizuálně za pomoci snímání výstupu odpadního vzduchu endoskopickou videokamerou. Tepelný výměník byl umístěn tak, aby se otvor na odvod kondenzátu na straně odváděného vzduchu nacházel na spodní straně. Bylo očekáváno, že po začátku kondenzace bude kondenzát z výměníku odtékat a bude možné to použít jako dodatečný způsob detekce změn stavu uvnitř výměníku.



Obrázek 24: V červeném kroužku je vyznačeno předpokládané místo vzniku první námrazy, která se bude šířit ve výměníku až k místu označenému oranžovým kroužkem. E1 = čerstvý vzduch, E2 = přiváděný vzduch, I1 = odváděný vzduch, I2 = odpadní vzduch. Zdroj: archiv autora

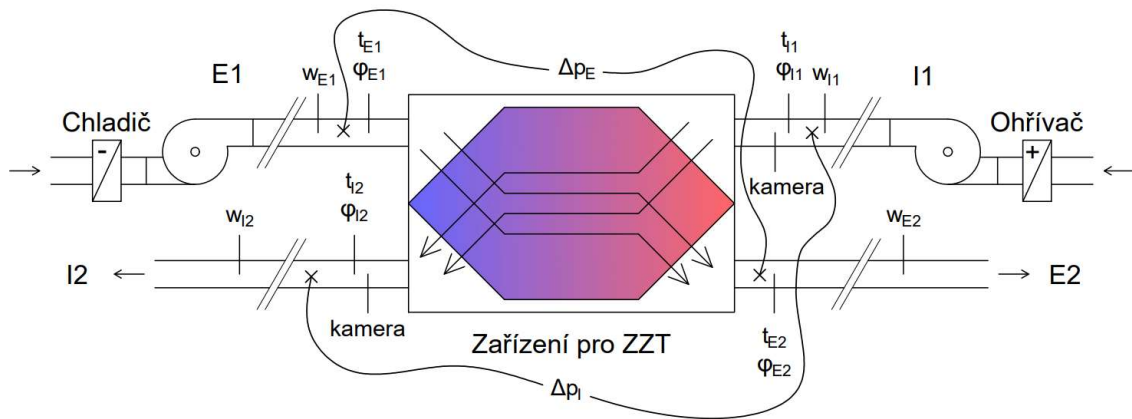


Obrázek 25: Detail otvoru pro odvod kondenzátu, zdroj: archiv autora

Tato část experimentu zahrnuje několik měření pro různé stavy odváděného vzduchu I1. Požadované teploty vzduchu bylo dosaženo pomocí ohřívače nebo chladiče vzduchotechnické jednotky A. Odváděný vzduch byl podle potřeby zvlhčován parním zvlhčovačem. Teplota čerstvého vzduchu se při měření nacházela v intervalu přibližně  $-4$  až  $-7$  °C. Řízení komponentů vzduchotechnických jednotek na testovací lince bohužel není zcela exaktní a není možné dosáhnout přesných hodnot. I přesto, že na výstupu vzduchotechnické jednotky byla teplota vzduchu  $-16$  °C, pohybovala se teplota čerstvého vzduchu přiváděného k měřenému výměníku, kvůli velkým tepelným ziskům přívodního potrubí, okolo  $-7$  °C. Mezi další problémy patřilo ještě pravděpodobné namrzání výměníku chladiče vzduchu ve VZT jednotce B. Namrzání způsobuje snížení účinnosti chlazení a rovněž snížení průtoku vzduchu. Vzhledem k tomu, že není možné vzduch, který přichází do vzduchotechnické jednotky B, odvlhčovat, závisela účinnost chlazení v daný den na mnoha různých faktorech. Když má nasávaný vzduch moc vysoký obsah vlhkosti, množství zmrzlé vodní páry se na chladiči zvětšuje a s tím se snižuje jeho účinnost. I z tohoto důvodu bylo obtížné udržet nízkou teplotu čerstvého vzduchu.

Aby bylo možné sledovat vizuálně stav výměníku, byly použity dvě endoskopické kamerové sondy s LED osvětlením. Endoskopy byly protaženy skrz zatěsněný otvor v potrubí a umístěny tak, aby bylo možné pozorovat vstup odváděného vzduchu a výstup odpadního vzduchu. Sondy lze připojit k počítači a sledovat dění v reálném čase. Dále byly k potrubí připojeny hadičky pro měření rozdílu tlaků před a za výměníkem na obou prouděch. Diferenční tlak byl měřen zvlášť na přívodním a zvlášť na odvodním proudu vzduchu. Protože byl tlak snímán ve stěně potrubí kolmo na směr proudění vzduchu, jedná se o statický tlak. Bylo předpokládáno, že se bude v průběhu zamrzání diferenční tlak zvyšovat z důvodu zmenšování průtočného průřezu výměníku.

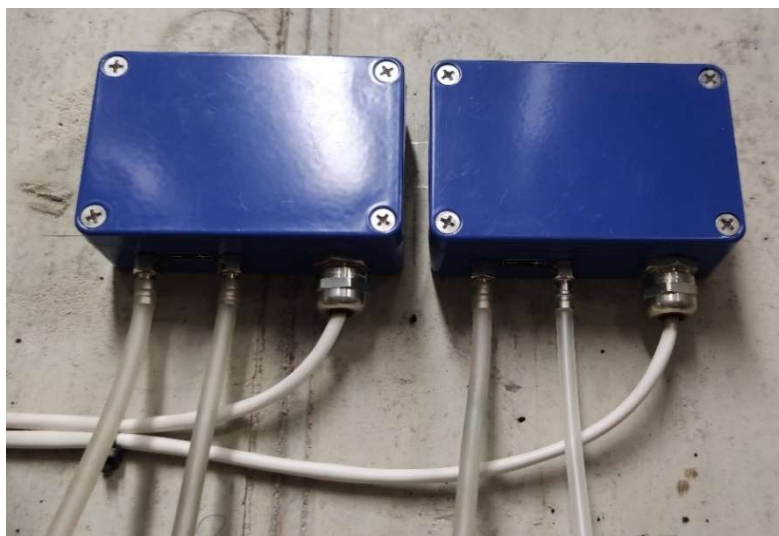
V neposlední řadě byly v sestavě pro měření umístěny senzory teploty a relativní vlhkosti vzduchu a také vrtulkové anemometry pro měření rychlostí obou proudů vzduchu. Hodnoty teplot a rychlostí proudění byly snímány s frekvencí 15 s, hodnoty tlakové difference byly snímány s frekvencí 30 s.



Obrázek 26: Schéma měření námrazy na výměníku ZZT, zdroj: archiv autora



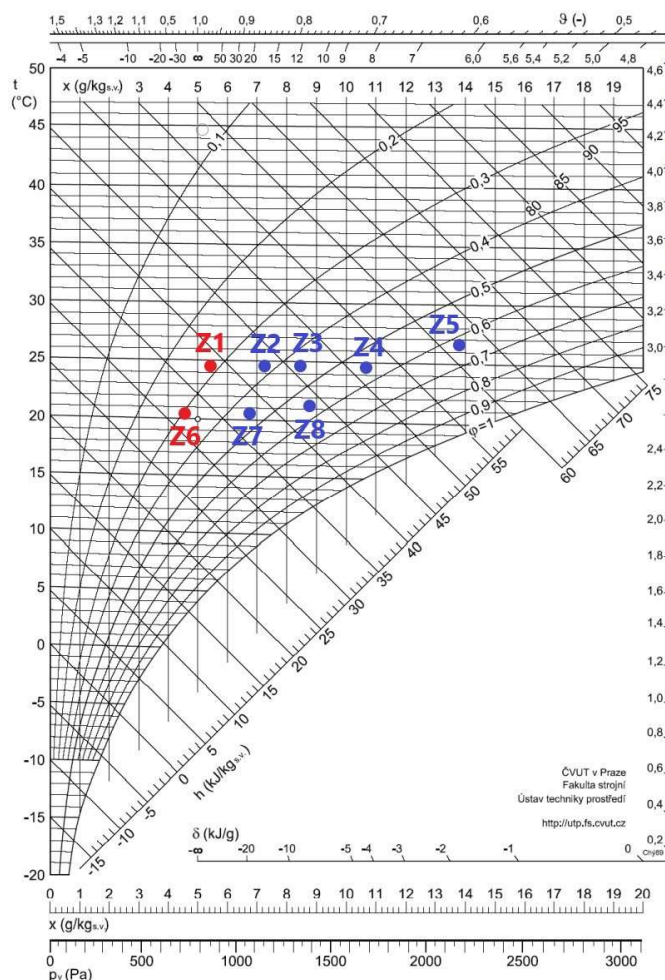
Obrázek 27: Použitý endoskop pro vizuální sledování stavu výměníku tepla, zdroj: archiv autora



Obrázek 28: Snímače diferenčního tlaku s připojenými hadičkami, zdroj: archiv autora

## 6.2.1 Průběh tvorby námrazy

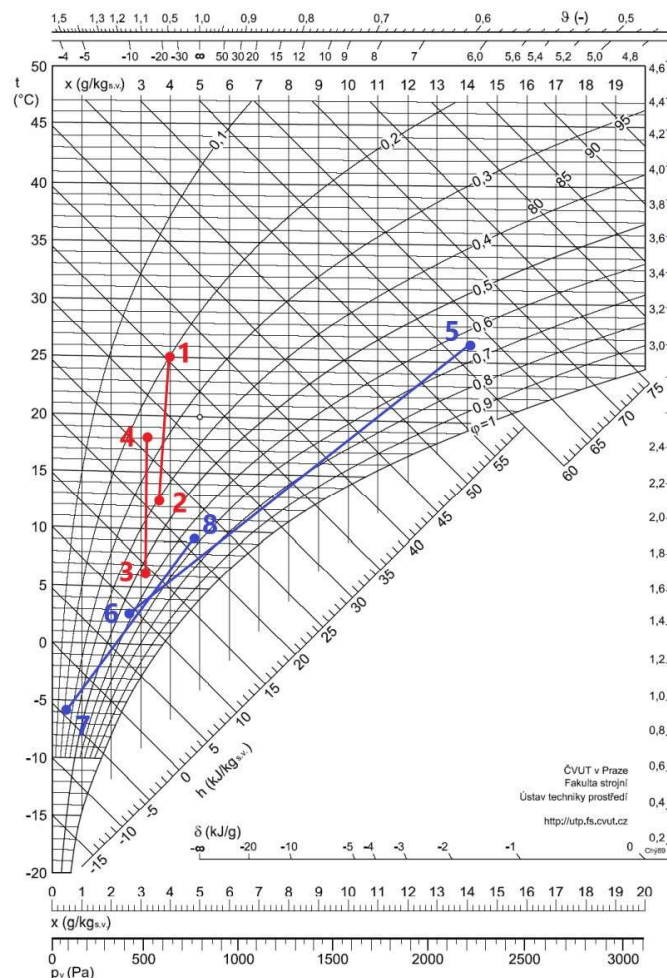
Při průběhu experimentu byla, po dosažení požadovaného stavu odváděného vzduchu I1, teplota čerstvého vzduchu E1 postupně snižována. Pro dvě různé teploty tI1 a k nim příslušným několika relativním vlhkostem bylo zjišťováno, zda na výměníku vzniká námraza. Rychlost proudění obou proudů vzduchu byla udržována na hodnotě přibližně 1,8 m/s, která odpovídá objemovému průtoku cca 50 m<sup>3</sup>/h. V H-X diagramu níže jsou vyznačeny všechny tepelně-vlhkostní stavy, které byly v rámci experimentu měřeny. Červeně jsou vyznačeny stavy, při kterých nebyl pozorován vznik námrazy, modře naopak ty, kdy byla námraza detekována. Námraza byla zjišťována vizuálně za pomoci endoskopické kamery. Z grafu je patrné, že se pro teplotu čerstvého vzduchu v intervalu cca -5 až -7 °C nachází hranice měrné vlhkosti vzniku námrazy mezi 5,7 g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub> pro měření Z1 a 6,7 g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub> pro měření Z7.



Obrázek 29: V H-X diagramu jsou vyznačeny měřené teplotní stavy. Modře jsou vyznačeny stavy, kdy na výměníku vznikala námraza, červeně stavy, kdy námraza pozorována nebyla. Přítomnost ledu byla zjišťována vizuálně za pomoci endoskopické kamery. Zdroj diagramu: [3]

V následujícím H-X diagramu jsou vyznačeny tepelně-vlhkostní změny vzduchu ve výměníku tepla. Provoz výměníku tepla při normových podmínkách pro měření teplotního a vlhkostního poměru je znázorněn body 1-4. Body 1-2 představují ochlazování a současné odevzdání vlhkosti odváděného proudu vzduchu, body 3-4 ohřev a příjem měrné vlhkosti přiváděným čerstvým vzduchem. Pro dané stavy vzduchu je patrné, že přenos vlhkosti skrz membránu není velký, spojnice bodů jsou téměř svislé.

Stav s přítomností námrazy je vyznačen pomocí bodů 5-8, v tomto případě se jedná o ustálený stav v rámci měření Z5. Protože je odváděný proud vzduchu výrazně vlhčen, je přenos vlhkosti mezi odváděným a přiváděným vzduchem větší. Změnu stavu odváděného vzduchu znázorňují body 5-6, přiváděného 7-8. Velká změna v měrných vlhkostech mezi stavem I1 a I2 je dána v první řadě přenosem vlhkosti skrz membránu, ale zároveň vodní pára kondenzuje uvnitř výměníku. Rozdíl měrných vlhkostí  $\Delta x_I$  je roven 11,6 g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub>, zatímco  $\Delta x_E$  je roven 4,6 g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub>.



Obrázek 30: V H-X diagramu jsou vyznačeny tepelně-vlhkostní stavy a jejich změny při průchodu výměníkem. Body 1-4 představují stav pro výpočet tepelného poměru dle normy. Body 5-8 jsou tepelné a vlhkostní stavy pro měření Z5 ve chvíli, kdy se na výměníku nachází námraza. Zdroj: [3]



Tabulka 11: Naměřené hodnoty pro měření S1 a Z5

	Měření S1		Měření Z5	
	t [°C]	φ [%]	t [°C]	φ [%]
I1	25,21	19,1	26,39	64,3
I2	12,44	41,1	2,75	58,6
E1	6,11	53,1	-5,85	21,4
E2	18,04	25,6	9,38	67,6

Na lamelách teplosměnné plochy se námraza tvořila ve formě ledových krystalků nebo ještě častěji vodní pára nejprve kondenzovala, vytvořila větší kapičky a mrzla až poté. Kondenzace se neobjevovala pro různá měření vždy na stejném místě a v rámci jednoho měření vznikala v místech nepravidelně rozmístěných na deskách výměníku. Původní úvaha, že se bude tvořit námraza v tzv. chladném rohu se ukázala ve většině případů jako mylná, zřejmě kvůli poloze výměníku při experimentu. Vzdušná vlhkost kondenzovala v malých kapičkách na chladném povrchu teplosměnné plochy, které se poté spojovaly ve větší kapky. Většina kapek vlivem tíhové síly stékala do spodní části výměníku tepla, kde poté vznikalo největší množství námrazy. Led se ale tvořil i v horní části výstupu odpadního vzduchu z výměníku.

Původní předpoklad, že se bude před vznikem námrazy kondenzátu tvořit větší množství a bude odváděn otvorem pro kondenzát se ukázal jako mylný. Teplota čerstvého vzduchu E1 byla tak nízká, že většina zkondenzované vodní páry velmi rychle namrzala a neměla šanci vytvořit větší kapky, které by mohly stékat až k otvoru.

Množství vytvořeného ledu záviselo na obsahu měrné vlhkosti v odváděném vzduchu I1. Čím vyšší byla měrná vlhkost, tím se námraza tvořila rychleji a ve větším množství. Například pokud měl přiváděných vzduch teplotu cca 25 °C a relativní vlhkost 56 %, byly patrné první náznaky vznikající námrazy již po 10 minutách na rozdíl od tepelně-vlhkostního stavu 25 °C a 38 %, kdy byla námraza pozorována až po 30 minutách.

Led se zpravidla netvořil na stále stejných místech, některé kanálky byly ledem zablokovány v poměrně krátkém časovém úseku, jiné zůstávaly relativně volné po celou dobu měření. Společným znakem napříč měřeními byl větší nárůst ledu ve spodní polovině kanálu odváděného vzduchu.

V následující tabulce jsou shrnuty všechny měřené stavy vzduchu. V posledním sloupci se nachází orientační doba, po které byly vizuálně detekovány změny související s rozvojem námrazy. Čas je odhadován od dosažení požadovaného stavu odváděného vzduchu I1 a současného dosažení teploty  $t_{E1}$  alespoň -5 °C.

Tabulka 12: Shrnutí všech měřených stavů odváděného vzduchu

číslo měření	$t_{11}$ [°C]	$\phi_{11}$ [%]	$x_{11}$ [g <sub>v.p.</sub> /kg <sub>s.v.</sub> ]	$t_{E1}$ [°C]	námraza	detekce námrazy
Měření Z1	24,72	29,1%	5,8	0 až -6,49	ne	-
Měření Z2	25,24	38,2%	7,9	0 až -5,81	ano	30 min
Měření Z3	24,71	43,0%	8,6	0 až -7,93	ano	25 min
Měření Z4	24,55	55,7%	11,1	0 až -5,69	ano	10 min
Měření Z5	26,51	62,8%	14,2	0 až -7,53	ano	0 min
Měření Z6	20,43	30,5%	4,7	0 až -6,37	ne	-
Měření Z7	20,53	44,4%	6,9	0 až -6,70	ano	35 min
Měření Z8	21,30	56,3%	9,2	0 až -6,76	ano	20 min

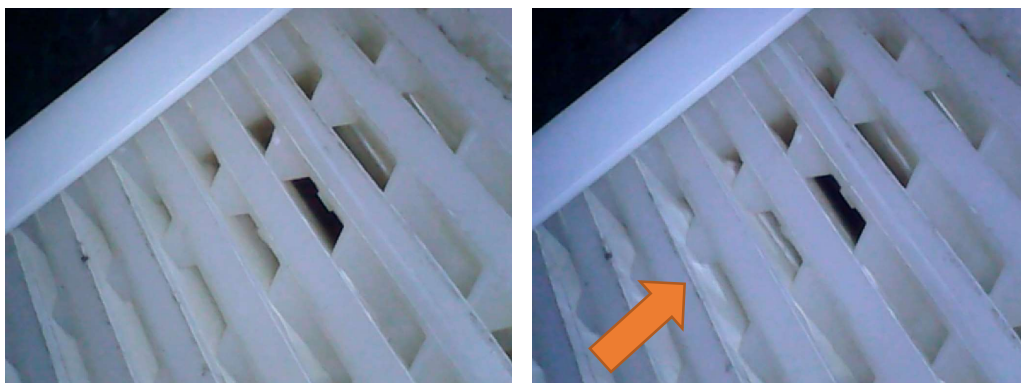
U měření Z5 je uvedena doba detekce námrazy 0 min, protože byla zjištěna ještě před dosažením -5 °C z důvodu vysokého obsahu vodní páry ve vzduchu. Z tabulky je patrné, že se se zvyšující měrnou vlhkostí snižuje doba, po které se objeví první známky tvořící se námrazy. Ze záznamu videokamery je rovněž znatelné, že se zvyšující se měrnou vlhkostí se tvoří námrazy více.

#### 6.2.1.1 Vizuální kontrola

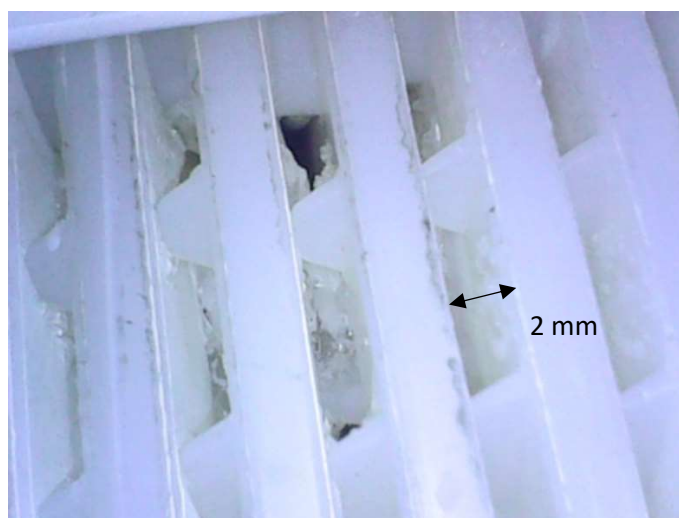
Mezi první znaky vznikající námrazy na výměníku tepla patří odlesky LED světla kamery zkondenzované vodní páry na povrchu teplosměnné plochy. Pokud jsou okrajové podmínky dále udržovány, je možné pozorovat zvětšující se kapičky kondenzátu a jejich případný pohyb způsobený tíhovou silou. Dále je možné pozorovat postupný růst ledu, který přibývá v kanálcích výměníku. Je možné pozorovat současně vznik kondenzátu i námrazy, to je zřejmě dáno turbulentním prouděním vzduchu uvnitř výměníku, které způsobuje, že teplota desek není ve všech místech stejná. V některých místech to vypadá, že led v čase pomalu mizí. To může být způsobeno tepelnými zisky z teplosměnné plochy, které způsobí tání, nebo sublimací ledu. Proces tvorby ledu je dobře viditelný ve videu v příloze 3.

Kvůli velikosti kamerové sondy ji nebylo možné vsunout mezi lamely výměníku. Stav byl snímán pouze z venku. Proto nelze stanovit přítomnost námrazy vizuálním způsobem s naprostou přesností. Led může vznikat nejprve v místech, kam endoskop nedohlédne. Rovněž je možné detekovat pouze větší změny, které se objevují až ve chvíli, kdy je námraza více rozšířena. Určování počátku vzniku námrazy touto metodou je orientační, ale protože má měřený výměník tepla relativně malé rozměry a námraza se šíří v rámci několika minut, lze tento odhad použít.

Předpoklad, že se bude námraza postupně šířit z výstupu odpadního vzduchu I2 až k vstupu odváděného vzduchu I1 se ukázal jako pravdivý. Lze pozorovat námrazu i zkondenzovanou vodní páru. Oba stavy se objevovaly při zvýšené produkci námrazy z důvodu vyššího obsahu vlhkosti ve vzduchu I1.



Obrázek 31: Vlevo: počáteční stavy výměníku, vpravo: viditelné první známky vzniku námrazy – šipkou je označeno odražející se světlo endoskopické sondy od zkondenzované nebo namrzlé vody, zdroj: archiv autora



Obrázek 32: Detail lamel výměníku na výstupu odpadního vzduchu I2 s krystalky ledu, zdroj: archiv autora



Obrázek 33: Námraza na vstupu odváděného proudu I1 do výměníku, která se rozšířila v průběhu měření od výstupu I2. Zdroj: archiv autora

### 6.2.1.2 Rychlost proudění vzduchu a diferenční tlak

Pohyb vzduchu byl zajištěn ventilátory ve vzduchotechnických jednotkách A a B. Ventilátory byly ovládány podle otáček, které se v průběhu měření neměnily. Z tohoto důvodu je možné pozorovat snižování rychlosti proudění na odváděném proudu vzduchu při větším rozšíření námrazy. Průtočný profil se tímto zmenšuje a pokud ventilátor nezvyšuje svůj výkon, tak se objemový průtok procházející výměníkem postupně snižuje.

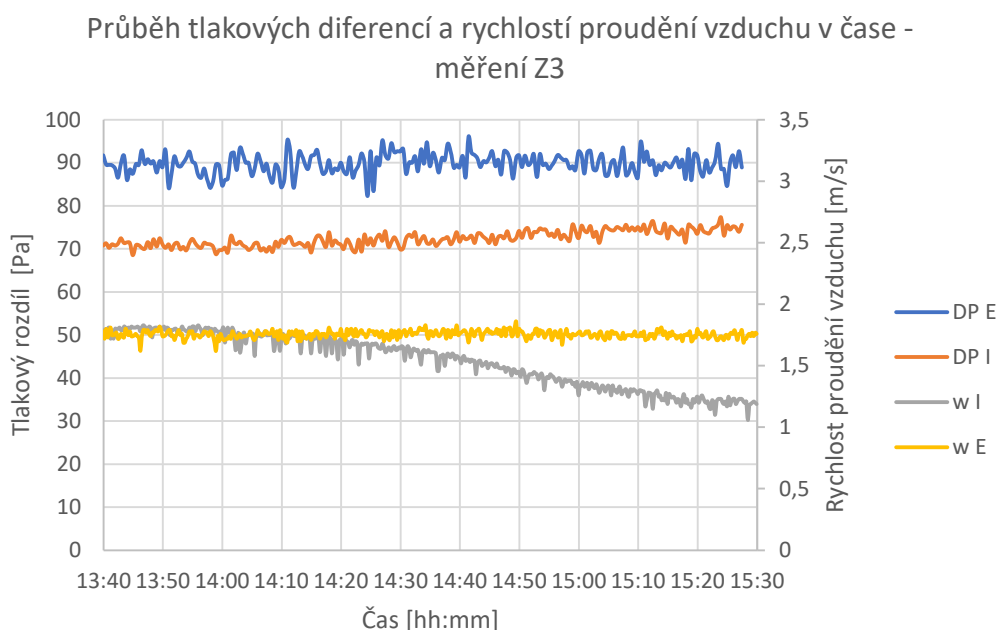
Rozdíl statických tlaků před a za výměníkem tepla neboli tlaková diference, je závislá na mnoha různých faktorech. Existují aparatury, které fungují na principu měření rozdílu statických tlaků, ze kterého je poté možné vypočítat průtok vzduchu. Jedná se o škrťací orgány, například clonky nebo dýzy, které mají normou daný tvar a existují pro ně laboratorně ověřené podklady [45]. Pro měřený výměník ale žádné takové podklady neexistují a jeho odpor není znám. Velikost tlakové diference se u každého výměníku liší a závisí jak na materiálu, tak i na geometrickém provedení. Dále závisí na rychlosti proudění vzduchu výměníkem, její průběh kopíruje průběh rychlosti vzduchu daného proudu vzduchu.

Bylo uvažováno, že se bude tlakový rozdíl se šířící se námrazou výrazně zvyšovat a bude tak možné námrazu detekovat. Z naměřených dat ale vyplývá, že se sice diferenční tlak zvyšuje, ale v menší míře, než bylo očekáváno. To je zřejmě způsobeno tím, že se zároveň s rozšiřováním námrazy snižuje rychlost proudění. Pokud by byly otáčky ventilátoru proměnné a udržoval by konstantní průtok vzduchu, rychlost proudění by se neměnila a zřejmě by se tlaková diference zvyšovala výrazněji.

V grafu níže jsou uvedeny průběhy tlakových rozdílů na odváděném a přiváděném proudu vzduchu a příslušné rychlosti proudění. Vizualně byla námraza zjištěna v 14:30 zatímco podle metody standardizace teplotního poměru se námraza objevuje již ve 14:15 (viz kapitola 6.2.1.5). Rychlost odváděného proudu se poměrně výrazně snižuje z původní hodnoty 1,7 m/s až na 1,2 m/s. Kanálky výměníku, kterými proudí vzduch, jsou postupně zmenšovány až blokovány rostoucím ledem a rychlost, potažmo průtok vzduchu se tím snižuje. I přesto, že se hodnota rychlosti odváděného proudu vzduchu snižuje, je stále možné pozorovat mírné zvýšení tlakové diference na stejném proudu vzduchu.

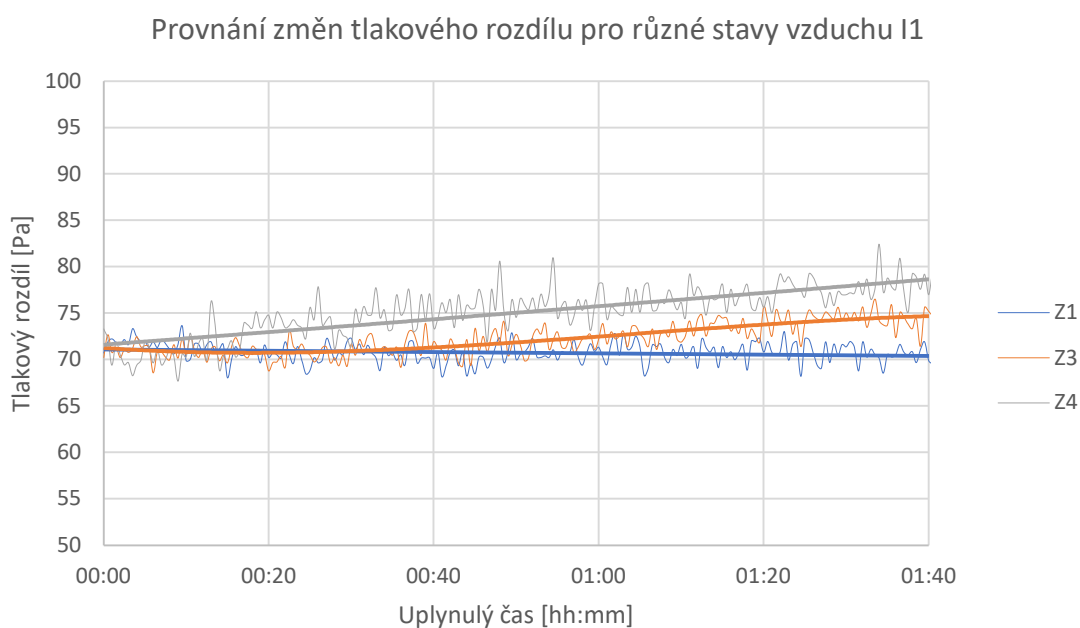
Ve všech ostatních měřeních, kde se objevovala námraza, byly změny tlakové diference a rychlosti proudění obdobné.

Graf 4: Průběh tlakových diferencí a rychlostí proudění vzduchu obou proudů ve výměníku v čase.



V grafu níže se nachází porovnání změn tlakových rozdílů pro měření Z1, Z3 a Z4. Při měření Z1 na výměníku námraza nevznikala, proto je průběh tlakové difference přibližně konstantní. V ostatních dvou měření byla pozorována kondenzace a následné tuhnutí vody, liší se od sebe množstvím obsažené vlhkosti v odváděném vzduchu. V měření Z4 byla měrná vlhkost vyšší o 2,5 g<sub>v.p.</sub>/kg<sub>s.v.</sub>, námraza se začala objevovat dříve a ve větším množství. To má za následek větší nárůst tlakového rozdílu před a za měřeným výměníkem tepla.

Graf 5: Porovnání změn tlakové difference pro měření Z1, Z3 a Z4.

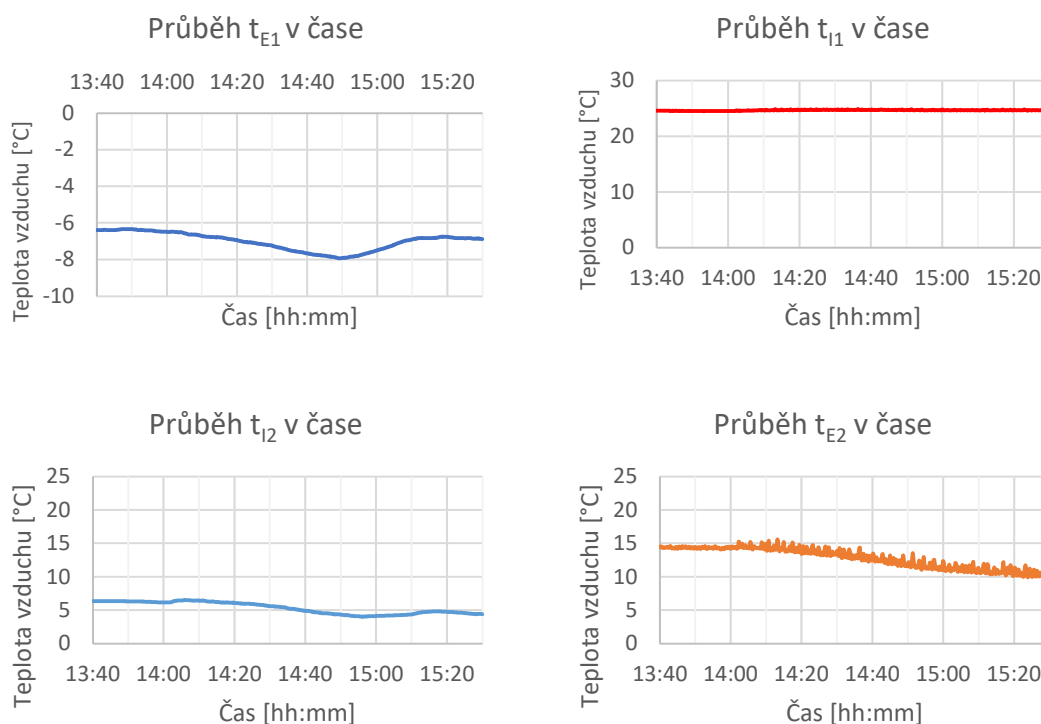


### 6.2.1.3 Teplotní změny

V přítomnosti námrazy na teplosměnné ploše je možné pozorovat také změny v teplotním stavu vzduchu. Protože led funguje jako izolant, snižuje účinnost předávání tepla ve výměníku [26]. Snižuje se množství předané energie mezi odváděným a čerstvým vzduchem a teplota přiváděného vzduchu  $t_{E2}$  s rozvojem námrazy klesá.

V následujících grafech jsou zobrazeny průběhy teplot na vstupech a výstupech výměníku tepla pro měření Z3. Průběh teploty odpadního vzduchu  $t_{I2}$  kopíruje průběh teploty čerstvého vzduchu  $t_{E1}$ . V případě, kdy by se ve výměníku nenacházela ledová vrstva, rovněž by průběh teploty přiváděného vzduchu v nějakém rozsahu kopíroval průběh  $t_{E1}$ . S rozvojem námrazy bude teplota  $t_{E2}$  klesat, protože neobdrží tak velké množství tepla, jaké by obdržela při normálním stavu.

Graf 6: Průběhy jednotlivých teplot na vstupech a výstupech výměníku pro měření Z3 v čase.



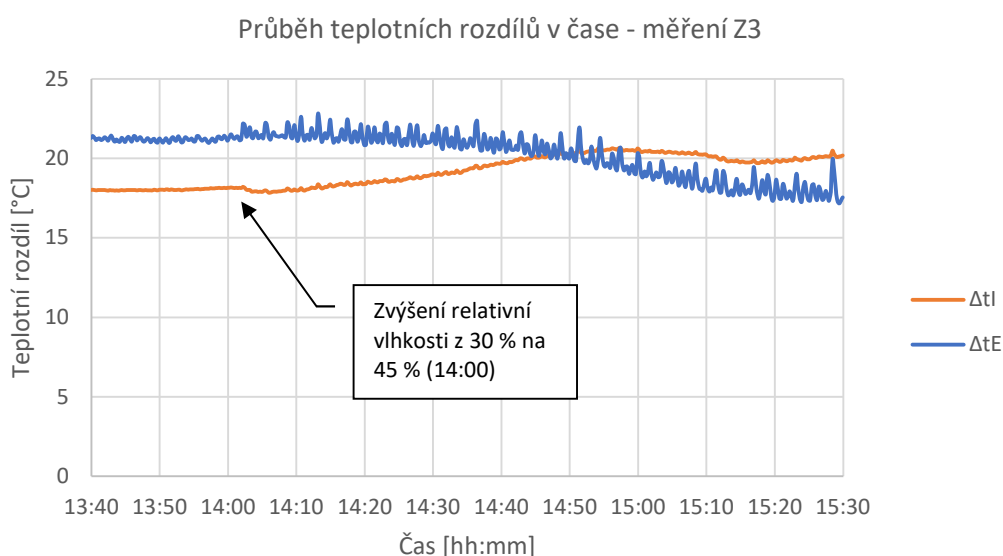
Teplota přiváděného proudu vzduchu  $t_{E2}$  vykazuje větší kolísání hodnoty v čase než průběhy ostatních teplot. Důvodů tohoto jevu může být více. Tyto výkyvy teploty  $t_{E2}$  se objevují ve chvíli, kdy je v provozu parní zvlhčovač. Proces zvlhčování probíhá tak, že zvlhčovač periodicky spíná a vypíná a okamžitá relativní vlhkost tedy výrazně fluktuuje. Amplituda teploty  $t_{E2}$  se zvyšuje se zvýšením relativní vlhkosti, zvyšuje se rovněž amplituda okamžité relativní vlhkosti odváděného proudu vzduchu. Výkyvy tedy mohou být způsobeny nerovnoměrným pokrytím teplosměnné plochy ledem. Vzduch se ohřívá nerovnoměrně, a protože před senzorem teploty není rovný

úsek pro ustálení turbulentního proudu, vzduch neměl šanci se dostatečně promíchat a kolem senzoru proudí střídavě teplejší a chladnější vzduch.

Druhou možností je, že je to způsobeno samotným kolísáním relativní vlhkosti. Se zvyšováním vlhkosti se zvyšuje obsažené vázané teplo ve vzduchu a zvyšuje se tak celková účinnost výměníku. Protože ale ve výměníku vždy se zvýšenou relativní vlhkostí vzniká námraza, nebylo možné přesně určit původ tohoto jevu, aniž by byl proveden podrobnější výzkum.

V průběhu tvorby námrazy ve výměníku lze pozorovat, že se rozdíl mezi teplotami vstupujícího a vystupujícího vzduchu do výměníků u obou proudů mění. Zatímco se rozdíl  $\Delta t_i$  mezi teplotami  $t_{i1}$  a  $t_{i2}$  v průběhu zamrzání zvětšuje, rozdíl  $\Delta t_E$  mezi teplotami  $t_{E2}$  a  $t_{E1}$  se zmenšuje.

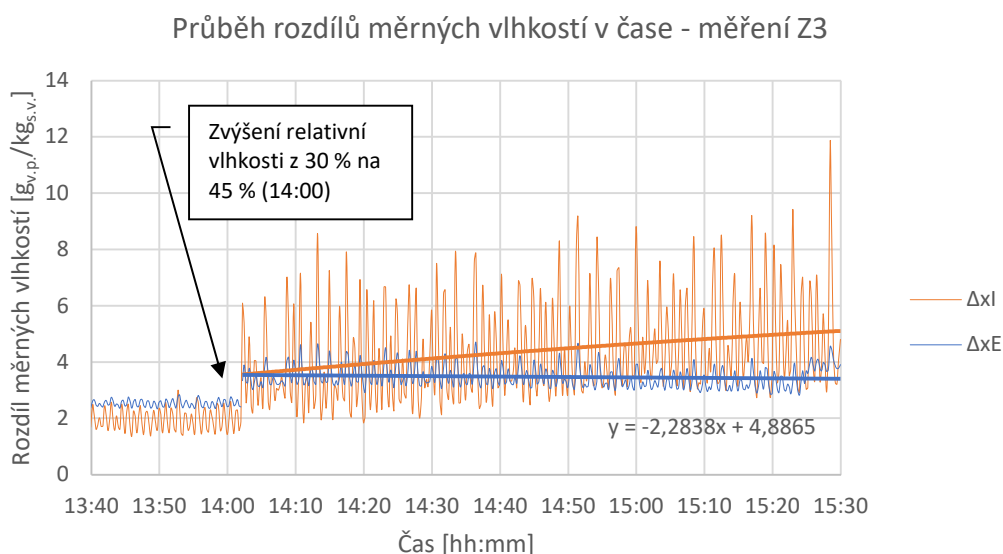
Graf 7: Průběh teplotních rozdílů odváděného a čerstvého vzduchu před a za výměníkem v čase.



#### 6.2.1.4 Vlhkostní změny

Protože ve výměníku zůstává část vzdušné vlhkosti jako námraza, je možné předpokládat, že se bude rozdíl měrných vlhkostí  $I_1$  a  $I_2$  postupně zvětšovat se zvyšující se produkcí námrazy, zatímco rozdíl  $E_2$  a  $E_1$  bude zůstávat konstantní nebo se bude také mírně měnit. Kromě vlhkosti předané mezi proudem  $I$  a  $E$  je pokles měrné vlhkosti  $x_{I2}$  v čase způsoben kondenzací. Průběh rozdílů měrných vlhkostí je možné pozorovat v následujícím grafu.

Graf 8: Průběh vlhkostních rozdílů odváděného a čerstvého vzduchu před a za výměníkem v čase.

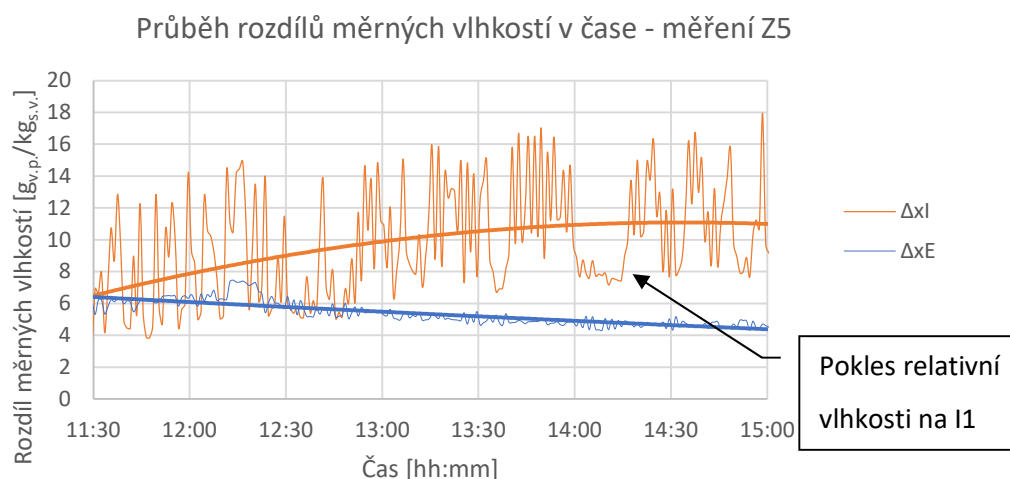


Rozdíl  $\Delta x_E$  se v čase mírně zmenšuje. To je zřejmě způsobeno blokáží teplosměnné plochy ledovou vrstvou, takže není schopna předávat tolik vlhkosti mezi proudy vzduchu. Přiváděný proud vzduchu tedy nezíská tak velký objem vzdušné vlhkosti. To dále přispívá ke zvětšení rozdílů  $\Delta x_I$ . Pokud odváděný proud vzduchu předá druhému proudu méně vlhkosti, je v kontaktu se studenou plochou vlhčí vzduch a ve výsledku je objem zkondenzované vodní páry větší. To přispívá k rychlejšímu růstu ledu a celý proces se znovu opakuje. I v případě, že do výměníku přichází vzduch o vyšší relativní vlhkosti a je produkce námrazy větší, rozdíly měrných vlhkostí se mění přibližně stejnou měrou – viz graf níže. Pro měření byly hodnoty snímány v minutovém intervalu. Asi čtvrt hodinový pokles rozdílů měrných vlhkostí na proudu I byl způsoben krátkodobým poklesem relativní vlhkosti odváděného proudu I1 kvůli výpadku funkce zvlhčovače. Rozdíl mezi měrnými vlhkostmi  $x_{I1}$  a  $x_{I2}$  se pro měření Z3 zvětšil za 1 h cca 1,25 x, stejně tak pro měření Z5.

Větší změny vlhkostních rozdílů jsou patrné nejvíce na začátku měření, kdy probíhá vývoj námrazy. V případě, že se teploty  $t_{E1}$  a  $t_{I1}$  v čase nemění, může po nějaké době nastat jakási ustálení stavu kdy se rozdíl měrných vlhkostí na odváděném proudu výrazně nemění. Ve výměníku tepla se nachází větší množství ledu, který teplosměnnou plochu izoluje. Pokud by ledu vzniklo příliš velké množství nebude se odváděný vzduch ochlazovat v tak velké míře a mohl by způsobovat tání ledu.



Graf 9: Průběh vlhkostních rozdílů odváděného a čerstvého vzduchu před a za výměníkem v čase.



Pro jedno měření byla zjišťována hmotnost namrzlého kondenzátu. Před a po měření Z4 byl výměník tepla zvážen na digitální váze s přesností 0,01 g. Hmotnosti před a po měření jsou uvedeny v tabulce níže. Rozdíl hmotností se rovná 35 g, měření při režimu namrzání probíhalo po dobu 105 min. Podle jednoduchého výpočtu je produkce námrazy pro dané okrajové podmínky přibližně 20 g/h.

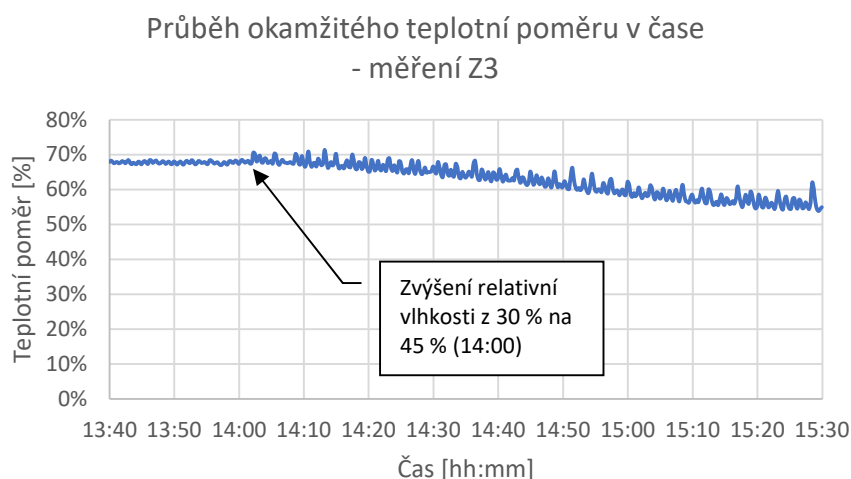
Tabulka 13: Zaznamenané hodnoty hmotností a výpočet produkce námrazy.

Měření Z4	
hmotnost před [g]	2075,06
hmotnost po [g]	2110,02
rozdíl hmotností [g]	34,96
teplota $t_{I1}$ [°C]	24,55
měrná vlhkost $x_{I1}$ [g <sub>v.p.</sub> /kg <sub>s.v.</sub> ]	11,1
teplota $t_{E1}$ [°C]	0 až -5,69
délka měření [min]	105
produkce námrazy [g/s]	0,01
produkce námrazy [g/h]	19,98

### 6.2.1.5 Teplotní poměr

Z důvodu snižování objemu předávaného tepla mezi proudy vzduchu, způsobeném přítomností ledu na teplosměnné ploše, se bude teplotní poměr s rozvojem námrazy měnit. Jen z průběhu okamžitého teplotního poměru v čase ale přesný počátek vzniku námrazy určit nelze. Z grafu níže je patrné, že se účinnost předávání citelného tepla snižuje s rozšiřováním námrazy. Kromě většího kolísání hodnoty účinnosti, které souvisí se zvýšením relativní vlhkosti a s tím spojeným kolísáním teploty  $t_{E2}$ , není z grafu patrný žádný výrazný zlom, který by naznačoval přesný počátek vzniku námrazy.

Graf 10: Průběh okamžitého teplotního poměru v čase, měření Z3



Protože teplota vzduchu E2 v tomto stavu výrazně kolísá a tím kolísá i hodnota teplotního poměru, je nutné vyloučit možnost falešného určení přítomnosti námrazy. Toho bylo dosaženo použitím metody standardizace dat nejistotou teplotního poměru. Tímto způsobem je možné proměnné převést na stejné měřítko a vzájemně je porovnávat. [46]

Tato analýza byla provedena pro měření Z3. Pro daný ustálený stav vzduchu bez výskytu námrazy byl určen teplotní poměr, pro který byla určena nejistota (viz příloha 1). Standardizovaná proměnná se následně určí podle následující rovnice:

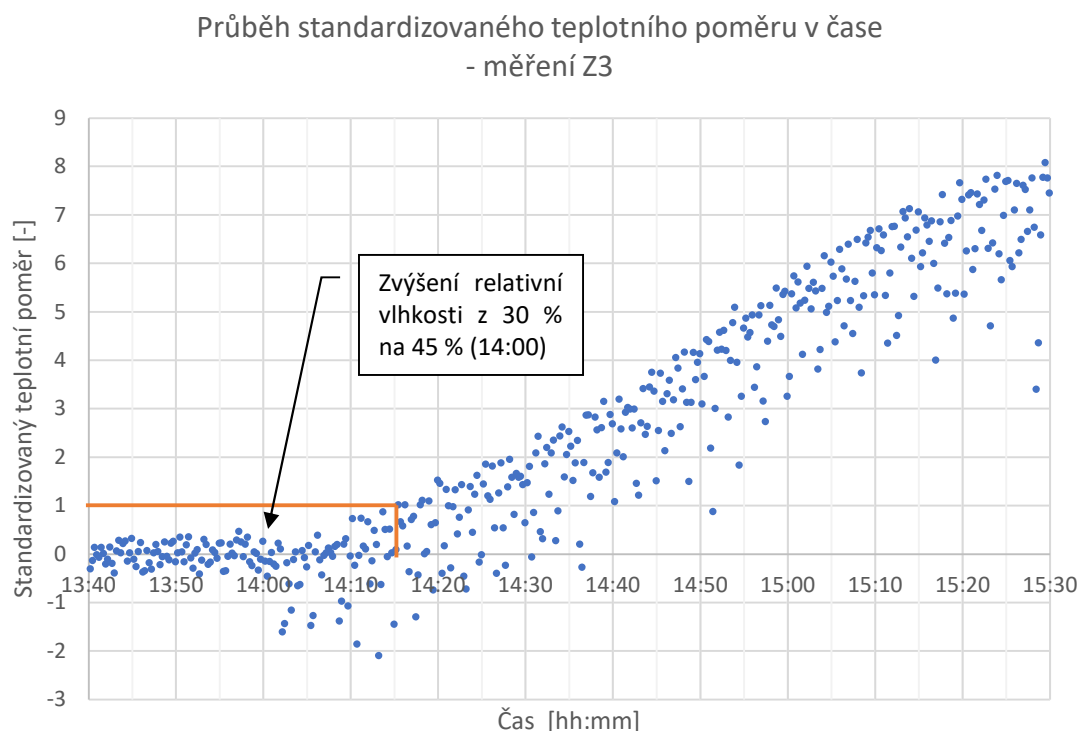
$$\Phi_{Z1,si} = \frac{\Phi_{Z1,i} - \Phi_{Z1}}{u_{t,Z1}} \quad (15)$$

kde  $\Phi_{Z1,si}$  je standardizovaný teplotní poměr [-],  $\Phi_{Z1,i}$  je teplotní poměr pro okamžitý stav vzduchu [%],  $\Phi_{Z1}$  je teplotní poměr pro ustálený stav bez výskytu námrazy [%] a  $u_{t,Z1}$  je výsledná nejistota teplotního poměru [%].

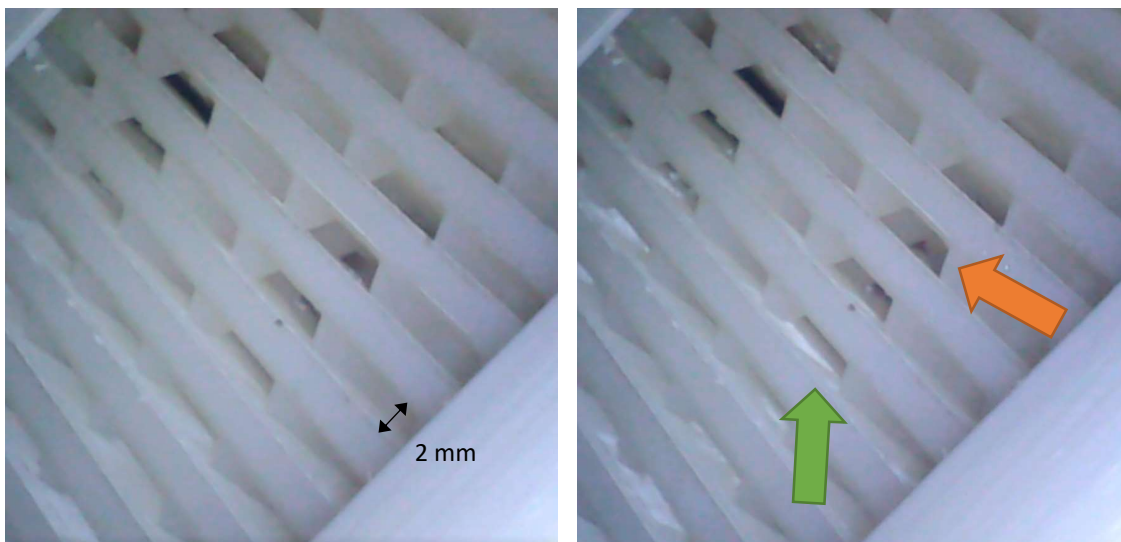
Tabulka 14: Naměřené hodnoty pro měření Z3 a vypočtený teplotní poměr včetně nejistoty.

	Měření Z3			
	$t_i = 21,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $p_a = 99,3 \text{ kPa}$			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	1,79	1,79	1,75	1,75
teplota vzduchu [°C]	24,42	6,37	-6,87	14,34
objemový průtok [m3/h]	50,73	50,73	49,49	49,49
teplotní poměr [%]	67,79 % $\pm$ 1,72 %			

Graf 11: Průběh standardizovaného okamžitého teplotního poměru v čase, oranžově je vyznačena hranice, kdy je překročen interval ohraničený nejistotou



Pro okamžitou hodnotu teplotního poměru rovnou teplotnímu poměru pro ustálený stav se standardizovaný teplotní poměr rovná 0. Ve chvíli, kdy je jeho hodnota větší než 1 (případně nižší než -1), překročil okamžitý teplotní poměr interval ohraničený nejistotou a lze tedy uvažovat, že ve výměníku nastávají změny související se vznikem námrazy. Tento stav je v grafu 11 vyznačen oranžově. Po zvýšení relativní vlhkosti na 45 % bylo poprvé dosaženo mezní hodnoty standardizované proměnné po cca 15 minutách. Ze záběrů z endoskopické kamery jsou patrné první změny až po přibližně 25 minutách. Tento způsob detekce se zdá jako přesnější než vizuální zjištění a je možné detekovat i malé množství námrazy. Předchází mu ale poměrně složitý výpočet, především výpočet nejistot, a není praktické tento způsob aplikovat v běžné praxi.



Obrázek 34: Stav výměníku vzduchu snímáný endoskopickou kamerou, vlevo se nachází stav v 14:00, vpravo poté stav ve 14:25. Na pravém obrázku je viditelný růst námrazy – vyznačeno oranžovou šipkou. Rovněž je možné pozorovat odlesky světla kamery od vzniklého kapalného nebo případně již zmrzlého kondenzátu – zelená šipka.

#### 6.2.1.6 Průběh teploty po šířce výměníku tepla

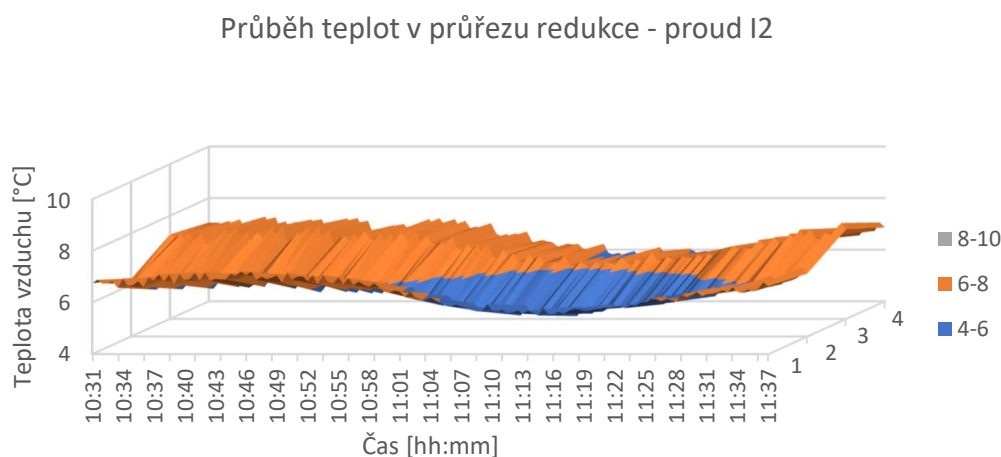
Teplota vzduchu se po šířce výměníku mění. Na výstupu vzniká turbulentní proudění, které se ustálí až v určité vzdálenosti od výměníku. Pro měření Z8 a N1 (viz kapitola 6.2.1.7) byly do redukce výměníku na výstupu I2 a E2 umístěny čtyři senzory – viz schéma níže.



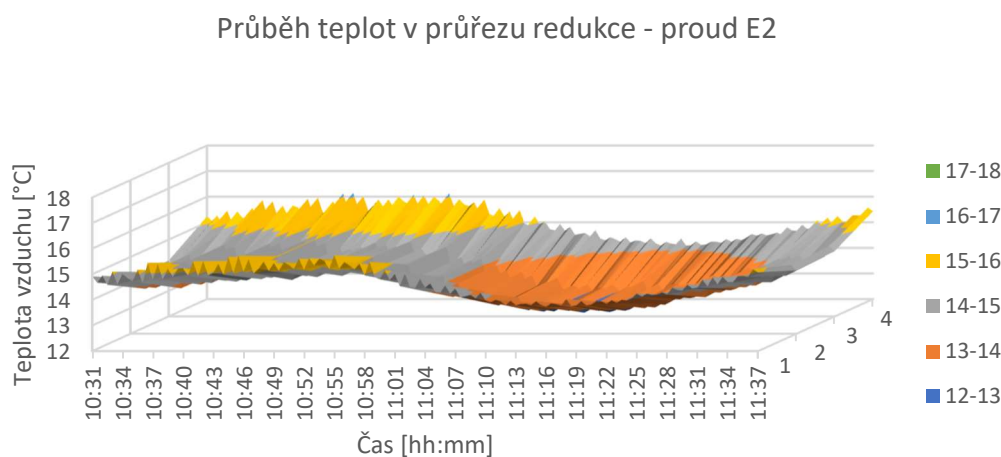
Obrázek 35: Označení umístění senzoru teploty, zdroj: archiv autora

Zatímco na výstupu E2 byla pro všechna měření konzistentně vyšší teplota na okrajích než uprostřed, na výstupu I2 se výsledky lišily. Pro některá měření byl průběh shodný s výstupem E2, pro měření Z8 byla nejvyšší teplota naměřena v bodě číslo 3. To je zřejmě způsobeno různým rozložením vznikající námrazy pro různá měření. V grafu 13 je vyznačen průběh teplot po průřezu výstupu z výměníku E2. Po celý průběh měření jsou nejvyšší teploty na okrajích.

Graf 12: Znázornění průběhu teplot po šířce redukce u proudu I2 pro měření Z8



Graf 13: Znázornění průběhu teplot po šířce redukce u proudu E2 pro měření Z8



#### 6.2.1.7 Plné zamrznutí a změna vnitřní netěsnosti

Bylo předpokládáno, že pokud ve výměníku tepla vznikne velké množství ledu, může dojít ke zvětšení vnitřních netěsností. Protože voda při tuhnutí zvětšuje svůj objem, mohou při zvýšené produkci námrazy uvnitř výměníku degradovat spoje nebo se mohou zvětšovat již přítomné netěsnosti nebo skuliny. To se pak projeví větším množstvím vzduchu, který přefukuje mezi dvěma proudy vzduchu. Vnitřní netěsnost se bude zvětšovat.

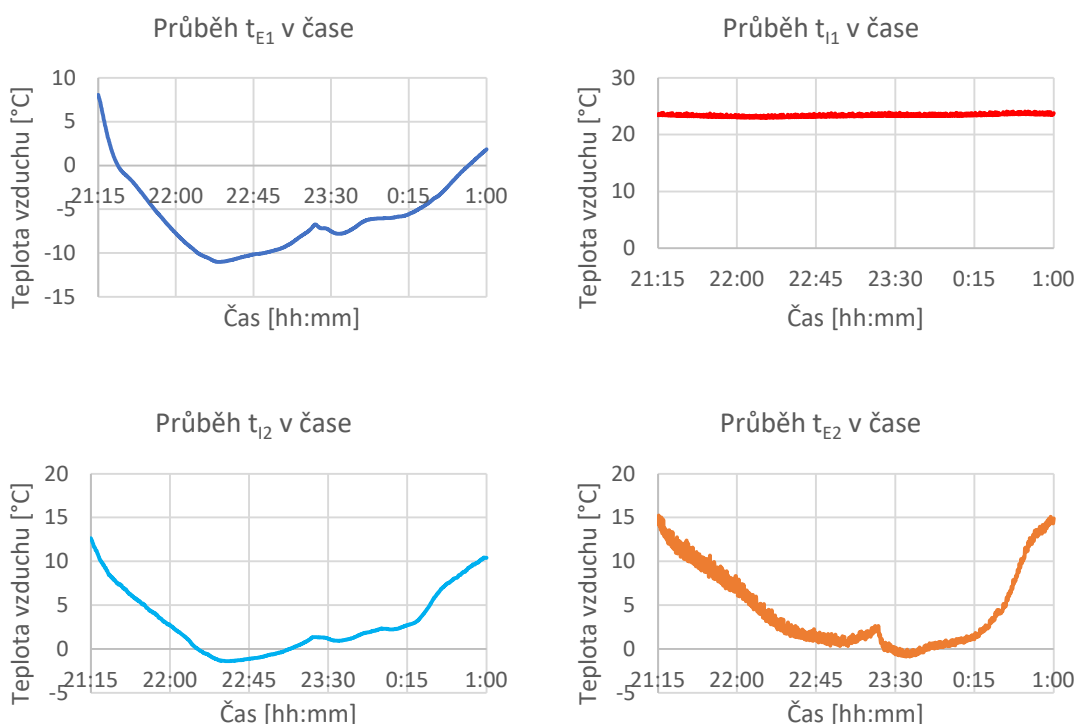
Aby byla změna v měření vnitřní netěsnosti viditelná, byly zvoleny takové okrajové podmínky, které zaručují, že bude produkce námrazy vysoká. Jsou uvedeny v následující tabulce. Byla zvolena větší rychlost proudění přiváděného vzduchu  $w_E$  pro spolehlivé udržení nízké teploty vzduchu. To se projevilo dosažením teploty čerstvého vzduchu až  $-11\text{ °C}$ .

Tabulka 15: Naměřené hodnoty pro měření N1

Měření N1	
Teplota $t_{I1}$ [°C]	23,43
Relativní vlhkost $\phi_{I1}$ [%]	66,45
Měrná vlhkost $x_{I1}$ [g <sub>v.p.</sub> /kg <sub>s.v.</sub> ]	12,2
Rychlost $w_{I1}$ [m/s]	1,88
Objemový průtok $V_{I1}$ [m <sup>3</sup> /h]	53,16
Teplota $t_{E1}$ [°C]	0 až - 11,02
Rychlost $w_{E1}$ [m/s]	3,11
Objemový průtok $V_{E1}$ [m <sup>3</sup> /h]	87,93

Měření probíhalo po dobu 4 hodin. Vzhledem k již dříve popsanému problému s namrzáním chladiče ve vzduchotechnické jednotce B nebylo v tomto případě možné dosáhnout ustálení teploty čerstvého vzduchu  $t_{E1}$ . V následujících grafech jsou uvedeny průběhy teplot.

Graf 14: Průběhy jednotlivých teplot na vstupech a výstupech výměníku pro měření N1 v čase.



Se zvyšujícím se výskytem námrazy se zmenšoval průtočný profil a s tím se také zmenšovala rychlost proudění odváděného vzduchu I. Ve chvíli, kdy bylo dosaženo největší míry zamrznutí klesla rychlost proudění I z původních 1,88 m/s na 0,18 m/s. Objem teplého vzduchu byl tak malý, že teplota  $t_{E2}$  klesla až pod bod mrazu, protože množství energie předávané mezi proudy klesalo se snižující se rychlostí. Teplota  $t_{I2}$  rovněž v rámci měření klesla pod bod mrazu, ale v jiný časový okamžik. Tato křivka kopíruje průběh teploty  $t_{E1}$ , jejíž hodnota v tu chvíli byla rovna

- 11 °C. Při snižující se teplotě čerstvého vzduchu E1 se také snižuje teplota odpadního vzduchu I2. V žádném z předchozích měření neklesla teplota tI2 pod 3 °C a teplota tE2 pod 9 °C.

Na následujících fotografiích je viditelný průběh tvorby námrazy a konečný výsledek.



Obrázek 36: Průběh zamrzání měřeného výměníku tepla. Vlevo: počáteční stav, uprostřed: stav po 15 minutách, vpravo: konečný stav. Zdroj: archiv autora

Po skončení měření byly znovu změřeny vnitřní netěsnosti. Podrobný popis měření a následného výpočtu je uveden v kapitole 6.1.2.

Tabulka 16: Naměřené hodnoty a výpočet vnitřních netěsností.

Vnitřní netěsnost – konečný stav	
počáteční hodnota [m3]	186,026
konečná hodnota [m3]	186,053
rozdíl [m3]	0,027
doba měření [s]	360
objemový průtok [m3/h]	0,27
teplota vzduchu [°C]	21,15
atmosférický tlak [Pa]	96 500
hustota vzduchu [kg/m3]	1,14
hmotnostní průtok [kg/h]	0,31 ± 0,001

Hodnota hmotnostního průtoku přefukovaného z odsávané strany výměníku na stranu dodávaného vzduchu se zvětšila z 0,24 kg/h na 0,31 kg/h, rozdíl je roven 0,07 kg/h. Vnitřní netěsnost se po plném zamrznutí výměníku zvětšila 1,3 x. Lze tedy usuzovat, že vliv přítomnosti ledu ve výměníku na změnu vnitřní netěsnosti je znatelný. Přesnou míru zvyšování netěsností ale nelze z takto malého počtu měření usuzovat. Bylo by nutné provést větší množství zmrazovacích cyklů a následných měření vnitřních netěsností, aby bylo možné dojít k jednoznačnému závěru.

Tabulka 17: Shrnutí výsledků měření vnitřních netěsností před a po plném zamrznutí.

Počáteční stav [kg/h]	0,24 ± 0,001
Konečný stav [kg/h]	0,31 ± 0,001

### 6.3 Posouzení způsobů detekce námrazy dle naměřených dat

V předchozím textu byly popsány různé způsoby detekce námrazy ve výměníku tepla – viz kapitola 3.5. Vizuální kontrola je všeobecně považována za spolehlivou metodu detekce. Tento předpoklad byl potvrzen měřením. Problém nastává, když vzniká námraza jen v malém množství nebo když vzniká nejdříve uvnitř výměníku tepla a do zorného pole kamery se rozšíří až po nějaké době. Zpravidla bylo možné zjistit první změny až po větším rozšíření námrazy. I přesto ale byla tato metoda vyhodnocena jako přesnější než sledování tlakového rozdílu.

V literatuře je uváděno, že sledování tlakového rozdílu před a za výměníkem je považováno za poměrně spolehlivou metodu, která se používá i v praxi. Tento postup je ale možné využít hlavně v případech, kdy ventilátor vzduchotechnické jednotky funguje s proměnlivými otáčkami a snaží se udržovat stálou rychlost proudění a tím i průtok. Pokud jsou otáčky ventilátoru konstantní, s růstem námrazy se zmenšuje průtočný profil, zmenšuje se i rychlost proudění a nárůst tlakové difference není v mnoha případech dobře znatelný. Zároveň na jeho průběhu nelze poznat začátek vzniku námrazy. Vznik námrazy může bezpečně indikovat současné zvýšení diferenčního tlaku a snížení rychlosti proudění vzduchu v případě, kdy ventilátor funguje v režimu stálých otáček. To ale vyžaduje kontinuální měření průtoku, což nelze vždy v praxi provést a znamená to vyšší finanční náklady.

Další možností detekce je sledování okamžitého teplotního poměru a vyhodnocení přítomnosti ledu na základě jeho standardizace. Protože této metodě ale předchází poměrně složitý výpočet, včetně výpočtu nejistot, je pro využití v praxi nutné použití výpočetního systému, který bude schopný výsledek vyhodnotit. Ve chvíli, kdy je výsledek rovnice ( 15 ) rovný číslu 1 a zároveň se jeho hodnota v čase dále zvětšuje, lze s jistotou usuzovat vznik a další šíření námrazy.

Případně by bylo možné sledovat změny související s vlhkostí, jako je kondenzace nebo vznik námrazy, pomocí kontinuálního odečítání měrné vlhkosti a pozorování změn rozdílu měrných vlhkostí I1 a I2. Pokud se bude rozdíl měrných vlhkostí odváděného proudu vzduchu na vstupu a výstupu z výměníku zvětšovat v čase, lze usoudit, že probíhá kondenzace vodní páry. V kombinaci s teplotou čerstvého vzduchu lze odhadovat, zda také dochází ke vzniku námrazy. Toto vyhodnocení je rovněž možné provést obdobným způsobem, jako u teplotního poměru s pomocí standardizace.



Pokud by byla použita membrána s vyšší propustností pro vodní páru, je možné docílit větší odolnosti výměníku vůči vzniku námrazy. Mezi proudy vzduchu bude předáno více vlhkosti, na výstupu I2 bude obsah měrné vlhkosti ve vzduchu menší, teplota rosného bodu bude nižší. To znamená, že bude námraza vznikat při nižších teplotách čerstvého vzduchu, případně při vyšších měrných vlhkostech odváděného vzduchu.

Samotné měření teplot vzduchu není pro detekci ledu dostačující. Myšlenka, že se tvoří námraza až ve chvíli, kdy je teplota odpadního vzduchu I2 rovna 0 °C je mylná. Námraza byla pozorována i ve chvíli, kdy byla teplota tI2 rovna 8 °C. Použití teploty čerstvého vzduchu pro spouštění protimrazových opatření se ukázalo jako neúspěšné, protože je často jako hranice uváděno dosažení teploty čerstvého vzduchu 0 °C. Námraza ale zpravidla vznikala až při nižších teplotách. Potenciál vzniku námrazy výrazně závisel na obsahu vzdušné vlhkosti v odváděném vzduchu I1.

## 6.4 Nejistoty měření

Žádné měření není v praxi absolutně přesné, proto je nutné provést výpočet nejistot měření. Nejistotou měření se rozumí interval hodnot okolo naměřené výsledné hodnoty, kde je možné očekávat skutečnou hodnotu. Výpočet nejistot byl proveden podle dokumentu „Stanovení nejistot akreditovaných zkoušek“. Postup pro výpočet nejistot pro tento typ měření byl odvozen z norem ČSN EN 308 [40] a ČSN EN 16211 [41]. Podrobný výpočet a výsledné hodnoty nejistot jsou uvedeny v příloze 1.

### 6.4.1 Nejistota teplotního poměru

#### 6.4.1.1 Rychlost

Objemový průtoky byl zjišťován výpočtem z naměřené rychlosti proudění pomocí vrtulkového anemometru Schiltknecht MiniAir64 Micro 0,6 – 20,0 m/s a Schiltknecht MiniAir64 Mini 0,4 – 20 m/s. Výrobce udává standardní nejistotu přístroje pro anemometr označený Micro rovnu  $\pm 3\%$  a pro Mini  $\pm 1,5\%$ .

Standardní nejistota přístroje  $u_1$ :  $u_{1,wE1} = 3\%$  nebo  $1,5\%$

Standardní nejistota metodiky  $u_2$ :  $u_{2,wi} = 4\%$

Standardní nejistota odečtu  $u_3$ :  $u_{3,wi} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \text{rozlišení}$  (16)

Standardní nejistota měření  $u_m$ :  $u_{m,wi} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$  (17)

#### 6.4.1.2 Objemový průtok

Objemový průtok je vypočten dle rovnice (7).

Výsledná nejistota objemového průtoku:  $u_{2,v} = \sqrt{A_{2,w}^2 \cdot u_{m,w}^2}$  (18)

Konstanta  $A_{1,w}$  je vypočtena jako parciální derivace vzorce pro výpočet objemového průtoku podle rychlosti:

$$A_{2,w} = \frac{\partial V}{\partial w} = S \quad (19)$$

#### 6.4.1.3 Teplota

Pro každý proud vzduchu se výsledná kombinovaná nejistota vypočítá z nejistot typu A a typu B. Pro měření teplot byly použity kombinované snímače teploty a relativní vlhkosti Ahlborn Almemo FHA646-E2C. Pro tyto senzory udává kalibrační list přesnost  $\pm 0,3\text{ °C}$  pro teploty  $0\text{ °C}$  až  $80\text{ °C}$ .

Standardní nejistota typu A: 
$$u_{3A,ti} = k_x \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{j=1}^n (t_j - \bar{t})^2} \quad (20)$$

kde  $k_x$  je opravný koeficient,  $t_j$  je j-tá teplota [°C],  $\bar{t}$  je aritmetický průměr teplot [°C] a  $n$  je počet naměřených hodnot. Protože je počet naměřených hodnot vyšší než 10, bude  $k_x = 1$ .

Standardní nejistota typu B: 
$$u_{3B,ti} = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{3,tj}^2} \quad (21)$$

kde  $n$  je počet použitých čidel v měřeném proudu vzduchu a  $\Delta z_{max,tj}$  je standardní nejistota měřidla uváděná výrobcem. Pro měření bylo v místě použito jedno čidlo.

Kombinovaná nejistota průměrných teplot: 
$$u_{3,tI1} = \sqrt{u_{3A,tI1}^2 + u_{3B,tI1}^2} \quad (22)$$

#### 6.4.1.4 Hustota

Hustota vzduchu byla vypočítána podle rovnice ( 13 ).

Výsledná nejistota stanovení hustoty vzduchu: 
$$u_{4,r} = \sqrt{A_{1,t}^2 \cdot u_{3,t}^2} \quad (23)$$

Konstanta  $A_{1,t}$  je vypočtena jako parciální derivace hustoty vzduchu podle teploty:

$$A_{4,t} = \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = - \frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{T^2} \cdot (2,65 \cdot p + \varphi \cdot p''_{vp}) \quad (24)$$

#### 6.4.1.5 Hmotnostní průtok

Výsledná nejistota hmotnostního průtoku: 
$$u_5 = \sqrt{A_{5,V}^2 \cdot u_{2,V}^2 + A_{5,r}^2 \cdot u_{4,r}^2} \quad (25)$$

Konstanta  $A_{5,V}$  se stanoví: 
$$A_{5,V} = \frac{\partial M}{\partial V} = \frac{1}{\rho_a} \quad (26)$$

Konstanta  $A_{1,r}$  se stanoví: 
$$A_{1,r} = \frac{\partial M}{\partial \rho_a} = - \frac{V}{\rho_a^2} \quad (27)$$

#### 6.4.1.6 Výsledná nejistota teplotního poměru

Teplotní poměr byl stanoven podle rovnice ( 1 ).

Výsledná nejistota teplotního poměru:

$$u_{6,t} = \sqrt{A_{tI1}^2 \cdot u_{3,tI1}^2 + A_{tE}^2 \cdot u_{3,tE}^2 + A_{tE}^2 \cdot u_{3,tE}^2 + A_{m,e}^2 \cdot u_{5,e}^2 + A_{m,i}^2 \cdot u_{5,i}^2} \quad (28)$$

Rovnice a podrobný výpočet konstant A je uveden v příloze 1.

Celkový výsledek teplotního poměru pro měření S1:  $\Phi = 62,46 \% \pm 3,66 \%$

## 6.4.2 Nejistota vlhkostního poměru

### 6.4.2.1 Relativní vlhkost

Pro měření relativních vlhkostí byly použity kombinované snímače teploty a relativní vlhkosti Ahlborn Almemo FHAD46C2. Pro tyto senzory je v kalibračním listu udávána přesnost  $\pm 2,7 \%$ .

Standardní nejistota typu A:

$$u_{1A,fi} = k_x \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{j=1}^n (\varphi_j - \bar{\varphi})^2} \quad (29)$$

kde  $k_x$  je opravný koeficient,  $\varphi_j$  je j-tá relativní vlhkost,  $\bar{\varphi}$  je aritmetický průměr relativních vlhkostí a  $n$  je počet naměřených hodnot. Pro počet hodnot vyšší než 10, bude  $k_x = 1$ .

Standardní nejistota typu B:

$$u_{1B,fi1} = \frac{\Delta z_{max,fi}}{\sqrt{3}} \quad (30)$$

Kombinovaná nejistota relativních vlhkostí:

$$u_{1,fi1} = \sqrt{u_{4A,fi}^2 + u_{4B,fi}^2} \quad (31)$$

### 6.4.2.2 Měrná vlhkost

Měrná vlhkost byla pro každý stav vzduchu stanovena dle rovnice ( 12 ).

Výsledná nejistota měrné vlhkosti:

$$u_{2,xi} = \sqrt{A_{fi}^2 \cdot u_{1,fi}^2 + A_{ti}^2 \cdot u_{3,ti}^2} \quad (32)$$

Konstanta  $A_{ri}$ :

$$A_{ri} = \frac{\partial x_i}{\partial \varphi_i} = \frac{0,622 \cdot p''_{vp} \cdot p}{(p - \varphi \cdot p''_{vp})^2} \quad (33)$$

Konstanta  $A_{ti}$ :

$$A_{ti} = \frac{\partial x_i}{\partial \varphi_i} = \frac{0,622 \cdot \varphi \cdot p \cdot \frac{\partial p''_{vp}}{\partial t}}{(p - \varphi \cdot p''_{vp})^2} \quad (34)$$

Pro teploty 0 až 80 °C je parciální derivace rovna:

$$\frac{\partial p''_{vp}}{\partial t} = \exp\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6+t}\right) \cdot \left(\frac{4044,2}{(235,6+t)^2}\right) \quad (35)$$

### 6.4.2.3 Výsledná nejistota vlhkostního poměru

Vlhkostní poměr byl vypočítán dle rovnice ( 2 ).

Výsledná nejistota měrné vlhkosti se stanoví podle:

$$u_{3,x} = \sqrt{A_{xI1}^2 \cdot u_{2,xI}^2 + A_{xE}^2 \cdot u_{2,xE}^2 + A_{xE}^2 \cdot u_{2,xE2}^2 + A_{m,e}^2 \cdot u_{5,e}^2 + A_{m,i}^2 \cdot u_{5,i}^2} \quad (36)$$

Rovnice a podrobný výpočet konstant A je uveden v příloze 1.

Celkový výsledek vlhkostního poměru pro měření S1:  $\Psi = 24,7 \% \pm 3,6 \%$

## 7 Závěr

Tato práce se zabývala vlivem namrzání na provoz výměníku zpětného získávání tepla. V teoretické části byly prezentovány informace o různých druzích výměníků tepla za suchého stavu. Výměníky jsou obvykle děleny na dvě skupiny, regenerační a rekuperační. Rozdíl je primárně ve způsobu předání tepla mezi přiváděným a odváděným proudem vzduchu. Zatímco v regeneračním výměníku teplý odváděný proud nejprve předá teplo akumulační hmotě a posléze ho předá studenému přiváděnému vzduchu, v rekuperačním výměníku si oba proudy vzduchu teplo vyměňují napřímo.

V další části se nachází rešerše o tvorbě námrazy na výměníku ZZT, jejímu předcházení, odstraňování a detekci. Vniklý led může malé prostory ve výměníku zčásti nebo zcela zablokovat a narušit tak správnou funkci celého systému. Je proto potřeba námraze předcházet nebo ji včas detekovat a eliminovat. Způsobů prevence vzniku námrazy se využívá několik, například přehřívání studeného čerstvého vzduchu, případně lze využít i materiály s fázovou změnou, tzv. PCM. Odstranění námrazy může být dosaženo s pomocí elektrického ohříváče, použitím obtoku nebo krátkodobým úplným vypnutím přívodu čerstvého vzduchu.

Námraze je možné detekovat vizuálně. Tento způsob je považován za spolehlivý, ale v naprosté většině případů ji nelze využít v praxi. V současnosti nejhojněji využívaný způsob je pozorování tlakového rozdílu před a za výměníkem. V literatuře je uváděno, že je možné v průběhu růstu námrazy pozorovat zvýšení tlakové ztráty na odváděném proudu vzduchu. Dále je možné využít odporové senzory nebo umělou inteligenci. Problematika námrazy ve výměnících tepla ale ještě stále není zcela probádána.

Praktická část byla zaměřena na zjišťování vlastností deskového protiproudého výměníku s entalpickou membránou za suchého stavu a při vystavení námraze. Mezi cíle práce patřilo experimentální vyhodnocení průběhu vzniku námrazy, změn ve výměníku a ověření některých způsobů detekce námrazy uvedených v teoretické části na základě naměřených dat.

Vizuální metoda se dle pořízených snímků a videí prokázala jako spolehlivý způsob detekce přítomnosti namrzání. Její nevýhodou je nemožnost přesného určení začátku vzniku námrazy, protože v tu chvíli jsou vizuální změny příliš malé, aby bylo možné je detekovat okem nebo aby bylo možné poznat, že se jedná o změnu.

Předpoklad, že se bude zvyšovat tlaková diference se pro měřený výměník ukázal jako částečně mylný. Rozdíl tlaků před a za výměníkem na odváděném proudu vzduchu se sice mírně zvyšoval, ale protože se jednalo pouze o malé změny, nebylo možné určit přítomnost námrazy, dokud

nebyla již značně rozšířena a její odstranění by bylo energeticky náročné. Tato skutečnost je zřejmě způsobena způsobem ovládání ventilátoru ve vzduchotechnické jednotce, která je zdrojem odváděného vzduchu. Kvůli přesnějšímu ovládání průtoku výměníkem byl použit provoz se stálými otáčkami. Při rozšíření ledu ve výměníku se objemový průtok postupně zmenšoval z důvodu zmenšování průtočného profilu, což mimo jiné mělo vliv na změny tlakové difference. I přesto, že nebyl zachován daný objemový průtok bylo možné zvyšování tlakového rozdílu pozorovat.

Namrzání ve výměníku ZZT způsobuje i další změny. Patří mezi ně i zvětšující se rozdíly teplot a měrných vlhkostí před a za výměníkem u odváděného proudu vzduchu v čase. Teplota odpadního vzduchu  $t_{12}$  se snižuje, protože se snižuje účinnost výměníku tepla. Zvětšující se rozdíl měrných vlhkostí je způsoben kondenzací a namrzáním vodní páry obsažené ve vzduchu. S rozrůstající se námrazou se mění i hodnota teplotního poměru. Tento jev byl vyhodnocen pomocí standardizace dat nejistotou teplotního poměru. Takto je možné detekovat chvíli, kdy se hodnota teplotního poměru vymkne intervalu ohraničeném nejistotou, poté bylo možné přesně určit začátek vzniku námrazy. Tato metoda byla, pro účely zjišťování počátku námrazy, vyhodnocena jako nejspolehlivější.

V neposlední řadě byl testován vliv většího množství námrazy na vnitřní netěsnosti měřeného výměníku. Byl proveden jeden cyklus zamrznutí tak, aby dle obrazu endoskopické kamery byly všechny mezery mezi lamelami teplosměnné plochy vyplněny ledem. Výsledkem měření bylo zvýšení hmotnostního průtoku přefukujícího mezi odváděným a přiváděným vzduchem. Aby bylo možné stanovit jednoznačný závěr, bylo by potřeba provést cyklů zamrznutí více.

Namrzání ve výměníku ZZT je stále se rozvíjející téma, které může vést k dalším možnostem úspory energetických zdrojů. Pokud by byly výrobcem pro prodávané výměníky stanoveny okrajové podmínky, při kterých existuje vysoká pravděpodobnost vzniku námrazy, bylo by možné namrznutí lépe předcházet a nebylo by nutné používat metody pro odstranění ledu. Pro zefektivnění použití výměníků tepla v praxi je potřeba stále provádět další výzkum.

## 8 Bibliografie

- [1] KABELE, Karel. Úspory energie a vnitřní prostředí budov. In: *Časopis Stavebnictví* [online]. Praha: INFORMAČNÍ CENTRUM ČKAIT s.r.o., 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-uspory-energie-a-vnitri-prostredi-budov.html>
- [2] ZIKÁN, Zdeněk. Zpětné získávání tepla a větrání objektů. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2022 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/6325-zpetne-ziskavani-tepla-a-vetrani-objektu>
- [3] DRKAL, František, Miloš LAIN, Jan SCHWARZER a Vladimír ZMRHAL. *Vzduchotechnika* [online]. 1. Praha: Evropský sociální fond, 2009 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9251350-Vzduchotechnika-prof-ing-frantisek-drkal-csc-ing-milos-lain-ph-d-ing-jan-schwarzer-ph-d-ing-vladimir-zmrhal-ph-d.html>
- [4] GEBAUER, Günter, Olga RUBINOVÁ a Helena HORKÁ. *Vzduchotechnika*. 1. Brno: ERA, 2005. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-736-6027-X.
- [5] What is an air handling unit (AHU)?. In: *Air curtains specialist - Industrial ventilation* [online]. Barcelona, Španělsko: Airtècnics, 2021 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.airtecnics.com/news/what-is-an-air-handling-unit-ahu>
- [6] O'CONNOR, Dominic, John CALAUTIT a Ben HUGHES. A review of heat recovery technology for passive ventilation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **54**, 1481-1493 [cit. 2021-03-16]. ISSN 13640321. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rser.2015.10.039](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039)
- [7] SCHWARZER, Jan. Teorie vlhkého vzduchu (II): Hustota vlhkého vzduchu a entalpie. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2022 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3353-teorie-vlhkeho-vzduchu-ii>
- [8] Vlhký vzduch - stavové veličiny. In: *Katedra technických zařízení budov K11125* [online]. Praha: Katedra technických zařízení budov, 2022 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/14/vlhky-vzduch.pdf>

- [9] POSTUPA, Martin. Moderní rotační výměníky tepla. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2022 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/15795-moderni-rotacni-vymeniky-tepla>
- [10] WHAT IS SILICA GEL AND WHAT ARE THE ADVANTAGES OF IT AS A DESICCANT. In: *Bry-Air* [online]. Dillí, Indie: Bry-Air (Asia) Pvt. Ltd., 2022 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.bryair.com/news-and-events/articles/what-is-silica-gel-and-what-are-the-advantages-of-it-as-a-desiccant/>
- [11] Jakým způsobem pracuje rotační výměník tepla?. In: *Remak* [online]. Brno: REMAK a.s., 2022 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.remak.eu/cs/jakym-zpusobem-pracuje-rotacni-vymenik-tepla>
- [12] REHVA COVID-19 guidance document: How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces. In: *REHVA* [online]. Brusel, Belgie: REHVA, 2022 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: [https://www.rehva.eu/fileadmin/user\\_upload/REHVA\\_COVID-19\\_guidance\\_document\\_V4.1\\_15042021.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4.1_15042021.pdf)
- [13] MARDIANA-IDAYU, A. a S.B. RIFFAT. Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, **16**(2), 1241-1255 [cit. 2021-03-16]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2011.09.026
- [14] Rotační rekuperátory KOMFOVENT. In: *Rekuperace, vzduchotechnika, řízené větrání Rekuvent* [online]. České Budějovice: Rekuvent s.r.o., 2012 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.rekuvent.cz/aktuality/rotacni-rekuperatory-komfovent-54.html>
- [15] VENTS Reversible heat and energy recovery ventilator SOLO. In: *VENTS - manufacture of ventilation and air conditioning systems* [online]. Boyarka, Ukrajina: Vents, 2021 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://ventilation-system.com/series/reversible-heat-and-energy-recovery-ventilator-solo>
- [16] ČSN EN 305: *Výměníky tepla - Definování výkonnosti výměníků tepla a všeobecné metody zkoušek pro stanovení výkonnosti výměníků tepla*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998, 20 s. Třídící znak 696305.



- [17] LAIN, Miloš. Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (II). In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/3688-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-ii>
- [18] Tepelná trubice. In: *PowerWiki* [online]. Praha: Katedra elektroenergetiky FEL, 2008 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: [https://www.powerwiki.cz/wiki/OOEET\\_TepelnaTrubice](https://www.powerwiki.cz/wiki/OOEET_TepelnaTrubice)
- [19] Protiproudý vs. křížový výměník vzduchu. In: *Recutech - Protiproudé tepelné výměníky vzduch-vzduch* [online]. Pardubice: RECUTECH s.r.o., 2022 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.recutech.com/cs/technologie/protiproudy-vs-krizovy-vymenik/>
- [20] Hliníkový nebo plastový protiproudý výměník?. In: *Recutech - Protiproudé tepelné výměníky vzduch-vzduch* [online]. Pardubice: RECUTECH s.r.o., 2022 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.recutech.com/cs/technologie/hlinikovy-vs-plastovy-vymenik/>
- [21] Entalpický rekuperační výměník tepla EX-P 03/300. In: *RekupeX - rekuperační výměníky tepla, rekuperace vzduchu* [online]. Červený Kostelec: RekupeX, 2017 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.rekupex.cz/domu/103-entalpicky-rekuperacni-vymenik-tepla-ex-p-03300-protiproudy-teplovdusny-rekuperator-pro-rekuperace-vzduchu.html>
- [22] SIEGELE, Dietmar a Fabian OCHS. Effectiveness of a membrane enthalpy heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2019, **160** [cit. 2021-03-17]. ISSN 13594311. Dostupné z: [doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114005](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114005)
- [23] ZHANG, Li-Zhi. Heat and mass transfer in plate-fin enthalpy exchangers with different plate and fin materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2009, **52**(11-12), 2704-2713 [cit. 2021-04-26]. ISSN 00179310. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.12.014](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.12.014)
- [24] KISLIK, Vladimir S. Supported Liquid Membrane. In: *Encyclopedia of Membranes* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, s. 1-2 [cit. 2021-04-26]. ISBN 978-3-642-40872-4. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-642-40872-4\\_566-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4_566-2)
- [25] RAFATI NASR, Mohammad, Melanie FAUCHOUX, Robert BESANT a Carey SIMONSON. A review of frosting in air-to-air energy exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **30**, 538-554 [cit. 2021-03-30]. ISSN 13640321. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rser.2013.10.038](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.038)

- [26] ANISIMOV, Sergey, Andrzej JEDLIKOWSKI a Demis PANDELIDIS. Frost formation in the cross-flow plate heat exchanger for energy recovery. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2015, **90**, 201-217 [cit. 2022-04-02]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.056
- [27] RAFATI NASR, Mohammad et al. Experimental methods for detecting frosting in cross-flow air-to-air energy exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2016, **77**, 100-115 [cit. 2022-04-10]. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.04.009
- [28] LIU, Peng et al. A theoretical model to predict frosting limits in cross-flow air-to-air flat plate heat/energy exchangers. *Energy and Buildings* [online]. 2016, **110**, 404-414 [cit. 2022-04-10]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.007
- [29] KO, Jinyoung, Junseok PARK a Jae-Weon JEONG. Energy saving potential of a model-predicted frost prevention method for energy recovery ventilators. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2021, **185** [cit. 2022-05-29]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116450
- [30] SIVS - Námrazové jevy. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2021 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/sivs/namrazy.html>
- [31] BILODEAU, S., P. BROUSSEAU, M. LACROIX a Y. MERCADIER. Frost formation in rotary heat and moisture exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1999, **42**(14), 2605-2619 [cit. 2021-03-30]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/S0017-9310(98)00323-8
- [32] PHILLIPS, E. G. et al. A Model to Compare Freezing Control Strategies for Residential Air-to-Air Heat Recovery Ventilators. *ASHRAE Journal*. 1989, **95**(2), 475-483. ISSN 0001-2505. Dostupné také z: [https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_3543.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_3543.pdf)
- [33] HOLMBERG, R.B. Prediction of Condensation and Frosting Limits in Rotary Wheels for Heat Recovery in Buildings. *ASHRAE Journal*. 1993, **99**(1), 64-69. Dostupné také z: [https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_3366.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_3366.pdf)

- [34] Předehřev pro rekuperaci. In: *Luftuj.cz* [online]. Slatiňany: Luftuj s.r.o., 2022 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.luftuj.cz/clanky/predehrev-pro-rekuperaci/>
- [35] Zemní vzduchový výměník ED geoflex. In: *Elektrodesign Ventilátory s.r.o.* [online]. Praha: ELEKTRODESIGN ventilátory, 2003 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/zemni-vzduchovy-vymenik-ed-geoflex>
- [36] EL QARNIA, H., M. LACROIX a Y. MERCADIER. Use of a phase change material to prevent frosting in a compact crossflow air exchanger. *Energy Conversion and Management* [online]. 2001, **42**(10), 1277-1296 [cit. 2021-04-06]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(00)00070-4
- [37] SOUKUP, Karel. Kompaktní jednotky Topvex a regulační systém Systemair Access. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2022 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/18623-kompaktni-jednotky-topvex-a-regulacni-system-systemair-access>
- [38] AGUIAR, M.L. et al. Medium materials for improving frost detection on a resistive sensor. *Energy Reports* [online]. 2020, **6**, 263-269 [cit. 2022-04-06]. ISSN 23524847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2020.11.258
- [39] AGUIAR, Martim, Pedro Dinis GASPARGASPAR a Pedro Dinho DA SILVA. Image recognition method for frost sensing applications. *Energy Reports* [online]. 2022, **8**, 234-240 [cit. 2022-04-06]. ISSN 23524847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2022.01.049
- [40] ČSN EN 308. *Výměníky tepla - Metody zkoušek pro ověření výkonnosti zařízení pro regeneraci tepla*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998, 20 s. Třídící znak 696308.
- [41] ČSN EN 16211. *Větrání budov - Provozní měření průtoku vzduchu - Metody*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 36 s. Třídící znak 127132.
- [42] CHYSKÝ, Jaroslav a Karel HEMZAL. *Větrání a klimatizace*. 3., zcela přeprac. vyd. Brno: BOLIT-B Press, 1993. ISBN 80-901-5740-8.
- [43] SCHWARZER, Jan. Teorie vlhkého vzduchu (I): Úvod a vyjádření vlhkosti vzduchu. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3323-teorie-vlhkeho-vzduchu-i>

- [44] Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>
- [45] KLEPÁRNÍK, Jan. Škrťící orgány. In: *Jan Klepárník - WEB podpora výuky* [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2002 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn\\_prskrtici.htm](https://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_prskrtici.htm)
- [46] Standardizace dat. In: *Matematická biologie učebnice* [online]. Brno: Institut biostatistiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity, 2015 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--vicerozmerne-rozdeleni-pravdepodobnosti--transformace-dat--standardizace-dat>

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma zařízení pro zpětné získávání tepla s vyznačenými názvy jednotlivých proudů vzduchu, zdroj: archiv autora .....	8
Obrázek 2: Schéma vzduchotechnické jednotky, zeleně je označeno zařízení pro ZZT, v tomto případě deskový výměník, zdroj: [5] .....	9
Obrázek 3: Schéma rotačního výměníku s vyplachovací komorou, zdroj: [9] .....	11
Obrázek 4: Detail teplosměnné plochy rotačního výměníku, zdroj: [14] .....	11
Obrázek 5: Schématické znázornění malé větrací jednotky s přepínacím výměníkem vyráběné firmou Vents, fasádní vyústka vlevo, výměník tepla je vyznačen žlutě, vpravo ventil pro přívod a odvod vzduchu, zdroj: [15].....	12
Obrázek 6: Schématické znázornění větrání malou větrací jednotkou Vents s přepínacím výměníkem, zdroj: [15] .....	13
Obrázek 7: Schéma ZZT s kapalinovým okruhem, modře je vyznačen přiváděný čerstvý vzduchu, červeně vzduch odváděný, zdroj: [17] .....	14
Obrázek 8: Schéma tepelné trubice, zdroj: [18].....	15
Obrázek 9: Schéma protiproudého deskového výměníku s kanálky ve tvaru šestiúhelníků, zdroj: [2] .....	16
Obrázek 10: Jedna z desek protiproudého výměníku, prostřední částí proudí oba proudy vzduchu proti sobě, v okrajových částech kolmo na sebe, zdroj: [20] .....	16
Obrázek 11: Vyznačení tzv. studeného rohu na protiproudém výměníku, zdroj: [2] .....	20
Obrázek 12: Schéma měřeného výměníku tepla s vyznačenými teplotami a měřnými vlhkostmi potřebnými pro výpočet teplotního a vlhkostního poměru, zdroj: archiv autora .....	25
Obrázek 13: Umístění bodů v průřezu potrubí, zdroj: [41] .....	26
Obrázek 14: Vzduchotechnické jednotky v laboratoři vzduchotechniky, zdroj: archiv autora...	27
Obrázek 15: Softwarové rozhraní Mervis, zdroj: archiv autora, SW Mervis.....	28
Obrázek 16: 3D model redukce, zdroj: archiv autora, SW SolidWorks .....	28
Obrázek 17: Měřený výměník tepla s instalovanými vytištěnými redukcemi, zdroj: archiv autora .....	29
Obrázek 18: Schéma zapojení výměníku tepla pro zjišťování teplotních a vlhkostních poměrů, zdroj: archiv autora .....	32
Obrázek 19: Měřený výměník tepla napojený na testovací linku, zdroj: archiv autora.....	33
Obrázek 20: Detail zapojení měřeného výměníku tepla, zdroj: archiv autora .....	33
Obrázek 21: Schéma měření vnitřních netěsností výměníku tepla, zdroj: archiv autora .....	40

Obrázek 22: Použitý ventilátor pro měření vnitřních netěsností výměníku tepla, zdroj: archiv autora .....	41
Obrázek 23: Membránový plynoměr použitý pro měření vnitřních netěsností výměníku tepla, zdroj: archiv autora .....	41
Obrázek 24: V červeném kroužku je vyznačeno předpokládané místo vzniku první námrazy, která se bude šířit ve výměníku až k místu označenému oranžovým kroužkem. E1 = čerstvý vzduch, E2 = přiváděný vzduch, I1 = odváděný vzduch, I2 = odpadní vzduch. Zdroj: archiv autora.....	42
Obrázek 25: Detail otvoru pro odvod kondenzátu, zdroj: archiv autora .....	43
Obrázek 26: Schéma měření námrazy na výměníku ZZT, zdroj: archiv autora .....	44
Obrázek 27: Použitý endoskop pro vizuální sledování stavu výměníku tepla, zdroj: archiv autora .....	44
Obrázek 28: Snímače diferenčního tlaku s připojenými hadičkami, zdroj: archiv autora.....	44
Obrázek 29: V H-X diagramu jsou vyznačeny měřené teplotní stavy. Modře jsou vyznačeny stavy, kdy na výměníku vznikala námraza, červeně stavy, kdy námraza pozorována nebyla. Přítomnost ledu byla zjišťována vizuálně za pomoci endoskopické kamery. Zdroj diagramu: [3] .....	45
Obrázek 30: V H-X diagramu jsou vyznačeny tepelně-vlhkostní stavy a jejich změny při průchodu výměníkem. Body 1-4 představují stav pro výpočet tepelného poměru dle normy. Body 5-8 jsou tepelné a vlhkostní stavy pro měření Z5 ve chvíli, kdy se na výměníku nachází námraza. Zdroj: [3] .....	46
Obrázek 31: Vlevo: počáteční stavy výměníku, vpravo: viditelné první známky vzniku námrazy – šipkou je označeno odražející se světlo endoskopické sondy od zkondenzované nebo namrzlé vody, zdroj: archiv autora .....	49
Obrázek 32: Detail lamel výměníku na výstupu odpadního vzduchu I2 s krystalky ledu, zdroj: archiv autora .....	49
Obrázek 33: Námraza na vstupu odváděného proudu I1 do výměníku, která se rozšířila v průběhu měření od výstupu I2. Zdroj: archiv autora.....	49
Obrázek 34: Stav výměníku vzduchu snímáný endoskopickou kamerou, vlevo se nachází stav v 14:00, vpravo poté stav ve 14:25. Na pravém obrázku je viditelný růst námrazy – vyznačeno oranžovou šipkou. Rovněž je možné pozorovat odlesky světla kamery od vzniklého kapalného nebo případně již zmrzlého kondenzátu – zelená šipka. ....	58
Obrázek 35: Označení umístění senzoru teploty, zdroj: archiv autora .....	58
Obrázek 36: Průběh zamrzání měřeného výměníku tepla. Vlevo: počáteční stav, uprostřed: stav po 15 minutách, vpravo: konečný stav. Zdroj: archiv autora.....	61

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Naměřené hodnoty teplot vzduchu .....	29
Tabulka 2: Rovnice proložené přímkou pro měření teploty.....	30
Tabulka 3: Naměřené hodnoty relativních vlhkostí vzduchu.....	31
Tabulka 4: Rovnice proložené přímkou pro měření relativní vlhkosti.....	31
Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro výpočet – měření S1 .....	35
Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření S1 a S2, provoz dle objemového průtoku .....	36
Tabulka 7: Porovnání dvou měření při provozu dle objemového a hmotnostního průtoku .....	37
Tabulka 8: Naměřené a vypočtené hodnoty pro průtoky 35 m <sup>3</sup> /h, provoz dle objemového průtoku.....	38
Tabulka 9: Shrnutí vlastností pro všechny měřené stavy výměníku pro provoz dle objemového průtoku.....	38
Tabulka 10: Naměřené hodnoty a výpočet vnitřních netěsností.....	40
Tabulka 11: Naměřené hodnoty pro měření S1 a Z5 .....	47
Tabulka 12: Shrnutí všech měřených stavů odváděného vzduchu .....	48
Tabulka 13: Zaznamenané hodnoty hmotností a výpočet produkce námrazy.....	55
Tabulka 14: Naměřené hodnoty pro měření Z3 a vypočtený teplotní poměr včetně nejistoty. 56	
Tabulka 15: Naměřené hodnoty pro měření N1 .....	60
Tabulka 16: Naměřené hodnoty a výpočet vnitřních netěsností.....	61
Tabulka 17: Shrnutí výsledků měření vnitřních netěsností před a po plném zamrznutí. ....	61

## 11 Seznam grafů

Graf 1: Graf naměřených teplot vzduchu pro zkoušený senzor č. 0 .....	30
Graf 2: Graf naměřených relativních vlhkostí pro zkoušený senzor č. 0.....	31
Graf 3: Závislost teplotního poměru měřeného výměníku tepla na objemovém průtoku.....	39
Graf 4: Průběh tlakových diferencí a rychlostí proudění vzduchu obou proudů ve výměníku v čase.....	51
Graf 5: Porovnání změn tlakové difference pro měření Z1, Z3 a Z4. ....	51
Graf 6: Průběhy jednotlivých teplot na vstupech a výstupech výměníku pro měření Z3 v čase.	52
Graf 7: Průběh teplotních rozdílů odváděného a čerstvého vzduchu před a za výměníkem v čase. ....	53
Graf 8: Průběh vlhkostních rozdílů odváděného a čerstvého vzduchu před a za výměníkem v čase.....	54
Graf 9: Průběh vlhkostních rozdílů odváděného a čerstvého vzduchu před a za výměníkem v čase.....	55
Graf 10: Průběh okamžitého teplotního poměru v čase, měření Z3.....	56
Graf 11: Průběh standardizovaného okamžitého teplotního poměru v čase, oranžově je vyznačena hranice, kdy je překročen interval ohraničený nejistotou .....	57
Graf 12: Zázornění průběhu teplot po šířce redukce u proudu I2 pro měření Z8 .....	59
Graf 13: Zázornění průběhu teplot po šířce redukce u proudu E2 pro měření Z8.....	59
Graf 14: Průběhy jednotlivých teplot na vstupech a výstupech výměníku pro měření N1 v čase. ....	60



## 12 Seznam příloh

Příloha 1: Stanovení nejistot

Příloha 2: Naměřené hodnoty

Příloha 3: Video – průběh námrazy pro měření N1

Příloha 4: Naměřené hodnoty pro měření Z1

Příloha 5: Naměřené hodnoty pro měření Z2

Příloha 6: Naměřené hodnoty pro měření Z3

Příloha 7: Naměřené hodnoty pro měření Z4

Příloha 8: Naměřené hodnoty pro měření Z5

Příloha 9: Naměřené hodnoty pro měření Z6

Příloha 10: Naměřené hodnoty pro měření Z7

Příloha 11: Naměřené hodnoty pro měření Z8

Příloha 12: Naměřené hodnoty pro měření N1