

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ENERGETIKY

AERODYNAMICKÉ A TEPLENÉ VLASTNOSTI 3D  
TIŠTĚNÝCH TEPELNÝCH VÝMĚNÍKU

BAKALAŘSKÁ PRÁCE

2022

Ondřej Prošek



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prošek** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **483132**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Aerodynamické a tepelné vlastnosti 3D tištěných tepelných výměníků**

Název bakalářské práce anglicky:

**Aerodynamic and thermal properties of 3D printed heat exchangers**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte literární rešerši na téma chlazení různých komponent a připravte měřicí trať pro měření tepelných výměníků vyrobených FDM 3D tiskovou metodou.

Dílčí cíle:

- 1) Připravte experimentální aparaturu
- 2) Navrhněte výměníky optimalizované pro 3D tisk
- 3) Ověřte možnost měření výměníků vyrobených FDM metodou
- 4) Proměřte ztrátové součinitele navržených výměníků

Seznam doporučené literatury:

Rieger, F., Novák, V., Jirout, T.: Hydromechanické procesy 1 a 2, ČVUT, 2005

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Stanislav Solnař, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Stanislav Solnař, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsme bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu

V Praze dne .....

.....

Ondřej Prošek

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Stanislavu Solnaři, Ph.D. za jeho perfektní vedení práce a za cenné rady jak k bakalářské práci, tak do profesního života.

Dále bych chtěl poděkovat za psychickou podporu rodině, přítelkyni a přátelům, bez které bych se ani k psaní bakalářské práce nedostal.

# Anotační list

Jméno autora: Ondřej

Příjmení autora: Prošek

Název práce česky: Aerodynamické a tepelné vlastnosti 3D tištěných tepelných výměníků

Název práce anglicky: Aerodynamic and thermal properties of 3D printed heat exchangers

Rozsah Práce: Počet stran:60

Počet obrázků:14

Počet tabulek: 17

Počet příloh:20

Akademický rok: 2021/2022

Jazyk práce: český

Ústav: Energetiky

Studijní program: Strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Solnař, Ph.D.

Anotace česky: V této práci byly experimentálně změřeny aerodynamické vlastnosti komerčních a vlastních výměníků tepla používaných při chlazení počítačových komponent. V rámci experimentů byla vyzkoušena i možnost měření tepelných vlastností vlastních výměníků ze dvou různých materiálů a porovnání s komerčním výměníkem.

Klíčová slova: - 3D tisk, výměník tepla, tlaková ztráta

Anotace anglicky: In this work, the aerodynamic properties of commercial and proprietary heat exchangers used in cooling computer components were experimentally measured. The experiments also tested the possibility of measuring the thermal properties of the heat exchanger from two different materials and compared with a commercial heat exchanger.

Klíčová slova anglicky: - 3D printing, heat exchanger, pressure drop

# Obsah

Úvod: .....	8
1. Stručný přehled druhů výměníků .....	9
1.1 Co je výměník tepla .....	9
1.2 Použití výměníků .....	9
1.3 Požadavky na výměník .....	9
1.4 Typy výměníků .....	10
2. Způsoby sdílení tepla ve výměnících .....	11
2.1 Sdílení tepla vedením (kondukce) .....	11
2.2 Sdílení tepla prouděním (konvekci).....	12
2.3 Sdílení tepla sáláním (radiací) .....	13
3. Nutnost chlazení komponentů a základy vodního chlazení .....	13
3.1 Fyzikální důvod chlazení komponentů aneb Jouleovo teplo .....	13
3.2 Chlazené počítačové komponenty a jejich normální pracovní teplota .....	14
3.3 Způsoby chlazení .....	14
3.4 Vodní chlazení .....	15
4. Hydraulické ztráty v potrubí a Reynoldsovo číslo .....	16
4.1 Hydraulické ztráty.....	16
4.2 Dělení hydraulických ztrát.....	17
4.3 Ztrátový Součinitel $\xi$ .....	18
4.4 Reynoldsovo číslo.....	19
5. Měření výkonu výměníku.....	21
5.1 Cíl měření .....	21
5.2 Popis měření .....	21
5.3 Popis měřicí dráhy .....	21
5.4 Postup měření .....	22
5.5 Použité přístroje .....	22

5.6 Teoretický základ.....	22
5.7 Výsledky měření .....	24
5.8 Diskuse výsledků .....	26
6. Měření rychlostního profilu.....	27
6.1 Cíl měření .....	27
6.2 Popis měření .....	27
6.3 Popis měřicí aparatury .....	27
6.4 Postup měření .....	27
6.5 Použité přístroje .....	27
6.6 Výsledky měření .....	28
6.7 Diskuse výsledků .....	29
7. Stanovení ztrátového součinitele $\xi$ v závislosti na Reynoldsově čísle .....	30
7.1 Cíl měření .....	30
7.2 Popis měření .....	30
7.3 Popis měřicí dráhy .....	30
7.4 Postup měření .....	31
7.5 Použité přístroje .....	31
7.6 Teoretický základ.....	31
7.7 Výsledky měření .....	32
7.8 Diskuse výsledků .....	36
Závěr .....	37

## Úvod:

Počítače a počítačová technika se stále více stává součástí našich životů. Upřímně, už si bez jejich výhod nedokážeme představit normální život. Pomáhají nám jak v pracovní, tak ve volnočasové aktivitě, avšak tyto stoje při svém provozu produkují zbytkové teplo, které je potřeba efektivně odvádět, aby komponent mohl správně pracovat. Se zvyšujícím se výkonem těchto stojů je stále větší poptávka po tom, jak efektivně a levně toto teplo odvádět.

Chlazení počítačů se v komerčním měřítku provádí přes výměníky vzduch/vzduch, které mají největší zastoupení na trhu pro svůj jednoduchý design, levnost výroby a dostatečnou účinnost, anebo přes výměník kapalina/vzduch. V této práci se bude zabývat právě výměníkem kapalina/vzduch. Výměníky jsou většinou tvořeny z kovů, které dobře vedou teplo. S nástupem aditivní technologií 3D tisku se nám naskytly další možnosti pro výrobu těchto výměníků, především v kategorii efektivnějších designů, které technologie 3D tisku umožňuje, oproti konvenčním metodám výroby.

Cílem této práce je vytvoření výměníku tepla pomocí technologie 3D tisku a podrobit ho sérii měření.

Součástí této práce bude také 7 tipů výměníků vlastního designu a rozbor jejich hydraulických a tepelných vlastností. Dále budeme podrobovat pokusům výměník s organickou strukturou, který by podle literatury měl mít dobré vlastnosti a účinnost.

Hlavním zdrojem informací byly kromě doporučené literatury, také odborné články publikované vědci z celého světa.



# 1. Stručný přehled druhů výměníků

## 1.1 Co je výměník tepla

Přenos tepelné energie, získané ve spalovacích zařízeních nebo jako vedlejší produkt fungování stroje či nástroje, na chlazení, vytápění, technologický ohřev nebo výrobu elektrické energie, se odehrává ve výměnících tepla.

Výměníky tepla jsou zařízení, která slouží k průběžnému nebo přerušovanému předávání tepelné energie proudících teplosměnných látek. Dochází zde k předávání tepla z teplejšího (ohřívacího) media do media chladnějšího (ohřívajícího). [1]

## 1.2 Použití výměníků

Výměník tepla je jeden z nejrozšířenějších komponentů v energetice. Mají mnoho využití, v energetice se nejčastěji setkáváme s těmito aplikacemi:

- Ohřev pracovní látky – jedná se především o ohřev vody či vzduchu parou, horkou vodou nebo spalinami.
- Chlazení pracovní látky – jedná se o snížení teploty pracovní látky.
- Kondenzace páry – jedná se o odebrání tepla páře za účelem jejího zkapalnění.
- Využití odpadního tepla – tato aplikace se používá především v průmyslových závodech k šetření energie.
- Výroba páry

[1] [2]

## 1.3 Požadavky na výměník

Při konstruování výměníku je nejdůležitější myslet na to, aby výměník co nejlépe předával teplo při nízkých nákladech jak na provoz, tak na výrobu. To můžeme dosáhnout vhodnou geometrií, správně zvoleným materiálem pro konstrukci výměníku nebo volbou vhodného pracovního média.

Při konstrukci výměníku tepla narazíme na několik požadavků, které by výměník měl splňovat, avšak tyto požadavky jdou často proti sobě. Jedná se o:

- Co nejmenší rozměr, hmotnost a cena výměníku
- Co nejmenší tlakové ztráty (čerpací práce)
- Co nevyšší spolehlivost v provozu

První dva body se zabývají konstrukcí výměníku nebo výběru typu výměníku. Tyto dva parametry při návrhu konstrukce jdou proti sobě a výsledné řešení je proto kompromisem mezi těmito požadavky.

Poslední bod, a to spolehlivost v provozu, můžeme interpretovat jako:

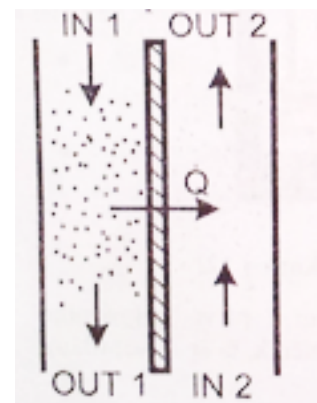
Nutnost zamezit určitým poruchám v citlivých aplikacích, např. při netěsnostech výměníku, který používá jako pracovní medium kapalinu, která by se mohla dostat do citlivých částí stroje a mohla způsobit nevratné škody.

Možnost údržby. U průmyslových typů výměníků, které jsou výrazně namáhány, je potřeba dbát při návrhu konstrukce, aby části výměníku byly dostupné pro údržbu a ty které potřebují čištění nebo vykazují častější poruchovost, bylo možno snadno vyměnit či vyčistit obsluhou. [1] [2]

#### 1.4 Typy výměníků

- Rekuperační – obě tekutá media, ohřivané i ohřívající, jsou oddělena stěnou, kterou media neprojdou a nemohou se mísit. Dochází tedy pouze k přenosu tepelné energie vedením a prouděním.

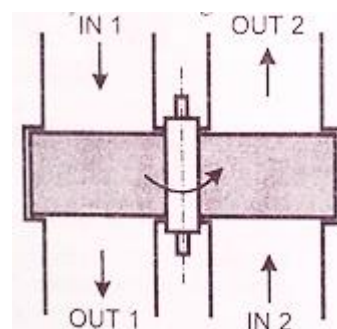
Základním typem je trubkový rekuperační výměník. Výhodou tohoto řešení je velmi dobrá čistitelnost, takže tento typ se používá zejména v průmyslu. Nevýhodou je relativně malý povrch a z toho vyplývající nízká účinnost, která bývá 20-40 %. Vyšších účinností obvykle v rozmezí 40-70 % dosahují deskové křížové rekuperátory. Ještě vyšších účinností v rozsahu cca 60-90 % je možné dosáhnout protiproudým uspořádáním a kanálkovým profilem průtokových cest výměníku.



Obr. 1.4.1 schéma rekuperačního výměníku [1]

- Regenerační – ohřivané a ohřívající medium vtéká do vymezeného prostoru v odlišných časových intervalech a předávají své teplo teplosměnné ploše.

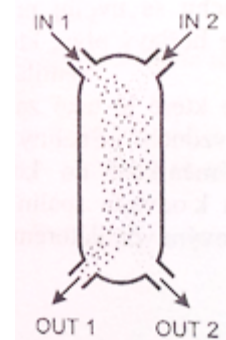
Teplosměnná plocha přijímá teplo ohřívacího tělesa a vzápětí ho odevzdává ohřivanému tělesu. Tento cyklus se stále opakuje. Může zde dojít k částečnému smísení obou medií.



Obr. 1.4.2 schéma regeneračního výměníku [1]

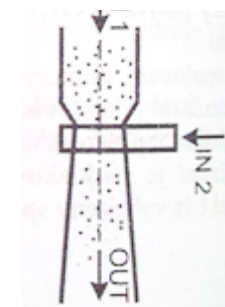
V současnosti se nejčastěji používají dva systémy, a to s použitím rotačního regeneračního výměníku a druhým princip je přepínání, kdy akumulacním blokem protéká střídavě pomocí přepínacích klapky odpadní a přírodní medium. Účinnost se pohybuje v rozmezí 60-80 %.

- Kontaktní – teplé a studené medium jsou v rozdílných fázích. Obě složky jsou přivedeny do výměníku kde se smísí a předají si tepelnou energii. Teplosměnná plocha je dána povrchem částic pevné fáze.



Obr. 1.4.3 schéma kontaktního výměníku [1]

- Směšovací – ve výměníku se nenachází teplosměnná plocha, teplé a studené medium přichází do výměníku, kde se mísí a vytváří homogenní směs. [1] [2] [3]



Obr. 1.4.4 schéma směšovacího výměníku [1]

## 2. Způsoby sdílení tepla ve výměnících

Sdílení tepla je přenos vnitřní energie, která samovolně přechází z teplejšího tělesa nebo média na chladnější. Sdílení tepla rozlišujeme na tři způsoby: vedení (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (radiace). [1] [4]

### 2.1 Sdílení tepla vedením (kondukce)

V tomto způsobu šíření tepla se tepelná energie přenáší vzájemným působením částic látky s vyšší střední kinetickou energií látky s nižší střední kinetickou energií, a to především prostřednictvím srážek mezi částicemi, čímž ji předá svou pohybovou energii. Vedení tepla můžeme pozorovat především v pevných látkách, avšak kapaliny a plyny si také mohou předávat teplo pomocí vedení, ale mnohem větší zastoupení zde má sdílení tepla pomocí proudění. Velikost hustoty tepelného toku je charakterizován pomocí Fourierova zákona.

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\delta} \quad (1)$$

Kde:	$q$	měrný tepelný tok, prošlý za jednotku času jednotkovou plochou ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )
	$\lambda$	tepelná vodivost ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
	$\Delta T$	rozdíl teplot ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$\delta$	tloušťka stěny (m)

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  je fyzikální vlastnost látky a je definován jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový tepelný spád. A to za předpokladu, že se teplo šíří jen jedním směrem. Tuto definici lze také vyjádřit tak, že součinitel tepelné vodivosti je výkon, který projde každým čtverečním metrem desky tlusté jeden metr, jejíž jedna strana má teplotu o 1 Kelvin vyšší než druhá. Pro většinu materiálu je  $\lambda = f(T)$

Tepelná vodivost je tabulková hodnota, kterou lze nalézt v odborné literatuře. Kovy se vyznačují mnohonásobně vyšší tepelnou vodivostí oproti organickým látkám, kde hodně jejich prostoru vyplňuje vzduch. Proto, když chceme co nejlepší tepelnou vodivost, sáhneme po materiálech s vysokým tepelným součinitelem – nejčastěji po dostupných kovech. Na druhou stranu, pokud chceme izolovat například dům, využijeme materiály s nízkou tepelnou vodivostí. Dříve se používaly organické látky, např. (sláma, konopí nebo len). Dnes se používají spíše syntetické látky, např: (polystyren a skelná vata.) [1] [4] [5]

## 2.2 Sdílení tepla prouděním (konvekcí)

V tomto způsobu šíření tepla se tepelná energie přenáší makropohybem, prouděním tekutiny a jejich kontaktu s okolními tuhými látkami s odlišnou teplotou. Přenos tepla konvekcí se skládá ze dvou mechanismů. Zaprvé se jedná o vedení (kondukce). Ta probíhá pouze v mezní vrstvě tekutiny, která naléhá na stěnu. Za druhé se jedná o pohyb mikročástic tekutiny, které jsou strhávány z volného proudu do mezní vrstvy, kde odebírají teplo a následně se vrací zpět.

Konvekci můžeme dělit podle typu proudění na:

- Nucenou – proudění tekutiny je ovlivněno přidáváním vnější energie (čerpání nebo ofukování)
- Přírozenou – proudění je způsobeno pouze teplotním rozdílem, kdy teplejší částice s nižší hustotou vlivem Archimédova vztlaku stoupají vzhůru.

Sdílení tepla konvekcí popisuje Newtonův vztah:

$$q = \alpha \cdot (T_w - T_o) \quad (2)$$

Kde:	$q$	hustota tepelného toku	$(W \cdot m^{-2})$
	$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
	$T_w$	teplota povrchu obtékaného tělesa	(K)
	$T_o$	teplota tekutiny v nekonečné vzdálenosti od povrchu	(K)

Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  na rozdíl od součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ , který je většinou konstantní, je složité určit. Součinitel  $\alpha$  závisí na mnoha faktorech – druh tekutiny, rychlost

a druh proudění (laminární nebo turbulentní), typ proudění (přirozené nebo nucené), tvar a rozměr teplosměnných ploch, stav a termofyzikální vlastnost tekutiny, teplota stěny. [1] [4]

### 2.3 Sdílení tepla sáláním (radiací)

Sálání je fyzikální proces, při kterém látka emituje do prostoru energii ve formě dlouhovlnného elektromagnetického záření. Konkrétně infračervené záření, které má vlnovou délku 800-400 nm. Šíření elektromagnetického záření není vázáno na hmotnost prostředí, proto se šíří i ve vakuu. Pro šíření infračerveného záření platí fyzikální zákony jako pro každé elektromagnetické záření. Jsou to, např. zákon odrazu, lomu a pohlcování. Pro teoretické řešení těchto mezních situací zavádíme pojem absolutně černé těleso. Pro toto těleso platí, že veškerá energie záření je jím absorbována. Pro reálná tělesa je pak stanoven pojem emisivity, např. pro železo je emisivita 90-95 %. Emisivita tělesa se určuje pomocí Stefan-Boltzmanova zákona.

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

Kde: q	měrný tepelný tok	(W.m <sup>-2</sup> )
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta σ= 5,67032*10 <sup>-8</sup> W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> )
T	absolutní teplota tělesa	(K)

Tako rovnice ovšem platí pouze pro absolutně černé těleso, pro reálná tělesa upravujeme rovnici na tvar  $E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ , kde  $\varepsilon$  je emisivita povrchu tělesa a určuje, jak je záření efektivní oproti černému tělesu.

U výměníku tepla můžeme pozorovat všechny tyto typy sdílení tepla, avšak u normálních výměníků převahuje sdílení tepla konvekcí a u vysoce teplých výměníků tepla zase sdílení tepla sáláním. Jak plyne ze vztahu (3) [1]

## 3. Nutnost chlazení komponentů a základy vodního chlazení

### 3.1 Fyzikální důvod chlazení komponentů aneb Jouleovo teplo

Na vině zahřívání elektrických komponentů je impedance polovodičových součástek a elektrických obvodů. Vlivem impedance se část elektrické energie při průchodu obvodem přemění v odpadní teplo (Jouleovo teplo). Vzhledem k malé ploše moderních polovodičových součástek, může nedostatečným odvodem tepla lehce dojít k přehřátí. To vede v lepším případě k značnému snížení výkonu vlivem automatického taktování, což sníží množství generovaného tepla. V tom horším případě může dojít až k poškození hardwaru. [6]

## 3.2 Chlazené počítačové komponenty a jejich normální pracovní teplota

- Procesor – nejvíce odpadního tepla zde vzniká při přepínání stavů tranzistorů během provádění početních operací.  
-interní čidlo: 70-75 °C,
- Grafická karta – zde nejvíce tepla produkuje GPU. Dále pak napájecí obvody, paměti a součásti typu rezistorů.  
– interní čidlo: 70-80 °C,
- Základní deska – zde mají největší podíl na produkci tepla napájecí obvody, které jsou složeny z tranzistorů. Dále čipsety (přídavné čipy, síťový čip atd.) a rezistory – teplota spínacích tranzistorů zdroje na základní desce: 80-85 °C
- Zdroj – jedná se o zařízení, které se nachází na konci chladicího systému, nicméně jím produkované teplo se může přenášet i do prostoru skříně. Odpadní teplo zde vzniká především v transformátoru, usměrňovači a tranzistorech. [7]

## 3.3 Způsoby chlazení

Způsoby chlazení počítačových komponentů by se daly rozdělit na dva základní typy podle chladicího média:

- Chlazení vzduchem – ke chlazení komponentů je používán vzduch z okolí počítače, který je vháněn do počítače, kde sdílí teplo z ovívaných teplosměnných ploch. Vzduch se do počítače může dostávat nuceně nebo přirozeně za příčiny rozdílů teplot. Tato metoda je konkurenčně více používaná a používá se u komponentů s menším tepelným výkonem.  
Protože téma této práce se zaměřuje na vodní chlazení, spokojíme se pouze s tímto krátkým popisem vzduchového chlazení, a dále se budeme zabývat vodním chlazením.
- Vodní chlazení – jak už název naznačuje, chladící medium je v této aplikaci voda. Dále o vodním chlazení v samostatné kapitole.

### 3.4 Vodní chlazení

Základní princip vodního chlazení je nahradit vzduch, jako chladicí medium, kapalinou. Kapalina (oproti vzduchu) má násobně vyšší tepelnou kapacitu a při správném využití nabízí možnost účinnějšího chlazení než klasické vzduchové chladiče. Ideální kapalina pro využití v chladiči má vysokou tepelnou kapacitu, nízkou viskozitu a je levná. Také není toxická a chemicky reaktivní, aby se zabránilo korozi kovových částí v okruhu. Tyto parametry celkem dobře splňuje destilovaná voda, a proto je také nejčastěji využívaným médiem v kapalinových chladičích. [8] [6]



Obr.3.4.1 ukázka vodního chlazení [8]

Chladicí okruh se skládá z několika částí:

- Chladicí blok – je v podstatě tepelný výměník připevněný na čipu a zajišťuje přenos tepla z povrchu čipu do kapaliny. Takřka většina bloků používá jako materiál pro základnu měď. Měď má výbornou tepelnou vodivost  $395 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ , což má za důsledek dostatečně malý tepelný odpor vedením tepla. Ostatní části, jako je, např. víko, se převážně vyrábí z plastu. Na trhu už dneska nenajdeme čip, na který by nebylo možné koupit chladicí blok.
- Spojovací hadice pro transport kapaliny – hadice plní funkci jakési cesty pro kapalinu. Jejich vlastnosti by měly být především dobrá ohebnost a tepelná a časová stálost. Používají se proto materiály jako PVC nebo silikon. Silikonová hadice plní dobře funkci ohebnosti a tepelné a časové stálosti, avšak stává se, že při spojování se trubička ustříhne.



Obr. 3.4.2 Chladicí blok [8]



Obr.3.4.3 Spojovací hadice [8]

- Desko žebrový výměník tepla – má za úkol teplo z procesorů, dopravené kapalinou, předat okolnímu prostředí. Od velikosti a kvality se pak určuje celkový výkon, který je dané chlazení schopno odvést. Veškeré teplo vyprodukované procesory musí být schopen desko žebrový výměník tepla předat okolí. Desko žebrové výměníky tepla se dají rozdělit na dva základní typy. Pasivní desko žebrový výměník tepla, kde výměna tepla nastává volnou konvekcí. Na radiátoru tím pádem nenajdeme žádný přídavný větrák. Tento typ se moc nevyskytuje. Aktivní desko žebrový výměník tepla, ke kterému je přimontován větrák a dochází tak k efektivnější výměně tepla nucenou konvekcí. Tento tip je hojně používaný napříč sestavami vodního chlazení.



Obr. 3.4.4 Desko žebrový výměník tepla [8]

- Čerpadlo – čerpadlo v oběhu vodního chlazení zajišťuje cirkulaci kapaliny a je tím nezbytnou součástí každého chladícího okruhu. Na čerpadlo nejsou kladeny žádné velké nároky. Dalo by se říct, že čerpadla pro vodní chlazení se moc neliší od normálních akvarijních odstředivých čerpadel. [9] [10] [8]



Obr. 3.4.5 Čerpadlo [8]

## 4. Hydraulické ztráty v potrubí a Reynoldsovo číslo

### 4.1 Hydraulické ztráty

Při proudění reálné kapaliny či plynu dochází ke tření o vnitřní povrch protékaného kanálu a obtékaných těles i ke tření uvnitř kapaliny (tzv. vnitřní tření), příčina tohoto děje je viskozita kapaliny. Z důvodu vnitřního tření a tření kapaliny o vnitřní stěny protékaného kanálu dochází z disipací mechanické energie na teplo, neboli k hydraulickým ztrátám. Důsledkem hydraulických ztrát je pokles tlaku podél trasy ve směru proudění kapaliny či plynu. Rozlišujeme dva druhy hydraulických ztrát, a to třecí ztráty a místní ztráty. Hydraulické ztráty jsou závislé na řadě parametrů, např. viskozitě tekutiny, geometrii potrubí a jeho drsnosti, ale především na rychlosti média. [11] [12]



## 4.2 Dělení hydraulických ztrát

- Třecí ztráty (délkové ztráty) vznikají prouděním v dlouhých rovných úsecích protékaného tělesa. Závisí na vlastnostech protékaného média, rychlosti proudění, délce protékaného tělesa, vnitřním průměru a drsnosti protékaného tělesa. K jeho vypočtení se v Evropě hojně používá tzv. Darcy-Weis Bachův vztah [11] [13] [12]

$$e_z = \frac{\Delta p}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

Kde:	$\lambda$	Součinitel ztráty třením	(1)
	$e_z$	ztráta měrné mechanické energie	(.kg <sup>-1</sup> )
	$\Delta p$	tlaková ztráta	(Pa)
	$\rho$	měrná hmotnost	(kg.m <sup>-3</sup> )
	$u$	střední rychlost proudění	(m.s <sup>-1</sup> )
	$d$	průměr	(m)
	$l$	délka	(m)

- Místní ztráty jsou způsobené změnou velikosti průřezu nebo změnou směru proudícího média. To má za následek vznik vírů v médiu, které se posléze utlumí a jejich energie se přemění na teplo. Dále také dochází k vzájemnému tření částic, proudícího média, o sebe a o stěny potrubí. Velikost místních ztrát se vypočítá ze vztahu

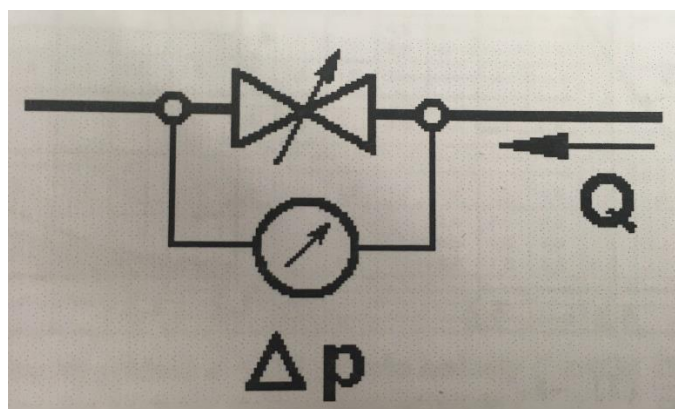
$$e_z = \frac{\Delta p}{\rho} = \xi \frac{u^2}{2} \quad (5)$$

Kde:	$\xi$	ztrátový součinitel	(1)
	$e_z$	ztráta měrné mechanické energie	(.kg <sup>-1</sup> )
	$\Delta p$	tlaková ztráta	(Pa)
	$\rho$	měrná hmotnost	(kg.m <sup>-3</sup> )
	$u$	střední rychlost proudění	(m.s <sup>-1</sup> )

Protože proudění média v prostorách složitých struktur je komplikované a jednotlivé vlivy nelze separovat, je obtížné je předpovědět pouhým výpočtem. Proto se při výpočtech vychází právě ze ztrátového součinitele  $\xi$ , který se získává experimentálně a jeho hodnoty, pro různě tvarované potrubí, lze nalézt v odborných příručkách, např. u dodavatelů [11] [13] [12]

### 4.3 Ztrátový Součinitel $\xi$

$\xi$  jak už bylo řečeno, je ztrátový součinitel, který se výhradně stanovuje experimentálně. Jeho hodnoty se odvíjejí od typu lokálního odporu a při nízkých hodnotách Reynoldsova čísla i od něho. Při průtoku média protékáním tělesem, naráží medium na odpor, který vnímáme jako ztrátu energie média  $e_z$ . To se projeví jako rozdíl tlaků media měřeného před odporem a tlaku média měřeného za odporem. Tohoto fyzikálního úkazu se využívá právě ke stanovování ztrátového součinitele  $\xi$ . Hodnoty součinitele  $\xi$  lze zjistit podle schématu (obr. 4.3.1). U konkrétního tělesa určitých rozměrů, kterým proudí dané medium o určité hustotě  $\rho$  a rychlosti  $u$ , se měří hodnoty rozdílu tlaků před a za tělesem  $\Delta p$ , při průtoku  $Q$ . Ze vztahu (4) lze poté vypočítat hodnotu  $\xi$  daného tělesa. [11] [14]



Obr. 4.3.1 schéma zapojení měření ztrátového součinitele [11]

Po lehké úpravě vztahu (5) pro určení hydraulických ztrát dostaneme.

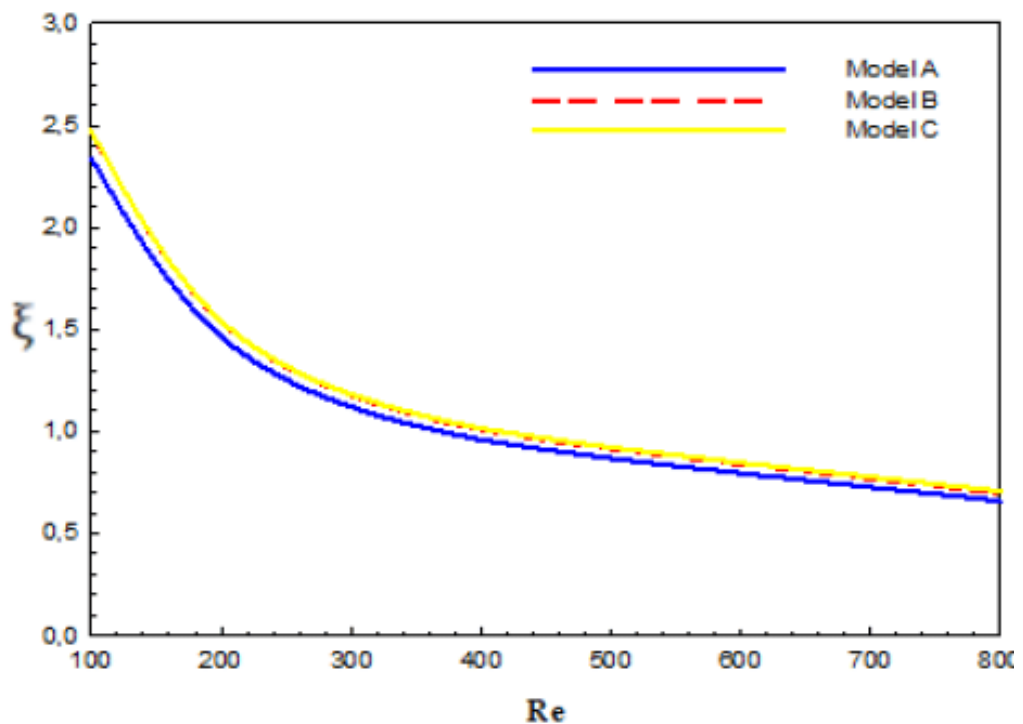
$$\Delta p = \xi \frac{u^2}{2} \rho \quad (6)$$

Z toho tvaru už je vidět, že po změření tlakové ztráty a střední rychlosti, můžeme lehce dopočítat ztrátový součinitel.

$$\xi = \frac{2\Delta p}{u^2 \rho} \quad (7)$$

Tento vzorec budeme dále používat v praktické části.

Při zvyšujícím se Reynoldsově čísle a přechodu do turbulentního proudění nám přestává Reynoldsovo číslo ovlivňovat ztrátový součinitel  $\xi$ . Grafy závislosti ztrátového součinitele  $\xi$  na Reynoldsově čísle mají potom podobný charakter jako na (Obr.4.3). [11] [13] [4]



Obr. 4.3.2 graf závislosti ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle [15]

#### 4.4 Reynoldsovo číslo

Roku 1883 provedl profesor Osborne Reynolds pokus, kdy do skleněné trubice kruhového průřezu, ve kterém proudila voda, vypouštěl v místech osy trubice barvu. Zjistil, že při stacionárním průtoku nižších rychlostí pramínky barvy zachovávají svou individualitu, zatímco při vyšších rychlostech se barva začne mísit a roztok rychle zaplní celý průřez

trubice. Při detailním pozorování zjistil, že v kapalině při vyšších rychlostech vznikají víry. [4]

Reynoldsovo číslo je poměrové číslo, které vyjadřuje poměr mezi setrvačnými a vazkými silami. Reynoldsovo číslo je tudíž definováno vztahem [3]

$$Re = \frac{u D}{\nu} \quad (8)$$

Kde:

$u$  – je střední objemová rychlost v profilu (m s<sup>-1</sup>)

$D$  – je charakteristický rozměr (m)

$\nu$  – je kinematická viskozita (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)

Hydraulický průměr  $D$  je definován poměrem čtyřnásobku vnitřního průřezu daného profilu potrubí  $S$  a jeho omočeného obvodu  $O$ , což umožňuje stanovení charakteristického rozměru obecných nekruhových profilů [16]

$$D = \frac{4S}{O} \quad (9)$$

Velikost hydraulických ztrát závisí mj. na typu proudění. Proudění rozdělujeme na tři základní stavy: laminární, přechodové a turbulentní. Hranici mez zhroucení laminárního proudění nám udává tzv. kritická hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{kr}=2320$ . Je-li  $Re \leq 2320$ , proudění je laminární. V rozmezí  $Re = 2320$  do  $Re = 6000$  až  $10000$  je tzv. přechodová oblast. Od  $Re = 10000$  a výš už můžeme s určitostí říct, že se jedná o turbulentní proudění. U laminárního proudění je hydraulický odpor proti pohybu média v přímých úsecích potrubí lineárně závislý na střední rychlosti proudění, u turbulentního proudění v přímých úsecích potrubí závisí nelineárně na střední rychlosti proudění. [11] [14]

# Praktická část

Cílem praktické části byl návrh vlastního výměníku tepla, který byl zhotoven pomocí technologie 3D tisku. Výměník jsme dále podrobili sérii měření, které se dají rozdělit do tří částí:

- 1) Měření výkonu výměníku
- 2) Stanovení ztrátového součinitele  $\xi$
- 3) Měření rychlostního profil

## 5. Měření výkonu výměníku

### 5.1 Cíl měření

Cílem tohoto měření je změřit výkon výměníku vlastního designu ze dvou materiálů (PLA a ESD) a porovnání s běžným výměníkem.

### 5.2 Popis měření

V tomto měření jsme se zaměřili na výkon výměníku. Pro tento účel byly vytištěny dva výměníky mého designu. Jeden z materiálu PLA, který se běžně používá ke 3D tisku a druhý výměník jsme vytiskli z materiálu ESD od firmy TCPoly. Tento materiál by se měl hodit právě na výrobu výměníků z důvodu jeho lepší tepelné vodivosti, která by měla činit 4 W/m K. S porovnáním oproti materiálu PLA, který má tepelnou vodivost 0,13 W/m K, je druhý materiál výrazně vhodnější a předpokládáme větší výkon výměníku vyrobeného z materiálu ESD. Dále byl pořízen běžný výměník, který bude fungovat jako referenční výměník a naše výměníky s ním budeme porovnávat.

### 5.3 Popis měřicí dráhy

Měření bylo provedeno na vlastnoručně sestavené dráze (Obr.4.3.1), která se skládá ze dvou ventilátorů, dvou elementů pro měření tlaku, teploty před měřeným výměníkem a za výměníkem, vrtulkového anemometru, dvou termočlánků a tlakoměru. Ventilátory vhání vzduch do prostorů dráhy, kde se v prvním elementu měří tlak a teplota na různých souřadnicích. Dále je instalován samotný výměník, kterým proudí teplá voda udržovaná pomocí termostatu na konstantních 50 °C. Následuje druhý element pro měření teploty v různých hladinách a tlaku za výměníkem. Za druhým elementem následuje druhý ventilátor a za ním anemometr pro měření rychlosti vzduchu.



Obr.4.3.1 Schéma měřicí dráhy

#### 5.4 Postup měření

Do připravené dráhy se nainstaluje příslušný měřený výměník. Dále počkáme, až teplota proudící vody ve výměníku dosáhne požadované teploty 50 °C. Po dosažení potřebné teploty spouštíme ventilátory a postupně přidáváme napětí na ventilátorech. Přitom odečítáme tlakovou diferenci, rychlost vzduchu a rozdíl teplot v různých hladinách. Výsledné hodnoty nám pak vytvoří charakteristiku výměníku.

#### 5.5 Použité přístroje

- Ventilátory SUNON o velikosti 120x120x38 mm se jmenovitým napájecím napětím 12 V DC. S rozsahem napětí 4-14 V o nominálním výstupním výkonu 19,2W
- Almemo 2590 stanice. Přidal jsem diferenční tlakoměrem (0-2600 Pa a diff. ± 2 Pa)
- Anemometr Testo 417 (0,3-20 m/s ±1,5 %) o měřeném průměru 100 mm.
- Termočlánek typu K, rozsahu -40 až 200 °C a toleranci ± 0,4 %
- Lauda E100 termostat.
- Laboratorní zdroj napětí HQ power PSS-4005

#### 5.6 Teoretický základ

Výkon výměníku lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$Q = C_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \quad (10)$$

$Q$  je výkon (W) výměníku,  $C_p$  je měrná tepelná kapacita za stálého tlaku (J/kg·K),  $\dot{m}$  je hmotnostní tok vzduchu (kg/s) a  $\Delta T$  je rozdíl teplot(°C) před výměníkem a za výměníkem.

Hmotnostní tok vzduchu  $\dot{m}$  lze pak vyjádřit pomocí vztahu:

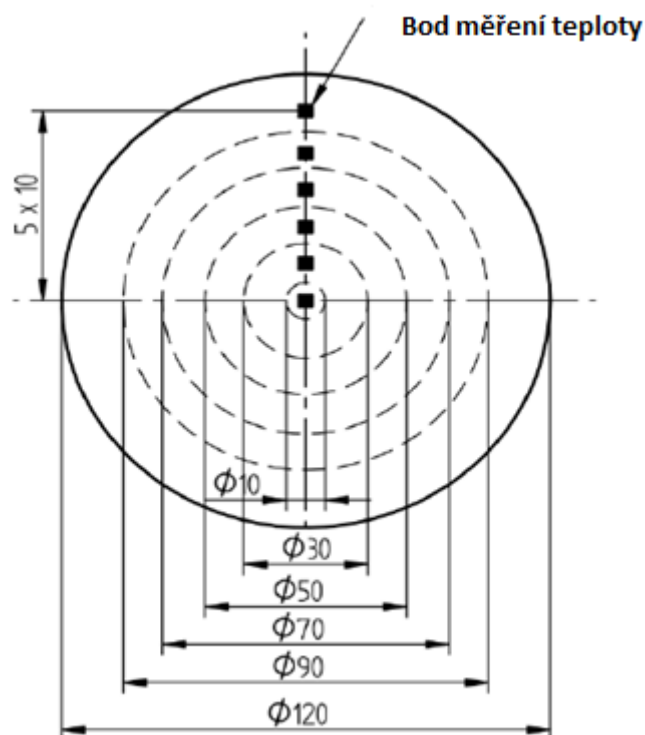
$$\dot{m} = A \cdot u \cdot \rho \quad (11)$$

A je obsah kontrolní průřez (m<sup>2</sup>). Kontrolní průřez byl stanoven na průměr měřicích elementů d = 120 mm, u je rychlost vzduchu (m/s). Anemometr má průměr 100 mm. Pro použití ve vztahu je potřeba výsledky rychlosti přepočítat na průměr 120 mm. ρ je hustota vzduchu (kg/m<sup>3</sup>), která je odečtena z tabulek podle teploty okolního vzduchu.

Abychom proměřili teplotu v celém poli měření, změřili jsme 6 hodnot v různých hladinách prostoru měření. První měření teploty jsme provedli ve středu a dále jsme postupovali po 10 mm krocích směrem od středu. Viz (obr.5.3.1)

Pro určení plošně zprůměrované hodnoty teplotní difference ΔT, jsme teplotu v každé hladině pronásobili obsahem mezikruží oblasti, kde byla daná teplota změřena a všechny hodnoty sečetli. Dále jsme pak celkovou hodnotu podělili celkovým obsahem kruhu. Viz vzorec (13)

$$\Delta T = \frac{\sum_{x=0}^n \Delta T_x \cdot S_x}{S} \quad (12)$$



Obr.5.3.1 Popis měření teploty

## 5.7 Výsledky měření

Vlastnosti okolí a měřené dráhy

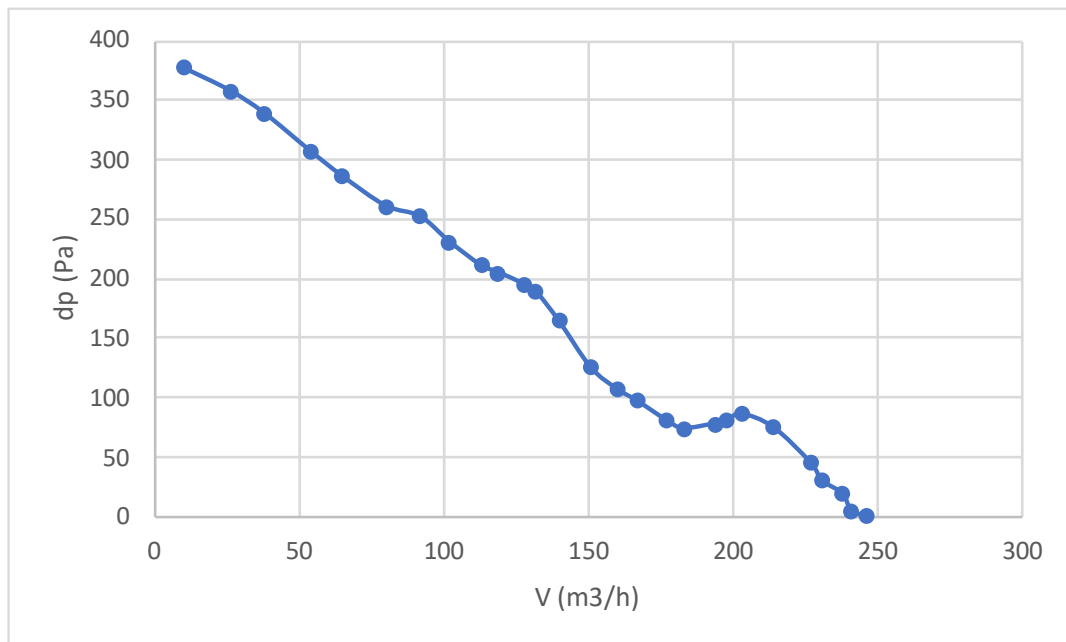
Teplota okolí:  $t = 22\text{ °C}$

Charakteristický rozměr:  $D = 120\text{ mm}$

Tepelná kapacita  $C_p = 1010\text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Hustota vzduchu  $\rho = 1,157\text{ Kg/m}^3$

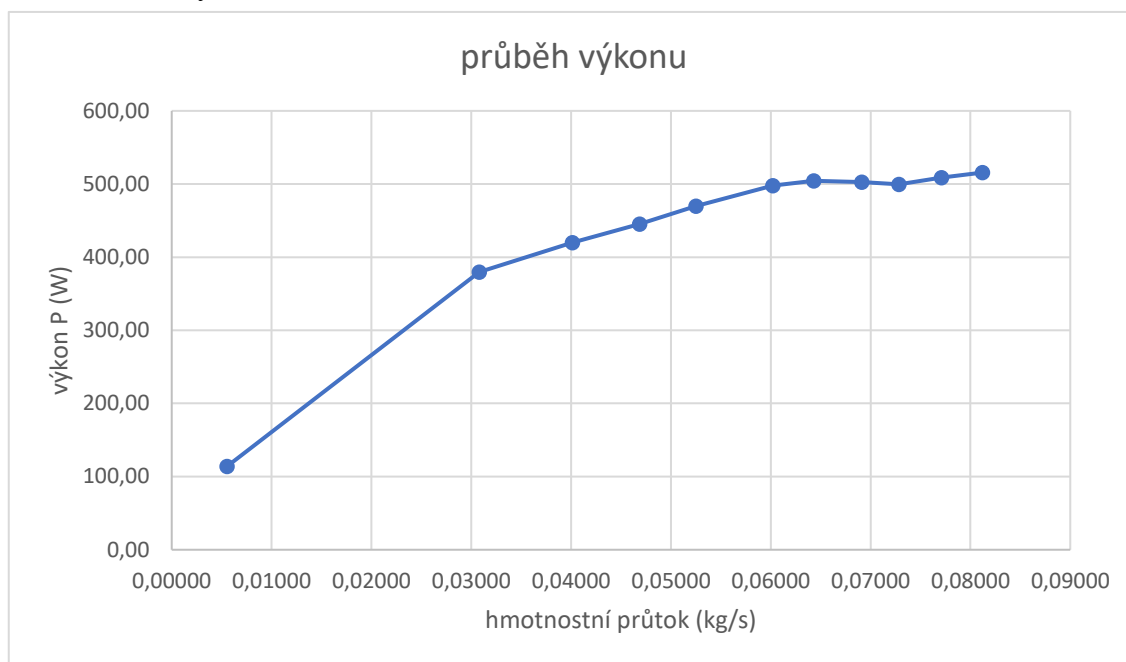
Charakteristika tratě pro nominální napětí 12 V



Graf 5.7.1 charakteristika tratě

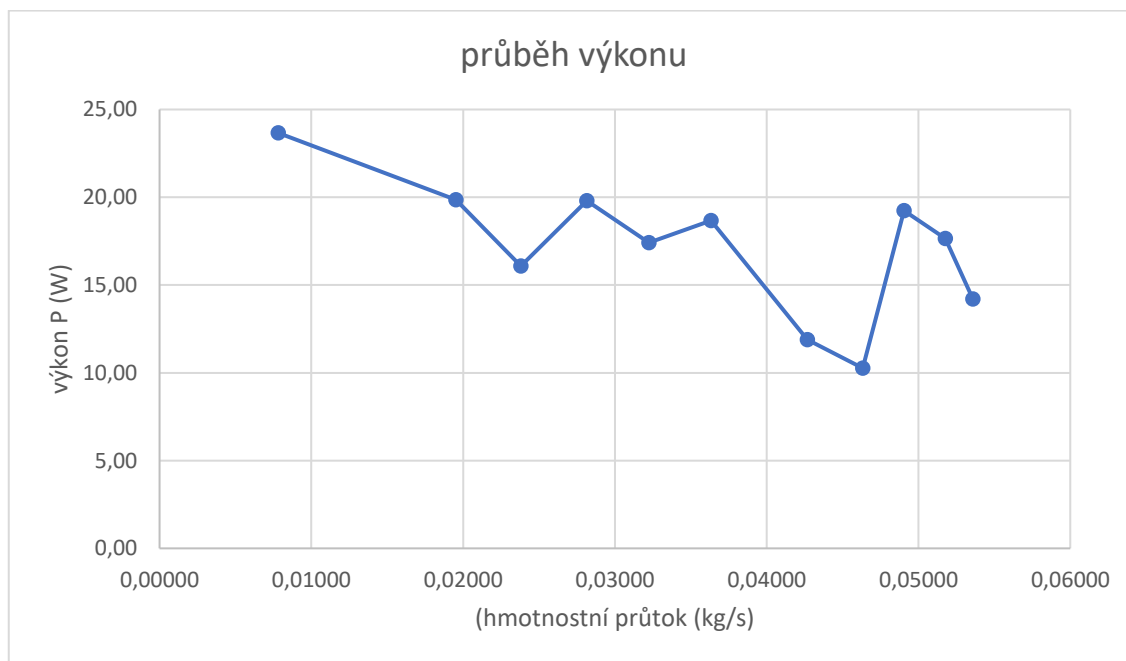


### 1.měření: ref.výměník



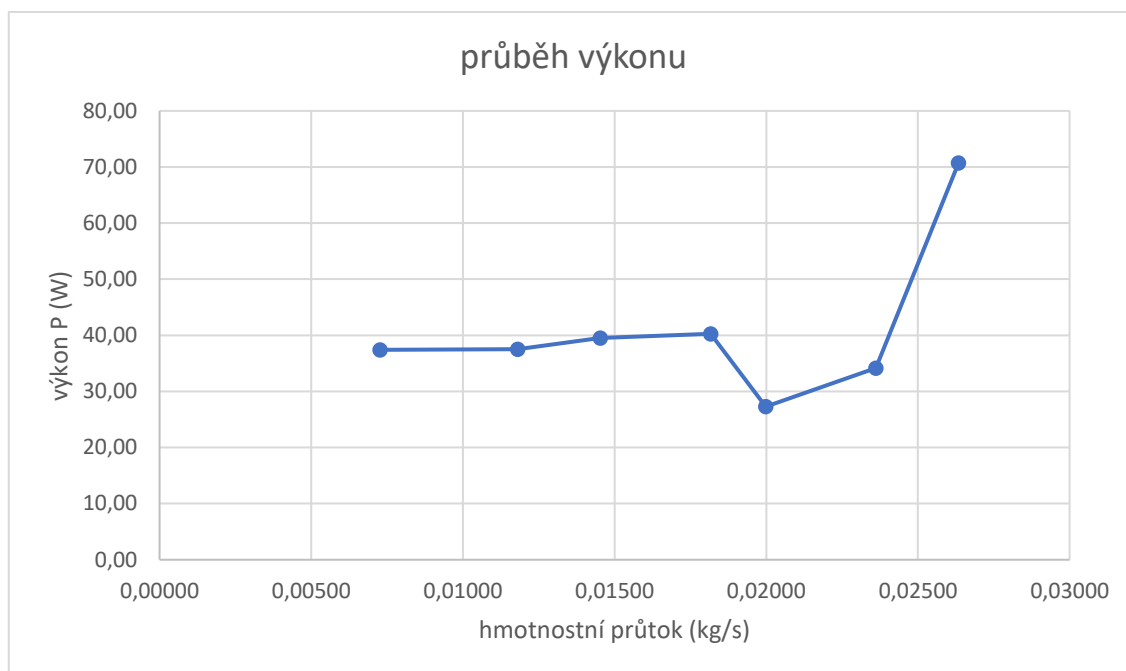
Graf 5.7.2 průběh výkonu referenční výměník

### 2.měření: OP PLA



Graf 5.7.3 průběh výkonu výměník OP PLA

### 3.měření: OP ESD



Graf 5.7.4 Průběh výkonu výměník OP ESD

## 5.8 Diskuse výsledků

V První měření jsme změřili výkon ref. výměníku. Z grafu (5.6.1) můžeme vidět, že ref. výměník dosahuje maximálního výkonu 500 W od hmotnostního průtoku 0,6 kg/s.

V druhém měření jsme měřili výměník OP z materiálu PLA. Při měření jsme narazili na problém netěsnosti výměníku. Konstatovali jsme, že problém netěsnosti výměníku je v technologii FDM 3D tisku. Při kladení vrstev z plastu vznikají mezírky vlivem nerovnoměrného tuhnutí, přes které uniká kapalina. Na grafu (5.6.2) můžeme vidět velké skoky ve výkonech, a dokonce klesání výkonu, což by z teoretického hlediska nemělo být možné. Důsledkem toho byla právě unikající kapalina z výměníku, která ovlivňovala měření teploty.

Ve třetím měření jsme měřili výměník OP z materiálu ESD. V tomto měření nastal stejný problém jako u předchozího měření 2., ale ve větším rozsahu úniku kapaliny. Tato skutečnost znemožnila výměník vůbec doměřit. Větší kapky unikající vody se po cca 5 minutách zachytávali na teploměrech a teploměry pak udávali nesmyslné hodnoty. Kdybychom opomenuli chybovost měření, z grafů můžeme vidět, že změnou materiálu z PLA na materiál ESD se výkon výměníku zvýšil cca trojnásobně.

Z výsledků tohoto měření můžeme konstatovat, že FDM 3D tisk není v tento čas vhodná technologie pro výrobu výměníků tepla voda/vzduch. Avšak při vhodné volbě materiálu, designu a vyřešení problému netěsnosti, by se tato technologie mohla osvědčit.

## 6. Měření rychlostního profilu

### 6.1 Cíl měření

Stanovení rychlostního profilu výměníků na celé ploše a ověřit, jestli model výměník 20 % žeber je z hlediska proudění vzduchu ekvivalentní náhrada výměníku OP.

### 6.2 Popis měření

V tomto měření jsme se zaměřili na měření rychlostního profilu výměníku pomocí Prandlovy sondy. Měření jsme podrobili 4 výměníky. Výměník OP, referenční výměník, organický výměník a výměník 20 % žeber.

### 6.3 Popis měřicí aparatury

Měřicí aparatura se skládá z ventilátoru a Prandlovy sondy. Na ventilátor je nainstalován měřený výměník a nad ním je Prandlova sonda k měření lokální rychlosti vzduchu.

### 6.4 Postup měření

Zapneme ventilátor na nominální výkon 12 V. Nejdříve podrobíme měřením samotnou měřicí aparaturu, abychom měli počáteční rychlostní profil. Poté do měřicí dráhy naistalujeme určený výměník a pomocí Prandlovy sondy měříme lokální rychlost vzduchu procházející výměníkem. Postupujeme od kraje výměníku směrem do středu výměníku po kroku o délce 2,5 mm. Výměníky jsou osově symetrické, proto stačí naměřit jenom půlku průměru. Výsledné hodnoty nám pak vykreslí rychlostní profil daného výměníku.

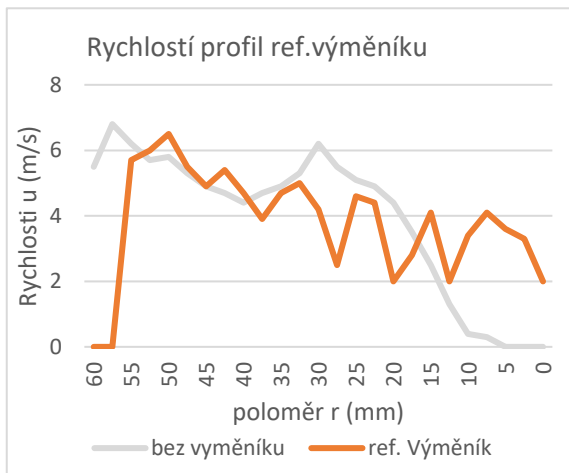
### 6.5 Použité přístroje

- Prandlova sonda
- Ventilátory SUNON o velikosti 120x120x38 mm se jmenovitým napájecím napětím 12 V DC. S rozsahem napětí 4-14 V o nominálním výstupním výkonu 19,2W
- Almemo 2590 stanice. Doplněna o Prandtlovu sondu (0-90 m/s  $\pm$  1 %)

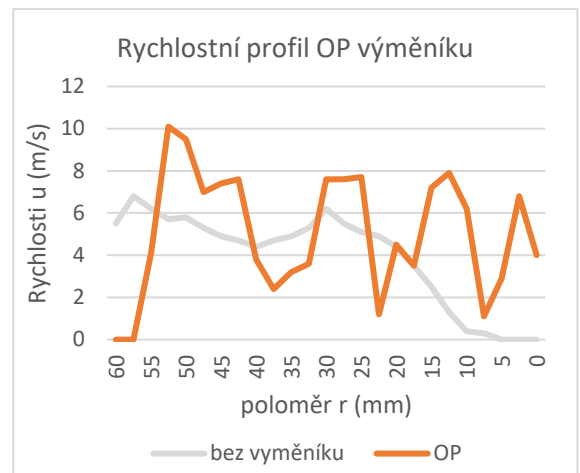
## 6.6 Výsledky měření

Poloměr r (mm)	Rychlosti u (m/s)				
	bez výměníku	ref. Výměník	OP	20 % žebra	Organic
60	5,5	0	0	0,3	0
57,5	6,8	0	0	5,5	2,5
55	6,2	5,7	4,1	8,1	3,6
52,5	5,7	6	10,1	8,7	4,7
50	5,8	6,5	9,5	9,1	3,8
47,5	5,3	5,5	7	6,1	3,9
45	4,9	4,9	7,4	6,6	4,3
42,5	4,7	5,4	7,6	8,5	4
40	4,4	4,7	3,8	9,1	4,2
37,5	4,7	3,9	2,4	8,8	4,5
35	4,9	4,7	3,2	8,6	3,9
32,5	5,3	5	3,6	7,6	4,7
30	6,2	4,2	7,6	5,3	3,9
27,5	5,5	2,5	7,6	6,9	3,8
25	5,1	4,6	7,7	8,2	3,4
22,5	4,9	4,4	1,2	7,7	3,6
20	4,4	2	4,5	6,9	4,7
17,5	3,5	2,8	3,5	5,2	3,9
15	2,5	4,1	7,2	3,9	3,8
12,5	1,3	2	7,9	3,5	5
10	0,4	3,4	6,2	2,9	3,6
7,5	0,3	4,1	1,1	5,4	4,5
5	0	3,6	2,9	5,3	4,3
2,5	0	3,3	6,8	3,8	3,2
0	0	2	4	3	2,1

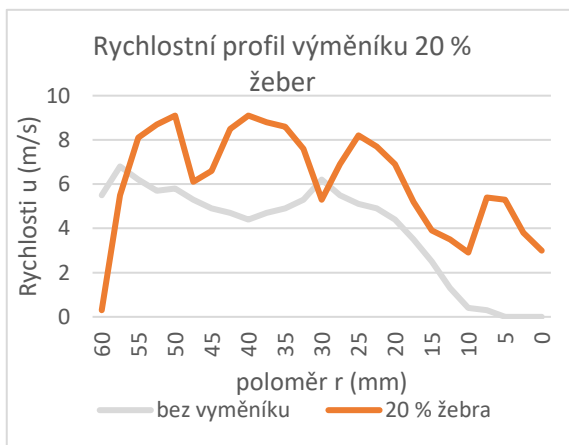
tabulka 6.6.1 Naměřené hodnoty



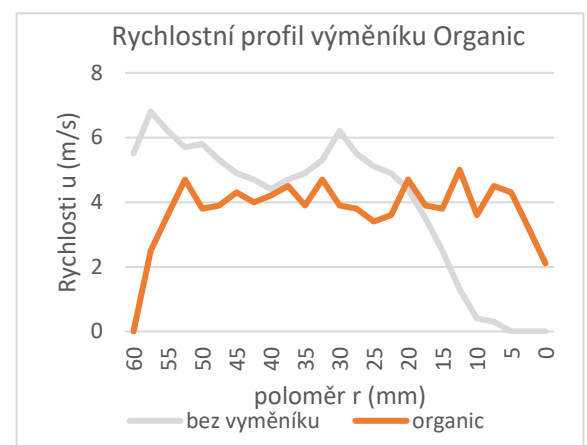
Graf 6.6.1. Rychlostní profil ref. výměníku



Graf 6.6.2. Rychlostní profil OP výměník



Graf 6.6.3. Rychlostní profil výměník 20 %



Graf 6.6.4. Rychlostní profil Výměník Organic

## 6.7 Diskuse výsledků

V prvním měření jsme měřili Ref. výměník. Jeho rychlostí profil je mírně zubatý, což je způsobeno deskami výměníku, na kterých dochází k poklesu rychlosti.

Další měřený výměník byl výměník OP. Na tomto výměníku rychlosti dosahují nejvyšších hodnot. Rychlostí profil je značně nerovnoměrný a dochází zde k velkým poklesům rychlosti. Tyto poklesy způsobuje především žebrování a rozvodné trubky media v konstrukci výměníku, které odpovídají umístěním právě místům poklesů. Podobný rychlostní profil má i výměník 20% žebra, kde rychlostí poklesy odpovídají místům žebří v konstrukci. Z tohoto zjištění se dá konstatovat, že výměník je vhodným modelem výměníku OP a můžeme ho pro účely měření ztrátového součinitele nahradit modelem se žebří.

Jako poslední jsme podrobili měření výměník Organic (design konstrukce vedoucí bakalářské práce Ing. Stanislav Solnař, Ph.D.). Tento výměník vykazuje velice konstantní

průběh rychlostního profilu s rychlostí cca 4 m/s. Z grafu můžeme pozorovat, že rozvádí vzduch velice rovnoměrně do celého svého prostoru. Ostatním výměníku klesá rychlost v místech středu. To je způsobeno konstrukcí ventilátoru, kde prostředek je zaplněn elektromotorem a nepředává tak v těchto místech energii vzduchu. Z těchto kladných výsledku, můžeme konstatovat, že tento typ designu, je v rámci kritérii tohoto měření, potenciálně vhodný pro tvorbu výměníku pomocí technologie 3D tisku.

## 7. Stanovení ztrátového součinitele $\xi$ v závislosti na Reynoldsově čísle

### 7.1 Cíl měření

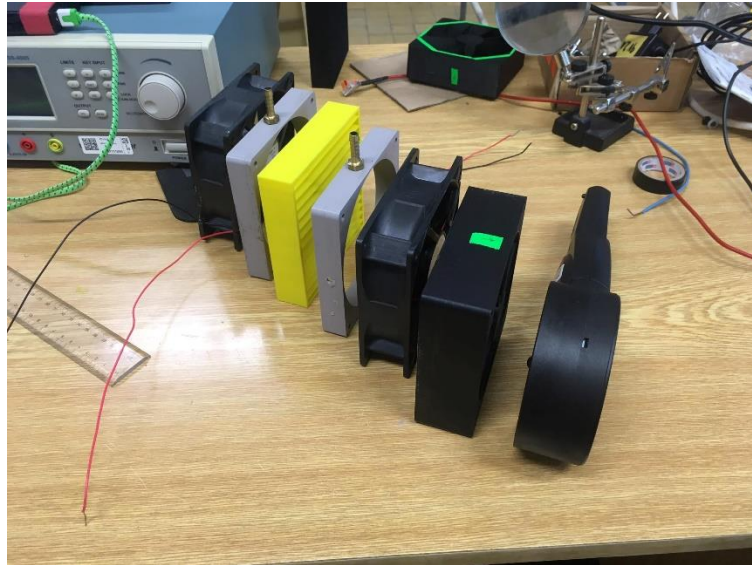
Cílem měření je stanovit ztrátový součinitel našich výměníku a porovnat ho s ekvivalentem výměníku OP s různou hustotou žebrování.

### 7.2 Popis měření

V tomto měření jsme se zaměřili na měření ztrátového součinitele  $\xi$  v závislosti na Reynoldsově čísle. V předchozím měření jsme si potvrdili, že zásadní roli v proudění výměníku OP hrají žebra a jejich procentuální zastoupení v celkovém obsahu výměníku. Proto pro účel měření byli vytvořeny 4 modely výměníku s různou hustotou žebrování. Konkrétně modely s 5% zastoupení žebor z celkového obsahu modelu, 10 %, 20 % a 40 %. Tyto modely budeme dále porovnávat s Ref. výměníkem, výměníkem Solnař a výměníkem Organic.

### 7.3 Popis měřicí dráhy

Měření bylo provedeno na stejné dráze jako v měření výkonu výměníku. Z důvodu neměření teplotní diference, jsme odstranili termočlánky k měření teploty. Dráha se tedy skládá ze dvou ventilátorů, dvou elementů pro měření tlaku a vrtulkového anemometru. Stejně jako v předchozím případě ventilátor vhání vzduch do prostoru dráhy, kde se v první elementu měří tlak před výměníkem. Dále je instalován samotný výměník. Za ním následuje druhý element pro měření tlaku za výměníkem. Za druhým elementem následuje druhý ventilátor a za ním anemometr pro měření rychlosti vzduchu.



Obr.7.3.1 Měřicí dráha

#### 7.4 Postup měření

Do připravené dráhy se osadí příslušný měřený výměník. Po osazení výměníku zvyšujeme postupně krok za krokem napětí na ventilátorech a odečítáme příslušné hodnoty tlakové ztráty a rychlosti vzduchu. Změřené hodnoty nám pak vykreslí graf závislosti ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle.

#### 7.5 Použité přístroje

- Ventilátory SUNON o velikosti 120x120x38 mm se jmenovitým napájecím napětím 12 V DC. S rozsahem napětí 4-14 V o nominálním výstupním výkonu 19,2W
- Almemo 2590 stanice (0-2600Pa a diff.  $\pm 2$  Pa)
- Anemometr Testo 417 (0,3-20 m/s  $\pm 1,5\%$ ) o měřeném průměru 100mm.
- HQ power PSS-4005

#### 7.6 Teoretický základ

Ke stanovení ztrátového součinitele  $\xi$  můžeme dojít pomocí rovnice hydraulické ztráty:

$$e_z = \frac{\Delta p}{\rho} = \xi \frac{u^2}{2} \quad (13)$$

$e_z$  je ztráta měrné mechanické energie disipací,  $\Delta p$  je tlaková diference (Pa),  $\rho$  je měrná hmotnost ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\xi$  je ztrátový součinitel (-) a  $u$  je rychlost média (m/s).

Úpravou rovnice (14) lze vyjádřit ztrátový součinitel  $\xi$ :

$$\xi = \frac{2\Delta p}{u^2 \rho} \quad (14)$$

Po změření tlakové diference, rychlosti vzduchu a stanovení hustoty vzduchu o patřičné teplotě z tabulek, můžeme pomocí vzorce (14) dopočítat ztrátový součinitel  $\xi$ .

Reynoldsovo číslo lze vyjádřit vztahem:

$$Re = \frac{u D}{\nu} \quad (15)$$

Kde  $u$  je rychlost vzduchu (m/s),  $D$  je charakteristický rozměr (m) a  $\nu$  je kinematická viskozita ( $m^2/s$ ).

Kinematická viskozita je podíl dynamické viskozity a hustoty dané látky za určité teploty. Tyto hodnoty se zjišťují experimentálně a dají se odečíst z příslušných tabulek. Charakteristický rozměr  $D$  se volí podle měřeného prostoru.

## 7.7 Výsledky měření

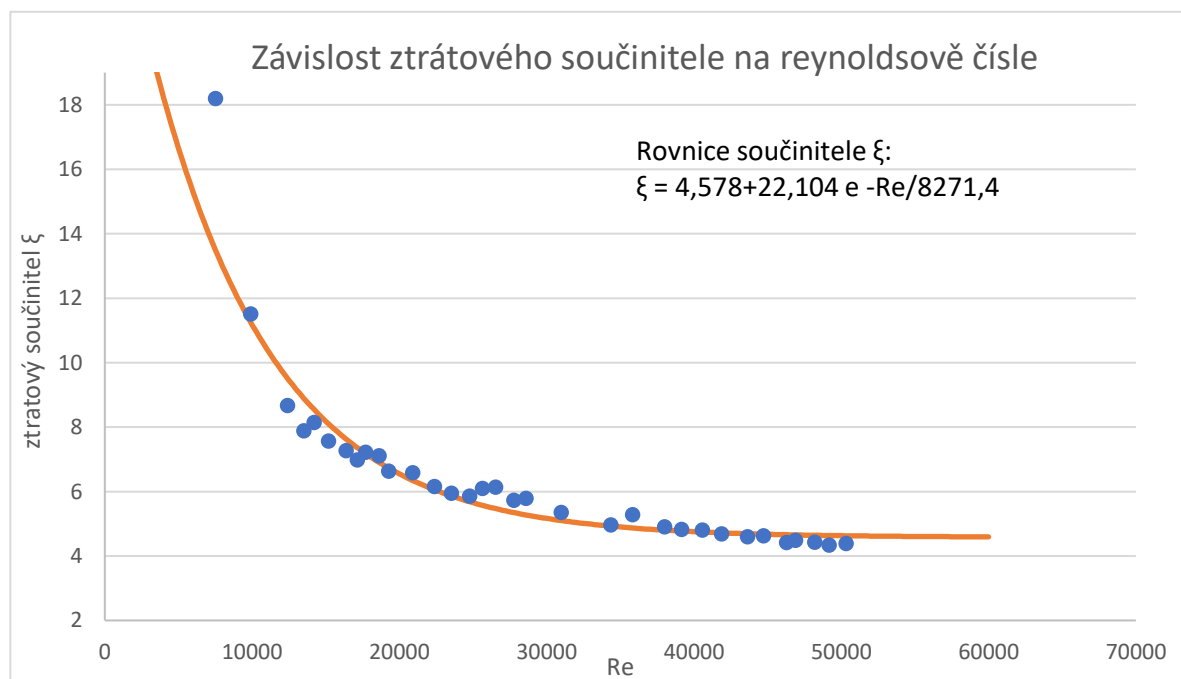
Vlastnosti okolí a měřené dráhy

Teplota okolí:  $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$

Charakteristický rozměr:  $D = 120 \text{ mm}$

Kinematická viskozita:  $\nu = 0,0000153 \text{ m}^2/\text{s}$

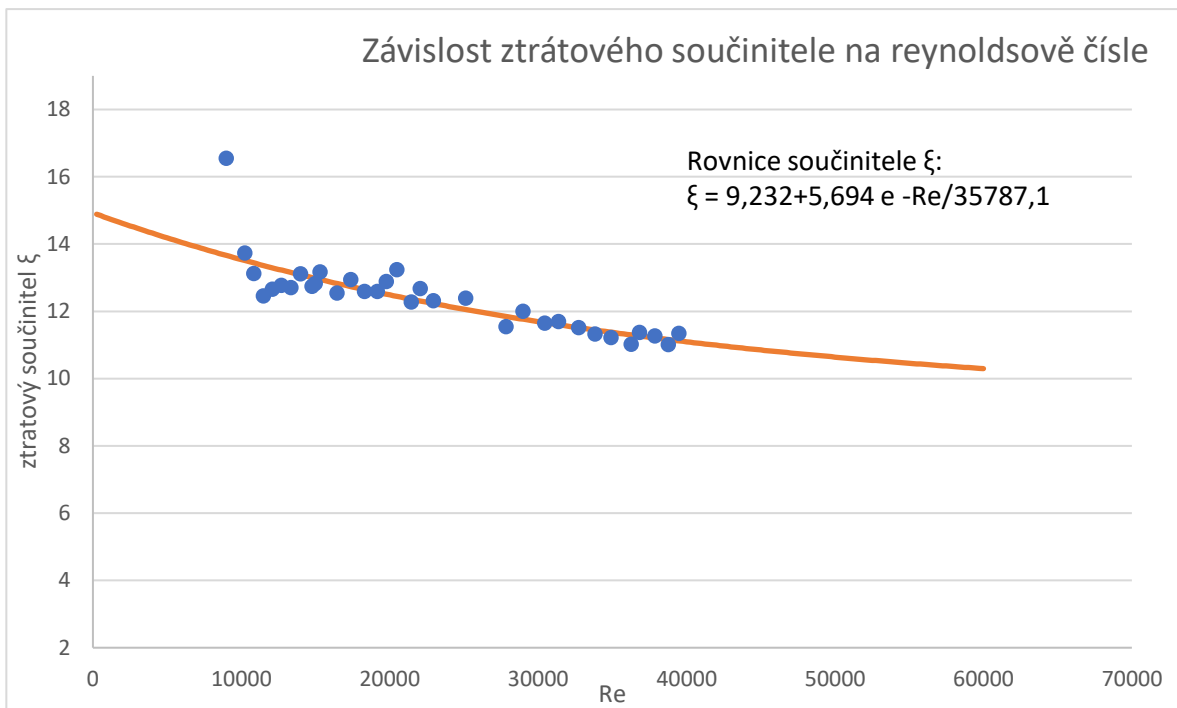
1.Měření: ref. Výměník



7.7.1 Graf měření ztrátového součinitele ref. výměník

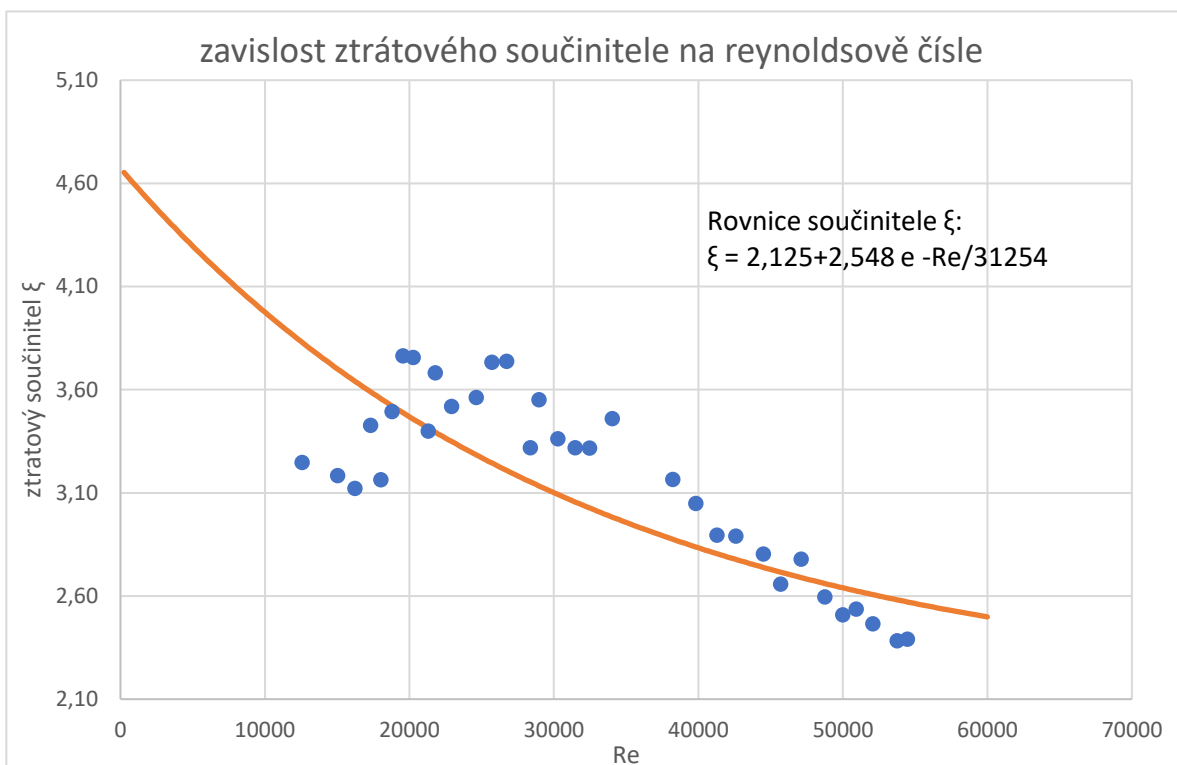


## 2.měření: výměník OP



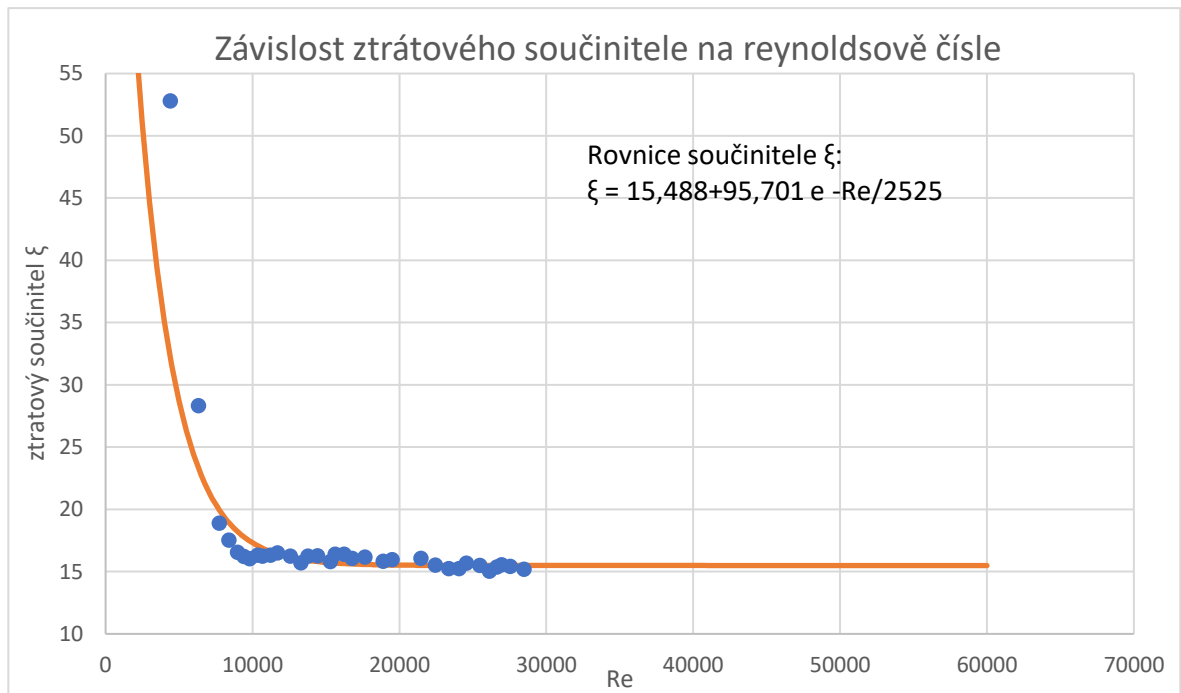
7.7.2 Graf měření ztrátového součinitele výměník OP

## 3.měření: výměník Solnař



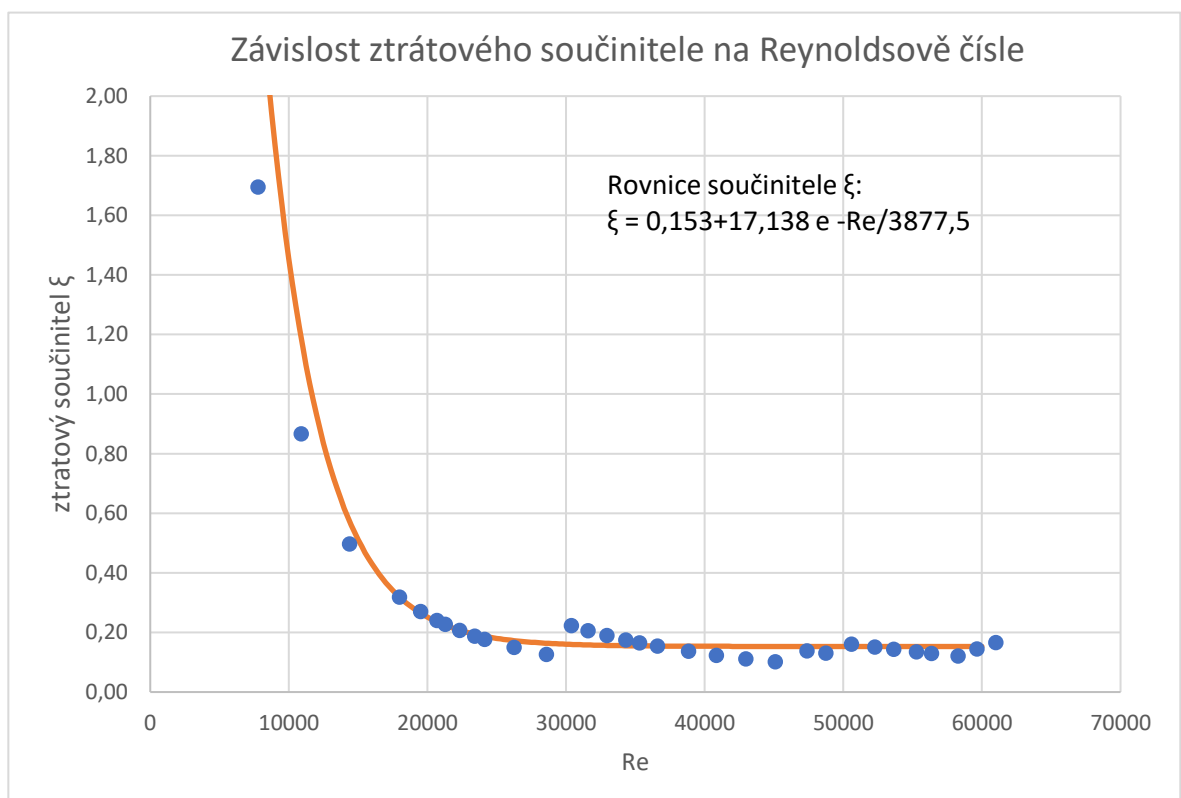
7.7.3 Graf měření ztrátového součinitele výměník Solnař

#### 4.měření: výměník Organic



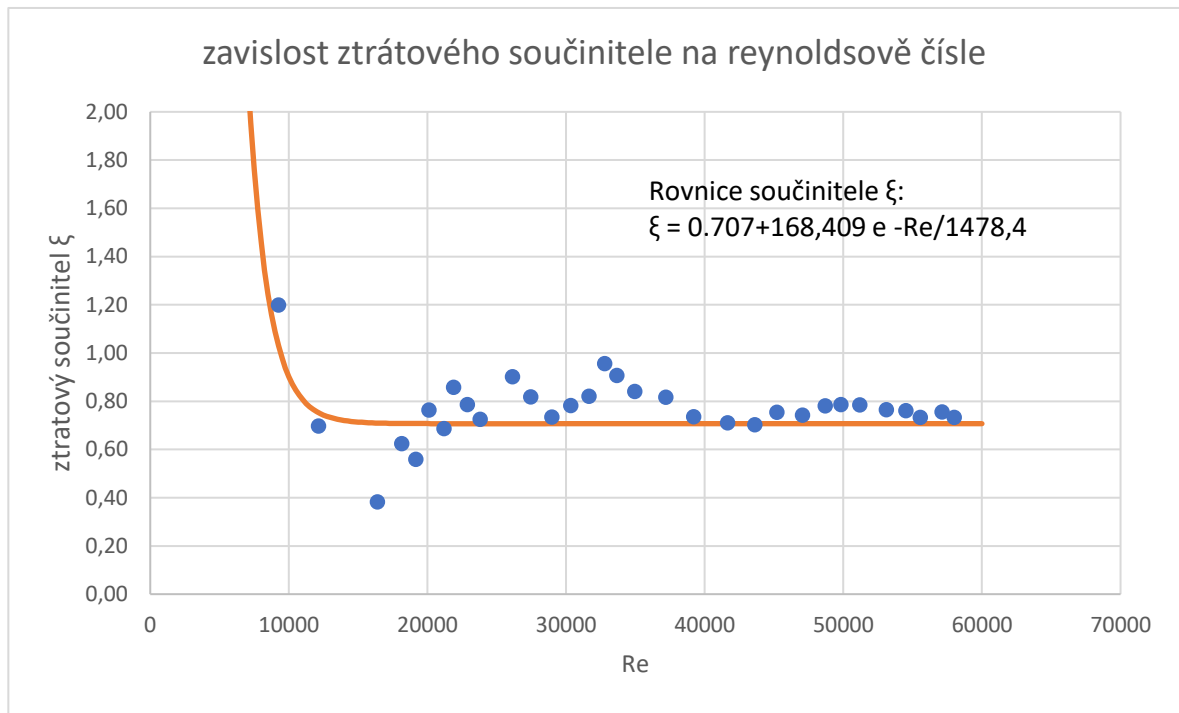
7.7.4 Graf měření ztrátového součinitele výměník Organic

#### 5.měření: 5 % žebra



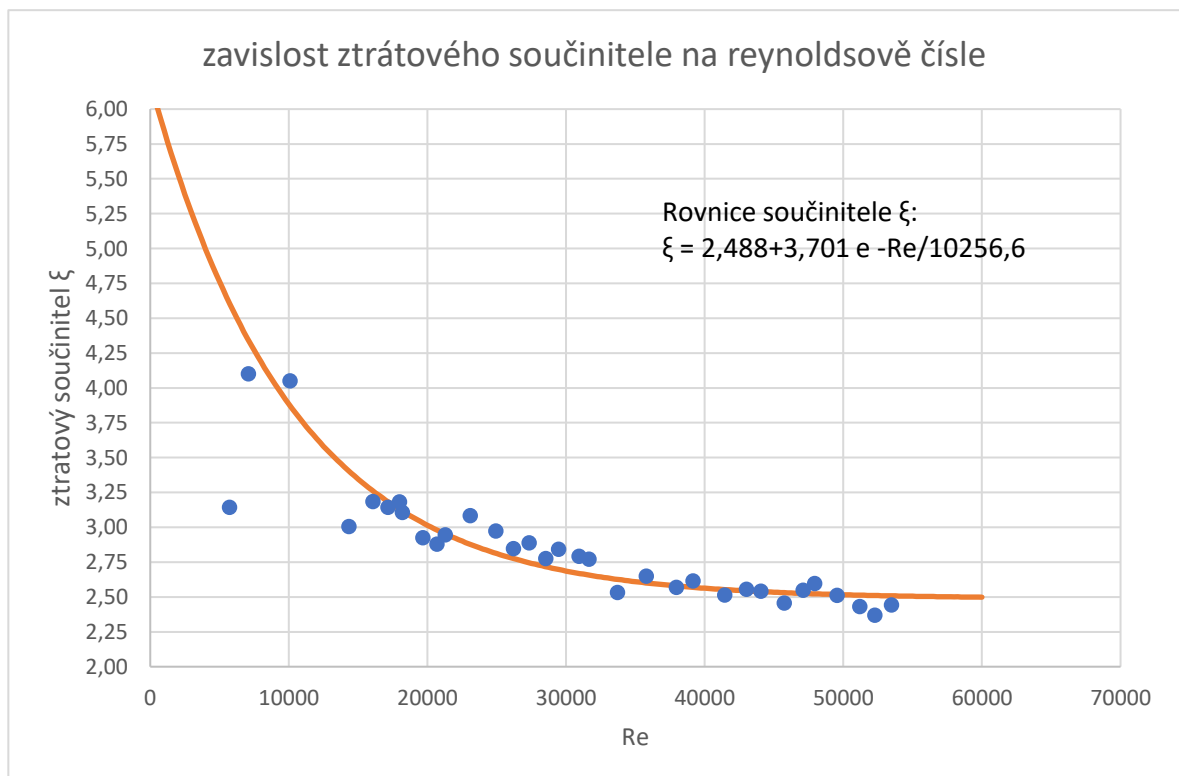
7.7.5 Graf měření ztrátového součinitele 5 % žebra

6.měření: 10 % žebra



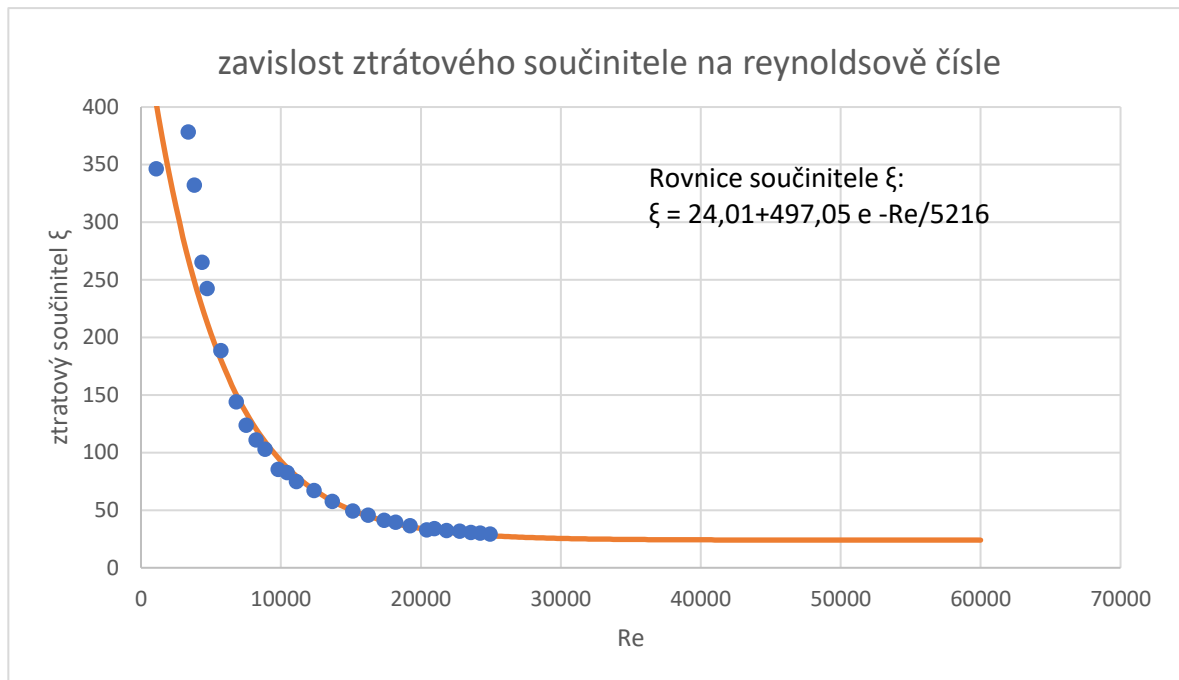
7.7.6 Graf měření ztrátového součinitele 10 % žeber

7.měření: 20 % žebra



7.7.7 Graf měření ztrátového součinitele 20 % žeber

8.měření: 40 % žebra



7.7.8 Graf měření ztrátového součinitele 40 % žeber

## 7.8 Diskuse výsledků.

Z grafu č.1 vidíme rovnoměrný průběh místních a délkových ztrát. Ztrátový součinitel pro nekonečně velké hodnoty Reynoldsova čísla se ustaluje kolem hodnoty 4. Výměník by se dal přirovnat k ekvivalentu cca 25% zastoupení žebrování.

U měření výměníku OP můžeme vidět strmější průběh funkce. To značí, že zde převládají místní ztráty a hodnota ztrátového součinitele se ustaluje u hodnoty 10,3.

U měření výměníku Solnař můžeme vidět strmější průběh funkce, což nám ukazuje na větší zastoupení místních ztrát. Na rozdíl od výměníku OP se nám hodnota ztrátového součinitele ustaluje u hodnoty 2,7. Výměník by se dal přirovnat k ekvivalentu výměníku 20% zastoupení žeber.

Průběh grafu výměníku Organic je velice mírný. To nám ukazuje, že zde převládají délkové ztráty. Tlakové ztráty se velice podobají výměníku OP, avšak průběh grafu je velice odlišný.

## Závěr

Z těchto tří měření nám plyne několik závěrů.

- 3D tisk z plastu se ne úplně hodí k výrobě výměníku tepla s kapalným médiem. Z důvodu netěsnosti kladených vrstev plastu výměníky propouští kapalinu a znemožňují tak použití v praxi. Jistý potenciál v přijatelném výkonu výměníku z materiálu ESD tu je, ale bylo by potřeba vyřešit problém s únikem kapaliny. To by znamenalo zlepšit technologii FDM 3D tisku nebo vymyslet nějakou postprocesingovou technologii, která by pro materiál ESD uzavřela jednotlivé vrstvy.
- 3D tisk nabízí tvorbu mnohem zajímavějších a složitějších struktur viz právě organický výměník. Struktura organického výměníku má podobné tlakové ztráty jako výměník OP, který je inspirován designem komerčních výměníků, avšak jejich rychlostní profily se odlišují. Organický výměník dokáže lépe rozvádět teplo do celého prostoru výměníku a mohl by tím pádem být efektivnější. To nám ukazuje, že pouze změnou designu výměníku, můžeme zásadně ovlivnit výkon výměníku a jeho účinnost. Dále můžeme říct, že výměník s organickou strukturou je velice zajímavý koncept výměníků a obsahuje potenciál k dalšímu výzkumu.
- Technologie FDM 3D tisku je velice levná a dokáže rychle a levně vyrobit model výměníku. To nám umožňuje zkoušet různé designy výměníků a vylepšovat je do nejefektivnějšího designu. Potom by se výsledný výměník dal vyrobit pomocí SLS technologie, která vyřeší problém netěsnosti a malé tepelné vodivosti plastu. V tomto procesu by technologie 3D tisku mohla tedy fungovat jako mezičlánek k navrhnutí optimalizovaného designu levně a rychle a výrazně tak zlevnit finální výrobek.

# Literatura

1. BALÁŠ, MAREK. *Kotle a výměníky tepla*. Brno : Akademické nakladatelství CERM,, 2009.
2. DLOUHÝ, TOMÁŠ. <http://energetika.cvut.cz/>. *Výměníky tepla kotle*. [Online] <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/VTK-pr1-2.pdf>.
3. . [www.qpro.cz](http://www.qpro.cz). *Techika prostředí*. [Online] [Citace: 15. Duben 2022.] <https://www.qpro.cz/ZZT-rekuperace-regenerace..>
4. NOŽIČKA, JIŘÍ. *Mechanika Tekutin*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004.
5. . přírodní stavba. *Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$* . [Online] [Citace: 19. březen 2022.] <https://www.prirodnistavba.cz/popup/soucinitel-tepelne-vodivosti-33e.html>.
6. PCT, redakce. *PCtuning*. [Online] 15. Ledna 2004. [Citace: 2. Únor 2022.] [https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/4081-test\\_chladicu\\_pro\\_socket\\_a-mereni\\_ucinnosti..](https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/4081-test-chladicu_pro_socket_a-mereni_ucinnosti..)
7. STRACH, JAN. *PCtuning*. [Online] 19. 6 2006. [Citace: 18. 11 2020.] <https://pctuning.cz/article/zaklady-pc-chlazení-a-tichy-pocitac#article-header>.
8. ŠULC, TOMÁŠ. *PC Tuning. Teoretický i praktický průvodce vodním chlazením*. [Online] [Citace: 5. Leden 2022.] <https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/27530->.
9. . ventilátory, Sériový radiátor Airplex Evo 240 pro dva 120mm.
10. VÍTEK, JAN. *Vodní chlazení a dnešní nabídka. svět hardvaru*. [Online] [Citace: 14. Březen 2022.] <https://www.svethardware.cz/vodni-chlazení-a-dnesni-nabidka/26311>.
11. MELICHAR, JAN. *Úvod do čerpací techniky*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2012.
12. KŘIVOHLÁVEK, JINDŘICH. *Clazení počítače: kompletní průvodce (nejen) pro hráče*. Brno : Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1509-1.
13. JAN JEŽEK, BLANKA VÁRADIOVÁ, JOSEFADAMEC. *Mechanika tekutin*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000.
14. ŠKORPÍR, JIŘÍ. *VZNIK TLAKOVÉ ZTRÁTY PŘI PROUDĚNÍ TEKUTINY A JEJÍ VÝPOČET*. <https://www.transformacni-technologie.cz/>. [Online] [Citace: 8. květen 2022.] <https://www.transformacni-technologie.cz/38.html>.

15. . Variation of pressure loss coefficient with Reynolds number. *ResearchGate*. [Online] [Citace: 6. Únor 2022.] [https://www.researchgate.net/figure/Variation-of-pressure-loss-coefficient-with-Reynolds-number\\_fig2\\_322857884](https://www.researchgate.net/figure/Variation-of-pressure-loss-coefficient-with-Reynolds-number_fig2_322857884).
16. ŠOB, FRANTIŠEK. *hydromechanika*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002,2008.
17. PIRS. Pctuning. [Online] 19. 10 2005. [Citace: 5. Březen 2022.] <https://pctuning.cz/article/vodni-chlazení-teorie-a-zaklady-stavby?chapter=4#article-header>.
18. SEKERA, PAVEL. Vodní okruh pro chlazení PC. *geek magazín*. [Online] 14. 9 2019. <https://www.czc.cz/geek/vodni-okruh-pro-chlazení-pc-je-to-lehčí-než-se-zdá-1-díl/clanek>.

# Seznam použitých symbolů

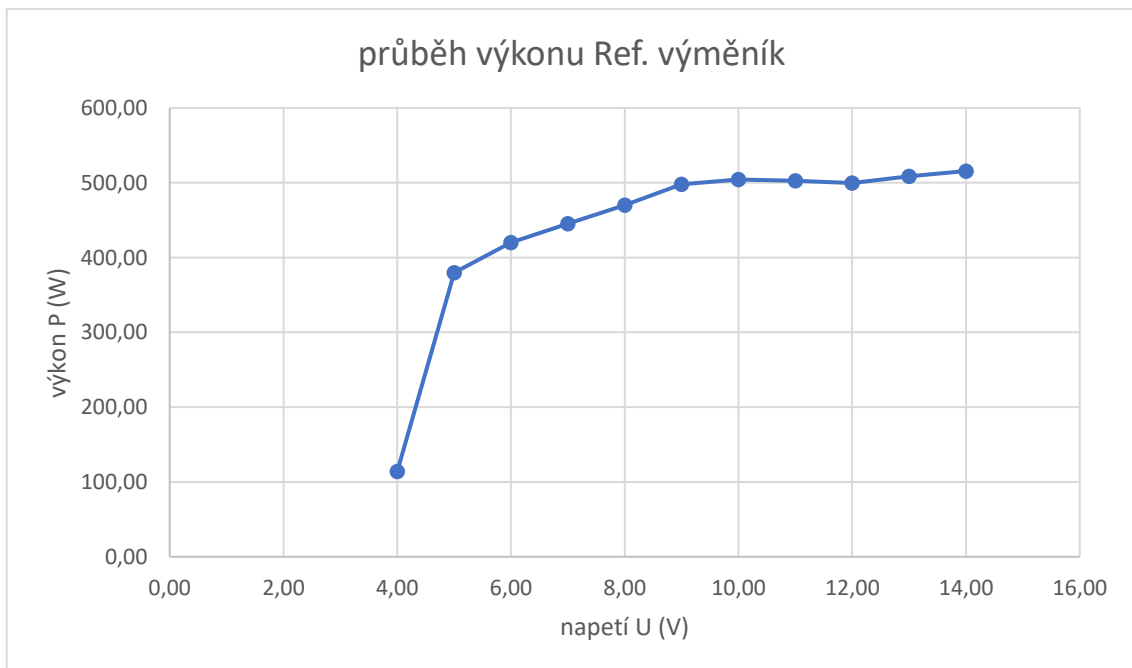
$q$	měrný tepelný tok	$(W \cdot m^{-2})$
$\lambda$	tepelná vodivost	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
$\xi$	ztrátový součinitel	(1)
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
$\delta$	tloušťka stěny	(m)
$T$	absolutní teplota tělesa	(K)
$T_w$	teplota povrchu obtékaného tělesa	(K)
$T_o$	teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu	(K)
$\Delta T$	rozdíl teplot	(°C)
$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$
$e_z$	ztráta měrné mechanické energie	$(J \cdot kg^{-1})$
$\Delta p$	tlaková ztráta	(Pa)
$\rho$	měrná hmotnost	$(kg \cdot m^{-3})$
$u$	střední rychlost proudění	$(m \cdot s^{-1})$
$D$	charakteristický rozměr průtočného profilu	(m)
$\nu$	kinematická viskozita	$(m^2 \cdot s^{-1})$
$\dot{m}$	hmotnostní tok vzduchu	$(kg \cdot s^{-1})$
$A$	obsah kontrolní průřez	$(m^2)$
$l$	délka	(m)
$d$	průměr	(m)
$Q$	průtok	$(m^3 \cdot s^{-1})$
$S$	vnitřní průřez	$(m^2)$
$C_p$	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
$Re_{kr}$	kritická hodnota Reynoldsova čísla	(1)
$Re$	Reynoldsovo číslo	(1)



# Přílohy

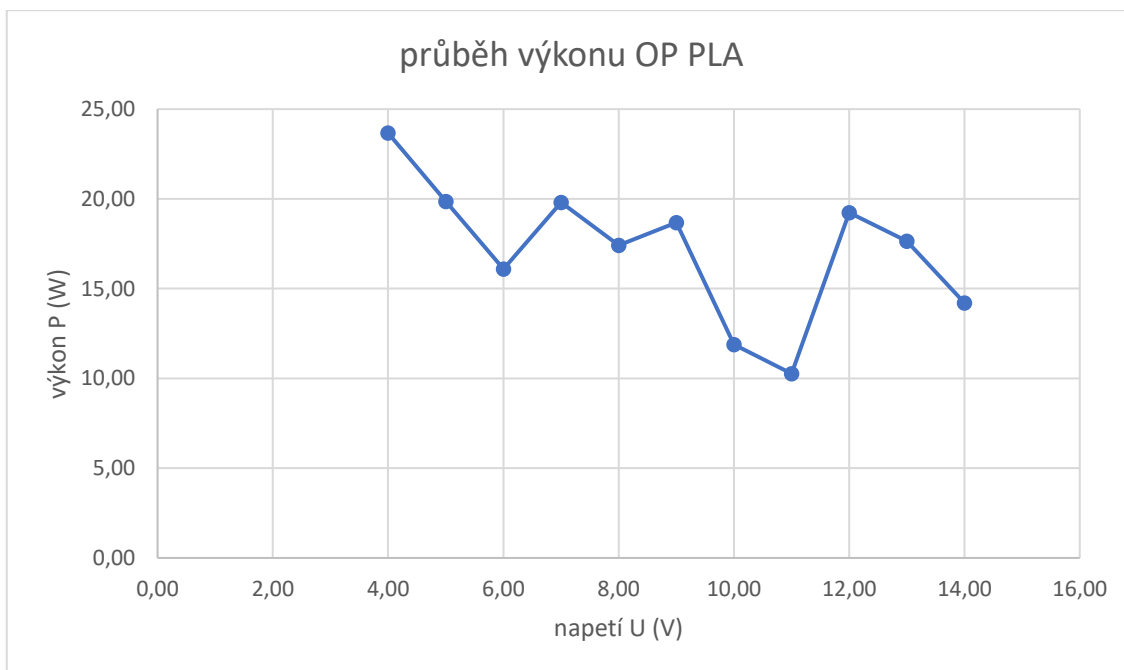
Příloha 1: Měření výkonu referenčního výměníku. Naměřená data a graf

Referenční výměník							
						teplota vzduchu t (°C)	22
						plocha A (m <sup>2</sup> )	0,01130
						tepelná kapacita Cp (J/kg K)	1010
						hustota vzduchu ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1,157
naměřená data							
napětí U (V)	rychlost u d=100 (m/s)	objemový tok (mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u d=120 (m/s)	tlaková ztráta Δp (pa)	m. tok (kg/m <sup>3</sup> )	výkon P (W)	
4,00	0,61	19154,00	0,42	4,00	0,00554	114,01	
5,00	3,39	106446,00	2,35	24,00	0,03079	379,73	
6,00	4,42	138788,00	3,07	34,00	0,04014	420,04	
7,00	5,16	162024,00	3,58	42,00	0,04687	445,30	
8,00	5,78	181492,00	4,01	53,00	0,05250	469,98	
9,00	6,63	208182,00	4,60	64,00	0,06022	497,83	
10,00	7,08	222312,00	4,92	73,00	0,06430	504,42	
11,00	7,61	238954,00	5,28	82,00	0,06912	502,77	
12,00	8,02	251828,00	5,57	91,00	0,07284	499,71	
13,00	8,49	266586,00	5,90	99,00	0,07711	508,61	
14,00	8,94	280716,00	6,21	108,00	0,08120	515,63	
měření teplot							
napětí U (V)	ΔT 1	ΔT 2	ΔT 3	ΔT 4	ΔT 5	ΔT 6	vážená průměrná ΔT
4	20,5	21,10	21,00	20,8	19,9	20,2	20,37
5	13,8	14,40	14,10	13,5	11,3	11,4	12,21
6	12,6	12,10	12,40	11,6	9,4	9,6	10,36
7	11,6	11,30	11,20	10,7	8	8,9	9,41
8	10,9	10,10	10,30	9,8	7	8,9	8,86
9	10,1	9,70	9,60	9	6,4	8,2	8,19
10	9,8	9,60	9,00	8,5	6,8	7,4	7,77
11	9,1	8,80	8,40	8,2	5,4	7,2	7,20
12	8,9	8,00	8,20	7,6	5,1	6,8	6,79
13	8,5	7,70	7,90	7,4	4,9	6,5	6,53
14	8,4	7,90	7,00	7,4	4,8	6,2	6,29



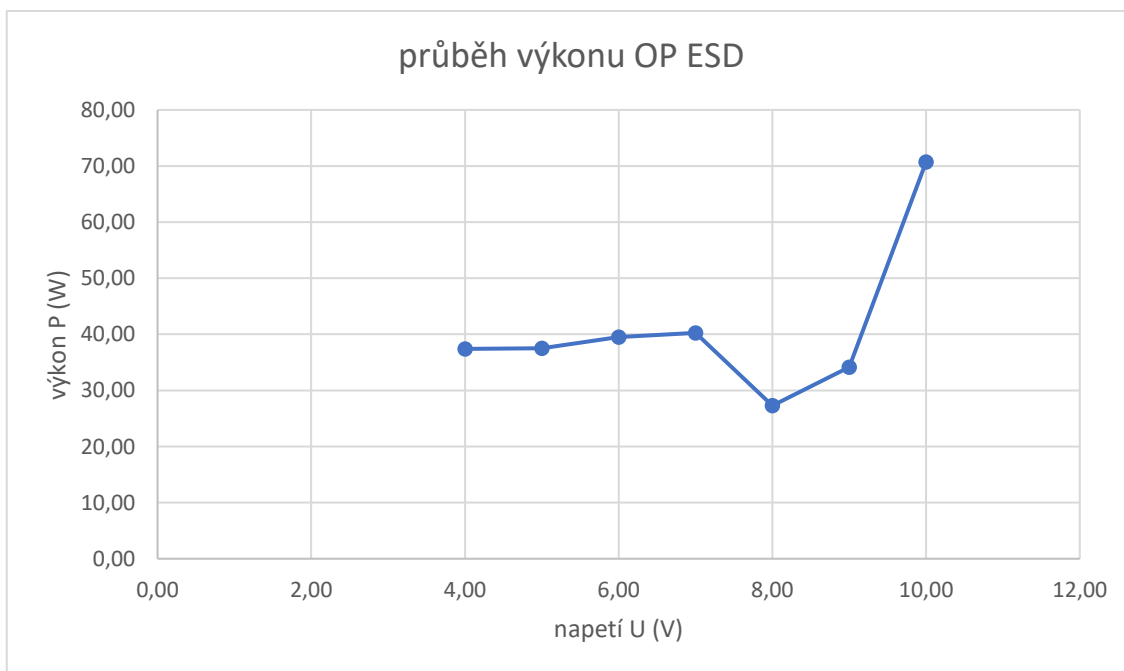
## Příloha 2: Měření výkonu výměníku OP z materiálu PLA. Naměřená data a graf

OP PLA							
						teplota vzduchu $t$ (°C)	22
						plocha $A$ (m <sup>2</sup> )	0,01130
						tepelná kapacita $C_p$ (J/kg K)	1010
						hustota vzduchu $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,157
naměřená data							
napětí $U$ (V)	rychlost $u$ d=100 (m/s)	objemový tok (mm <sup>3</sup> /s)	rychlost $u$ d=120 (m/s)	tlaková ztráta $\Delta p$ (pa)	m. tok (kg/m <sup>3</sup> )	výkon $P$ (W)	
4,00	0,86	27004,00	0,60	5,00	0,00781	23,67	
5,00	2,15	67510,00	1,49	36,00	0,01953	19,86	
6,00	2,62	82268,00	1,82	54,00	0,02380	16,09	
7,00	3,10	97340,00	2,15	73,00	0,02816	19,81	
8,00	3,55	111470,00	2,47	92,00	0,03224	17,41	
9,00	4,00	125600,00	2,78	109,00	0,03633	18,68	
10,00	4,70	147580,00	3,26	117,00	0,04269	11,89	
11,00	5,10	160140,00	3,54	139,00	0,04632	10,27	
12,00	5,40	169560,00	3,75	169,00	0,04905	19,23	
13,00	5,70	178980,00	3,96	186,00	0,05177	17,65	
14,00	5,90	185260,00	4,10	203,00	0,05359	14,21	
měření teplot							
napětí $U$ (V)	$\Delta T$ 1	$\Delta T$ 2	$\Delta T$ 3	$\Delta T$ 4	$\Delta T$ 5	$\Delta T$ 6	vážená průměrná $\Delta T$
4	4	5,70	3,90	4,2	3,7	1,6	3,00
5	1,4	1,70	1,70	1,5	1,3	0,4	1,01
6	1,3	1,40	1,20	1,1	1	0,1	0,67
7	1,3	1,30	1,10	1,1	1	0,2	0,70
8	1,1	1,20	0,80	0,9	0,8	0,1	0,53
9	0,7	0,70	0,80	0,8	0,7	0,2	0,51
10	0,6	0,70	0,60	0,2	0,4	0,1	0,28
11	0,5	0,70	0,30	0,2	0,3	0,1	0,22
12	0,3	0,30	0,40	0,5	0,3	0,4	0,39
13	0,2	0,20	0,10	0,7	0,1	0,4	0,34
14	0,5	0,30	0,20	0,4	0,1	0,3	0,26



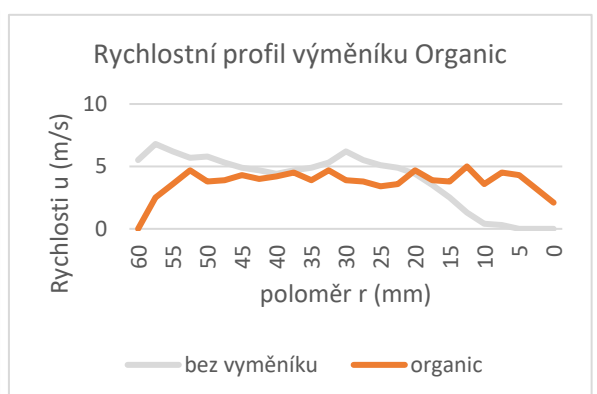
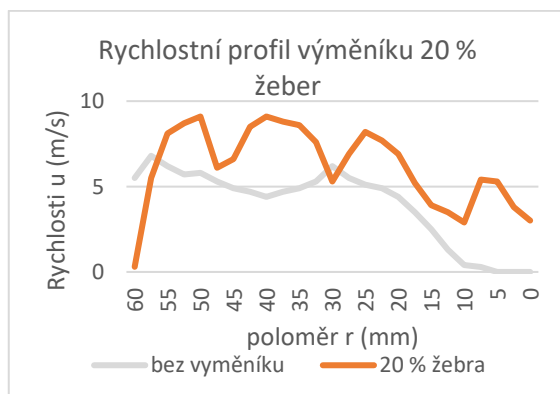
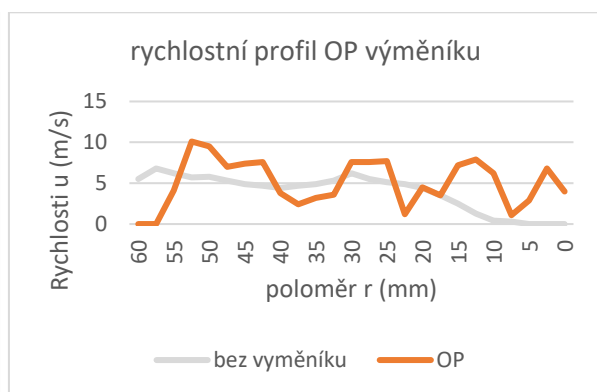
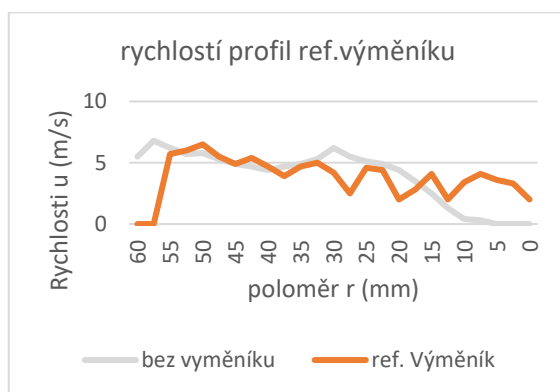
Příloha 3: Měření výkonu výměníku OP z materiálu ESD. Naměřená data a graf

OP ESD							
						teplota vzduchu t (°C)	22
						plocha A (m <sup>2</sup> )	0,01130
naměřená data							
						tepelná kapacita Cp (J/kg K)	1010
						hustota vzduchu ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1,157
napětí U (V)	rychlost u d=100 (m/s)	objemový tok (mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u d=120 (m/s)	tlaková ztráta Δp (pa)	m. tok (kg/m <sup>3</sup> )	výkon P (W)	
4,00	0,80	25120,00	0,56	14,00	0,00727	37,43	
5,00	1,30	40820,00	0,90	32,00	0,01181	37,51	
6,00	1,60	50240,00	1,11	50,00	0,01453	39,50	
7,00	2,00	62800,00	1,39	79,00	0,01816	40,27	
8,00	2,20	69080,00	1,53	97,00	0,01998	27,29	
9,00	2,60	81640,00	1,81	118,00	0,02361	34,15	
10,00	2,90	91060,00	2,01	141,00	0,02634	70,72	
11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	
12,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	
13,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	
14,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	
měření teplot							
napětí U (V)	ΔT 1	ΔT 2	ΔT 3	ΔT 4	ΔT 5	ΔT 6	vážená průměrná ΔT
4	5,40	4,70	5,90	6,90	6,00	3,80	5,10
5	3,10	4,00	4,30	4,50	3,40	2,10	3,15
6	2,80	3,40	4,00	3,90	2,90	1,70	2,69
7	1,70	2,20	2,60	3,10	2,50	1,60	2,20
8	1,30	2,30	2,50	2,70	1,80	0,20	1,35
9	1,50	0,50	0,10	0,40	1,00	2,50	1,43
10	1,20	1,50	1,60	0,50	2,50	4,00	2,66
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



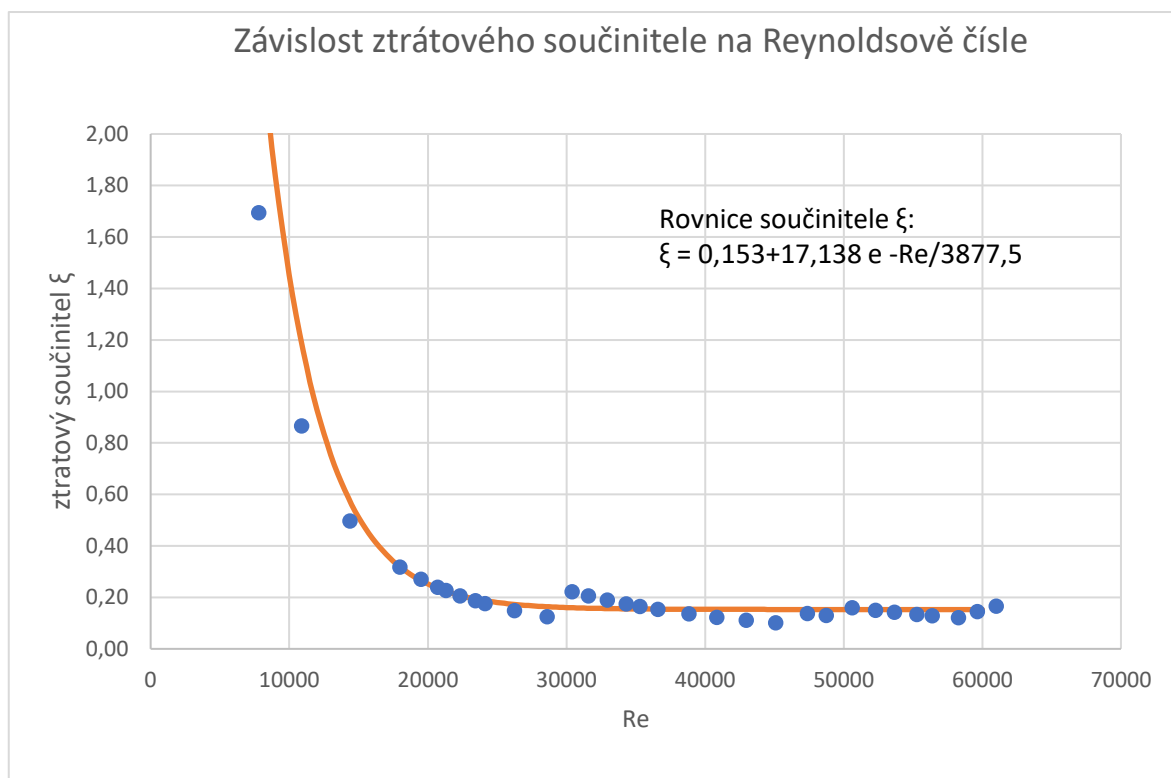
Příloha 4: Rychlostní profily výměníku. Naměřená data a grafy.

u= 12 (v)					
poloměr r (mm)	Rychlosti u (m/s)				
	bez výměníku	ref. Výměník	OP 1	20 % žebra	organic
60	5,5	0	0	0,3	0
57,5	6,8	0	0	5,5	2,5
55	6,2	5,7	4,1	8,1	3,6
52,5	5,7	6	10,1	8,7	4,7
50	5,8	6,5	9,5	9,1	3,8
47,5	5,3	5,5	7	6,1	3,9
45	4,9	4,9	7,4	6,6	4,3
42,5	4,7	5,4	7,6	8,5	4
40	4,4	4,7	3,8	9,1	4,2
37,5	4,7	3,9	2,4	8,8	4,5
35	4,9	4,7	3,2	8,6	3,9
32,5	5,3	5	3,6	7,6	4,7
30	6,2	4,2	7,6	5,3	3,9
27,5	5,5	2,5	7,6	6,9	3,8
25	5,1	4,6	7,7	8,2	3,4
22,5	4,9	4,4	1,2	7,7	3,6
20	4,4	2	4,5	6,9	4,7
17,5	3,5	2,8	3,5	5,2	3,9
15	2,5	4,1	7,2	3,9	3,8
12,5	1,3	2	7,9	3,5	5
10	0,4	3,4	6,2	2,9	3,6
7,5	0,3	4,1	1,1	5,4	4,5
5	0	3,6	2,9	5,3	4,3
2,5	0	3,3	6,8	3,8	3,2
0	0	2	4	3	2,1



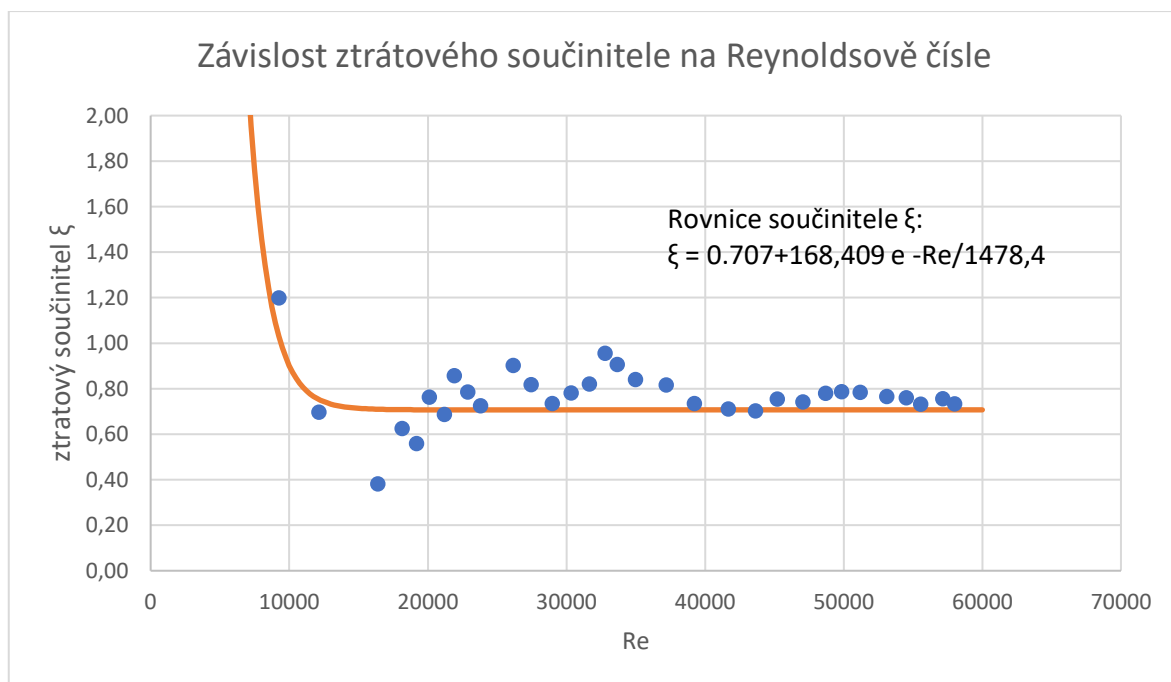
Příloha 5: Měření ztrátového součinitele OP 5 %. Naměřená data a graf.

výměník OP 5%							teplota vzduchu (°C)	22,3
naměřená data							kinematická viskozita	0,0000153
							char. rozměr d m	0,12
							hustota kg/m <sup>3</sup>	1,197
napětí U (V)	rychlost u 100 (m/s)	objemový tok (mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u 120 (m/s)	tlaková ztráta Δp	setrvačné síly ξ	reynolds		
4	0,81	25434,00	0,56	1	5,28	4411,76		
4,1	1,43	44902,00	0,99	1	1,69	7788,67		
4,2	2	62800,00	1,39	1	0,87	10893,25		
4,3	2,64	82896,00	1,83	1	0,50	14379,08		
4,4	3,3	103620,00	2,29	1	0,32	17973,86		
4,5	3,58	112412,00	2,49	1	0,27	19498,91		
4,6	3,8	119320,00	2,64	1	0,24	20697,17		
4,7	3,91	122774,00	2,72	1	0,23	21296,30		
4,8	4,1	128740,00	2,85	1	0,21	22331,15		
4,9	4,3	135020,00	2,99	1	0,19	23420,48		
5	4,43	139102,00	3,08	1	0,18	24128,54		
5,25	4,82	151348,00	3,35	1	0,15	26252,72		
5,5	5,25	164850,00	3,65	1	0,13	28594,77		
5,75	5,58	175212,00	3,88	2	0,22	30392,16		
6	5,8	182120,00	4,03	2	0,21	31590,41		
6,25	6,05	189970,00	4,20	2	0,19	32952,07		
6,5	6,3	197820,00	4,38	2	0,17	34313,73		
6,75	6,48	203472,00	4,50	2	0,17	35294,12		
7	6,72	211008,00	4,67	2	0,15	36601,31		
7,5	7,13	223882,00	4,95	2	0,14	38834,42		
8	7,5	235500,00	5,21	2	0,12	40849,67		
8,5	7,89	247746,00	5,48	2	0,11	42973,86		
9	8,28	259992,00	5,75	2	0,10	45098,04		
9,5	8,7	273180,00	6,04	3	0,14	47385,62		
10	8,95	281030,00	6,22	3	0,13	48747,28		
10,5	9,29	291706,00	6,45	4	0,16	50599,13		
11	9,6	301440,00	6,67	4	0,15	52287,58		
11,5	9,85	309290,00	6,84	4	0,14	53649,24		
12	10,15	318710,00	7,05	4	0,13	55283,22		
12,5	10,35	324990,00	7,19	4	0,13	56372,55		
13	10,7	335980,00	7,43	4	0,12	58278,87		
13,5	10,95	343830,00	7,60	5	0,14	59640,52		
14	11,2	351680,00	7,78	6	0,17	61002,18		



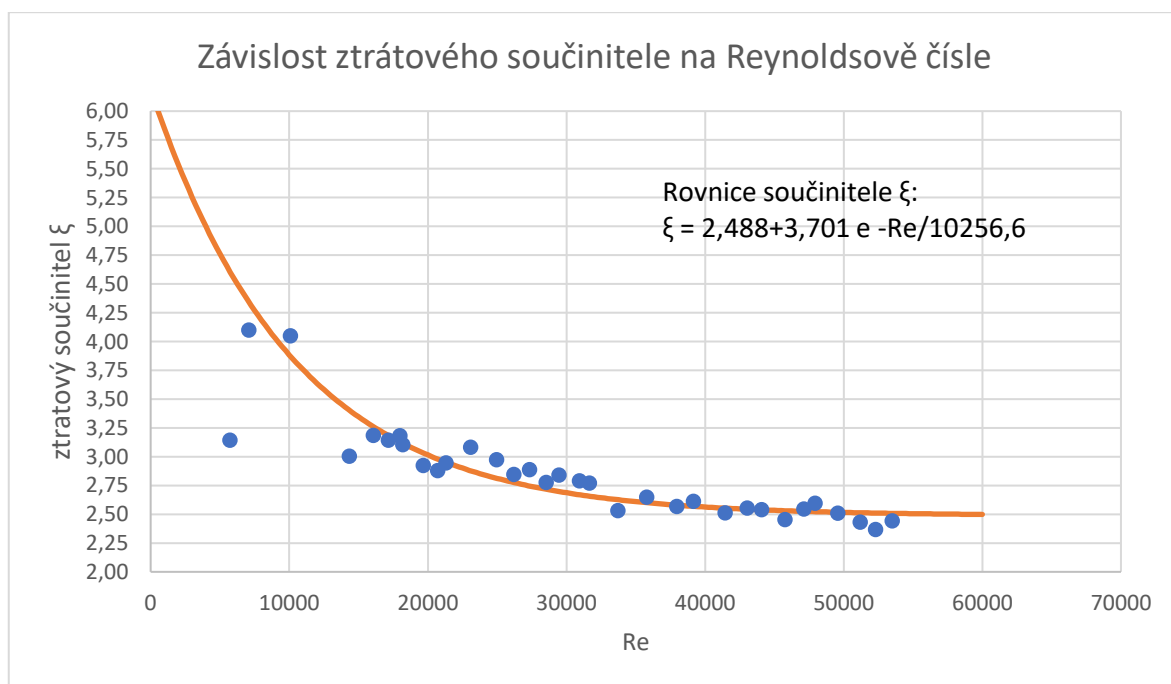
Příloha 6: Měření ztrátového součinitele OP 10 %. Naměřená data a graf.

výměník OP 10% červený							teplota vzduchu (°C)	22,3
naměřená data							kinematická viskozita	0,0000153
							char. rozměr d m	0,12
							hustota kg/m <sup>3</sup>	1,197
napětí U (V)	rychlost u 100 (m/s)	objemový tok(mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u 120 (m/s)	tlaková ztráta Δp	setrvačné síly ξ	reynolds		
4	1,29	40506,00	0,90	1	2,08	7026,14		
4,1	1,7	53380,00	1,18	1	1,20	9259,26		
4,2	2,23	70022,00	1,55	1	0,70	12145,97		
4,3	3,01	94514,00	2,09	1	0,38	16394,34		
4,4	3,33	104562,00	2,31	2	0,62	18137,25		
4,5	3,52	110528,00	2,44	2	0,56	19172,11		
4,6	3,69	115866,00	2,56	3	0,76	20098,04		
4,7	3,89	122146,00	2,70	3	0,69	21187,36		
4,8	4,02	126228,00	2,79	4	0,86	21895,42		
4,9	4,2	131880,00	2,92	4	0,79	22875,82		
5	4,37	137218,00	3,03	4	0,73	23801,74		
5,25	4,8	150720,00	3,33	6	0,90	26143,79		
5,5	5,04	158256,00	3,50	6	0,82	27450,98		
5,75	5,32	167048,00	3,69	6	0,73	28976,03		
6	5,57	174898,00	3,87	7	0,78	30337,69		
6,25	5,81	182434,00	4,03	8	0,82	31644,88		
6,5	6,02	189028,00	4,18	10	0,96	32788,67		
6,75	6,18	194052,00	4,29	10	0,91	33660,13		
7	6,42	201588,00	4,46	10	0,84	34967,32		
7,5	6,83	214462,00	4,74	11	0,82	37200,44		
8	7,2	226080,00	5,00	11	0,74	39215,69		
8,5	7,65	240210,00	5,31	12	0,71	41666,67		
9	8,01	251514,00	5,56	13	0,70	43627,45		
9,5	8,3	260620,00	5,76	15	0,75	45206,97		
10	8,64	271296,00	6,00	16	0,74	47058,82		
10,5	8,94	280716,00	6,21	18	0,78	48692,81		
11	9,15	287310,00	6,35	19	0,79	49836,60		
11,5	9,4	295160,00	6,53	20	0,78	51198,26		
12	9,75	306150,00	6,77	21	0,77	53104,58		
12,5	10,01	314314,00	6,95	22	0,76	54520,70		
13	10,2	320280,00	7,08	22	0,73	55555,56		
13,5	10,49	329386,00	7,28	24	0,76	57135,08		
14	10,65	334410,00	7,40	24	0,73	58006,54		



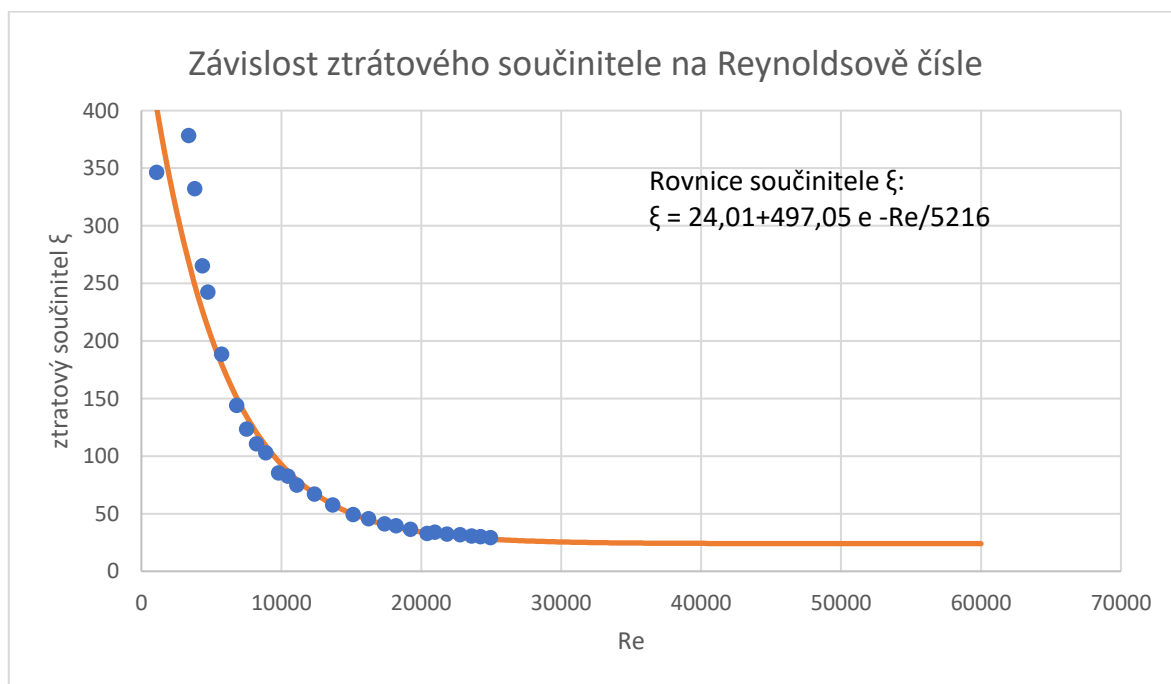
Příloha 7: Měření ztrátového součinitele OP 20 %. Naměřená data a graf.

výměník OP 20% černý								
naměřená data							teplota vzduchu (°C)	22,3
							kinematická viskozita	0,0000153
							char. rozměr d m	0,12
							hustota kg/m3	1,197
napětí U (V)	rychlost u 100 (m/s)	objemový tok(mm3/s)	rychlost u 120 (m/s)	tlaková ztráta Δp	setrvačné síly ξ	reynolds		
4	1,05	32970,00	0,73	1	3,14	5718,95		
4,1	1,3	40820,00	0,90	2	4,10	7080,61		
4,2	1,85	58090,00	1,28	4	4,05	10076,25		
4,3	2,63	82582,00	1,83	6	3,01	14324,62		
4,4	2,95	92630,00	2,05	8	3,18	16067,54		
4,5	3,15	98910,00	2,19	9	3,14	17156,86		
4,6	3,34	104876,00	2,32	10	3,11	18191,72		
4,7	3,3	103620,00	2,29	10	3,18	17973,86		
4,8	3,61	113354,00	2,51	11	2,92	19662,31		
4,9	3,8	119320,00	2,64	12	2,88	20697,17		
5	3,91	122774,00	2,72	13	2,95	21296,30		
5,25	4,24	133136,00	2,94	16	3,08	23093,68		
5,5	4,58	143812,00	3,18	18	2,97	24945,53		
5,75	4,81	151034,00	3,34	19	2,85	26198,26		
6	5,02	157628,00	3,49	21	2,89	27342,05		
6,25	5,24	164536,00	3,64	22	2,78	28540,31		
6,5	5,41	169874,00	3,76	24	2,84	29466,23		
6,75	5,68	178352,00	3,94	26	2,79	30936,82		
7	5,81	182434,00	4,03	27	2,77	31644,88		
7,5	6,19	194366,00	4,30	28	2,53	33714,60		
8	6,57	206298,00	4,56	33	2,65	35784,31		
8,5	6,97	218858,00	4,84	36	2,57	37962,96		
9	7,19	225766,00	4,99	39	2,61	39161,22		
9,5	7,61	238954,00	5,28	42	2,51	41448,80		
10	7,9	248060,00	5,49	46	2,55	43028,32		
10,5	8,09	254026,00	5,62	48	2,54	44063,18		
11	8,4	263760,00	5,83	50	2,46	45751,63		
11,5	8,65	271610,00	6,01	55	2,55	47113,29		
12	8,8	276320,00	6,11	58	2,59	47930,28		
12,5	9,1	285740,00	6,32	60	2,51	49564,27		
13	9,4	295160,00	6,53	62	2,43	51198,26		
13,5	9,6	301440,00	6,67	63	2,37	52287,58		
14	9,82	308348,00	6,82	68	2,44	53485,84		



Příloha 8: Měření ztrátového součinitele OP 40 %. Naměřená data a graf.

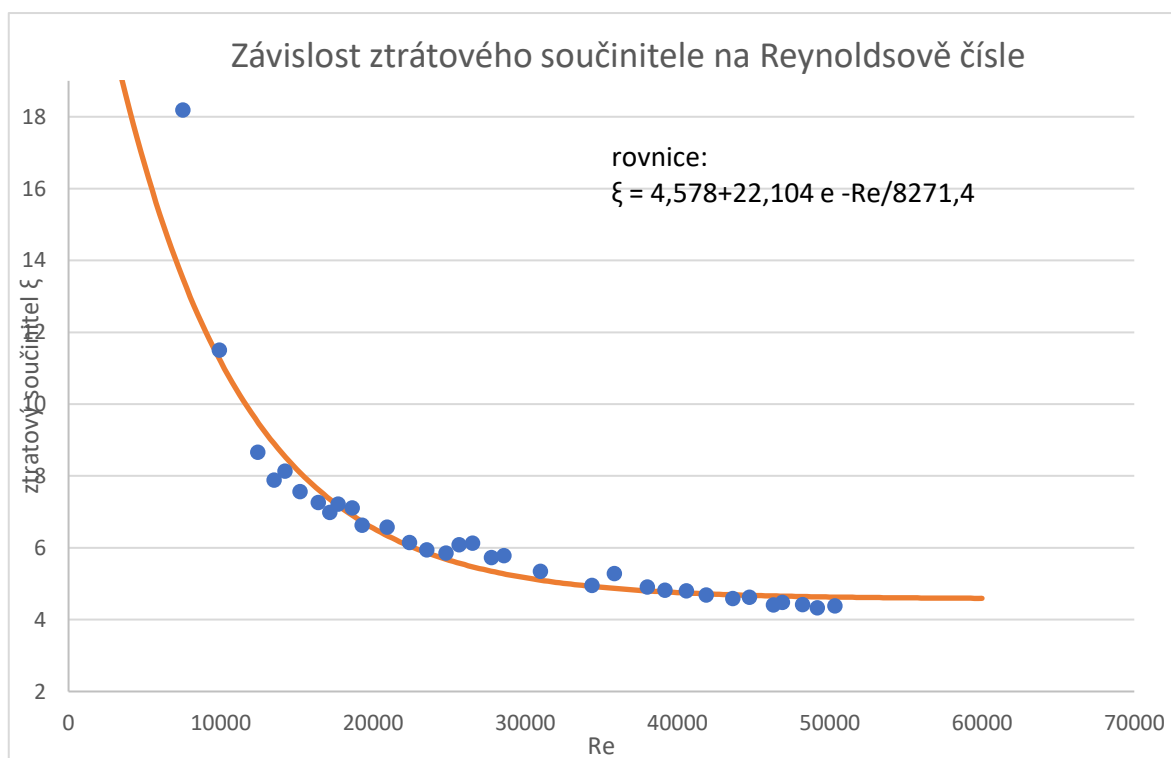
výměník OP 40% černý							
naměřená data						teplota vzduchu (°C)	22,3
						kinematická viskozita	0,0000153
						char. rozměr d m	0,12
						hustota kg/m <sup>3</sup>	1,197
napětí U (V)	rychlost u 100 (m/s)	objemový tok(mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u 120 (m/s)	tlaková ztráta Δp	setrvačné síly ξ	reynolds	
4	0,2	6280,00	0,14	4,00	346,47	1089,32	
4,1	0,3	9420,00	0,21	12,00	461,95	1633,99	
4,2	0,3	9420,00	0,21	20,00	769,92	1633,99	
4,3	0,31	9734,00	0,22	30,00	1081,58	1688,45	
4,4	0,34	10676,00	0,24	35,00	1048,99	1851,85	
4,5	0,48	15072,00	0,33	38,00	571,43	2614,38	
4,6	0,57	17898,00	0,40	40,00	426,55	3104,58	
4,7	0,62	19468,00	0,43	42,00	378,55	3376,91	
4,8	0,7	21980,00	0,49	47,00	332,32	3812,64	
4,9	0,8	25120,00	0,56	49,00	265,26	4357,30	
5	0,87	27318,00	0,60	53,00	242,60	4738,56	
5,25	1,05	32970,00	0,73	60,00	188,55	5718,95	
5,5	1,25	39250,00	0,87	65,00	144,13	6808,28	
5,75	1,38	43332,00	0,96	68,00	123,71	7516,34	
6	1,51	47414,00	1,05	73,00	110,93	8224,40	
6,25	1,63	51182,00	1,13	79,00	103,02	8878,00	
6,5	1,8	56520,00	1,25	80,00	85,55	9803,92	
6,75	1,92	60288,00	1,33	88,00	82,71	10457,52	
7	2,04	64056,00	1,42	90,00	74,93	11111,11	
7,5	2,27	71278,00	1,58	100,00	67,24	12363,83	
8	2,51	78814,00	1,74	105,00	57,74	13671,02	
8,5	2,78	87292,00	1,93	110,00	49,31	15141,61	
9	2,98	93572,00	2,07	117,00	45,65	16230,94	
9,5	3,19	100166,00	2,22	121,00	41,20	17374,73	
10	3,34	104876,00	2,32	128,00	39,75	18191,72	
10,5	3,53	110842,00	2,45	132,00	36,70	19226,58	
11	3,75	117750,00	2,60	134,00	33,01	20424,84	
11,5	3,85	120890,00	2,67	146,00	34,13	20969,50	
12	4,01	125914,00	2,78	150,00	32,32	21840,96	
12,5	4,18	131252,00	2,90	161,00	31,93	22766,88	
13	4,33	135962,00	3,01	166,00	30,68	23583,88	
13,5	4,45	139730,00	3,09	172,00	30,09	24237,47	
14	4,58	143812,00	3,18	177,00	29,24	24945,53	





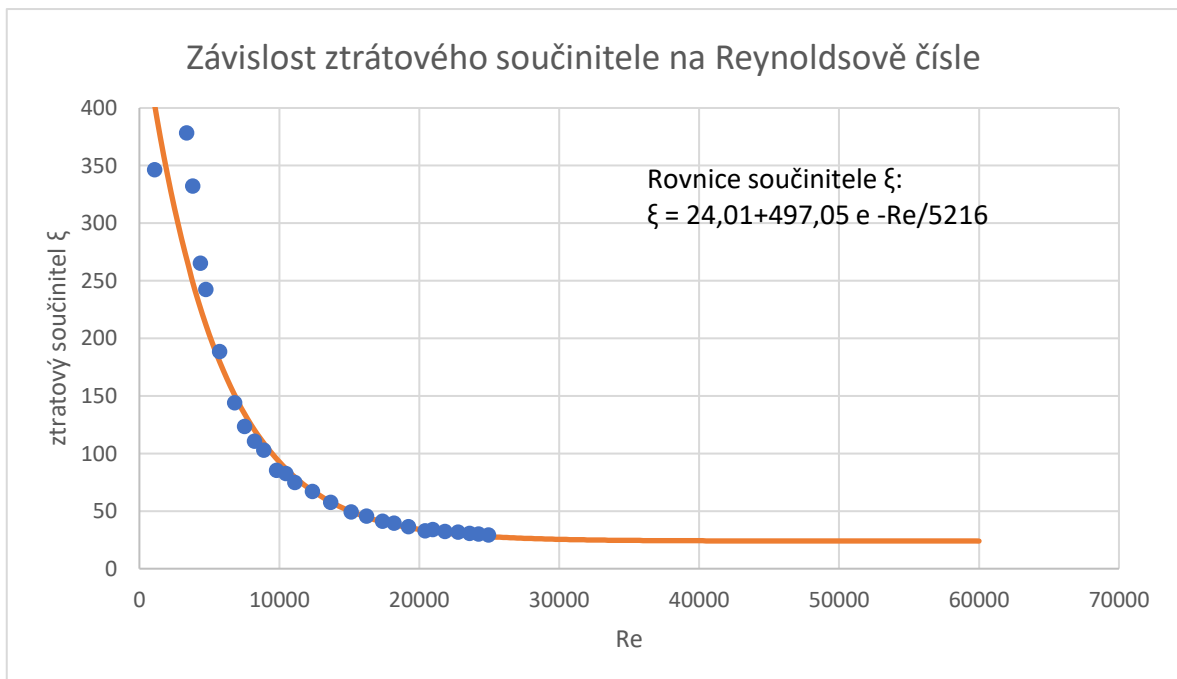
Příloha 9: Měření ztrátového součinitele Ref. výměník. Naměřená data a graf.

výměník referenční								
naměřená data							teplota vzduchu (°C)	22,3
							kinematická viskozita	0,0000153
							char. rozměr d m	0,12
							hustota kg/m <sup>3</sup>	1,197
napětí U (V)	rychlost u 100 (m/s)	objemový tok (mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u 120 (m/s)	tlaková ztráta Δp	setrvačné síly ξ	reynolds		
4	1,38	43332,00	0,96	10	18,19	7516		
4,1	1,82	57148,00	1,26	11	11,51	9913		
4,2	2,28	71592,00	1,58	13	8,66	12418		
4,3	2,48	77872,00	1,72	14	7,89	13508		
4,4	2,61	81954,00	1,81	16	8,14	14216		
4,5	2,79	87606,00	1,94	17	7,57	15196		
4,6	3,01	94514,00	2,09	19	7,27	16394		
4,7	3,15	98910,00	2,19	20	6,98	17157		
4,8	3,25	102050,00	2,26	22	7,22	17702		
4,9	3,42	107388,00	2,38	24	7,11	18627		
5	3,54	111156,00	2,46	24	6,64	19281		
5,25	3,84	120576,00	2,67	28	6,58	20915		
5,5	4,11	129054,00	2,85	30	6,15	22386		
5,75	4,32	135648,00	3,00	32	5,94	23529		
6	4,55	142870,00	3,16	35	5,86	24782		
6,25	4,71	147894,00	3,27	39	6,09	25654		
6,5	4,87	152918,00	3,38	42	6,14	26525		
6,75	5,1	160140,00	3,54	43	5,73	27778		
7	5,25	164850,00	3,65	46	5,78	28595		
7,5	5,69	178666,00	3,95	50	5,35	30991		
8	6,31	198134,00	4,38	57	4,96	34368		
8,5	6,58	206612,00	4,57	66	5,28	35839		
9	6,98	219172,00	4,85	69	4,91	38017		
9,5	7,19	225766,00	4,99	72	4,83	39161		
10	7,45	233930,00	5,17	77	4,81	40577		
10,5	7,69	241466,00	5,34	80	4,69	41885		
11	8,01	251514,00	5,56	85	4,59	43627		
11,5	8,21	257794,00	5,70	90	4,63	44717		
12	8,5	266900,00	5,90	92	4,41	46296		
12,5	8,61	270354,00	5,98	96	4,49	46895		
13	8,85	277890,00	6,15	100	4,42	48203		
13,5	9,03	283542,00	6,27	102	4,33	49183		
14	9,24	290136,00	6,42	108	4,38	50327		



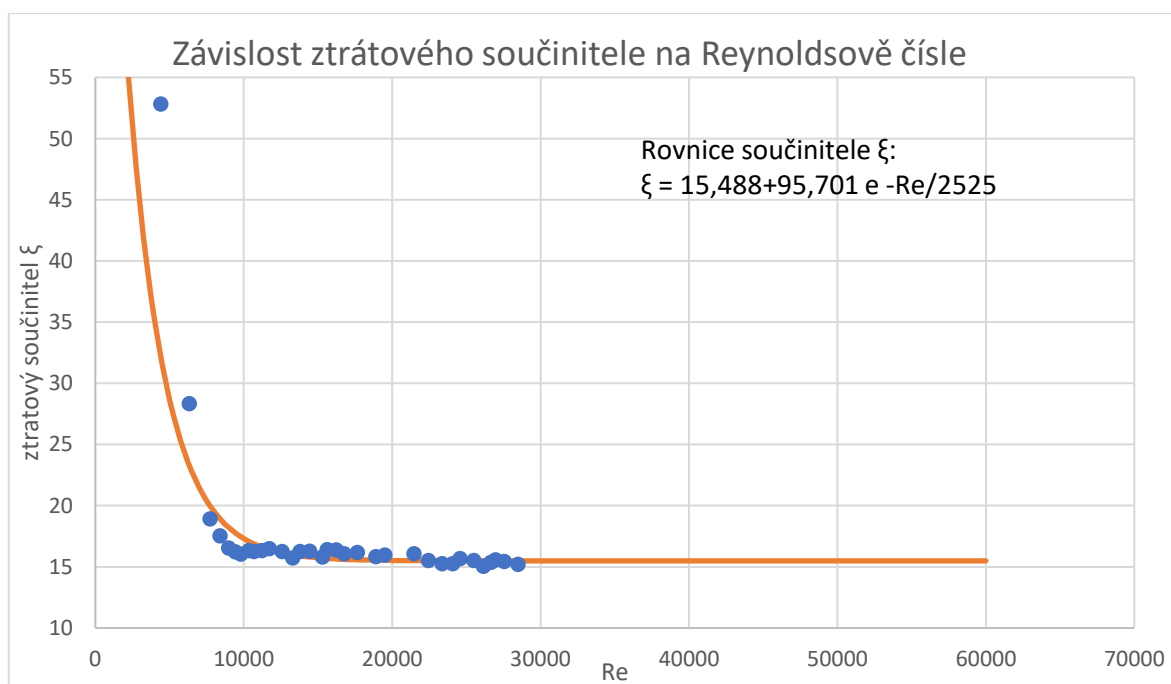
Příloha 10: Měření ztrátového součinitele Výměníku Solnař. Naměřená data a graf.

výměník Stanislav Solnař							teplota vzduchu (°C)	22
naměřená data							kinematická viskozita	0,0000153
							char. rozměr d m	0,12
							hustota kg/m <sup>3</sup>	1,197
napětí U (V)	rychlost u 100 (m/s)	objemový tok(mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u 120 (m/s)	tlaková ztráta Δp	setrvačné síly ξ	reynolds		
4	2,31	72534,00	1,60	5	3,25	12581,70		
4,1	2,76	86664,00	1,92	7	3,18	15032,68		
4,2	2,98	93572,00	2,07	8	3,12	16230,94		
4,3	3,18	99852,00	2,21	10	3,43	17320,26		
4,4	3,31	103934,00	2,30	10	3,16	18028,32		
4,5	3,45	108330,00	2,40	12	3,49	18790,85		
4,6	3,59	112726,00	2,49	14	3,76	19553,38		
4,7	3,72	116808,00	2,58	15	3,76	20261,44		
4,8	3,91	122774,00	2,72	15	3,40	21296,30		
4,9	4	125600,00	2,78	17	3,68	21786,49		
5	4,21	132194,00	2,92	18	3,52	22930,28		
5,25	4,52	141928,00	3,14	21	3,56	24618,74		
5,5	4,72	148208,00	3,28	24	3,73	25708,06		
5,75	4,91	154174,00	3,41	26	3,74	26742,92		
6	5,21	163594,00	3,62	26	3,32	28376,91		
6,25	5,32	167048,00	3,69	29	3,55	28976,03		
6,5	5,56	174584,00	3,86	30	3,36	30283,22		
6,75	5,78	181492,00	4,01	32	3,32	31481,48		
7	5,96	187144,00	4,14	34	3,32	32461,87		
7,5	6,25	196250,00	4,34	39	3,46	34041,39		
8	7,02	220428,00	4,88	45	3,16	38235,29		
8,5	7,31	229534,00	5,08	47	3,05	39814,81		
9	7,58	238012,00	5,26	48	2,89	41285,40		
9,5	7,82	245548,00	5,43	51	2,89	42592,59		
10	8,17	256538,00	5,67	54	2,80	44498,91		
10,5	8,39	263446,00	5,83	54	2,66	45697,17		
11	8,65	271610,00	6,01	60	2,78	47113,29		
11,5	8,95	281030,00	6,22	60	2,60	48747,28		
12	9,18	288252,00	6,38	61	2,51	50000,00		
12,5	9,35	293590,00	6,49	64	2,54	50925,93		
13	9,56	300184,00	6,64	65	2,46	52069,72		
13,5	9,87	309918,00	6,85	67	2,38	53758,17		
14	10	314000,00	6,94	69	2,39	54466,23		



Příloha 11: Měření ztrátového součinitele Výměníku Organic Naměřená data a graf.

výměník organic								
naměřená data						teplota vzduchu (°C)	22,3	
						kinematická viskozita	0,0000153	
						char. rozměr d m	0,12	
						hustota kg/m <sup>3</sup>	1,197	
napětí U (V)	rychlost u 100 (m/s)	objemový tok (mm <sup>3</sup> /s)	rychlost u 120 (m/s)	tlaková ztráta Δp (Pa)	setrvačné síly ξ	Reynoldsovo č.		
4	0,81	25434,00	0,56	10	52,81	4411,76		
4,1	1,16	36424,00	0,81	11	28,32	6318,08		
4,2	1,42	44588,00	0,99	11	18,90	7734,20		
4,3	1,54	48356,00	1,07	12	17,53	8387,80		
4,4	1,65	51810,00	1,15	13	16,54	8986,93		
4,5	1,73	54322,00	1,20	14	16,21	9422,66		
4,6	1,8	56520,00	1,25	15	16,04	9803,92		
4,7	1,9	59660,00	1,32	17	16,32	10348,58		
4,8	1,96	61544,00	1,36	18	16,23	10675,38		
4,9	2,06	64684,00	1,43	20	16,33	11220,04		
5	2,15	67510,00	1,49	22	16,49	11710,24		
5,25	2,31	72534,00	1,60	25	16,23	12581,70		
5,5	2,44	76616,00	1,69	27	15,71	13289,76		
5,75	2,53	79442,00	1,76	30	16,24	13779,96		
6	2,65	83210,00	1,84	33	16,28	14433,55		
6,25	2,81	88234,00	1,95	36	15,80	15305,01		
6,5	2,87	90118,00	1,99	39	16,40	15631,81		
6,75	2,98	93572,00	2,07	42	16,39	16230,94		
7	3,08	96712,00	2,14	44	16,07	16775,60		
7,5	3,24	101736,00	2,25	49	16,17	17647,06		
8	3,47	108958,00	2,41	55	15,83	18899,78		
8,5	3,58	112412,00	2,49	59	15,95	19498,91		
9	3,94	123716,00	2,74	72	16,07	21459,69		
9,5	4,12	129368,00	2,86	76	15,51	22440,09		
10	4,29	134706,00	2,98	81	15,25	23366,01		
10,5	4,42	138788,00	3,07	86	15,25	24074,07		
11	4,51	141614,00	3,13	92	15,67	24564,27		
11,5	4,68	146952,00	3,25	98	15,50	25490,20		
12	4,8	150720,00	3,33	100	15,04	26143,79		
12,5	4,89	153546,00	3,40	106	15,36	26633,99		
13	4,95	155430,00	3,44	110	15,55	26960,78		
13,5	5,06	158884,00	3,51	114	15,43	27559,91		
14	5,23	164222,00	3,63	120	15,20	28485,84		

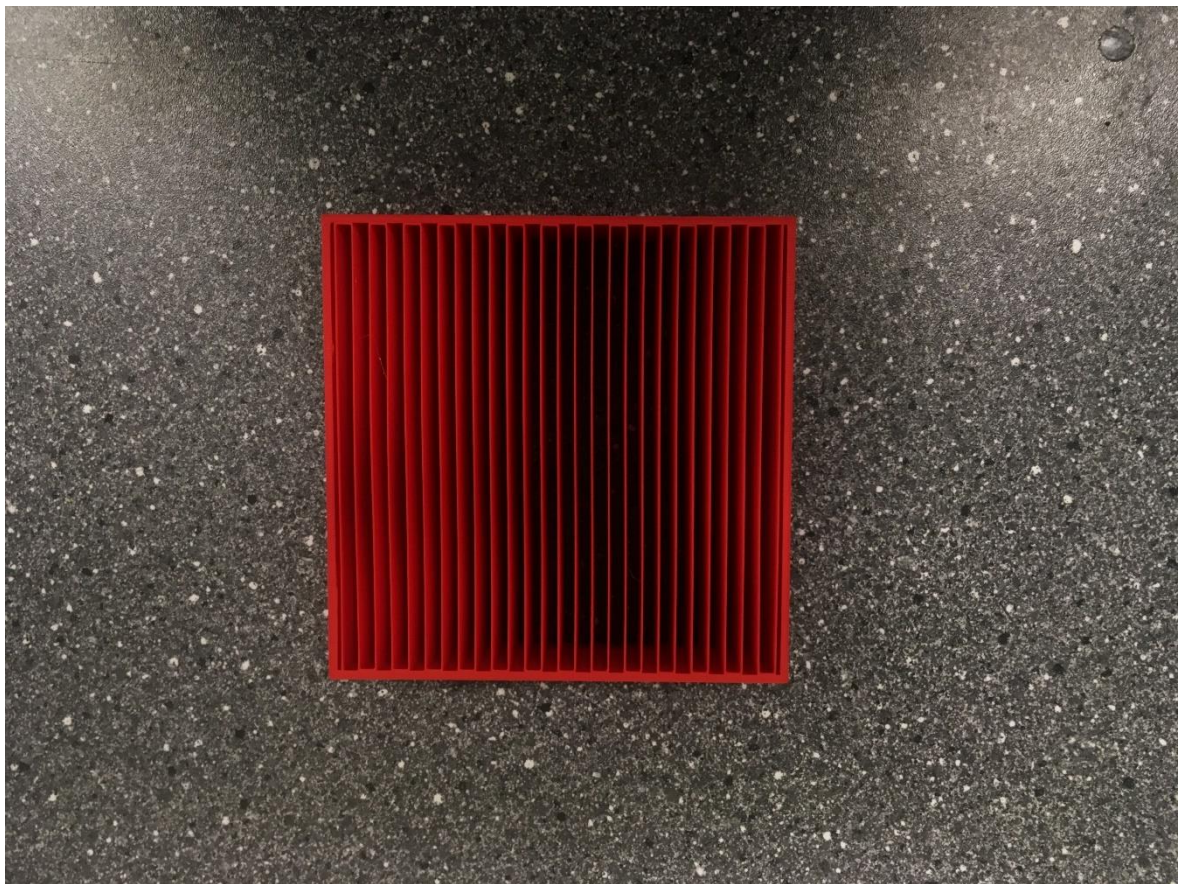


Příloha 12: Výměník 5 % žeber



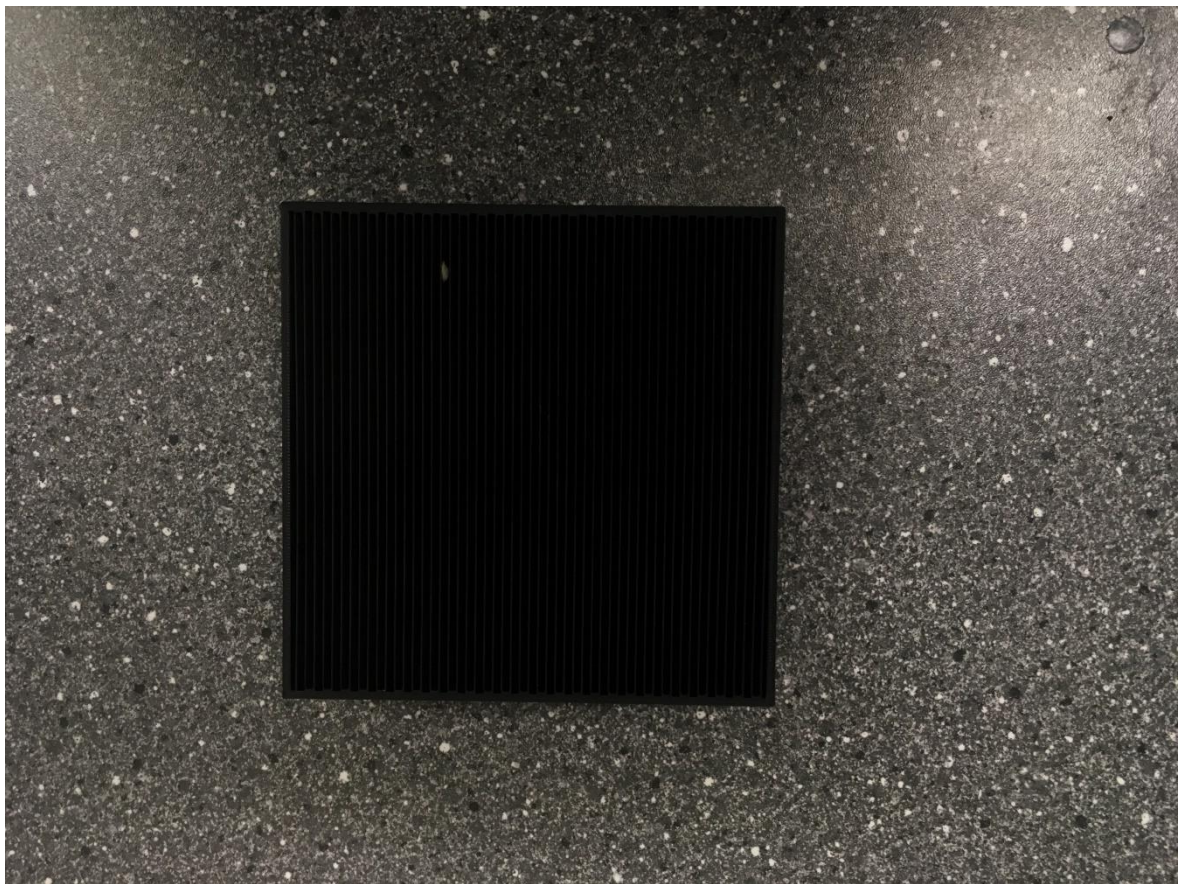
Plocha A (%)	Počet žeber (/)	teplosměnná plocha (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
5	13	108

Příloha 13: Výměník 10 % žeber



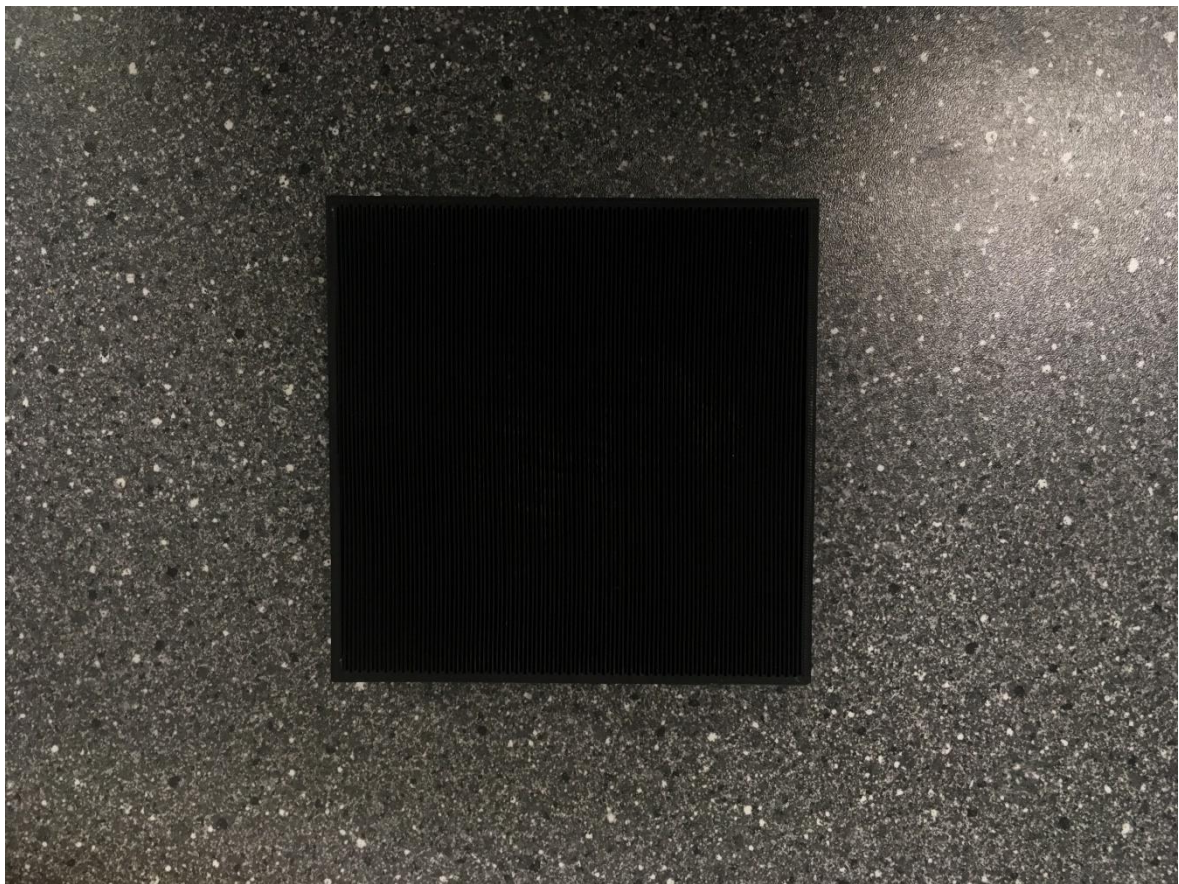
Plocha A (%)	Počet žeber (/)	teplosměnná plocha (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
10	27	225

Příloha 14: Výměník 20 % žeber



Plocha A (%)	Počet žeber (l)	teplosměnná plocha (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
20	53	442

Příloha 15: Výměník 40 % žeber



Plocha A (%)	Počet žeber (/)	teplosměnná plocha (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
40	107	891

Příloha 16: Ref. výměník

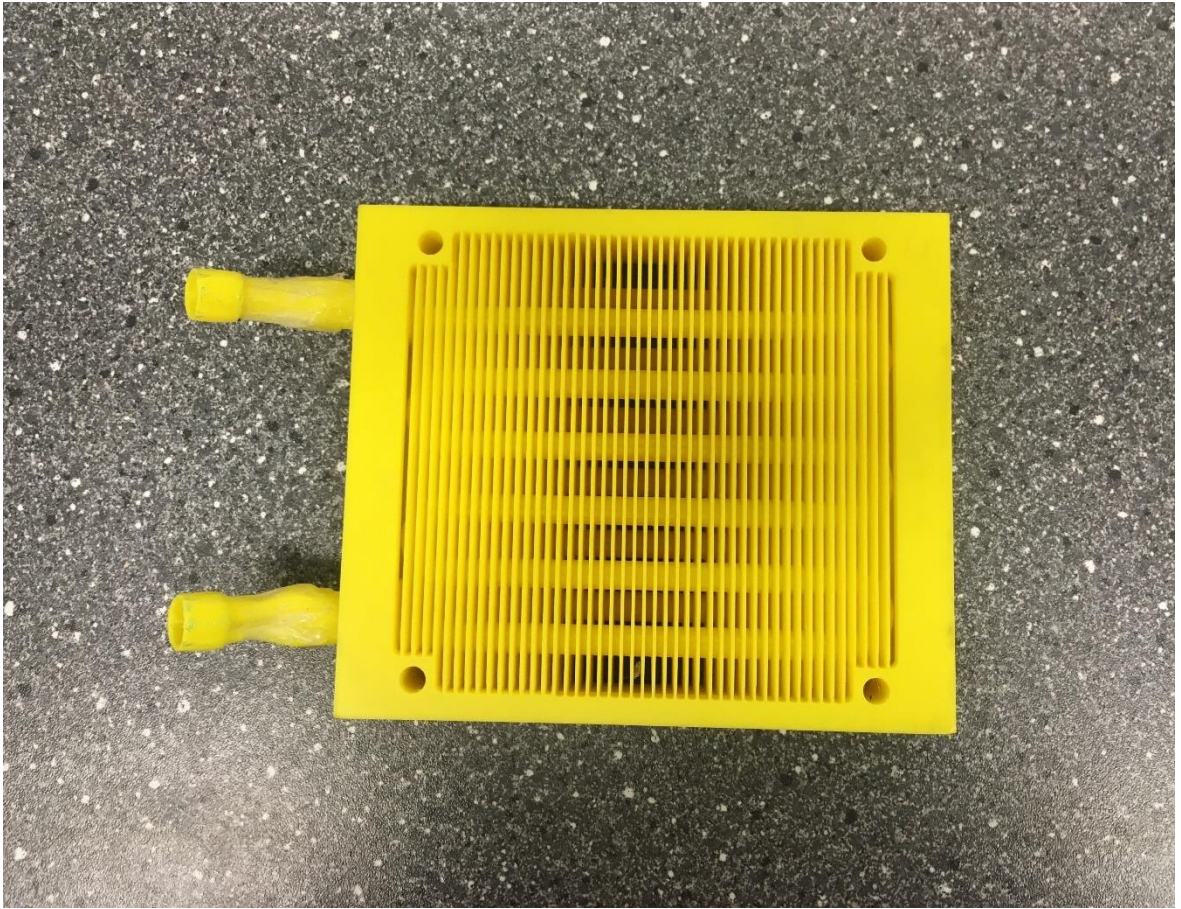




Příloha 17: Výměník Solnař



Příloha 18: Výměník OP PLA (deformace způsobena měřením)



Příloha 19: Výměník OP ESD



Příloha 20: Výměník Organic

