

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení

Měření entalpických deskových výměníků

Student:

Michal Pavlas

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Dvořák Václav, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce:

18. 10. 2012

Datum odevzdání bakalářské práce:

24. 05. 2013

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřeby TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jeho skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci 24. 05. 2013

.....
Michal Pavlas

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Václavu Dvořákovi, Ph.D., za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Anotace

PAVLAS, M. Metodika měření rekuperačních výměníků. Bakalářská práce, TUL Liberec: 2013, 35s.

V bakalářské práci je řešena problematika měření rekuperačních výměníků na experimentální trati. Vlastní práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část, kde v teoretické části jsou uvedeny základní rozdělení výměníků a popsány vztahy definující jejich výkonost. Dále obsahuje popis stávající tratě a měření. V praktické části je porovnání aktuálního stavu tratě podle platných norem a uvedeno několik možných úprav ke zpřesnění metodiky měření na měřící trati. Je zde také uvedena nejistota měření, kterou je zatížena aktuální trať. V závěru je upozorněno na zjištěné nedostatky a je provedeno zhodnocení práce.

Klíčová slova

Měření, rekuperační výměník, nejistota měření, stanovení výkonnosti, ČSN ISO 5761.

Annotation

PAVLAS, M. Methodic of measuring recuperative heat exchanger. Bachelor thesis, TUL Liberec: 2013, 35p.

This thesis deals with the issue of measuring recuperative heat exchanger at experimental test track. The work itself is divided into theoretical and practical parts. Basic division of recuperative heat exchangers and described formulas defining their performance are presented in theoretical parts. Further parts contain description of actual state of track and measuring. The comparison of actual state of the track with the valid standards is in the practical part. Several possible modifications of the track to obtain more precise measurement are suggested here. The evaluation of uncertainties of actual track is also included. In the conclusion the discovered imperfections are pointed out of the conclusion.

Key words

Measuring, recuperative heat exchanger, uncertainties of measuring, definitions of performance, ČSN ISO 5761.

Obsah

1.	ÚVOD DO PROBLEMATIKY	1
1.1	PARAMETRY VÝKONNOSTI ZZT	2
1.1.1	TEPLOTNÍ ROZDÍL	2
1.1.2	TEPELNÝ VÝKON	2
1.1.3	ÚČINNOST	3
1.2	REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍK TEPLA	4
1.2.1	TRUBKOVÉ VÝMĚNÍKY	5
1.2.2	DESKOVÉ VÝMĚNÍKY	5
1.2.3	REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY LAMELOVÉ S POMOCNOU TEKUTINOU	6
1.2.4	TEPELNÉ TRUBICE	7
1.2.5	TEPELNÉ ČERPADLA	7
1.3	REGENERAČNÍ VÝMĚNÍKY	8
1.3.1	ROTAČNÍ REGENERAČNÍ VÝMĚNÍK	8
1.3.2	REGENERAČNÍ VÝMĚNÍKY PŘEPÍNACÍ	9
2.	MĚŘENÍ REKUPERAČNÍCH VÝMĚNÍKŮ	10
2.1	REŠERŠE PLATNÝCH NOREM	10
2.1.1	NORMA ČSN EN 305	10
2.1.2	NORMA ČSN EN 306	10
2.1.3	NORMA ČSN EN 308	10
2.1.4	NORMA ČSN EN 5167	11
2.1.5	NORMA ČSN EN 5168	13
2.2	POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU TRATĚ	13
2.3	HODNOTY V ROZPORU S NORMOU	14
2.4	POPIS MĚŘENÍ	15
2.4.1	SBĚR INFORMACÍ	17
2.4.2	TEPLOTA	18
2.4.3	ATMOSFÉRICKÝ TLAK	20
2.4.4	MĚŘENÍ HMOTNOSTNÍHO PRŮTOKU	20
2.4.5	MĚŘENÍ VLHKOSTI	21
3.	NÁVRHY OPATŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ NEJISTOTY	22
3.1	NÁVRH ÚPRAVY TRATĚ PODLE NORMY	22
3.1.1	VARIANTA (1)	22
3.1.2	VARIANTA (2)	23

3.1.3	VARIANTA (3).....	24
3.1.4	VARIANTA (4).....	25
3.1.5	VARIANTA (5).....	26
3.2	VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ	26
3.2.1	OBECNÉ ZÁKLADY	26
3.2.2	STANDARDNÍ NEJISTOTY TYPU A.....	27
3.2.3	STANDARDNÍ NEJISTOTY TYPU B.....	28
3.2.4	KOMBINOVANÁ NEJISTOTA.....	28
3.2.5	ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA	29
3.2.6	OSTATNÍ NEJISTOTY.....	29
3.2.7	URČENÍ NEJISTOTY.....	29
4.	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	33
4.1	DOPORUČENÍ.....	33
5.	ZÁVĚR	34
	POUŽITÉ ZDROJE	35

Značky a zkratky

Značka	Veličina	Jednotky
A	plocha přenosu tepla	m^2
a_i	rozsah měřených hodnot	
c	měrná tepelná kapacita	$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
c^*	koeficient relativní citlivosti	%
D	průměr potrubí	m
d	průměr clony	m
F	korekční součinitel pro LMTD	
h	měrná entalpie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
H	entalpie	J
k	součinitel prostupu tepla	$\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$
k	uvedený koeficient rozšíření	
$LMTD$	střední logaritmický teplotní rozdíl	K
n	počet hodnot ve vzorku	
p	tlak	Pa
P	tepelný výkon	W
q_m	hmotnostní tok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	
s	směrodatná odchylka	
t	teplota tekutiny	$^{\circ}\text{C}$
T	termodynamická teplota	K
U	rozšířená nejistota	
u	standartní nejistota	
u^*	relativní nejistota	%
x	měrná vlhkost	$\text{kg}_p \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$
β	poměr průměrů	
Δp	diferenční tlak	Pa
ε	součinitel expanze	
η_t	teplotní účinnost	%
κ	izoentropický koeficient	
μ	dynamická viskozita	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ρ	hustota tekutiny	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ψ	vlhkostní účinnost	%

1. Úvod do problematiky

Tématem bakalářské práce je problematika měření deskových výměníků a jeho zpracování v experimentální laboratoři. Měřicí trať nacházející se v laboratoři se využívá k měření rekuperačních jednotek a následnému určení jejich tepelné či entalpické účinnosti. Podmětem k vypracování této práce byl nevyhovující stav měřicí tratě, kdy naměřené hodnoty účinnosti na komerčních výměnících neodpovídaly údajům uváděnými výrobci. Aktuální stav je v práci zanalyzován a podroben zkoumání podle platných norem. Na základě shledaných nedostatků a rozporů je zde uvedeno několik možných variant úprav měřicí tratě, které by měly vést ke zlepšení přesnosti získávaných hodnot. Dále se v práci nachází výpočet základní nejistoty, kterou je měření na stávající trati zatíženo.

Trať je konstruována pro měření rekuperačních jednotek. Rekuperační jednotky jsou základním prvkem v technice zpětného získávání tepla. Zpětné získávání tepla dále jen ZZT v případě vzduchotechniky lze definovat jako cílené využití energie odpadního vzduchu odváděného z objektu. Využívat lze energii citelného tepla i energii vázanou ve vlhkosti a obvykle se tato energie využívá k úpravě přiváděného vzduchu do objektu.

Jelikož tepelné ztráty nuceným větráním jsou obvykle vyšší než běžné tepelné ztráty konvencí je zde na místě využívat zařízení, které tyto ztráty umožňuje částečně eliminovat. Tyto zařízení se nazývají tepelné výměníky a jejich základním principem je přestup citelného tepla mezi proudícím vzduchem a materiálem výměníku. V případě využití tepla obsaženého ve vlhkosti neboli vázaného tepla, mluvíme o entalpických výměnících.

ZZT lze v základě dělit na systémy rekuperační, kde se teplo předává mezi přiváděným a odváděným vzduchem přímo přes stěnu výměníku a systémy regenerační, kde se teplo z odváděného vzduchu předá do akumulární hmoty a z ní se pak teplo uvolňuje do vzduchu přiváděného [1].

tab. 1-1: Podrobnější rozdělení ZZT systémů [1].

přenos tepla rekuperačními výměníky	přímá výměna tepla	• trubkové výměníky • deskové výměníky
	výměna tepla přes pomocnou tekutinu	• lamelové výměníky s teplotonosnou kapalinou • s chladivem bez pohonu (tepelná trubice) • nucený oběh chladiva (tepelná čerpadla)
regenerační výměníky	akumulační hmota je ve stálé poloze, mění se směr proudu vzduchu	
	akumulační hmota mění polohu, směr vzduchu je stálý	

1.1 Parametry výkonnosti ZZT

Účinnost zařízení ZZT může být velmi výrazně ovlivněna jejich dimenzováním a provozem. Jako u všech výměníků tepla je základním parametrem teplosměnná plocha, tj. velikost výměníku vzhledem k průtoku vzduchu. Je-li pro malý průtok použito velkého výměníku, roste účinnost a klesají tlakové ztráty a naopak. Je pravda, že snižování průtoku způsobí i pokles rychlosti a tím i snížení součinitele přestupu tepla, ale ve většině případů je vliv větší teplosměnné plochy převažující [2].

V případě rovnosti hmotnostních toků q_m přiváděného a odváděného vzduchu je účinnost u ZZT definována pouze pomocí teplot. Je-li množství odváděného vzduchu větší než množství vzduchu přiváděného roste účinnost systému ZZT [2].

Dalším parametrem výrazně ovlivňujícím účinnost rekuperačního výměníku je kondenzace vlhkosti z odváděného vzduchu. Při kondenzaci se předává do přiváděného vzduchu i vázané výparné teplo a roste i součinitel přestupu tepla na stěně výměníku. Proto má kondenzace velmi výrazný vliv na zvýšení teplotní účinnosti [2].

1.1.1 Teplotní rozdíl [3]

Střední logaritmický teplotní rozdíl $LMTD$ se vypočte jako poměr rozdílu teplotních diferencí na vstupu a výstupu a logaritmického podílu těchto dvou teplotních diferencí stanovených rozdílem teplot mezi primárními a sekundární stranou po celé délce výměníku tepla

$$LMTD = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}, \quad (1.1)$$

kde $\Delta T_1 (K)$ je teplotní rozdíl mezi primárním vstupním bodem a sekundárním vstupním bodem nebo výstupním bodem podle obr. 1-2, $\Delta T_2 (K)$ je teplotní rozdíl mezi primárním výstupním bodem a sekundárním výstupním bodem podle obr. 1-2.

Pro ostatní typy proudění, tj. křížový proud; musí být použit pro $LMTD$ korekční součinitel. Takové součinitele je možno najít v literatuře a musí být použity při výpočtu tepelného výkonu.

Konečný teplotní rozdíl musí být stanoven rozdílem mezi teplotou na výstupu primárního okruhu a teplotou na výstupu nebo vstupu sekundárního okruhu v závislosti na typu proudění. Z fyzikálních důvodů musí být konečný teplotní rozdíl kladný.

1.1.2 Tepelný výkon [3]

Přenos tepelného výkonu jako základní princip výměníku tepla je charakterizován přenosem určitého množství tepla za jednotku času definován rovnicí

$$P = k \cdot A \cdot LMTD \cdot F, \quad (1.2)$$

kde P (W) je tepelný výkon, k ($W.m^2.K^{-1}$) je celkový součinitel prostupu tepla, A (m^2) je referenční plocha povrchu přenosu tepla, $LMTD$ je střední logaritmický teplotní rozdíl podle (1.1), F je korekční součinitel pro LMTD podle typu proudění.

Výměník tepla se systémem jednofázových pracovních látek, tj. kde obě pracovní látky jsou kapaliny, vodní pára nebo plyny bez kondenzace nebo varu je charakterizován tepelným výkonem definovaným rovnicí

$$P = q_m \cdot c_p |t_{n1} - t_{n2}| + P_{loss} \quad (1.3)$$

kde q_m ($kg.s^{-1}$) je hmotnostní průtok, c_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku, t ($^{\circ}C$) je teplota, n je index vztažený k jedné nebo druhé straně, P_{loss} (W) je ztráta tepelného výkonu do okolního prostředí nebo výkon z něho získaný.

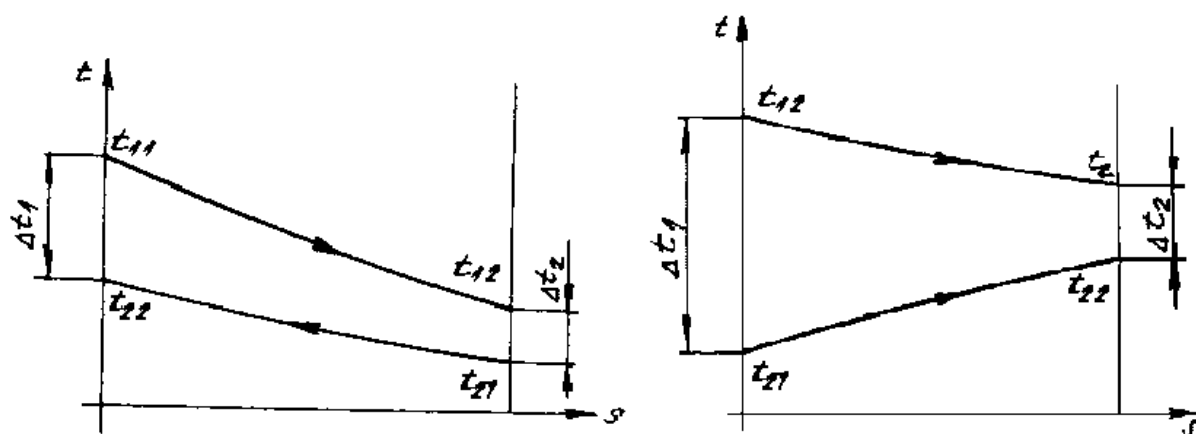
Index n se vztahuje k primárnímu nebo sekundárnímu okruhu výměníku tepla. Tento vztah rovnováhy tepelných výkonů ve výměníku popisuje, že výkon předaný horkou pracovní látkou se rovná výkonu převzatému chladnou pracovní látkou včetně ztrát nebo zisku z okolního prostředí.

1.1.3 Účinnost

Účinnost výměníku je poměr skutečně převedeného tepelného výkonu k největšímu možnému tepelnému výkonu, který je teoreticky možno převést na takovém ideálním výměníku, v němž jsou stejné pracovní látky, stejné hmotnostní průtoky a stejné vstupní teploty podle obr. 1-1[3]

$$P = q_{m1} \cdot c_{p1} \cdot (t_{11} - t_{12}) + P_{loss1} = q_{m2} \cdot c_{p2} \cdot (t_{22} - t_{21}) + P_{loss2}. \quad (1.4)$$

Vyměňený tepelný výkon dosáhne maxima, když jedna z pracovních látek snese změnu teploty rovnou rozdílu mezi vstupními teplotami obou pracovních látek. Tuto maximální změnu snáší pouze pracovní látka s nižší $q_m c_p$ [3].



Obr. 1-1: Teplotní rozdíly pro protiproudý a souproudý výměník [3].

Maximální vyměnitelný výkon bude pro protiproudý výměník

$$P_{max} = (q_m c_p)_{min} \cdot (t_{11} - t_{21}), \quad (1.5)$$

$$\text{jestliže je } q_{m2} c_{p2} = (q_m c_p)_{min} \quad \eta_t = \eta_{t2} = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}. \quad (1.6)$$

V praxi je pak účinnost výměníku definována použitou pracovní látkou, tj. látkou ohřivanou nebo chlazenou, pro kterou není nezbytná minimální hodnota q_{mc_p} . Pouze účinnost definovaná pracovní látkou s q_{mc_p} minimální má fyzikální význam [3].

Pro zařízení se zpětným získáváním vlhkosti je definována vlhkostní účinnost ψ [2].

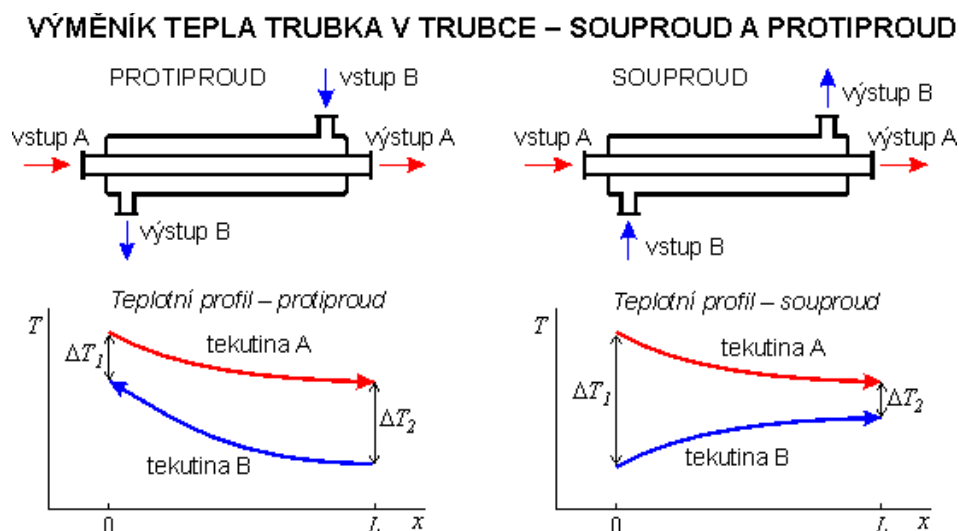
$$\psi = \frac{x_{e2} - x_{e1}}{x_{i1} - x_{e1}} \quad (1.7)$$

kde x_{e1} ($\text{kgp} \cdot \text{kgsv}^{-1}$) je měrná vlhkost přiváděného vzduchu před výměníkem, x_{e2} ($\text{kgp} \cdot \text{kgsv}^{-1}$) je měrná vlhkost přiváděného vzduchu za výměníkem, x_{i1} ($\text{kgp} \cdot \text{kgsv}^{-1}$) je měrná vlhkost odváděného vzduchu před výměníkem.

Těchto skutečností někdy zneužívají někteří výrobci a prezentují v prospektech tzv. maximální účinnosti, kterých však může výměník ZZT dosáhnout pouze za krajně příznivých podmínek (vysoká vlhkost odváděného vzduchu, více odváděného než přiváděného vzduchu, malý průtok vzduchu výměníkem) a nikoli při běžném provozu.

1.2 Rekuperační výměník tepla

Hlavní princip rekuperačního výměníku je založen na přenosu tepelné energie mezi odpadním vzduchem a přiváděným vzduchem přes pevnou stěnu popřípadě přes pomocnou tekutinu. Při tomto principu nedochází k žádnému přenosu hmoty mezi odpadním a přiváděným vzduchem a proto se obecně hodí pro znečištěný odpadní vzduch [4]. Proud odpadního vzduchu vůči přiváděnému proudu vzduchu může být veden proti nebo souběžně. Proto dále rozdělujeme rekuperační výměníky na protiproudé a sounproudé, v praxi se většinou využívá jejich kombinace. Z pohledu konstrukce tepelného výměníku je můžeme rozlišovat na výměníky deskové nebo trubkové.



Obr. 1-2: Sounproudý a protiproudý výměník [5].

1.2.1 Trubkové výměníky [6]

Trubkové výměníky, viz obr. 1-2 ZTZ jsou svým principem podobné deskovým výměníkům, ale teplosměnnou plochou je svazek trubek, kterými protéká vzduch (většinou odváděný) a z vnější strany je svazek obtékán vzduchem přiváděným. Výhodou trubek je jejich vyšší pevnost, což umožňuje i použití méně běžných materiálů, jako je sklo či plasty. Dále mohou být trubkové výměníky použity pro znečištěný vzduch, neboť je jejich čištění snazší. Naproti tomu nevýhodou je menší teplosměnná plocha a z toho plynoucí nižší účinnost. Ta dosahuje hodnot pouze 30 až 50%.

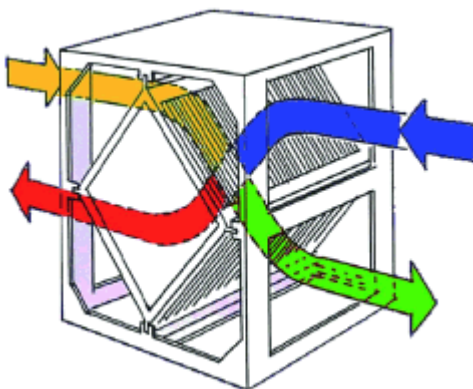
V praxi nacházejí trubkové výměníky ZTZ uplatnění hlavně v technologických provozech, kde je přes ně odváděn znečištěný vzduch či spaliny.

1.2.2 Deskové výměníky [7]

Deskové rekuperační výměníky jsou velmi rozšířené především v zařízeních s menším průtokem vzduchu, pro domácnosti a menší provozovny. Proud odváděného vzduchu prochází výměníkem a od proudu přiváděného vzduchu je oddělen tepelně vodivými profilovanými deskami. Tyto desky jsou teplosměnnou plochou výměníku.

Desky mohou být z různých materiálů (nerez, ocel, hliník, plasty) a bývají slepeny nebo jinak mechanicky spojeny, sletovány nebo svařeny, výjimečně i sešroubovány. Profil desek a šířka průduchů závisí na předpokládaném znečištění vzduchu.

Nejčastější je provedení deskových výměníků s kolmým křížením proudů ve tvaru čtverce, viz obr. 1-3. Tepelná účinnost deskových výměníků s křížením proudů je 40 až 80%.



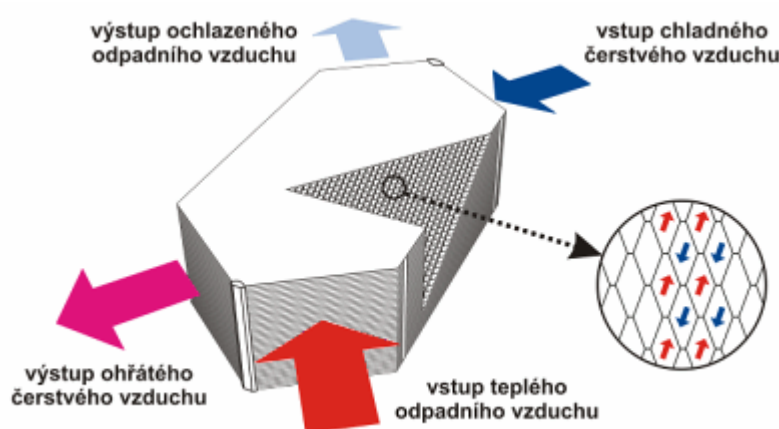
Obr. 1-3: Deskový rekuperátor [2].

Účinnost výměníku závisí především na velikosti teplosměnné plochy, tj. na velikosti výměníku. S rostoucí plochou výměníku však stoupá i jeho cena. Je-li řazeno více výměníků za sebou účinnost zařízení také roste, nicméně současně rostou výrazně i tlakové ztráty. Účinnost deskových výměníků lze zvýšit i zvyšováním součinitele přestupu tepla mezi vzduchem a výměníkem, buď vyšší rychlostí proudění, nebo úpravami (zdrsněním) povrchů. Avšak i tato řešení většinou vedou k vyšším tlakovým ztrátám.

Při rozdílném tlaku přiváděného a odváděného vzduchu může diferenční tlak způsobit pronikání vzduchu netěsnostmi mezi oběma proudy anebo i poškození výměníku.

Deskové výměníky nemají žádné mechanické pohyblivé části a vlastní výměník není možné přímo vypnout či regulovat. Vzhledem k tomu, že určitou část roku není výhodné provozovat ZZT osazují se většinou deskové výměníky bypassem (obchodem) s uzavírací klapkou, který zajistí průchod přiváděného vzduchu mimo výměník.

V deskovém výměníku jsou proudy přiváděného a odváděného vzduchu odděleny, viz obr. 1-4. Proto jsou tyto systémy vhodné i pro případy, kde je odváděný vzduch znečištěn pachy, choroboplodnými zárodky, vlákny, prachem, tukem či olejem ale současně nepatrný přenos znečištění do přiváděného vzduchu nevadí. V případě pomocného detekčního zařízení či speciální konstrukce je lze na znečištěný vzduch použít i tam, kde není přípustný žádný přenos škodlivin. Deskové výměníky se však v zásadě nehodí tam, kde není dovolen přenos škodlivin ani při poruše nebo defektu zařízení. Deskové výměníky nejsou vhodné ani pro příliš znečištěný vzduch vzhledem k jejich špatné čistitelnosti



Obr. 1-4: Funkční schéma protiproudého rekuperačního výměníku [2].

Deskové výměníky neumožňují přenos vlhkosti, a to vzhledem k tomu, že materiály desek jsou většinou nepropustné. Speciální případ deskového výměníku s přenosem vlhkosti jsou výměníky z nasákových materiálů dodávané některými výrobci klimatizačních jednotek.

1.2.3 Rekuperační výměníky lamelové s pomocnou tekutinou [1]

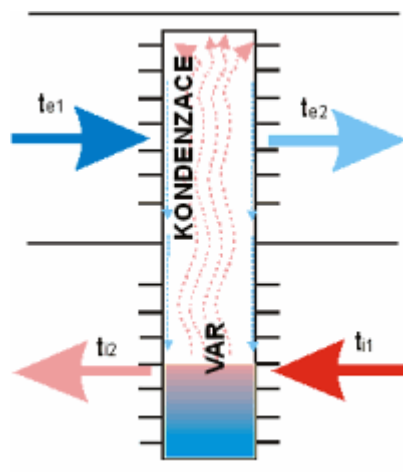
Tyto výměníky jsou poměrně laciné. Příslušenství tvoří trubkové propojení výměníků s čerpadlem a expanzní nádobou. Výjimečně se vybavují tyto okruhy automatickou regulací. Jako teplotonosné kapaliny se využívají různé vodní roztoky s nízkou teplotou tuhnutí. Oba proudy vzduchu jsou od sebe zcela odděleny a mohou být i značně vzdálené. Musí být provedena opatření proti zamrznutí kapaliny a tvoření námrazy na lamelách. Dále musí být zajištěna filtrace vzduchu, vstupujícího do výměníku. Jejich teplosměnné plochy jsou těžko čistitelné a po zanesení se musí většinou vyměnit. Výhodou tohoto způsobu zpětného získávání tepla dále je, že je možno vzájemně propojovat i několik sekcí a to jak vzduchu přiváděného, tak odváděného.

1.2.4 Tepelné trubice [1]

Tepelné trubice jsou vhodné při menších průtocích vzduchu, protože pro jejich použití musí být vzduchovody přiváděného a odváděného vzduchu umístěny vedle sebe. Tepelné trubice jsou založeny na přenosu tepla při změně skupenství jejich náplně. Pro teploty -20 až 30°C jsou nejvhodnější kapaliny čpavek a R 22. Pro vyšší teploty, např. v sušárenství lze používat např. i vodu.

Konstrukčně je tepelná trubice žebrovaná trubka, obvykle hliníková s vyválným žebrováním, která obsahuje náplň příslušné kapaliny, viz obr. 1-5. Obsah bývá přibližně $1/3$ výšky trubky. Každá trubka je samostatným výrobkem, který se jednotlivě vkládá do příslušného rámu. Snadné vyjímání je nutné pro výměnu trubek (poruchovost je způsobena únikem pracovní tekutiny).

Tepelné trubice se dnes vyrábějí jako vertikální, v nichž zkondenzovaná kapalina stéká vlastní tíží do kapalinového prostoru a horizontální, v nichž je kapalina transportována kapilárními silami. V tomto případě je vnitřní stěna trubky opatřena vhodnou kapilární soustavou. U vertikálních tepelných trubic je možný přenos tepla zdola nahoru, u horizontálních na obě strany. Po konstrukční stránce nebývá vhodně řešeno těsnění rozhraní obou proudů vzduchu, takže tlaky na obou stranách by neměly být příliš rozdílné. Výhodou kapilárních trubic je, že nepotřebují k provozu oběhové čerpadlo.



Obr. 1-5: Schéma tepelné trubice [6].

1.2.5 Tepelné čerpadla [2]

Patří k cenově nejnáročnějším typům ZZT. Přenos tepla probíhá při využití kondenzačního a výparného tepla chladivové náplně za práce pohonu, čímž je v tomto případě kompresor tepelného čerpadla. Mohou se použít systémy se stavebně oddělenými výměníky výparníku a kondenzátoru (podobně jako v případě kapalinových okruhů), nebo tyto mohou být umístěny v jedné vzduchotechnické jednotce. Setkáváme se s aplikacemi, kdy výměníky tepelného čerpadla jsou umístěny i ve vzduchotechnických jednotkách s deskovými rekuperátory, kde ještě více vychlazují odpadní vzduch za rekuperátorem a dohřívají přívodní vzduch za rekuperátorem. Takováto jednotka pak nemusí mít ohřívač za rekuperací, aby se přiváděl vzduch o stejné teplotě, jako se odvádí.

Velmi časté je využití tepelných čerpadel vzduch – vzduch pro chlazení či ohřev vnitřního vzduchu nebo u třítrubkových systémů s proměnným průtokem chladiva, kdy předávání tepla se děje nejen vůči venkovnímu prostředí, ale také navzájem mezi rozdílnými teplotními zónami uvnitř budovy. Tyto systémy však neodebírají teplo ze vzduchu odváděného a většinou nepracují s výměnou vzduchu v prostorách, proto se nejedná o ZZT tak, jak ho chápeme v oboru větrání a klimatizace. Protože je nutné při použití těchto systémů dbát také na požadavky větrání, z hlediska technologických či hygienických, je nutno chápat, že toto není ZZT tak jak je definováno, tedy to, které odebírá teplo z odváděného vzduchu.

1.3 Regenerační výměníky

Regenerační výměníky mají ze všech alternativních řešení zpětného získávání tepla nejvyšší účinnost. Je to způsobeno tím, že velikost teplosměnných ploch je proti jiným výměníkům mnohonásobně větší [1]. Regenerační systém zpětného získávání tepla využívá hmoty výměníku k akumulaci tepelné energie a případně i vlhkosti. Teplo se střídavě předává z odpadního vzduchu do hmoty a odevzdává do přírodního vzduchu, to znamená, že teplosměnný povrch hmoty je omýván střídavě odpadním i přírodním vzduchem [4].

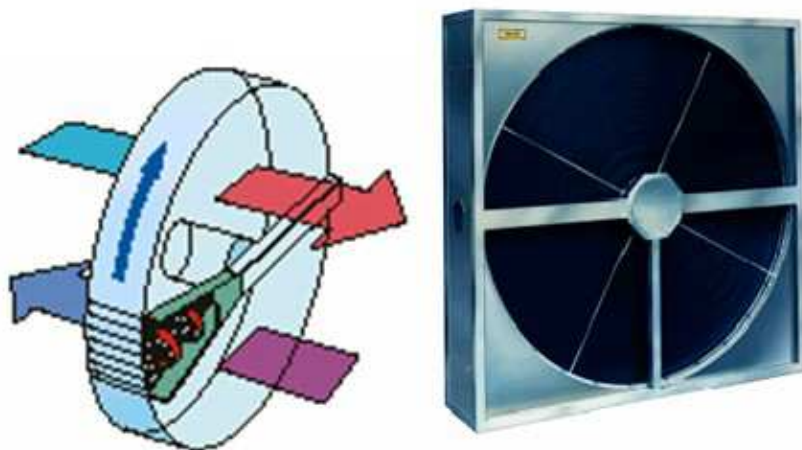
V současnosti se nejčastěji používají dva systémy a to s použitím rotačního regeneračního výměníku, kdy akumulační hmota je tvořena válcem s průtočnými kanálky, který se otáčí v prostoru mezi vzduchovými kanály a střídavě zasahuje půlkou objemu hmoty do obou kanálů. Druhým principem je přepínání, kdy akumulačním blokem protéká střídavě pomocí přepínacích klapek odpadní a přírodní vzduch. Aby nedocházelo k nerovnoměrnostem proudění, tak jsou obvykle použity dva shodné akumulační bloky a klapkový systém přepíná proudění střídavě mezi nimi [4].

Vlastností regeneračních výměníků je částečný přenos hmoty. Cíleným využitím může být tato vlastnost pro některé aplikace pozitivní, protože umožňuje z odpadního vzduchu přenášet vlhkost. V případě rotačních regenerátorů se upravuje povrch hmoty tak, aby přenos vlhkosti byl co nejvyšší. V některých případech lze dosáhnout účinnosti přenosu vlhkosti 60-80% [4].

1.3.1 Rotační regenerační výměník [6]

Regenerační výměníky s rotující akumulační hmotou nacházejí velmi široké uplatnění především u větších klimatizačních zařízení. Jejich hlavní výhodou je velmi vysoká účinnost, relativně malé rozměry a možnost přenosu nejen tepla citelného, ale i vlhkosti (tepla vázaného).

Rotující akumulační hmota regeneračního výměníku ve tvaru válce s drobnými kanálky rotuje mezi proudem přiváděného a odváděného vzduchu, viz obr. 1-6. Rotující teplosměnná a akumulační hmota je upevněna v rámu a poháněna elektrickým motorem. Akumulační rotor může být z řady materiálů. Často je z hliníkového plechu, používají se i plasty nebo tvrzená papírovina. Pro přenos vlhkosti se povrch teplosměnné plochy upravuje nanesením hydrofobické vrstvy.



Obr. 1-6: Schéma a fotografie rotačního regeneračního výměníku [6].

Při průchodu z odváděného do přiváděného vzduchu prochází rotor tzv. pročišťovací zónou. Zde jsou kanálky profukovány proudem čistého vzduchu, čímž se snižuje přenos nečistot z odváděného vzduchu. Pro správnou funkci pročištění a zamezení pronikání odváděného vzduchu netěsnostmi okolo rotoru, je třeba zajistit mírný přetlak přiváděného vzduchu oproti vzduchu odváděnému.

Teplotní účinnost rotačních výměníků bez hyroskopické hmoty dosahuje 60 až 80%, vlhkostní účinnost 10 až 20%. U rotorů s hyroskopickou vrstvou vzrůstá vlhkostní účinnost na 60 až 70%.

Rotační výměníky je možné snadno regulovat nebo zcela vypnout změnou otáček. Aby se zabránilo nestejnoměrnému opotřebení rotoru, zajišťuje většinou regulace občasné otočení rotoru i v době, kdy je mimo provoz. V rotačních výměnících nejsou proudy přiváděného a odváděného vzduchu bezpečně odděleny a existuje proto vysoké riziko přenosu škodlivin. Z toho důvodu nejsou rotační výměníky vhodné pro případy, kde je odváděný vzduch znečištěn pachy, choroboplodnými zárodky, vlákny, prachem, tukem či olejem. Rotační výměníky lze použít i tehdy, je-li přípustný nízký přenos škodlivin. V takovém případě je třeba doplnit o pomocné detekční zařízení či využít speciální konstrukce.

1.3.2 Regenerační výměníky přepínací [6]

Přepínací výměníky regenerační jsou konstruovány tak, že akumulární hmota zůstává ve stejné poloze a přepínají se proudy vzduchu. Přepínací výměníky mají dvě komory naplněné akumulární hmotou a soustavu klapek, která přepíná přiváděný a odváděný vzduch tak, aby procházel přes tyto komory střídavě. Tyto výměníky dosahují vysokých účinností, ale jejich konstrukce je poměrně složitá a jejich rozměry jsou větší.

Teplotní účinnost přepínacích výměníků je 60 až 90%, vlhkostní účinnost může být 50 až 70 %. U přepínacích výměníků nelze zabránit přenosu škodlivin z odváděného vzduchu do vzduchu přiváděného, proto je lze použít pouze v případě, že odváděný vzduch není znečištěn, nebo tam, kde je nízký přenos škodlivin přípustný.

2. Měření rekuperačních výměníků

2.1 Rešerše platných norem

2.1.1 Norma ČSN EN 305 [3]

Název normy: Definování výkonnosti výměníků tepla a všeobecné metody zkoušek pro stanovení výkonnosti výměníku tepla.

Norma obsahuje všeobecné pojmy a výpočty používané při stanovení výkonnosti výměníku tepla včetně související teorie a všeobecných zkušebních postupů. Ke stanovení výkonnosti využijeme naměřené hodnoty charakteristických veličin jako je průměrná teplota, kterou použijeme ve výpočtu středního logaritmického rozdílu pro křížový výměník (ten norma neobsahuje). Dále se bude počítat s tlakem a tlakovým rozdílem. Tyto hodnoty se využijí ke stanovení výpočtu tepelného výkonu a účinnosti [3].

V kapitole 4 jsou vypsány základní definice charakteristický pro určení výkonnosti výměníků. Kapitola 5 už pracuje přímo s parametry určující výkonnost, zabývá se pouze početními vztahy jako například: teplotní rozdíl, tepelná účinnost a účinnost výměníku. Měření charakteristických veličin, jako je teplota, tlak a průtok je popsáno v normě [9] týkající se popisu a měření [3].

V kapitole 6 jsou shrnuty všeobecné informace o zkušebních postupech. Způsoby zkoušení výměníků se dělí na tři kategorie:

- I typová zkouška nového výměníku tepla,
- II přejímací zkouška nového výměníku tepla,
- III zkoušení výkonu provozovaného výměníku tepla.

2.1.2 Norma ČSN EN 306 [9]

Název normy: Metody měření parametrů potřebných pro stanovení výkonnosti výměníků tepla.

Norma popisuje způsoby a přesnosti měření teploty, tlaku, jakosti kapalin, hmotnostního toku různých kapalin a způsob stanovení tlakové ztráty při jejich průchodu výměníkem. Zapojení měřicí techniky je ilustrováno na vzorových příkladech a na zpracování naměřených údajů [9].

Kapitola 3 uvádí použité definice, které v následující normě [10] platí. Jedná se o definice pro měření: teploty, průtoku, tlaku a vlhkosti a suchosti pracovní látky. Na konci odstavce je uvedena všeobecná terminologie. Čtvrtá kapitola pojednává o četnosti a periodě odběru vzorku.

V následujících dalších kapitolách jsou rozebrané pokyny a požadavky pro odečet teploty, průtoku, tlaku a vlhkosti a tvorbě vyhodnocovacího protokolu.

2.1.3 Norma ČSN EN 308 [10]

Název normy: Metody zkoušek pro ověření výkonnosti zařízení pro regeneraci tepla.

Tato evropská norma stanoví metody, které mají být použity pro laboratorní zkoušení zařízení pro regeneraci tepla metodou vzduch-vzduch. Tím jsou dány požadavky na provedení těchto zkoušek a určena vstupní kritéria, požadovaná pro zkoušky na ověření údajů o výkonu, předaných výrobcem [10].

Norma dále stanovuje metody zkoušek pro určení:

- vnější netěsnosti,
- pronikání odsávaného vzduchu do vzduchu dodávaného uvnitř zařízení při daném tlakovém rozdílu mezi vzduchovými kanály u regeneračních zařízení,
- poměry teplot a vlhkosti,
- tlakové ztráty na odsávané a přívodní straně vzduchu.

2.1.4 Norma ČSN EN 5167

Název normy: Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu.

2.1.4.1 Část - 1: obecné principy a požadavky [11]

Norma stanovuje termíny, značky a zavedení obecných principů pro metody měření a výpočet průtoku tekutin proudících v potrubí pomocí snímačů diferenčního tlaku (clon, dýz a Venturiho trubic) vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. Také zde nalezneme obecné požadavky na metody měření, montáže a stanovení nejistoty měření průtoku. Stanovuje obecně specifikované rozmezí velikosti potrubí a Reynoldsova čísla, pro něž jsou tyto snímače užívány [11].

Měření hmotnostního toku q_m škrtícími orgány

Princip metody měření spočívá v zabudování primárního prvku (v našem případě clony) do potrubí, v němž plným průřezem protéká tekutina. Zabudování primárního prvku způsobí rozdíl statických tlaků mezi přední stranou a hrdlem nebo zadní stranou primárního prvku. Průtok může být stanoven z naměřených hodnot tohoto tlakového rozdílu a ze znalostí vlastností proudící tekutiny, jakož i z okolností, za nichž je primární prvek použit. Předpokládá se, že primární prvek je geometricky podobný primárnímu prvku, který byl kalibrován a že podmínky použití jsou stejné viz norma [12] a [11].

Hmotnostní tok q_m může být stanoven, pokud se vztahuje k diferenčnímu tlaku v mezích nejistoty, užitím rovnice

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}, \quad (2.1)$$

kde C je součinitel průtoku, β je poměr průměrů, D (m) je průměr potrubí, Δp (Pa) je diferenční tlak, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota tekutiny, ε je součinitel expanze.

Výpočet průtoku, což je ryze aritmetická operace, se provede tak, že jednotlivé členy na pravé straně rovnice (2.1) se nahradí jejich číselnými hodnotami. V našem případě C závisí na Re , které samo závisí na q_m . V takových případech se konečná hodnota C a tím i q_m získá iterováním [11].

Při výpočtu hmotnostního průtoku z rovnice (2.1) je potřeba nejprve vyjádřit poměr průměrů na cloně β , diferenci tlaku na cloně Δp , hustotu tekutiny ρ , součinitel expanze ε a součinitel průtoku C .

Poměr průměrů β je poměr průměrů clonového otvoru nebo hrdla primárního prvku k vnitřnímu průměru měřicího potrubí před primárním prvkem [11]

$$\beta = \frac{d}{D}, \quad (2.2)$$

kde d (m) je průměr otvoru clony za provozních podmínek.

Diferenční tlak Δp je rozdíl mezi statickými tlaky měřenými v odběrech tlaku ve stěně, z nichž jeden je před a druhý za primárním prvkem, vloženým do přímého potrubí, jímž protéká tekutina, při uvažování všech rozdílů ve výšce odběrů před a za primárním prvkem [11]

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (2.3)$$

kde p_1 (Pa) je statický tlak tekutiny před primárním prvkem (clona), p_2 (Pa) je statický tlak tekutiny za primárním prvkem (clona).

Hustota tekutiny ρ může být změřena přímo nebo vypočtena z údaje příslušné rovnice (2.4) známého absolutního statického tlaku, teploty a složení tekutiny v tomto místě

$$\rho = \frac{p_v}{r_v \cdot T} + \frac{p_p}{r_p \cdot T}, \quad (2.4)$$

kde p_v (Pa) je parciální tlak suchého vzduchu, r_v ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) je měrná plynová konstanta suchého vzduchu, p_p (Pa) je parciální tlak vodní páry, r_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) je měrná plynová konstanta vodní páry, T (K) je termodynamická teplota.

Součinitel expanze ε se používá k výpočtu korekce u stlačitelných tekutin. Pro clony uvedené v normě [12] se zakládají na experimentálně stanovených datech. Empirický vzorec uvedený v odstavci 5.3.2.2 normy [12] pro výpočet součinitele expanze ε je použitelný pouze v rozsahu omezení specifikovaných v odstavci 5.3.1 téže normy. Rovnice (2.5) je použitelná jen, pokud $p_2/p_1 \geq 0,75$

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,0256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right], \quad (2.5)$$

kde κ je izentropický exponent.

Reynoldsovo číslo potrubí Re_D je bezrozměrový parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami v potrubí před primárním prvkem [11]

$$Re_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu \cdot D}, \quad (2.6)$$

kde μ (Pa·s) je dynamická viskozita.

Dynamická viskozita μ je síla tření, která vzniká mezi dvěma vrstvami proudící kapaliny. Použijeme ji k dosazení do rovnice (2.8)

$$\mu = \frac{1,49 \cdot T^{1,5}}{(T+117)} \cdot 10^{-6}. \quad (2.7)$$

Součinitel průtoku C stanovený pro proud stlačitelné tekutiny, který udává poměr skutečného průtoku primárním prvkem k teoretickému průtoku; pro stlačitelné tekutiny je dán Reader-Harris/Gallagherovou rovnicí (1998) – rovnice (2.6), uvedenou v odstavci 5.3.2.1 normy [12]

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A) \cdot \beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right) + (1 - 0,11A) \cdot 0,043 \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}. \quad (2.8)$$

kde A je poměr počtů průměrů β k Reynoldsovu číslu podle rovnice (2.9).

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0,8} \quad (2.9)$$

Součinitel průtoku C (2.8) je závislý na Re_D (2.6), který je následně závislý na q_m (2.1). V tomto případě je nutné stanovit hodnotu C a tím i q_m iterováním,

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8. \quad (2.10)$$

Postup iterování spočívá v postupném přibližování se ke správné hodnotě opakováním výpočtu se zpřesňující se výsledkem. Nejprve se provede odhad jednoho parametru, v našem případě jako odhad poslouží upravená rovnice C (2.10) vytvořená z rovnice (2.8) odebráním členů obsahující Re_D . Výsledek je dosazen do rovnice q_m (2.1), ze které už je možné vypočíst Re_D (2.6) a to následně použít již v rovnici C (2.8). Nová hodnota C je zase dosazena do rovnice q_m a celý postup se opakuje do dosažení přesného výsledku. Ve většině případů postačí čtyři iterace. Potom už je hodnota q_m natolik přesná, že je možno ji považovat za správnou.

2.1.4.2 Část – 2: clony [12]

Tato část normy specifikuje geometrii a způsob užití (podmínky montáže a provozu) clon, jsou-li vloženy do potrubí, jehož průřez je proudem zcela zaplněn, za účelem stanovení průtoku tekutiny. Norma také podává informace potřebné pro výpočet průtoku. Průtok v celém měřicím průřezu musí být podzvukový a ustálený, kde tekutina může být považována za jednofázovou. Tato norma není vhodná při měření pulzujícího průtoku [12]. Doporučení normy jsou citována v dalším textu.

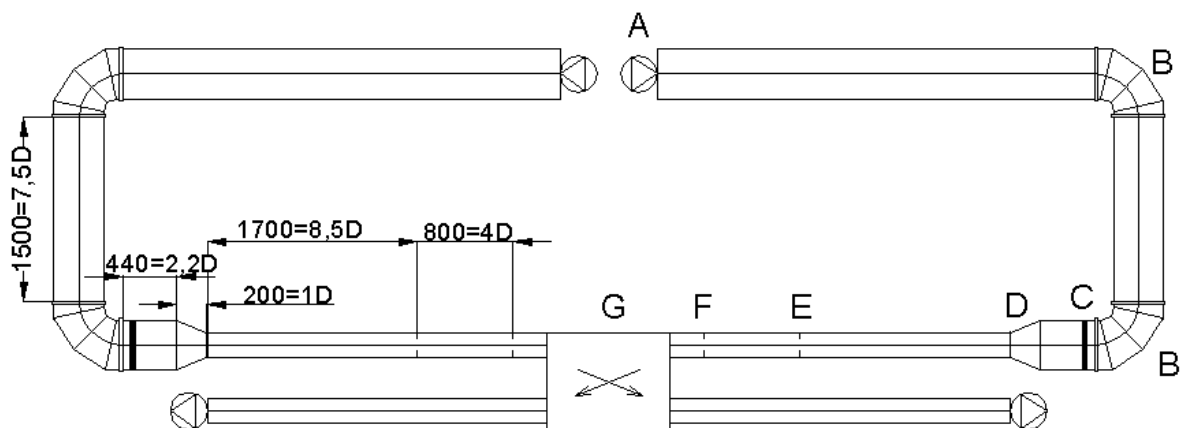
2.1.5 Norma ČSN EN 5168 [13]

Název normy: Měření průtoku tekutin – Postupy pro vyhodnocení nejistot

Tato mezinárodní norma informuje o obecných principech a popisuje postupy pro vyhodnocení nejistoty průtoku nebo množství tekutiny.

2.2 Popis stávajícího stavu tratě

Měřicí trať, jejíž schéma je na obr. 2-1, je umístěna v laboratoři a zabírá prostor přibližně o délce 9 a výšce 3 metrů. Potrubí užitá v sestavě je kruhového průřezu ze spirálovitě vinutého pozinkovaného plechu. Potrubí se v trati vyskytuje o dvou průměrech a to 400 mm dále označován jako „2D“ a 200 mm, značeno jako „D“. Na začátku tratě je umístěn ventilátor, který vhání vzduch do soustavy a je rovněž využíván k regulaci průtoku. Symetrická polovina tratě se skládá ze dvou 90° kolen průměru 2D, nenormalizovaného usměrňovače s velikosti stejného průměru, soustředném zúžení potrubí z 2D na D, clony MATTECH velikosti 200/100 pro dosažení diferencí tlaku a clony DIRU 200 určené ke škracení proudu vzduchu fungující jako regulace. Výměník je usazen do výměníkového boxu, kde je utěsněn a izolován.



Obr. 2-1: Schéma stávající měřicí tratě: *A – ventilátor, B – 90° kolena, C – nenormalizovaný usměrňovač, D – soustředné zúžení z 2D na D, E – clona MATTECH 200/100, F – škrťací clona DIRU 200, G – výměňkový box.*

Rozměry tratě byly měřeny posuvným pásmem a byly zaokrouhleny proto je lze brát pouze jako orientační, i když pro následné srovnání s normou postačující.

2.3 Hodnoty v rozporu s normou

V trati je užit nenormalizovaný usměrňovač proudění vlastní výroby, uvedený na obr. 2-2, který je podle normy nepřípustný, bere se tedy v potaz, že usměrňovač zde není přítomen. Proto se budou parametry přímých délek tratě porovnávat s hodnotami uvedenými v tabulce přílohy A, která je uvedená pro případy bez užití usměrňovače.



Obr. 2-2: Nenormalizovaný usměrňovač proudění.

Z naměřené vzdálenosti $7,5D$ mezi dvěma koleny se určil sloupec 6, který zahrnuje hodnoty menší než $5D$, ale je nutno brát v potaz, že v tomto úseku je průměr potrubí rovno $2D$ takže po přepočtu tento sloupec zahrnuje hodnoty menší než $10D$. Poměr průměrů $\beta=0,50$ pro clonu MATTERCH 200/100.

Poměr průměrů β	Dvě kolena 90° v kolmých rovinách ($5D > S$) ^{a, b}	
1	6	
	A ^e	B ^f
$\leq 0,20$	34	17
0,40	50	25
0,50	75	34
0,60	65 ^h	25
0,67	60	18
0,75	75	18

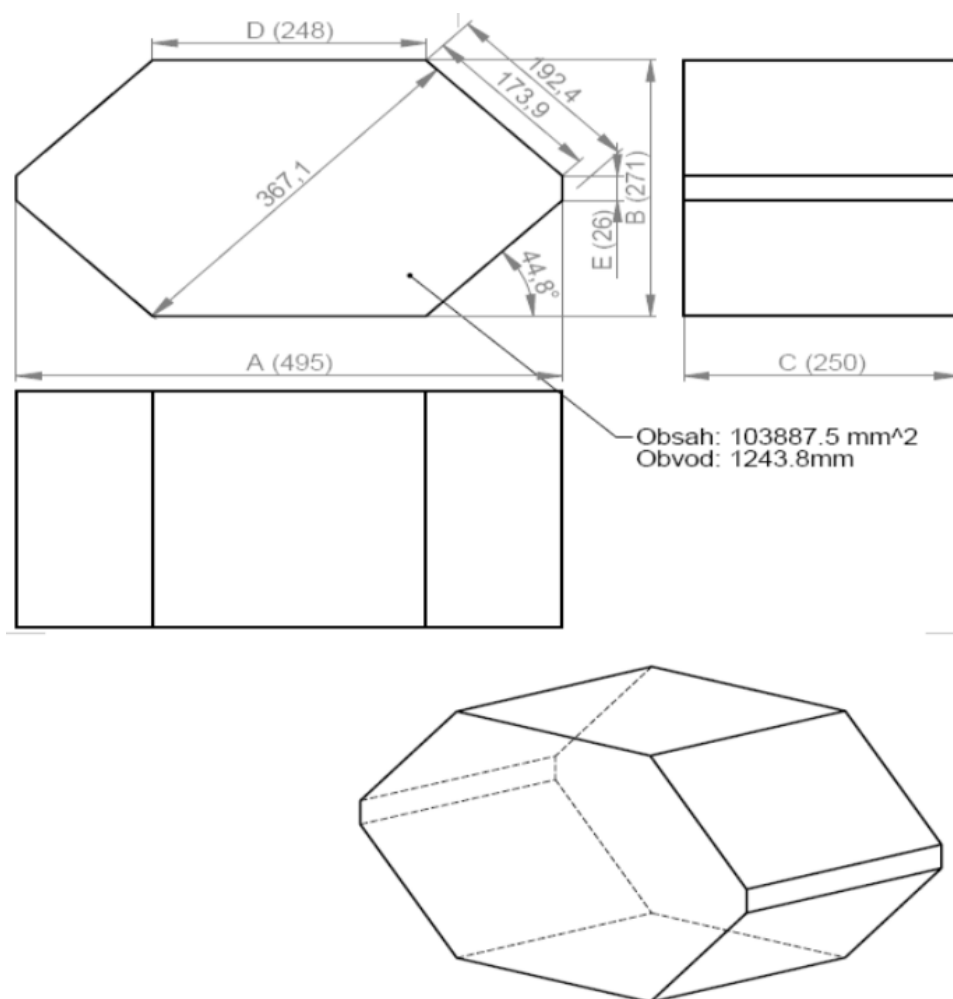
Obr. 2-3: Sloupec 6 z tabulky přílohy A.

První rozpor byl shledán u 90° kolen, kde je menší poloměr křivosti než 1,5 průměru potrubí, jak je uvedeno v tabulce přílohy A. Přímá délka potrubí mezi body C a D naměřena $2,2D$ nesplňuje požadavek minimální délky $25D$, což je nejmenší přípustná hodnota a byla získána podle pokynu v normě [5], odstavec 6.2.8 a, 2. Délka tvarovky zúžení (bod D) podle normy má odpovídat minimálně velikosti $1,5D$, což není splněno. Vzdálenost škrťací clony DIRU 200 od konce tvarovky zúžení (bod D) podle normy má být rovno minimální délce $6D$, na trati změřeno $4D$.

Vzhledem k tomu že hodnoty naměřené jsou v rozporu s hodnotami uvedenými v normě [11], není možné určit nejistotu průtoku pro stávající stav tratě, a je nutné provést její úpravu.

2.4 Popis měření

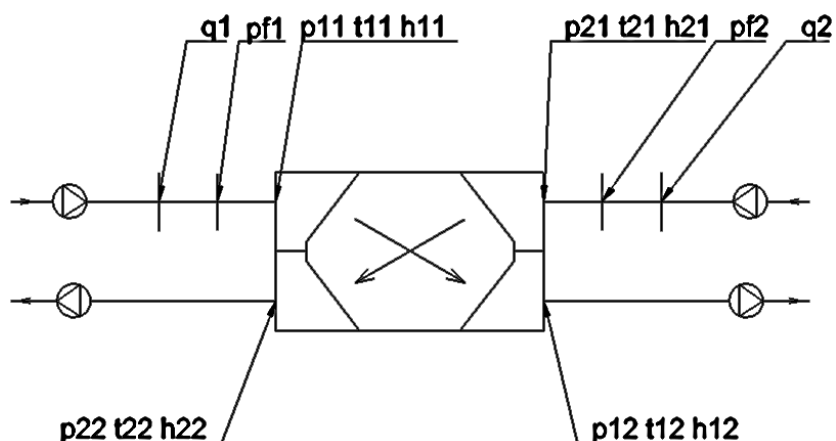
Veličiny zde uvedené jako naměřené, byly změřeny dne 18. 09. 2012 a zanalyzovaný soubor dat je uveden v příloze C. Měření probíhalo na komerčním rekuperačním deskovým entalpickým výměníku uvedeném na obr. 2-4.



Obr. 2-4: Měřený komerční výměník.

Výměník je uložen v boxu, kde je pevně upevněn, aby nedocházelo k náhodnému pohybu. Box musí být dále dobře izolován, kvůli zmenšení tepelné ztráty konvekci. Připojené kanály příváděného a odváděného vzduchu musí být dokonale utěsněny, aby nedocházelo k poklesu statického přetlaku.

Snímače jsou zabudovány podle zjednodušeného schématu na obr. 2-5. Na trati dochází k odběru diferenciálního tlaku na cloně. Takto získané hodnoty se dále použijí ke stanovení hmotnostního průtoku tratí. Teplota, statický tlak a vlhkost jsou odebírány přímo na vstupu a výstupu do výměňkového boxu.



Obr. 2-5: Schéma zabudování měřidel v trati.

Snímače: t - teploty, q - průtoky, p - tlaku, h - vlhkosti, pf - škrcení

11 - vstup přiváděného vzduchu

12 - výstup přiváděného vzduchu

21 - vstup odváděného vzduchu

22 - výstup odváděného vzduchu

Seznam užitých měřidel

- ústředna	ALMEMO 5690-2
- teplotní čidla:	8xFPA 10L0250 G5 ZA9030-FS2
- čidla tlaku:	4xFDA602-S1K
- čidlo atmosférického tlaku:	FDA 612-SA
- čidla vlhkosti/teplota :	4xFHA646-E2C
	8xFHAD36R
- centrická clona :	2xMATTECH 200/100
	2xDIRU 200/100

2.4.1 Sběr informací [14]

Sběr informací je prováděn pomocí měřicí ústředny ALMEMO 5690 – 2 od firmy Ahlborn, uvedený na obr. 2-6. Tato ústředna je naprogramovaná pro určité veličiny a pak už stačí pouze připojení příslušného čidla. Je vybavena 9 galvanicky oddělenými vstupy, na které je možno napojit čidla s více jak 70 měřicími rozsahy pro bezpočet měřících možností. Počet vstupů lze rozšířit až na 99.



Obr. 2-6: Měřicí ústředna ALMEMO 5690-2.

Přístroj je obsluhován buď pomocí 9 kláves a LCD displeje, na kterém se zobrazuje příslušné menu, nebo počítačem. V ústředně jsou nastaveny 3 menu, - měřicí, programové a asistenční menu. Ústředna měří v reálném čase (nastaven datum a čas) a hodnoty ukládá buď přes čtečku karet na paměťovou kartu, nebo do paměti propojeného počítače. Shodný čas a datum je nastaven i v počítači a díky tomu jsou výsledky porovnatelné. Bohužel není možné spustit všechna měření naráz.

Senzory (ALMEMO konektory) jsou použitelné bez dalšího opatření. Stačí je pouze připojit a zajistit šroubky, aniž bychom museli provádět jakékoliv speciální nastavování. Pro každé měření jsou také stanoveny maximální a minimální hodnoty měření s údajem času a data. Přístroj může být napájen síťovým adaptérem ze sítě 230 V nebo pomocí 8 NiMH akumulátory (9,6 V/ 1600 mAh).

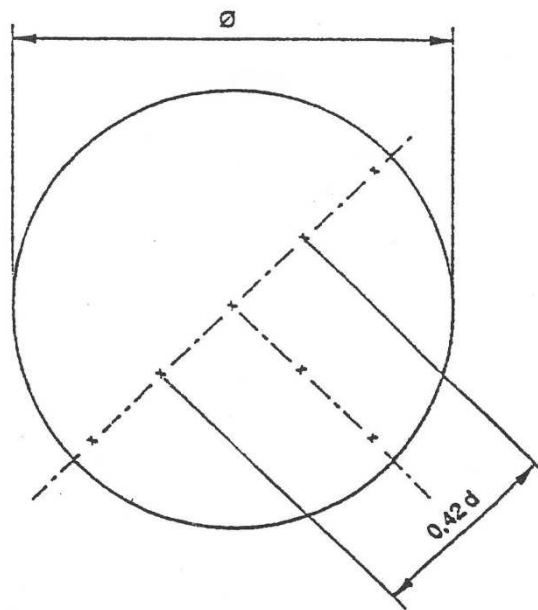
2.4.2 Teplota

Teplota je měřena odporovým snímačem teploty FPA10L0250. Odporové teploměry využívají změnu elektrického odporu kovů a polovodičů způsobenou změnou teploty. Tento výpočet je často proveden přímo na přístroji, který je opatřen snímačem se stabilizovaným zdrojem napájecího proudu a ukazatelem teploty. Snímač a doplňující zařízení jsou obvykle přizpůsobeny pro připojení na systém pro záznam údajů. Odporové teploměry měří absolutní teplotu přímo a nevyžadují žádné referenční teploty, dále jsou použitelné s vysokou přesností a jsou často používány jako referenční teploměry pro kalibraci. Jsou považovány za stabilní po velmi dlouhou dobu [9].



Obr. 2-7: Odporový snímač teploty FPA10L0250.

Odporový snímač FPA10L0250 od firmy Ahlborn je vyroben z platiny a jeho rozsah teplot je od - 200 - 600 °C, průměr senzoru je 1 mm. Snímače byly tři a byly rozmístěny v průměru potrubí k pokrytí všech teplotních vrstev v rovině. Podle normy[10], odstavce 6.4 se uvádí, že v každé rovině měřící plochy se má nacházet 5 bodů odběru teploty k dosažení nejlepšího popisu teplotní situace uvnitř profilu viz. Obr. 2-8. Bylo by tedy vhodné pro příští měření doplnit teploměry do měřeného profilu, aby jejich počet byl 5.



Obr. 2-8: Zabudování snímačů teploty.

Profil na Obr. 2-9 byl zabudován do výměníkového boxu na vstup přiváděného vzduchu podle Obr. 2-6 ke zlepšení teplotního profilu uvnitř průřezu potrubí. Proud vzduchu se díky zahnutým lopatkám zkroutí a dojde k jeho promísení, díky kterému se teplotní profil uvnitř potrubí stane homogennějším.



Obr. 2-9: Profil na promísení vzduchu.

2.4.3 Atmosférický tlak

V laboratoři je atmosférický tlak měřen snímačem atmosférického tlaku typu FDA 612 SA, uvedený na obr. 2-10. Měřicí rozsah snímače je 700 až 1050 mbar. Celkový rozsah je od 0 do 1050 mbar. Přesnost snímače je $\pm 0,5 \%$ z rozsahu. Teplotní rozsah, při kterém je snímač schopen plnit funkci, je od -10 do 60°C . Čidlo je zapojeno přímo do ústředny ALMENO 5690-2, kde dochází k vyhodnocování naměřených dat.



Obr. 2-10: Snímač atmosférického tlaku FDA 612 SA.

2.4.4 Měření hmotnostního toku

Měření průtoku plynu v přívodním a odvodním potrubí je provedeno pomocí snímání diferenčního tlaku za centrickou clonou. Diferenční tlak je měřen snímačem FDA 602 SK1, uvedený na obr. 2-11. Rozsah snímače je ± 1250 Pa. Rychlostní rozsah je od 1 do 40 m/s. Přesnost snímače je $\pm 0,5$ z konečné kladné hodnoty. Teplotní rozsah, při kterém je čidlo schopné plnit funkci, je od -10 do 60°C . Čidlo je zapojeno přímo do ústředny ALMENO 5690-2, kde dochází k vyhodnocování naměřených dat.



Obr. 2-11: Snímač diferenčního tlaku FDA 602 SK1.

2.4.5 Měření vlhkosti

Měření vlhkosti je prováděno kapacitním snímačem FHA 646 E2C, uvedený na obr. 2-12. Kapacitní snímač je postaven na principu kondenzátoru s dielektrikem z polymeru, který má hygroskopické vlastnosti. Jedna z elektrod je provedená tak, že umožňuje vodním parám z okolního vzduchu difundovat do polymeru. Polymer absorpcí vody mění své dielektrické vlastnosti, tím se mění i kapacita kondenzátoru, ze které se vyhodnotí vlhkost [15].



Obr. 2-12: Snímač vlhkosti FHA 646 E2C.

Kapacitní snímač FHA 646 E2C je z nerezové oceli, má průměr 12 mm a je dlouhý 270 mm. Snímač má rozmezí od 0 do 100% relativní vlhkosti. Přesnost snímače je $\pm 2\%$ z relativní vlhkosti, při relativní vlhkosti menší než 90% v teplotě 25 ± 3 °C. Teplotní rozsah, při kterém je čidlo schopné plnit funkci, je od - 10 do 80 °C. Čidlo je zapojeno přímo do ústředny ALMENO 5690-2, kde dochází k vyhodnocování naměřených dat.

3. Návrhy opatření a zpracování nejistoty

Z důvodu několika rozporů s normou uvedených v kapitole 2.3, je na místě navrhnout několik variant ke zlepšení přesnosti měření. Varianty budou v zásadě podle normy [12], jelikož jako největší problém je ve velikosti přímých délek měřící tratě, kde dochází ke zkreslení hmotnostního průtoku tekutiny a tím pádem i ke zkreslení účinnosti a tepelného výkonu výměníku.

3.1 Návrh úpravy tratě podle normy [12]

První aspekt, který omezuje návrhy úpravy tratě je délka možného využitelného prostoru, který je cca 9 metrů. Toto omezení velmi zredukovalo možné varianty, u kterých je potřeba větších přímých délek potrubí. Ale pro případ sestavení konstrukce tratě na jiném místě, bez tohoto omezení, jsou zde uvedeny i varianty počítající s většími přímými délkami. Pro všechny varianty úprav se použije norma [12], která obsahuje tabulky č. 1 a tabulku č. 2, které jsou zde uvedeny v příloze A a příloze B.

Všechny varianty zde uvedené jsou pro průměr potrubí $D=200\text{ mm}$, centrickou clonu DIRU 200/100 a následně i poměr průměrů $\beta=0,5$. Jako první úprava tratě, dále označována jako varianta (1) je trať, využívající normalizovaný usměrňovač proudění se svazkem 19 trubic a přídatná hodnota nejistoty je 0%. Druhá úprava, varianta (2) má stejnou přídatnou hodnotu nejistoty rovnou 0%, ale místo usměrňovače proudění se svazkem 19 trubic je zde použit jeden z dalších normalizovaných usměrňovačů – Zankerův usměrňovač proudění.

3.1.1 Varianta (1)

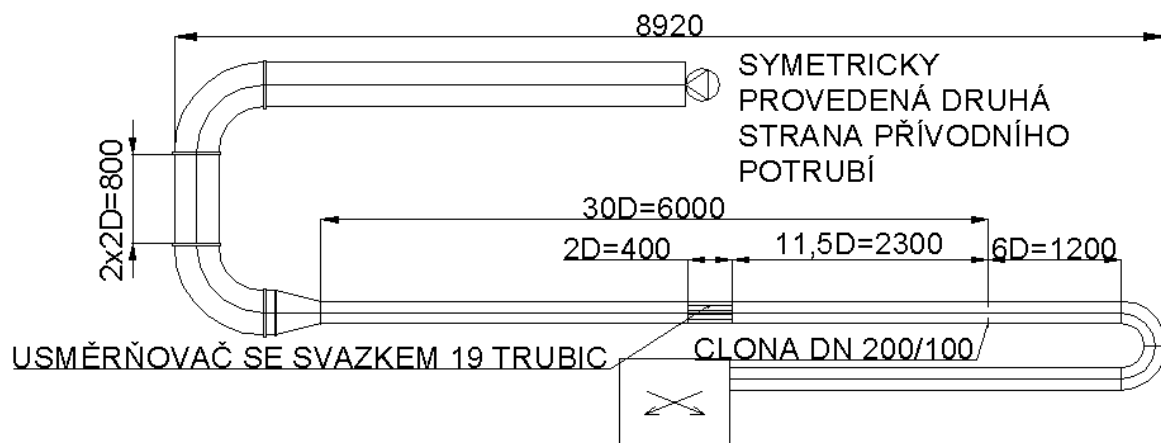
Navržená trať je přímo koncipována na již omezenou délku prostoru určeného pro trať. Tato délka čítá 9 metrů a kvůli zkrácení přímých délek v trati je zde zabudován normalizovaný usměrňovač proudění se svazkem 19 trubek. Kvůli zabudování usměrňovače byla tato trať navrhována podle pokynů tabulky uvedené v příloze B. Jak již bylo výše uvedeno, je poměr průměrů pro všechny varianty $\beta=0,5$.

V tabulce, příloha B, je zvolen sloupec 9, který obsahuje hodnoty pro libovolnou tvarovku umístěnou v minimální vzdálenosti $30 D$ od clony, v našem případě 6000 mm. Tvarovka umístěná před clonou je zúžení z $2 D$ na D , které se bohužel v této tabulce nenachází. Pro 0% přídatnou hodnotu nejistoty je zvolen sloupec A, který tuto nejistotu bere v potaz. Po zahrnutí těchto všech požadavků nám v tabulce č. 2 vyjde hodnota $11,5 D \div 14,5 D$, která značí vzdálenost mezi clonou a zadní částí usměrňovače proudění se svazkem 19 trubic.



Obr. 3-1: Usměrňovač proudění se svazkem 19 trubic dle normy [12]

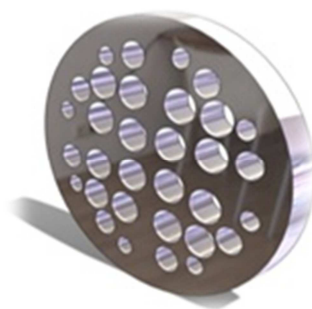
Trat' je konstruována pro 0% přídavnou hodnotu nejistoty proudění. Je zde využit normalizovaný usměrňovač proudění se svazkem 19 trubic, usměrňovač není patentován. Regulace hmotnostního průtoku vzduchu je zde zajištěna změnou výkonu ventilátoru. Výpočet hmotnostního průtoku bude proveden pomocí rozdílu tlaku na cloně, kde tlak bude odebírán koutově. Poměr průměrů na cloně $\beta=0,5$. Poloměr křivosti 90° kolen je zde zvolen $1,5 D$ podle doporučení přílohy A. Návrh přímých délek tratě byl vybrán podle tab. 2, kde byl zvolen sloupec 9 určený pro libovolnou tvarovku.



Obr. 3-2: Schéma měřící tratě podle varianty (1).

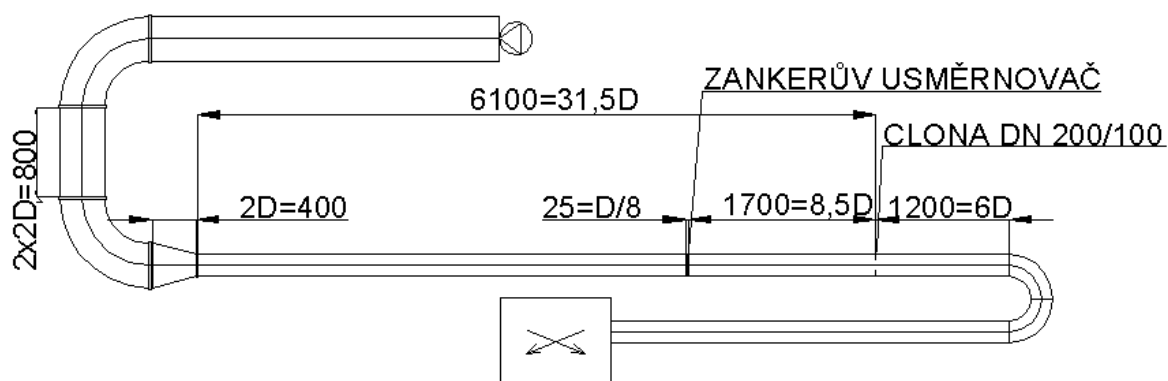
3.1.2 Varianta (2)

Obdobný návrh prvního řešení, hlavní rozdíl je v použití odlišného usměrňovače proudění, kde usměrňovač se svazkem 19 trubic je nahrazen deskovým Zankerovým usměrňovačem. Jako předchozí varianta (1) je i zde 0% přídavná nejistota proudění a využívá podobné konstrukční řešení, které spočívá v delší přímé délce potrubí, které je vedeno nad výměníkem a následně připojeno z druhé strany, než tomu bylo v původní trati. Tento krok je z důvodu omezené délky laboratoře na 9 metrů, kde nejde umístit vhodnou přímou délku tratě k vytvoření požadovaného rychlostního profilu. Návrh varianty (2) proběhl podle odstavce 6.3.3.3 normy [12], kde je přesně popsáno přípustné zabudování do systému. Při konstrukci této varianty je také nutno vzít v potaz požadavky na kruhovitost a válcovitost potrubí uvedené v normě [12] odstavce 6.4.



Obr. 3-3: Deskový Zankerův usměrňovač proudění dle normy [12].

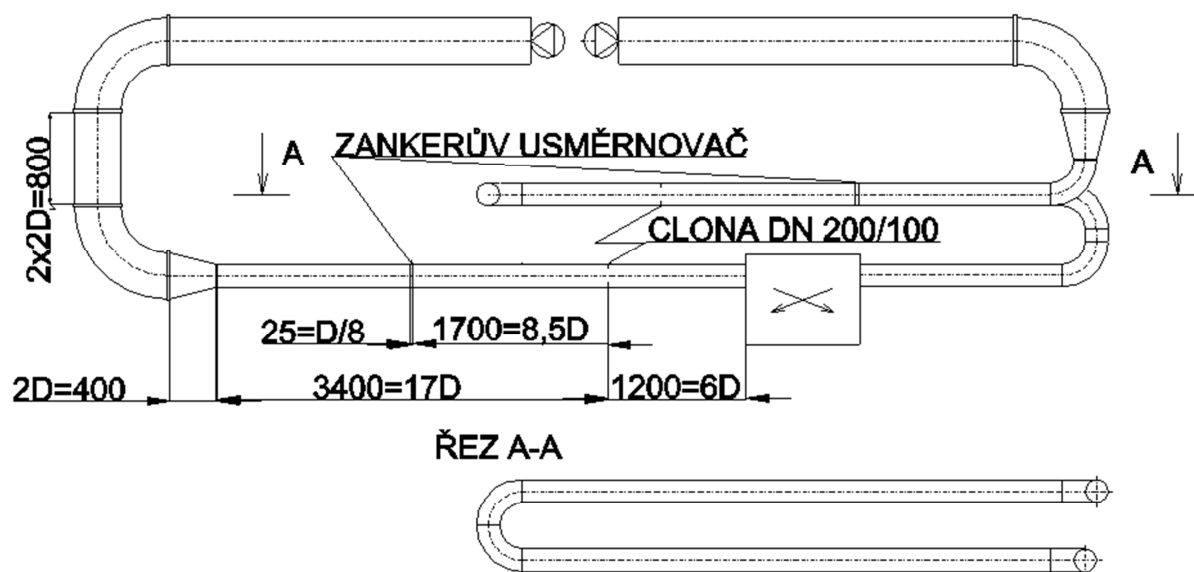
Deskový Zankerův usměrňovač proudění je vyvinutý ze Zankerova usměrňovače popsaného v příloze C odstavce 3.2.5 normy [11]. Deskový Zankerův usměrňovač proudění má stejné rozložení otvorů, ale nemá krabicovitou pláštěv připevněnou k desce; místo toho tloušťka desky roste k $D/8$. Je normalizovaný a není patentově chráněn, což umožňuje jeho vlastní výrobu [12]. Popis provedení výrobní specifikace usměrňovače je uvedeno v normě [12] odstavce 6.3.3.2, dále musí splňovat zkoušky funkčnosti uvedené v normě [11] odstavce 7.4.1.2 a odstavce 7.4.1.6.



Obr. 3-4: Schéma měřicí tratě podle varianty (2).

3.1.3 Varianta (3)

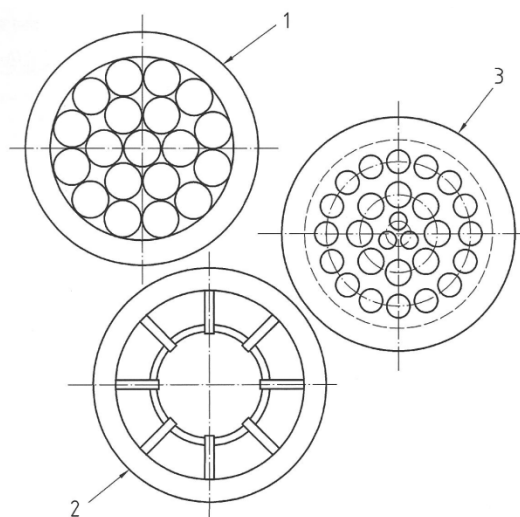
Znovu varianta s deskovým Zankerovým usměrňovačem proudění. Oproti variantě (2) počítá s přímým zúžením ve vertikální poloze na pravé straně. Tato úprava je zde uvedena na návrh zaměstnance ETELAB z důvodu že horní část měřicí tratě už je takto zkonstruována a následné úpravy by nebyly tolik náročné. Tato úprava bere v potaz 0% přídatnou hodnotu nejistoty proudění. Jako usměrňovač je zde použit Zankerův usměrňovač proudění. Všechny 90° kolena vyskytující se v této trati mají poloměr křivosti $1,5 D$ podle doporučení v tab. 1. Regulace hmotnostního průtoku zde je provedena pomocí ventilátoru umístěného na vrcholu tratě. Určení průtoku proběhne stejně jako u varianty (1) pomocí difference tlaku před a za clonou MATTECH 200/100. Poměr průměrů clony $\beta=0,50$. Zankerův usměrňovač proudění je třeba provést podle pokynů normy [11] odstavce 6.3.3.2.



Obr. 3-5: Schéma měřící tratě podle varianty (3).

3.1.4 Varianta (4)

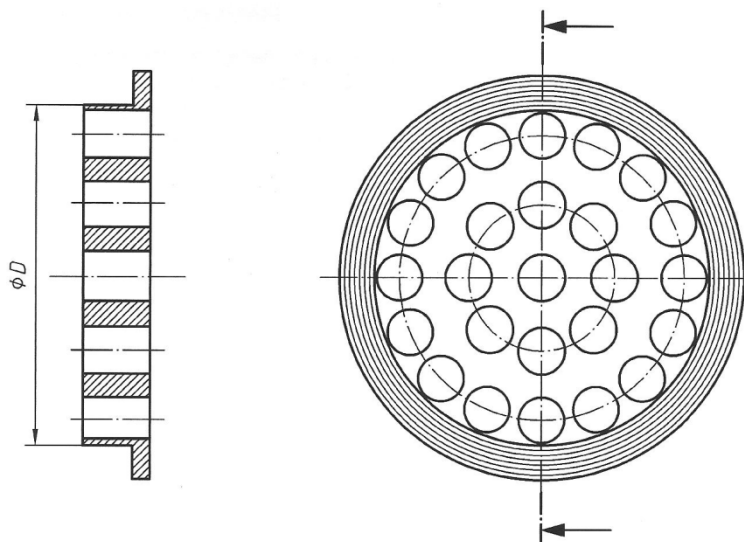
V této variantě může být stejné konstrukční řešení jako ve variantě (2) a variantě (3). Hlavní rozdíl oproti minulým variantám je odlišný usměrňovač proudění, který je zde zabudován. Gallagherův usměrňovač proudění je patentově chráněn, což omezuje jeho širší uplatnění. Gallagherův usměrňovač proudění se sestává z protizkrutového zařízení, sedimentační komory a trvalého profilového zařízení [11]. Gallagherův usměrňovač proudění splňuje zkoušky funkčnosti v normě [11] uvedené v odstavci 7.4.1.2 až 7.4.1.7. Požadavek na zabudování je takový, že vzdálenost L_f mezi clonou a nejbližší předchozí tvarovkou je rovna minimálně $17 D$ jako ve variantách (2) a (3). Vzdálenost L_s mezi koncem Gallagherova usměrňovače proudění a clonou je $5 D \leq L_s \leq L_f - 8 D$ pro $\theta \leq 0,67$.



Obr. 3-6: Gallagherův usměrňovač proudění [4], kde 1 - protizkrutové zařízení – provedení trubkového uspořádání, 2 - protizkrutové zařízení – provedení lamelového uspořádání, 3 - profilové zařízení.

3.1.5 Varianta (5)

Obdobný případ jako varianta (4), umístěný usměrňovač proudění je K-Lab NOVA. Děrovaná deska usměrňovače proudění K-Lab – provedení NOVA, je patentově chráněna. Sestává se z desky s 25 vnitřními otvory uspořádanými do symetrického kruhového vzoru, jak je znázorněno na Obr. 3-7. Usměrňovač splňuje zkoušky funkčnosti v normě [11] uvedené v odstavci 7.4.1.2 až 7.4.1.6. Požadavek na zabudování je takový, že vzdálenost L_f mezi clonou a nejbližší předchozí tvarovkou je rovna minimálně $17 D$ jako ve variantách (2) a (3). Vzdálenost L_s mezi koncem K-Lab NOVA usměrňovače proudění a clonou je $8,5 D \leq L_s \leq L_f - 7,5 D$ pro $\theta \leq 0,67$.



Obr. 3-7: K-Lab NOVA usměrňovač proudění [11].

3.2 Výpočet nejistoty měření

3.2.1 Obecné základy

V praxi nejsou žádná měření, žádná měřicí metoda ani žádný přístroj absolutně přesné. Nejrušnější negativní vlivy, které se v reálném měřicím procesu vyskytují, se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření se tak vždy pohybuje v jistém „tolerančním poli“ kolem skutečné hodnoty, ale téměř nikdy nenastává ideální ztotožnění obou hodnot. Přiblížení se k nulové velikosti odchylky vytváří velké potíže i u realizace etalonů. Výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami je někdy tvořen i velmi složitou kombinací dílčích faktorů. Dosud bylo zvykem při vyhodnocování souborů naměřených hodnot pracovat s chybami. Nově je vyhodnocování prováděno prostřednictvím vyjádření nejistot měření [16].

Nejistota měření charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze zdůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se týká nejen výsledku měření, ale i měřicích přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na kterých nejistota výsledku měření závisí. Základem určování nejistot měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje, jak se může udávaná hodnota odchýlovat od skutečné hodnoty, resp. pravděpodobnost, s jakou se v intervalu daném nejistotou může nacházet skutečná hodnota. Mírou nejistoty měření je směrodatná odchylka udávané veličiny. Takto vyjádřená nejistota se označuje jako standardní nejistota $u(x_i)$ a představuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty. Standardní nejistoty se dělí na standardní nejistoty typu A a typu B. Udávají se buď samostatně bez

znaménka, nebo za hodnotou výsledku se znaménkem $\pm$ [16]. Při zjišťování jednotlivých standardních nejistot se postupuje podle toho, zda se jedná o přímé nebo nepřímé měření jedné nebo více veličin. Při výpočtech se hodnoty koeficientů a nejistot zaokrouhlují na tři platné číslice. Udávaná výsledná nejistota se zaokrouhluje na dvě platné číslice.

3.2.2 Standardní nejistoty typu A

Jsou způsobovány náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé. Stanovují se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. Tyto nejistoty se stoupajícím počtem opakovaných měření se zmenšují. Přitom se předpokládá existence náhodných chyb s normálním rozdělením [16]. Jejím určením se věnuje norma [13] kapitola 6.

Základní statistické pojmy pro použití odhadu standardní nejistoty typu A

Výběrový průměr $\bar{x}$ souboru dat je definován jako aritmetický průměr všech vzorků podle rovnice

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i, \quad (3.1)$$

kde x_i je i -tá hodnota ve vzorku, n je počet hodnot ve vzorku.

V kterémkoli vzorku experimentálních dat bude vždycky existovat odchylka mezi hodnotami. Obecně je zajímavější odhadnout nestálost úplného souboru hodnot, z nichž je vzorek vytvořen a pro tento odhad uvést směrodatnou odchylku s dat vzorku. Ta se definuje podle rovnice

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.2)$$

Průměr $\bar{x}$ vzorku dat poskytuje pouze odhad průměru úplného souboru, poněvadž, jestliže byl vzat jiný vzorek, měl by být získán nový odhad průměru. Je zřejmé, že čím větší nestálost dat, tím větší bude nejistota okolo pravé průměrné hodnoty a čím větší počet hodnot se použije, tím bude lepší odhad průměru. Měření nejistoty na vzorovém průmětu se nazývá standardní nejistota průměru a je definována rovnicí

$$u(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (3.3)$$

Pro vztah vyjádřený v procentech použijeme rovnici

$$u^*(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \frac{100}{\bar{x}}. \quad (3.4)$$

Potom již celková nejistota typu A se stanoví z rovnice

$$u_A = \sqrt{\sum u^*(x_i)^2}. \quad (3.5)$$

3.2.3 Standardní nejistoty typu B

Jsou způsobovány známými a odhadnutelnými příčinami vzniku. Jejich identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor. Jejich určování nebývá vždy jednoduché. U složitých měřicích zařízení a při zvýšeném požadavku na přesnost, musí se provést podrobný rozbor chyb, což vyžaduje značné zkušenosti. Tyto nejistoty vycházejí z různých zdrojů a výsledná nejistota typu B je dána jejich sumací - přitom nezávisí na počtu opakovaných měření [16]. Jejím určením se věnuje norma [6] kapitola 7. Vyhodnocení nejistoty typu B jsou ty prováděné jinými prostředky, než statistickou analýzou série pozorování. Vyhodnocení vyžaduje znalost rozdělení pravděpodobnosti vycházející z nejistoty. Pro naši potřebu využijeme pouze obdélníkové a normální rozdělení

$$u_B = \sqrt{\sum u(x_i)^2}. \quad (3.6)$$

Obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti

Tento druh rozdělení se využije například pro maximální přístrojový drift mezi kalibracemi, nebo pro chybu způsobenou omezenou rozlišovací schopností displeje přístroje anebo meze výrobních tolerancí. Standardní nejistota měřené hodnoty x_i je vypočtena z rovnice

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}, \quad (3.7)$$

kde a_i je rozsah měřených hodnot.

Normální rozdělení pravděpodobnosti

Typické příklady obsahují certifikáty kalibrace, které uvádějí konfidenční úroveň nebo koeficient rozšíření s rozšířenou nejistotou. Zde se standardní nejistota vypočte z rovnice

$$u(x_i) = \frac{U}{k}, \quad (3.8)$$

kde U je rozšířená nejistota, k je uvedený koeficient rozšíření.

3.2.4 Kombinovaná nejistota

Také je důležité si uvědomit, že je nedostatečné zohlednit pouze velikosti složek nejistot vstupních veličin, ale že je také nezbytné uvážit vliv každé vstupní veličiny na konečný výsledek. Proto je vhodné zavést pojem citlivost výstupní veličiny vůči vstupní veličině, tj. relativní koeficient citlivosti podle rovnice

$$c_i^* = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y}. \quad (3.9)$$

Kombinovaná nejistota je sumací nejistot typu A a B. Hodnotí-li se výsledek měření touto nejistotou, není třeba rozlišovat nejistoty typu A a B. Kombinovaná standardní nejistota udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny. V praxi se dává této nejistotě přednost a je vypočtena podle vzorce [16]

$$u_c^*(x_i) = \sqrt{(u_A^{*2} + u_B^{*2})c_i^{*2}}. \quad (3.10)$$

3.2.5 Rozšířená nejistota

Tato nejistota se zavádí v případě, že je třeba zajistit ještě větší pravděpodobnost správného výsledku měření. V případě dostatečného počtu pozorování se získá tak, že se kombinovaná nejistota u_c vynásobí koeficientem rozšíření $k=2$. Tím se zaručí, že rozšířená standardní nejistota bude v 95% uzavřené konfidenční úrovni. V opačném případě kdy nelze zaručit dostatečný počet pozorování je nutné zvolit koeficient rozšíření k podle normy [13], přílohy C. Rozšířená nejistota se stanoví vzorcem

$$U = k u_c. \quad (3.11)$$

3.2.6 Ostatní nejistoty

Další dílčí nejistoty se musí určit podle odstavce 5.3.3, normy [12], kde jsou přímo vypočteny pro užití clony. V odstavci se nachází dvě nejistoty a to nejistota součinitele průtoku C a nejistota součinitele expanze ε .

Nejistotu součinitele průtoku C podle tab. 3-1 můžeme použít za předpokladu, že poměr průměrů β , vnitřní průměr potrubí D , Reynoldsovo číslo vztažené k D Re_D a drsnost vnitřního potrubí Ra/D jsou známy bez chyby.

tab. 3-1: Nejistota součinitele průtoku C

NEJISTOTA	ROZSAH
$(0,7 - \beta)\%$	$0,1 \leq \beta \leq 0,2$
0,5%	$0,2 \leq \beta \leq 0,6$
$(1,667 \beta - 0,5)\%$	$0,6 \leq \beta \leq 0,75$

Poměr průměrů β užitý v trati je roven 0,5 a následná nejistota součinitele průtoku $\delta C=0,5\%$ podle výše uvedené tab. 3-1. Nejistota součinitele expanze ε za předpokladu, že β , $\Delta p/p_1$ a κ jsou bez chyby, je relativní nejistota v procentech hodnoty ε rovna rovnici

$$\delta \varepsilon = 3,5 \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} \%. \quad (3.12)$$

3.2.7 Určení nejistoty

Hodnoty měření, ze kterých vychází níže uvedené nejistoty, jsou uvedeny v příloze C. Měření proběhlo dne 18. 09. 2012. Jedná se o měření v jednu dobu. Vyhodnocovat měření pro delší čas by bylo nevhodné, neboť většina veličin je přímo závislá se změnou času. Počítání nejistoty v pro takto vybraný soubor dat by vedlo k předimenzování určité nejistoty. K měření byly použity snímače

uvedené v tab. 3-2. Nejistoty typu B se určí z dat uvedených výrobcem a hodnoty kalibrace, uvedené v protokolu kalibračního listu.

tab. 3-2: Chyby přístrojů, udávaný výrobcem

PŘÍSTROJ	POPIS	ROZSAH	PŘESNOST/CHYBA
FDA602-S1K	Snímač diferenčního tlaku	± 1250 Pa	$\pm 0,5\%$ z konečné hodnoty v rozsahu 0 až konečná kladná hodnota
FDA612-SA	Snímač atmosférického tlaku	700 až 1050 mbar	$\pm 0,5\%$ z konečné hodnoty
FPA10L0250	Oporový snímač teploty	-200°C až $+600^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,05\text{K}$
FHA646-E2C	Kapacitní čidlo vlhkosti	0 – 100% RB	2% z relativní vlhkosti

Nejistota typu B se skládá z nejistoty kalibrace, kde hodnota převzatá z kalibračního listu odpovídá normálnímu rozdělení se součinitelem rozšíření $k=2$. Nejistota měřidla je v obdélníkovém rozdělení pravděpodobnosti se součinitelem $k=\sqrt{3}$. Určení nejistoty rozlišovací stupnice je stejně jako nejistota měřidla v obdélníkovém rozdělení. Hodnoty nejistot pro další počítání jsou vyděleny součinitelem rozšíření podle pravděpodobnostního rozdělení, ve kterém se nachází a následně sečteny jako součet čtverců. Nejistota uvedená v procentech je vztažena k výběrovému souboru dané veličiny.

tab. 3-3: Nejistoty přístrojů typu B

PŘÍSTROJ	Snímač	nejistota kalibrace	nejistota měřidla	nejistota rozlišovací stupnice	$u_B(x_i)$	$u_B^*(x_i)$ [%]
FDA602-S1K	Dif. tlaku	3,2	0,886	0,025	3,32	0,93
FDA612-SA	Atm. tlaku	15	493,8	2,9	494,03	0,5
FPA10L0250	Teploty	0,05	0,05	0,025	0,075	1,45
FHA646-E2C	vlhkosti	1,25	1,44	0,01	1,90	1,9

Celkové nejistoty měřených veličin jsou uvedeny v tab. 3-4. Standartní nejistota průměru u_A musí být vynásobena rozšiřujícím součinitelem k_A z důvodu malého počtu souboru. Soubor o velikosti tři prvků není zcela vypovídající, a proto je rozšířen na základě doporučení z normy [13].

tab. 3-4: Celkové nejistoty měřených veličin

VELIČINA	JEDNOTKA	$\bar{x}$	$u(\bar{x})$	k_A	$u_A(x_i)$	$u_B(x_i)$	$u_C(x_i)$	k	U_C	U_C^* [%]
t	$^{\circ}\text{C}$	5,146	0,05811	2,3	0,133	0,075	0,152	2	0,3	5,83
φ	% RV	72,3	0,35118	2,3	0,807	1,90	2,06	2	4,12	5,7
Δp	Pa	354,3	0	2,3	0	3,32	3,32	2	6,64	1,87
p_{atm}	Pa	98760	0	2,3	0	494,03	494,03	2	988,06	1

Celková nejistota pro teplotu uvedená v procentech U_C^* v tab. 3-4 je tak velká, protože je vztažena k celkovému výběrovému souboru. V porovnání s ostatními nejistotami v tab. 3-8 je vidět, že velký rozdíl mezi nimi není, většina se pohybuje v rozmezí $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

tab. 3-5: Určení nejistoty hmotnostního průtoku

VELIČINA	JEDNOTKA	$\bar{x}$	$u(\bar{x})$	$u_A^*(x_i)^2$ [%]	$u_B^*(x_i)$ [%]	c^*	$u_c^*(x_i)$ [%]	k	U_c^* [%]
t	°C	5,146	0,05811	2,59	1,45	-0,3	0,89		
φ	% RV	72,3	0,35118	1,10	1,9	0,0005	$1,1 \times 10^{-3}$		
Δp	Pa	354,3	0	0	0,5	0,5	0,46		
p_{atm}	Pa	98760	0	0	0,25	0,0005	$5,5 \times 10^{-5}$		
μ	Pa·s	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,74 \times 10^{-7}$	2,91	-	0,005	0,014		
ρ	kg/m ³	1,240	0,0124	1	-	0,5	0,27		
C	-	0,6086	0,00152	0,25	-	1	0,227		
ε	-	0,9993	0,00008	0,008	-	1	$7,2 \times 10^{-3}$		
q_m	kg/s	0,146	-	-	-	$\sqrt{\sum (u_c^*)^2}$	1,069	2	2,13

Nejistota hmotnostního toku q_m je hlavně ovlivněna teplotou, diferencí tlaku, hustotou a součinitelem průtoku, ostatní přírůstky jsou ve výpočtu zanedbatelné. Z důvodů nesplňujících požadavků na přímé délky podle normy [12] uvedené v odstavci 2.3 této práce, je třeba rozšířit nejistotu hmotnostního průtoku o hodnotu 2%. Konečná nejistota průtoku je součet čtverců nejistoty průtoku $u_c(q_m)$ a nejistotou 2%. Následně se celková nejistota rozšíří koeficientem rozšíření $k=2$ a výsledná nejistota hmotnostního toku je tedy $\pm 4,53\%$. Podle normy [10] odstavce 6.4 je nepřipustné, aby nejistota hmotnostního průtoku překročila hodnotu $\pm 3\%$.

tab. 3-6: Určení tepelného výkonu

VELIČINA	JEDNOTKA	$\bar{x}$	c^*	$u_c^*(x_i)$ [%]	k	U_c^* [%]
q_{m2}	kg/s	0,146	1	2,265		
Δt_{22-11}	°C	11,38	1	3,70		
cp_2	J/kg·K	1023,44	1	3,52		
P_2	W	1700,42	$\sqrt{\sum (u_c^*)^2}$	5,58	2	11,17
q_{m1}	kg/s	0,141	1	2,31		
Δt_{12-11}	°C	11,19	1	3,68		
cp_1	J/kg·K	1038,28	1	3,54		
P_1	W	1643,99	$\sqrt{\sum (u_c^*)^2}$	5,62	2	11,24

Nejistota tepelného výkonu je po vynásobení rozšiřujícím koeficientem rovna 11,24 %. Účinnost tepelného výkonu je určena vydělením nejmenšího výkonu výkonem bude P_{max} vypočteného podle rovnice (1.5). Maximální tepelný výkon po dosazení do rovnice $P_{max}=2811,28$ W. Celková tepelná účinnost je $\eta = 58,47 \pm 11,24$ %. Hodnota účinnosti je zde uvedena pouze z informativních důvodů. Pro stanovení tepelné účinnosti je třeba hlubší analýzy a v této práci uvedena nebude.

tab. 3-7: Určení nejistoty toku entalpie

VELIČINA	JEDNOTKA	$\bar{x}$	c^*	$u_c^*(x_i)$ [%]	k	U_c^* [%]	U_c
q_{m_2}	kg/s	0,146	1	2,265	2	7,75	173,14
cp_{sv}	J/kg·K	1004,5	0,34	$1,77 \times 10^{-3}$			
cp_{vp}	J/kg·K	1884,6	0,00138	$6,84 \times 10^{-3}$			
t_{21}	°C	5,14	0,065	2,915			
x_{21}	kg _p /kg _{sv}	$4,04 \times 10^{-3}$	0,66	1,18			
qH_1	J/s	2234,1	$\sqrt{\sum (u_c^*)^2}$	3,87			

Z tabulky je vidět, že největší podíl na celkové nejistotě entalpického toku má na starosti nejistota teploty a průtoku. Entalpický tok uveden v tab. 3-7 je pouze informativní a nemá větší vypovídající hodnotu. Pro vypočtení přesnější hodnoty je třeba udělat hlubší analýzu daného problému, což není předmětem této bakalářské práce.

4. Zhodnocení výsledků

V této kapitole jsou shrnuté dosavadní získané výsledky, dále obsahuje poznámky na pár nedostatků, ke kterým během zpracování této práce došlo. V tab. 3-8 jsou uvedeny všechny hodnoty, které byly naměřeny a podrobeny analýze nejistoty. Velký rozdíl v procentuální nejistotě U_c^* , kde se stejné veličiny liší v řádu procent je způsoben tím, že je vztažena k jinak velkému výběrovému souboru. V rámci nejistoty uvedené v jednotkách U_c je už tento problém eliminován a dílčí nejistoty jsou si již více podobné.

tab. 3-8: Naměřené a vypočtené hodnoty s vlastními nejistotami

VELIČINA	JEDNOTKA	$\bar{x}$	U_c^* [%]	U_c
t_{11}	°C	24,62	1,46	0,36
t_{12}	°C	13,43	2,82	0,37
t_{21}	°C	5,14	5,83	0,3
t_{22}	°C	16,52	1,32	0,218
x_{11}	kg _p /kg _{sv}	$8,06 \times 10^{-3}$	1,14	$9,24 \times 10^{-5}$
x_{12}	kg _p /kg _{sv}	$3,98 \times 10^{-3}$	2,5	10×10^{-5}
x_{21}	kg _p /kg _{sv}	$4,04 \times 10^{-3}$	2,36	$9,56 \times 10^{-5}$
x_{22}	kg _p /kg _{sv}	$8,64 \times 10^{-3}$	1,12	$9,72 \times 10^{-5}$
φ_{11}	% RV	40,8	12,17	4,96
φ_{12}	% RV	69,7	6,06	4,23
φ_{21}	% RV	72,3	5,7	4,12
φ_{22}	% RV	42,6	11,31	4,82
Δp_1	Pa	354,3	6,58	1,93
Δp_2	Pa	376,8	6,64	1,87
p_{atm}	Pa	98760	1,87	1846,81
q_{m1}	kg/s	0,141	4,50	$6,34 \times 10^{-3}$
q_{m2}	kg/s	0,146	4,53	$6,61 \times 10^{-3}$

4.1 Doporučení

Při pohledu na tab. 3-8 je vidět, že největší nejistota je v oblasti hmotnostního toku, v tomto případě by doporučení přímo korespondovalo s návrhem opatření v kapitole 3.1 kde je popsáno několik řešení jak konstrukčně upravit stávající trať. Pokud proběhne úprava podle výše uvedených doporučení, nejistota se sníží o 2% a tím bude i nižší nejistota tepelného výkonu a entalpického toku, která je přímo závislá na q_m .

Doporučení ohledně měření teploty by bylo takové, aby se dosáhlo homogenního rozložení teploty v měřeném profilu. V tomto případě může pomoci umístění více teplotních čidel, třeba 5 do průřezu k menšímu rozptylu teplot. Použitý profil na obr. 2-9 je dobrý nápad, ale musí být zabudován v délce minimálně $6D$ za clonou.

5. Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřovala především na zpracování a vyhodnocování měření na rekuperačních výměnících. Prvním úkolem bylo provedení rešerše platných norem potřebných pro stanovení výkonnosti rekuperačních výměníků. Dále bylo zhodnoceno stávající provedení experimentální tratě a následně určeny jeho nedostatky, které se zde vyskytly. V rámci práce bylo navrženo několik možných úprav, aby byly splněny platné normy, ze kterých měření má vycházet. Především se jedná o konstrukční úpravu, kde byl velký rozpor od požadavků uvedených v normách. Další část práce se zabírala analýzou nejistoty měření jednotlivých veličin, kde došlo ke zjištění, že měření na experimentální trati je zatíženo velkou hodnotou nejistoty z důvodu nedodržení norem při měření hmotnostního toku.

K vypracování této práce bylo potřeba osvojit si schopnost vyhledávat informace v daných normách a literatuře. Pochopit problematiku zpětného získávání tepla a získat základy teoretických znalostí o rekuperačních jednotkách. Naučit se pracovat se souborem dat měření a jeho zpracování podle příslušné normy. Zpracování měření znamenalo pochopit problematiku vlhkého vzduchu a jeho další možné úpravy. Dále bylo třeba osvojit si nutné základy zpracování nejistoty měření. K těmto základům patří úvod do statistických a metrologických počtů a znalost vyhodnocování chyb měřících přístrojů a snímačů.

V budoucnu by bylo přínosné zkoumat podrobněji nejistoty jednotlivých veličiny, provést celkovou analýzu většího souboru dat a pokusit se dosáhnout nejvyšší možné přesnosti měření. Takto přesné naměřené výsledky by bylo již možné použít ke srovnání s výsledky získanými pomocí numerických simulací, například v software FLUENT.

Tato práce by mohla usnadnit počáteční seznamování s měřicí trati, s jejími nedostatky a problematikou spojenou s měřením a především vyhodnocováním získaných dat. Další studenti nebo pracovníci na ní můžou navázat a inspirovat se při navrhování a konstrukci obdobné tratě.

Použité zdroje

- [1] CHYSKÝ, J. - HEMZAL, K.: Větrání a klimatizace, Bolit-b press, Praha 1993.
- [2] Ing. Miloš Lain, Ph.D. Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (I) [online]. c2006 [cit. 2013-04-20]. Dostupný z WWW:< <http://www.tzb-info.cz/3648-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-i> > .
- [3] ČSN EN 305:1998 (696305) Výměníky tepla - Definování výkonnosti výměníků tepla a všeobecné metody zkoušek pro stanovení výkonnosti výměníků tepla
- [4] Firma QPRO. Zpětné získávání tepla ve vzduchotechnice [online]. c2006-2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupný z WWW:< <http://www.qpro.cz/ZZT-rekuperace-regenerace> > .
- [5] VŠCHT. Trubkové výměníky tepla [online]. c2006 [cit. 2013-04-23]. Dostupný z WWW:<<http://www.vscht.cz/uchi/echi/vt/trubkove.html> >.
- [6] Ing. Miloš Lain, Ph.D. Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (II) [online]. c2006 [cit. 2013-04-20]. Dostupný z WWW:< <http://www.tzb-info.cz/3688-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-ii> > .
- [8] Ing. Zdeněk Zikán, ATREA. Zpětné získávání tepla ve vzduchotechnice [online]. c2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupný z WWW:<<http://vetrani.tzb-info.cz/rekuperace-tepla/6325-zpetne-ziskavani-tepla-a-vetrani-objektu> > .
- [9] ČSN EN 306:1998 (69 6306) Výměníky tepla - Metody měření parametrů potřebných pro stanovení výkonnosti
- [10] ČSN EN 308:1998 (69 6308) Výměníky tepla – Metody zkoušek pro ověření výkonnosti zařízení pro regeneraci tepla
- [11] ČSN EN ISO 5167-1:2003 (25 7710) Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky
- [12] ČSN EN ISO 5167-2:2003 (25 7710) Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 2: Clony
- [13] ČSN EN ISO 5168:2006 (25 7705) Měření průtoku tekutin – Postupy pro vyhodnocení nejistot
- [14] AHLBORN. Měřicí ústředna ALMENO 5690-2M : Návod k použití. 4. 4. 2006. 74 s.
- [15] Ing. Luděk Mareš. Vlhkost vzduchu a její měření [online]. c2006 [cit. 2013-05-08]. Dostupný z WWW:<<http://www.tzb-info.cz/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>>.
- [16] VŠCHT Praha: Ústav fyziky a měřicí techniky. *Nejistoty měření a zpracování výsledků*. [online]. c2001 [cit. 2013-05-09]. Dostupný z WWW:<<http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>>.

Seznam příloh

Příloha A – Požadované přímé délky mezi clonami a tvarovkami bez usměrňovačů proudění [11].

Příloha B – Povolené rozsahy přímých délek mezi clonou a uklidňovačem proudění se svazkem 19 trubek [12].

Příloha C – Soubor dat použitý k analýze nejistoty měření.

Příloha A

Tabulka 3 – Požadované přímé délky mezi clonami a tvarovkami bez usměrňovačů proudění

Hodnoty vyjádřené v násobcích vnitřního průměru D

Poměr průměrů β	Strana před clonou (vstup)																								Strana za clonou (výstup)	
	Jednoduché koleno 90° Dvě kolena v jakékoli rovině ($S > 30D$) ^a	Dvě kolena 90° v téže rovině: S-uspořádání ($30D \geq S > 10D$) ^a	Dvě kolena 90° v téže rovině: S-uspořádání ($10D \geq S$) ^a	Dvě kolena 90° v kolmých rovinách ($30D \geq S \geq 5D$) ^a	Dvě kolena 90° v kolmých rovinách ($5D > S$) ^{a, b}	Jednoduchý T kus 90° s nástavcem nebo bez nástavce Koleno 90° spoj na pokos	Jednoduché koleno 45°, dvě kolena 45° v téže rovině: S uspořádání ($S \geq 2D$) ^a	Soustředné zúžení potrubí ze 2D na D v délce 1,5D až 3D	Soustředné rozšíření potrubí z 0,5D na D v délce D až 2D	Zcela otevřený kulový kohout nebo zcela otevřený šoupě	Náhlé symetrické zúžení potrubí	Teploměřová jímka nebo trubice ^c o průměru ^d $\leq 0,03D$	Tvarovky (sloupce 2 až 11) a jímka hustoměru													
1	2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14	
	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f
$\leq 0,20$	6	3	10	^g	10	^g	19	18	34	17	3	^g	7	^g	5	^g	6	^g	12	6	30	15	5	3	4	2
0,40	16	3	10	^g	10	^g	44	18	50	25	9	3	30	^g	5	^g	12	8	12	6	30	15	5	3	6	3
0,50	22	9	18	10	22	10	44	18	75	34	19	9	30	18	8	5	20	9	12	6	30	15	5	3	6	3
0,60	42	13	30	18	42	18	44	18	65 ^h	25	29	18	30	18	9	5	26	11	14	7	30	15	5	3	7	3,5
0,67	44	20	44	18	44	20	44	20	60	18	36	18	44	18	12	6	28	14	18	9	30	15	5	3	7	3,5
0,75	44	20	44	18	44	22	44	20	75	18	44	18	44	18	13	8	36	18	24	12	30	15	5	3	8	4

POZNÁMKA 1 Požadované minimální přímé délky jsou délky mezi různými tvarovkami umístěnými před nebo za clonou a samotnou clonou. Přímé délky se musí měřit od zadního konce nebo zakřivené části nejbližšího (nebo samotného) kolena nebo T kusu nebo k zadnímu konci zakřivené nebo kuželovité části zúžení nebo rozšíření potrubí.

POZNÁMKA 2 Většina kolen, na nichž jsou délky v této tabulce založeny, měla poloměr zakřivení rovný 1,5D.

^a S je vzdálenost mezi dvěma koleny měřená od zadního konce zakřivené části předního kolena k přednímu konci zakřivené části zadního kolena.

^b Toto není správné zabudování na nátokové straně; kde je to možné, měl by se použít usměrňovač proudění.

^c Zabudování teploměrových jímek nebo trubice nezmění požadované minimální přímé délky před clonou pro ostatní tvarovky.

^d Je přípustné zabudovat teploměrové jímkové nebo trubice o průměru mezi 0,03D a 0,13D za předpokladu, že se hodnoty ve sloupcích A a B zvětšují k 20, resp. 10. Avšak takovéto zabudování se nedoporučuje.

^e Sloupec A pro každou tvarovku udává délky odpovídající hodnotám „nulové přídavné nejistoty“ (viz 6.2.3).

^f Sloupec B pro každou tvarovku udává délky odpovídající hodnotám „0,5 % přídavné nejistoty“ (viz 6.2.4).

^g Přímá délka ve sloupci A udává nulovou přídavnou nejistotu; nejsou k dispozici údaje pro kratší přímé délky, které by mohly být použity, aby daly požadované přímé délky pro sloupec B.

^h 95D se požaduje pro $Re_D > 2 \times 10^6$, pokud $S < 2D$.

Příloha B

Tabulka 4 – Povolené rozsahy přímých délek mezi clonou a uklidňovačem proudění se svazkem 19 trubek (1998) za tvarovkami umístěnými ve vzdálenosti L_f od clony

Hodnoty vyjádřené v násobcích vnitřního průměru D

Poměr průměrů β	Jednoduché 90° koleno ^b				Dvě 90° kolena ^b v kolmých rovinách ($2D \geq S$) ^a				Jednoduchý 90° T kus				Libovolná tvarovka			
	$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$		$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$		$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$		$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$	
1	2		3		4		5		6		7		8		9	
	A ^c	B ^d	A ^c	B ^d	A ^c	B ^d	A ^c	B ^d	A ^c	B ^d	A ^c	B ^d	A ^c	B ^d	A ^c	B ^d
$\leq 0,2$	5 až 14,5	1 až n^e	5 až 25	1 až n^e	5 až 14,5	1 až n^e	5 až 25	1 až n^e	5 až 14,5	1 až n^e	1 až 25	1 až n^e	5 až 11	1 až n^e	5 až 13	1 až n^e
0,4	5 až 14,5	1 až n^e	5 až 25	1 až n^e	5 až 14,5	1 až n^e	5 až 25	1 až n^e	5 až 14,5	1 až n^e	1 až 25	1 až n^e	5 až 11	1 až n^e	5 až 13	1 až n^e
0,5	11,5 až 14,5	3 až n^e	11,5 až 25	3 až n^e	9,5 až 14,5	1 až n^e	9 až 25	1 až n^e	11 až 13	1 až n^e	9 až 23	1 až n^e	^{f g}	3 až n^e	11,5 až 14,5	3 až n^e
0,6	12 až 13	5 až n^e	12 až 25	5 až n^e	13,5 až 14,5	6 až n^e	9 až 25	1 až n^e	^{f h}	7 až n^e	11 až 16	1 až n^e	^f	7 až n^e	12 až 16	6 až n^e
0,67	13	7 až n^e	13 až 16,5	7 až n^e	13 až 14,5	7 až n^e	10 až 16	5 až n^e	^f	8 až n^e	11 až 13	6 až n^e	^f	8 až 10	13	7 až $n - 1,5^e$
0,75	14	8 až n^e	14 až 16,5	8 až n^e	^f	9,5 až n^e	12 až 12,5	8 až n^e	^f	9 až n^e	12 až 14	7 až n^e	^f	9,5	^f	8 až 22
Doporučeno	13 pro $\beta \leq 0,67$	13 pro $\beta \leq 0,75$	14 až 16,5 pro $\beta \leq 0,75$	14 až 16,5 pro $\beta \leq 0,75$	13,5 až 14,5 pro $\beta \leq 0,67$	13,5 až 14,5 pro $\beta \leq 0,75$	12 až 12,5 pro $\beta \leq 0,75$	12 až 12,5 pro $\beta \leq 0,75$	13 pro $\beta \leq 0,54$	13 pro $\beta \leq 0,75$	12 až 13 pro $\beta \leq 0,75$	12 až 13 pro $\beta \leq 0,75$	9,5 pro $\beta \leq 0,46$	9,5 pro $\beta \leq 0,75$	13 pro $\beta \leq 0,67$	13 pro $\beta \leq 0,75$

POZNÁMKA Přímé délky uvedené v tabulce jsou povolené délky mezi zadním koncem uklidňovače proudění se svazkem 19 trubek (1998) (jako popsané v 6.3.2.1) a clonou, což platí, pokud je jednotlivá tvarovka zabudována před uklidňovačem proudění se svazkem 19 trubek (1998) ve vzdálenosti L_f od clony. Vzdálenost L_f od clony se měří k zadnímu konci nebo zakřivené části nejblíže (nebo samotného) kolena nebo T kusu nebo k zadnímu konci zakřivené nebo kuželovité části zúžení nebo rozšíření. Doporučené hodnoty uvedeného umístění svazku trubek, jsou vhodné pro příslušný rozsah β .

^a S je vzdálenost mezi dvěma koleny měřená od zadního konce zakřivené části předního kolena k přednímu konci zakřivené části zadního kolena.

^b Kolena by měla mít poloměr zakřivení rovný $1,5D$.

^c Sloupec A pro každou tvarovku udává délky odpovídající hodnotám „nulové přídavné nejistoty“ (viz 6.3.2.3.2).

^d Sloupec B pro každou tvarovku udává délky odpovídající hodnotám „0,5 % přídavné nejistoty“ (viz 6.3.2.3.3).

^e n je takový počet průměrů, že je přední konec uklidňovače proudění se svazkem 19 trubek (1998) situován $1D$ od zadního konce nebo kuželovité části nejblíže tvarovky. To je žádoucí, pokud by délka mezi předním koncem uklidňovače proudění se svazkem 19 trubek (1998) a zadním koncem nebo kuželovitou částí nejblíže tvarovky musela být alespoň $2,5D$, kromě toho, kde by neměla být uvedena přijatelná hodnota mezi clonou a zadním koncem uklidňovače proudění se svazkem 19 trubek (1998).

^f Není možné nalézt přijatelné umístění pro uklidňovač proudění se svazkem 19 trubek (1998) za jednotlivou tvarovkou pro všechny velikosti L_f , kterých se sloupec týká.

^g Je-li $\beta = 0,46$, je přípustná hodnota 9,5.

^h Je-li $\beta = 0,54$, je přípustná hodnota 13.

Příloha C

Datum	Čas	t _{21.1}	t _{21.2}	t _{21.3}	t _{22.1}	t _{22.2}	t _{22.3}	Δp ₂	φ _{21.1}	φ _{21.2}	φ _{21.3}	φ _{22.1}	φ _{22.2}	φ _{22.3}	p _{atm}
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	Pa	% RV	% RV	% RV	% RV	% RV	% RV	Pa
18. 09. 2012	07:20:23	05,04	05,16	05,24	16,52	16,58	16,46	354,3	72,6	72,7	71,6	44,5	42,8	40,7	987,6

Datum	Čas	t _{11.1}	t _{11.2}	t _{11.3}	t _{12.1}	t _{12.2}	t _{12.3}	Δp ₁	φ _{11.1}	φ _{11.2}	φ _{11.3}	φ _{12.1}	φ _{12.2}	φ _{12.3}	p _{atm}
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	Pa	% RV	% RV	% RV	% RV	% RV	% RV	Pa
18. 09. 2012	07:20:23	24,48	24,71	24,68	13,28	13,54	13,44	376,8	37,7	42,7	42	71,8	68,7	68,7	987,6