



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

OPTIMALIZACE CHLADICÍHO SYSTÉMU LETOUNŮ

AIRPLANE COOLING SYSTEM OPTIMIZATION

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Lajza

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.

BRNO 2017

Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na CFD výpočet a měření tlakové ztráty jako klíčový parametr ovlivňující návrh chladicího systému z pohledu aerodynamiky.

Úvod práce je věnován způsobům chlazení pístových spalovacích motorů. Je zde uveden popis chladicího systému letounů, tak i automobilů. Na tuto část navazují charakteristiky chladičů a jejich určování. Poté jsou popsány základní typy měřících tratí pro měření těchto charakteristik a měřící trať na Leteckém ústavu.

Praktická část práce se věnuje kalibraci měřící trati a měření chladičů. Dále byl proveden CFD výpočet na zjednodušené model chladiče, tak i na modelu prvku chladiče. Výsledky jednotlivých výpočtů byly vzájemně srovnány. Bylo provedeno srovnání s měřením ve specializované zkušebně chladičů.

Abstract

Dissertation thesis is focused on the aircraft cooling system optimization. The knowledge of the pressure loss is necessity for design of an optimal system.

In the beginning of the thesis, the different designs of piston engine cooling systems are described for both aircrafts and automobiles. Other sections outline the determination of the coolers characteristics and describe the different test sections applicable for the characteristics measurement. The test section built at the Institute of the aerospace engineering is described as well.

Practical part of the thesis describes the calibration of the test section. The measurements of the specific coolers were compared with the CFD simulation of two models - the simplified cooler model and cooler element model. Additionally, the measurements were compared with results obtained at specialized coolers testing facility.

Klíčová slova

Měření chladičů, tlaková ztráta, chladicí systém, CFD,CTA

Key words

Radiator measurement, pressure lost, cooling system, CFD,CTA

Bibliografická citace

LAJZA, O. Optimalizace chladicího systému letounů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 81 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc

Prohlášení autora o původnosti práce

Já, Ondřej Lajza, prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne 31.7.2017

Lajza Ondřej

Poděkování

Děkuji všem, díky kterým tato práce mohla vzniknout.

Obsah

1. Úvod	7
2. Chlazení pístových spalovacích motorů	11
2.1. Přímé chlazení	11
2.1.1. Náporové chlazení	11
2.1.2. Nucené chlazení	11
2.2. Nepřímé chlazení.....	12
2.2.1. Termosifonové (gravitační) chlazení	12
2.2.2. Chlazení s nucenou cirkulací chladicí kapaliny	12
2.2.3. Odpařovací systém chlazení	13
2.3. Kombinovaní chlazení.....	13
3. Chladicí systémy	14
3.1. Chladicí systém letounů	14
3.2. Chladicí systém automobilů	16
4. Cíl dizertační práce	19
5. Charakteristiky chladiče	20
Tlaková ztráta	20
Určování tlakové ztráty	21
6. Měření chladičů	22
6.1. Používané měřicí tratě.....	22
6.1.1. Měřicí trať s otevřeným oběhem vzduchu	22
6.1.2. Měřicí trať s uzavřeným oběhem vzduchu	24
6.2. Instalace chladiče	25
6.3. Měřicí trať na Leteckém ústavu.....	29
7. Kalibrace měřicího prostoru	32
7.1. Měření tunelové konstanty	32
7.2. Měření rozložení dynamického tlaku – rychlosti	35
7.3. Měření intenzity turbulence.....	36
7.3.1. Kalibrace sondy.....	38
7.3.2. Měření rozložení intenzity turbulence	39
8. Měření chladičů	42
Popis instalace chladiče.....	42
8.1. Měření tlakové ztráty	42
8.2. Měření rozložení tlakové ztráty.....	45
8.3. Měření rozložení rychlosti před chladičem a za chladičem.....	46
8.4. Měření intenzity turbulence.....	48

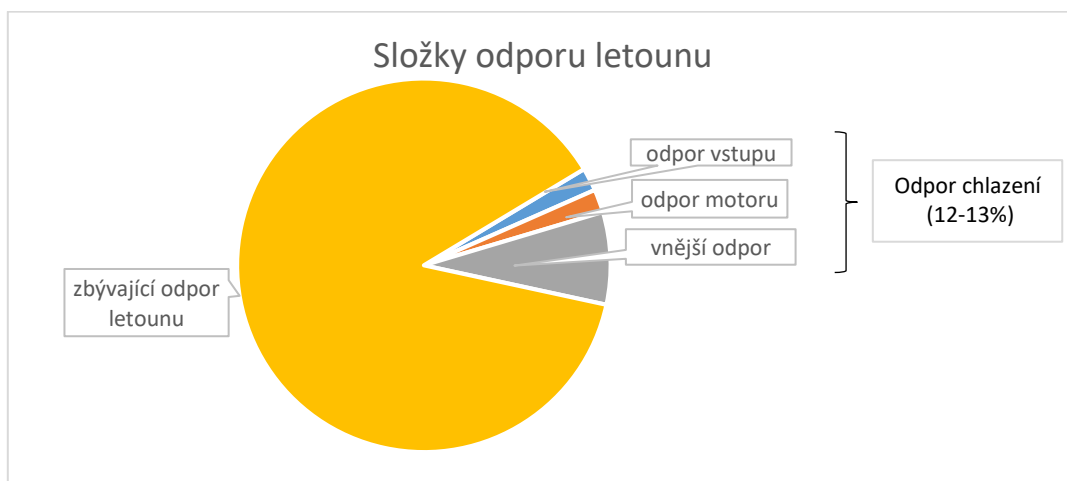
8.5.	Test opakovatelnosti	49
8.6.	Srovnání naměřených dat	51
9.	CFD výpočet tlakové ztráty.....	56
9.1.	Tvorba zjednodušené geometrie.....	56
9.2.	Tvorba výpočetní domény	58
9.3.	CFD výpočet a vyhodnocení	60
10.	CFD výpočet zjednodušeného modelu chladič.....	65
11.	Letová měření.....	71
12.	Další rozvoj měřicí trati.....	72
13.	Závěr	73
14.	Seznam použité literatury	74
15.	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	77

1. Úvod

Každý z provozovatelů letounu chce mít co nejnížší provozní náklady a dosahovat co nejvyšší cestovní rychlosti. Těchto cílů lze dosáhnout snížením odporu letounu. Snížení odporu letounu se zvýší rychlost a sníží celková spotřeba.

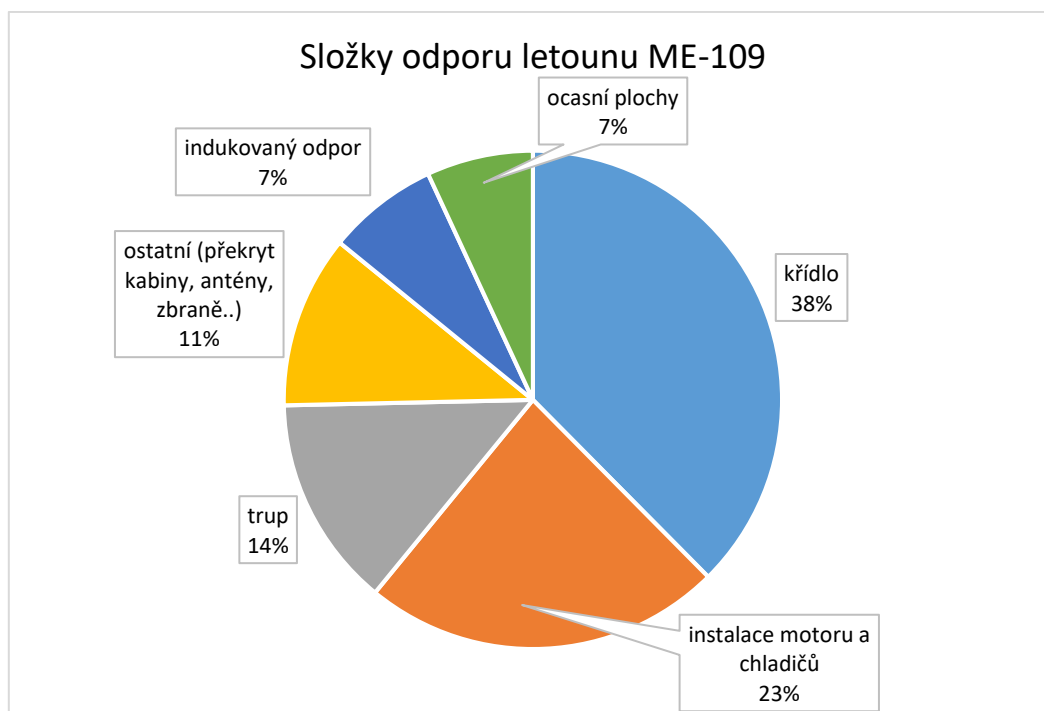
Snížení odporu lze dosáhnout například tvarovou optimalizací. Jelikož tvarová optimalizace dosáhla téměř maxima svých možností, tak i nepatrné snížení odporu vyžaduje vynaložit velké úsilí. Proto velký potenciál ke snížení odporu představuje chladič systém letounů.

Dle lit. [1] tvoří odpor chlazení až 13% celkového odporu letounu viz obr. 1.



Obr. 1: Chladič odpor letounu

V lit. [2] je provedena podrobná analýza odporu letounu Me-109 a pro tento konkrétní letoun při max. rychlosti letu (610 km/h) viz obr. 2.



Obr. 2: Složky odporu letounu ME-109

Z obr. 1 a obr. 2 je patrné, že odpor chlazení je nezanedbatelný a v případě letounu ME-109 je téměř 25% celkového odporu letounu. Tento odpor je možno velmi efektně eliminovat, jak ukazují příklady z minulosti.

Ke konci II. světové války bylo u stíhacích letounů s pístovými motory věnováno maximum sil tomu, aby byly výkonnější než letouny protivníka. Odpor u těchto letounů byl co nejvíce minimalizován. Toho bylo docíleno i díky vhodně navrženému chladicímu systému. Při vhodném návrhu chladicího kanálu s chladičem byl odpor tohoto kanálu eliminován do té míry, že generoval tah. Tento jev je také označován jako Meredithův efekt po svém objeviteli [4]. Tento efekt spočívá v tom, že v kanále k chladiči dojde ke stlačení proudícího vzduchu, za chladičem dochází k expanzi ohřátého chladicího vzduchu. Tento ohřátý vzduch má však větší energii než vzduch na vstupu. Tohoto efektu využívaly letouny Supermarine Spitfire a Hawker Hurricane, nejvíce je však patrný u letounu North American P-51 Mustang. Tento letoun dosahoval maximální rychlosti 490 mph (789 km/h), byl osazen motorem Packard V-1650-9 o maximálním vzletovém výkonu 1490 k (1111 kW). Údaje jsou pro verzi P-51H z roku 1943 [3].

Chladicí systém je možno upravit i u letounů, které jsou již v provozu. Zlepšením chladicího systému není dosaženo jen snížení aerodynamického odporu, ale i zvýšení účinnosti chlazení a s tím související pozitivní vliv na životnost motoru a také snížení hmotnosti letounu – zvýšení užitečného zatížení.

V současné době je drtivá většina menších letounů kategorií ULL, VLA, LSA vybavena motory Rotax řady 912 případně 914. Tyto motory jsou částečně kapalinou chlazené a z toho plyne nutnost letoun osadit mimo olejového chladiče také chladičem chladicí kapaliny. I u vyšší kategorie letounů GA jsou stále častěji používány motory kapalinou chlazené. Chladiče oleje pak obsahují všechny běžně používané letecké motory. U všech letounů je pak kladen důraz na schopnost chlazení i při extrémních okolních teplotách za všech provozních podmínek.

V instalační příručce motoru ROTAX 912i series [4] se uvádí následující požadavek na kapalinové chlazení motoru:

*Množství odvedeného tepla chladičem 6kW (5.7 BTU/s) při vzletovém režimu motoru.
Min. průřez vstupu 100cm².*

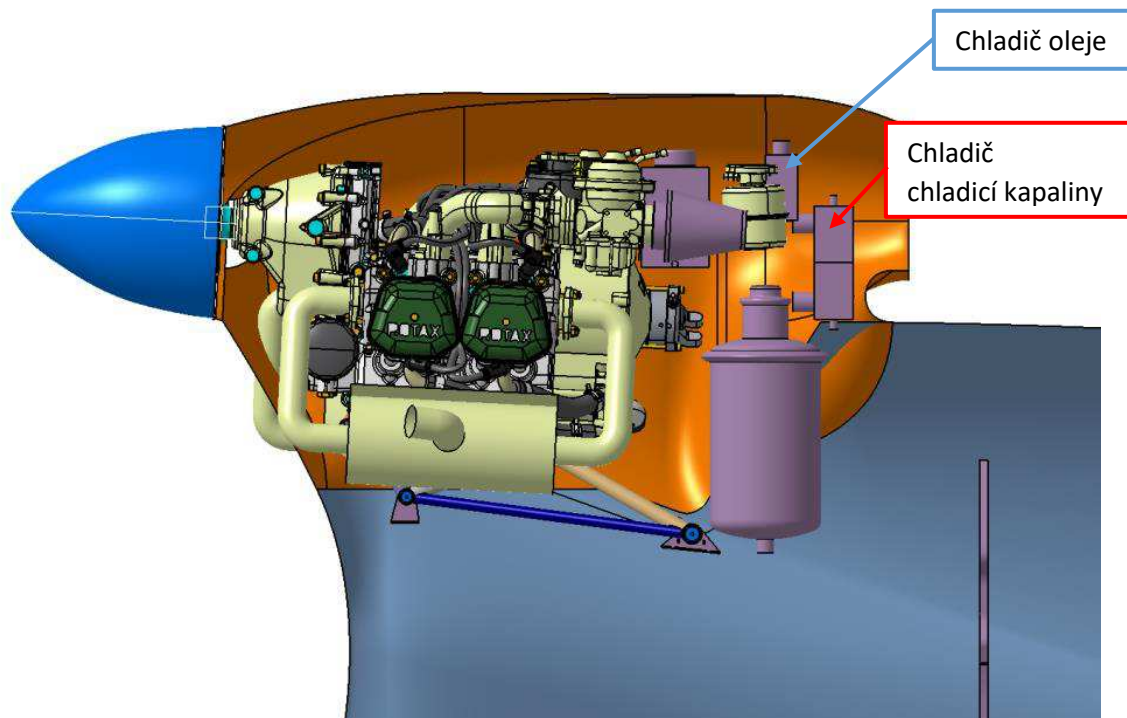
Dále je v instalační příručce uveden dodávaný chladič s jeho rozměry. Žádné jiné parametry chladiče nemá výrobce k dispozici. Stejná situace panuje i v případě automobilových a motocyklových chladičů, prodejce neposkytuje data k chladičům. V případě olejových chladičů je již situace lepší, někteří výrobci udávají potřebné charakteristiky chladiče.

Snadno se může stát, že i přes toto doporučení se letoun může při vzletu přehřívat. Výrobce osazuje cestou pokus-omyl letoun účinnějšími chladiči s větší činnou plochou. Tím zhoršuje vlastnosti letounu, což vývoj letounu prodlužuje a prodražuje.

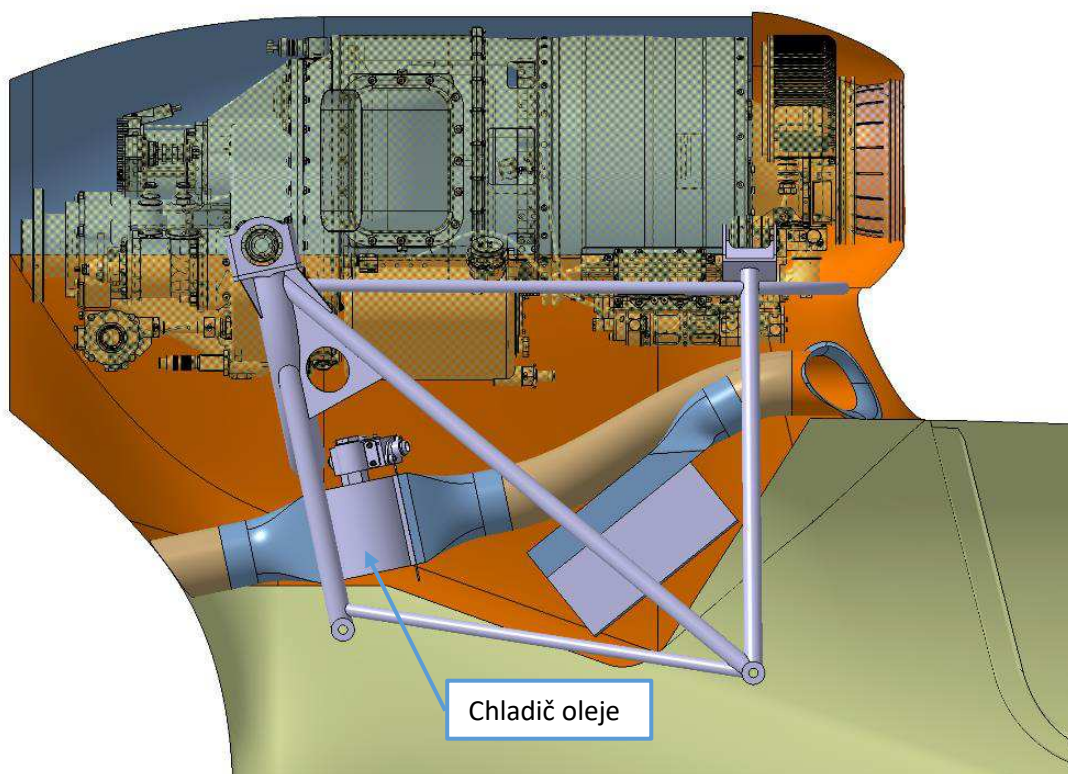
Podíváme-li se na chlazení z pohledu automobilového průmyslu, tak zjistíme, že je mu věnováno v posledních letech extrémní pozornosti. Chladiče, které se používají u dnešních ULL letounů, jsou konstrukčně identické s automobilovými chladiči. Automobilky hledají cesty, jak přivádět vzduch k chladičům jen když je třeba. Např. automobilka BMW již delší dobu využívá systém lamel před chladičem, podobný systém se stále častěji objevuje u nově uváděných modelů většiny automobilek. Pokud jsou tyto lamely uzavřeny, tak dojde ke snížení odporu automobilu. Lamely se otevrou jen tehdy, když je třeba dodat k chladičům chladicí vzduch, a to zcela automaticky.

Autor práce pracoval na návrhu kapotáže a chlazení pro letouny VUT 001 Marabu (obr.3), VUT 061 Turbo (obr.4) a VUT 081 Kondor (obr.5) vzniklé na Leteckém ústavu. Letouny VUT 001 Marabu a VUT 081 Kondor jsou osazeny pístovým spalovacím motorem Rotax řady 912 a letoun VUT 061 Turbo je osazen turbovrtulovým motorem. U turbovrtulového motoru je použit olejový chladič. K olejovému

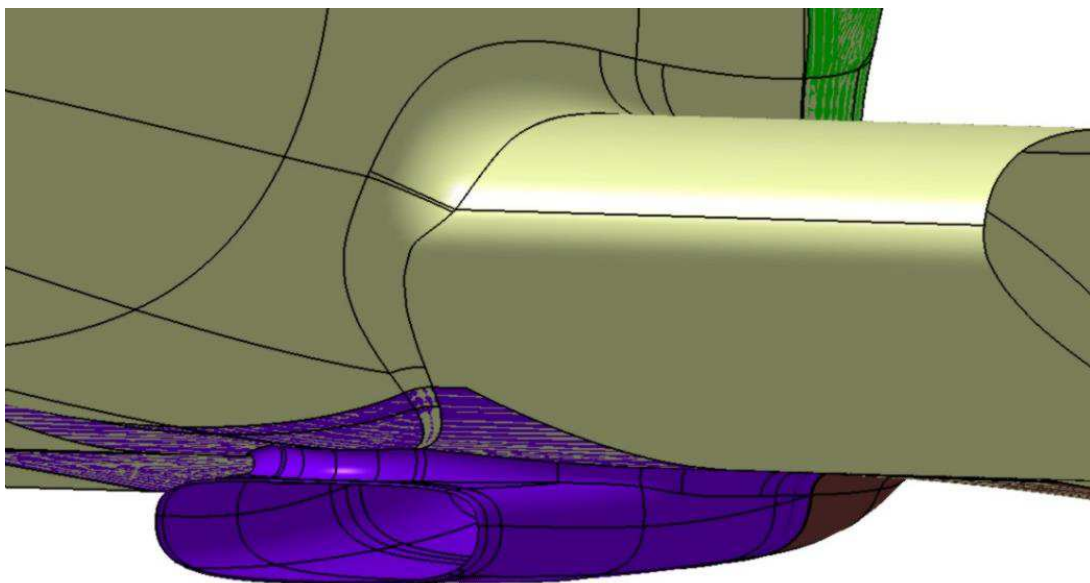
chladiči byly dostupné veškeré potřebné údaje, díky tomu bylo možno navrhnout chladicí kanál, který zajišťoval funkci i při rozdílných režimech letu. V případě motorů Rotax nebyly k dispozici tyto údaje a chladicí kanál (v případě letounu VUT 081 Kondor) byl navržen na základě literatury [5]. V případě letounu VUT 081 Kondor jsou chladiče umístěny v chladicím kanálu.



Obr. 3: VUT 001 Marabu – kapotáž a umístění chladičů



Obr. 4: VUT 061 Turbo – kapotáž a umístění chladičů



Obr. 5: VUT 081 Kondor - chladicí kanál

Pro samotný návrh chladicího kanálu je důležité znát parametry chladiče. Protože tyto parametry nejsou od prodejce motoru k dispozici, je třeba najít cesty, jak a které parametry je třeba znát, aby bylo možno navrhnout efektivní a spolehlivý chladicí systém.

2. Chlazení pístových spalovacích motorů

Pro zajištění správné funkce pístového spalovacího motoru je třeba zajistit odpovídající provozní teplotu. To má za úkol chladicí systém, který odvádí přebytečné teplo hlavně ze stěn pracovního prostoru pístu, především pak ze stěny válce a hlavy motoru do okolního prostředí. Odvod tepla se děje buď přímo prostřednictvím materiálu, ze kterého jsou vyrobeny příslušné části motoru, nebo nepřímo prostřednictvím teplotnosného média. Vyskytuje se i kombinace obou přístupů, kdy je z hlavy odváděno teplo nepřímo a z válců přímo.

Do okolí je třeba odvést přibližně $1/3$ energie, která byla získána ze spalování paliva v motoru. Jinými slovy můžeme říci, že je třeba odvést stejné množství energie, která odpovídá výkonu motoru. Přibližně $1/3$ energie z paliva odchází ve formě výfukových plynů. Tyto poměry jsou rozdílné podle toho, zda se jedná o vznětový nebo zážehový typ motoru. Také závisí na tom, zda je motor atmosférický či přeplňovaný. Tuto energii můžeme odvést do okolí několika způsoby, základní druhy pak jsou přímé a nepřímé chlazení.

2.1. Přímé chlazení

V případě přímého chlazení dochází k odvodu tepla z pracovního prostoru přímo materiálem částí motoru. Pro zvýšení teplosměnné plochy je vnější povrch opatřen žebrováním. Často je tento typ chlazení označován jako *vzduchové chlazení*. Tento typ chlazení je velice často používán pro chlazení leteckých a motocyklových motorů.

Předností tohoto typu chlazení je jednoduchá konstrukce, nízká hmotnost, vyšší spolehlivost, rychlejší zahřátí na provozní teplotu. Nedostatky jsou pak větší rozměry motoru, vyšší pracovní teplota dílů motoru.

Přímé chlazení pak můžeme být náporové nebo nucené.

2.1.1. Náporové chlazení

Ochlazování pracovního prostoru se děje náporem vzduchu vzniklého pohybem letounu (automobilu,...). Jedná se o nejjednodušší a nejspolehlivější způsob chlazení.

Velkou nevýhodou je možnost přehřátí při režimech, kdy je malá rychlost pohybu při velkém zatížení motoru.

2.1.2. Nucené chlazení

Pro chlazení je využíván proud vzduchu, který je vytvořen ventilátorem nezávisle na rychlosti pohybu letounu (automobilu). Ventilátor může být radiální či axiální. Dle teploty může být regulováno množství chladicího vzduchu.

2.2. Nepřímé chlazení

U nepřímého chlazení je teplo z pracovního prostoru odváděno pomocí teplotnosného média do tepelného výměníku (chladiče). Médium může být chladicí kapalina (nemrznoucí směs + voda), olej. Často je toto chlazení označováno jako *vodní chlazení*.

Mezi výhody patří nižší teplota motoru, tím pádem i vyšší výkon motoru. Rozměry motoru jsou menší, chladicí kapalinou můžeme i poměrně jednoduše vyhřívat prostor pro cestující. Nedostatky pak jsou pak komplikovanější systém chlazení, vyšší hmotnost a větší riziko poruchy.

Nepřímé chlazení může být termosifonové (gravitační), s nucenou cirkulací chladicí kapaliny a odpařovací.

2.2.1. Termosifonové (gravitační) chlazení

Cirkulace chladicí kapaliny je zabezpečeno rozdílnou hustotou teplé a studené kapaliny. Pro zajištění intenzivní cirkulace je potřeba mít značný tepelný spát na chladiči (až 30°C). Chladiče jsou velké a množství chladicí kapaliny v okruhu značné. Dnes se již nepoužívá.

2.2.2. Chlazení s nucenou cirkulací chladicí kapaliny

Cirkulace chladicí kapaliny je zabezpečena oběhovým čerpadlem. Výhodou je menší objem chladicí kapaliny, chladič je možno umístit dle potřeby. Jedná se o nejpoužívanější systém nepřímého chlazení. Systém pak obsahuje následující prvky:

Čerpadlo chladicí kapaliny

Zajišťuje cirkulaci chladicí kapaliny. Rychlost průtoku kapaliny ovlivňuje výkon chladicí soustavy. Pohon je řešen od klikové hřídele motoru. U automobilů se v poslední době uplatňuje i pohon elektrický, nezávislý na otáčkách motoru.

Expanzní nádobka

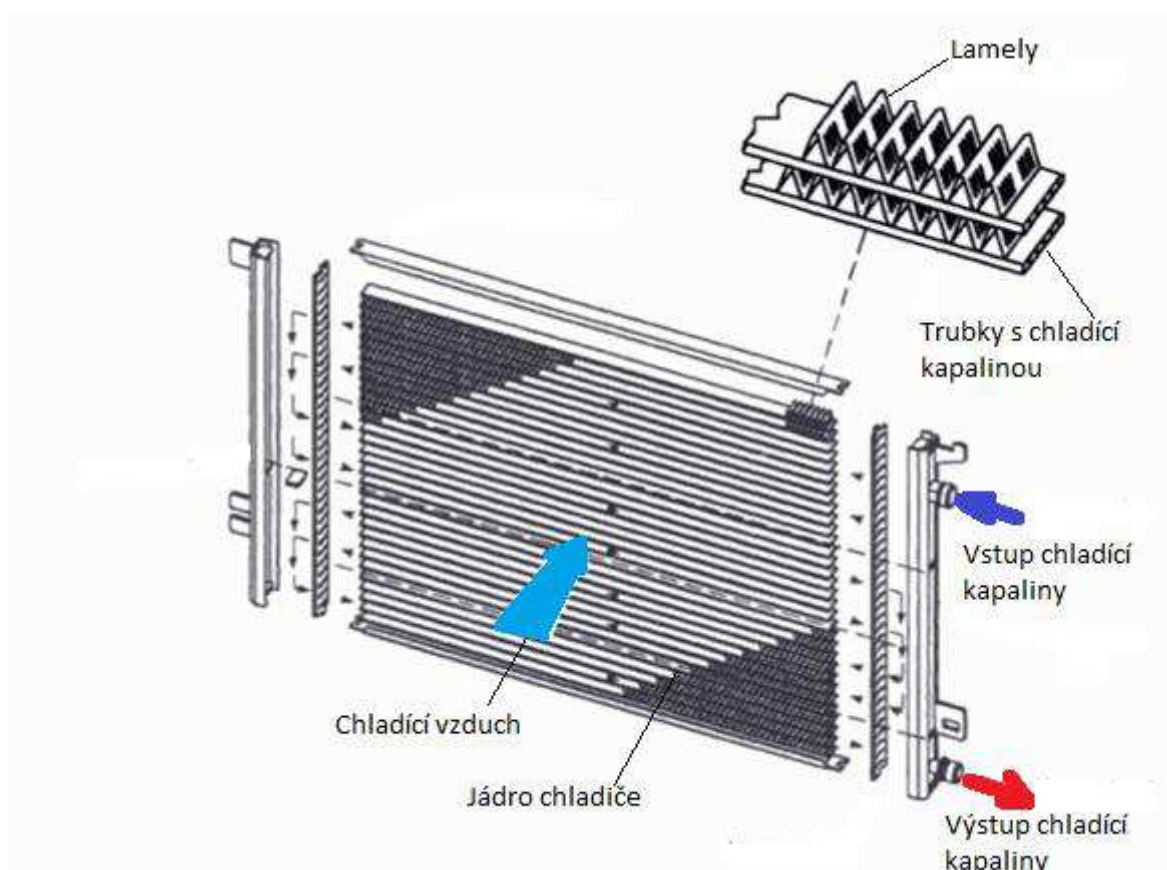
Má za úkol vyrovnávat teplotní roztažnost kapaliny v uzavřeném systému.

Víčko s přetlakovým a podtlakovým ventilem

Je důležitou součástí chladicího systému. Díky zvýšení tlaku dochází ke snížení bodu varu chladicí kapaliny. Přetlak uzavřeného systému má na starosti právě toto víčko.

Chladič

V práci je označován tepelný výměník terminologicky nesprávně jako *chladič*. Zde dochází k ochlazení chladicí kapaliny vzájemnou interakcí chladicích elementů s proudícím vzduchem. Chladičů existuje několik typů. Nejčastěji používaným typem chladičů typu kapalina – vzduch je typ plate-fin. Chladič je nejčastěji vyroben ze slitin hliníku a plastu. Plast je použit na zásobníky vody, z hliníku je vyrobeno chladicí jádro. Chladicí jádro se skládá z trubelek, ve kterých proudí chladicí médium (voda) a lamel opatřených žebrovaním pro zvýšení teplosměnné plochy a snížení rychlosti proudícího vzduchu.



Obr. 6: Chladič typu plate-fin

Ventilátor

Slouží k zajištění dostatečného proudu chladicího vzduchu chladičem hlavně při malých rychlostech chladicího vzduchu. Používá se i v extrémních případech, kdy je teplota okolního vzduchu příliš vysoká a nestačí k ochlazení média. Většinou je ventilátor umístěn za chladičem. Jeho pohon je nejčastěji řešen elektricky.

Termostat

Používá se k rychlejšímu ohřevu motoru na pracovní teplotu a odděluje mezi sebou malý a velký chladicí okruh. Termostat pracuje na principu tepelné roztažnosti.

2.2.3. Odpařovací systém chlazení

K chlazení se využívá i tepla odvedeného pro změnu kapaliny v páru. Tento typ chlazení byl využíván pro chlazení prvních automobilů. Ve 30. letech byl využit u letounů pro rychlostní rekord. K tomuto chlazení bylo přistoupeno z důvodu minimalizace odporu a chladič výrazně zvyšuje odpor. Chladicí kapalina proudila do speciálních kanálků v křídle. Částečně se odpařovala a částečně na vnitřní straně potahu kondenzovala a vracela se zpět do chladicího systému. Spotřeba chladicí kapaliny byla až 7l/min.

2.3. Kombinování chlazení

Jedná se o kombinaci nepřímého a přímého chlazení. K chlazení hlavy motoru se využívá nepřímého chlazení a na chlazení válců přímého. Kombinuje přednosti obou systému a částečně eliminuje jejich nedostatky. Hlava motoru je nejvíce tepelně namáhanou částí motoru a také je nejsložitější součástí motoru. Tento typ chlazení je používán velice často u leteckých motorů a je to případ i motoru řady Rotax 912.

3. Chladicí systémy

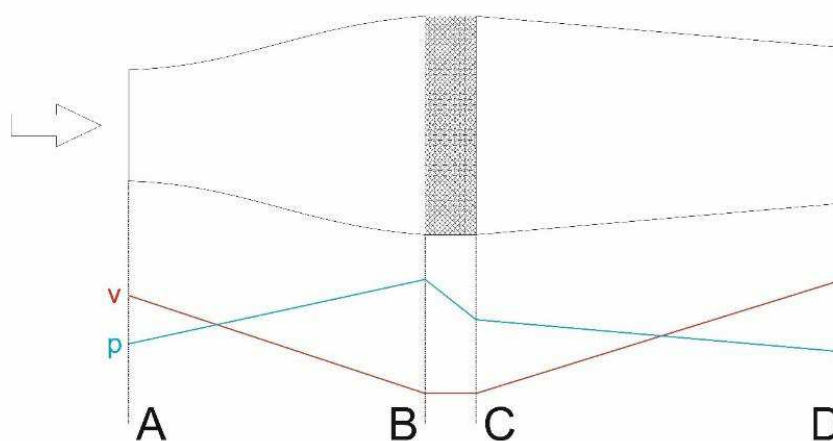
V předešlé kapitole byly popsány možnosti, jak se dá chladit spalovací pístový motor. Toto rozdělení bylo především pak z pohledu automobilů. Spalovací motory jsou pro automobily a letouny téměř identické, někdy jsou i používány konverze automobilových motorů pro pohon malých letounů. Jedná především o amatérské stavby.

Chladicí systémy automobilů a letounů se zdají být na první pohled identické, ale opak je pravdou. Na systémy jsou kladeny rozdílné požadavky a pracují za rozdílných podmínek. Chladicí systém se bude lišit dle způsobu chlazení motoru, dále bude věnována pozornost nepřímému chlazeným motorům, či částí nepřímého chlazení u kombinovaného způsobu chlazení motoru.

3.1. Chladicí systém letounů

Chladiče se v letounu mohou umístit do chladicího kanálu, který je vhodně tvarován, případně mohou být umístěny samostatně v motorovém prostoru. Pokud je chladič umístěn do chladicího kanálu, tak je možno za znalosti chování chladiče navrhnout tento kanál efektivně tak, že zajistí chlazení za každých podmínek a jeho celkový odpor bude minimální.

Na obr. 7 je schematicky naznačen chladí kanál letounu s průběhem rychlosti a tlaku.



Obr. 7: Průběh rychlosti a tlaku v chladícím kanále

- A Vstup do chladicího systému
- A-B Vstupní kanál
- B-C Chladič či chladiče
- C-D Výstupní kanál
- D Výstup z chladicího systému

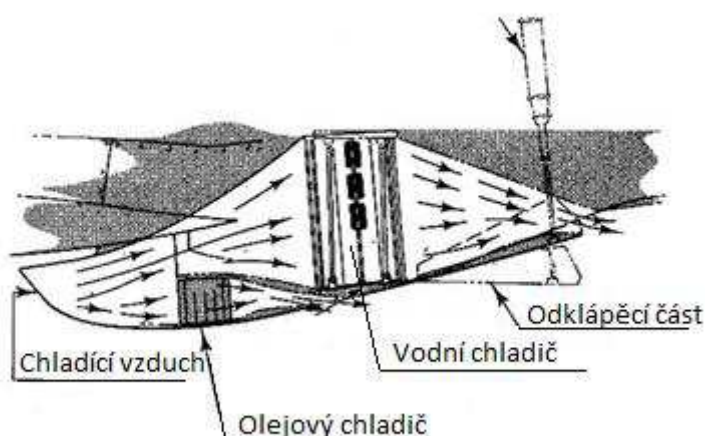
Vstupní kanál má za úkol navést vzduch k chladiči, zároveň v něm dochází k přeměně dynamického tlaku (rychlosti) na statický tlak – tento statický tlak pak pomáhá překonat tlakovou ztrátu na chladiči. Statický tlak snižuje rychlost tak, aby byl na chladič přiveden proud vzduchu o potřebné rychlosti (objemovém toku), který je dostatečný pro daný chladicí výkon na chladiči. Díky tomu je tlaková ztráta minimalizována.

Výstupní kanál má za úkol odvést chladicí vzduch z chladicího kanálu, zde dochází k urychlování proudu vzduchu na rychlost okolního proudu.

Vstup a výstup z chladicího systému se snažíme umísťovat do vhodných míst. Vstup do místa s nejvyšším přetlakem a výstup naopak do co nejvyššího podtlaku.

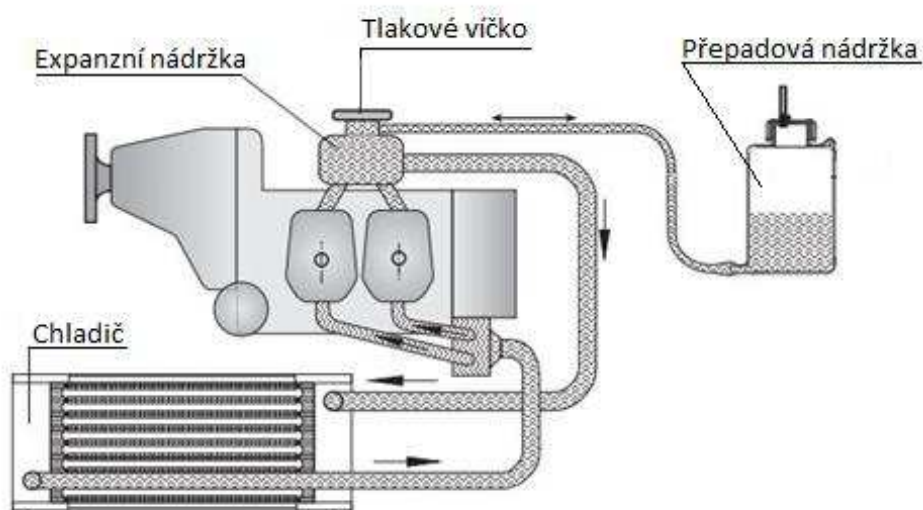
Na vstupu do chladicího systému je zpravidla tvarované vstupní hrdlo. To také pomáhá snížit vstupní rychlost a vhodným návrhem dokáže dodávat k chladiči konstantní objemový tok za různých podmínek letu.

Pro návrh chladicího systému je zpravidla rozhodující stoupání po vzletu, kdy motor pracuje na svém maximu a letoun se pohybuje malou dobřednou rychlostí.



Obr. 8: Chladicí kanál letounu P-51 Mustang

Bohužel v současnosti se najde jen minimum výrobců, kteří věnují chlazení větší úsilí. Proto většina letounů neobsahuje všechny zde uvedené části chladicího systému. Někteří výrobci mají dokonce chladiče umístěny až za motorem.

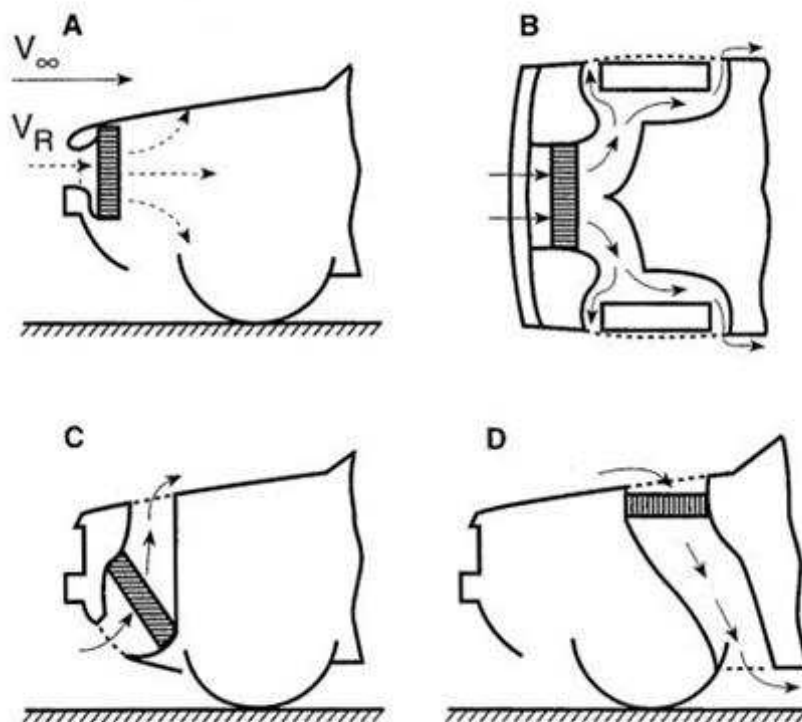


Obr. 9: Hlavní části kapalinového chlazení motoru Rotax serie 912

3.2. Chladicí systém automobilů

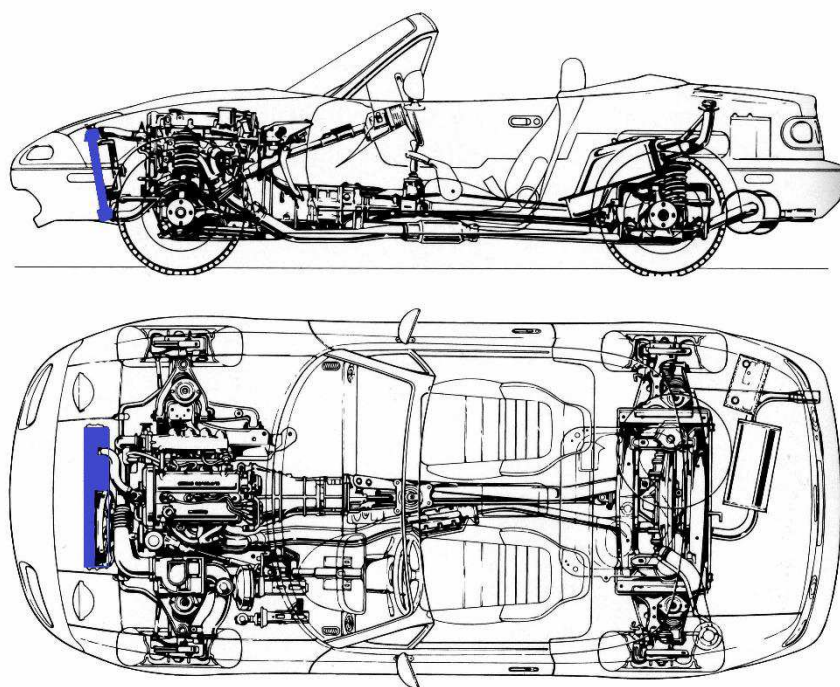
U běžných automobilů jsou na prvním místě výrobní náklady a tak je chladicí systém do značné míry zjednodušen a ořezán na nutné minimum. Hlavní části pak jsou:

- Vstup do chladicího systému
- Chladič či chladiče
- Ventilátor či ventilátory
- Výstup z chladicího systému



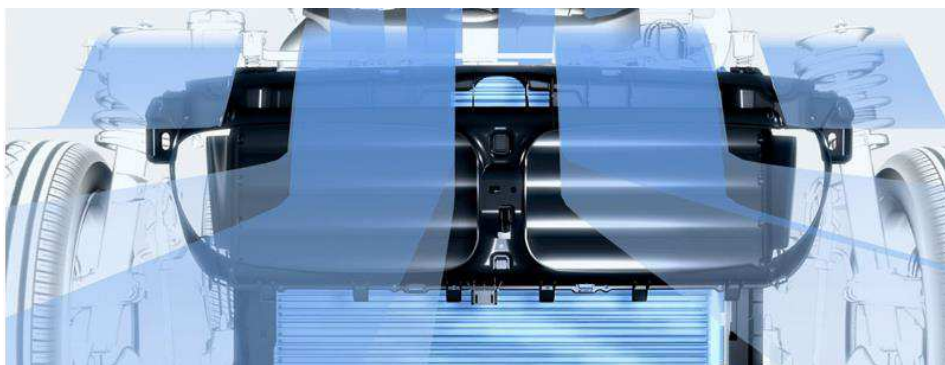
Obr. 10: Možnosti zástavby chladičů v automobilech

Na obr. 10 je několik možností jak je možno zastavět chladič v automobilu a jak je k němu a od něj odváděn vzduch. Nejčastějším řešením u běžných automobilů má označení A na obr.10. Důvodů, proč je používáno právě toto řešení, je několik - od min. požadavku na zástavbu, prostorové omezení a v neposlední řadě i cena řešení. V poslední době se však i u běžných automobilů začíná věnovat více pozornosti zástavbě chladičů.



Obr. 11: Průhled automobilem

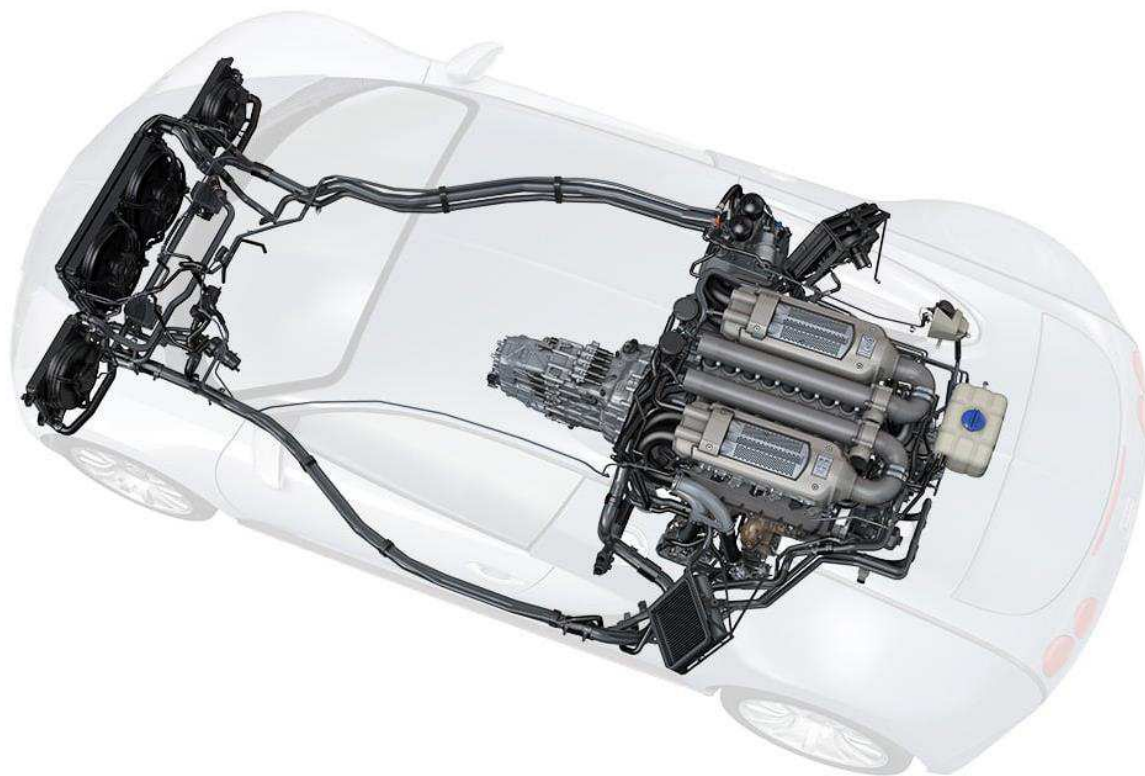
Vstupující chladicí vzduch není použit pouze pro chlazení samotných chladičů, ale po průchodu chladičem slouží pro ochlazení motorového prostoru. Některé automobily mají před chladičem umístěny lamely, které mají zajistit přístup vzduchu, jen když je jej třeba. Toto opatření snižuje odpor automobilu.



Obr. 12: Lamely před chladičem

Vystupující chladicí vzduch pak většinou proudí pod automobil. Zásadní rozdíl vůči leteckému chladicímu systému je ten, že automobily jsou osazeny několika chladiči za sebou, za nimi je pak umístěn jeden nebo několik ventilátorů, které pomáhají proudění vzduchu přes chladiče za nízké rychlosti.

Množství chladičů v jednom automobilu může být značné. Jako příklad může posloužit Bugatti Veyron (výkon motoru až 882kW/ 1200hp) Množství tepla, které je třeba uchladiť je 1764kW/2400hp. [7]



Obr. 13: Chladicí systém automobilu Bugatti Veyron

Tento automobil má 5 separátních chladících okruhů. Pro chlazení motoru jsou použity 2 vodní okruhy – nízko a vysokotlaký. Celkový počet chladičů je 10. I u ostatních moderních vysokovýkonných (super či hypersportovních) automobilů je počet chladičů podobný. Z tohoto je patrné, že výrobci vysokovýkonných automobilů musí věnovat chlazení velkou pozornost.

4. Cíl dizertační práce

Pro návrh chladicího kanálu letounu je třeba znát tlakové ztráty chladiče na straně vzduchu. Na chladič se v tomto případě díváme z pohledu aerodynamiky, kde chladič představuje překážku pro proudící chladicí vzduch. Tlakovou ztrátu nechceme znát jen z kvantitativního pohledu, ale také z pohledu kvalitativního. Díky kvalitativnímu popsání můžeme navrhnout účinnějších chladicí kanál a chladič.

Cíle dizertační práce jsou:

1. Kvantitativní a kvalitativní měření chladiče
2. CFD výpočet tlakové ztráty na elementu chladiče
3. CFD validace zjednodušeného modelu chladiče s měřením

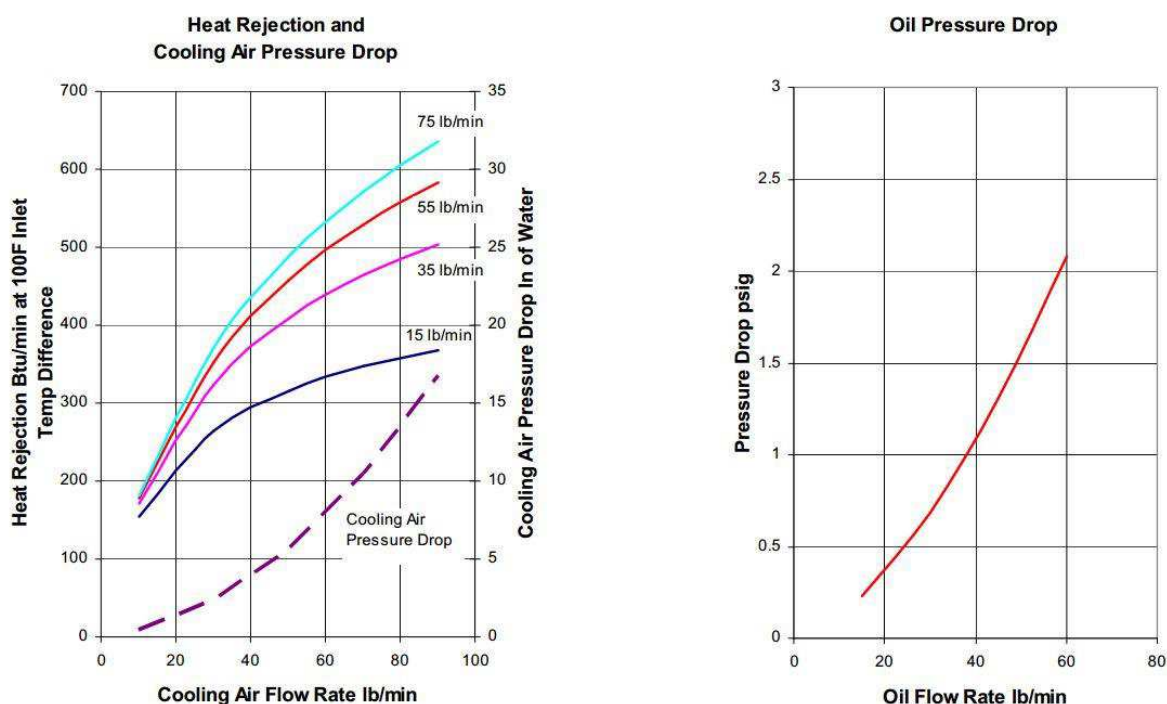
K měření chladičů byla vybudována měřicí trať (aerodynamický tunel). Nejprve je potřeba Prvním z dílčích cílů je tuto trať uvést do provozu a vybavit ji příslušnou měřicí aparaturou. Po kalibraci měřicí tratě bude přistoupeno k jednotlivým měřením chladiče.

5. Charakteristiky chladiče

Mezi zásadní vlastnosti chladiče patří dosahovaný chladicí výkon, potřebný hmotnostní tok chladicího vzduchu a tomu odpovídající tlaková ztráta na straně vzduchu. Chladicí výkon a tlaková ztráta je ovlivněna konstrukcí chladiče, hmotnostním tokem chladicí kapaliny a hmotnostním tokem chladicího vzduchu.

Vlastnosti chladiče pak charakterizují následující vlastnosti:

- Tlaková ztráta na straně chladicí kapaliny
- Tlaková ztráta na straně chladicího vzduchu
- Chladicí výkon chladiče



Graf 1: Charakteristika olejového chladiče

Pro návrh chladicího systému z aerodynamického hlediska je nejdůležitějším parametrem tlaková ztráta na straně vzduchu při odpovídajícím chladícím výkonu chladiče.

Tlaková ztráta

Tlaková ztráta je rozdíl tlaků před a za chladičem, tuto ztrátu potřebuje chladicí vzduch překonat. Vhodně navržený chladicí kanál má takový tlakový spád, aby takto ztráta byla překonána.

Tlakovou ztrátu jsme schopni určit

Analyticky

Numerickými výpočty

Měřením

Každý z uvedených přístupů má svá úskalí.

Určování tlakové ztráty

Tlakovou ztrátu je možno určit na tzv. studeném chladiči, tak i na chladiči teplém. Tlakové ztráty však nejsou identické. Na tzv. teplém chladiči se tlaková ztráta na vzduchu zjišťuje při odvodu tepla chladiče. Na tzv. studeném chladiči se tlaková ztráta na vzduchu zjišťuje bez odvodu tepla chladičem. Rozdílnost tlakových ztrát je daná rozdílnou teplotou proudícího vzduchu – rozdílnou hustotou a tím pádem i rozdílnými Reynoldsovými čísly.

Analytický výpočet

Jedná se zdlouhavý a náročný iterační proces, kde se vyskytuje spousta neznámých a volených parametrů. Je třeba počítat chladič komplexně, to znamená uvažovat i přestup tepla z proudící chladicí kapaliny. Velké množství parametrů se volí dle tabulek v závislosti na konstrukci chladiče. Zde s touto variantou nebude vůbec uvažováno.

Numerický výpočet

Pomocí CFD metod je možno vypočítat na základě znalosti geometrie jednoho elementu chladiče komplexní charakteristiku tohoto elementu, potažmo i celého chladiče. Tento přístup se využívá při vývoji nového typu chladiče, kdy je možno v krátkém čase analyzovat několik variant. Pro reverzní výpočet reálného chladiče je však třeba dokonale odměřit geometrii a vytvořit idealizovaný model. Protože jsou rozměry elementu chladiče velmi malé, jsou kladeny velké požadavky na přesnost měření.

Měření

Měření lze realizovat pomocí měřící trati (kalorimetru), kde je možno změřit všechny charakteristiky chladiče. Výhodou měření je, že v relativně krátkém čase získáme přesnější výsledky. Při měření se pracuje již s reálným chladičem. Ten však má díky výrobě určité nepřesnosti, při instalaci může dojít i k poškození velice jemných lamel. Měření chladičů bylo realizováno na aerodynamické trati, která byla vybudována za účelem měření aerodynamických charakteristik chladičů ale i běžných aerodynamických těles (profil, model letounu...)

6. Měření chladičů

Cílem měření je změřit vlastnosti chladiče. Tyto vlastnosti můžeme rozdělit dle média na vlastnosti chladicího vzduchu a na vlastnosti chlazené kapaliny. Na základě vlastností chladicího vzduchu je určována tlaková ztráta na straně vzduchu. Z vlastností chlazené kapaliny je určován chladicí výkon chladiče, tlaková ztráta na straně „vody“. Hydraulickému okruhu nebude věnována pozornost. Práce je zaměřena na vlastnosti chladiče z pohledu chladicího vzduchu.

Hydraulický okruh

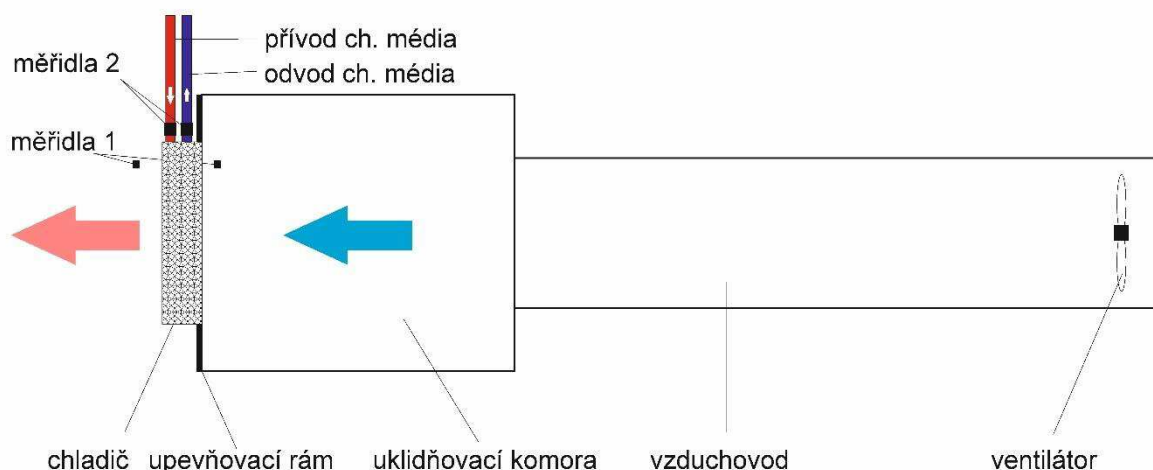
Hydraulický okruh představuje samostatný okruh. Je použit u všech typů měřících tratí, kde se měří kompletní charakteristika chladiče. K ohřevu chladicí kapaliny se používá nejčastěji elektrický ohřev. Ohřívá se dostatečné množství chladicí kapaliny na požadovanou teplotu tak, aby byla zajištěna teplotní stálost chladicí kapaliny. Tato kapalina pak proudí přes měřený chladič zpět do zásobníku, kde se opět ohřívá na provozní teplotu. V okruhu je čerpadlo, které umožňuje regulovat průtok chladicí kapaliny. Okruh s chladicí kapalinou je pak v případě „vodního“ okruhu přetlakován, aby nedocházelo při vyšších teplotách k varu. Okruh s chladicí kapalinou může být i s olejem, použité chladicí medium záleží od typu měřeného chladiče. Okruhy pro „vodu“ a oleje jsou samostatné.

6.1. Používané měřící tratě

Jedná se v podstatě o tratě konstrukčně velice blízké aerodynamickým tunelům. Tratě mohou být dvojího typu, a to s uzavřeným nebo otevřeným oběhem vzduchu.

6.1.1. Měřící trať s otevřeným oběhem vzduchu

Na obr. 14 je schéma jednoduché měřící trati pro měření chladičů s otevřeným oběhem vzduchu.



Obr. 14: Schéma trati s otevřeným oběhem

Vzduchová část je tvořena upevňovacím rámem, uklidňovací komorou, vzduchovodem a ventilátorem. Uklidňovací komora může být opatřena usměrňovacími mřížemi. Trať je osazena potřebnými měřidly. Těmi se měří hodnoty tlaku a teploty před a za chladičem (měřidla 1 na obr. 14). Objemový tok chladičem (rychlost) můžeme zjistit několika způsoby a to buď přímým měřením rychlosti, či nepřímým měřením (clona, protitlak...).

V hydraulickém okruhu se pak na výstupu a vstupu z chladiče měří tlak a teplota chladicí kapaliny (měřidla 2 na obr. 14), dále je třeba měřit průtok. Na základě těchto naměřených veličin se určuje tepelný výkon chladiče, tlaková ztráta na straně chladicí média.

Vlastní chladič je pak uchycen na upevňovací rám, který má v sobě otvor přesně odpovídající velikosti činné plochy chladiče. U tohoto typu trati je to nejčastější a nejjednodušší způsob uchycení. Pro každý typ chladiče je vyroben patřičný upevňovací rám. Tento rám však může být i pohyblivý v jednom či ve dvou směrech. U pohyblivého upevňovacího rámu se však věnuje zvýšená pozornost utěsnění.

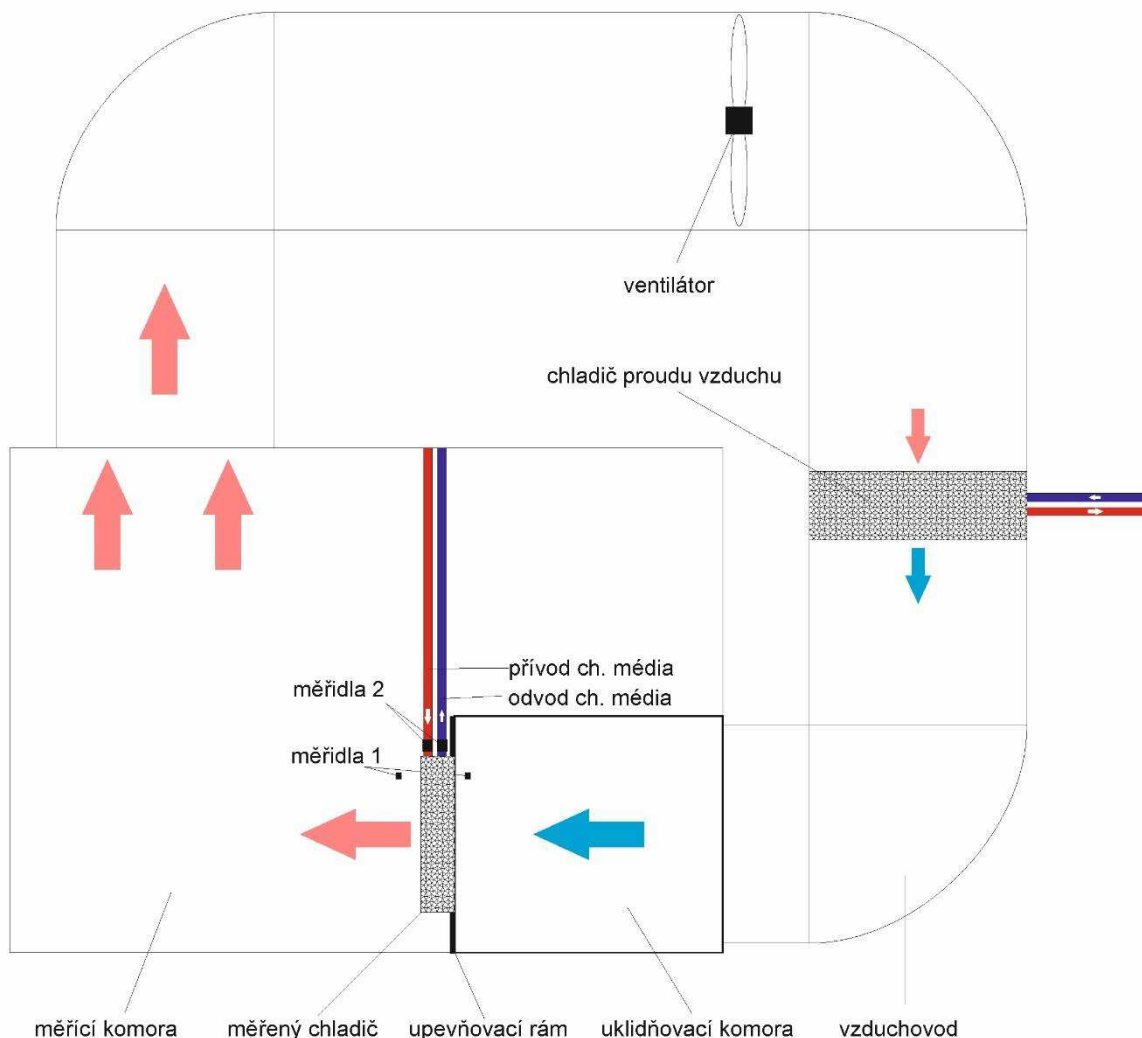
Výhody:	Nevýhody
nízké pořizovací náklady	vyšší energetická náročnost (vzduch)
snadná a rychlá změna velikosti měřeného chladiče	závislost teploty měření na okolní teplotě
kompaktní provedení	



Obr. 15: Ukázka jednoduché otevřené měřicí trati

6.1.2. Měřicí trať s uzavřeným oběhem vzduchu

Provedení měřicí trati může být několik typů. Existují trati podobné aerodynamickým tunelům. Další možností je mít „otevřený“ měřicí prostor, kde je chladič umístěn stejně jako v případě otevřených měřicí tratí. Uzávěření okruhu dosáhneme umístěním měřicího prostoru do velké měřicí komory viz obr. 16.



Obr. 16: Schéma trati s uzavřeným oběhem

Tento typ je téměř identický, jako tomu bylo v případě otevřené trati. Velkou změnou je, že uklidňovací komora je umístěna do měřicí komory, do které je přiváděn vzduch, pak dále pokračuje přes měřený chladič do vzduchovodu. Proudící vzduch pak cirkuluje v uzavřeném okruhu. Tento vzduch se ohřeje z větší části od samotného odvedeného tepla měřeným chladičem, z menší části pak cirkulací v trati. Z toho důvodu je do trati zařazen chladič proudu vzduchu, který umožní měřit chladič za různých tepelných podmínek. V některých případech je řízena i vlhkost uvnitř trati.

Výhody:	Nevýhody
nižší energetická náročnost (vzduch)	vyšší pořizovací náklady
řízení podmínek měření (vzduch – teplota, vlhkost)	sofistikovanější zařízení

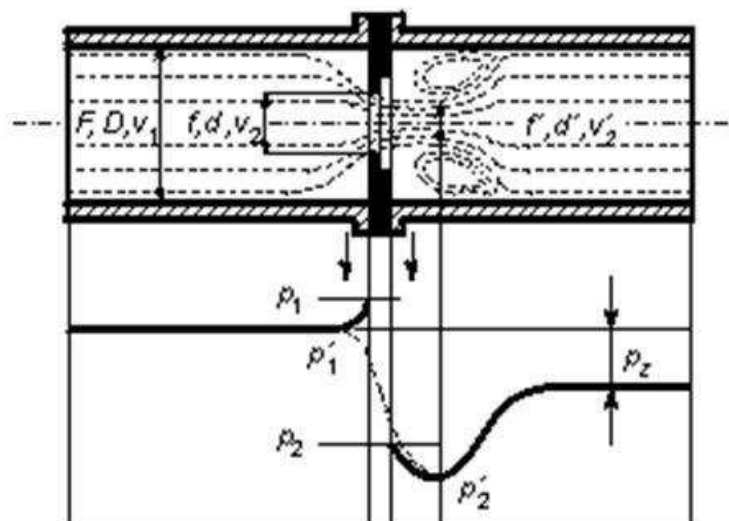
6.2. Instalace chladiče

Instalace chladiče je do značné míry rozhodujícím faktorem měření. V případě otevřených tratí se používá jednoduchá zástavba. To je zachyceno na obr.15, kde je na desku s odpovídajícími rozměry činné plochy chladiče usazen chladič. V případě uzavřených tratí vycházející z aerodynamických tunelů je však situace variabilnější.

Možné způsoby jsou uvedeny níže.

Zástavba chladiče do měřicího prostoru jako clona

Chladič je zastavěn do měřicího prostoru jako clona. Viz. obr. 17. Chladič je přichycen k desce, ve které je otvor odpovídající činné ploše chladiče. To umožňuje velkou rozměrovou variabilitu měřených chladičů. Statické odběry tlaků při měření tlakové ztráty na cloně jsou v těsné blízkosti clony (před i za clonou). Vír, který se za clonou vytvoří, komplikuje měření chladiče a v některých případech ovlivní i měření tlakové ztráty.

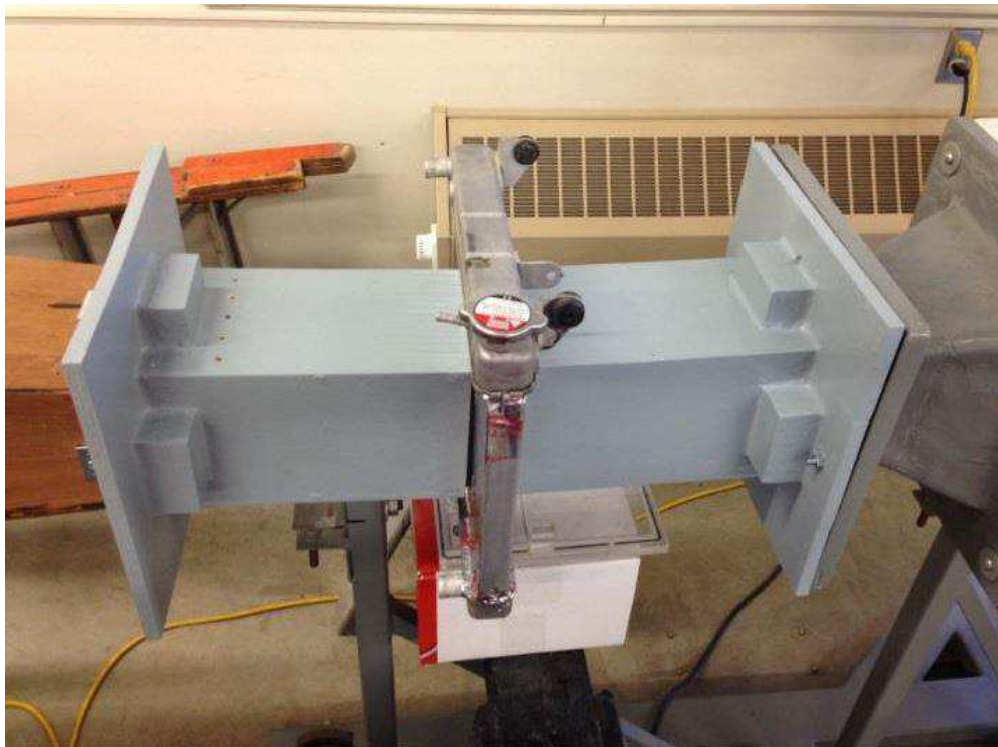


Obr. 17: Průběh tlaků na cloně

Výhody:	Nevýhody
velký rozměrový rozsah měřených chladičů	vír vznikající za clonou ovlivňuje měření
snadná instalace chladičů	nemožnost měřit kvalitu proudu

Měření na části chladiče

Chladič je vložen mezi části měřicího prostoru. Měří se jen na části chladiče. Tento způsob instalace umožňuje měřit pouze vlastnosti vzduchu. Tlakové ztráty jsou měřeny v těsné blízkosti před a za chladičem. V případě většího rozměru měřicí sekce je možno měřit i kvalitu proudu. Tento způsob představuje nejsnadnější a nejrychlejší způsob měření tlakové ztráty.



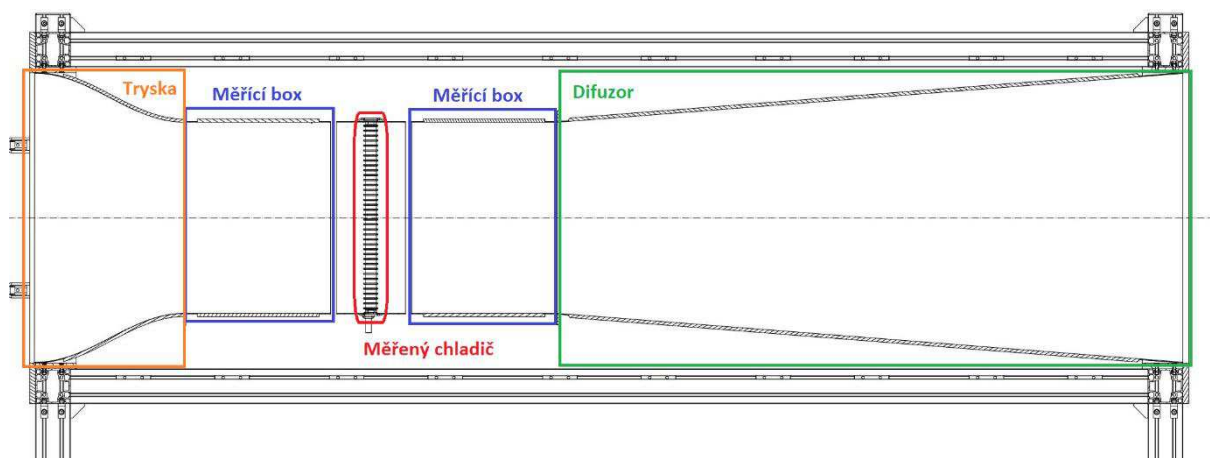
Obr. 18: Měření na části chladič

Výhody:	Nevýhody
velký rozměrový rozsah měřených chladičů	nemožnost měřit výkon chladiče
snadná instalace chladičů	
možnost měřit kvalitu proudu	

Zástavba chladiče do měřicí sekce na Leteckém ústavu (LÚ)

Pro měření v aerodynamickém tunelu na LÚ byl chladič instalován tak, aby nebylo měření ovlivněno zástavbou, a bylo možno měřit kvalitativně proud před i za chladičem. Dále zástavba musí umožnit měření silových účinků a měření výkonů. Protože způsoby instalací chladičů do měřících prostorů měřicí tratí jsou často střeženým tajemstvím a běžně používaná instalace na desku nepřípadala v úvahu, tak se autor rozhodl pro vlastní řešení zástavby. Tato zástavba plně respektovala všechny požadavky. Zástavba byla inovativní pro měření chladičů, proto se během realizace objevilo několik problémů.

Chladič je nainstalován do měřicí sekce pomocí kompozicových tvarových dílců. Tyto dílce obsahují trysku, která redukuje původní průřez na průřez odpovídající rozměrům chladiče, dále je zde měřicí box s drážkou pro sondy. Měřicí box je před i za chladičem. Za měřicím boxem za chladičem je umístěn difuzor.



Obr. 19: Zástavba chladiče do měřicí sekce

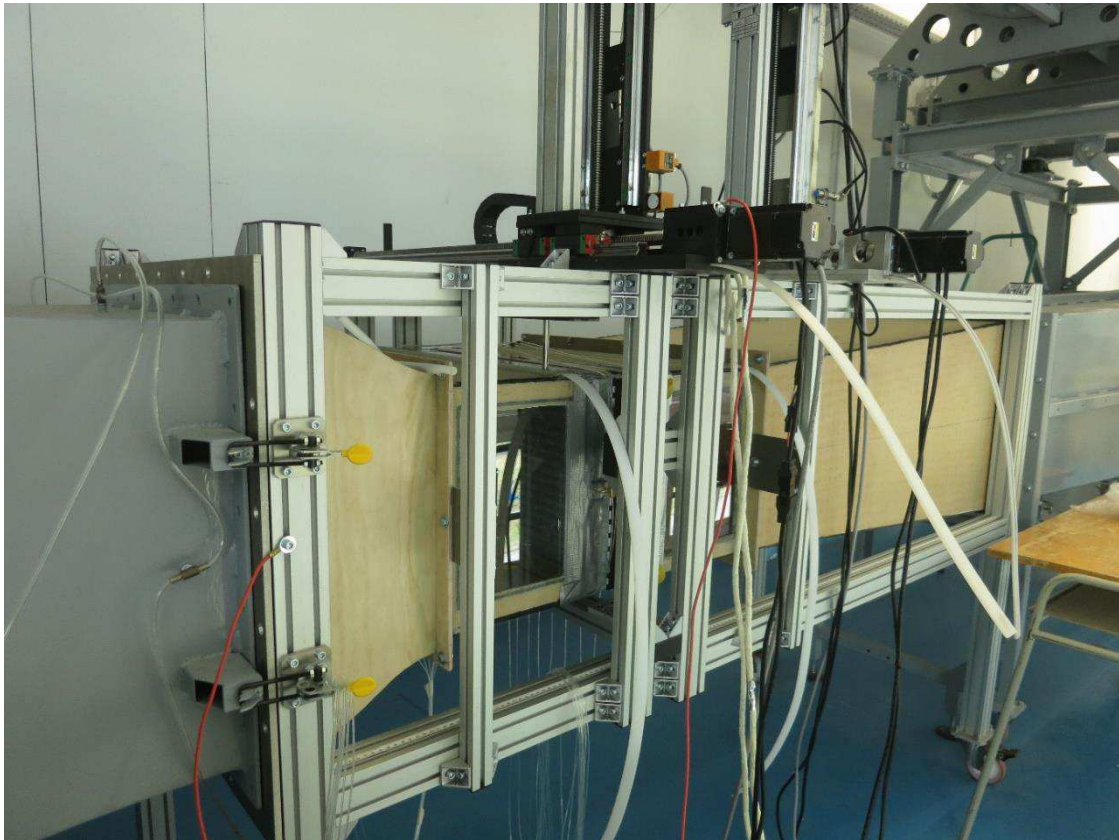
Prostor mezi rámy kolem chladiče a měřicími boxy byl utěsněn lepicí páskou. Mezera mezi měřicím boxem a rámem kolem chladiče byla navržena z důvodu plánovaného měření silových účinků na chladič tak, aby instalace neovlivňovala měření.

Vlastní chladič byl uchycen za úchytné body na chladiči k rámu měřicí sekce pomocí konstrukčních hliníkových profilů. To umožňuje velice snadnou instalaci různých provedení chladičů. Vlastní tvarové dílce je třeba vyrobit pro každý chladič nové. To však sebou nese nutnost vždy vyrobit pro daný chladič všechny části nové. Velká nevýhoda je v podobě náročnosti instalace (časové a finanční). Výhodou pak je, že je možno změřit velice přesně tlakovou ztrátu chladiče. Před a za měřeným chladičem je možné proměřit celý průřez, což umožňuje mít detailní informaci o rozložení rychlosti, tlaku, teploty, a dalších veličin v daném řezu. Vliv zástavby nemá negativní vliv na chování chladiče na rozdíl od používaných způsobů zástaveb.

V průběhu měření se ukázalo, že je třeba vyřešit problém s utěsněním sond v měřicích boxech. Zkoušelo se několik variant provedení od neutěsněných, po různá těsnění, až po posuvný pásek, který se ukázal jako ideální. Vliv těsnění sond a mezery mezi prvky pak mělo značný vliv na tlakovou ztrátu.



Obr. 20: Reálná zástavba chladiče

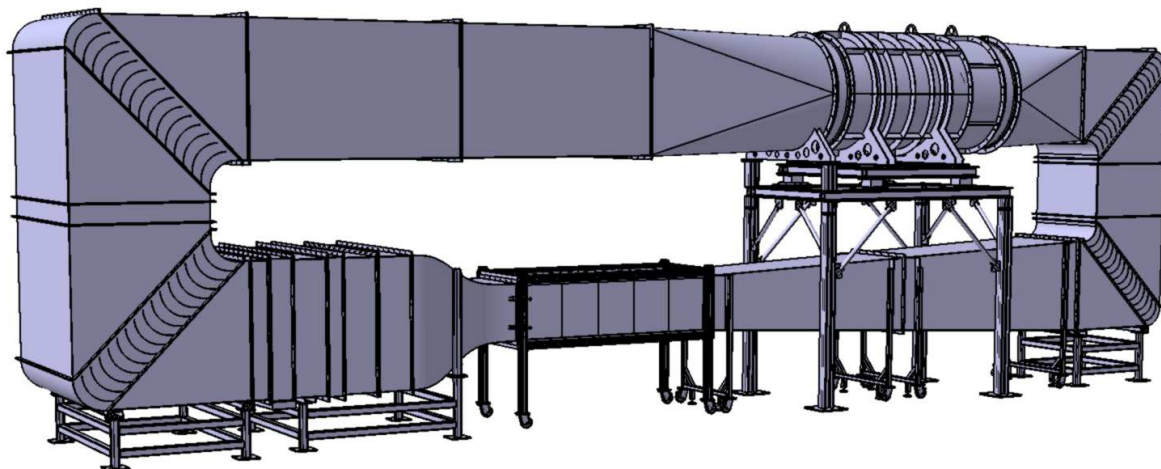


Obr. 21: Reálná zástavba chladiče

Výhody:	Nevýhody
zástavba neovlivňující měření	malý rozsah rozměrů měřených chladičů
možnost měřit kvalitu proudu	finanční a časová náročnost zástavby
možnost měřit výkony chladičů	
možnost měřit silové účinky chladiče	

6.3. Měřicí trať na Leteckém ústavu

Jedná se o uzavřený aerodynamický tunel (měřicí trať) s uzavřenou měřicí sekci. Viz. obr. 22.



Obr. 22: Model měřicí trati na LÚ

Měřicí trať není určena jen na měření charakteristik chladiče, ale i na obecná aerodynamická měření. Existují dvě provedení měřicí sekce. Jedna je určena pro měření v konfiguraci aerodynamický tunel, druhá je určena pro měření chladičů. Rozdíl je pouze v tom, že pro měření chladičů je měřicí sekce bez stěn z plexiskla. Do rámu z hliníkových profilů je pak zastavěn chladič (viz. Zástavba do měřicí sekce na LÚ). Základní parametry trati jsou uvedeny v tabulce níže. Parametry platí pro prázdnou měřicí sekci.

rozměry měřicí sekce	500 x 700 -2000	m
max. rychlost	60	m/s
max. intenzita turbulence	< 0.4	%
Instalovaný chladič	60	kW

Tabulka 1: Základní údaje měřicí tratě

Celá měřicí trať byla od samého začátku navržena modulárně a byly plánovány i 3 rozdílné rozměry měřících sekcí. Prioritní však byla největší z měřících sekcí, která byla také součástí dodávky měřicí trati.

Před dýzou (konfuzorem) je prostor pro síta a voštiny. Dále je v této části tunelu chladič sloužící k ochlazení proudu vzduchu, který se zahřívá samotným oběhem vzduchu v aerodynamickém tunelu. Instalovaný chladič v měřicí trati je připraven na chladičový výkon až 120kW, stejně tak i výměník instalovaný na střeše budovy. Zatím je však nainstalována jedna chladičová stanice s kompresorem o výkonu 60kW. Přidáním druhé stanice a úpravou systému bude umožněno měřit komplexní vlastnosti chladičů. Tato úprava také přinese lepší rozsah regulace chladičového výkonu, zejména pak na jejím spodním rozsahu. V současné podobě je nejnižší výkon 10 %, což je pro aerodynamická měření příliš. Tento nejnižší výkon je dán vlastnostmi nainstalované chladičové stanice. Nejnižší trvalé otáčky motoru chladičové stanice odpovídají právě 10%. Při regulaci pod 10 % by docházelo k neustálému vypínání a spínání kompresoru, což má za následek výrazné zkrácení životnosti kompresoru chladičové stanice.

Součástí měřící tratě musí být i měřící aparatura. Měřící aparatura se průběžně doplňuje o nové zařízení. Stav ke konci května 2016 je následující:

Tlakové převodníky:

Omega PX655 – 01DI (nově zakoupený po měření chladičů)

Omega PX655 – 10DI (nově zakoupený po měření chladičů)

Omega PX655 – 50DI

Omega PX655 – 25BDI

Scanivalve ZOC 17 -8 portů

Měřící sondy:

Pitot – statická sonda 4ks (zakoupeny další 2ks po měření chladičů)

Pěti otvorová sonda

Teplotní sonda kombinující měření statického tlaku

Horký drátek:

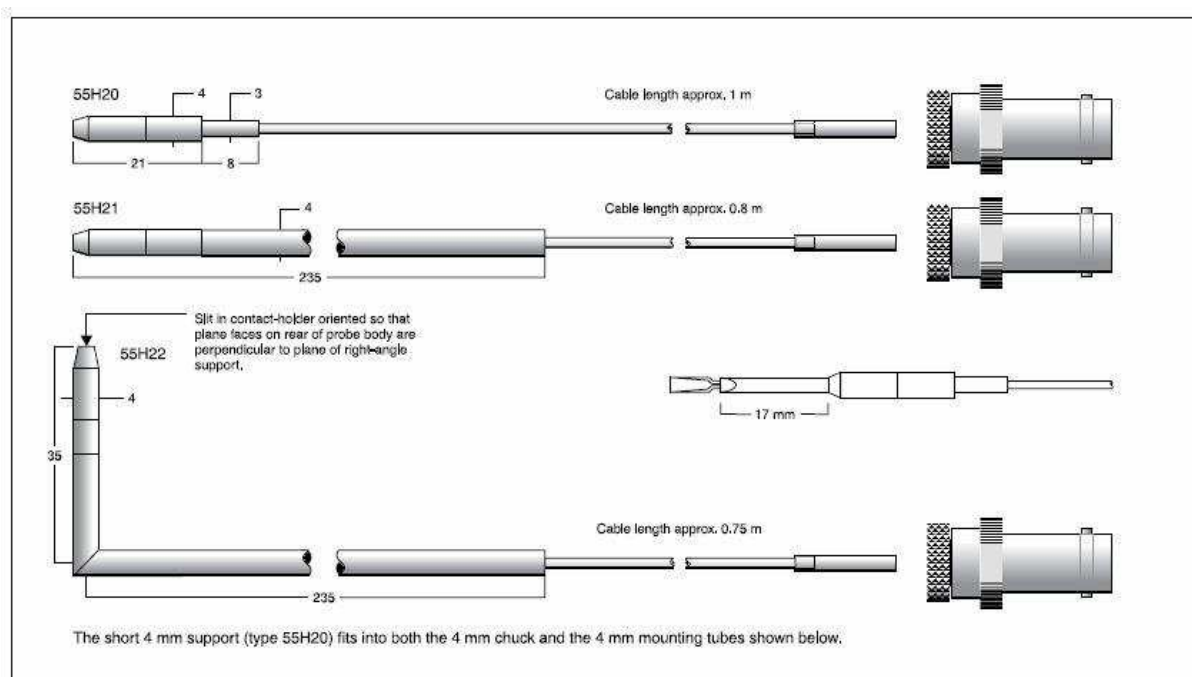
MiniCTA (1 kanál) + teplotní čidlo

Jednosměrná sonda 55R01 – 6ks

Držáky sond pro jednu sondu:

Krátká přímá 55H20

Zahnutá o 90° 55H22



Obr. 23: Ukázka držáků sond pro horký drátek

Sondy jsou pak uchyceny do dvou traverzérů umožňující automatizovaný pohyb ve dvou osách. Pro kalibraci a rekalibraci tlakoměrů byl použit kalibrátor tlaku Druck DPI 615PC.

Pro čtenářovu představu je zde uvedena časová náročnost vybudování měřicí trati od první technické specifikace po měření chladiče. Veškeré technické náležitosti kolem měřicí trati řešil autor práce sám.

Pro daný rok jsou uvedeny nejvýznamnější činnosti spojené s měřicí trati:

- 2011 myšlenka na stavbu měřicí tratě
- 2012 definice technické specifikace trati
- 2013 výběrové řízení, dodávka trati, oživení trati
- 2014 nákup CTA, kalibrace měřicího prostoru
- 2015 návrh a výroba zástavby chladiče, dovybavení CTA teplotním čidlem
- 2016 měření chladiče

Jak je z přehledu patrné, stavba měřicí trati je časově, administrativně a také finančně velmi náročná. S rostoucími zkušenostmi také rostou nároky na přesnost a kvalitu výsledků a díky tomu dochází k vybavování tratě o nové přístroje a zařízení. Z důvodů velké administrativní zátěže nebylo možno měřicí trať doplňovat průběžně o další měřicí vybavení ihned po zjištění nedostatků stávajícího vybavení. Díky tomu pak nedošlo k měření komplexních charakteristik chladiče a měření silových účinků. Některé úpravy nebyly provedeny okamžitě, ale byly naplánovány v rámci většího balíku vylepšení.

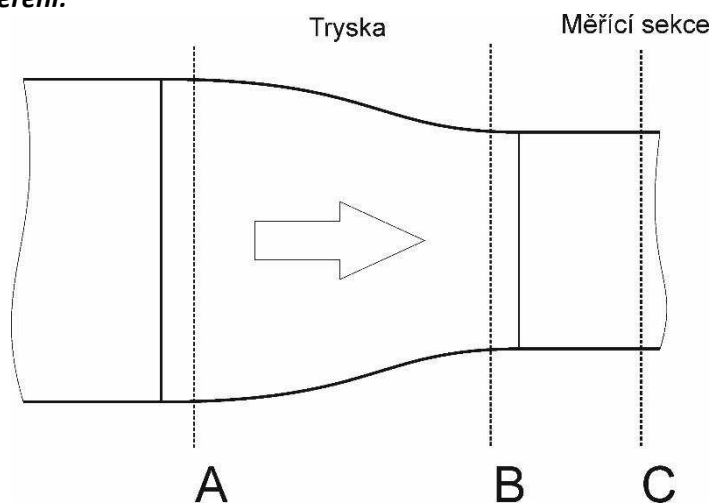
7. Kalibrace měřicího prostoru

Před měřením chladiče v aerodynamickém tunelu bylo třeba provést kalibraci měřicího prostoru. Tato kalibrace spočívala v proměření 3 různých průřezů pro definované rychlosti proudění. Z této kalibrace byla zjištěna tunelová konstanta pro prázdnou měřicí sekci. Kalibrace měřicího prostoru byla provedena za účelem zjištění kvality proudu. Kvalitou proudu se pak rozumí, rovnoměrné rozložení dynamického tlaku (rychlosti), intenzity turbulence, teploty v daném průřezu. Odchylka těchto veličin by pak měla být od referenční hodnoty dostatečně malá. Velikost odchylky je rozdílná dle měřeného objektu a dané veličiny.

7.1. Měření tunelové konstanty

Účelem měření je zjistit tunelovou konstantu. Tunelová konstanta říká, jak se liší hodnota naměřených rozdílů statických tlaků na začátku a konci trysky proti rychlosti uvnitř měřicí sekce. Této hodnoty se pak využívá v případech, kdy není možno umístit do měřicí sekce pitot-statickou sondu.

Teoretický rozbor měření:



Obr. 24: Schéma trysky a měřicí sekce

Místa A, B a C představují místa, ve kterých měříme tlak. V místě C je umístěna pitot-statická sonda. Z Bernoulliho rovnice pak platí:

$$p_{S,A} + q_A = p_{S,B} + q_B - K_1 q_B \quad (7.1)$$

Kde q_b K_1 představuje tlakovou ztrátu celkového tlaku mezi body A a B. Z rovnice kontinuity platí:

$$S_A v_A = S_B v_B \quad (7.2)$$

Úpravou rovnic dostaneme:

$$q_A = \left(\frac{S_B}{S_A}\right)^2 q_B = K_2 q_B \quad (7.3)$$

Dosazením q_A z rovnice (7.3) do rovnice (7.1) získáme:

$$p_{S,A} - p_{S,B} = (1 - K_1 - K_2) q_B \quad (7.4)$$

Protože průřez v místě B a C není stejný tak opět vyjdeme z Bernouliho rovnice a rovnice kontinuity pro body B a C. A stejným postupem jako pro body A a B získáme následující rovnici:

$$q_B = \left(\frac{S_C}{S_B}\right)^2 q_C = K_3 q_C \quad (7.5)$$

Dosazením do rovnice (7.4) získáme:

$$p_{S,A} - p_{S,B} = (1 - K_1 - K_2) K_3 q_C \quad (7.6)$$

Pokud budeme rozdíl tlaků $p_{S,A} - p_{S,B}$ brát jako dynamický tlak, tak můžeme rovnici (7.6) přepsat v rychlostech:

$$v_{A,B} = \sqrt{(1 - K_1 - K_2) K_3} v_C = K_T v_C \quad (7.7)$$

$$K_T = \frac{v_C}{v_{A,B}} \quad (7.8)$$

Rychlost v_C měříme pomocí pitot- statické sondy

Rychlost $v_{A,B}$ měříme odběry statického tlaku na stěnách trysky

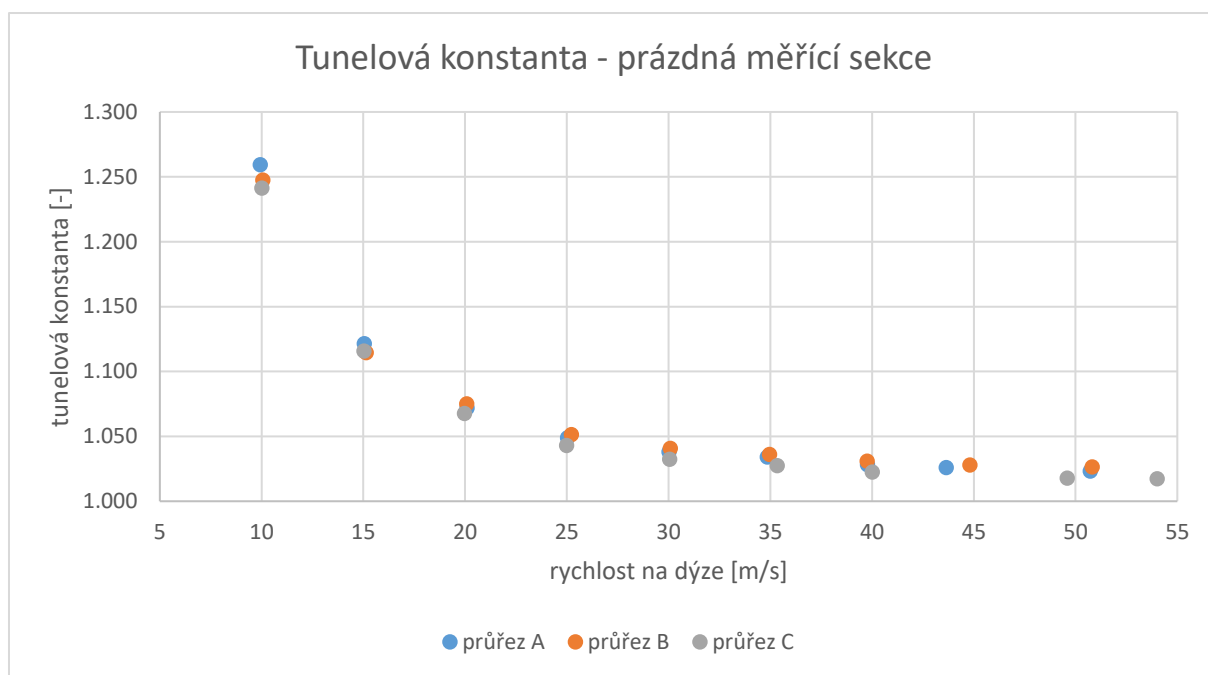
Použité měřicí sondy:

Pitot-statická sonda

Popis měření:

V předem definovaných vzdálenostech je v měřicí sekci uchycena pitot-statická sonda do traverséru. Sonda je propojena s tlakovým převodníkem. Poloha sondy je nastavena do definované polohy v daném řezu. Postupně se mění otáčky motoru a tím pádem i rychlost proudícího vzduchu. Měřicí program zaznamenává v daný okamžik teploty uvnitř měřicí sekce, tlak z tlakoměru připojeného k odběrům tlaku z dýzy, tak i tlak z pitot-statické sondy. Z naměřených dat je pak vypočítán poměr rychlostí na pitot-statické sondě a dýze. Tento poměr pak udává hodnotu tunelové konstanty. Pomocí tunelové konstanty je pak možno regulovat rychlost aniž by byla přítomna pitot-statická sonda uvnitř měřicího prostoru. Nevýhodou je však, že potřebuje tunelovou konstantu určit před každým měřením pro konkrétní konfiguraci.

V tomto konkrétním případě byly měřeny 3 průřezy ve vzdálenostech, které byli zajímavé – předpokládané umístění modelů. Hodnota tunelové konstanty bude později využita ke kalibraci horkého drátku a k měření intenzity turbulence.



Graf 2: Průběh tunelové konstanty pro rozdílná místa měření

7.2. Měření rozložení dynamického tlaku – rychlosti

Rozložení dynamického tlaku (rychlosti) je důležité hlavně z důvodu, abychom se dozvěděli o kvalitě proudu uvnitř měřicí sekce a na základě tohoto měření se pak měřicí trať může osadit voštinou, aby bylo dosaženo požadovaného rozložení rychlosti.

Použité měřicí sondy:

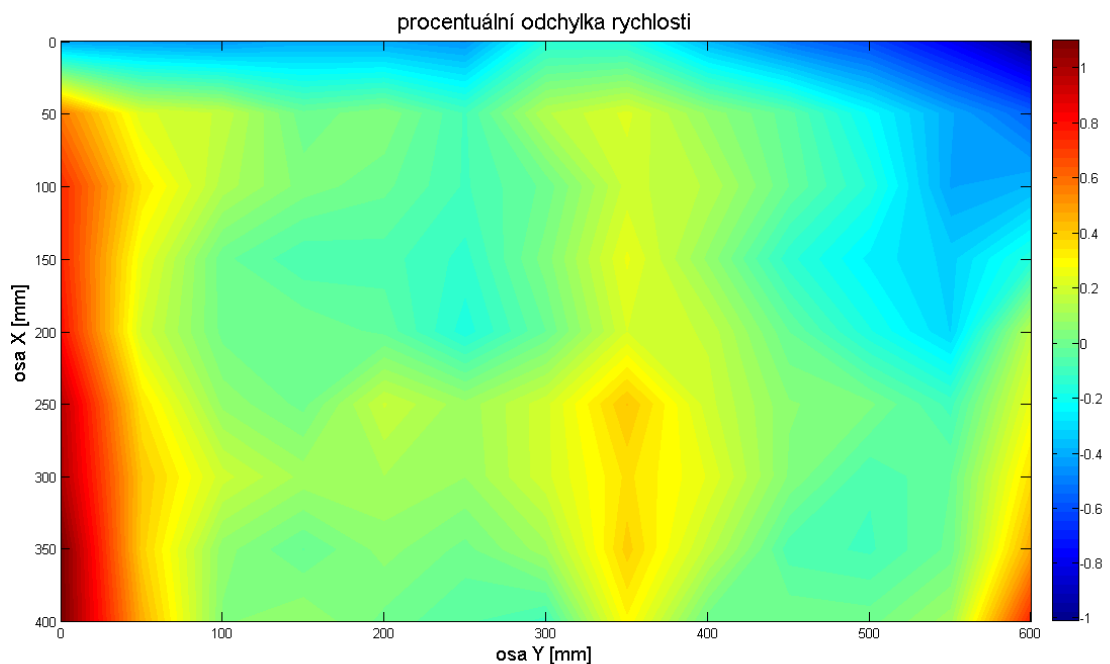
Pitot-statická sonda

Popis měření:

Daný průřez je proměřen pitot-statickou sondou. Sonda je uchycena do traverzéry, který je řízen počítačem a pohybuje sondou ve dvou osách s definovaným krokem. V tomto případě byl zvolen krok 50mm. V každém měřeném bodě je zaznamenán dyn. tlak pomocí tlakoměru, teplota uvnitř měřicí sekce. V každém průřezu bylo měřeno několik rychlostí proudu.

Poté byla vyhodnocena odchylka dynamického tlaku vzhledem k dynamickému tlaku v referenčním bodě. Z dynamického tlaku byla pak vypočtena rychlost.

V prázdné měřicí sekci je rozložení procentuální odchylky rychlosti od rychlosti v referenčním bodě následující:



Obr. 25: Rozložení odchylky rychlosti

Z ukázaného rozložení je patrné, že rozložení rychlosti je poměrně rovnoměrné. Pokud zanedbáme největší odchylky v horním a dolním rohu, tak je celková odchylka není vyšší než $\pm 0.4\%$ z referenční rychlosti.

7.3. Měření intenzity turbulence

Intenzitu turbulence a její rozložení potřebujeme znát z více důvodů. Hodnota intenzity turbulence má velký vliv na výsledky měření. Intenzitu turbulence můžeme měřit několika možnostmi. V tomto případě byla měřena pomocí žárového anemometru (horký drátek). Na základě změření intenzity turbulence se mohou přidat síta tak, abychom dosáhly požadované intenzity turbulence a tím kvality proudu.

Princip měření žárovým anemometrem:

Horký drátek pracuje na základě přenosu tepla konvekci ze žhaveného elementu (drátek, film ...) do okolního prostředí.

Platí rovnost tepelného toku a příkonu pro elektrický ohřev elementu.

Tepelný tok:

$$Q = S\alpha(t_w - t_\infty) \quad (7.9)$$

Příkon el. ohřevu elementu

$$kP = RI^2 \quad (7.10)$$

Technicky pak můžeme mít 2 možné varianty žárového anemometru.

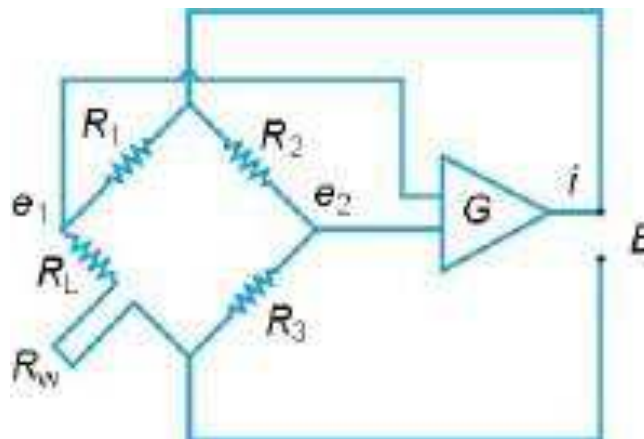
CCA – Constant Current Anemometer – anemometr se stálým proudem

CTA – Constant Temperature Anemometer – anemometr se stálou teplotou

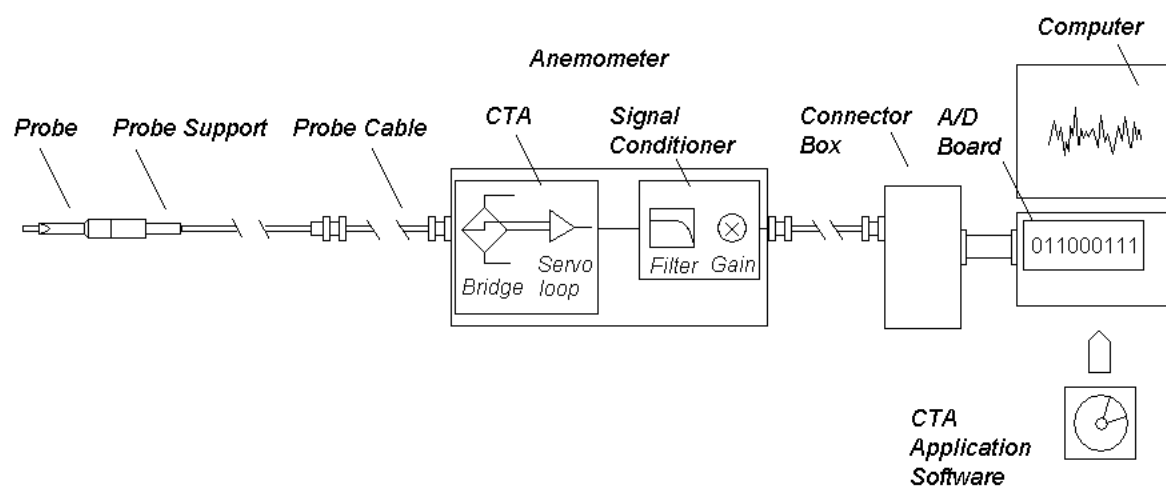
Nejčastěji používaným pak je CTA systém ten byl také využit i v tomto případě.

Princip CTA systému:

Prouděním kolem žhaveného elementu dochází k jeho ochlazení. Abychom udržely konstantní teplotu (odpor), tak systém obsahuje Wheatstonův můstek a zesilovač. Do systému je pak dále zařazen voltmetr, díky němuž známe závislost mezi ochlazením a potřebným napětím, aby byla zajištěna konstantní teplota.



Obr. 26: Schéma CTA systému



Obr. 27: Schéma měřicího řetězce horkého drátku

Rychlost ochlazování elementu je úměrná rychlosti proudu, toho se využije při rychlostní kalibraci sondy.

7.3.1. Kalibrace sondy

Před každým měřením s žárovým anemometrem je třeba provést rychlostí kalibraci.

Použité měřící vybavení:

Diferenciální tlakoměr Omega

MiniCTA

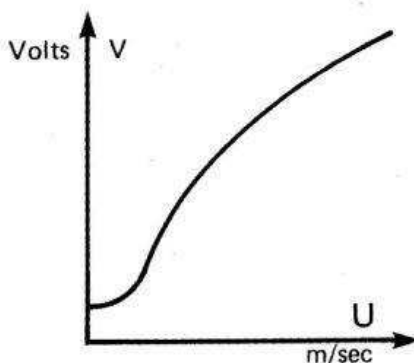
Přímý drátek – hot film

Držák drátku zahnutý o 90°

Popis měření:

Na základě vypočtené tunelové konstanty byla nastavena rychlost proudu. Zaznamená se odpovídající napětí, teplota, tlak. Poté se změní rychlost a opakujeme, dokud nemáme dostatek bodů (aspoň 10). Rozsah rychlosti by měl odpovídat zamýšleným rychlostem, při kterých se bude horký drátek používat. V tomto případě od cca 5 do 60 m/s.

Typická závislost rychlosti proudu a napětí pro horký drátek vypadá následovně:



Obr. 28: Typický průběh závislosti napětí a rychlosti proudu pro horký drátek

Data můžeme proložit buď to polynomem či exponenciálou. Koeficienty se pak použijí pro pozdější měření. Ideální je, pokud se už dále nemanipuluje se sestaveným měřícím řetězcem. Jeho opětovným rozložením se už dopouštíme chyby. To však většinou není technicky možné. Protože pro kalibraci a pozdější měření používáme rozdílné zařízení či konfigurace měřících sekcí.

7.3.2. Měření rozložení intenzity turbulence

Použité měřicí vybavení:

Diferenciální tlakoměr Omega

MiniCTA

Přímý drátek – hot film

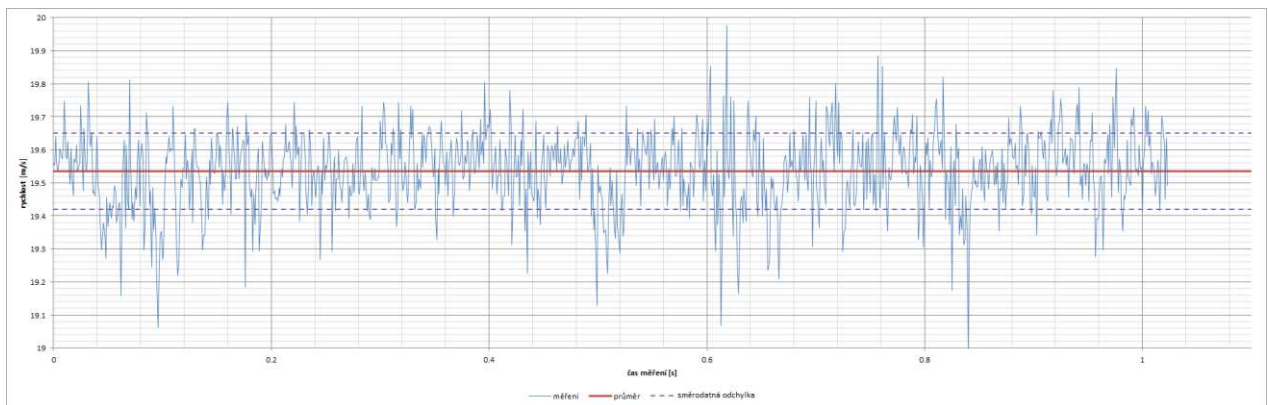
Držák drátku zahnutý o 90°

Popis měření:

Držák sondy je umístěn do držáku, který je upevněn v traverzéro. Traverzérem postupně měříme pozice po 50mm v obou osách. Vždy po změně pozice je třeba nějaký čas počkat a až poté se začne s měřením. Celý měřicí prostor měříme při jedné nastavené rychlosti. Pro změření celého průřezu je možno změnit rychlosti a měření opakovat. Měření bylo prováděno v několika řezech a pro několik rychlostí.

Zpracování naměřených dat:

Intenzita turbulence je definována jako poměr směrodatné odchytky a průměrné rychlosti.



Obr. 29: Časový průběh měření horkým drátkem

průměrná rychlost je definována:

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (7.11)$$

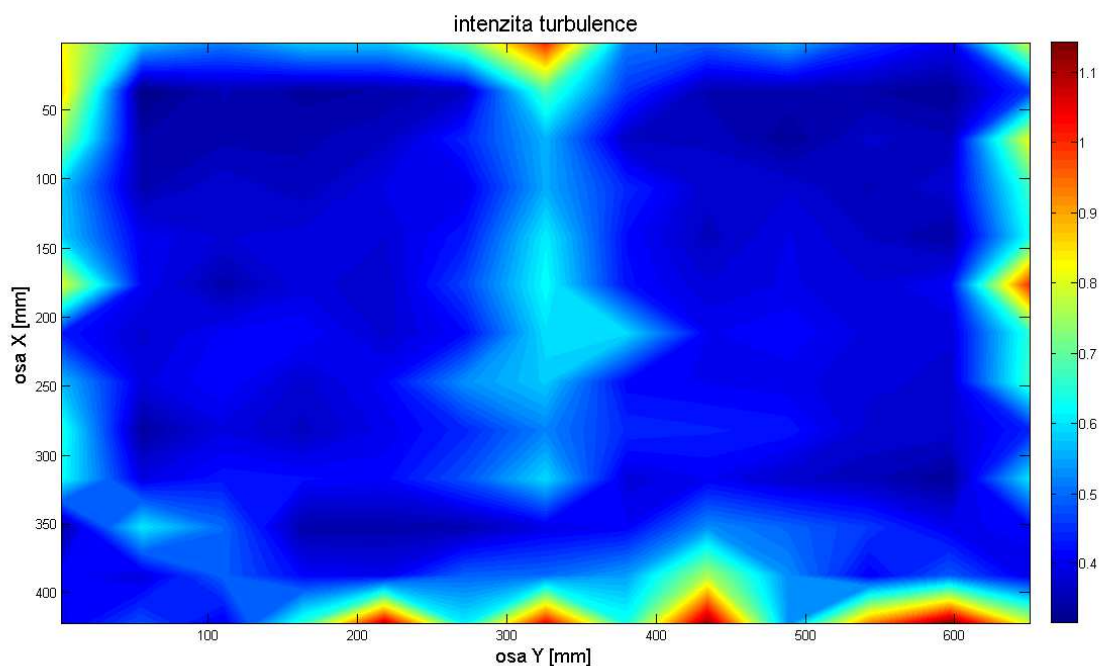
Směrodatná odchylka definována:

$$U_{mean} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{mean})^2 \right)^{0.5} \quad (7.12)$$

Intenzita turbulence:

$$IT = \frac{U_{rms}}{U_{mean}} \quad (7.13)$$

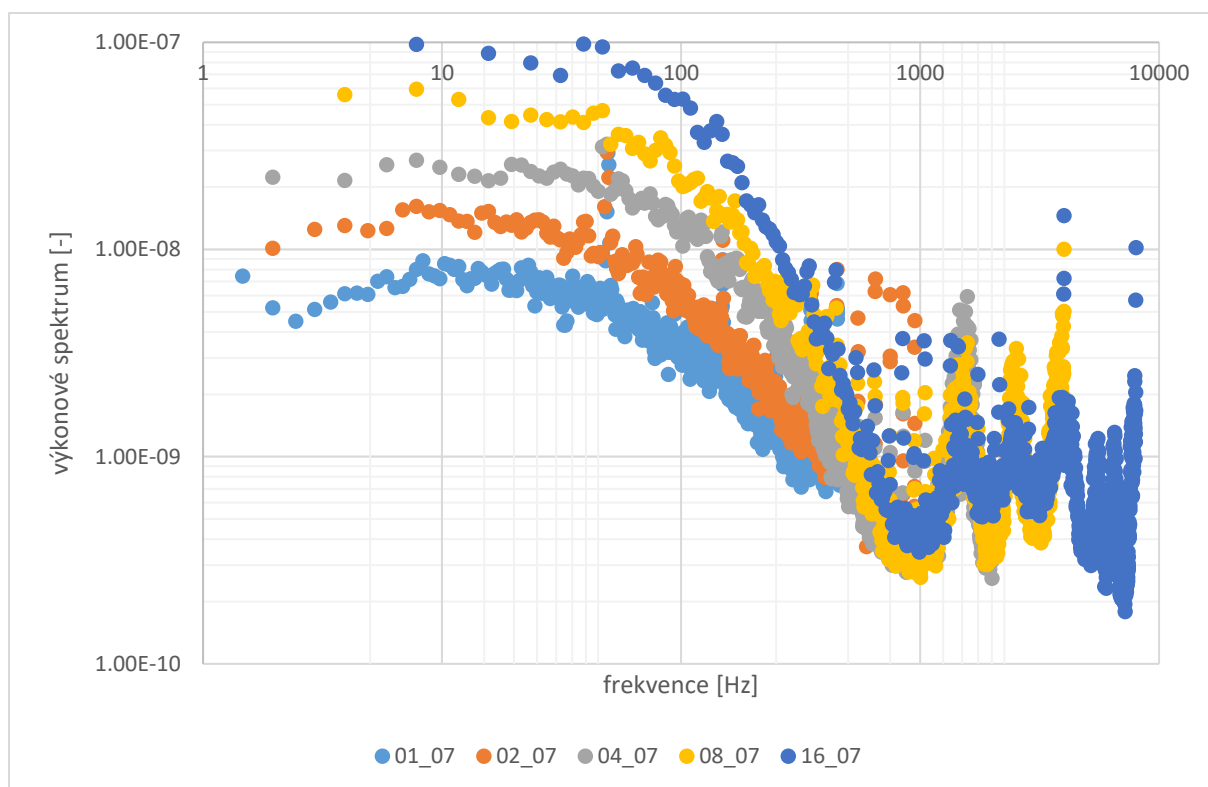
Na obr. 30 je ukázka rozložení intenzity turbulence v prostoru měřicí sekce.



Obr. 30: Rozložení intenzity turbulence [%]

Z obrázku je patrné, že mimo oblasti v blízkosti stěn nepřesahuje intenzita 0.5%. Modus z naměřených dat byl pak 0.33%. To je pro měření chladičů více než dostatečně nízká hodnota. Pro měření leteckých profilů je však míra intenzity turbulence velká a je ji třeba vylepšit. Nízkorychlostní aerodynamické tunely mají intenzitu turbulence nižší jak 0.2%. Zlepšení intenzity turbulence dotáhneme instalací jemnějších sít do měřicí sekce. Tyto síta však mají větší tlakové ztráty a tím pádem dojde ke snížení maximální dosažitelné rychlosti v měřicí sekci.

Protože horký drátek měří rychlost s velkou frekvencí, tak je možno se podívat na vlastnosti proudu i jinak. Příkladem může být třeba spektrální analýza. Ta řekne, jaké jsou dominantní frekvence v proudu a zda nastavená frekvence měření a počet vzorků je odpovídající. V grafu 3 je výstup z této analýzy pro různé vzorkovací frekvence. Z tohoto grafu je možné si ověřit, zda nedochází k elektrickému rušení měření. Pro tento konkrétní případ je pak dominantní frekvence vírů kolem 10Hz.



Graf 3: Spektrální analýza pro rozdílné vzorkovací frekvence měření

Po kalibraci měřicího prostoru a zjištěných vlastnostech proudového pole bylo přistoupeno k vlastnímu měření chladičů.

8. Měření chladičů

Byly měřeny 2 chladiče stejného typu. Zvolený chladič byl automobilový chladič o rozměrech činné plochy 650x345x26mm. Tento chladič byl zvolen z několika důvodů. Chladič byl použit jako testovací chladič v jiných zkušebnách chladičů a je ho možné srovnat. Činná plocha má vhodné zástavbové rozměry do použité měřicí sekce.

Popis instalace chladiče

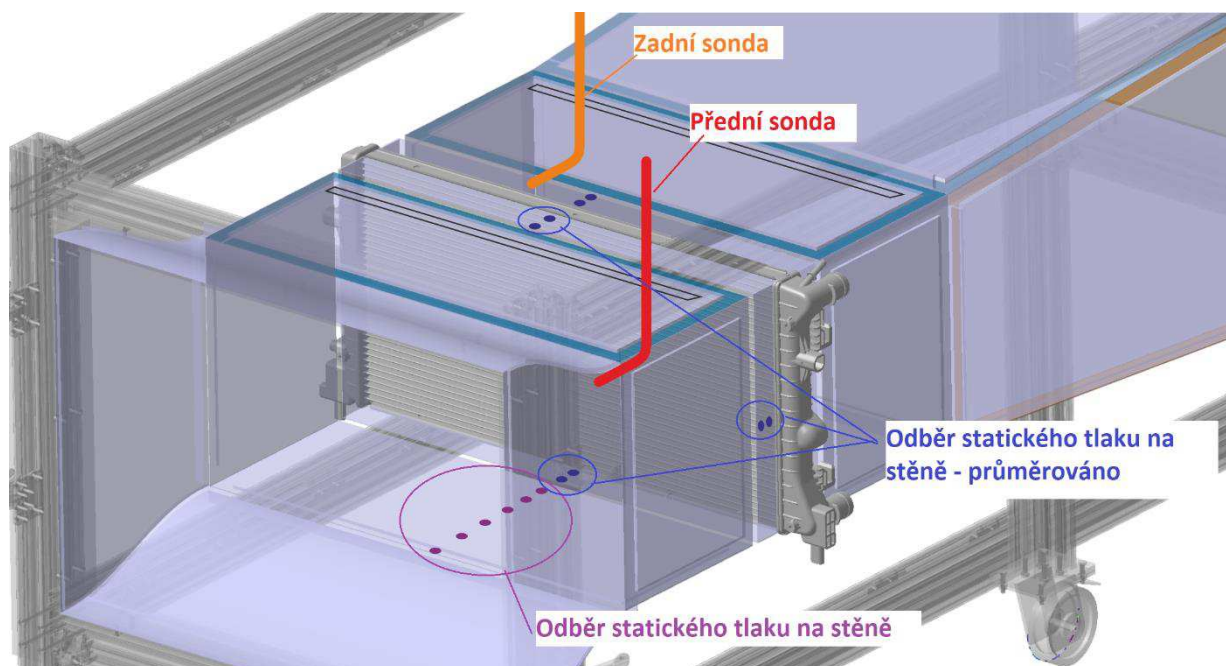
Viz. kapitola **Zástavba chladiče do měřicí sekce na LÚ**

8.1. Měření tlakové ztráty

Měření slouží pro zjištění základní vlastnosti chladiče – tlakové ztráty v závislosti na rychlosti chladicího vzduchu. Měření bylo prováděno na tzv. *studeném chladiči* – do chladiče nebyla přiváděna ohřátá chladicí kapalina.

Popis měření:

Na obr. 31 je schéma měření tlakové ztráty na chladiči.



Obr. 31: Schéma měření

Před i za chladičem jsou umístěny Prandtlovy sondy (na obr. 31 označeny jako přední a zadní sonda), které jsou uchyceny v traverzách. Sondy jsou během měření co nejdále od sebe (vždy 100mm od stěny) tak, aby se vzájemně neovlivňovaly. Přední sonda je připojena na diferenciální tlakoměr, statický tlak je pak pomocí T spojky připojen k druhému diferenciálnímu tlakoměru, kam je připojen statický tlak ze sondy umístěné za chladičem. Díky tomu, že jsou sondy přímo propojeny statickými tlaky, tak je měřena přímo hodnota tlakové ztráty. Přední sonda slouží především k měření rychlosti. Vzdálenost místa odběru statického tlaku je 175 mm před i za chladičem.

Na spodní straně boxů připojeným k chladiči jsou ve vzdálenostech 20, 40, 73, 93, 123, 163, 213 a 273 mm od chladiče (před i za chladičem) odběry statického tlaku. (na obr. 31 označeny jako Odběr statického tlaku na stěně a Odběr statického tlaku na stěně – průměrováno). První dvě vzdálenosti (nejblíže k chladiči) mají odběrná místa tlaku po obvodových stěnách,. Odběry jsou propojeny do jedné hadičky, která vede do tlakoměru. (na obr. 31 označeny jako Odběr statického tlaku na stěně – průměrováno) To slouží k měření průměrné hodnoty statického tlaku ze stěn. Tlak na stěnách je měřen 8-portovým diferenciálním tlakoměrem. Pro změření všech 16 portů bylo třeba přepojit hadičky. Měřicí program zaznamenával spolu s tlaky i teplotu a další parametry.

Použité měřicí vybavení:

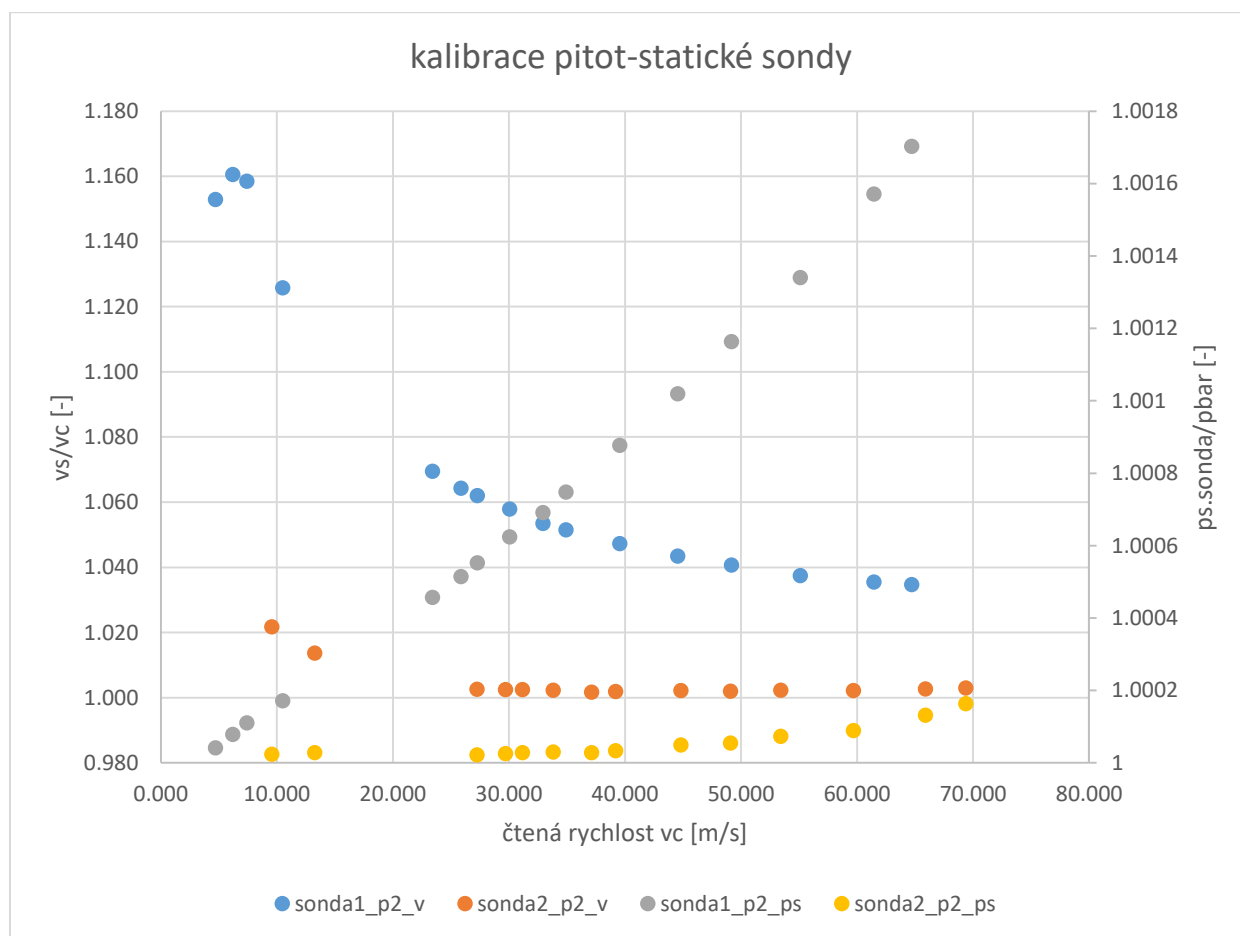
Diferenciální tlakoměr Omega 2ks

Diferenciální tlakoměr Scanivalve 8portů – 1ks

Pitot-Statická sonda 2ks

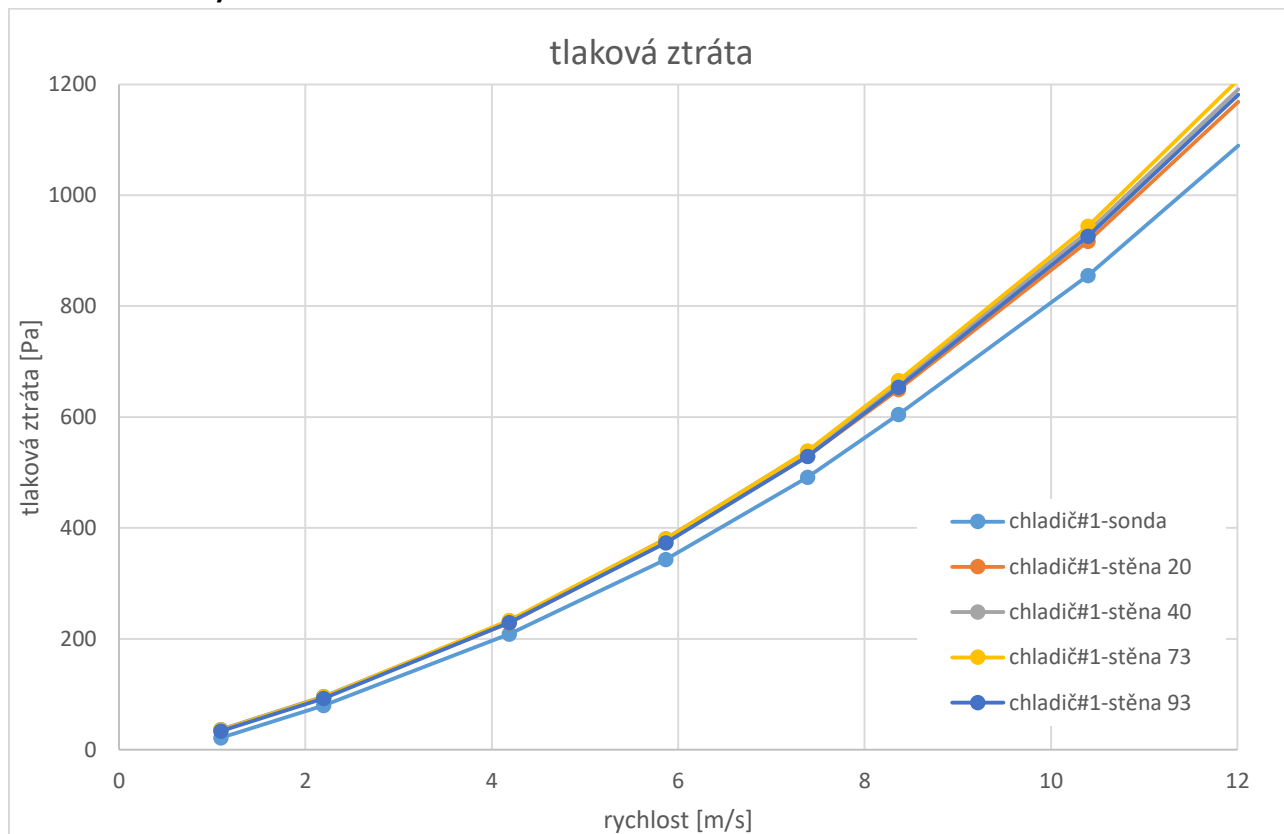
Zpracování naměřených dat:

Nejprve bylo třeba přepočítat naměřenou rychlost pitot-statickou sondou na skutečnou rychlost. Viz. kalibrace sond (Graf 4). Poté se již do grafu vynesla závislost rychlosti proudění s naměřenou tlakovou ztrátou. Vyhodnoceny byly i tlaky naměřené odběry na stěně měřicího boxu. Tlaková ztráta chladiče je pak rozdíl tlaků před a za chladičem. V případě odběrů statického tlaku to byl vždy rozdíl tlaků měřených v identických vzdálenostech před a za chladičem. Průběh statického tlaku v rozdílných bodech měření byl analyzován za účelem vykreslení jeho průběhu před i za chladičem.

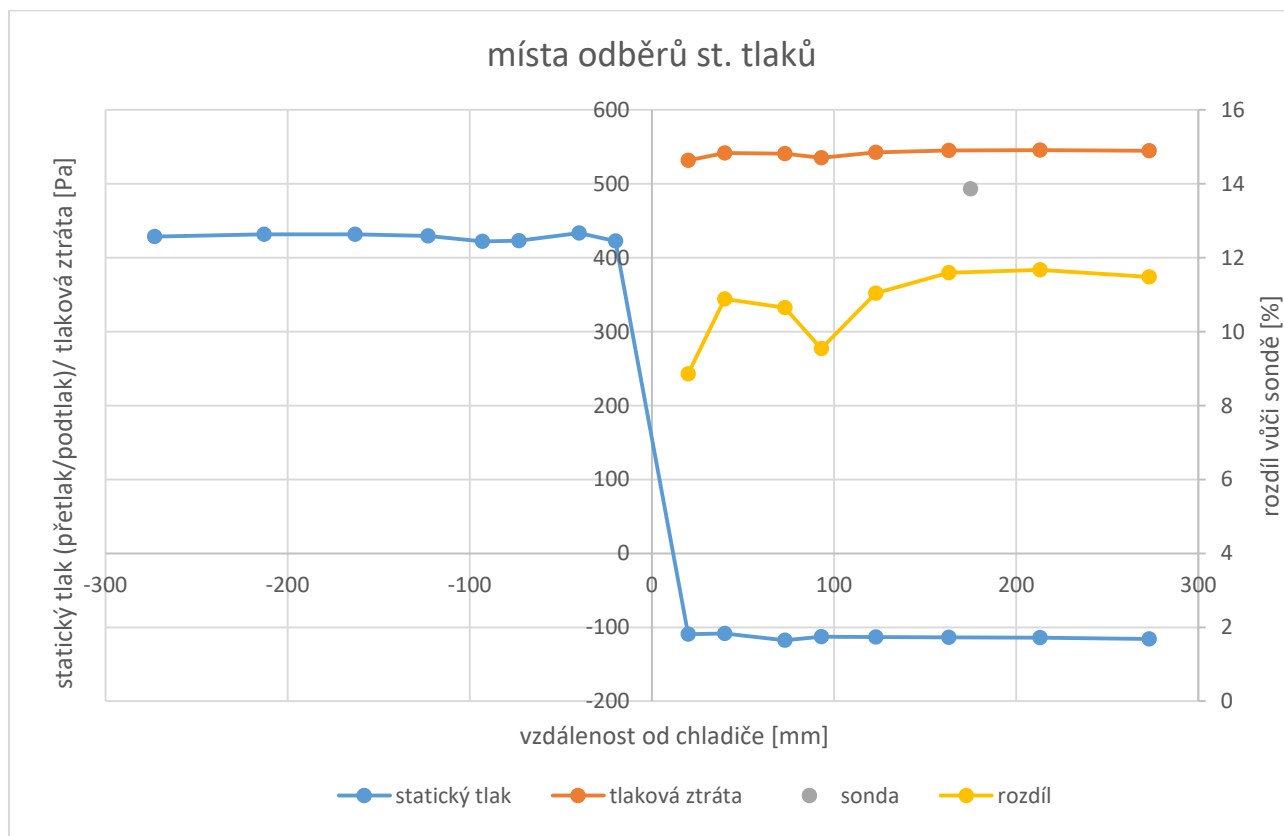


Graf 4: Ukázka dat z kalibrace pitot-statických sond

Ukázka naměřených dat:



Graf 5: Tlaková ztráta – porovnání míst měření



Graf 6: Průběh statického tlaku a tlakové ztráty v závislosti na místě měření

8.2. Měření rozložení tlakové ztráty

Toto měření je zajímavé především z důvodu, aby se zjistilo jaký vliv má místo měření tlakové ztráty.

Popis měření:

Měření je identické, jako v případě měření tlakové ztráty. Jediným rozdílem je to, že se po nastavení rychlosti přední Pitot- statická sonda přesune do místa, které je mimo měřený prostor. Zadní sondou se pak postupně trasuje za chladičem. Krok byl zvolen 50mm v obou směrech. Byl nastaven časový interval, během kterého se neměřilo. Ten sloužil k tomu, aby se sonda stabilizovala po najetí na danou pozici. Poté se změnila hodnota tlakové ztráty za chladičem. Pak se sonda přesunula na další pozici. Celkově bylo měřeno 72 bodů.

Použité měřicí vybavení:

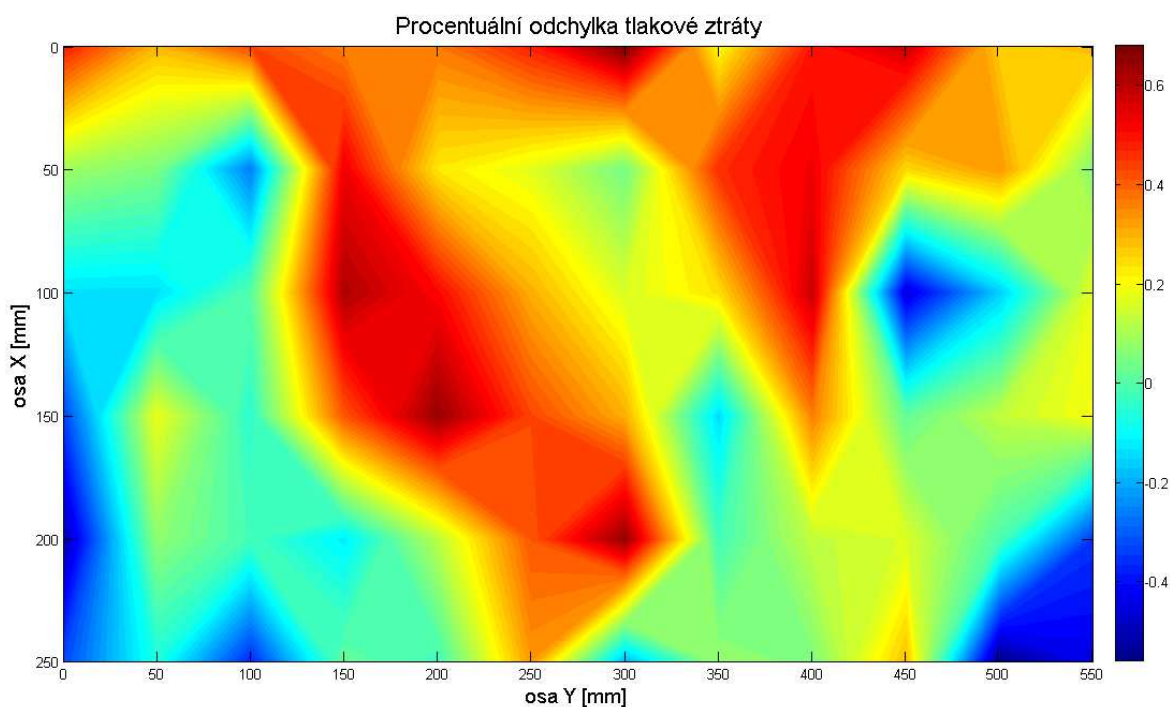
Diferenciální tlakoměr Omega 2ks

Pitot-Statická sonda 2ks

Zpracování naměřených dat:

Je identické, jako v předešlém případě. Z naměřené tlakové ztráty se vypočítala procentuální odchylka vůči referenčnímu bodu [100,100]. V tomto bodě se nastavuje rychlost proudu. Z procentuálních odchylek pak bylo vykresleno rozložení odchylky v prostoru.

Ukázka naměřených dat:



Obr. 32: Rozložení odchylky tlakové ztráty

Odchylka tlakové ztráty se pohybuje v rozmezí -0.56 až 0.68%. Odchylka tlakové ztráty bude ovlivněna především deformací jemných vlnovců chladiče.

8.3. Měření rozložení rychlosti před chladičem a za chladičem

Měření rychlosti před chladičem bylo provedeno z důvodů zjištění kvality proudu vzduchu vstupujícího/vystupujícího z chladiče. Dále také z důvodu pozdějšího srovnání s CFD výpočtem.

Popis měření:

Pitot-statické sondy jsou uchyceny v treverzích. Sondy jsou připojeny na diferenciální tlakoměry. Nejprve se nastaví požadovaná rychlost a poté se přední sondou proměří celý průřez – druhá sonda je mimo měřenou oblast, aby neovlivňovala měření. Opět se trasuje s krokem 50mm v obou směrech a celkový počet bodů je 72. Poté se při té samé rychlosti proměří prostor za chladičem a přední sonda je mimo měřenou oblast. Bylo měřeno několik vstupních rychlostí.

Použité měřicí vybavení:

Diferenciální tlakoměr Omega 2ks

Pitot-Statická sonda 2ks

Zpracování naměřených dat:

Z přepočtené rychlosti se nejprve vypočítal poměr dynamických tlaků v referenčním bodě [100,100] při nastavování rychlosti vůči konkrétnímu dyn. tlaku v daném místě.

$$k_n = \frac{q_0}{q_n} \quad (8.1)$$

Touto hodnotou se pak přepočítala hodnota dynamického tlaku v daném místě.

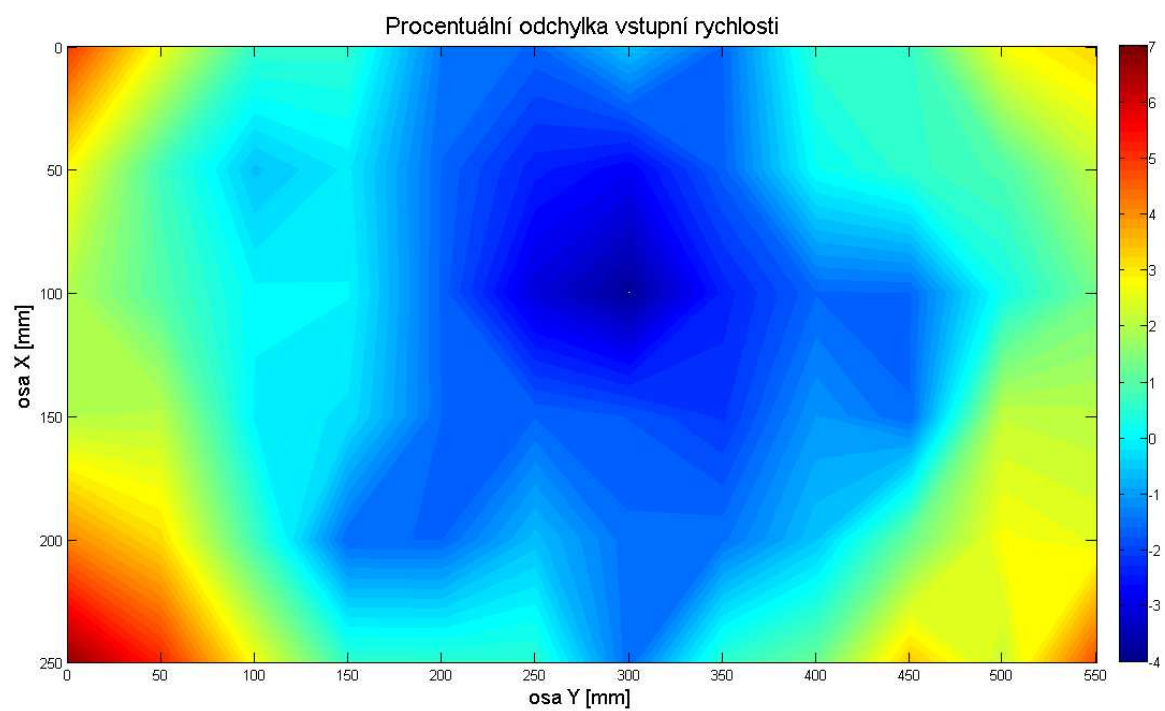
$$q_p = k_n q_n \quad (8.2)$$

A poté se z hustoty odpovídající hodnotě při nastavování rychlosti vypočítá rychlost.

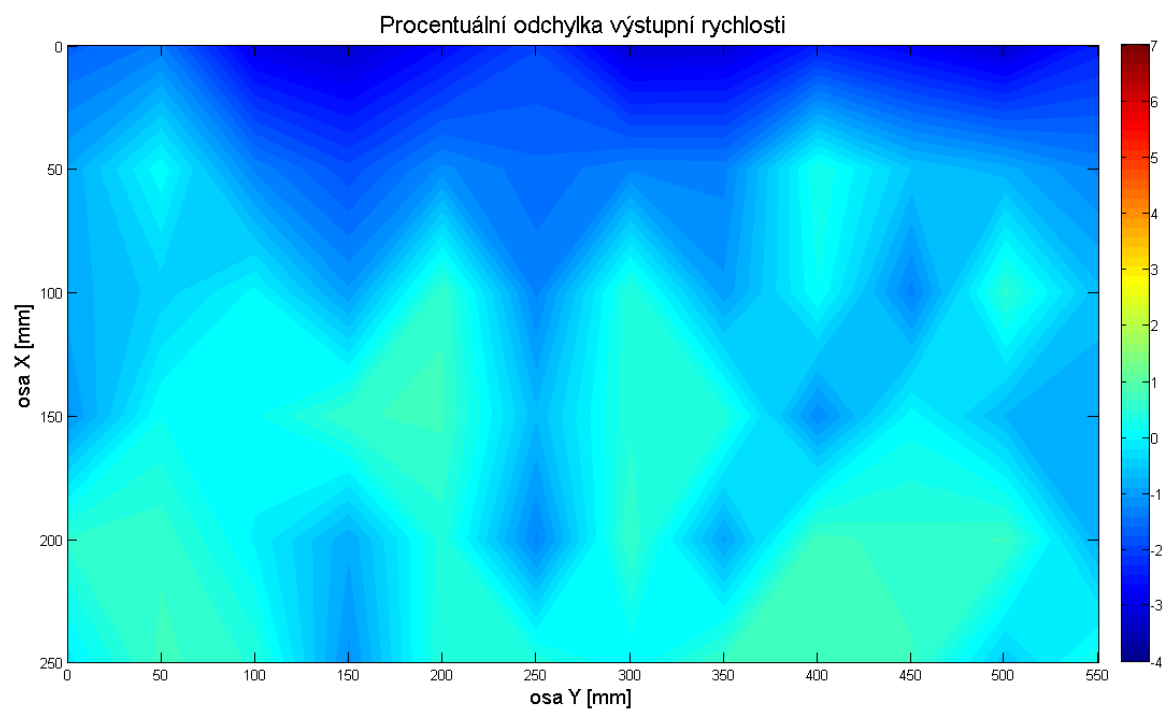
$$v_p = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho_0}} \quad (8.3)$$

To slouží k tomu, abychom eliminovali vliv ohřevu vzduchu během měření. Během měření došlo k ohřevu proudu vzduchu o necelé 2°C.

Ukázka naměřených dat:



Obr. 33: Procentuální odchylka rychlosti před chladičem



Obr. 34: Procentuální odchylka rychlosti za chladičem

8.4. Měření intenzity turbulence

Měření intenzity turbulence slouží k tomu, abychom dostali informaci o chování proudu za chladičem.

Popis měření:

Před každým měřením horkým drátkem je třeba provést kalibraci pro předpokládaný rozsah rychlostí. Kalibrace proběhla ve velkém měřicím prostoru. Bohužel však bylo třeba měřicí soustavu rozpojit a poté složit v sekci s chladičem. To má za následek snížení přesnosti měření – naměřená rychlost už 100% neodpovídá rychlosti během kalibrace. Tato nepřesnost v tomto případě není překážkou, protože není důležitá absolutní rychlost, ale míra intenzity turbulence.

Před chladičem je umístěna pitot-statická sonda, kterou se nastaví rychlost v referenčním bodě. Poté je sonda umístěna mimo měřicí oblast horkého drátku. Za chladičem je pak nainstalován v travverzě horký drátek. Tím je trasován prostor za chladičem s krokem 50mm v obou osách. Celkem je měřeno 72 bodů. Po změření při jedné rychlosti, se změní rychlost a měření se opakuje. V měřicí sekci je těsně za chladičem umístěno i teplotní čidlo. Toto čidlo slouží k provedení teplotní korekce.

Použité měřicí vybavení:

Diferenciální tlakoměr Omega 1ks

Pitot-Statická sonda 1ks

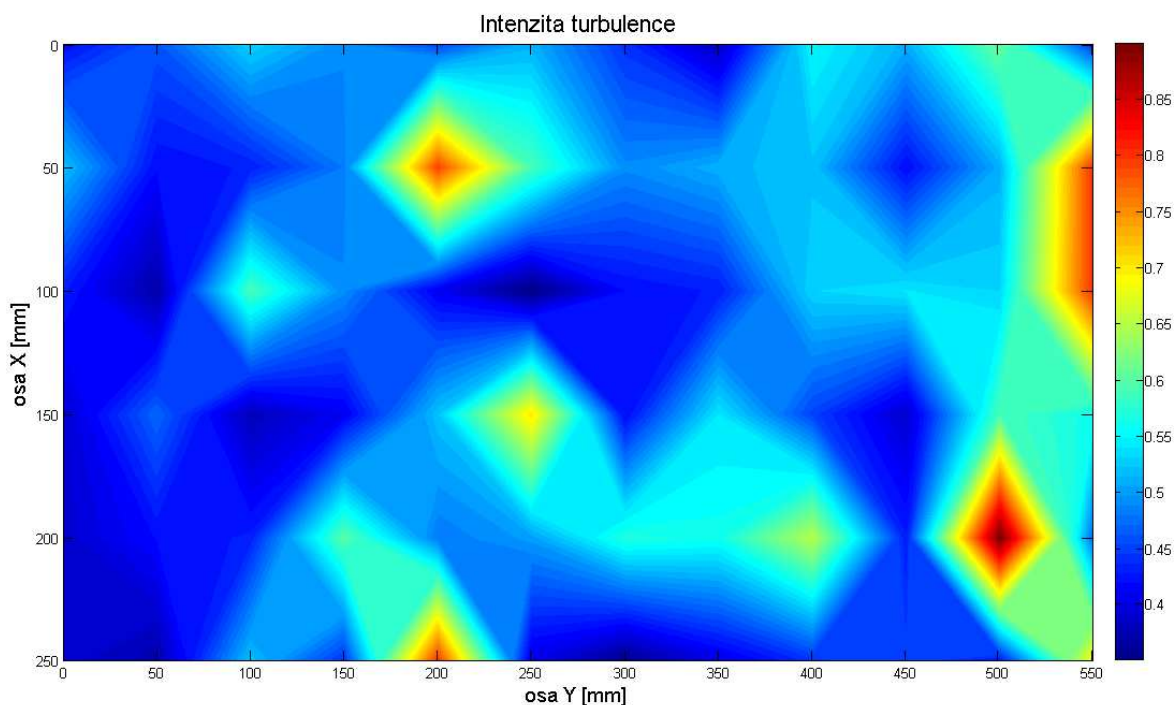
Horký drátek mini CTA

Teplotní čidlo k mini CTA

Zpracování naměřených dat:

Zpracování naměřených dat je identické jako při kalibraci měřicího prostoru.

Ukázka naměřených dat:



Obr. 35: Rozložení intenzity turbulence za chladičem

Místa s vyšší mírou intenzity turbulence označují místa, kde jsou poškozeny lamely chladiče. K poškození dojde velice snadno při manipulaci chladiče vzhledem k jejich provedení.

8.5. Test opakovatelnosti

Tento test sloužil především k ověření, jak moc se budou lišit výsledky – tlaková ztráta po znovu nainstalování stejného chladiče.

Popis měření:

Měření je identické jako v případě měření tlakové ztráty. Rozdíl spočívá v tom, že se porovnává tlaková ztráta na chladiči mezi prvotní instalací a novou instalací chladiče.

Použité měřicí vybavení:

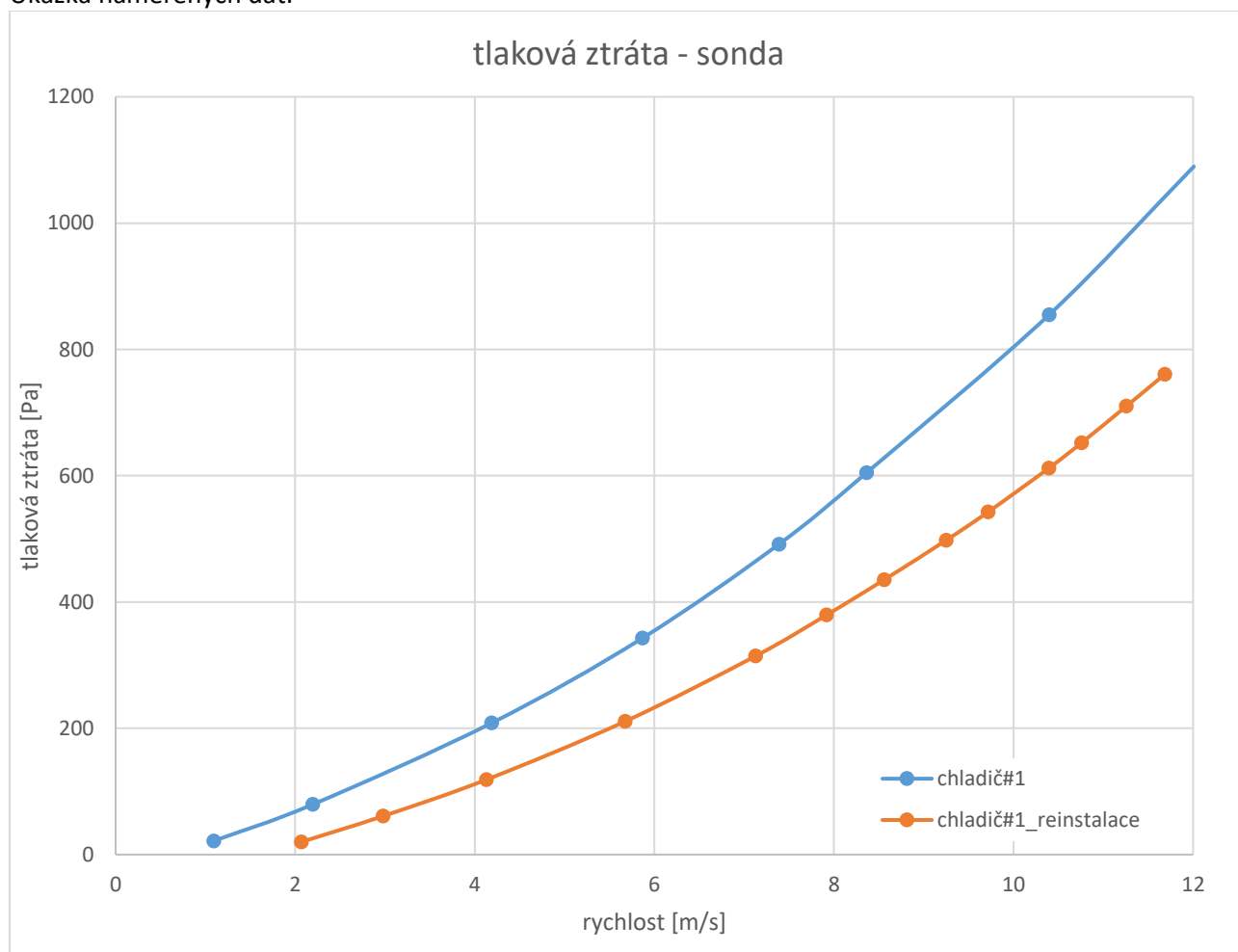
Diferenciální tlakoměr Omega 2ks

Pitot-Statická sonda 2ks

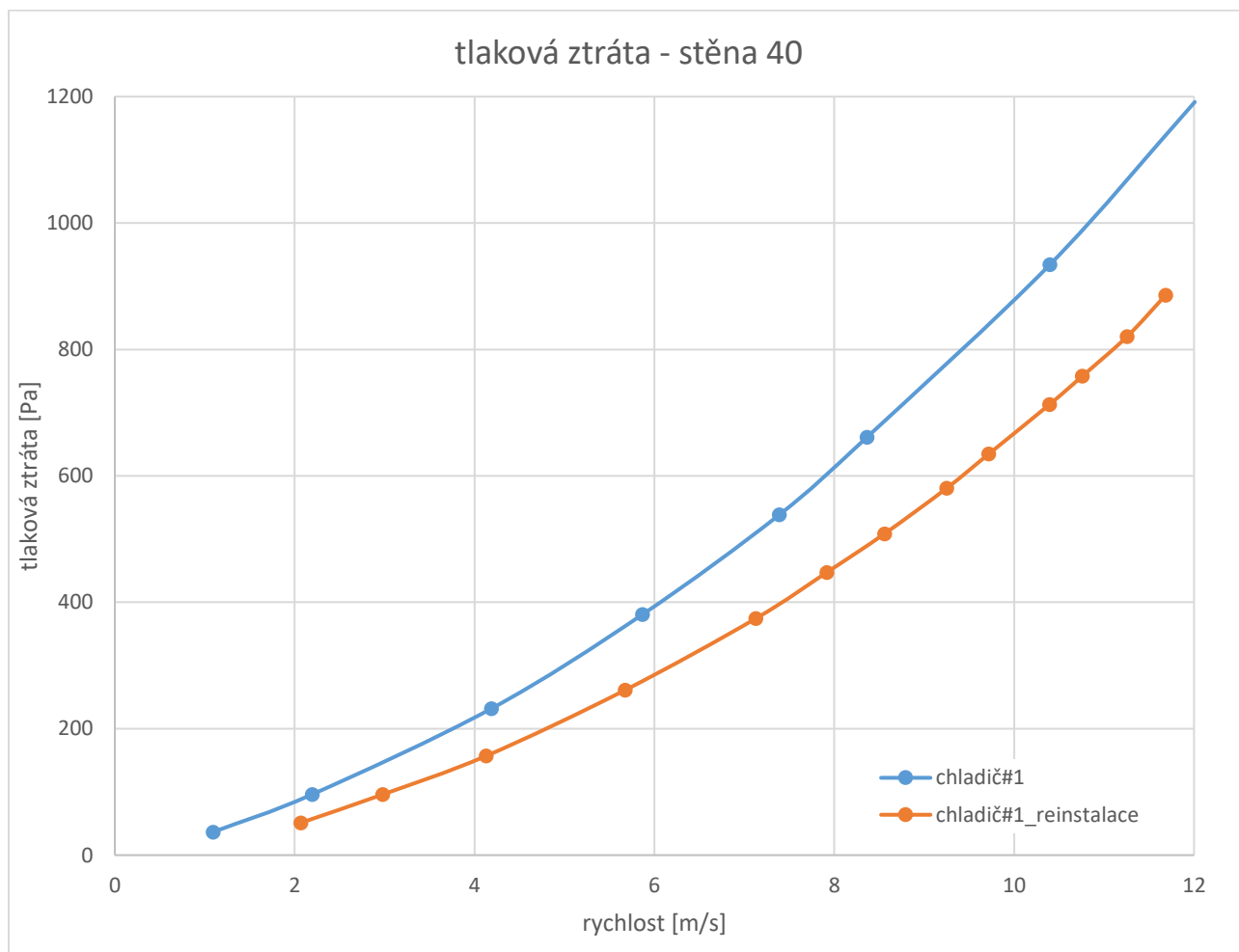
Zpracování naměřených dat:

Je opět identické, jako tomu bylo v případě měření tlakové ztráty.

Ukázka naměřených dat:



Graf 7: Srovnání tlakové ztráty po reinstalaci chladiče- měřeno pitot-statickou sondou



Graf 8: Srovnání tlakové ztráty po reinstalaci chladiče- měřeno na stěně

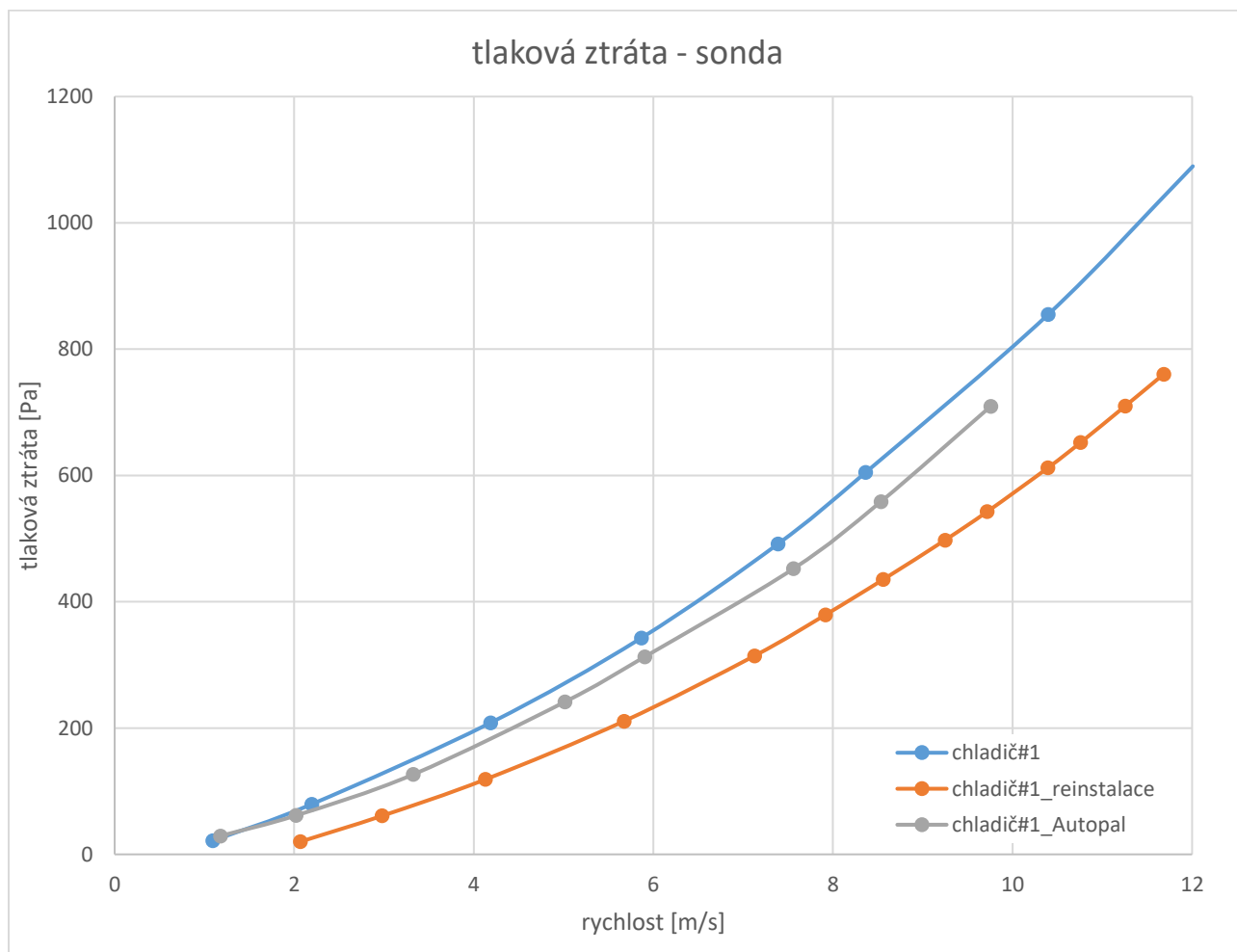
Rozdíl mezi původní instalací a reinstalací se pohybuje od 58% do 25% v případě měření sondami a 40% až 20% v případě odběrů tlaků ze stěny.

Tato odchylka bude probrána více v následující kapitole.

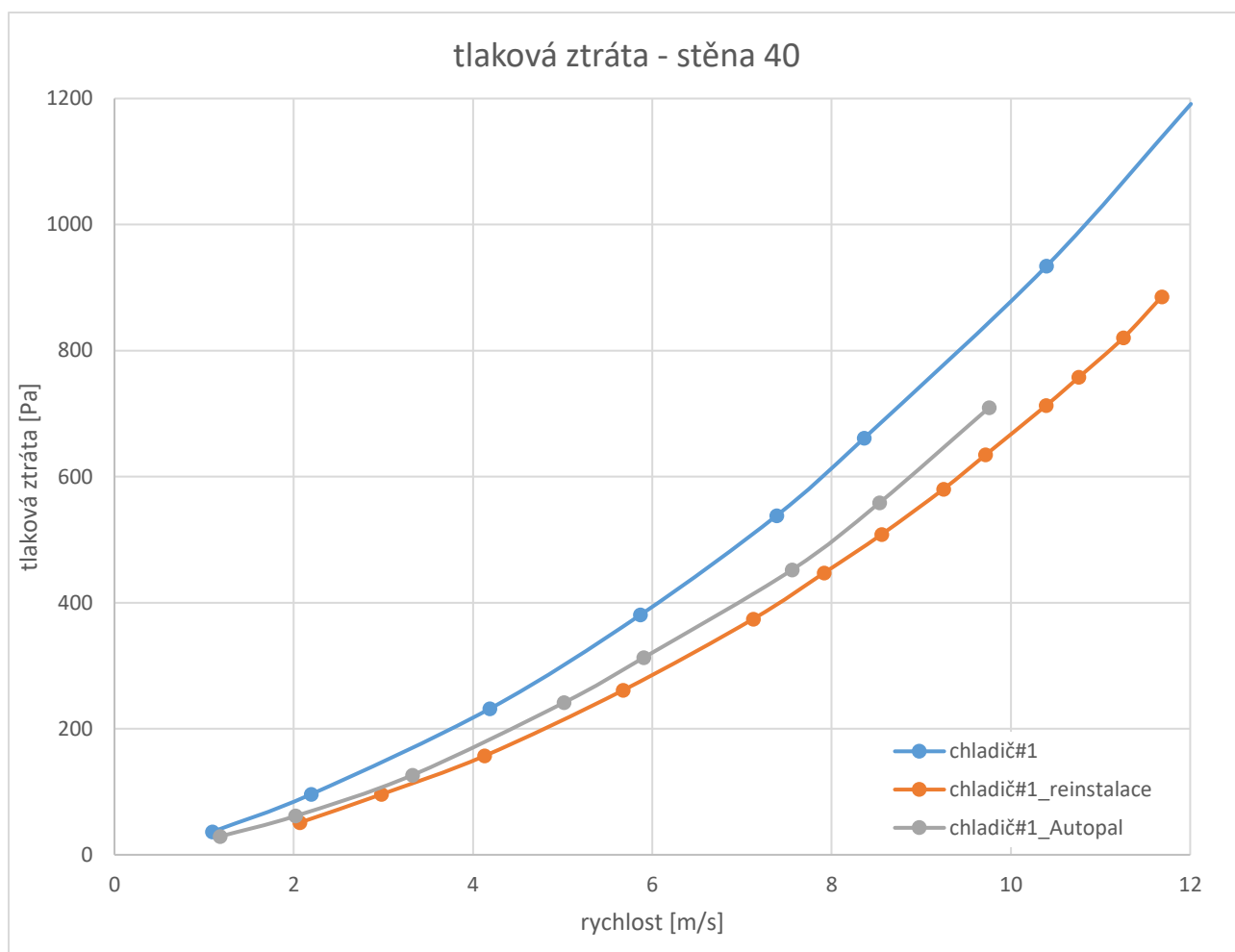
8.6. Srovnání naměřených dat

Srovnání bylo provedeno především z důvodu, aby byla validována neměřená data s daty naměřenými ve zkušebně mající dlouholeté zkušenosti s měřením chladičů. Touto zkušebnou byla zkušebna firmy Autopal Hluk (Hanon Systems Autopal).

Na identických chladičích (2ks) bylo provedeno měření tlakových ztrát v následujícím pořadí. Nejdříve byl chladič #1 změřen v trati na LÚ, poté byl předán na měření do Autopalu. Poté se opět změřil na LÚ. Chladič # 2 byl změřen nejprve na LÚ, poté byl změřen v Autopalu. Po měření byl chladič #2 v Autopalu rozřezán, aby bylo možno na základě rozměrů provést CFD výpočet tlakové ztráty.

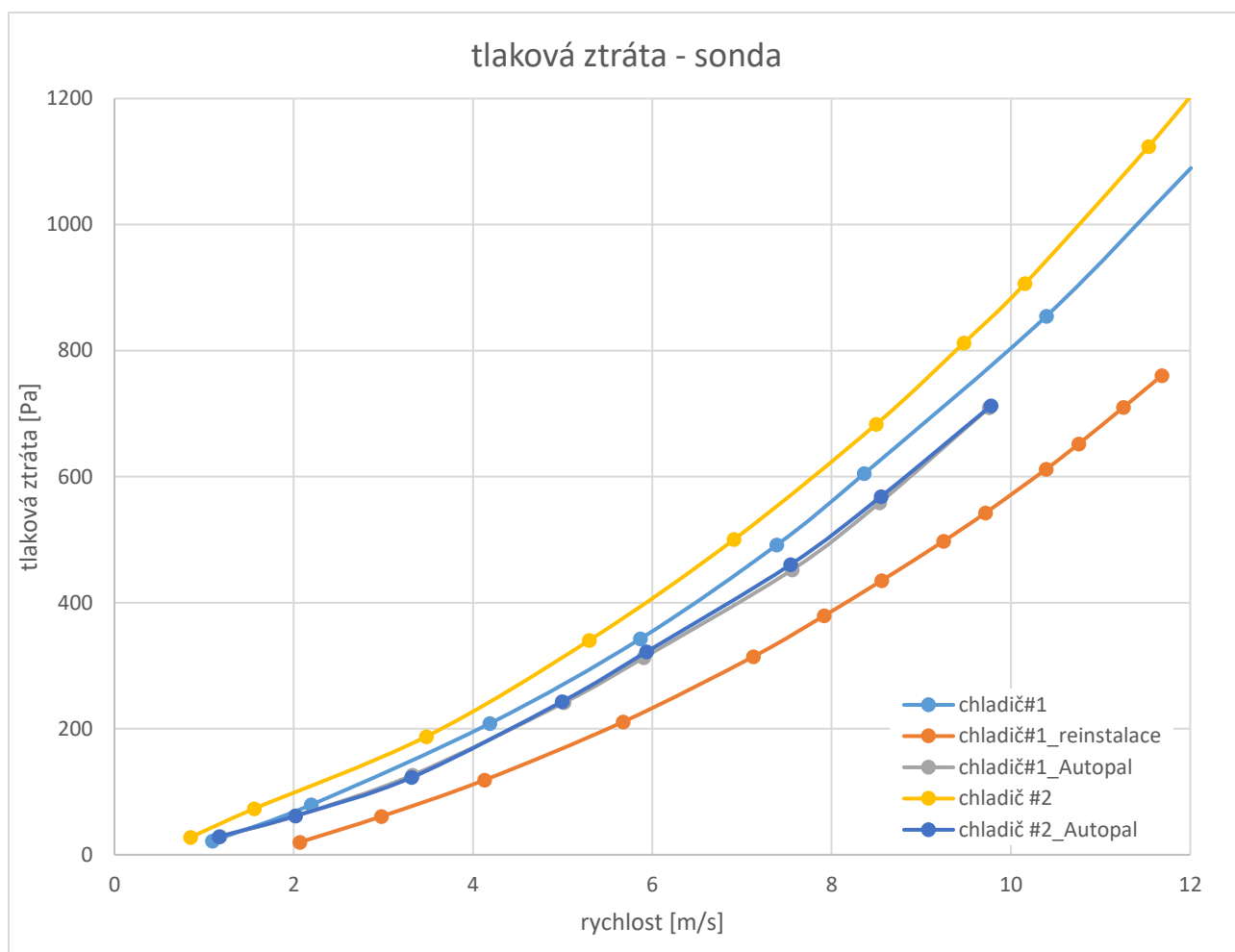


Graf 9: Srovnání naměřených dat s měřením v Autopalu – měřeno pitot-statickou sondou



Graf 10: Srovnání naměřených dat s měřením v Autopalu – měřeno na stěně

Naměřená data v Autopalu byla srovnána s měřením pomocí pitot-statických sond a pomocí měření na stěně.



Graf 11: Srovnání naměřených dat s měřením v Autopalu - dva vzorky, měření pitot-statickou sondou

Po proložení polynomem a vypočtení hodnoty tlakové ztráty, tak aby ve všech měřených případech byla stejná rychlost, získáme následující tabulku. Ve všech případech měření na LÚ se jedná o tlakovou ztrátu naměřenou pomocí pitot-statických sond.:

tlaková ztráta [Pa]					
rychlost [m/s]	chladič #1	chladič #1_r	chladič #1 _A	chladič #2	chladič #2_A
1.0	19.60	-11.67	23.55	42.37	20.51
2.5	94.78	39.62	84.25	120.48	85.03
5.0	269.49	166.24	236.86	306.95	241.66
7.5	505.94	344.26	453.79	563.78	459.67
10.0	804.13	573.69	735.04	890.98	739.05
12.5	1164.06	854.52	1080.61	1288.55	1079.82
15.0	1585.74	1186.76	1490.49	1756.48	1481.97

Tabulka 2: Rozdíl tlakových ztrát

Po dopočtení procentuální odchylky, kde budeme brát za referenční měření na chladiči #1 v Autopalu, tak dostaneme následující hodnoty:

odchylka vůči chladiči #1 -H [%]					
rychlost [m/s]	chladič #1	chladič #1_r	chladič #1_A	chladič #2	chladič #2_A
1.0	-16.80	-149.56	-	79.89	-12.90
2.5	12.51	-52.97	-	43.00	0.93
5.0	13.78	-29.82	-	29.59	2.03
7.5	11.49	-24.14	-	24.24	1.30
10.0	9.40	-21.95	-	21.22	0.55
12.5	7.72	-20.92	-	19.24	-0.07
15.0	6.39	-20.38	-	17.85	-0.57

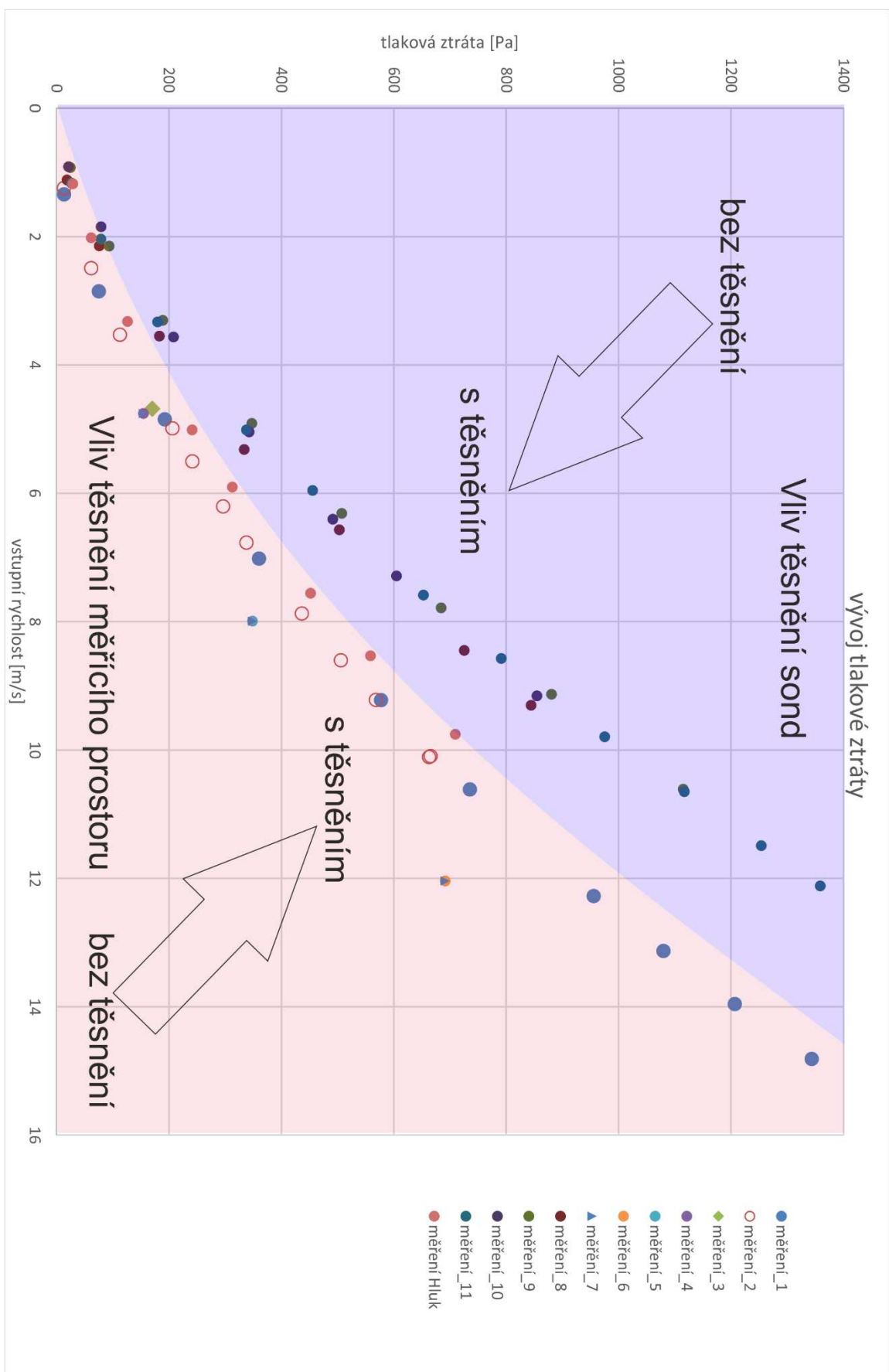
Tabulka 3: Procentuální rozdíl tlakových ztrát

Jak je z této tabulky patrné, rozdíl mezi měřeními v Autopalu je na obou chladičích minimální. Největší chyba je při nízkých rychlostech. Při vyšších rychlostech je tato chyba max. 2.03%. V případě měření v trati na LÚ již tato chyba není zanedbatelná.

Rozptýl naměřených ztrát na LÚ je do značné míry ovlivněn nedokonalým utěsněním. Na obr.36 je zobrazen vývoj tlakové ztráty v závislosti na způsobu utěsnění a to jak měřicího prostoru, tak sond. V obrázku je rozdělen vliv těsnění jednotlivých prvků na celkovou tlakovou ztrátu.

Na základě tohoto rozdělení se dá říci, že v případě reinstalace chladiče #1 nebylo provedeno utěsnění prostoru mezi jednotlivými sekcemi tak pečlivě jako v případě prvotního měření. V případě chladiče #2 měla zásadní vliv na výsledky netěsnost v oblasti měřících sond.

V případě chladiče #1 před reinstalací se chyba pohybuje kolem 10% což je dáno rozdílným způsobem měření tlakové ztráty na LÚ a v Autopalu. V případě měření v Autopalu je chladič vložen do dřevěného rámu a tím pádem dojde k jeho utěsnění i po obvodu. V případě měření na LÚ nebyly nijak těsněny obvodové stěny na chladiči.

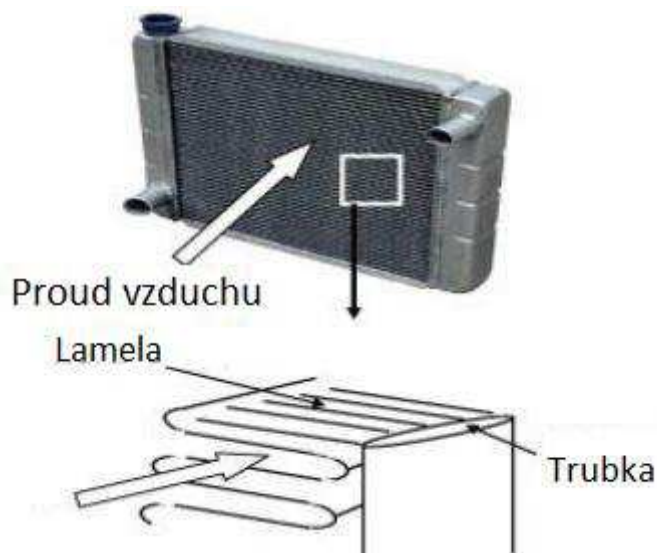


Obr. 36: Vliv těsnění na tlakovou ztrátu

9. CFD výpočet tlakové ztráty

CFD výpočet tlakové ztráty byl proveden za účelem ověření, zda je možno rekonstrukcí reálné geometrie vytvořit výpočetní model a z něj určit tlakovou ztrátu. Tento přístup je dobré použít v případě, kdy je k dispozici identický, avšak poškozený či nefunkční chladič.

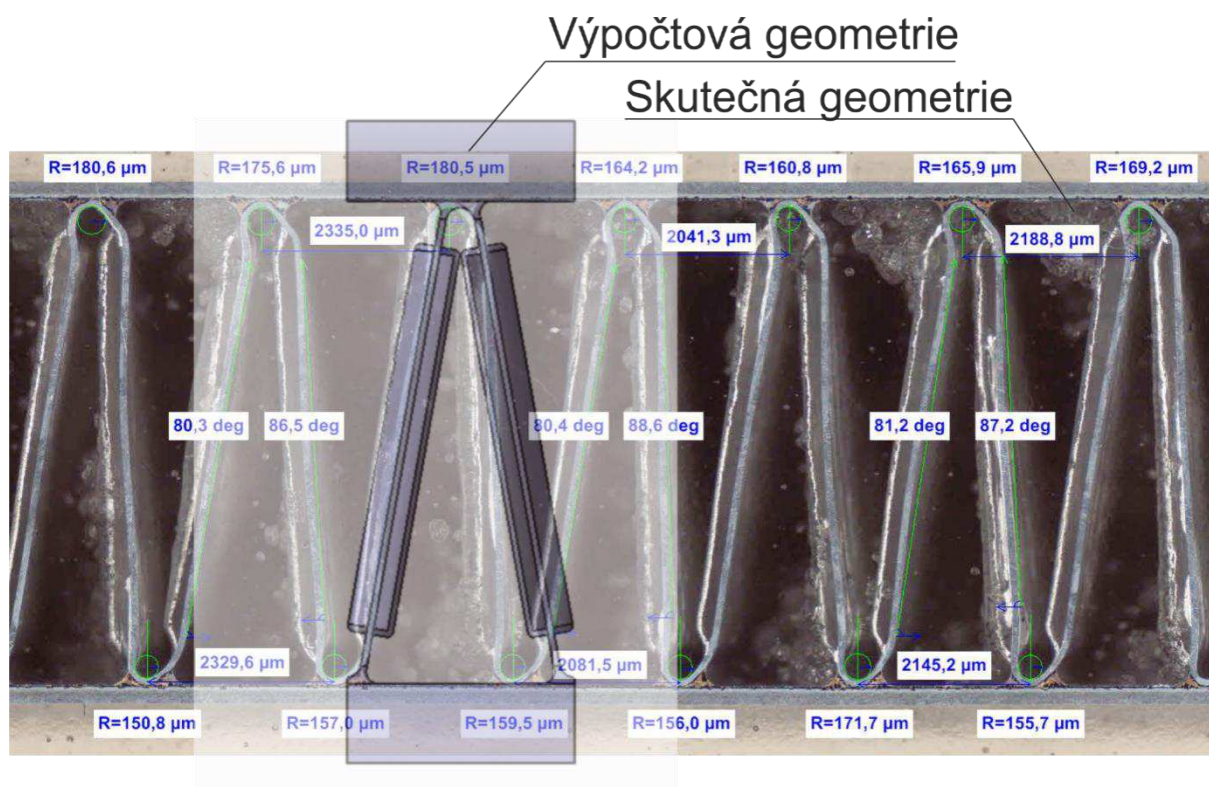
Chladič není třeba počítat celý, ale stačí se zaměřit pouze na jednu vzduchovou mezeru mezi lamelami. Tlakovou ztrátu pak ovlivňuje především geometrie lamely, a tloušťka chladiče.



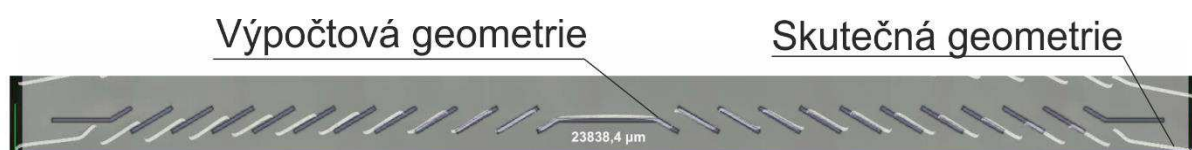
Obr. 37: Schéma vzduchové mezery mezi lamelami

9.1. Tvorba zjednodušené geometrie

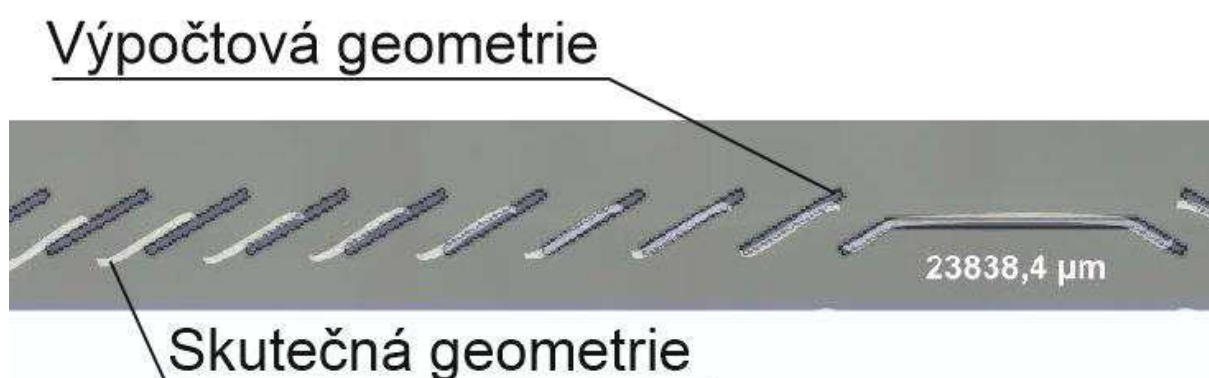
Geometrie byla získána rozřezáním druhého vzorku chladiče v Autopalu, kde došlo také k proměření geometrie. Změřená geometrie posloužila k tvorbě geometrického modelu, který sloužil k CFD výpočtu. Tato geometrie však byla částečně zjednodušena a to jak z důvodů pozdější tvorby sítě, tak i z důvodů deformace reálné geometrie. Toto zjednodušení se týkalo především zakončení žeber v lamelách, dále v modelu není deformace po prostřižení materiálu. Zjednodušený model také neobsahuje zaoblení přechodů žeber v lamelách. Rozměry pro tvorbu byly průměrnou hodnotou z naměřených dat. Viz obr. 38 až 40, kde je patrné, že se geometrie jednotlivých lamel a žeber liší.



Obr. 38: Srovnání geometrie



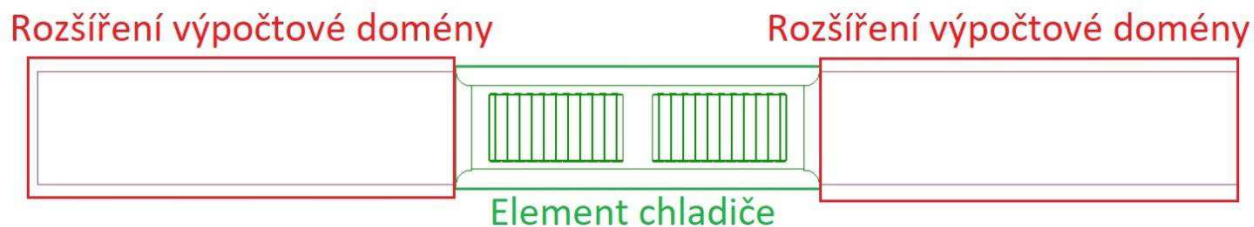
Obr. 39: Srovnání geometrie



Obr. 40: Srovnání geometrie - detail

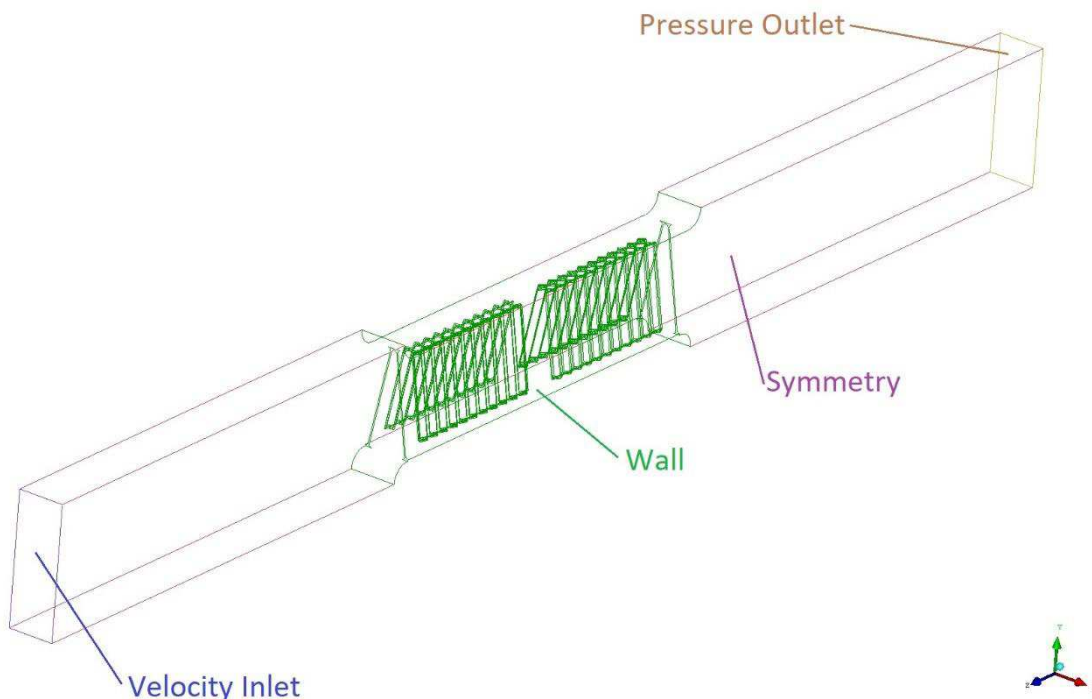
9.2. Tvorba výpočetní domény

Z geometrického modelu byla vytvořena výpočetní síť v programu ICEM CFD. Výpočetní doména pak byla ještě rozšířena před a za elementem o 30 mm. Délka elementu pak odpovídá šířce chladiče.



Obr. 41: Výpočetní doména

Okrajové podmínky pro výpočet byly nastaveny následovně:



Obr. 42: Okrajové podmínky

Stěny elementu chladiče – Wall

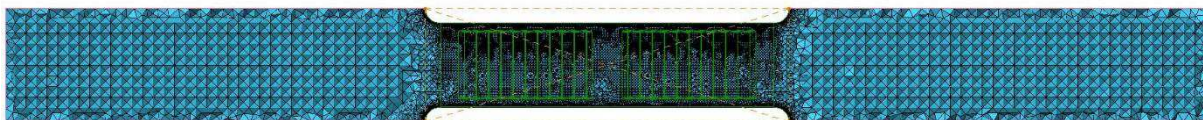
Vstup – Velocity inlet

Výstup – Pressure outlet

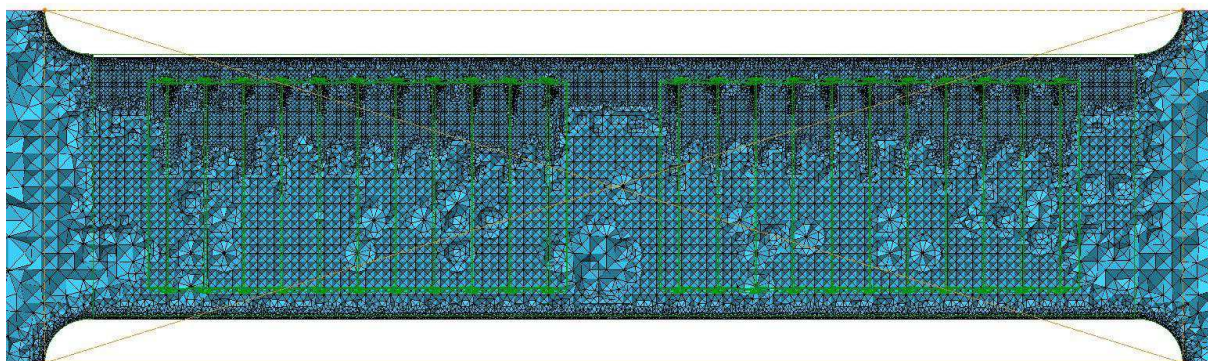
Stěny rozšíření a okolní uzavření výpočetní domény – Symmetry

Výsledná výpočetní síť měla celkový počet elementů 9 700 000. Velikost elementů byla od 0.05 do 1. Menší velikost byla použita na stěny vlastního elementu chladiče a 1 na zbytku povrchu výpočtové domény. Oblast kolem elementu byla zhuštěna pomocí funkce Density na max. velikost elementu 0.5. Výsledná síť obsahovala pouze tetrahedrální prvky.

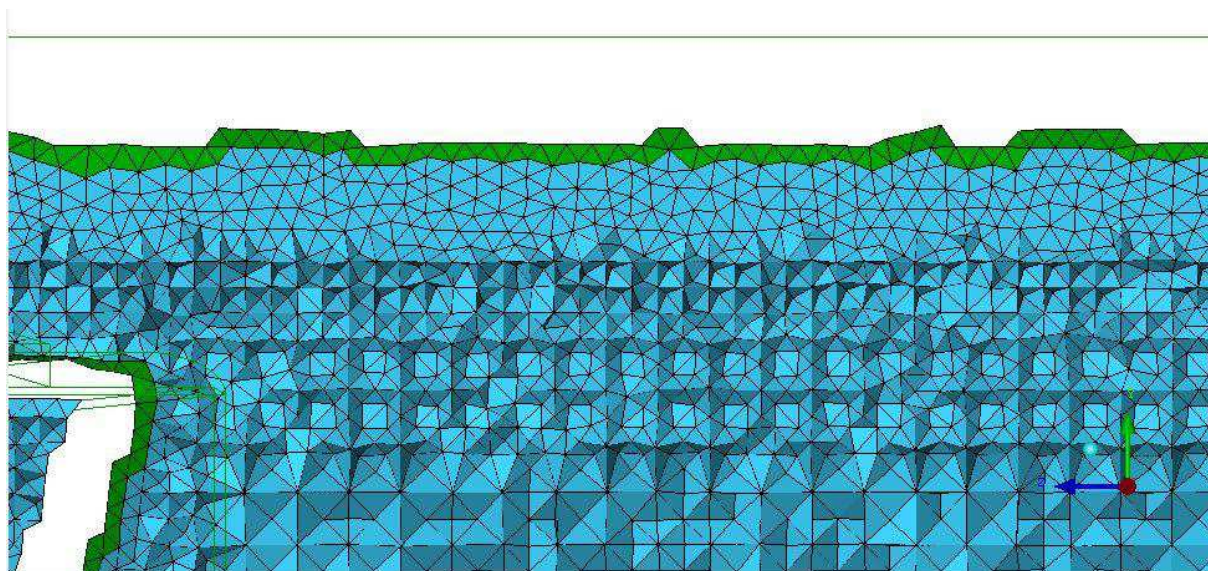
Na obr. 43 až 44 jsou řezy středem výpočetní domény, přiblížení na element chladiče a poté detail sítě u stěny elementu chladiče.



Obr. 43: Výpočetní síť



Obr. 44: Výpočetní síť - element chladiče



Obr. 45: Výpočetní síť - v blízkosti stěny

9.3. CFD výpočet a vyhodnocení

CFD výpočet byl proveden v programu FLUENT. Okrajové podmínky pak byly nastaveny tak, že na vstupu a výstupu byl definován tlak odpovídající výšce 0m MSA, to je 101 325 Pa. Vstupní rychlost se měnila od 2 do 14 m/s. Intenzita turbulence pak odpovídala intenzitě změřené v aerodynamickém tunelu. Hodnota parametru Wall Y+ se pohybovala kolem 1.

Při výpočtech byly použity následující turbulentní modely:

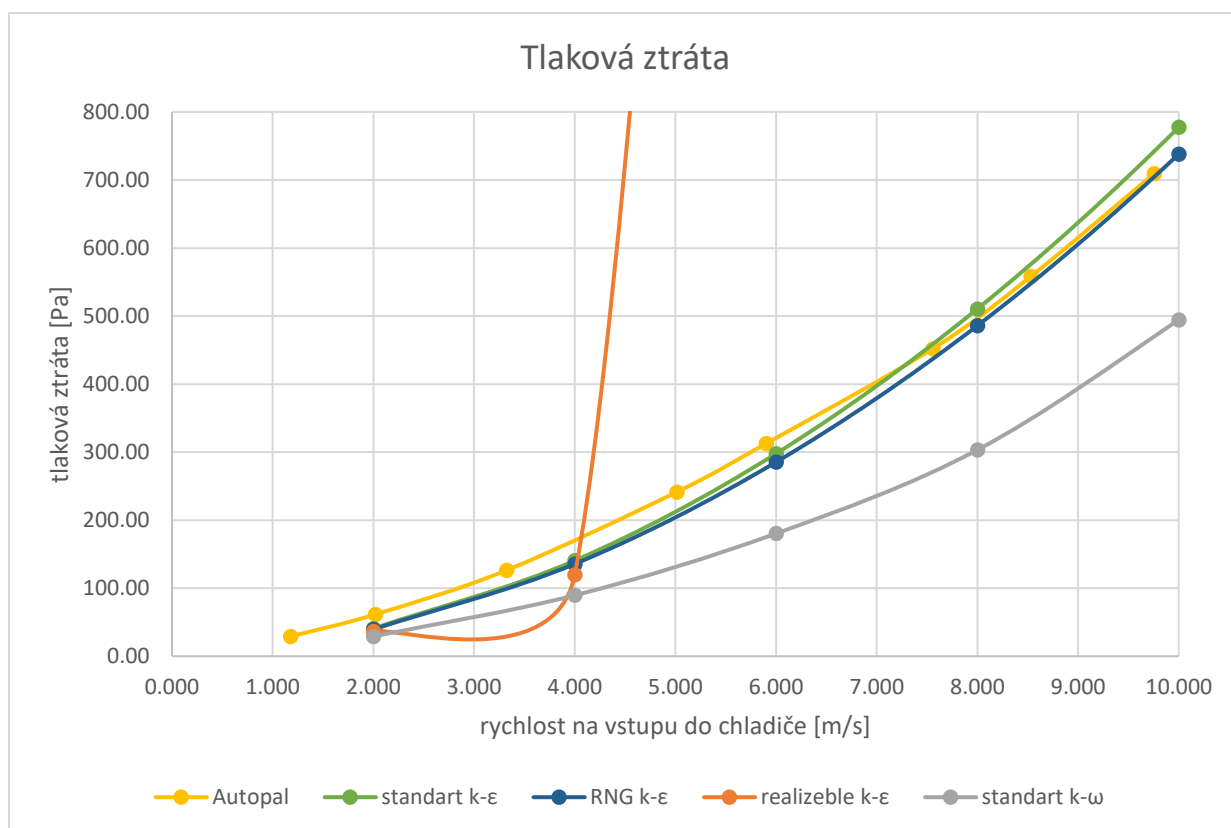
- standart k- ϵ
- RNG k- ϵ
- Realizable k- ϵ
- Standart k- ω

Vybrané modely byly zvoleny z důvodů jejich rozšířenosti v praxi. Turbulentní modely k- ϵ a k- ω jsou velice rozšířené zejména pro jejich robustnost, dostatečnou přesnost. Rovnice popisující turbulenci jsou dvourovnicové, což snižuje výpočetní náročnost.

Turbulentní modely **k- ϵ** využívá k popisu turbulence rovnice kinetické energie turbulence (k) a rozptylu této energie (ϵ). Uvažuje se plně turbulentní proudění.

Turbulentní modely z rodiny **k- ω** využívají k popisu turbulence rovnice kinetické energie turbulence (k) a poměrné specifické ztráty (ω). Tento model dosahuje lepší stability než modely k- ϵ a to zejména v blízkosti stěn.

Při vyhodnocení byla vyhodnocena hodnota statického tlaku a rychlost na vstupu a výstupu z výpočetní domény. Rozdíl statického tlaku pak představoval velikost tlakové ztráty. Po vyhodnocení všech počítaných rychlostí byl vykreslen průběh tlakové ztráty, která byla srovnána s měřením v Autopalu. Měření z Autopalu bylo vybráno jako referenční vzhledem k dlouholetým zkušenostem v oblasti měření chladičů.



Graf 12: Srovnání tlakové ztráty měřením s CFD výpočet elementu

Pro proložení polynomem vypočteme hodnoty tlakové ztráty pro stejné rychlosti ve všech případech. Pak dostaneme následující tabulku:

tlaková ztráta [Pa]					
rychlost [m/s]	standart k-ε	RNG k-ε	realizeble k-ε	standart k-ω	Autopal
2.000	40.87	39.47	36.66	29.13	61.44
4.000	140.59	135.63	119.75	89.58	168.10
6.000	297.80	285.34	3106.70	180.37	315.91
8.000	510.51	485.88	3525.77	303.31	504.89
10.000	777.49	738.04	4190.00	494.60	735.04
12.000	1097.67	1041.60	4900.03	705.66	1006.35

Tabulka 4: Hodnoty tlakové ztráty

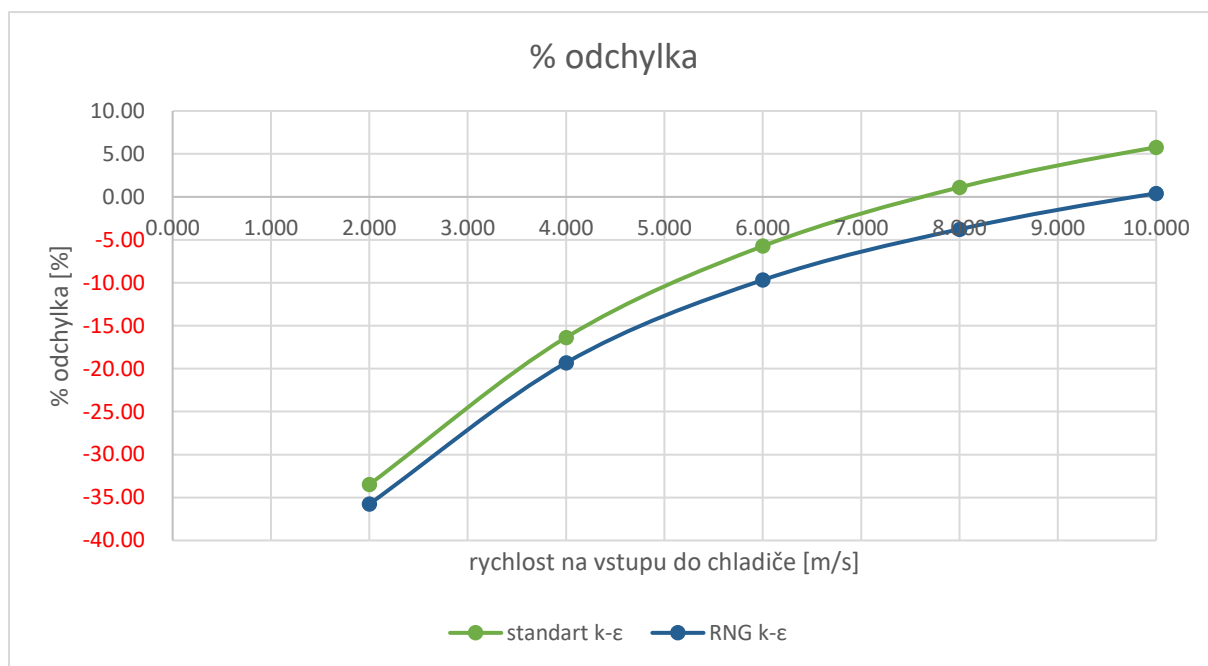
Poté již můžeme dopočítat procentuální odchylku od měření uskutečněných v Autopalu. Tyto odchylky jsou v následující tabulce:

odchylka vůči měření [%]					
rychlost [m/s]	standart k-ε	RNG k-ε	realizeble k-ε	standart k-ω	Autopal
2.000	-33.48	-35.76	-40.34	-52.59	0.00
4.000	-16.36	-19.31	-28.76	-46.71	0.00
6.000	-5.73	-9.68	883.40	-42.91	0.00
8.000	1.11	-3.77	598.32	-39.93	0.00
10.000	5.78	0.41	470.04	-32.71	0.00
12.000	9.07	3.50	386.91	-29.88	0.00

Tabulka 5: Procentuální rozdíl tlakové ztráty

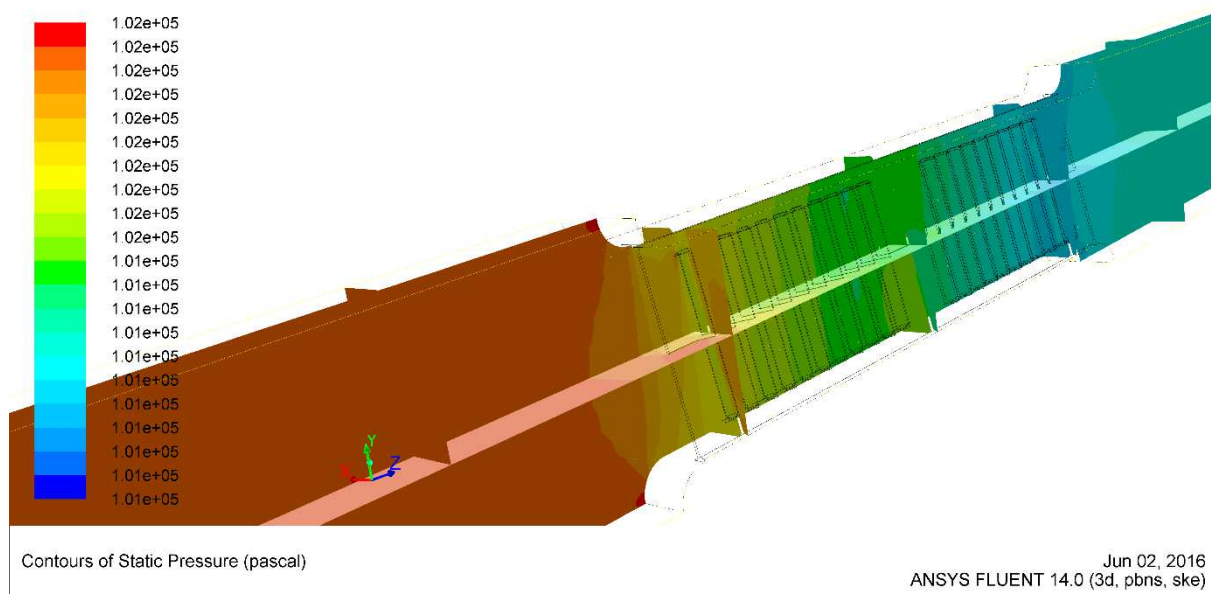
Z počítaných turbulentních modelů vykázaly dobrou shodu modely standart k- ϵ a RNG k- ϵ . V případě modelu RNG k- ϵ se přidává k výhodám ještě výrazně rychlejší konvergence výpočtu. Při srovnání odchylek těchto dvou turbulentních modelů lze říci, že odchylky $\pm 5\%$ dosahují od cca 6 m/s v případě standart k- ϵ , od cca 7.5 m/s v případě modelu RNG k- ϵ . Odchylka od měření se vzrůstající rychlostí klesá.

Tato odchylka je značně ovlivněna rozdílem mezi reálnou a zjednodušenou geometrií. Dále je pak ovlivně omezením na spodní hranici měřitelnosti tlakové ztráty – přesnost snímačů. Odchylka na takto zjednodušené a velice komplexní geometrii je více než dobrá.

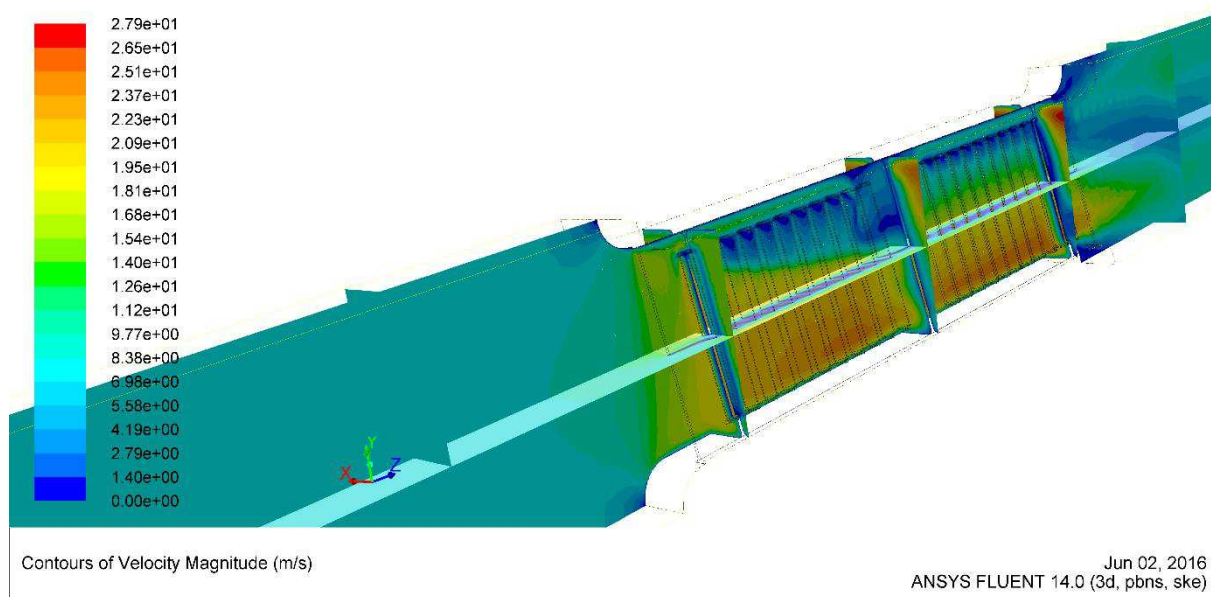


Graf 13: Průběh procentuální odchylky tlakové ztráty

Při vyhodnocení elementu chladiče je možnost se podívat na rozložení rychlosti uvnitř vzduchové mezery, proudnice či rozložení jiné potřebné veličiny. Pro ukázkou jsou ukázány výstupy pro vstupní rychlost 8m/s a turbulentní model standart k-ε.



Obr. 46: Statický tlak v několika rovinách



Obr. 47: Rychlost proudění v několika rovinách

10. CFD výpočet zjednodušeného modelu chladič

Cílem této úlohy bylo ověřit CFD k výpočtu chladiče umístěného v měřicí sekci. Pro tento případ bylo použito funkce Porous Medium v programu Fluent, kterého se využívá pro výpočet předmětu s definovanou tlakovou ztrátou. Chování chladiče bylo nastaveno na základě měření chladiče v aerodynamickém tunelu a to zejména z důvodů měření statických tlaků před a za chladičem.

V případě Fluentu je Porous Medium modelováno na principu přidaného zdroje hybnosti. Tento přidaný člen je pak složen ze dvou částí: viskózní a inerciální ztráty.

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (10.1)$$

Pro jednoduché homogenní porózní medium:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (10.2)$$

Pokud rozdělíme ztráty na viskózní ztráty a inerciální, tak pro viskózní ztráty můžeme psát:

$$\nabla p = - \frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (10.3)$$

V jednotlivých osách pak můžeme napsat tlakovou ztrátu:

$$\Delta p_x = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x \quad (10.4)$$

$$\Delta p_y = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y \quad (10.5)$$

$$\Delta p_z = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z \quad (10.6)$$

Kde $\frac{1}{\alpha_{ij}}$ je vstup v matici D_{ij} v rovnici (10.1), v_j je komponent rychlosti v příslušném směru a $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$ je tloušťka porózního média v příslušné ose.

Inerciální ztráta je pak:

$$\nabla p = - \sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (10.7)$$

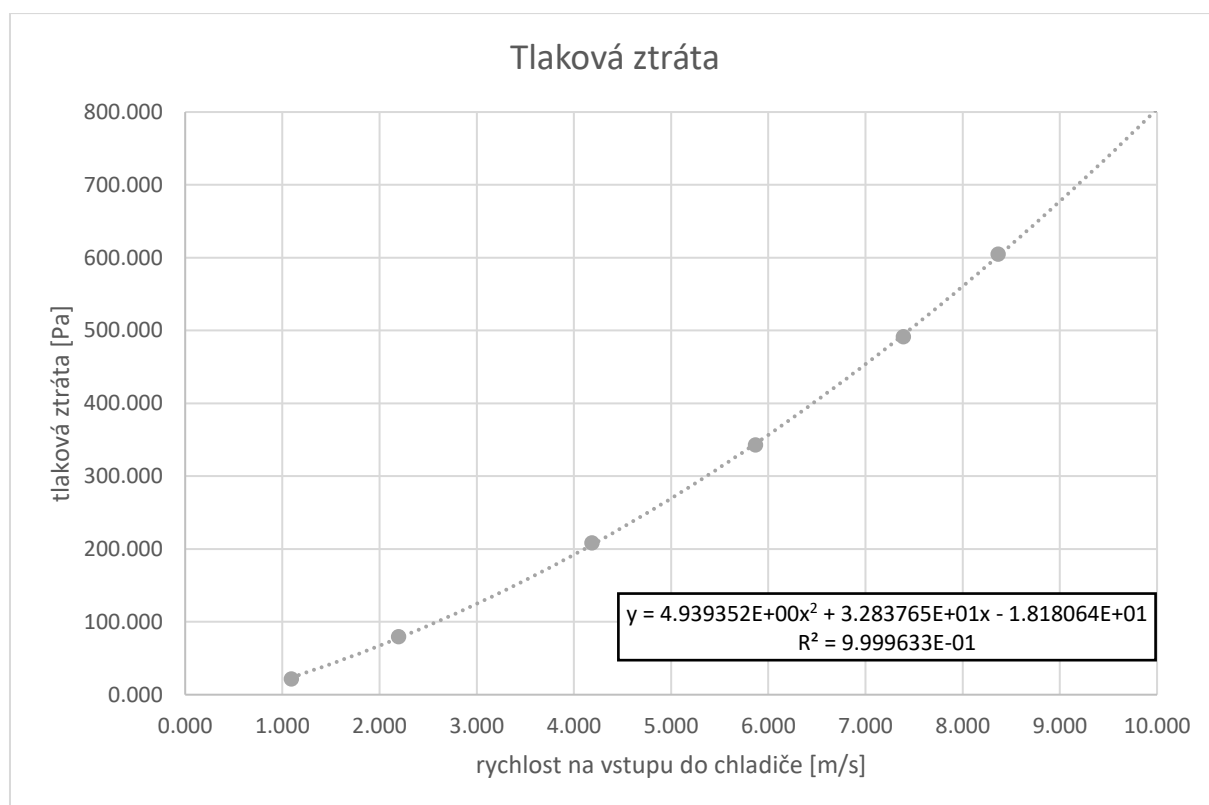
V jednotlivých osách dostaneme:

$$\Delta p_x \approx \sum_{j=1}^3 C_{2xj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho v_j |v| \quad (10.8)$$

$$\Delta p_y \approx \sum_{j=1}^3 C_{2yj} \Delta n_y \frac{1}{2} \rho v_j |v| \quad (10.9)$$

$$\Delta p_z \approx \sum_{j=1}^3 C_{2zj} \Delta n_z \frac{1}{2} \rho v_j |v| \quad (10.10)$$

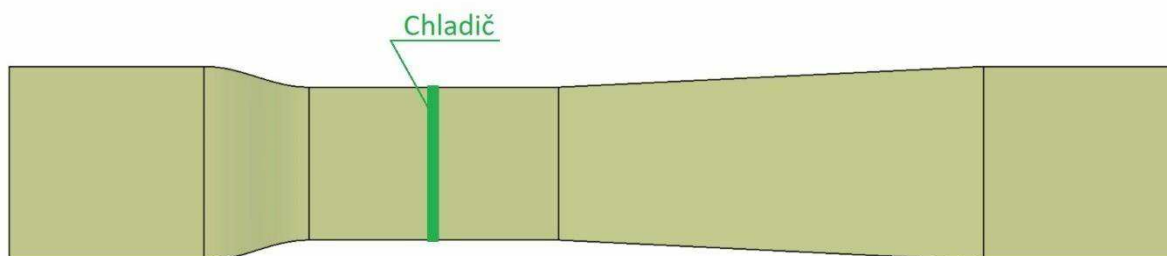
Změřený, případně vypočtený chladič je možno definovat na základě koeficientů polynomu tlakové ztráty v závislosti na rychlosti.



Graf 14: Tlaková ztráta chladiče #1 – měření na LÚ

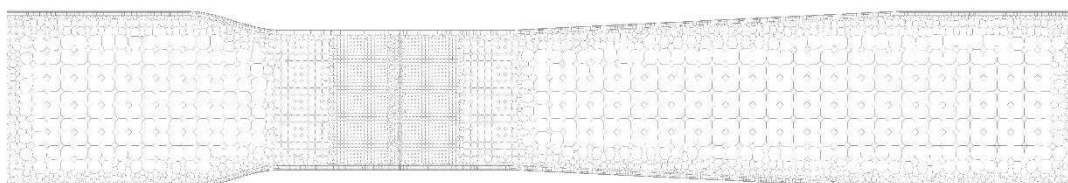
Při definování Porouz Zone v CFD je třeba zadat hodnoty $\frac{1}{\alpha}$ a C_2 . Tyto hodnoty vypočítáme tak, že známe hodnotu odporu a tyto hodnoty dopočítáme.

CFD výpočet byl proveden na geometrii, která reprezentovala zástavbu chladiče v měřící sekci. Tato geometrie byla vybrána s ohledem na to, že je možno kromě tlakové ztráty porovnat i průběh tlaku za a před chladičem. Model byl proti realitě rozšířen rovnou částí na vstupu a výstupu.



Obr. 50: Geometrický model zástavby chladiče

Výpočetní doména byla vytvořena v programu ICEM CFD. Síť byla nejprve vytvořena jako hybridní – kombinace tetrahedrální sítě s prizmatickou podvrstvou. Celkový počet elementů sítě byl 3 405 000. Poté byla v programu Fluent převedena na polyhedrickou síť z důvodů redukce elementů na 943 000.



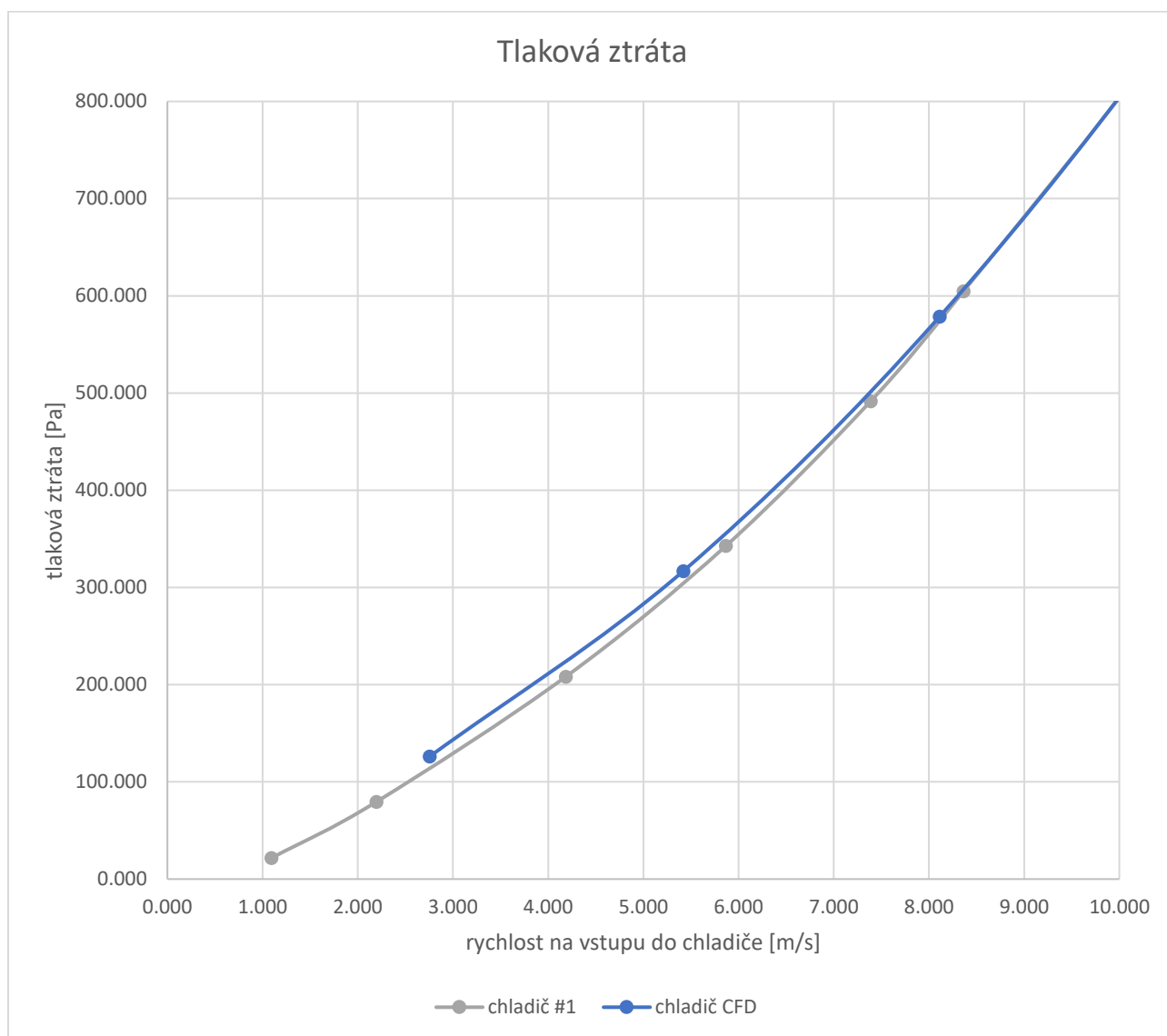
Mesh

Jun 06, 2016
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, dbns imp, S-A)

Obr. 51: Výpočetní síť v rovině symetrie zástavby chladiče

Dále byly počítány vstupní rychlosti do domény od 2 do 10 m/s. Poté byla vyhodnocena vstupní rychlost na chladiči. Na vstupu a výstupu z chladiče byl vyhodnocen statický tlak a z rozdílu před a za chladičem byla dopočtena tlaková ztráta.

Když se tyto výsledky srovnají s naměřeným reálným chladičem, tak dostaneme následující graf.



Graf 15: Srovnání tlakové ztráty

Po proložení polynomem vypočteme hodnoty tlakové ztráty pro rychlosti stejné pro oba případy, pak dostaneme následující tabulku:

tlaková ztráta [Pa]		
rychlost [m/s]	chladič #1	chladič CFD
1	19.6	39.72
2.5	94.78	112.01
5	269.49	281.61
7.5	505.94	512.60
10	804.13	805.00
12.5	1164.06	1158.80
15	1585.74	1573.99

Tabulka 6: Hodnota tlakových ztrát

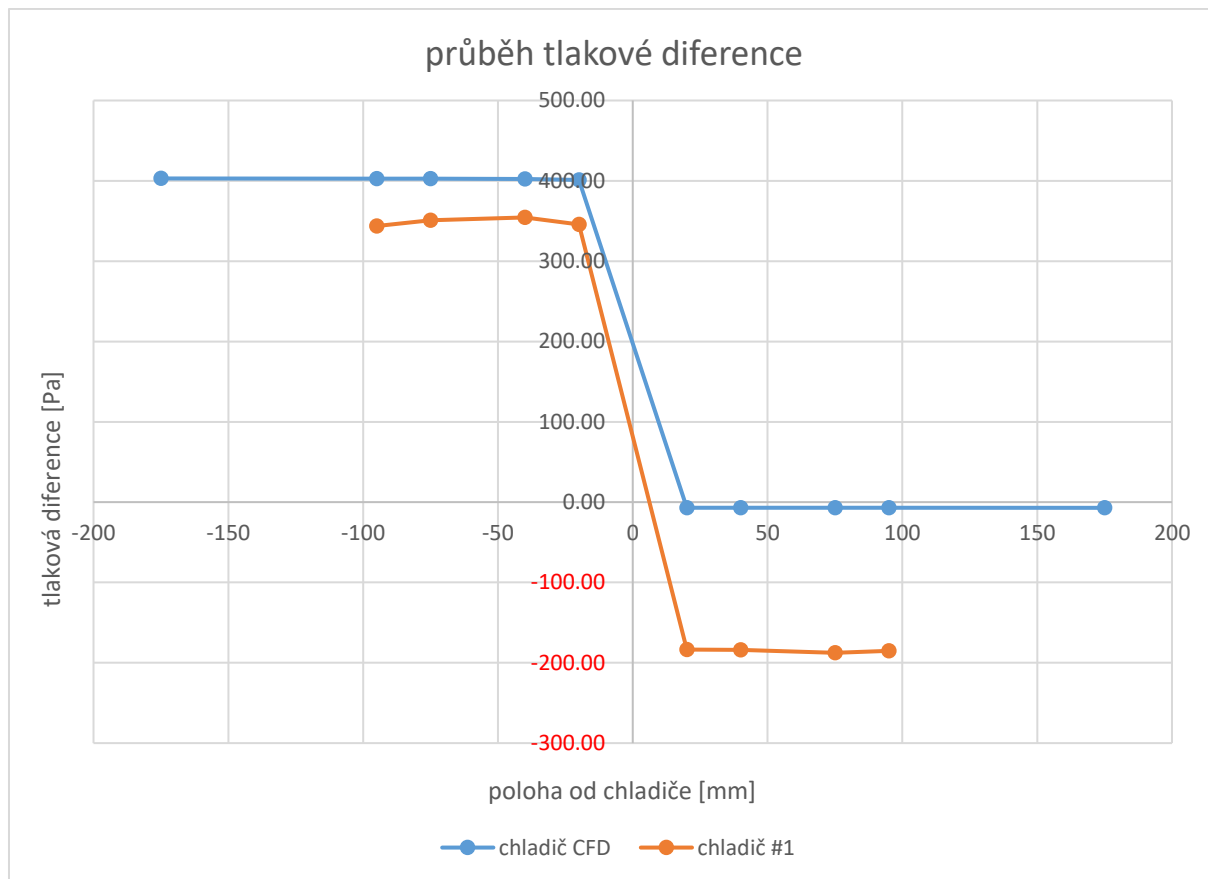
Procentuální odchylka CFD výpočtu vůči měření pak je:

odchylka vůči měření [%]	
rychlost [m/s]	chladič CFD
1	102.67
2.5	18.18
5	4.50
7.5	1.32
10	0.11
12.5	-0.45
15	-0.74

Tabulka 7: Odchylka výpočtu CFD chladiče

Z tabulky s procentuální odchylkou je patrné, že odchylka je největší pro malé rychlosti, pro vyšší rychlosti je tato odchylka minimální. Celková shoda měření a CFD výpočtu je velice dobrá. Rozdíl při malých rychlostech je dán do značné míry použitým způsobem měření.

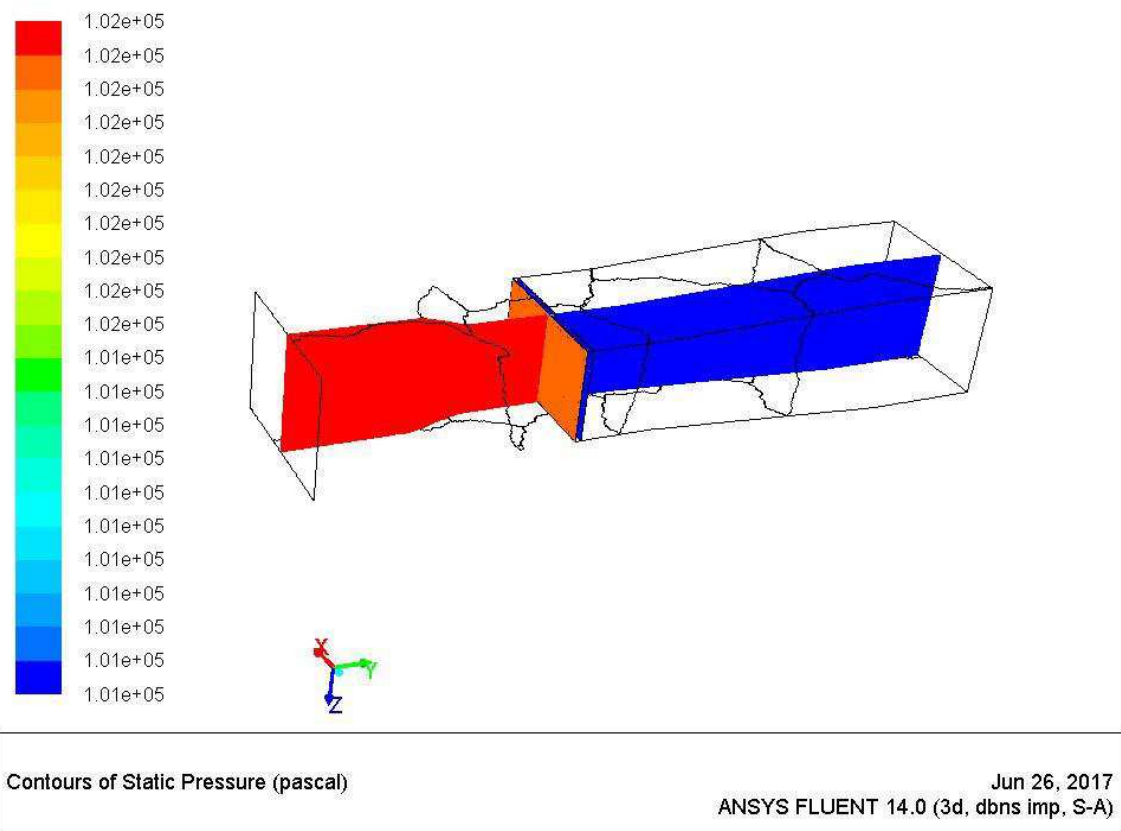
Pokud vypočítáme rozdíl mezi statickým tlakem a atmosférickým tlakem a srovnáme ji s naměřeným přetlakem/podtlakem v různých bodech, dostaneme následující průběh tlaků. Porovnání je provedeno pro podobné rychlosti 5.4 m/s (CFD) vz 5 m/s (měření).



Graf 16: Průběh statického tlaku CFD vz měření

Zásadním rozdílem mezi CFD a měřením je to, že v případě CFD nedochází za chladičem k takovému podtlaku, jako je tomu u měření. Tento rozdíl bude patrně tím, že v případě CFD výpočtu byl nastaven na vstupu a výstupu do výpočetní domény stejný atmosférický tlak (101 325 Pa). I když je za měřicí sekci mezer, která má sloužit k vyrovnání tlaků uvnitř tunelu. Touto mezerou však zřejmě nedošlo k vyrovnání tlaku.

Na obr. 52 a 53 je rozložení st. tlaku a rychlosti v rovině symetrie a na plochách ohraničujících chladič.

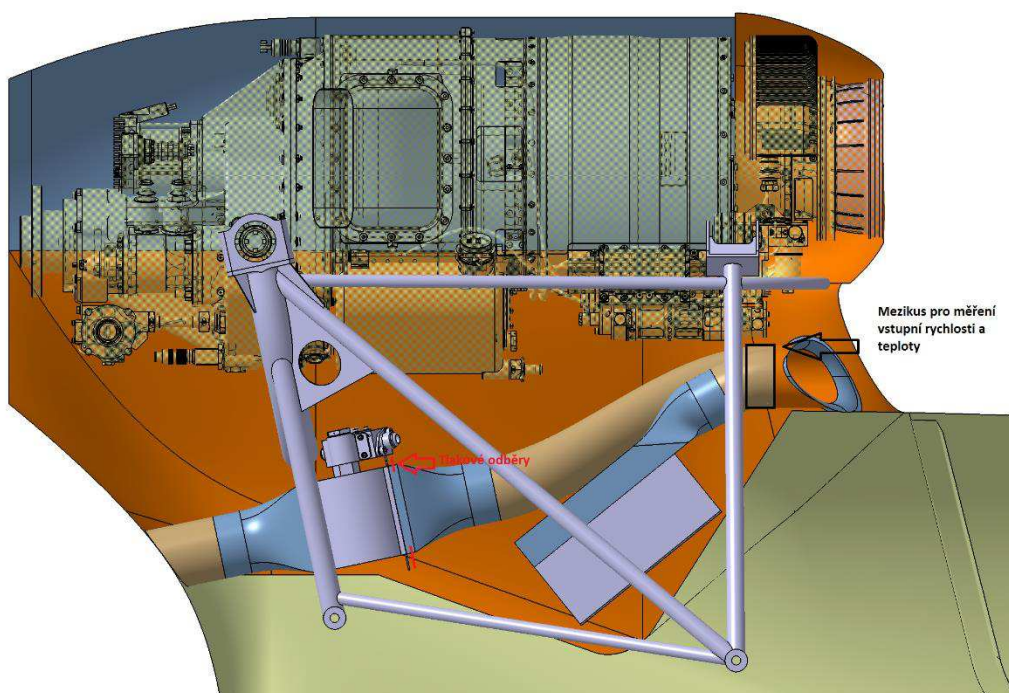


Obr. 52 Rozložení stat.tlaku

Obr. 53 Rozložení rychlosti

11. Letová měření

Při návrhu chlazení oleje reduktoru letounu VUT 061 Turbo byly detailně známe charakteristiky použitého chladiče. Na základě znalostí bylo použito zjednodušeného chladiče (Porous Zone) a byl vhodně navržen chladicí kanál. Primárním účelem návrhu kanálu bylo, aby bylo zajištěno proudění kanálem za všech okolností. Původní tvar chladicího kanálu byl do značné míry modifikován ať už z hlediska prostorového tak z hlediska technologického. Předmětem letového měření je změřit tlakovou ztrátu na chladiči oleje v reálných podmínkách. Schéma měření je na obrázku níže.



Obr. 54: Schéma měření

K datu odevzdání práce nebylo měření provedeno z kapacitních důvodů. Měření poté znemožňovala nepříznivě počasí. Měření je však plánováno uskutečnit kvůli vlastní validaci CFD výpočtu.

12. Další rozvoj měřící trati

V průběhu měření se objevilo několik komplikací a potíží, které se více či méně povedlo eliminovat a na základě těchto zkušeností bude v budoucnu trať upravena.

Do budoucna je plánováno:

- Vybavit měřící trať novými pitot-statický sondy + jejich kalibrace.
- Lepšit těsnění chladiče a mezery mezi chladičem a měřícím boxem.
- Modifikovat měřící boxy, tak aby byla snadnější instalace sond.
- Měřící trať se rozšíří o kalorimetrickou část. V budoucnu to umožní komplexní měření vlastností chladiče.
- Implementovat měření sil na chladiči.

13. Závěr

V práci bylo srovnáno několik přístupů k měření tlakové ztráty. Od měření v aerodynamické trati, tak CFD výpočtu.

Aby bylo vůbec možno chladiče změřit, tak bylo třeba projít administrativním procesem výběrovým řízením na stavbu měřicí trati. Trať uvést do provozu, vybavit ji měřicí aparaturou, proměřit ji a odstranit její nedostatky.

Velká část práce je věnována měření chladičů v této trati. Pro měření bylo třeba navrhnout vhodnou zástavbu chladiče do měřicího prostoru, to sebou neslo nemálo komplikací. Při měření chladiče byly uplatněny přístupy z klasického aerodynamického měření v tunelech a díky těmto přístupům bylo možno proměřit prostor před i za chladičem. Byly srovnány rozdílné přístupy měření tlakové ztráty (pitot-statická sonda, tlakové odběry na stěnách). Díky možnosti měřit celý průřez bylo dosaženo změřením detailnějšího chování vzduchu procházejícího chladičem. Navržená zástavba chladiče umožňuje měření charakteristik proudu, dále umožňuje i měření silových účinků na chladič. Tento typ zástavby a měření proudového pole je dosti zásadním vylepšením stávajících měřících tratí používaných k měření charakteristik chladičů. Současné měřicí trati měří chladiče z pohledu globálních veličin. Pokud je třeba proměřit proudové (teplotní) pole, tak se využívá soustava několika měřidel v definovaných bodech.

Použití CFD výpočtu tlakové ztráty (na elementu chladiče) mělo ověřit možnosti použití tohoto přístupu, při znalosti geometrie použitého chladiče. CFD výpočet byl srovnán s naměřenou tlakovou ztrátou. Tento přístup se ukázal použitelný pro zjištění tlakových ztrát.

Velice zajímavou možností bylo srovnat naměřená data tlakové ztráty s měřením ve zkušebně věnujícím se měření chladičů profesionálně. Touto zkušebnou byla zkušebna chladičů firmy Autopal Hluk. Rozdíly mezi měřeními tlakové ztráty na LÚ a v Autopalu se výrazně nelišily. V této zkušebně velmi kladně hodnotili možnost proměření proudového pole před a za chladičem, které v této zkušebně není možno realizovat. Tento způsob měření doposud v praxi používán a naměřená proudová pole jsou velice vítána. Samotné měření neovlivňuje zástavba chladiče. Získaná data z naměřených proudových polí mají velký význam při vývoji nových chladičů a to zejména v kombinaci 2 a více chladičů za sebou.

Pomocí zjednodušeného modelu chladiče (Porous Zone) můžeme efektivně navrhnout či optimalizovat chladičí kanál. Tento model velice přesně reprezentuje náhradu za chladič. Pro definování náhrady musíme zadat koeficienty, které zjistíme nejpřesněji na základě měření, případně je můžeme vypočítat opět pomocí CFD metod na základě znalosti geometrie elementu chladiče. Možnost predikce tlakové ztráty na základě znalosti geometrie elementu chladiče je velmi perspektivní, především pro výrobce chladičů, kdy může pomocí CFD výpočtu provést velké množství výpočtů budoucího chladiče.

Na základě spolupráce při měření těchto dvou vzorků chladičů byla navázána velmi perspektivní spolupráce nejen na měření chladičů, ale i na jejich CFD výpočet. Velice kladně bylo hodnoceno měření celého prostoru za či před měřeným chladičem. Pozornost se upřela i na CFD přístupy výpočtů tlakových ztrát. Zejména pak dobrá shoda CFD predikcí tlakové ztráty s měřeními. Těchto poznatků je plánováno využít při vývojových pracích na nových typech chladičů pro významného automobilového výrobce. Naměřená data budou sloužit pro zadání vstupních parametrů do výpočetních modelů chladičů. Výrobce tím do značné míry zpřesní dosavadní návrhy chladičů ve specializovaných softwarech. CFD přístup je pro něj perspektivní především při kombinaci více chladičů.

14. Seznam použité literatury

- [1] KATZ, J., V. R. CORSIGLIA, P. R. BARLOW. Cooling Air Inlet and Exit Geometries on Aircraft Engine Installations. *Journal of Aircraft*. 1982, **No. 7**(Vol. 19), pp. 525-530.
- [2] HOERNER, S. F. Fluid-dynamic drag: practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance. 2nd ed. Bakersfield: Hoerner Fluid Dynamics, 1992. ISBN 978-999-1194-448.
- [3] BRP-Powertrain. Instalation manual for Rotax engine type 912 i series. January 01 2012
- [4] MEREDITH, F. W. Cooling of aircraft engines. With special reference to ethylene glycol radiators enclosed in ducts. ARCRM No 1683. 1936
- [5] FOWLES, Curtis. MustangsMustangs [Online]. [cit. 10. 06.2016].
Dostupné z: <http://www.mustangsmustangs.com/p-51/variants/p51h>
- [6] DEARBORN, C. H., A. SILVERSTEIN. Drag analysis of single-engine military ariplanes tested in the nace full-scale wind tunnel. NACA. 1940
- [7] Bugatti atutomobiles s.a.s.. Bugatti [Online]. [cit. 10. 06.2016].
Dostupné z: <http://www.bugatti.com/veyron/technology/>
- [8] RAUSCHER, J. Spalovací motory: studijní opory, Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2005.235s
- [9] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428.
- [10] BARLOW, Jewel B., William H. RAE a Alan POPE. Low-speed wind tunnel testing. 3rd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 0471557749.
- [11] MELOUN, Milan. Statistické zpracování experimentálních dat v chemometrii, biometrii, ekonometrii a v dalších oborech přírodních, technických a společenských věd. Praha: Plus, 1994. Plus (Plus). ISBN 80-85297-56-6.
- [12] CREED, T. Measurement of finned-tube head exchanger performance. Georgia Institute of Technology, 2004.
- [13] KLEGER, O. Zkušební stav pro zkoušení chladičů. [Online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 68s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík. [cit. 10. 06.2016].
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54628
- [14] VAN DEN BERG L.,B. Lofaro. Formula SAE Cooling System Design.[Online]. San Luis .2014. [cit. 10. 06.2016].
Dostupné z: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1229&context=mesp>
- [15] AYS, W. M., A. L. LONDON. Compact heat exchangers. Repr. ed. 1998 with corrections. Malabar, Fla.: Krieger Pub. Co., 1998. ISBN 1575240602.

- [16] THULUKKANAM, Kuppan. Heat exchanger design handbook. 2nd ed. Boca Raton, L: CRC Press, 2013. ISBN 9781439842133.
- [17] Niagara thermal products llc. Aircraft oil cooler P/N:20006A. 1998
- [18] JØRGENSEN, Finn E. How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide. Dantec Dynamics, 2002.
- [19] BRUUN, H. H. Hot-Wire Anemometry: principles and Signal Analysis. 2 ed. Oxford: Oxford University Press, 1996. ISBN 0198563426.
- [20] SAMUEL A.E. The Correction of hot wire measurements for fluid temperature variation. Christchurch, New Zealand.1974
- [21] BENJAMIN, S. F., C. A. ROBERTS. Measuring flow velocity at elevated temperature with a hot wire anemometer calibrated in cold flow. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002. **4**(volume 45). pp.703–706.
- [22] STAINBACK, P. C., K. A. NAGABUSHANA. Review of Hot-Wire Anemometry Techniques and the Range of their Applicability for Various Flows. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME.
- [23] Hultmark M., A. J. Smits. Temperature corrections for constant temperature and constant current hot-wire anemometers. Measurement Science and Technology [online]. 2010, **21**(10). [cit.10.06.2016]. Dostupné z: <http://www.stacks.iop.org/MST/21/105404>
- [24] BALL, S.J., S. ASHFORTH-FROST, K. JAMBUNATHAN, C.F. WHITNEY. Appraisal of a hot-wire temperature compensation technique for velocity measurements in non-isothermal flows. International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. Elsevier Ltd. 1999. **16**(42). p. 3097-3102. ISSN 0017-9310.
- [25] JUNJANA, G.C., N. KULASEKHARAN, H.R.PURUSHOTHAM. Performance Improvement Of A Louver-Finned Automobile Radiator Using Conjugate Thermal CFD Analysis. International Journal of Engineering Research & Technology. 2012.**Issue 8**(Vol.1). e-ISSN: 2278-0181
- [26] PELAEZ, R.B., J. O. CASANOVA, J.M.C. LOPEZ. A three-dimensional numerical study and comparison between the air side model and the air/water side model of a plain fin and tube heat exchanger. Applied Thermal Engineering.2010. **Issue 13**(Vol.30) pp.1608-1615
- [27] HE, Y.L., W.Q. TAO, F.Q. SONG, W. Zhang. Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of plain plate fin-and-tube heat exchangers from view point of field synergy principle. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2005. **Issue 3**(Vol.26) pp. 459–473
- [28] WOLF, I., B. FRANKOVIC, I. VILIČIĆ, R. JURKOWSKI, A. BAILLY. A numerical and experimental analysis of heat transfer in a wavy fin-and-tube heat exchanger. Energy and the Environment.2006. pp.91-101
- [29] OLIET C., A. OLIVA, J. CASTRO, D. PÉREZ-SEGARRA. Parametric studies on automotive radiators. Applied Thermal Engineering. 2007. **Issue 11-12**(Vol.27) pp. 2033-2043

- [30] OLIET C., C. D. PÉREZ-SEGARRA, A. OLIVA. Thermal and Fluid Dynamic Simulation of Automotive Fin-and-Tube Heat Exchangers, Part 1: Mathematical Model. Heat Transfer Engineering. 2008. **Issue 5** (Vol.29) pp. 484-494
- [31] PÉREZ-SEGARRA C. D., C. OLIET, A. OLIVA. Thermal and Fluid Dynamic Simulation of Automotive Fin-and-Tube Heat Exchangers, Part 2: Experimental Comparison. Heat Transfer Engineering. 2008. **Issue 5** (Vol.29) pp. 495-502
- [32] ANSYS. ANSYS Fluent 15.0 User's Guide. Ansys, Inc.2013
- [33] ANSYS.. ANSYS: Fluent 15.0 Fluent Theory Guide. Ansys, Inc.2013
- [34] MILEY, S. J., E. J. Jr. CROSS, J. K. OWENS D.L. LAWRENCE. An experimental investigation of the aerodynamics and cooling of a horizontally-opposed air-cooled aircraft engine installation. NASA Contractor Report 3405. 1981.
- [35] MILEY, S.J. Review of liquid-cooled aircraft engine instalation aerodynamics. Journal of Aircraf. 1988, **No. 3**(Vol. 25), pp. 222-228.
- [36] MACKOVÍK, M. Optimalizace chlazení oleje letounu VUT 100. [Online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 73s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Popela, Ph.D. [cit. 10. 06.2016]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42480
- [37] FAZEKAŠ, S. Návrh kanálu olejového chladiče pro modernizovanou motorovou gondolu letounu L410NG. [Online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 81s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Navrátil. [cit. 10. 06.2016]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103219
- [38] Miata.net [Online]. [cit. 10. 06.2016]. Dostupné z: <http://forum.miata.net/vb/showthread.php?t=538684>
- [39] BMW AG. Bmw [Online]. [cit. 10. 06.2016]. Dostupné z: <http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/efficientdynamics-2015/aerodynamik.html>

15. Seznam použitých zkratk a symbolů

ULL	Ultralehký letoun	
VLA	Very Light Aircraft (velmi lehký letoun)	
LSA	Light Sport Aircraft (lehký sportovní letoun)	
GA	General Aviation (obecné letectví)	
VUT	vysoké učení technické	
LÚ	Letecký ústav	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
v_{∞}	rychlost nerozrušeného proudu	[m/s]
v_R	rychlost na vstupu do chladiče	[m/s]
$p_{S,A}$	statický tlak v místě A	[Pa]
q_A	dyn. tlak v místě A	[Pa]
$p_{S,B}$	statický tlak v místě B	[Pa]
q_B	dyn. tlak v místě B	[Pa]
K_1	koeficient tlakové ztráty	[-]
S_A	plocha průřezu v místě A	[m ²]
v_A	rychlost v místě A	[m/s]
S_B	plocha průřezu v místě B	[m ²]
v_B	rychlost v místě B	[m/s]
q_C	dyn. tlak v místě C	[Pa]
S_C	plocha průřezu v místě C	[m ²]
v_C	rychlost v místě C	[m/s]
K_T	tunelová konstanta	[-]
$v_{A,B}$	rychlost mezi body A-B	[m/s]
Q	teplený tok	[W]
S	plocha elementu	[m ²]
α	součinitel přestupu tepla konvekci	[W/ m ² /K]
t_w	teplota povrchu elementu	[°C]
t_{∞}	teplota proudící látky	[°C]
P	elektrický příkon	[W]
R	elektrický odpor tělíska	[Ω]
I	proud procházející elementem	[A]
U_{mean}	průměrná rychlost proudění	[m/s]
U_i	i-tá rychlost	[m/s]
N	počet vzorků	[-]
U_{rms}	směrodatná odchylka rychlosti	[m/s]
IT	intenzita turbulence	[-]
k_n	koeficient poměru dyn. tlaků	[-]
q_0	dyn. tlak v referenčním bodě	[Pa]
q_n	dyn. tlak v n-tém bodě	[Pa]
q_p	přepočtený dyn. tlak	[Pa]
v_p	přepočtená rychlost	[m/s]
ρ_0	hustota v referenčním bodě	[kg/m ³]
S_i	zdroj hydnosti	[-]
D_{ij}	diagonální matice s členy $1/\alpha$	[-]
C_{ij}	diagonální matice s členy C_2	[-]
μ	dynamická viskozita	[m ² /s]
v_j	komponenty rychlosti v příslušných složkách	[m/s]
v	rychlost	[m/s]

ρ	hustota proudícího média	[kg/m ³]
α	permeabilita	[-]
Δp_x	tlaková ztráta ve směru osy x	[Pa]
Δp_y	tlaková ztráta ve směru osy y	[Pa]
Δp_z	tlaková ztráta ve směru osy z	[Pa]
α_{xj}	permeabilita ve směru osy X	[-]
α_{yj}	permeabilita ve směru osy X	[-]
α_{zj}	permeabilita ve směru osy X	[-]
Δn_x	tloušťka porózního media v ose x	[m]
Δn_y	tloušťka porózního media v ose y	[m]
Δn_z	tloušťka porózního media v ose z	[m]
C_{2xj}	konstanta porózního media v ose x	[-]
C_{2yj}	konstanta porózního media v ose x	[-]
C_{2zj}	konstanta porózního media v ose x	[-]