

# **Výzkum aerodynamických parametru vybraných prvku vzduchotechnických systému**

Ing. Stanislav Sehnálek, Ph.D.

Teze disertační práce



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta aplikované informatiky

Teze dizertační práce

### Výzkum aerodynamických parametrů vybraných prvků vzduchotechnických systémů

Investigation of aerodynamic parameters of specialized  
duct systems

Autor: **Ing. Stanislav Sehnálek, Ph.D.**  
Studijní program: Inženýrská informatika (P3902)  
Studijní obor: Automatické řízení a informatika (3902V037)  
Školitel: prof. Ing. Roman Prokop, CSc.  
Oponenti: prof. RNDr. Milan Malcho, PhD.  
prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

Zlín, listopad 2020

© Stanislav Sehnálek

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary** v roce 2020.

Klíčová slova: *rekuperace, rekuperační výměník, proudění vzduchu, CFD, vizualizace proudění vzduchu, tlaková ztráta, snímač diferenčního tlaku*

Key words: *heat recovery, heat recovery exchangers, fluid flow, CFD, particle image velocimetry, pressure loss, pressure differential devices*

Plná verze dizertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-968-7

# ABSTRAKT

Tyto teze disertační práce se zabývají řešením proudění vzduchu a tlakovou ztrátou speciálních prvků na nově vybudované trati pro měření deskových rekuperačních výměníků. V úvodu je nastíněn způsob měření rekuperačních výměníků, parametry výměníků a podmínky měření. Důraz je kladen především na měřicí box pro výměníky. Je popsáno měření tlakové ztráty v různých konfiguracích tohoto boxu. Mezi dalším je popsáno provedené vizualizace proudění, které je porovnáno s numerickou simulací. Na základě těchto poznatků je navrhnout nový optimální box. Jsou nastíněny možnosti pro snížení tlakové ztráty nového boxu v podobě úprav vnitřních částí, na základě teoretických výpočtů a numerických simulací jsou realizovány zmíněné úpravy. V závěru práce je popsána validace trati komparačním měřením s certifikovanou laboratoří.

# ABSTRACT

This dissertation thesis summary deals with fluid flow, and pressure loss of particular types of equipment at the newly build tract for measuring heat recovery exchangers. At the beginning of this work is summarised form of measuring heat recovery exchangers, parameters of heat recovery exchangers and conditions of measurements. Particular emphasis is on measuring box in which are exchangers measured. The measurement of pressure loss in various configurations of this box is described. Among other things, the performed visualization of the flow is described, which is compared with the numerical simulation. Based on this knowledge, a new optimal box is designed. The possibilities for reducing the pressure loss of the new box in the form of modifications of the internal parts are outlined, on the basis of theoretical calculations and numerical simulations, the mentioned modifications are realized. Description of comparative measurement with a certified laboratory is at the end of this thesis.

# OBSAH

1	ÚVOD	4
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
2.1	Způsob měření energetických a hydraulických parametrů rekuperátorů	5
2.1.1	<i>Podmínky měření</i>	5
3	CÍL PRÁCE	6
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	7
4.1	Východiska pro návrh trati	7
4.1.1	<i>Parametry zkušební trati</i>	7
4.2	Zdrojová část zkušební trati	8
5	Hlavní výsledky práce	9
5.1	Komparační měření snímačů diferenčního tlaku	9
5.2	Návrh trati pro měření rekuperačních výměníků	11
5.3	Rekuperační box	13
5.3.1	<i>Výpočet tlakových ztrát rekuperačního boxu</i>	14
5.3.2	<i>Numerická simulace rekuperačního boxu</i>	17
5.3.3	<i>Vizualizace proudění v rekuperačním boxu</i>	19
5.3.4	<i>Návrh nového rekuperačního boxu</i>	20
5.4	Ověřovací měření a vyhodnocení měření účinnosti DRV	24
6	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	26
7	ZÁVĚR	27
	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	28
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	30
	SEZNAM OBRÁZKŮ	34
	SEZNAM TABULEK	34
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	34
	ŽIVOTOPIS	36

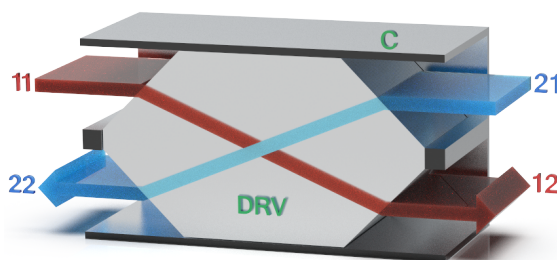
# 1 ÚVOD

Bez ohledu na aktuální hospodářské problémy některých států EU je všeobecně zřejmá trvalá snaha jednotlivých zemí o snižování spotřeby energie, a to jak ve formě přímé spotřeby provozní energie, tak i energie vložené do výroby a likvidace staveb a zařízení. Dle závěrů konference COP 21, která se uskutečnila v roce 2015 v Paříži je téměř 50 % konečné spotřeby energie v EU využíváno na vytápění a chlazení a z toho 80% v budovách. Dlouhodobou strategií v této oblasti je zajistit v jednotlivých zemích co nejnižší energetickou závislost budov, pokud možno s výrobou energie v místě spotřeby, s důrazem na komplexnost řešení úsporných opatření při zachování kvalitního vnitřního prostředí, tedy mimo jiné, vizuálního a tepelného komfortu. K tomuto problému byla vydána SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018 [1], kterou se mění směrnice 2010/31/EU o energetické náročnosti budov a směrnice 2012/27/EU o energetické účinnosti. Záměr reaguje na 3. směrnici 2018/844/EU o energetické náročnosti budov, která požaduje další omezení spotřeby celkové (primární) energie v technických systémech budov. Důraz je kladen na komplexnost úsporných opatření, která se nesmí omezit pouze na izolační parametry obvodového pláště budovy, ale na všechny relevantní prvky a technické systémy a snížit jak spotřebu energie, tak i zvýšit vizuální a tepelný komfort vnitřního prostředí, a to jak u nových, tak i existujících budov. V naší legislativě se tyto požadavky odráží v zákoně č. 406/2000 Sb. o hospodaření s energií ve znění pozdějších změn a předpisů. Uvedený zákon vyžaduje, aby od roku 2020 byly všechny nové budovy vlastněné státem v režimu NZEB (budovy s téměř nulovou spotřebou energie). Očekává se, že všechny vzduchotechnické systémy budou opatřeny vzduchovými rekuperátory a dále, že bude postupně snižována také spotřeba energie na osvětlení a chlazení budov. V souladu s požadavky na využití rekuperátorů energie při nuceném větrání se zvýšila výroba vzduchových rekuperátorů a v této souvislosti i potřeba jejich certifikace a tedy i na měření jejich parametrů. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k rozšíření laboratoře techniky prostředí o měřicí trať na měření na vzorcích rekuperátorů, jak z hlediska výrobních zkoušek, tak i zkoušek požadovaných pro certifikaci výrobků.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Způsob měření energetických a hydraulických parametrů rekuperátorů

Účelem měření parametrů rekuperačního výměníku (DRV) je stanovit jeho základní energetický parametr a to je především jeho účinnost. Energetická účinnost je definovaná a její stanovení je uvedeno v normě ČSN EN 308 [12]. Při definici účinnosti výměníku je vycházeno ze schéma, které je uvedeno na obrázku 2.1.



*Obr. 2.1 Schéma deskového rekuperačního výměníku s boxem*

Na obrázku 2.1 značí čísla 11 - Vstup odváděného vzduchu, 12 - Výstup odváděného vzduchu z výměníku, 21 - Vstup přiváděného vzduchu do výměníku (například z vnějšího prostředí), 22 - Výstup přiváděného vzduchu z výměníku, DRV – deskový rekuperační výměník a C – Měřicí box.

#### 2.1.1 Podmínky měření

Standardní podmínky měření vycházejí z ČSN EN 308 [12], kde výměníky jsou podle požadavků na ně kladených rozděleny do kategorií. Členění je u standardní zimní podmínky na dvě povinné, tři volitelné a pro chladné klima na jednu volitelnou. Letní podmínky jsou členěny na čtyři volitelné. Měření musí probíhat při ustáleném stavu (teplotním, vlhkostním a průtoku). Nicméně zkušební zařízení je koncipováno tak, aby bylo možné provádět vývojové práce při konstrukcích výměníků a je tedy více univerzální než požaduje norma.

### 3 CÍL PRÁCE

Tato disertační práce se zabývá návrhem nové rekuperační tratě. V rámci tohoto návrhu je řešen způsob měření potřebných veličin jako jsou teplota, vlhkost a průtok vzdušiny. Důraz je kladen především na měření průtoku pomocí snímačů diferenčního tlaku a správné zabudování do této trati. V rámci této práce byla provedena realizace navržených řešení a ověření komparačním měřením. Dále byla vybrána problematika proudění vzdušiny v rekuperačním boxu pro bližší zkoumání a na základě poznatků byl navrhnout nový rekuperační box s lepšími aerodynamickými parametry, což vede na snížení tlakové ztráty celé tratě. Původní rekuperační box je měřen v několika variantách vnitřního uspořádání na tlakovou ztrátu. Tyto varianty jsou také podrobeny vizualizaci proudění za pomoci heliových bublin. Je vytvořena numerická simulace pro komparaci s měřením. Na základě těchto poznatků je vytvořen nový rekuperační box, který je validován měřením tlakové ztráty. Dále jsou na něm simulována další možná zlepšení proudění vzduchu k dosažení optimálního proudového pole na vstupech a výstupech z něj, která jsou důležitá pro správné měření teploty a vlhkosti vzdušiny protékající deskovým rekuperačním výměníkem. V této práci je i okrajově zmíněn návrh SCADA řešení pro ovládání a vyhodnocování měření na rekuperační trati.



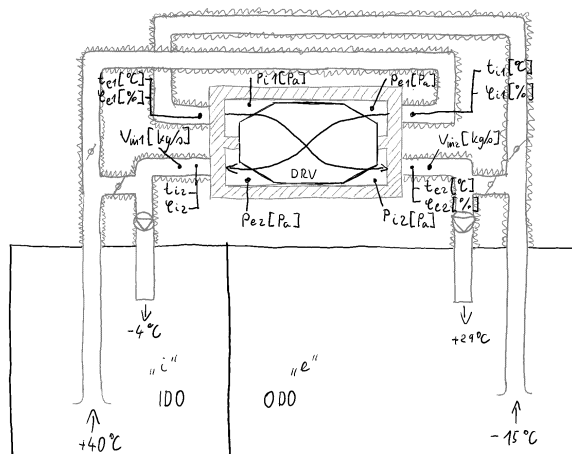
## 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Zvolené metody zpracování popisují jednotlivé potřebné prvky pro měření rekuperačních výměníků. Dále popisují problematiku zabudování snímačů diferenčního tlaku do potrubní sítě. Je popsáno zabudování rekuperačního výměníku do měřicího boxu

### 4.1 Východiska pro návrh trati

#### 4.1.1 Parametry zkušební trati

Návrh trati vychází z normativních požadavků na měření na vzorcích rekuperačních deskových výměníků a požadavků na možnost měření parametrů rekuperačních výměníků při vývojových a výzkumných činnostech. Z tohoto rozboru, rozboru prostorových limitů v LTP, také s ohledem na požadavky na měření průtoku vzduchu a předpokládaného rozsahu výkonových parametrů výměníků, byly stanoveny výchozí parametry návrhu trati. Předpokládané parametry vzduchových průtoků jsou  $50\text{m}^3\text{h}^{-1}$  do  $4\,000\text{m}^3\text{h}^{-1}$  při maximální tlakové ztrátě 2kPa v teplotních rozsazích externích teplot  $-35^\circ\text{C}$  do  $+40^\circ\text{C}$  při relativní vlhkosti vnitřního vzduchu 28% až 65%. Základní zdroje vzduchu o potřebných parametrech jsou prostory kompenzované kalorimetrické komory (KK), ze kterých se vzduch dodává a také vrací. Předmětný výměník je při měření umístěn v měřicí skříni (boxu). Samotné řešení boxu má významný vliv na tlakové ztráty trati. V průběhu řešení byla provedena série úprav boxu nutných pro optimalizaci proudových poměrů, pro minimalizaci tlakové ztráty a umístění teplotních a tlakových čidel. Provedený rozbor je základem návrhu tratě zahrnující dvě rozměrová řešení měření průtoků a z toho vyplývající také prostorová vymezení průchodů pro přívody upraveného vzduchu a následné průchody pro vracení vzdušiny do prostor KK. Součástí návrhu řešení a realizace jsou potřebné úpravy stropní konstrukce kalorimetrické komory, na které je trať umístěna. Základní schéma a princip měření je uveden na obrázku 4.1



Obr. 4.1 Základní schéma a princip měření

## 4.2 Zdrojová část zkušební trati

Jako zdrojová část zkušební trati je určena existující kombinovaná kompenzovaná kalorimetrická komora, která je koncipována jako univerzální, víceúčelová, s primárním využitím pro zkoušení energetických a akustických parametrů chladicích jednotek, split systémů, tepelných čerpadel a vybraných vytápěcích prvků. Kompenzovaná kalorimetrická komora je tedy určena jako zdroj upraveného vzduchu pro obě části rekuperátoru. Kompenzovaná kalorimetrická komora je dělena na 2 části s odlišnými klimatickými prostředími označené jako část OUTDOOR (ODO) a INDOOR (IDO) a je umístěna v klimatizované hale Laboratoře techniky prostředí opatřené ručním 5t pojízdočným jeřábem k přemísťování vzorků zařízení laboratoře a flexibilních částí komory umožňujících přestavby dělicí příčky a vestaveb dle typu prováděných zkoušek. Pro udržování parametrů v kompenzačních prostorech byly zhotoveny 2 speciální klimatizační jednotky ve venkovním provedení se zesílenou izolací, se speciálními dělenými výměníky, speciálními výparníky, el. ohřivači se spojitou regulací a ventilátory s EC motory. V kompenzačních prostorech musí být udržovány stejné parametry teplot jako v příslušných zkušebních prostorech. V komoře IDO je možnost udržování teploty vzduchu v rozmezí  $+5^{\circ}\text{C}$  až  $+40^{\circ}\text{C}$ , v komoře ODO je možnost udržovat teploty vzduchu v rozsahu  $-25^{\circ}\text{C}$  až  $+40^{\circ}\text{C}$

# 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

## 5.1 Komparační měření snímačů diferenčního tlaku

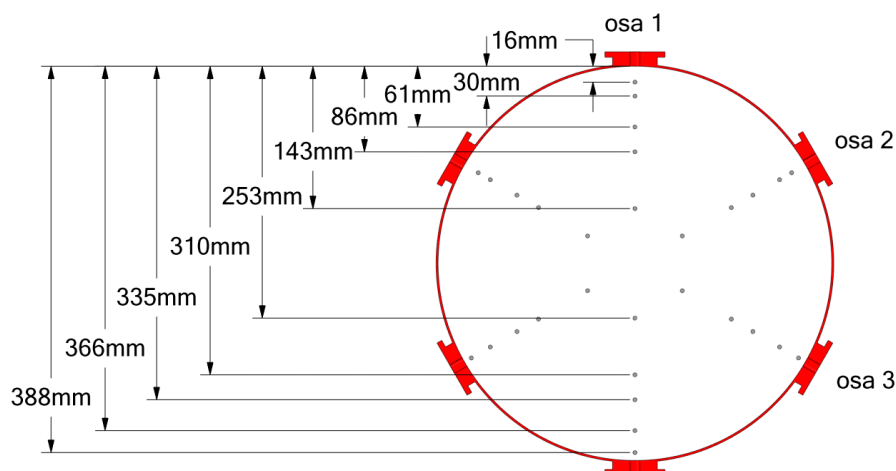
V této kapitole je popsáno komparační měření mezi clonou, MDK a traverzací Prandtlovou trubicí. Toto měření bylo provedeno z důvodu ověření výpočetních postupů aplikovaných do programu Excel.

Při použití Prandlovy trubice je nutná traverzace v několika bodech pro určení průměrné rychlosti proudící vzdušiny. Pro získání průtoku vzdušiny musí být průměrná rychlost vynásobena plochou potrubí. K určení bodů měření se používají převážně tři postupy, které poskytují identické výsledky, tyto postupy jsou metoda stejnoplochých mezikruží, metoda log-Tchebycheff a metoda log-Linear. První dvě zmíněné metody se používají převážně ve Spojených státech amerických a poslední zmíněna v evropských zemích. V tabulce 5.1 je porovnání určení bodů těchto tří metod pro 10 bodů v jedné ose měření, které se násobí průměrem potrubí. [4]

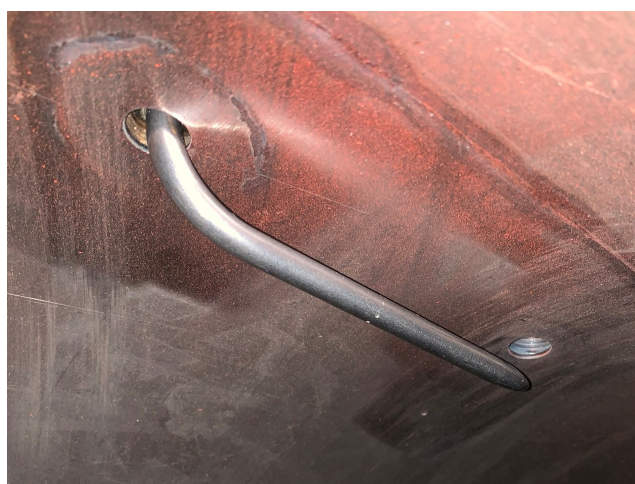
Tab. 5.1 Porovnání traverzovacích metod pro 10 bodů měření

	stejnoploché mezikruží	log-Tchebycheff	log-Linear
1	0.026	0.019	0.019
2	0.082	0.076	0.076
3	0.146	0.155	0.153
4	0.226	0.205	0.217
5	0.342	0.357	0.361
6	0.658	0.643	0.639
7	0.774	0.795	0.783
8	0.854	0.845	0.847
9	0.918	0.924	0.923
10	0.974	0.981	0.981

Pro měření prandlovou trubicí bylo použito speciální potrubí DN400, které disponuje 6 otvory se závitem pro umístění a polohování Prandlovy trubice. Na obrázku 5.1 jsou zobrazeny jednotlivé vzdálenosti pro umístění středu Prandlovy trubice od okraje vnitřního potrubí DN400. První bod není zcela ve správné poloze což je způsobeno zakřivením Prandlovy sondy a velikostí otvoru pro vložení, posun oproti standardu je 8mm. Na obrázku 5.2 je detail důvodu zmíněné odchylky. Řešením by bylo traverzování ve všech osách vždy



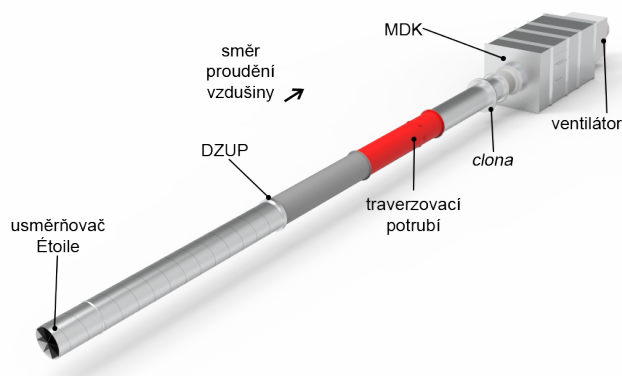
*Obr. 5.1 Schéma traverzovacích bodů*



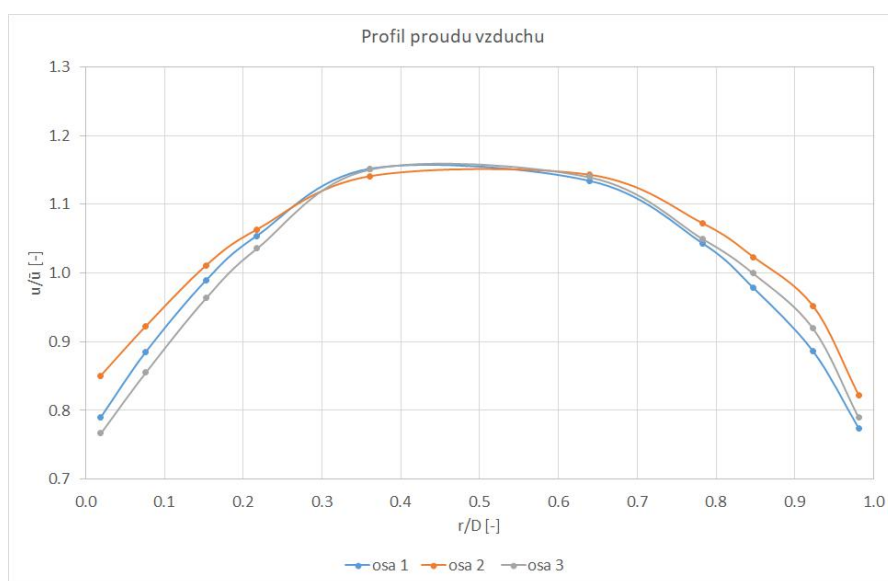
*Obr. 5.2 Detail odchylky prvního bodu při traverzaci*

jen od středu ke vzdálenému okraji, tento způsob ovšem nebyl možný vzhledem k prostorovým dispozicím a umístěním tratě. Na obrázku 5.2 je také vidět otvor u čela trubice, který slouží pro jímku k měření teploty, ovšem vzhledem ke své poloze by otvor mohl způsobovat nežádoucí rušení. Těchto otvorů je také 6 a pro zmíněné měření byly zalepeny hliníkovou páskou a teplota dopravované vzdušiny byla měřena na v hodnějším místě.

Složení trati pro komparační měření v rozměru DN400 je zobrazeno na obrázku 5.3. Na nasávací straně je umístěn autorem této práce zhotovený usměrňovač Étoile ve SPIRO potrubí o délce 0,6m, následně ustalovací SPIRO potrubí o délce 3m, na které navazuje DZUP, potrubí z plechu, potrubí pro traverzaci Prandlovou sondou, potrubí s clonou, pružné napojení, MDK a měřicí trať je zakončena ventilátorem. Měření probíhalo na straně podtlaku a bylo provedeno pro nastavení ventilátoru od 5% výkonu po 85% výkonu. Multidý-



Obr. 5.3 Schéma zapojení při komparačním měření

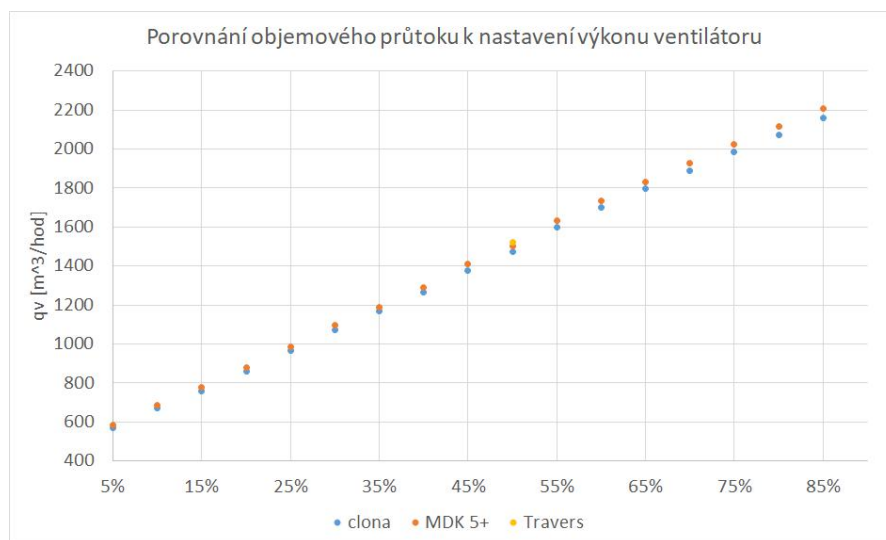


Obr. 5.4 Profil proudu vzduchu v osách měření

zová komora měla pro měření zaslepeny čtyři otvory, kdy otevřené dýzy tvořily kříž. Vzhledem k pracnosti a časové náročnosti traverzování Prandtlovou trubicí bylo provedeno měření jen pro jednu hodnotu nastavení ventilátoru a to 50%. Profil proudu vzdušiny je zobrazen v grafu 5.4. Z grafu 5.5 je patrná odchylka MDK od clony se zvyšující se rychlostí, maximální rozdíl činí 1% a je způsoben zaslepením čtyř dýz, kdy pro větší průtoky je potřebné mít je otevřeny.

## 5.2 Návrh trati pro měření rekuperačních výměníků

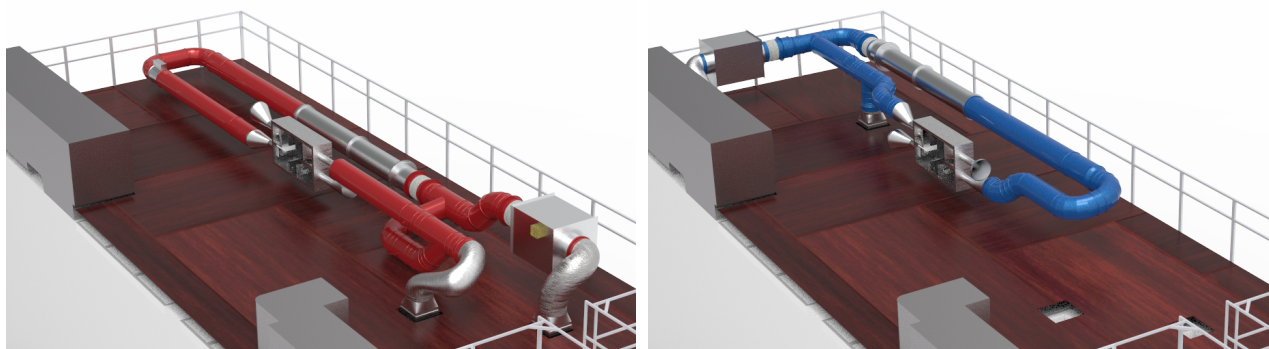
Při návrhu trati bylo vycházeno z parametrů a poznatků popsanych v kapitolách 4.1.1 a 4.2. Na začátku řešení byla úvaha umístit měření do vnitřních prostor KK, to by ovšem kladlo nároky na demontovatelnost tratě při po-



Obr. 5.5 Komparace objemového průtoku mezi clonou a MDK

třebě měření jiných zařízení, jako například tepelných čerpadel či stropních trámů. Proto se přistoupilo k řešení vybudovat trať na střeše KK. Tato varianta by tak využila nevyužívaný prostor v laboratoři, trať zde bude na stálo a bude umožněno případně napojení i na ventilační jednotky a další prvky větracích systémů. Prvním krokem tedy bylo navrhnutí pochůzná konstrukce se zábradlím, která by měla požadovanou nosnost. Možné zatížení se odvíjelo od konstrukčního řešení KK a v prvních fázích návrhu se zvažovalo vytvoření samonosné konstrukce na celou komorou. Od tohoto řešení se upustilo a byla vybrána varianta, kdy budou přes celou délku KK nosníky, které budou zatěžovat komoru v místech kolmých stěn. Výroba pochůzná plochy byla zadána externí firmě, která budovala původní KK. Následné práce spojené s budováním tratě byly již pouze v režii pracovníků laboratoře. Společně s konstrukcí bylo nutné opatřit KK průchody pro vzduchotechnické potrubí.

Pro potrubní část rekuperační trati se uvažovalo s navržením speciálních potrubních dílů a tvarovek. To by ovšem kladlo značné finanční náklady na realizaci, a proto se přistoupilo k použití SPIRO potrubí a přidružených tvarovek. Vzhledem k dostupným rozměrovým řadám SPIRO, omezené ploše pro umístění a požadavkům na průtoky byla vybrána rozměrová řada DN355 a DN400. Trať byla navržena jako podtlaková, tedy ventilátory byly umístěny před otvory pro vstup do komor. Množství protékající vzdušiny je regulovatelné pomocí těsných klapek případně nastavením výkonu ventilátoru. Následně byl umístěn měřící box do středu užité plochy a na něj navazující potrubí, první



(a) Část IDO

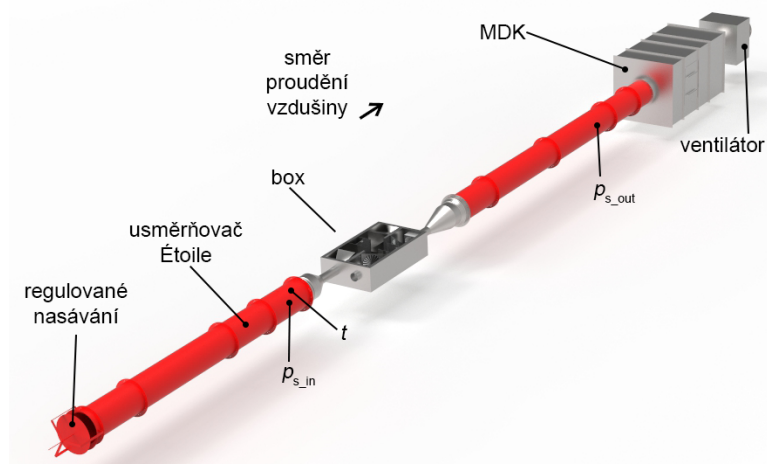
(b) Část ODO

Obr. 5.6 Vizualizace návrhu rekuperační trati

se navrhl okruh pro přívod a odvod technologie IDO, vizualizace tohoto okruhu je na obrázku 5.6a. U tohoto okruhu bylo použito napojení prostupů do komory pomocí izolované hadice. Od průchodu z KK je tedy flexi potrubí na které navazuje rozdělení k boxu nebo obtoku. Za boxem je umístěn elektrický ohřev pro zvýšení teploty nad rosný bod, aby nedocházelo ke kondenzaci na měřící cloně. Následovalo umístění okruhu pro přívod a odvod technologie ODO, kde je schéma potrubí na obrázku 5.6b. Zde je přívod z komory napojen tvarovkou T na kterou navazují klapky a přívod do boxu případně obtok. Návrh byl koncipován jako konfigurovatelný pro možnost napojení jak boxu pro bytové DRV, tak pro větší výměníky. Do budoucna je možné napojení na měřící trať celou rekuperační jednotku, tak i box pro měření rotačních regeneračních výměníků. Při potřebě měření nižších průtoků vzduchu je možná výměna měřícího úseku DN400 se clonami za potrubí DN200 s příslušnou clonou a ustalovacími dílky.

### 5.3 Rekuperační box

V této kapitole bude popsáno měření tlakové ztráty boxu pro měření DRV. Měření tlakové ztráty boxu bylo provedeno pro různé konfigurace vnitřní části, box je vždy brán jako celek i s asymetrickými kónickými přechody. Pro měření tlakové ztráty byl box přimontován na ventilátorovou trať. Schéma konfigurace měřící trati je na obrázku 5.7, měření probíhalo na straně podtlaku, za nasáváním do potrubí byl umístěn usměrňovač proudění Étoile, na který navazuje odběr statického tlaku a teplota vzdušiny, měřený vzorek za kterým je rovné ustalovací potrubí a odběr statického tlaku, následně multidýzová ko-



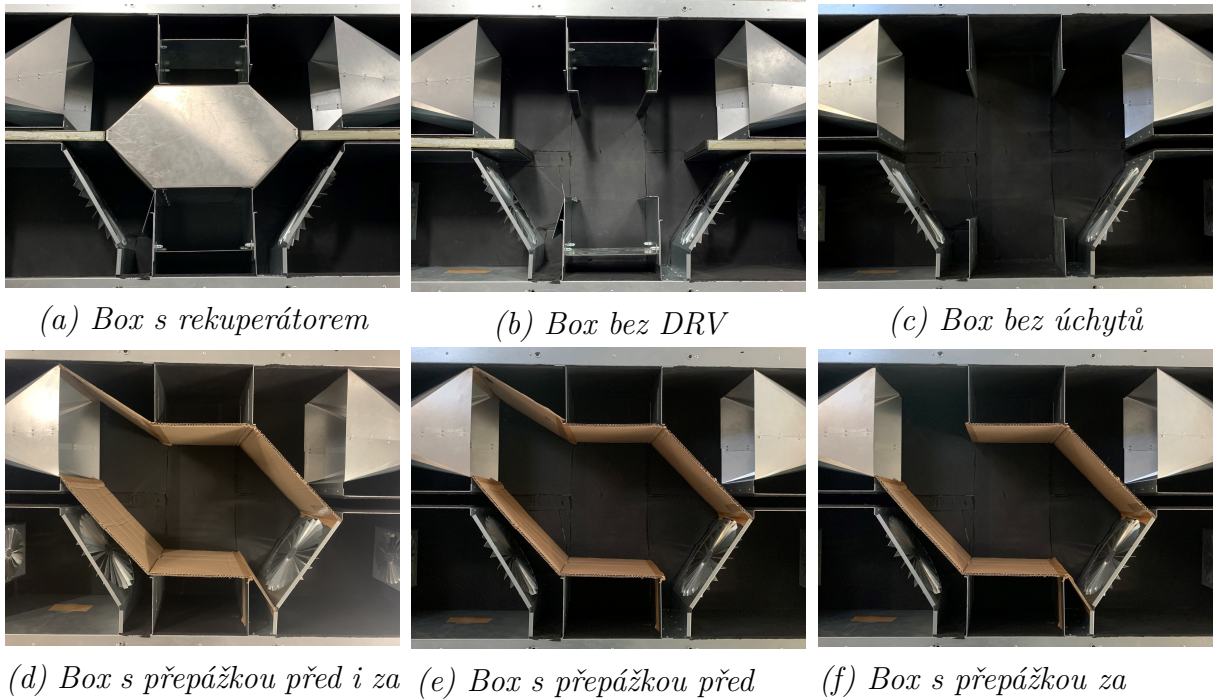
Obr. 5.7 Schéma zapojení při měření tlakové ztráty

mora a ventilátor. Měření tlakové ztráty boxu bylo provedeno na jedné větvi, kdy druhá větev byla zaslepena. První byl box změřen standardně osázeným deskovým rekuperačním výměníkem, v dalších krocích byl box měřen bez rekuperačního výměníku a následně pak za použití přepážek z kartonu jako imitace prostorové dispozice rekuperačního výměníku. U přepážky bylo použito několik variant umístění. Například v problematické části u vstupu, kde jde vzduch rozšířením z kruhového průměru  $\varnothing 120\text{mm}$  do hranatého  $296\text{mm} \times 300\text{mm}$  a následně zúžení vstupu do rekuperátoru. Příklady těchto variant jsou zobrazeny na obrázku 5.8. Výsledky z měření jsou zobrazeny v grafu 5.9.

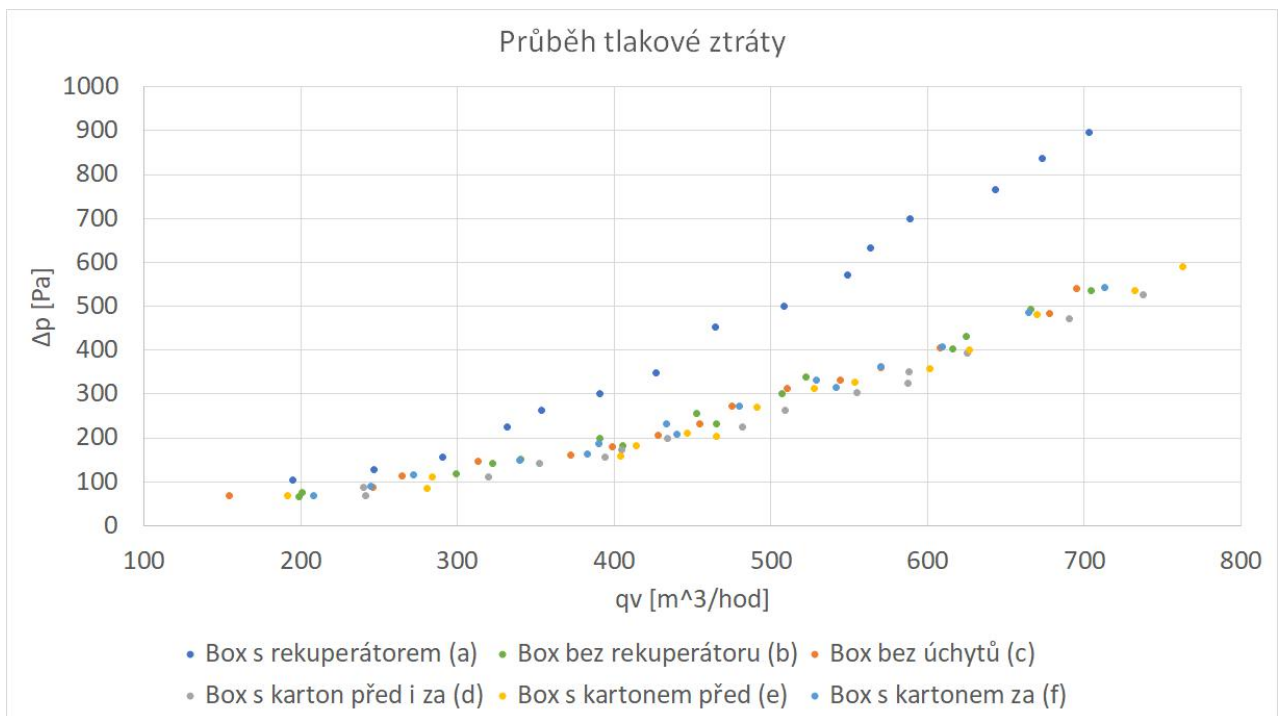
### 5.3.1 Výpočet tlakových ztrát rekuperačního boxu

Pro výpočet tlakové ztráty samotného boxu neexistují žádná validní data, je ovšem možné rozdělit box na jednotlivé sekce a na ty aplikovat postupy zmíněné dále. Pro výpočet tlakových ztrát jednotlivých tvarovek lze použít příručka Tlakové ztráty od Idelchika [6], ve které je obsaženo nepřehledné množství dat z experimentů, které jsou vyhodnoceny do grafů, tabulek a vzorců pro nalezení konkrétního součinitele místní tlakové ztráty hledané tvarovky. Podobná databáze tvarovek je obsažena i v ASHRAE Handbook: Fundamentals [3]. Dalším zdrojem může být příručka Recknagel-Sprenger [2], ovšem ani jedna není tak obsáhlá jako první uvedená příručka. Přestože tyto příručky pokrývají nepřehledné množství tvarovek, postrádají informace pro zjištění součinitele tlakové ztráty u nesymetrických přechodů, které jsou použity pro napojení rekuperačního boxu na měřicí trať. Tato problematika je řešena převážně pro





Obr. 5.8 Varianty při měření tlakové ztráty



Obr. 5.9 Porovnání tlakové ztráty na objemovém průtoku vzduchu pro jednotlivé varianty úprav

ploché difuzory a za pomoci numerických simulací metodou velkých vírů, jako příklad práce Tang a kolektiv [13], Noui-Mehidi a kolektiv [10], Elbalsohi a kolektiv [5]. Přesto neexistují data pro výpočet místní tlakové ztráty pro kruhový asymetrický difuzor. Pro případ dvou asymetrických přechodů z DN355 na DN120 a zpět na DN355 vychází z dat měření  $\xi = 1.41$ , což bylo validováno numerickou simulací. Ovšem tuto hodnotu nelze dělit dvěma, protože vzdušina se chová jinak při zúžení a následně jinak při rozšíření, což způsobuje rozdílné tlakové ztráty jednotlivých kusů. Pokud budeme uvažovat, že přechod je osově symetrický vychází z příručky  $\xi = 0.593$ , pro difuzor a pro konfuzor nejsou dostupná data. Pro zjištění tlakové ztráty nesymetrických kónických přechodů je tedy zapotřebí provést experimentální měření.

U samotného boxu je za vstupem do něj rozšíření z kruhového DN120 do obdélníkového tvaru o rozměrech  $a = 291\text{mm}$ ,  $b = 300\text{mm}$  a délce přechodu  $l = 300\text{mm}$ . Zde lze vypočítat úhel rozšíření  $\alpha$  z rovnice 5.1 a následně lze v příručce Idelchika najít součinitel tlakové ztráty pro daný poměr stran, úhel přechodu a Reynoldsova číslo. V konkrétním řešeném případě tak součinitel místní tlakové ztráty vychází  $\xi = 0.23$ , což vede na tlakovou ztrátu  $\Delta p = 14\text{Pa}$ . U tohoto přechodu by také šlo uvažovat jako o náhlém rozšíření za předpokladu, že se bude vycházet z rovnice uvedené v Recknagel, kde je uvažována kompenzační délka, po které se tok ustálí do celého průřezu. Tento vztah je uveden v rovnici 5.2. Pro řešený případ vychází tato délka  $l = 2.083\text{m}$  což překračuje délku přechodu. Pokud se tedy tento přechod bude uvažovat jako náhlé rozšíření, povede výpočet tlakové ztráty na rovnici Borda-Carnot a součinitel místní tlakové ztráty by byl  $\xi = 0.97$ . Tato hodnota je čtyřikrát větší než výpočet přechodu, reálná hodnota však bude ležet mezi a to z důvodu, že přechod není zcela v ose jak předpokládá rovnice 5.1 a následně data uváděná Idelchikem.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{2\sqrt{\frac{a_1 b_1}{\pi} - D_0}}{2l_d} \quad (5.1)$$

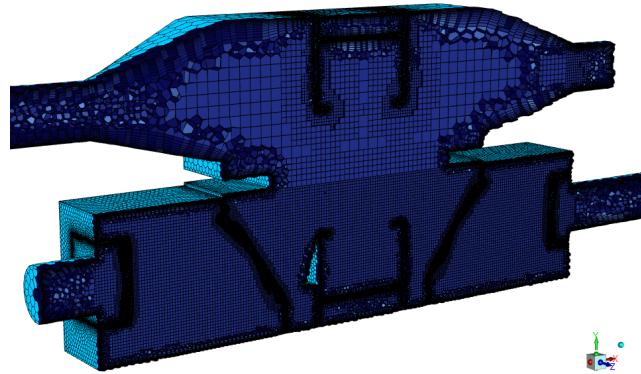
kde	$\alpha$	úhel přechodu	[°]
	$D_0$	průměr kruhového přechodu	[m]
	$a_1, b_1$	strany obdélníkového přechodu	[m]
	$l_d$	délka přechodu	[m]

$$l_p \approx 10 \left( \sqrt{A_2} - \sqrt{A_1} \right) \quad (5.2)$$

kde  $l_p$  potřebná délka pro vývin proudu vzduchu [m]  
 $A$  plocha průřezu potrubí [m<sup>2</sup>]

### 5.3.2 Numerická simulace rekuperačního boxu

Na boxu byla provedena numerická simulace proudění vzduchu za pomoci ANSYS Fluent pro všechny varianty měření tlakové ztráty. Model byl zjednodušen pouze na objem vzduchu z potrubí před rekuboxem, rekubox a potrubí za ním. Síť byla generována pomocí ANSYS Fluent meshing a pro všechny modely byly parametry nastaveny vždy stejně. Pro tvorbu objemové sítě byly použity poly-hexa buňky, které jsou svými vlastnostmi nejvíce vhodné pro řešenou problematiku. Na obrázku 5.10 je zobrazena generovaná síť pro variantu prázdného boxu, tuto konkrétní síť tvoří 2 741 402 buněk. [7, 14]



Obr. 5.10 Objemova síť u varianty boxu bez DRV

U všech provedených simulací byly nastaveny okrajové podmínky pro vstup jako *pressure-inlet* a výstup jako *mass-flow-outlet*. Označení  $p_{in}$  respektive  $p_{out}$  bylo nastaveno jako okrajová podmínka *wall* a slouží pro odečet statického tlaku ke komparaci s měřením. Odběry statického tlaku byly modelovány ve stejných vzdálenostech a rozměrech jako je tomu i u reálného měření. Pro výpočet byl implementován turbulentní model *Reliazable k-ε* s volbou *Enhanced Wall Treatment* a *Curvature Correction*. Pro algoritmus *pressure-velocity coupling* bylo použito schéma *COUPLED*, pro prvních 100 iterací byla ponechána prostorová diskretizace na výchozích hodnotách, následně k dosažení

Tab. 5.2 Okrajové podmínky jednotlivých variant u simulací původního boxu

Varianta boxu	inlet	outlet	hustota vzdušiny	dynamická viskozita	atmosférický tlak
	[Pa]	[kg s <sup>-1</sup> ]	[kg m <sup>-3</sup> ]	[Ns m <sup>-2</sup> ] $10^{-5}$	[Pa]
přechody	-12	0.1332	1.172	1.8869	98 137
bez DRV	-11	0.1339	1.192	1.8777	99 212
bez úchytů	-11	0.1336	1.209	1.8769	100 527
přepážka před i za	-12	0.1355	1.185	1.8898	99 471
přepážka před	-10	0.1355	1.208	1.8899	101 407
přepážka za	-11	0.1305	1.206	1.8910	101 282

přesnějších výsledků byla prostorová diskretizace přenastavena na druhý řád přesnosti u *turbulentní kinetické energie* a *turbulentní disipační energie*. Vlastnosti tekutiny byly pečlivě vybrány, aby se zajistilo shodné Reynoldsovo číslo s experimentálními daty. Nastavení hodnot okrajových podmínek pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v tabulce 5.2. Jak bylo zmíněno výše, měření bylo provedeno pro více hodnot proudění, provést simulace všech změřených průtoků by bylo časově náročné, proto byl vybrán střední průtok ke komparaci.

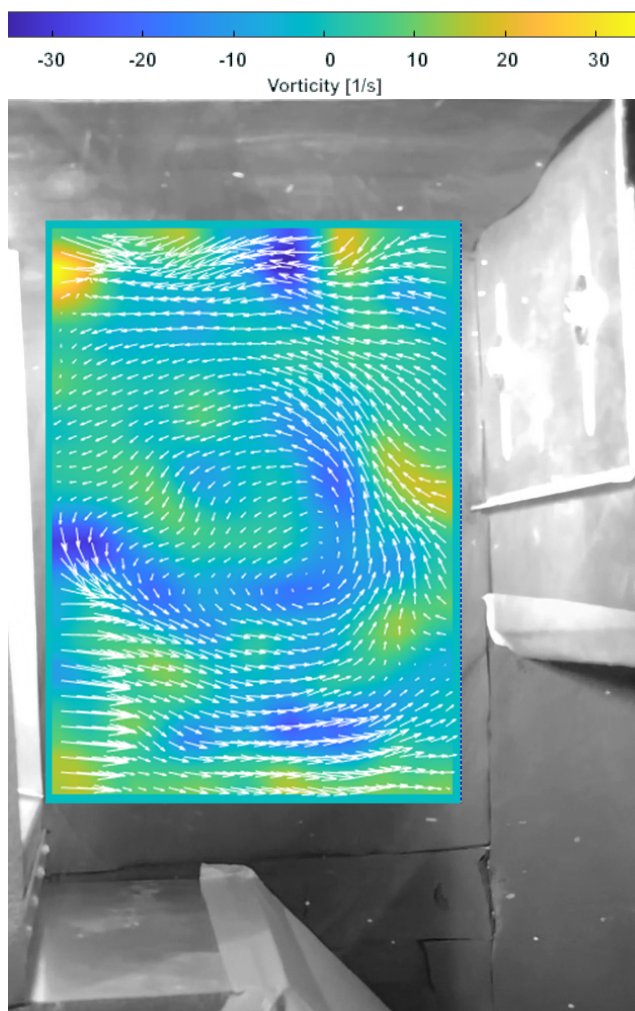
V tabulce 5.3 je uvedeno srovnání tlaků z experimentálního měření a numerických simulací. Z dat měření i simulací je patrné, že zjednodušení modelu pro numerickou simulaci mělo vliv na výsledky. Postihnout všechny detaily boxu a zahrnout je do simulace by značně zvýšilo počet buněk výpočetní sítě a tím také časovou náročnost. Přesto rozdíly mezi simulací a experimentálním měřením jsou v dostatečné shodě pro další postup, kterým byl návrh nového rekuperačního boxu.

Tab. 5.3 Porovnání výsledků měření a simulace na původním boxu

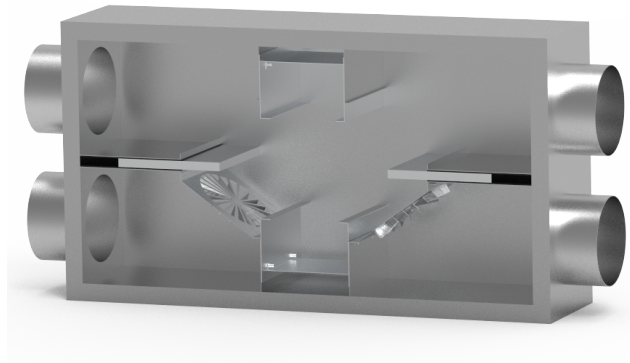
varianta boxu	měření			simulace			diference	
	P <sub>in</sub> [Pa]	P <sub>out</sub> [Pa]	Δp [Pa]	P <sub>in</sub> [Pa]	P <sub>out</sub> [Pa]	Δp [Pa]	Δp [Pa]	Δp [%]
bez DRV	13.2	97.0	83.8±2.5	12.6	92.6	80.0	3.8	4.8
bez úchytů	12.2	195.2	182.9±2.1	11.2	189.5	178.3	4.6	2.6
přep. před i za	12.0	192.0	180.0±3.6	11.7	187.8	176.1	3.9	2.2
přep. před	11.1	170.7	159.6±2.7	10.7	166.8	156.1	3.5	2.3
přep. za	12.4	200.5	188.1±3.6	11.6	194.8	183.2	4.9	2.7

### 5.3.3 Vizualizace proudění v rekuperačním boxu

Na boxu byla také provedena vizualizace proudění vzduchu pomocí heliových bublin a kouře. Ke generování heliových bublin byl využit generátor SAI Model 5 [11], který produkuje až 24 000 bublin za minutu o rozměrech 0.8 – 5mm. Ke generování je potřebné hélium, stlačený vzduch a speciální mydlinkový roztok SAI<sup>TM</sup>1035 BFS. Pro účely vizualizace bylo vyrobeno průhledné víko z plexiskla. Pro snímání proudění byla použita vysokorychlostní kamera OLYMPUS i-SPEED FS s možností snímání rychlých dějů díky rychlé uzávěrce 200ns. Pro vyhodnocení vektorů proudění byl použit opensource nástroj OpenPIV ve variantě pro Matlab. Na obrázku 5.11 je vyhodnocení vektorů z proudění heliových bublinek na vstupu do boxu. Jak je patrné z vizualizace dochází v tomto místě k tvorbě uplavu.



Obr. 5.11 Vyhodnocení vektorů a vírového pole z vizualizace proudění pomocí heliových bublin



*Obr. 5.12 Vizualizace nového boxu*

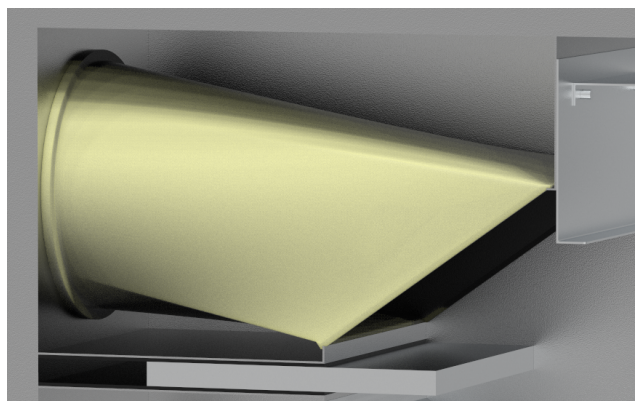
#### **5.3.4 Návrh nového rekuperačního boxu**

Ze všeho výše zmíněného bylo vyhodnoceno vytvořit nový rekuperační box, který bude lépe vyhovovat parametrům pro měření rekuperačních výměníků. Nový box byl konstruován na základě zkušeností z měření tlakových ztrát, vizualizace proudění, simulací původního boxu a v neposlední řadě dle příručky Tlakové ztráty od Idelchika [6]. Vizualizace nově navrženého boxu je zobrazena na obrázku 5.12. Nový box byl navrhnut s dvojnásobným průměrem průchodů, ve spodní části bylo odstraněno malé víření před průchodem a bylo ponecháno jen velké víření za DRV. To ovšem bylo pozměněno tak, aby přímo navazovalo na úchyty upevňovacích šoupat. Vzhledem ke změně průměru průchodu byly také navrhnuty nové přechody, ovšem vzhledem k vzdálenosti otvorů je nebylo možné navrhnout osově souměrné, jelikož by se překrývaly, a proto byly navrhnuty stejně jak u předchozího boxu a to asymetricky.

Nově vyrobený box byl změřen na tlakovou ztrátu stejně jako tomu bylo u předchozího boxu. První byla změřena tlaková ztráta přechodů, následně byla změřena tlaková ztráta boxu s rekuperátorem a box byl změřen prázdný s přepážkami ve tvaru DRV. Rozdíl mezi měřením a simulací je 3Pa. Provedené měření tlakové ztráty posloužilo ke komparaci s numerickou simulací. Následná vylepšení vedoucí ke snížení tlakové ztráty a homogenizaci proudového pole vzdušiny byla řešena jen numericky. Jednotlivé úpravy jsou popsány níže.

Dle Idelchika [6] je nejúčinnější způsob, jak zvýšit účinnost systému, zamezit vzniku separace mezní vrstvy, z tohoto boxu bylo také počítáno s nasávacím průchodem z potrubí k DRV, aby nevznikala tlaková ztráta náhlým rozšířením. Tento přechod by ovšem bylo složité vyrobit z plechu a tak byly vytištěny

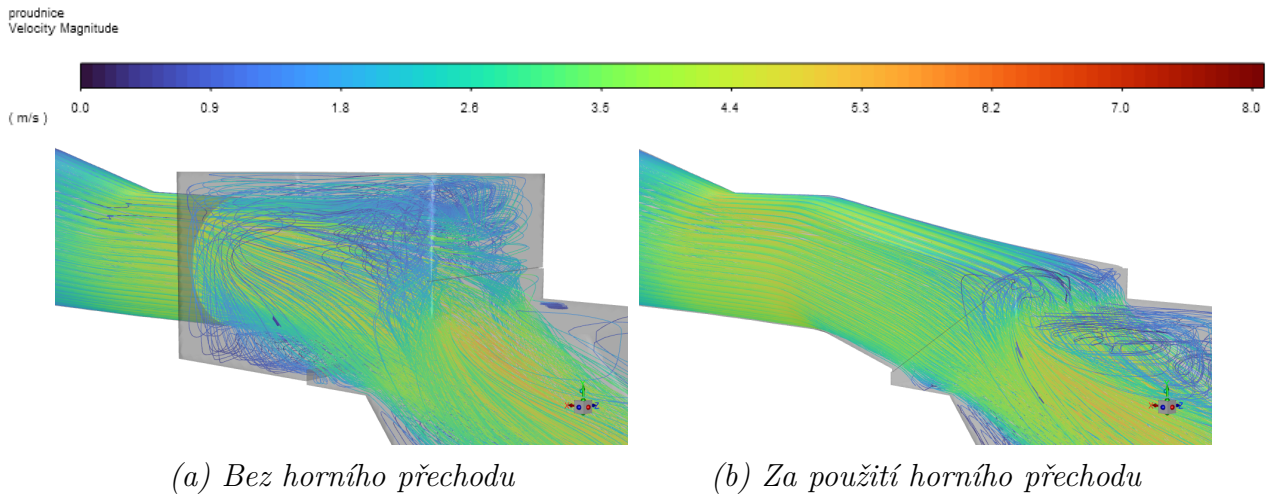
dva kusy na 3D tiskárně, vizualizace tohoto přechodu je na obrázku 5.13. Do tohoto přechodu byly následně vyvrtány díry tak, aby byl umožněn odběr statického tlaku na stěnách nového boxu stejně, jako tomu bylo u původního. Při porovnání dat z provedené simulace boxu s numerickou simulací za použití horního přechodu byla tlaková ztráta snížena o 1Pa. Přesto je výhodné tento přechod použít z důvodu, že vede vzduch přímo na DRV, proudová pole ze simulací jsou zobrazena na obrázku 5.14.



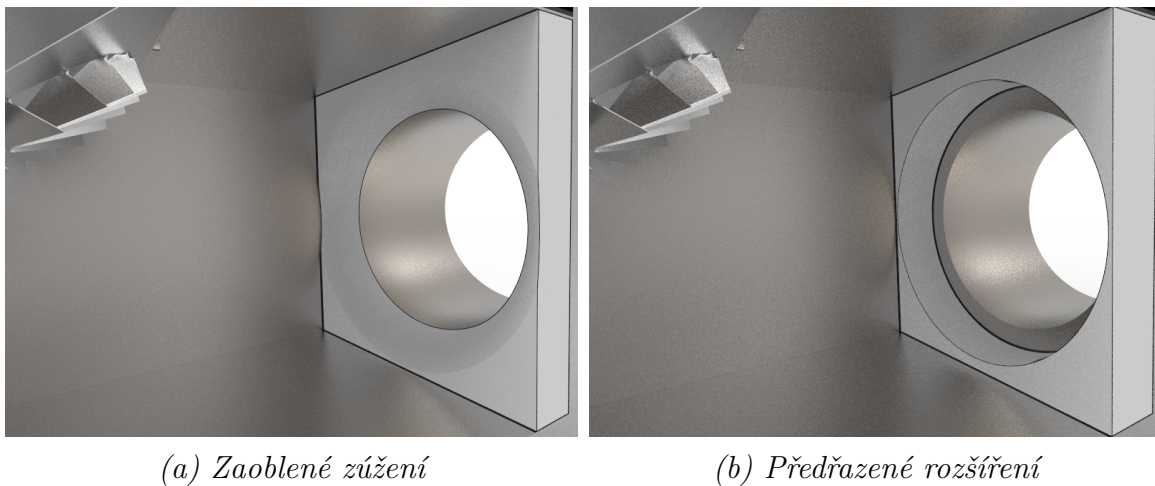
*Obr. 5.13 Vizualizace přechodu ze vstupu k DRV*

Pro snížení tlakové ztráty náhlého zúžení vstupu do potrubí DN240 za prostorem DRV by dle Khanzhonkova [8] bylo možné použít na místo ostré hrany zaoblení, pro výpočet zakřivení slouží vztahy  $l_d = 0,2 D_0$  a  $D_0 = 1,3 D_1$ , kde je  $l_d$  hloubka od hrany,  $D_0$  průměr vnitřního průřezu potrubí a  $D_1$  průměr začátku zaoblení. To by pro nový box znamenalo, že by se  $D_1 = 312\text{mm}$ , což přesahuje vnitřní šířku prostoru. Přesto byla provedena numerická simulace s přidáním tohoto prvku s oříznutím na krajích pro komparaci s dalšími možnostmi. Dalším způsobem, jak snížit tlakovou ztrátu otvoru ve stěně na základě dat Khanzhonkova [9], uvádí příručka zabudovat předřazené rozšíření s větším průměrem o určité tloušťce. Pro výpočet tohoto prvku se vychází ze vztahů  $l_d = 0,25 D_0$  a  $D_0 = 1,22 D_1$ . Stejně jako u předchozího prvku byla i u tohoto provedena numerická simulace. Vizualizace obou prvků je na obrázku 5.15. Tlaková ztráta za použití zaobleného přechodu se zlepšila o 4Pa a u předřazeného rozšíření ke zlepšení nedošlo. Výstupy z obou simulací jsou v podobě proudnic zobrazeny na obrázku 5.16.

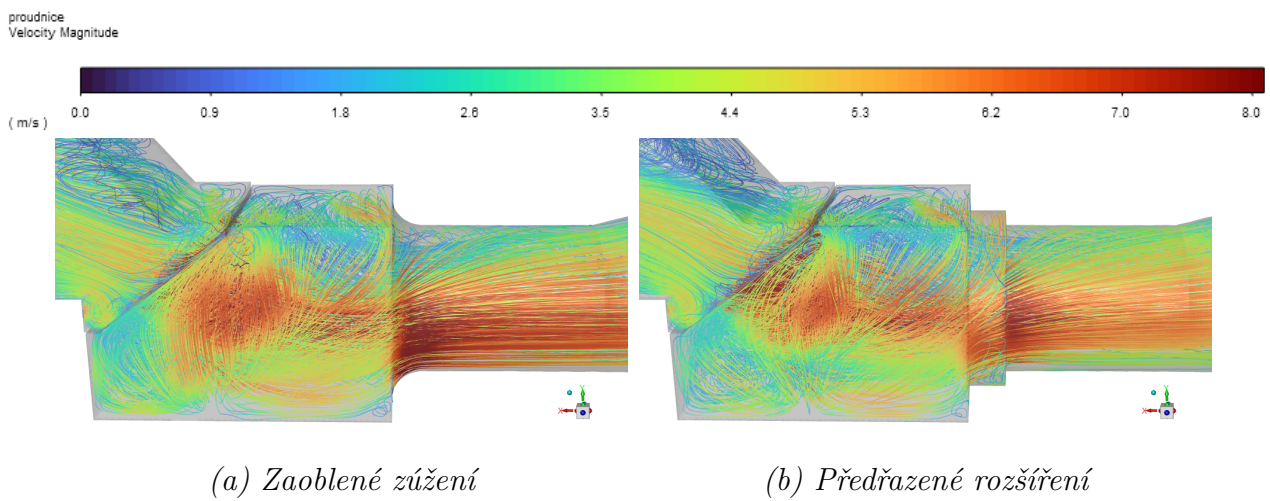
Dle Idelchika je nejúčinnější způsob, jak zvýšit účinnost vzduchovodu, zamezit vzniku separace mezní vrstvy, proto bylo přistoupeno k návrhu spojitého přechodu ze čtvercového průřezu za vířením na kruhový. Navrhovaný přechod



Obr. 5.14 Proudnice vzdušiny se zbarvením dle rychlosti pro jednotlivé varianty

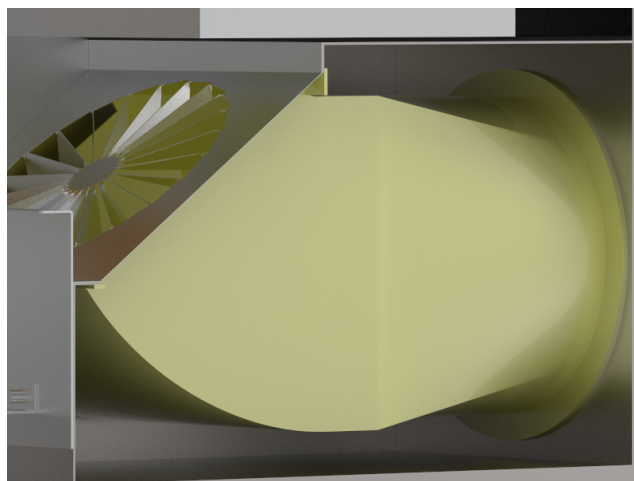


Obr. 5.15 Varianty úprav před náhlým zúžením do průchodu z boxu

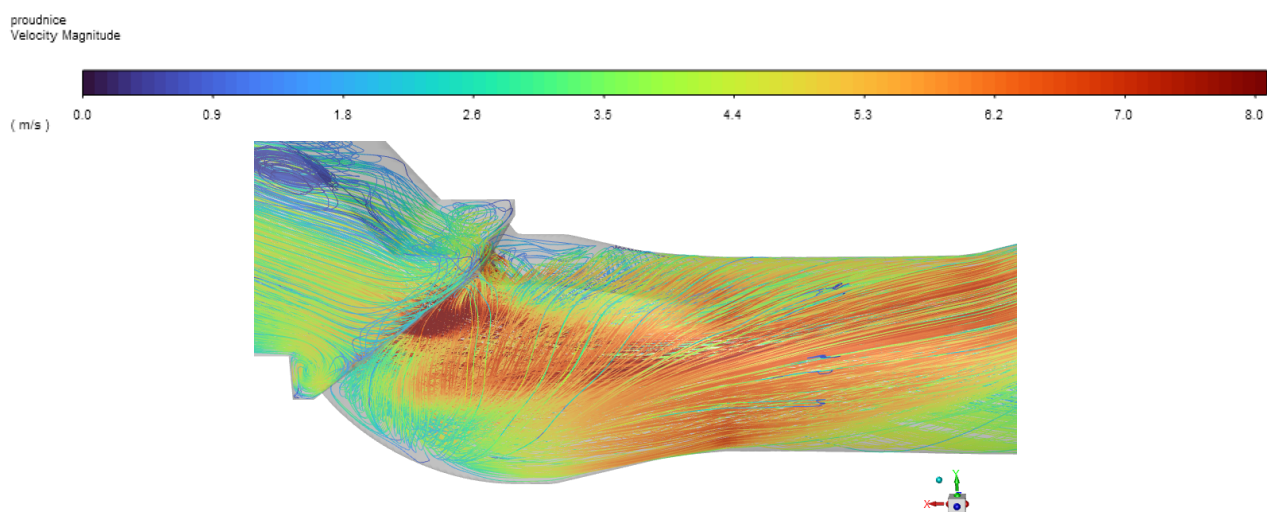


Obr. 5.16 Proudnice rychlosti předřazených prvků před náhlým zúžením do průchodu z boxu





Obr. 5.17 Vizualizace přechodu za vířením k výstupu z boxu



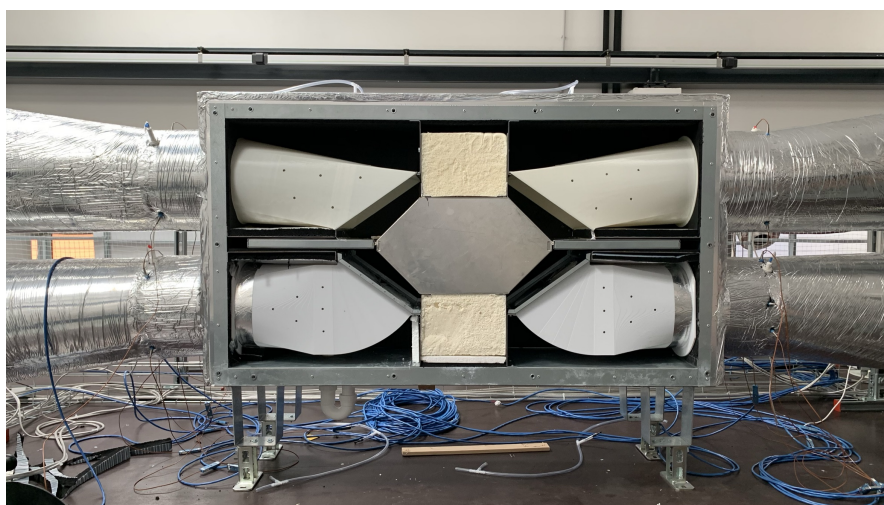
Obr. 5.18 Proudové pole dolního přechodu

je vizualizován na obrázku 5.17. Použití spodního přechodu vedlo ke snížení tlakové ztráty o 8Pa. Na obrázku 5.18 je poté vizualizace proudového pole ze simulace.

Použitím horní a dolního přechodu byla snížena celková tlaková ztráta boxu o 12Pa, což je 35% nižší než varianta bez těchto přechodů. Kompletní výčet tlakových ztrát ze simulací je v tabulce 5.4 Na obrázku 5.19 je pak zobrazen nový box osázený přechody, vypěněnými úchyty a DRV.

Tab. 5.4 Porovnání tlakové ztráty jednotlivých úprav ze simulace

varianta boxu	simulace			komparace	
	$P_{in}$ [Pa]	$P_{out}$ [Pa]	$\Delta p$ [Pa]	$\Delta P$ [Pa]	$\Delta P$ [%]
bez DRV	57.9	104.4	46.5		
s horním přechodem	58.0	103.0	45.0	1.4	3.2
s dolním přechodem	58.0	96.8	38.8	7.7	19.8
s horním a dolním přechodem	58.0	92.5	34.4	12.0	34.9
se zaobleným zúžením	58.0	99.0	41.0	5.4	13.3
s předřazeným rozšířením	58.0	103.0	45.0	1.5	3.3



Obr. 5.19 Nový box pro měření DRV

## 5.4 Ověřovací měření a vyhodnocení měření účinnosti DRV

Ověřovací měření probíhalo na dodaném deskovém rekuperačním výměníku, který byl již dříve testován ve dvou akreditovaných zkušebnách. První zkušebna byla akreditovaná měřící laboratoř Etelab s.r.o. se sídlem v Pardubicích. Druhou testovací laboratoří byla evropská akreditovaná zkušebna HOCHSHULE se sídlem ve Švýcarském Lausanne. Obě tyto laboratoře testovaly stejný vzorek DRV a došli ke schodě ve změřené účinnosti v podobě několika procent. Pro LTP byl poskytnut vzorek DRV k ověřovacímu měření na nově vybudované trati.

Vzorek byl měřen na tlakovou ztrátu a teplotní účinnost. Měření tlakové ztráty probíhalo na ventilátorové trati za pomoci původního boxu, měření účin-

nosti pak na nově zbudované rekuperační trati, kdy byl DRV umístěn do nově navrženého rekuperačního boxu. Podmínky pro měření účinnosti byly zadány pro pět hodnot průtoku, kde teplota odváděného vzduchu byla 25°C a relativní vlhkosti 23%. Teplota přiváděného vzduchu byla 5°C a relativní vlhkost 72%. Výsledky měření účinnosti  $\eta_{t,gro}$  na nové trati s porovnáním s daty z komparační laboratoře jsou uvedeny v tabulce 5.5.

*Tab. 5.5 Výsledky komparace účinnosti  $\eta_{t,gro}$*

	Kompar. lab [%]	LTP [%]	diff [%]
1	78.970	80.807±0.311	-1.837
2	77.998	79.554±0.193	-1.556
3	76.160	77.801±0.105	-1.641
4	74.282	74.952±0.126	-0.669
5	73.552	74.722±0.151	-1.171

## 6 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

V současné době je snaha o snižování energetické závislosti budov a právě rekuperace tepla se stává aktuálním trendem. Do budoucna se očekává, že budou všechny vzduchotechnické systémy pro úpravu vnitřního klimatu budov vybaveny rekuperací tepla, což povede k efektivnějšímu využití stávajících energetických zdrojů. V rámci toho se zvyšují nároky na vývoj efektivnějších rekuperátorů a následně i jejich certifikované testování. Tato disertační práce se zabývá tvorbou rekuperační tratě, na které lze tento vývoj a testování provádět. Je zmíněn postup návrhu tratě k měření rekuperačních výměníků, který může být uplatněn v praxi. Vytvoření měřicí tratě rekuperačních výměníků znamená rozšíření zaměření Laboratoře techniky prostředí o další perspektivní oblast. Nově vybudovaná trať rozšiřuje portfolio prováděného měření v laboratoři. Toto rozšíření zaměření laboratoře je přínosem pro praxi z hlediska možnosti testování nových návrhů rekuperačních výměníků. Díky úspěšnému komparačnímu měření deskového rekuperačního výměníku s měřením provedeném v renomované akreditované Švýcarské laboratoři je umožněno tuzemským firmám testování výměníků s nižšími finančními nároky. Dalším přínosem je popis validace měření se simulacemi, což vede na zefektivnění při návrhu a snižuje tak kladené časové, ale i finanční nároky při vývoji. Z pohledu vědy je přínos práce v podobě popisu provedení experimentálního měření boxu pro měření rekuperačního výměníku a následné shrnutí poznatků pro snížení tlakové ztráty takového boxu. V neposlední řadě užitek v provedené komparaci numerických metod s experimentálním měřením.

## 7 ZÁVĚR

Dizertační práce se zabývá problematikou rekuperace tepla, což navazuje na aktuální trend v praxi. V rámci disertační práce byly splněny všechny cíle, které byly stanoveny. Uvádí postup návrhu tratě pro měření rekuperačních výměníků na základě požadovaných teplotních, vlhkostních a rychlostních parametrů. Popisuje současný stav poznání o proudění vzduchu a navrhuje optimalizaci aerodynamických parametrů rekuperačního boxu sloužícího k měření. Tato optimalizace vychází z návrhu aplikovaného na simulační model, který byl validován experimentálním měřením. Práce přináší shrnutí základních pojmů při měření rekuperačních výměníků. Dizertační práce se zabývá řešením problémů spojených se vznikem nehomogenit rychlostního pole vznikajícího uvnitř rekuperačního boxu, které následně způsobují nárůst tlakové ztráty. V rámci řešení disertační práce bylo navrženo a realizováno zapojení potrubní sítě vhodné pro měření rekuperačních výměníků. Dále se disertační práce zabývala návrhem numerického řešení rekuperačních boxů v prostředí ANSYS. Pomocí numerických metod bylo hledáno nejvhodnější řešení pro snížení tlakové ztráty, které bylo následně validováno měřením na ventilátorové trati. Jedním z bodů disertační práce bylo prakticky ověřit funkčnost nové trati měřením deskového rekuperačního výměníku tepla na jeho parametry. Toto validační měření bylo provedeno a byla zjištěna shoda výsledků s akreditovanou Švýcarskou laboratoří. Získané závěry, výsledky a výstupy jsou shrnuty v této dizertační práci.

# LITERATURA

- [1] EUR-Lex - 32018L0844 - EN - EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>, 6 2017. (Accessed on 07/20/2020).
- [2] *Recknagel-Sprenger: Taschenbuch für Heizung und Lüftung*. Vulkan-Verlag GmbH, 74 edition, 2010. ISBN 978-3-8356-3134-2.
- [3] ASHRAE. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009. ISBN 9781933742557.
- [4] BANKS, E., ELLIS, C. a GRAVES, C. Airflow Traverse Comparisons Using The Equal-Area Method, Log-Tchebycheff Method, and The Log-Linear methos and Including Travesse Location Qualification. In *27th Nuclear air cleaninf and theatment conference*, pp. 53. NUCON Internationa, Inc., 2002.
- [5] ELBALSOHI, A., HU, J. a JIA, R. Simulation of Turbulent Flow in an Asymmetric Air Diffuser. 04 2014.
- [6] IDELCHIK, I. *Flow Resistance: A Design Guide for Engineers*. CRC Press, 2017. ISBN 9781351447898.
- [7] JIYUAN, T. *Computational fluid dynamics : a practical approach*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0-08-098243-4.
- [8] KHANZHONKOV, V. I. Reduction of the aerodynamic resistance of orifices by means of annular fins. 4, pp. 45 – 62. Oborongiz Press, .
- [9] KHANZHONKOV, V. I. Reduction of the aerodynamic resistance of orifices by means of annular recesses. 12, pp. 181 – 196. Oborongiz Press, .
- [10] NOUI-MEHIDI, M., WU, J., ŠUTALO, I. a GRAINGER, C. Velocity distribution downstream of an asymmetric wide-angle diffuser. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005, 29, 6, pp. 649 – 657. ISSN 0894-1777. doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.10.002>.
- [11] SAGE ACTION. Model 5. <https://sageaction.com/model-5-console.html>, 6 2017. (Accessed on 07/20/2020).
- [12] ČSN EN 308. Heat exchangers — Test procedures for establishing performance of air to air heat recovery components. Norma, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2009.

- [13] TANG, H., LEI, Y., LI, X. a FU, Y. Large-Eddy Simulation of an Asymmetric Plane Diffuser: Comparison of Different Subgrid Scale Models. *MDPI*. 2019, 11, 1337. ISSN 0894-1777. doi: <https://doi.org/10.3390/sym11111337>. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-8994/11/11/1337>.
- [14] VERSTEEG, H. K. *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method*. Pearson Education Ltd, 2007. ISBN 978-0131274983.

# PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

## Jimp - A

- [A.1] MANAS, D., MANAS, M., MIZERA, A., STOKLÁSEK, P., NAVRATIL, J., SEHNÁLEK, S. AND DRÁBEK, P. The High Density Polyethylene Composite with Recycled Radiation Cross-Linked Filler of rHDPE<sub>x</sub>. *Polymers*, 10, 2018.
- [A.2] MANAS, D., MIZERA, A., NAVRATIL, M., MANAS, M., OVSIK, M., SEHNÁLEK, S. AND STOKLÁSEK, P. The Electrical, Mechanical and Surface Properties of Thermoplastic Polyester Elastomer Modified by Electron Beta Radiation. *Polymers*, 10, 2018.
- [A.3] MANAS, D., MANAS, M., MIZERA, A., NAVRATIL, J., OVSIK, M., TOMANOVA, K. AND SEHNÁLEK, S. Use of irradiated polymers after their lifetime period. *Polymers*, 10, 2018.
- [A.4] MANAS, D., MIZERA, A., MANAS, M., OVSIK, M., HYLOVA, L., SEHNALEK, S. AND STOKLASEK, P. Mechanical properties changes of irradiated thermoplastic elastomer. *Polymers*, 10, 2018.
- [A.5] KOLÁČEK, M., CHARVÁTOVÁ, H. AND SEHNÁLEK, S. Experimental and numerical research of the thermal properties of a PCM window panel. *Sustainability*, 9, 2017.

## Jsc - Článek v databázi Scopus

- [A.6] SKOVAJSA, J., SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M Optimization and economic assessment of renewable energy sources and their combinations for Central Europe. In *MATEC Web of Conferences*, volume 292. EDP Sciences, 2019.
- [A.7] CHARVÁTOVÁ, H. AND ZÁLEŠÁK, M. AND KOLÁČEK, M. AND SEHNÁLEK, S. Experimental and Numerical Testing of Possibilities and Limits for Applications of Phase Changed Materials in Buildings. In *MATEC Web of Conferences*, volume 292. EDP Sciences, 2019.
- [A.8] HÝLOVÁ, L., MIZERA, A., MAŇAS, M., MAŇAS, D., SEHNÁLEK, S AND KUBIŠOVÁ, M. Influence of fall height setting on drop weight



- tested polypropylene and its crack growing. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2018.
- [A.9] SEHNÁLEK, S. Cfd validation by measurement of specialized ventilation equipments on duct tract. In *MATEC Web of Conferences*, volume 125, EDP Sciences, 2017.
- [A.10] SEHNÁLEK, S. Validation of new cfd release by ground-coupled heat transfer test cases. In *MATEC Web of Conferences*, volume 125, EDP Sciences, 2017.
- [A.11] KOLÁČEK, M. AND SEHNÁLEK, S. Heat transfer analysis of roof drains in the calorimetric chamber. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 2017.
- [A.12] SEHNÁLEK, S., DRÁBEK, P. AND ZÁLEŠÁK, M. Friction coefficient measurements of silencers on specialized duct tract. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2016.
- [A.13] SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Measurement of friction coefficient on specialized duct tract. *WSEAS Transactions on Systems*, 2016:7, 2016.
- [A.14] KOLÁČEK, M. AND SEHNÁLEK, S. Heat transfer by forced convection from a vertical pcm plate. *WSEAS Trans. Heat Mass Transf*, 11:56–61, 2016.
- [A.15] SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Temperature stratification in the passage space of the shaft type. In *Proceedings of the International Conferences*, page 3, 2015.
- [A.16] SEHNÁLEK, S. ZÁLEŠÁK, M., VINCENEC, J., OPLUŠTIL, M. AND CHROBÁK, P. Ground-coupled heat transfer test cases as ranking simulation software. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 10, 2015.
- [A.17] CHARVÁTOVÁ, H., ZÁLEŠÁK, M., SEHNÁLEK, S., JANÁČOVÁ, D., VAŠEK, V. AND DRGA, R. Computer simulation of parameterized module for testing of thermal stability in the room. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 2015.

## Článek ve sborníku

- [A.18] DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Možnosti stanovení základních akustických a hydraulických parametrů prvků vzduchotechnických systémů. *In Sborník přednášek 23. konference Klimatizace a větrání*, 2019.
- [A.19] SKOVAJSA, J., DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Měření v univerzální kompenzované kalorimetrické komoře. *In Sborník přednášek 23. konference Klimatizace a větrání*, 2019.
- [A.20] ZÁLEŠÁK, M., KOLÁČEK, M. AND SEHNÁLEK, S. Thermal properties of a four-pane window filled with phase change materials. *In Conference Proceedings of the*, 12:6, 2017.
- [A.21] ZÁLEŠÁK, M., CHARVÁTOVÁ, H., DRÁBEK, P., KOLÁČEK, M., AND SEHNÁLEK, S. Základní výzkumné směry a trendy v oboru integrované systémy v budovách. *In Zborník odborných referátov*, 5, 2017.
- [A.22] SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Air temperature distribution in the glazed stair case area. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 12:7, 2016.
- [A.23] SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Teplotní stratifikace v komunikačním prostoru šachtového typu. *In Tepelná ochrana budov*, 3, 2015.
- [A.24] ZÁLEŠÁK, M., KOLÁČEK, M., AND SEHNÁLEK, S. Difficulties of heat transfer from pcm type board to ambient room. *In Advanced building skins*, 5, 2015.
- [A.25] VINCENEC, J., ZÁLEŠÁK, M., CHROBÁK, P. AND SEHNÁLEK, S. Energy requirements of light sources. *In Recent Advances in Systems*, 3, 2015.
- [A.26] VINCENEC, J., ZÁLEŠÁK, M. AND SEHNÁLEK, S. Energy storage options and their subsequent usage. *In Annals of DAAAM International for*, 6, 2015.
- [A.27] SEHNÁLEK, S., ZÁLEŠÁK, M., VINCENEC, J., OPLUŠTIL, M. AND CHROBÁK, P. Evaluation of solidworks flow simulation by ground-coupled heat transfer test cases. *Latest Trends on Systems*, 4, 2014.

- [A.28] CHARVÁTOVÁ, H., ZÁLEŠÁK, M., AND SEHNÁLEK, S. Parameterization of module for testing of thermal stability in the room. *Latest Trends on Systems*, 2:647–650, 2014.

## **Prototyp, funkční vzorek**

- [A.29] KOLÁČEK, M. AND SEHNÁLEK, S. Chladící strop využívající tepelně akumulární material PCM. 2017.
- [A.30] DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Potrubní přípravek pro stanovení součinitele zvukové pohltivosti absorpčních materiálů na základě měření útlumu v potrubní síti. 2017.

## **Výzkumná zpráva**

- [A.31] SEHNÁLEK, S., DRÁBEK, P., ZÁLEŠÁK, M. AND SKOVAJSA, J. ATREA - Výzkum energeticky výkonových parametrů TČ se zásobníkem. 2019.
- [A.32] SKOVAJSA, J., ZÁLEŠÁK, M., DRÁBEK, P. AND SEHNÁLEK, S. TnG-Air - Výzkum akustických a energetických parametrů tepelných čerpadel. 2019.
- [A.33] SKOVAJSA, J., ZÁLEŠÁK, M., DRÁBEK, P. AND SEHNÁLEK, S. TnG-Air - Výzkum parametrů tepelných čerpadel typu monoblok/split s vysokým SCOP. 2019.
- [A.34] DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Tech-trade - výzkum akustických parametrů. 2016.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1	Schéma deskového rekuperačního výměníku s boxem . . . . .	5
Obr. 4.1	Základní schéma a princip měření . . . . .	8
Obr. 5.8	Varianty při měření tlakové ztráty . . . . .	15
Obr. 5.14	Proudnice vzdušiny se zbarvením dle rychlosti pro jednotlivé varianty . . . . .	22
Obr. 5.15	Varianty úprav před náhlým zúžením do průchodu z boxu .	22
Obr. 5.16	Proudnice rychlosti předřazených prvků před náhlým zúžením do průchodu z boxu . . . . .	22

## SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1	Porovnání traverzovacích metod pro 10 bodů měření . . . . .	9
Tab. 5.2	Okrajové podmínky jednotlivých variant u simulací původního boxu . . . . .	18
Tab. 5.3	Porovnání výsledků měření a simulace na původním boxu .	18
Tab. 5.4	Porovnání tlakové ztráty jednotlivých úprav ze simulace . .	24
Tab. 5.5	Výsledky komparace účinnosti $\eta_{t,gro}$ . . . . .	25

# SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRA- TEK

A	[m <sup>2</sup> ]	plocha
q <sub>m</sub>	[kg s <sup>-1</sup> ]	hmotností tok
v	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudící tekutiny
ρ	[kg m <sup>-3</sup> ]	hustota tekutiny
Θ	[°C]	teplota tekutiny
Δp	[Pa]	rozdíl tlaků
D	[mm]	průměr potrubí
ξ	[-]	koeficient místní tlakové ztráty
β	[-]	poměr mezi průměrem clony a vnitřním potrubím
l <sub>p</sub>	[m]	potřebná délka pro vývin proudu vzduchu
l <sub>d</sub>	[m]	délka přechodu
a <sub>1</sub> , b <sub>1</sub>	[m]	strany obdélníkového přechodu

CEBIA-	Centrum bezpečnostních, informačních a pokročilých tech-
Tech	nologií
ČSN	Česká technická norma
DN	Jmenovitá světlost potrubí
DRV	Deskový rekuperační výměník tepla
DZUP	deskový Zankeruv usměrňovač proudění
EU	Evropská Únie
IDO	Indoor část komory
KK	Kompenzovaná kalorimetrická komora
LTP	Laboratoř techniky prostředí
MDK	Multidýzová komora
NZEB	Budovy s téměř nulovou spotřebou energie
ODO	Outdoor část komory
RANS	Metoda časového středování Navierových-Stokesových rovnic
SwRI	Southwest Research Institute
VT	Ventilátorové trati

# ŽIVOTOPIS

## Osobní údaje

Ing. Stanislav Sehnálek

NAROZEN: 1.6.1987

ADRESA: Pod Stráněmi 2373, 760 01, Zlín

TELEFON: +420 602 787 700

E-MAIL: sehnalek@utb.cz

## Vzdělání

### **2012 – do současnosti Doktorské studium**

Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně

obor: Automatické řízení a informatika

zaměření: Proudění vzduchu, Numerické výpočty proudění tekutin v uzavřených profilech, Technické zařízení budov

### **2010 - 2012 Magisterské studium**

Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně

obor: Integrované systémy v budovách

téma Diplomové práce: 3D tiskárna na bázi projektu RepRap

### **2007 - 2010 Bakalářské studium**

Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně

obor: Informační a řídicí technologie

téma Bakalářské práce: Mikropočítačový modul pro řízení rychlosti vlaků na modelu kolejiště

## Zahraniční stáže

### **2018 ERASMUS+ stáž**

*Kaunas University of Technology, Kaunas (Litva)*

činnost: výjezd v období 17.09.2018 - 23.11.2018 v rámci programu ERASMUS+ traineeship

## Zaměstnání

### **2012 – do současnosti Vědecko technický pracovník**

*CEBIA-Tech, FAI, UTB ve Zlíně, Nad Stráněmi 5656, 760 05 Zlín (Česká republika)*

činnost: výzkumná činnost, měření parametrů zařízení techniky prostředí dle platné legislativy

**2011 Vývojový pracovník**

*Schneider Electric, Kvítkovická 1533, 763 61 Napajedla (Česká republika)*

činnost: spolupráce na vývoji HW a SW pro interní testovací zařízení

**2009 - 2012 Oprava mobilních telefonů**

*Mobilní telefony AP, Želechovice nad Dřevnicí (Česká republika)*

činnost: Diagnostika mob. telefonů, servis mob. telefonů

**2005 - 2006 Systémový administrátor**

*FortisNET, Velíková (Česká republika)*

činnost: správa serveru, údržba WiFi sítě, zapojování nových klientů, technická podpora

**Absolvovaná školení**

**2018 Školení programů ANSYS, TechSoft Engineering, spol. s r.o., Praha**

Školení programu Fluent zaměřené na proudění a vedení tepla. Program ANSYS Meshing určený pro vytváření výpočetních sítí jak pro proudění tak pro pevnostní analýzy. Specializovaný program Fluent Meshing pro vytváření kvalitních výpočetních sítí pro výpočty proudění. Část školení bude věnována akustickým výpočtům v programu Fluent a v programu Mechanical

**2017 Nejistoty měření kalibrací a zkoušek, České kalibrační sdružení, z.s., Brno**

Nejistoty měření, Úvod do vyhodnocování Experimentů, Revize návodu GUM, Úloha nejistot měření při vyhodnocování, Nejistoty kalibrací a měření teplot, Nejistoty kalibrací elektrických veličin

**2016 EuHIT School on Turbulence, University of Warsaw, Varšava (Polsko)**

Experimental techniques on turbulence, Numerical methods, Fluid flow, Theory of turbulence

**2016 International PhD School on Building Physics - Numerical Methods for Diffusion Phenomena in Building Physics: Theory and Practice, Pontifical Catholic University of Parana, Curitiba (Brazílie)**

Introduction to Diffusion Phenomena in Building Physics, Finite difference approaches applied to transient process, Finite difference/Finite Volume approaches applied to local diffusion phenomenon, Analytical techniques and related numerical methods, Spectral Approaches, Use of

Bayesian techniques for solution of inverse diffusion problems, Reduced Order Methods, Tools for diffusion problems in building physics

**2015 Školení a přezkoušení podle vyhlášky 50/1978 Sb., Školení-revize-elektro, Zlín**

§7 - Pracovníci pro řízení činnosti, zkouška odborné způsobilosti na elektrickém zařízení do 1000V a nevybušné prostředí dle konkrétních podmínek na pracovišti školené osoby

**2014 Základy Automation Studia, B+R automatizace, spol. s r.o., Brno-Žabovřesky**

Automation Studio online komunikace, Automation Runtime, Automation Studio diagnostika, Ladder Diagram (LAD), Structured Text (ST), Vytváření strukturovaných aplikací, Správa paměti ukládání dat, Knihovny Automation Studia

**2013 Základní kurz KNX zakončený zkouškou KNX, Školící centrum KNX, FAI, UTB ve Zlíně**

Systémové argumenty a sběrnice přístroje KNX, Topologie a Instalace KNX - Komunikace a telegram KNX, Projektování, nahrávání a diagnostika ETS, Praktická část obsahující projektování, nahrávání a diagnostiku zadaného KNX systému

### Vyučované předměty

Hydraulika (CZ, EN)

Technická měření v technice prostředí (CZ, EN)

Technika prostředí budov (CZ)

Vybrané parametry techniky budov (CZ, EN)

Projektování integrovaných systémů (EN)

### Odborné znalosti

ANSYS SpaceClaim, AutoCAD, OpenSCAD, Matlab, Wolfram Mathematica, Eagle, Control Web

ANSYS Fluent, ANSYS Mechanical, ANSYS Discovery LIVE, COMSOL Multiphysics

PLC B&R, PLC SAIA, PLC TECO



C/C++, HTML/CSS, PHP, JavaScript, MySQL, Linux Shell

## Aktivity

Spoluřešitel projektu INTERREG, řešení 2020 – do součastnosti, hlavní řešitel Ing. Martin Zálešák, CSc.

Spoluřešitel vědeckovýzkumného záměru NPU I. č. LO1303, řešení 10/2015 – do součastnosti, hlavní řešitel prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

Spoluřešitel vědeckovýzkumného záměru OP VaVpI, č. CZ.1.05/2.1.00/03.0089, řešení 11/2013 – 09/2014, hlavní řešitel prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

Spoluřešitel smluvního výzkumu se spol. ATREA (Výzkum energeticky výkonových parametrů TČ se zásobníkem)

Spoluřešitel smluvního výzkumu se spol. Etelab, s.r.o. (Výzkum rekuperační výměníků)

Spoluřešitel smluvního výzkumu se spol. Institut pro testování a certifikaci, a.s. (Výzkum tepelných a akustických parametrů tepelných čerpadel)

Spoluřešitel smluvního výzkumu se spol. TNG-Air, s.r.o. (Výzkum parametrů tepelných čerpadel typu monoblok/split s vysokým SCOP)

Spoluřešitel smluvního výzkumu se spol. TNG-Air, s.r.o. (Výzkum akustických a energetických parametrů tepelných čerpadel)

Spoluřešitel smluvního výzkumu se spol. Tech-Trade, s.r.o. (Výzkum akustických parametrů tlumičů hluku)

Ing. Stanislav Sehnálek, Ph.D.

**Výzkum aerodynamických parametrů vybraných prvků  
vzduchotechnických systémů**

Investigation of aerodynamic parameters of specialized duct systems

Teze dizertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,  
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

První vydání

Náklad: vydáno elektronicky

Sazba: Stanislav Sehnálek

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2020

ISBN 978-80-7454-968-7

