



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH A KONSTRUKCE VÝMĚNÍKU TEPLA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HEAT EXCHANGER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Teofil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Štěpán Foral

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Daniel Teofil

ID: 154893

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a konstrukce výměníku tepla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedení základních výpočtů a návržení koncepce tepelného výměníku.
2. Konstrukce tepelného výměníku.
3. Proměření zvolených parametrů tepelného výměníku a jejich srovnání s výpočty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 25.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Foral

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

TEOFIL, D. Návrh a konstrukce výměníku tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Štěpán Foral.

Pod kování

Děkuji panu Ing. Štěpánovi Foralovi za pomoc při vedení bakalářské práce. Mé pod kování patří také panu Ing. Filipu Kovalovi za spolupráci při konstrukci tepelného výměníku.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

ABSTRAKT

Cílem této práce je návrh, výpočet a zkonstruování tepelného výměníku pro učebny výuky na pracovišti UEEN. Úvodní část se zabývá významem tepelných výměníků v praxi, výchozími podmínkami pro konstrukci a zvolením řešení zadání. Další část se podrobněji věnuje výpočtu množství prostupu tepla a chování teplotních médií při jejich průtoku tepelným výměníkem. Následně je uveden popis konstrukce výměníku. V závěru práce jsou zkoumány rozdíly mezi teoreticky vypočtenými a naměřenými výstupními teplotami tepelného výměníku.

KLÍČOVÁ SLOVA: tepelný výměník; voda; výpočet; návrh; konstrukce

ABSTRACT

The aim of this thesis is to design, calculate and construct the heat exchanger for teaching purposes at the Department Of Electrical Power Engineering. The importance of heat exchangers in industry and conditions for the construction together with chosen solution is discussed in introductory part. The next part deals with calculations of heat transfer and behaviour of fluids flowing through the heat exchanger. The next part provides a description of the heat exchanger construction. In conclusion of this thesis, there are examined the differences between theoretically calculated values and experimentally determined values of the outlet temperature.

KEYWORDS: heat exchanger; water; calculation; construction

OBSAH

SEZNAM OBRÁZK	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	13
2 ROZDĚLENÍ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ	14
2.1 PODLE KONSTRUKCE	14
2.2 PODLE ÚČELU.....	14
2.3 PODLE SMĚRU A SMYSLU PROUDĚNÍ.....	14
2.4 Z HLEDISKA SKUPENSTVÍ PRACOVNÍCH MĚDIÍ	14
3 ZADÁNÍ PRÁCE A VÝCHOZÍ PODMÍNKY	15
3.1 ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	15
3.2 DOSTUPNÝ KONSTRUKČNÍ MATERIÁL	15
3.3 ZVOLENÝ POSTUP ŘEŠENÍ.....	15
4 NÁVRH TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU.....	16
4.1 METODA ϵ -NTU	16
4.2 SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA.....	18
4.3 VÝPOČETNÍ PROGRAM.....	20
5 KONSTRUKCE TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	25
5.1 3D MODEL.....	25
5.2 POPIS KONSTRUKCE.....	26
5.3 ZAPOJENÍ TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	27
6 MĚŘENÍ PARAMETRŮ TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	28
6.1 TERMOELEKTRICKÉ SNÍMAČE TEPLoty (TERMOČLÁNKY).....	28
6.2 ROTAMETR	29
6.3 KALIBRACE ROTAMETRU	30
6.4 ZAPOJENÍ TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	32
6.5 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY	33
7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	35
7.1 POROVNÁNÍ HODNOT	35
7.2 DISKUZE VÝSLEDKŮ	42
8 ZÁVĚR.....	44
POUŽITÁ LITERATURA	45

SEZNAM OBRÁZK

<i>Obrázek 1: 3D model tepelného vým níku</i>	25
<i>Obrázek 2: Tepelný vým ník</i>	26
<i>Obrázek 3: Detail válcové PVC zátky a T-kusu</i>	26
<i>Obrázek 4: Schéma zapojení tepelného vým níku</i>	27
<i>Obrázek 5: Za ízení pro zm nu sm ru proud ní ve vým níku</i>	27
<i>Obrázek 6: Schéma umíst ní termo lánku p i m ení</i>	28
<i>Obrázek 7: Princip rotametru[6]</i>	30
<i>Obrázek 8: Rotometr</i>	31
<i>Obrázek 9: Pr toková k ivka rotametru</i>	32
<i>Obrázek 10: M ení parametr tepelného vým níku</i>	33
<i>Obrázek 11: Hodnoty T_{h-out} pro souproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min</i>	38
<i>Obrázek 12: Hodnoty T_{c-out} pro souproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min</i>	38
<i>Obrázek 13: Hodnoty T_{h-out} pro souproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min</i>	39
<i>Obrázek 14: Hodnoty T_{c-out} pro souproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min</i>	39
<i>Obrázek 15: Hodnoty T_{h-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min</i>	40
<i>Obrázek 16: Hodnoty T_{c-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min</i>	40
<i>Obrázek 17: Hodnoty T_{h-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min</i>	41
<i>Obrázek 18: Hodnoty T_{c-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min</i>	41
<i>Obrázek 19: Simulace proud ní na vstupu vým níku v programu ANSYS</i>	42
<i>Obrázek 20: Simulace proud ní na výstupu vým níku v programu ANSYS</i>	43

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Vlastnosti vody p i tlaku 101 325 Pa [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 2: Koeficienty pro výpo et termoelektrického nap tí.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 3: Nam ené hodnoty pro kalibraci rotametry</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 4: Hodnoty pr toku pro vybrané hodnoty výchylky pr tokom ru.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 5: Nam ené teploty a pr toky pro souproudý vým ník</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 6: Nam ené teploty a pr toky pro protiproudý vým ník</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 7: Porovnání výsledk pro souproudé uspo ádání</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 8: Porovnání výsledk pro protiproudé uspo ádání.....</i>	<i>37</i>

SEZNAM SYMBOL A ZKRATEK

Zkratka	Název veli iny	Jednotka
A	Pr to ná plocha	m^2
A_t	Teplosm nná plocha	m^2
c	Rychlost proud ní vody	$m \cdot s^{-1}$
c_v	M rná tepelná kapacita vody	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_c	Pr toková tepelná kapacita oh ívané vody	$W \cdot K^{-1}$
C_h	Pr toková tepelná kapacita oh ívající vody	$W \cdot K^{-1}$
C_{max}	Menší z pr tokových tepelných kapacit C_h a C_c	$W \cdot K^{-1}$
C_{min}	Menší z pr tokových tepelných kapacit C_h a C_c	$W \cdot K^{-1}$
d_1	Vnit ní pr m r Cu trubky	m^2
d_2	Vn jší pr m r Cu trubky	m^2
d_s	St ední pr m r trubky	m
g	Tíhové zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
Gr	Grashofovo íslo	-
k	Sou initel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
l	Délka trubky	m
L	Charakteristický rozm r	m
NTU	Bezrozm rový parametr NTU	-
Nu	Nusseltovo íslo	-
O	Smá ený obvod	m
p	P esnost m ící karty	%
Pe	Pécletovo íslo	-
Q_m	Hmotnostní pr tok vody	$kg \cdot s^{-1}$
Q_{m-c}	Hmotnostní pr tok oh ívané vody	$kg \cdot s^{-1}$
Q_{m-h}	Hmotnostní pr tok oh ívající vody	$kg \cdot s^{-1}$
Q_{v-c}	Objemový pr tok oh ívané vody	$l \cdot min^{-1}$
Q_{v-h}	Objemový pr tok oh ívající vody	$l \cdot min^{-1}$
Q_{m-min}	Nejmenší hmotnostní pr tok vody z Q_{m-h} a Q_{m-c}	$kg \cdot s^{-1}$
Q_p	Objemový pr tok vody p i kalibraci	$l \cdot h^{-1}$
Ra	Rayleighovo íslo	-
Re	Reynoldsovo íslo	-

t_p	čas pln ní nádoby	s
t_v	Teplota vody	°C
T	Rozdíl ur ovacích teplot st ny trubky a vody	°C
T_{c-in}	Vstupní teplota oh ívané vody	°C
T_{c-out}	Výstupní teplota oh ívané vody	°C
T_{h-in}	Vstupní teplota oh ívající vody	°C
T_{h-out}	Výstupní teplota oh ívající vody	°C
T_{exp}	Teplotní rozdíl experimentu a výpo tu	°C
$T_{exp\%}$	Procentuální rozdíl experimentu a výpo tu	%
T_{exp}	Nam ená teplota experimentu	°C
T_{matlab}	Vypo tená teplota experimentu v programu Matlab	°C
V_b	Objem vody v nádob	ml
V_n	Objem vody v nádob po korekci	ml
V_s	Objem vody v zbylý na st nách po vyprázdni ní	ml
l	Sou initel p estupu tepla oh ívající vody	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
2	Sou initel p estupu tepla oh ívané vody	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
p	Výchylka rotametru	-
	Teplotní sou initel objemové roztažnosti	K^{-1}
	Teplot m ená termo lánkem	°C
	Efektivnost vým níku	-
cf	Efektivnost protiproudého vým níku	-
pf	Efektivnost souprroudého vým níku	-
d	Dynamická viskozita vody	Pa · s
v	Sou initel tepelné vodivosti vody	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
	Sou initel tepelné vodivosti trubky	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
	Kinematická viskozita vody	$m^2 \cdot s^{-1}$
v	Hustota vody	$kg \cdot m^{-3}$
	Skute ný p enášený tepelný tok ve vým níku	W
cf	Skut. p enášený tep. tok v protiproudém vým níku	W
max	Maximální p enášený tepelný tok ve vým níku	W
pf	Skut. p enášený tep. tok v souprroudém vým níku	W

1 ÚVOD

Po celou dobu vývoje lidstva se spotřeba energie na jednu osobu neustále zvyšuje. V dnešní době spotřeba energie na osobu je asi 4krát více než tomu bylo u lidí 7000 let dříve, a až 20krát více energie, než lidé, kteří se živili lovem a sbírkou potravy. [1]

Spotřeba energie provází lidstvo od nepaměti. Vždy rozvoj získávání energie šel ruku v ruce s rozvojem lidstva. S energií se setkáváme při nejrozličnějších našich aktivitách. Energie nám dává teplo a světlo, pomáhá upravit potraviny, pohání dopravní prostředky i výrobní a zemědělské stroje a také pomáhá lidem se učit, bavit se nebo odpočívat. Energie je v podstatě vázána v každém výrobku, se kterým se v životě setkáme. Kdysi to byla hlavně lidská práce, dnes ji nahrazují stroje a vyspělé technologie. V moderních ekonomikách jsou to právě stroje, které spotřebovávají velkou část energie, kterou vyrobíme nebo umíme získat například z ropy. Tu zbývající část spotřebujeme pomocí jednoduchých zařízení a procesů v tísňové energii, kterou získáme například z elektřiny nebo tepla. [1]

A právě teplo a jeho přenos se během staletí stalo klíčovými díky jeho využití jak v domácnostech, tak i v průmyslu. Důležitostí znalosti distribuce tepla a jeho využití je základem každého studenta vysoké školy, který se zajímá o tuto problematiku. A už to jsou elektrárny, teplárny, chemický průmysl i potravinářský průmysl, všude je vyžadována znalost efektivního využití tepla. A právě v této oblasti mají velké využití tepelné výměníky, které slouží k přenosu nebo přerušování přenosu tepla pomocí proudících médií. [2]

V dnešní době přenos tepla zaujímá významné místo v mnohých odvětvích průmyslu. Například v chemickém průmyslu jsou zařízení na výměnu tepla základem každé technologické linky. Je tedy zřejmé, že konstruktéři a projektanti by měli znát základní principy přenosu tepla. Dříve teoretické analýzy přenosu tepla byly jen sporadické, převládaly spíše empirické metody, avšak s rychlým rozvojem výpočetní techniky se v poslední době stále více opírají o teoretické. Ovšem matematický model je v rozhodnutí pouze v případě experimentálního ověření, které pomáhá zdokonalovat jeho popis. [3]

V této práci jsem se soustředil na návrh a konstrukci tepelného výměníku. Po jeho konstrukci jsem proměřil jeho vlastnosti a následně zkoumal a porovnával dosažené výsledky s teoreticky vypočtenými hodnotami.

2 ROZDĚLENÍ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ

Rozdělení tepelných výměníků dle literatury [2]:

2.1 Podle konstrukce

- rekuperační** - obě média, ohřívající i ohřívané, jsou oddělena nepropustnou stěnou o určité tloušťce a o teplosměnných plochách na stranách obou médií
- regenerační** - ohřívané médium vtéká opakovaně s určitým časovým zpožděním za médiem ohřívajícím do přesně vymezeného prostoru, vyplněného pevným teplo zprostředkujícím elementem a přijímá z něho teplo, dříve přivedené ohřívajícím médiem
- směšovací** - ohřívané a ochlazované médium se v tomto výměníku smíší

2.2 Podle účelu

- ohříváky** - vyznačují se tím, že ohřívané médium v nich zvyšuje svou teplotu, ale nedochází ke změně fáze
- chladiče** - ochlazované médium zde snižuje svou teplotu bez změny fáze
- výparníky a odparky** - ohřívané kapalné médium se mění v páru
- kondenzátory** - teplejší médium v parní fázi mění fázi na kapalnou
- pehříváky a mezipřehříváky** - slouží ke vysoušení mokré a zvyšování teploty syté nebo pehřáté páry
- sušárny** - přívodem tepla se dosahuje snížení vlhkosti látky v pevné fázi

2.3 Podle směru a smyslu proudění

- souproudé** - směry os proudění ohřívacího a ohřívajícího média jsou rovnoběžné a vektory rychlostí mají stejný smysl
- protiproudé** - směry proudění jsou rovnoběžné a mají opačný smysl
- kolmý** - osy proudění jsou mimoběžné a v kolmém průmětu spolu svírají úhel 90°
- se šikmým vzájemným proudem** - osy proudění svírají v kolmém průmětu spolu úhel větší nebo menší než 90°

2.4 Z hlediska skupenství pracovních médií

- bez změny skupenství teplotněstabilních látek
- se změnou skupenství jedné teplotněstabilní látky
- se změnou skupenství obou teplotněstabilních látek

3 ZADÁNÍ PRÁCE A VÝCHOZÍ PODMÍNKY

3.1 Zadání bakalářské práce

Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat tepelný výměník, který bude sloužit jako laboratorní úloha na pracovišti UEEN. Dále bude moci být použit pro dochlazování chladicí vody tepelného erpadla, které je budováno v solární laboratoři. Tepelný výměník má sloužit v souproudém i protiproudém uspořádání. Jelikož je vnitřní stěna výměníku prohledná, může být také využit jako názorná pomůcka při zkoumání proudění tekutin.

3.2 Dostupný konstrukční materiál

Konstrukce byla realizována z dostupného materiálu, to je PVC a Cu trubek. Ty tvoří základ tepelného výměníku. Vnitřní a vnější průměry PVC trubky jsou 40 mm a 30 mm, délka je 1,65 m. Vnitřní průměr Cu trubky je 15 mm o tloušťce stěny 1 mm. Délka Cu trubky je 1,65 m. Vnitřní trubku tvoří právě Cu trubka, kde proudí teplejší voda. Pro měření vstupní a výstupní teploty jsou použity školní termolánky, pro měření průtoku rotametr.

3.3 Zvolený postup řešení

Ještě před započetím konstrukce byl proveden návrh výměníku tak, aby splňoval zadání bakalářské práce. Jelikož byl pevně dán materiál, ze kterého měl být výměník zkonstruován, jediný parametr, který bylo možno ovlivnit, byla délka výměníku. Pro návrh jeho délky bylo nutno vytvořit výpočetní program, který by ze zadaných hodnot T_{h-in} (vstupní teplota ohřívající vody) a T_{c-in} (vstupní teplota ohřívané vody) vypočítal teoretické výstupní teploty teplotonosných médií. Jako výpočetní program byl zvolen Matlab. Dále bylo navrženo konstrukční řešení výměníku v programu Autodesk Inventor.

Po sestavení tepelného výměníku následovalo měření jeho reálných výstupních veličin pomocí průtokoměru a termolánek a vyhodnocení výsledků.

4 NÁVRH TEPELNÉHO VÝM NÍKU

V p ípad , že p i návrhu protiproudého vým níku známe pouze vstupní teploty obou látek, je možno použít dv metody výpo tu:

- Metoda -NTU
- Výpo et pomocí st edního logaritmického teplotního spádu

4.1 Metoda -NTU

P i použití výpo tu pomocí st edního logaritmického teplotního spádu je nutný itera ní postup, proto je vhodn jší metoda -NTU, kde je efektivnost vým níku a NTU zna í Number of Transfer Units. [4]

Pro definování efektivnosti protiproudého tepelného vým níku je nejprve pot eba ur it maximální možný tepelný tok Φ_{max} , který je ve vým níku p enášený mezi dv ma látkami. Tento tok dosáhneme pouze v p ípad nekone n dlouhého tepelného vým níku, kdy teplota ochlazované tekutiny T_{h-out} dosáhne na výstupu nejnižší možné hodnoty, tj. teploty studené tekutiny na vstupu do vým níku T_{c-in} , nebo teplota oh ívané tekutiny na výstupu T_{c-out} dosáhne nejvyšší možné teploty, tj. teploty horké tekutiny na vstupu T_{h-in} [4]. Postup a výpo et metodou -NTU je p evzat z literatury [4].

Za p edpokladu nekone n dlouhého protiproudého tepelného vým níku jedna z tekutin podstoupí maximální možnou teplotní diferenci, která se rovná $T_{h-in} - T_{c-in}$. Toto bude referen ní maximální teplotní diference, se kterou budeme ur ovat maximální možný p enášený tepelný tok ve vým níku Φ_{max} . Obecný vztah pro maximální p enášený tok ve vým níku:

$$\Phi_{max} = C_{min} (T_{h-in} - T_{c-in}) \quad (W) \quad (1)$$

kde C_{min} je pr toková tepelná kapacita, která je menší z pr tokových tepelných kapacit C_h a C_c . C_{min} je dána vztahem:

$$C_{min} = Q_{m-min} c_v \quad (W \cdot K^{-1}) \quad (2)$$

kde c_v je m rná tepelná kapacita vody a Q_{m-min} je nejmenší hmotnostní pr tok vody z Q_{m-h} a Q_{m-c} , když Q_{m-h} je hmotnostní pr tok oh ívající vody a Q_{m-c} hmotnostní pr tok oh ívané vody. Za p edpokladu, že m rná tepelná kapacita vody bude v p ípad teplejšího i studen jšího média stejná (4180 kJ/kg·K), bude hodnota C_{min} závislá pouze na hmotnostním pr toku teplonosného média s menším hmotnostním pr tokem. Naopak hodnota C_{max} , bude závislá na hmotnostním pr toku teplonosného média s v tším hmotnostním pr tokem.

Eektivnost vým níku, jejíž hodnota se pohybuje v intervalu 0 1, stanovuje pom r skute n p enášeného tepelného toku a maximálního p enášeného tepelného toku Φ_{max} [1].

$$\eta = \frac{\Phi}{\Phi_{max}} \quad (-) \quad (3)$$

Pro každý tepelný vým ník platí závislost:

$$v = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (-) \quad (4)$$

V analýze tepelných výměníků je široce používán bezrozměrný parametr NTU , který je definován vztahem:

$$NTU = \frac{kA_t}{C_{\min}} \quad (-) \quad (5)$$

kde A_t je teplosměrná plocha, k součinitel prostupu tepla a C_{\min} nejmenší proudová tepelná kapacita z C_h a C_c .

Konkrétní tvar funkce pro protiproudý tepelný výměník má tento tvar:

$$v_{cf} = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)NTU\right]}{1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \exp\left[-\left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)NTU\right]} \quad (-) \quad (6)$$

Pro souproudý tepelný výměník nabývá tato funkce tvar:

$$v_{pf} = \frac{1}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)NTU\right] \right\} \quad (-) \quad (7)$$

Pro skutečně přenášený tepelný tok souproudého a protiproudého výměníku platí:

$$\Phi_{cf} = v_{cf} \Phi_{\max} \quad (W) \quad (8)$$

$$\Phi_{pf} = v_{pf} \Phi_{\max} \quad (W) \quad (9)$$

Vztahy pro výstupní teploty ohřívající a ohřívané vody lze odvodit z bilanční rovnice tepelného výměníku (*Rovnice 1*). Pro protiproudý výměník bude platit:

$$T_{h-out} = T_{h-in} - \frac{\Phi_{cf}}{Q_{m-h} c_v} \quad (^\circ C) \quad (10)$$

$$T_{c-out} = T_{c-in} - \frac{\Phi_{cf}}{Q_{m-c} c_v} \quad (^\circ C) \quad (11)$$

Pro souproudý výměník bude platit:

$$T_{h-out} = T_{h-in} - \frac{\Phi_{pf}}{Q_{m-h} c_v} \quad (^\circ C) \quad (12)$$

$$T_{c-out} = T_{c-in} - \frac{\Phi_{pf}}{Q_{m-c} c_v} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (13)$$

4.2 Součinitel prostupu tepla

Pro metodu ϵ -NTU je v první řadě potřeba stanovit součinitel prostupu tepla k . Pokud máme na mysli přenos tepla z jedné tekutiny do druhé přes nějakou pevnou přepážku (např. přes stěnu trubky), pak hovoříme o prostupu tepla. Tepelný tok je přenesen postupně konvekcí z horké tekutiny do povrchu stěny, pak vedením stěnou a opět konvekcí z druhého povrchu stěny do studené tekutiny [4].

Parametrem, který nejvíce ovlivňuje velikost této veličiny je právě konstrukční materiál, tvar a velikost přepážky (trubky) a druh proudění, v jakém se teplotně nosné kapaliny nacházejí. Postup a výpočet prostupu tepla v této kapitole je převzat z [5].

Na velikost prostupu tepla konvekcí má vliv druh proudění (laminární, turbulentní nebo přechodový), který bude uvnitř trubky probíhat. Druh proudění určuje Reynoldsovo číslo, které vyjadřuje podobnost nuceného izotermického proudění viskózní tekutiny. Pro laminární proudění platí: $Re < 2300$, pro turbulentní proudění je $Re > 10000$ a pro přechodovou oblast $2300 < Re < 10000$. Reynoldsovo číslo je dáno vztahem:

$$Re = \frac{cL}{\epsilon} \text{ (-)} \quad (14)$$

kde c je rychlost proudění vody, L je charakteristický rozměr, ϵ je kinematičká viskozita vody a je definována jako podíl dynamické viskozity vody η a její hustoty ρ :

$$\epsilon = \frac{\eta}{\rho} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (15)$$

Hodnotu dynamické viskozity vody lze určit z *Tabulky 1*. Charakteristický rozměr L je dán rovnicí:

$$L = \frac{4A}{O} \text{ (m)} \quad (16)$$

kde A je průřezová plocha a O je směrný obvod.

Tabulka 1: Vlastnosti vody při tlaku 101 325 Pa [2]

t_v [°C]	ν 10^4 [Pa·s]	Pr [-]	λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	β 10^3 [K^{-1}]
0	17,89	13,67	0,552	999,8	-0,07
10	13,06	9,47	0,578	999,7	0,088
20	10,05	7,01	0,598	998,2	0,206
30	8,02	5,43	0,614	995,7	0,303
40	6,53	4,35	0,628	992,2	0,385
50	5,50	3,57	0,641	988	0,457
60	4,70	3,01	0,652	983,2	0,523
70	4,06	2,56	0,661	977,8	0,585
80	3,56	2,23	0,669	971,8	0,643
90	3,15	1,96	0,676	965,3	0,698
100	2,78	1,75	0,682	958,3	0,752

Další bezrozměrnou veličinou charakterizující přechod tepla mezi dvěma látkami je Péceletovo číslo:

$$Pe = Pr Re \quad (-) \quad (17)$$

kde Pr je Prandtlovo číslo a vyjadřuje podobnost sdílení tepla kondukcí a konvekcí tekutiny. Lze jej určit z Tabulky 1.

Nusseltovo číslo vyjadřuje podobnost sdílení tepla konvekcí a kondukcí v termokinetické mezní vrstvě tekutiny. Je odvozeno z podobnosti tepelných toků konvekcí a kondukcí tekutiny a je určujícím kritériem pro výpočet součinitele přestupu tepla. Tvary rovnic, které vyjadřují hodnotu Nusseltova čísla nabírají různých podob v závislosti na hodnotě Reynoldsova čísla. Pro přechodovou oblast platí:

$$Nu = \frac{1}{300} Re Pr^{0,37} \quad (-) \quad (18)$$

Pro turbulentní proudění:

$$Nu = 0,023 Re^{0,2} Pr^{0,4} \quad (-) \quad (19)$$

Pro laminární proudění:

$$Nu = 0,74 Pe^{0,2} Ra^{0,1} \quad (-) \quad (20)$$

kde Ra je Rayleighovo číslo a je dáno součinem Prandtlova a Grashofova čísla:

$$Ra = Pr Gr \quad (-) \quad (21)$$

kde Grashofovo číslo vyjadřuje podobnost gravitačního neizotermického proudění tekutiny, a je dáno vztahem:

$$Gr = \frac{\rho \Delta T g L^3}{\mu^2} \quad (-) \quad (22)$$

kde ρ je teplotní součinitel tepelné roztažnosti vody, g je tíhové zrychlení a ΔT je rozdíl teplot stěny trubky a vody.

Součinitele h_1 a h_2 je možno vyjádřit ze vztahu pro Nusseltovo číslo:

$$Nu = \frac{h L}{\lambda_v} \quad (-) \quad (23)$$

kde λ_v je součinitel tepelné vodivosti vody. Pro součinitel přestupu tepla tedy platí:

$$h = \frac{Nu \lambda_v}{L} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (24)$$

Pokud známe hodnotu součinitele přestupu tepla, můžeme vyjádřit rovnici pro součinitel přestupu tepla k , který je v našem případě vyjádřen vztahem:

$$k = \frac{1}{\frac{d_s}{r_1 d_1} + \frac{d_s}{2} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{d_s}{r_2 d_2}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (25)$$

kde d_1 je vnitřní průměr trubky, d_2 - vnější průměr trubky, λ_v - součinitel tepelné vodivosti trubky, h_1 - součinitel přestupu tepla teplejší (ohřívající) vody, h_2 - součinitel přestupu tepla studenější (ohřívané) vody a d_s je střední průměr trubky definovaný jako:

$$d_s = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{m}) \quad (26)$$

4.3 Výpočetní program

Pro výpočet výstupních teplot ohřívající a ohřívané vody posloužil výpočetní program vytvořený v prostředí Matlab. Níže je uveden zdrojový kód programu, který počítá na základě vztahů uvedených v kapitole 4.1 a 4.2. Při výpočtu byly uvažovány tyto zjednodušující předpoklady:

- termická tepelná kapacita vody c_v je konstantní
- součinitel tepelné vodivosti materiálu je konstantní
- konvekce tepla dochází pouze mezi teplotními médii (neuvažujeme ztráty do okolí)
- prostory s proudící vodou jsou rovnoběžné (neuvažujeme výrobní nepřesnosti a průhyby)
- pro určení vlastností vody v závislosti na teplotě byly použity rovnice regrese (viz Přílohu A) na základě Tabulky 1

Ukázka zdrojového kódu Matlabu:

```

clc;
clear all;
%%Fixní(nem nné) vstupní parametry tepelného vým níku

l=1.5;           %délka teplosm nné plochy[m]
d1=0.013;       %vnit ní pr m r Cu trubky[m]
d2=0.015;       %vn jší pr m r Cu trubky[m]
d3=0.03;        %vnit ní pr m r PVC trubky[m]
g=9.81;         %tíhové zrychlení [m/s-2]
Lambda_Cu=395;  %sou initel tepelné vodivosti Cu [W·m-1·K-1]
c_v=4180;       %m rná tepeplná kapacita vody [J·kg-1·K-1]

T_hin=80;       %teplota oh ívající vody na vstupu[°C]
T_cin=12;       %teplota oh ívané vody na vstupu[°C]
Q_vh=0.49;      %objemový pr tok oh ívající vody[l/min]
Q_vc=3.5;       %objemový pr tok oh ívané vody [l/min]

%%Vstupní p edpoklady teplot

T_phout=T_hin;  %p edpokládaná výstupní teplota teplejší vody [°C]
T_pcout=T_cin;  %p edpokládaná výstupní teplota studen jší vody [°C]

T_new = 0;
T_oldH = T_phout;

%%Cyklus for slouží k zp esn ní výpo tu všech veli in, které jsou závislé na
po áte ní p edpokládané výstupní teplot teplejší a studen jší vody T_phout a
T_pcout. Hohdnota výstupních teplot vypo tená pro odhadované výstupní teploty
je následn vrácena zpátky na po átek, a výpo et pokračuje s p esn jší vstupní
hodnotou. Tento cyklus je opakován 10 krát.

for k=1:10

T_mh=(T_phout+T_hin)/2; %p edpokládaná st ední teplota teplejší vody[°C]
T_mc=(T_pcout+T_hin)/2; %p edpokládaná st ední teplota studen jší vody[°C]

%odhadovaná teplota st ny [°C]
T_wall=((T_hin+T_phout)/2+(T_cin+T_pcout)/2)/2;

%rozdíl ur ovacích teplot st ny trubky a teplejší vody [°C]
DeltaT_h=((T_hin+T_phout)/2)-T_wall;
%rozdíl ur ovacích teplot st ny trubky a studen jší vody [°C]
DeltaT_c=T_wall-(T_cin+T_pcout)/2;

%%Výpo et sou initele p estupu tepla pro teplejší vodu

A1=pi*(d1/2)^2;           %pr to ná plocha teplejší vody [m2]
L_h=(4*A1)/(pi*d1);       %char. rozm r prostoru teplejší vody [m]
c_h=((Q_vh*0.001)/60)/A1;  %rychlost proud ní teplejší vody [m/s]

%pr m rná p edpokládaná hustota teplejší vody [kg/m3]
Ro_h=-0.0000155206*(T_mh^3)-0.0059189977*(T_mh^2)+0.02141414*T_mh+999.923;

%pr m rná p edpokládaná dynamická viskozita teplejší vody [Pa·s]
Eta_h=(0.00000031920163170131*(T_mh^4)-0.0000899535742035218*(T_mh^3)+
0.00983017773892625*(T_mh^2)-0.5527906565658*T_mh+17.8274755244795)/10^4;

```

```

%pr m rná p edpokládáná kinematická viskozita teplejší vody [m2/s]
Ni_h=Eta_h/Ro_h;

%Reynoldsovo íslo pro teplejší vodu [-]
Re_h=(c_h*L_h)/Ni_h;

%sou initel tepelné vodivosti teplejší vody [W·m-1·K-1]
Lambda_h=(-0.0000000090326340328*(T_mh^4)+0.0000024533799534293*(T_mh^3)-
0.00003046911421922260*(T_mh^2)+0.00279155011651966*T_mh+0.55230769230825);

%Prandtlovo íslo teplejší vody [-]
Pr_h=(0.0000003313*(T_mh^4)-0.0000900758*(T_mh^3)+0.0093542832*(T_mh^2)-
0.4840763403*T_mh+13.6058741259);

%teplotní sou initel objemové roztažnosti teplejší vody [K-1]
Gama_h=(0.00000057653457653469*(T_mh^3) 0.00013278554778557*(T_mh^2)+
0.0157128593628606*T_mh-0.0639860139860442)/10^3;

%Grashofovo íslo teplejší vody [-]
Gr_h=Gama_h*DeltaT_h*((g*(L_h^3))/Ni_h^2);
Ra_h=Gr_h*Pr_h; %Rayleighovo íslo teplejší vody [-]
Pe_h=Pr_h*Re_h; %Pécletovo íslo teplejší vody [-]

%Nusseltovo íslo teplejší vody [-]
Nu_h=0.74*(Pe_h)^(0.2)*Ra_h^(0.1);

%sou initel p estupu tepla teplejší vody [W·m-2·K-1]
Alfa_h=(Nu_h*Lambda_h)/L_h;

%%Výpo et sou initele p estupu tepla pro studen jší vodu

A2=(pi*(d3/2)^2)-(pi*(d2/2)^2); %pr to ná plocha studen jší vody [m2]
L_c=(4*A2)/((pi*d1)+(pi*d2)); %char rozm r prostoru studen jší vody [m]
c_c=((Q_vc*0.001)/60)/A2; %rychlost proud ní studen jší vody [m/s]

%pr m rná p edpokládáná hustota studen jší vody [kg/m3]
Ro_c=-0.0000155206*(T_mc^3)-0.0059189977*(T_mc^2)+0.0214141414*T_mc+999.923;

%pr m rná p edpokládáná dynamická viskozita studen jší vody [Pa·s]
Eta_c=(0.00000031920163170131*(T_mc^4)-0.0000899535742035218*(T_mc^3)+
0.00983017773892625*(T_mc^2)-0.552790656565804*T_mc+17.8274755244795)/10^4;

%pr m rná p edpokládáná kinematická viskozita studen jší vody [m2/s]
Ni_c=Eta_c/Ro_c;

%reynoldsovo íslo pro studen jší vodu [-]
Re_c=(c_c*L_c)/Ni_c;

%sou initel tepelné vodivosti studen jší vody [W·m-1·K-1]
Lambda_c=(-0.0000000090326340328*(T_mc^4)+0.0000024533799534293*(T_mc^3)-
0.0000304691142192226*(T_mc^2)+0.00279155011651966*T_mc+0.552307692308258);

%prandtlovo íslo studen jší vody [-]
Pr_c=(0.0000003313*(T_mc^4)-0.0000900758*(T_mc^3)+0.0093542832*(T_mc^2)-
0.4840763403*T_mc+13.6058741259);

%teplotní sou initel objemové roztažnosti studen jší vody [K-1]
Gama_c=(0.00000057653457653469*(T_mc^3)-
0.00013278554778557*(T_mc^2)+0.0157128593628606*T_mc-0.0639860139860442)/10^3;

%Grashofovo íslo studen jší vody [-]

```

```

Gr_c=Gama_c*DeltaT_c*((g*(L_c^3))/Ni_c^2);

Ra_c=Gr_c*Pr_c;          %Rayleighovo íslo studen jší vody[-]
Pe_c=Pr_c*Re_c;         %Pécletovo íslo studen jší vody [-]

%Nusseltovo íslo teplejší vody pro laminární proud ní[-]
Nu_c_l=0.74*(Pe_c)^(0.2)*Ra_c^(0.1);

%Nusseltovo íslo teplejší vody pro turbulentní proud ní[-]
Nu_c_t=(Re_c*Pr_c)/300;
if (Re_c<=2300);
    Nu_c=Nu_c_l;
else Nu_c=Nu_c_t;
end

%sou initel p estupu tepla studen jší vody [W·m-2·K-1]
Alfa_c=(Nu_c*Lambda_c)/L_c;

%%výpo et sou initele prostupu tepla

d_s=(d2+d1)/2; %st ední pr m r m d né trubky [m]

%sou initel prostupu tepla [W·m-2·K-1]
k=1/((d_s/(Alfa_h*d1))+((d_s/(Alfa_c*d2))+((d_s/((2*Lambda_Cu)*log(d2/d1))))));

%% metoda Epsilon NTU

Q_mh=((Q_vh*0.001)/60)*Ro_h;    %hmotnostní pr tok teplejší vody [kg·s-1]
Q_mc=((Q_vc*0.001)/60)*Ro_c;    %hmotnostní pr tok studen jší vody [kg·s-1]
A_t=pi*d2*l;                    %teplosm ná plocha [m2]

%tepelná kapacita teplejší látky, která má prote e za 1 sekundu [W·K-1]
C_h=Q_mh*c_v;

%tepelná kapacita studen jší látky, která má prote e za 1 sekundu [W·K-1]
C_c=Q_mc*c_v;

if (C_h<=C_c);
    C_min=C_h;
else C_min=C_c;
end

if (C_h>C_c);
    C_max=C_h;
else C_max=C_c;
end

Fi_max=C_min*(T_hin-T_cin);      %maximální p enášený tok ve vým níku [W]
NTU=(k*A_t)/C_min;              %bezrozm rový parametr NTU [-]

%efektivnost protiproudého vým níku [-]
Epsilon_cf=(1-(exp(-NTU*(1-(C_min/C_max)))))/((1-(C_min/C_max)*exp(-NTU*(1-(C_min/C_max)))));

%efektivnost souproudého vým níku [-]
Epsilon_pf=(1-exp(-NTU*(1+(C_min/C_max))))/(1+(C_min/C_max));

%skute n p enášený tepelný tok protiproudého vým níku [W]
Fi_cf=Epsilon_cf*Fi_max;

%skute n p enášený tepelný tok souproudého vým níku [W]%
```

```

Fi_pf=Epsilon_pf*Fi_max;

%výstupní teplota ohřevající vody pro protiproudý výměník [°C]
T_hout_cf=T_hin-(Fi_cf/(Q_mh*c_v));

%výstupní teplota ohřevané vody pro protiproudý výměník [°C]
T_cout_cf=T_cin+(Fi_cf/(Q_mc*c_v));

%výstupní teplota ohřevající vody pro souproudý výměník [°C]
T_hout_pf=T_hin-(Fi_pf/(Q_mh*c_v));

%výstupní teplota ohřevané vody pro souproudý výměník [°C]
T_cout_pf=T_cin+(Fi_pf/(Q_mc*c_v));

T_oldH = T_phout;
T_phout = (T_hout_cf+T_hout_pf)/2;

T_oldC = T_pcout;
T_pcout = (T_cout_cf+T_cout_pf)/2;

end

%Výpis sledovaných teplot

T_hout_cf%výstupní teplota ohřevající vody pro protiproudý výměník [°C]
T_cout_cf%výstupní teplota ohřevané vody pro protiproudý výměník [°C]

T_hout_pf%výstupní teplota ohřevající vody pro souproudý výměník [°C]
T_cout_pf%výstupní teplota ohřevané vody pro souproudý výměník [°C]

```

Výstupními hodnotami programu jsou výstupní teploty ohřevající a ohřevané vody jak pro souproudé tak i pro protiproudé uspořádání, to znamená celkem 4 hodnoty teplot. Vstupní hodnoty definující konstrukční vlastnosti výměníku (konstantní parametry) jsou délka teplosměnné plochy, vnitřní a vnější průměry Cu trubky, vnitřní průměry PVC trubky, tíhové zrychlení, součinitel tepelné vodivosti mědi a měrná tepelná kapacita vody. Proměnné vstupní hodnoty pro výpočet byly vstupní teploty a objemové průtoky ohřevající vody a ohřevané vody.

5 KONSTRUKCE TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU

Tato kapitola popisuje konstrukci výměníku od návrhu v programu Autodesk Inventor až po samotné zkonstruování. Konstrukce tepelného výměníku byla uskutečněna z dostupného materiálu popsaném v kapitole 3.2.

5.1 3D model

Výměník byl navrhnout a zkonstruován jako trubka v trubce, kde vnitřní trubka byla made z PVC. Vnější trubka má vnější průměr 15 mm, tloušťku stěny 1 mm a délku 1,65 m. PVC Trubka má vnější průměr 40 mm, tloušťku stěny 5 mm a délku 1,56 m. Pro dosažení maximálního teplotního rozdílu mezi vstupy a výstupy byla délka výměníku zvolena jako maximální možná, tj. 1,56 m z toho délka teplosměnné plochy je 1,5 m. Průvodní délka PVC trubky byla 1,65 m, ale z konstrukčních důvodů musela být zkrácena. Detailní výkres sestavy výměníku je umístěn v Příloze B.



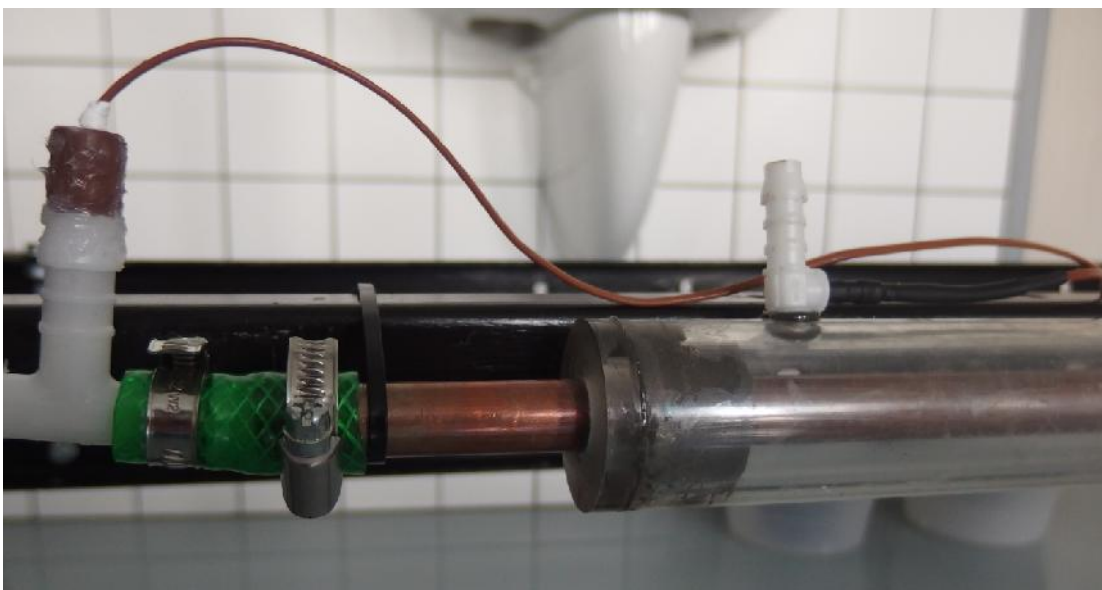
Obrázek 1: 3D model tepelného výměníku

5.2 Popis konstrukce

Pro umístění měřicích trubek do trubky z PVC byly použity válcové PVC zátky, které plnily funkci distanční mřížky spolu s plechovou vzpřímkou o šířce 1 mm, která je umístěna uprostřed výměníku. Plechová vzpříмка je orientovaná ve směru protékající vody tak, aby nebránila jejímu průtoku. Válcové zátky byly vyrobeny na soustruhu a jejich průměr byl zvolen tak, aby byly schopny zaručit těsnost mezi stěnami trubek spolu s těsněním. Všechny mezery jsou utěsněny dvousložkovým epoxidovým lepidlem, které je odolné vůči vodě v rozmezí -20 až 120°C a má dobrou přilnavost k plastu a mědi. Studená voda je do výměníku přiváděna plastovým T-kusem, jenž je zaveden dírou o průměru 6,7 mm. Stejně tak je voda odváděna na druhé straně. Termočlánky jsou umístěny tak, aby měřily teplotu uprostřed proudu a kolmo ke směru proudění. Pro utěsnění teplotních sond byl použit silikon a smršňovací bužírka. Výměník je uložen vodorovně a z důvodu lepšího odvětrání je výstupní otvor studené vody umístěn nahoře. Při měření výstupních parametrů byl výměník upevněn na ocelové konstrukci (viz *Obrázek 2 a 3*):



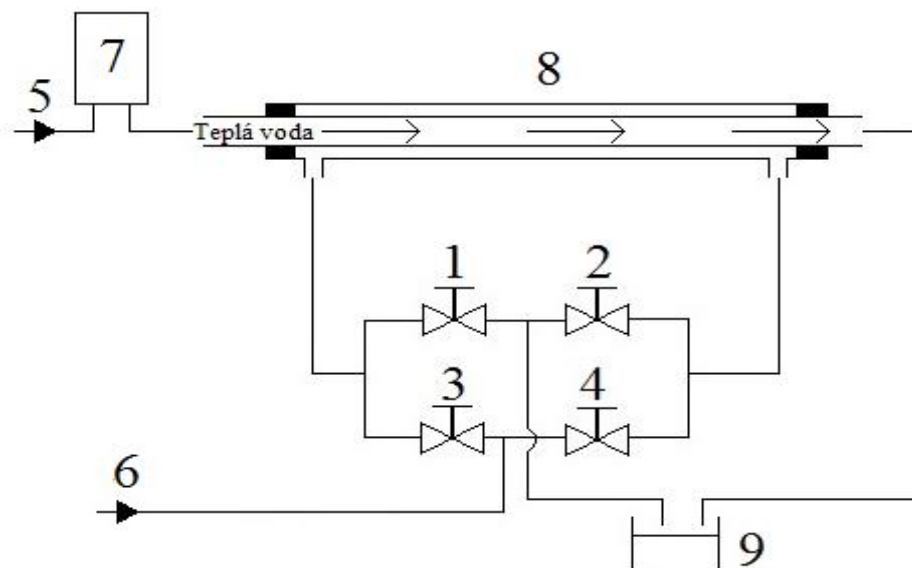
Obrázek 2: Tepelný výměník



Obrázek 3: Detail válcové PVC zátky a T-kusu

5.3 Zapojení tepelného výměníku

Tepelný výměník může sloužit jak v protiproudém, tak v souproudém uspořádání. Ke změně mezi protiproudým a souproudým uspořádáním slouží systém propojených ventilů, které propouští chladicí (studenou) vodu ve stejném směru jak teplou vodu, nebo proti. Jako propojovací cesty mezi ventily jsou použity gumové hadice. Schéma uspořádání ventilů je na Obrázku 4:



Obrázek 4: Schéma zapojení tepelného výměníku

Pro číselné označení na Obrázku 4 platí: 1-4 - ventily, 5 a 6 - vodovodní baterie, 7 - elektrický proudový ohříváček vody, 8 - tepelný výměník, 9 - odtok.

Z Obrázku 4 vyplývá, že při souproudém uspořádání výměníku budou otevřeny ventily číslo 2 a 3, ventily 1 a 4 zstanou zavěny. Naopak při uspořádání protiproudém budou ventily 1 a 4 otevřeny, zatímco 2 a 3 budou zavěny.

Praktické provedení ventilů je znázorněno na Obrázku 5:



Obrázek 5: Zařízení pro změnu směru proudění ve výměníku

6 M ĚNÍ PARAMETR TEPELNÉHO VÝM NÍKU

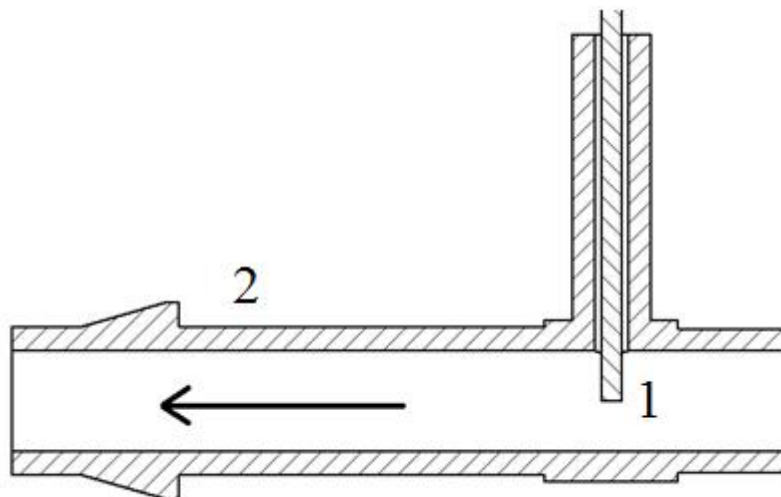
Tato kapitola se detailn ěji zabývá m ěn ěm pr toku a teploty v tepeln ěm vým níku. Základem ov ěn ěn ě proveden ěch výpo ět je prom ěn ěn ě výstupn ěch veli ěin vým níku. Teprve podle nam ěn ěn ěch hodnot, které budeme brát jako referen ěn ěn ě, m ěže být posouzeno, jak se liš ěí teoretick ěe hodnoty od experimentu. Nejd ěležit ějš ě parametry jsou vstupn ěí a výstupn ěí teploty teplotnosn ěch m ědi ěí a jejich pr tok.

6.1 Termoelektrick ěe sn ěma ěe teploty (termo lánky)

Princip t ěchto sn ěma ěí je založen na Seebeckov ěe efektu, kdy výstupn ěí nap ět ěí na svorkách termo lánky je dán sou ěnem termoelektrick ěe koeficientu dan ěho páru vodi ěí (pár vodi ěí s rozd ělnou výstupn ěí prac ěí) a rozd ělu teploty srovn ěvac ěho spoje a spoje termo lánky [6].

Teploty vody byly m ěn ěny t ěmi termo lánky HSTC-TT-K-24S-36 od firmy Omega. Tento termo lánek s teflonovou izolací má hermeticky uzav ěn ě m ěcí spoj a je vhodn ěy pro m ěn ěí teplot do 250 °C. Termo lánek je typu K s t ěídou p ěsnosti 1, a jeho materi ělov ěe složen ěí je Ni-Cr (+ p ěl) a Ni-Al (- p ěl) [8]. Pro termo lánek typu K s t ěídou p ěsnosti 1 je podle literatury [9] uv ěd ěna nep ěsnost $E_t = 1,5$ °C. Jako m ěcí jednotka byla použit ěa m ěcí karta Advantech USB 4718 s osm ěí analogov ěými vstupy. Z ěpis v ěsledk ěa nastaven ěí m ěn ěí a byly provedeny v aplikaci Data Logger.

Teplota vody byla m ěn ěna uprost ěd proudu, kolmo ke sm ěru proud ěn ěí. Sch ěma um ěst ěn ěi termo lánku do T-kusu p ě ěm ěn ěí je na *Obrázku 6*. Š ěipka na obrázku zn ězoruje sm ěr proud ěn ěí kapaliny. Pro ěseln ěe ozna ěn ěí na obrázku plat ěí: 1- termo lánek; 2- T-kus.



Obrázek 6: Sch ěma um ěst ěn ěi termo lánku p ě ěm ěn ěí

Postup výpočtu chyby měřící karty byl převzat z [9]. Pro termoelektrické napětí termoládky typu K v závislosti na teplotě platí vztah:

$$U_t = \sum_{i=0}^n a_i [t + c_0 \exp[c_1 (t - 126,9686)^2]] \quad (\mu\text{V}) \quad (27)$$

kde t je měřená teplota termoládkou a a_i , c_0 a c_1 jsou koeficienty termoládky typu K uvedeny pro všechny řádky v Tabulce 2:

Tabulka 2: Koeficienty pro výpočet termoelektrického napětí

a_0	-1,7600413686E+01
a_1	3,8921204975E+01
a_2	1,8558770032E-02
a_3	-9,9457592874E-05
a_4	3,1840945719E-07
a_5	-5,6072844889E-10
a_6	5,6075059000E-13
a_7	-3,2020720000E-16
a_8	9,7151147000E-20
a_9	-1,2104720000E-23
c_0	1,1859760000E+02
c_1	-1,1834320000E-04

Přesnost p měřící karty Advantech USB 4718 je $\pm 0,1\%$ pro napájecí výstup termoládky [10]. Při dosažení konkrétní měřené teploty do této rovnice se vypočte hodnota termoelektrického napětí. Pokud je známa přesnost karty, měříme chybu měřící karty přepočtenou na $^{\circ}\text{C}$ vyjádřit vztahem:

$$E = \left(\frac{\left(U_t \frac{p}{100} \right) + U_t}{U_t} \right) [t - t] \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (28)$$

Při konkrétním vyšetření této chyby v rozsahu $0-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se pohybuje v mezích $0-0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je ve srovnání s E_t zanedbatelná.

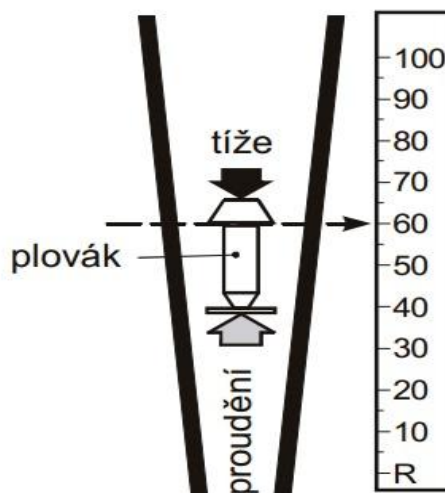
Celková chyba při měření termoládkou E_{celk} je tedy dána vztahem [11]:

$$E_{celk} = E + E_t \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (29)$$

6.2 Rotametr

Stav prouku lze kontrolovat pomocí snímač prouku, například turbínového, plovákového, lopatkového, vírového, ultrazvukového...[6] Pro měření prouku byl zvolen plovákový snímač prouku neboli rotametr. Princip rotametru spočívá v tom, že procesní kapalina protéká proudem trubici s plovákem, a to zdola nahoru, čímž způsobuje posun

plováku ve směru osy. Po celé délce prtokové trubice se vytváří závislost mezi průměrem plováku a vnitřním průměrem trubice. Zatímco je průměr plováku stálý, vnitřní průměr trubice se směrem nahoru ztlučuje. V případě, že je prtoková míra konstantní, diferenční tlak nad plovákem odpovídá skutečné hmotnosti plováku, přičemž plováček se ustálí v bodě, který představuje prtokovou míru. Když zesílí prtok, zvětší se i síla působící na plováček. Tato síla posune plováček směrem nahoru, dokud nedosáhne stejné hodnoty jako dříve. V případě, že prtok klesá, posunuje se plováček směrem dolů. Postavení plováku je tedy přímo úměrné prtoku. [7]



Obrázek 7: Princip rotametru[6]

Výhod rotametru je mnoho. Mezi ně patří vysoká spolehlivost při použití jednoduchého měřicího principu. Není potřeba žádného napájení, což snižuje náklady na instalaci a celkové náklady měřicího ústrojí. [7]

Jelikož bylo potřeba měřit dva prtoky a k dispozici byl pouze jeden rotametr, objemový prtok studené vody Q_{v-c} byl měřen odpouštěním vytékající vody do nádoby. Následně byl přesně odměřen, aby bylo možno spočítat hodnoty objemového prtoku.

6.3 Kalibrace rotametru

Pro správné stanovení prtoku ohřívající (teplé) vody byl použit rotametr. Základem kalibrace rotametru je zdroj vody o konstantním prtoku. Jako zdroj byl použit vodovod s maximálním objemovým prtokem 540 l/h. Rozsah výchytky kalibrovaného prtokoměrů byl 30 l/h.



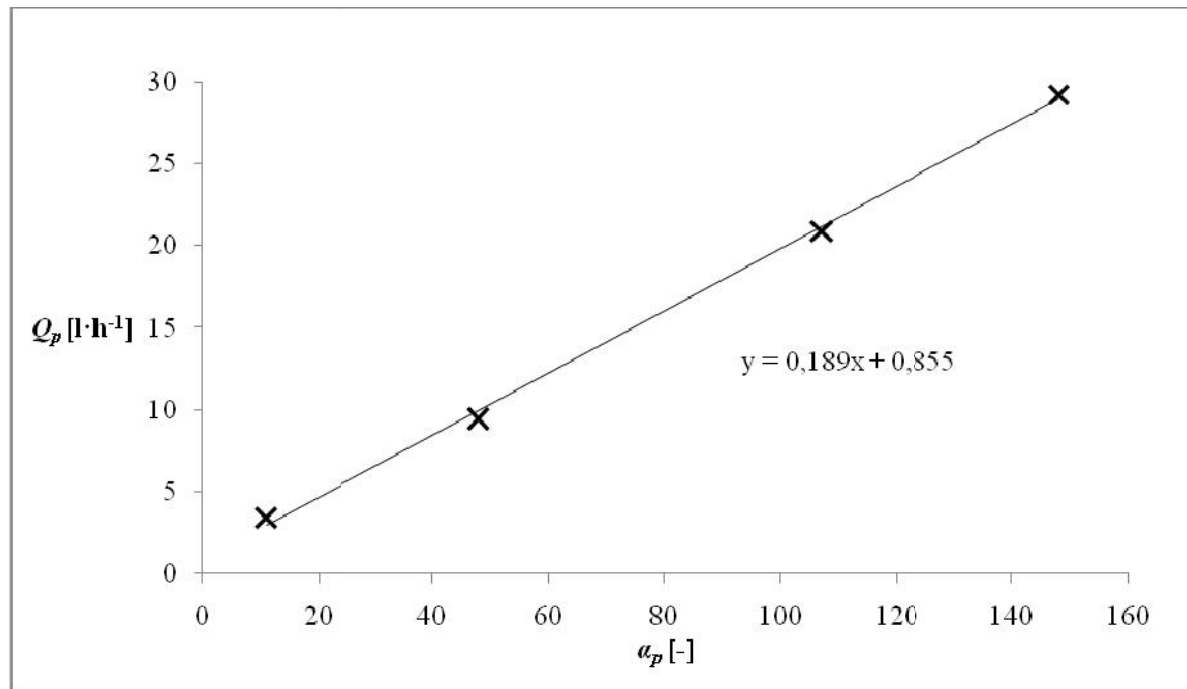
Obrázek 8: Rotametr

Při kalibraci byl zvolen následující postup: nejprve bylo potřeba odvědušnit plovákové hadice, které byly připojeny na rotametr. Malé bublinky vzduchu mohou způsobit nadnášení plováku a tím způsobit v měření nepřesnost kalibrace. Po odvědušnění následuje proměření průtokem. Pro ustálenou výchylku na průtokoměr se při daném průtokem plní odměrná nádoba a měří se čas jejího plnění. Čím delší čas plnění je zvolen, tím přesnější je měření. Po uplynutí určité doby se odečte objem vody, kterým byla odměrná nádoba naplněna. Hodnota objemu ovšem není přesná z důvodu vody ulpělé na stěnách nádoby z předcházejícího měření. Proto je potřeba provést korekci a odečíst objem vody zbylý na stěnách, který se stanovil opakovaným odkapáním vody pomocí gravitační síly při obrácení nádoby. Měření bylo provedeno 4 krát, každé pro různou hodnotu průtokem. Z naměřených hodnot lze získat závislost výchylky průtokoměru na objemovém průtokem a tímto si stanovit stupnici pro odečítání průtokem. Změřené hodnoty jsou uvedeny v *Tabulce 3*:

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro kalibraci rotametru

t_p [s]	V_b [ml]	V_s [ml]	V_n [ml]	ρ [-]	Q_p [$\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$]
58	474	2,5	471,5	148	29,3
80	467	2,5	464,5	107	20,9
181	478	2,5	475,5	48	9,5
510	483	2,5	480,5	11	3,4

kde t_p je čas plnění nádoby, V_b je objem vody v nádobě, V_s je objem vody zbylý na stěnách po jejím vyprázdnění, V_n je objem vody v nádobě po korekci, ρ je výchylka rotametru a Q_p je objemový průtokem vody při kalibraci. Vhodným proložení naměřených hodnot lze získat vztah, pro určení okamžitého průtokem v závislosti na výchylce rotametru (*Obrázek 9*):



Obrázek 9: Pr toková křivka rotametru

V Tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty pr toku pro různé výchylky rotametru. Výsledky jsou založeny na rovnici regrese z Obrázku 9:

Tabulka 4: Hodnoty pr toku pro vybrané hodnoty výchylky pr tokometru

α_p [-]	Q_p [l·h ⁻¹]
10	2,7
20	4,6
30	6,5
40	8,4
50	10,3
60	12,2
70	14,1
80	16,0
90	17,9
100	19,8
110	21,6
120	23,5
130	25,4
140	27,3
150	29,2

6.4 Zapojení tepelného výměníku

Na Obrázku 10 je znázorněno celkové zapojení tepelného výměníku v etn rotametru, elektrického pr tokového ohříváče vody, termo článků a rotametru.



Obrázek 10: Mění parametr tepelného výměníku

6.5 Naměřené výsledky

Níže uvedené *Tabulky 5 a 6* obsahují naměřené vstupní a výstupní hodnoty teplot a průtoky jak pro souprůdné, tak pro protiprůdné uspořádání. Měřeny byly objemové průtoky obou teplotnosných médií Q_{v-c} a Q_{v-h} a všechny vstupní a výstupní teploty T_{c-in} , T_{c-out} , T_{h-in} a T_{h-out} . Tyto teploty byly měřeny pro 2 různé objemové průtoky ohřívající vody Q_{v-h} a 5 různých průtoků Q_{v-c} , tedy celkem 10 měření pro každé uspořádání. Hodnoty Q_{v-h} byly zvoleny pro polovinu a maximální rozsah rotametru, tj. 0,25 a 0,49 l/min. Z důvodu tlakových ztrát v celém systému tepelného výměníku byl maximální dosažitelný průtok Q_{v-c} 4,5 l/min a jako minimální průtok ohřívající vody byla zvolena hodnota 1,09 l/min. Další hodnoty byly zvoleny rovnoměrně v tomto rozmezí, tj. 1,75, 2,5 a 3,5 l/min.

Tabulka 5: Naměřené teploty a průtoky pro souproudý výměník

Souproudé uspořádání						
-	Q_{v-h} [l/min]	Q_{v-c} [l/min]	T_{h-in} [°C]	T_{c-in} [°C]	T_{h-out} [°C]	T_{c-out} [°C]
Experiment 1	0,25	1,09	81	13	32	23,5
Experiment 2	0,25	1,75	80	12	27,5	21,5
Experiment 3	0,25	2,5	80	12	25	19
Experiment 4	0,25	3,5	82	12	24	17,25
Experiment 5	0,25	4,5	86	12	24,5	15,5
Experiment 6	0,49	1,09	77,5	13,25	43,5	27,85
Experiment 7	0,49	1,75	78	12	40	25,5
Experiment 8	0,49	2,5	79	12,5	37,25	22,5
Experiment 9	0,49	3,5	78,5	12	35	19
Experiment 10	0,49	4,5	77	12	35	16

Tabulka 6: Naměřené teploty a průtoky pro protiproudý výměník

Protiproudé uspořádání						
-	Q_{v-h} [l/min]	Q_{v-c} [l/min]	T_{h-in} [°C]	T_{c-in} [°C]	T_{h-out} [°C]	T_{c-out} [°C]
Experiment 1	0,25	1,09	84,5	13,75	30	26
Experiment 2	0,25	1,75	84	12,5	26	21,25
Experiment 3	0,25	2,5	83,5	12,5	24	19
Experiment 4	0,25	3,5	85	12,5	22,5	17,5
Experiment 5	0,25	4,5	90	12,75	22,5	16,25
Experiment 6	0,49	1,09	78	13,75	45	29
Experiment 7	0,49	1,75	77	12	41	23,5
Experiment 8	0,49	2,5	79,5	12,5	38,5	21,5
Experiment 9	0,49	3,5	80	12	36	19
Experiment 10	0,49	4,5	77,5	12	34	16

Tyto výsledky jsou dále porovnávány s teoretickými hodnotami v kapitole 7. Rovněž je zde provedena diskuze rozdílů mezi výpočty a experimenty.

7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDK

V této části budou porovnány experimentální a teoretické výsledky parametr výměníku. Na konci bude provedena diskuze výsledk .

7.1 Porovnání hodnot

V *Tabulkách 7 a 8* jsou uvedeny a porovnány hodnoty vypočtené programem Matlab s hodnotami změřenými. Rozdíly naměřených a vypočtených hodnot jsou vypočteny dle vztahu:

$$\Delta T_{\text{exp}} = T_{\text{matlab}} - T_{\text{exp}} \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (30)$$

kde T_{exp} je teplotní rozdíl experimentu a výpočtu, T_{exp} je naměřená teplota experimentu a T_{matlab} je vypočtená teplota experimentu v programu Matlab.

V tabulkách je rozdíl uveden taky v %, kde jako referenční hodnoty byly použity hodnoty experimentu. V případě teplé vody je rozdíl $T_{\text{exp}\%}$ počítán dle *Rovnice 31*

$$\Delta T_{\text{exp}\%} = \left(\frac{T_{\text{matlab}} - T_{\text{exp}}}{T_{h\text{-out}} - T_{h\text{-in}}} \right) 100 \text{ (\%)} \quad (31)$$

V případě studené vody dle *Rovnice 32*

$$\Delta T_{\text{exp}\%} = \left(\frac{T_{\text{matlab}} - T_{\text{exp}}}{T_{c\text{-out}} - T_{c\text{-in}}} \right) 100 \text{ (\%)} \quad (31)$$

Tabulka 7: Porovnání výsledk pro souproudé uspo ádání

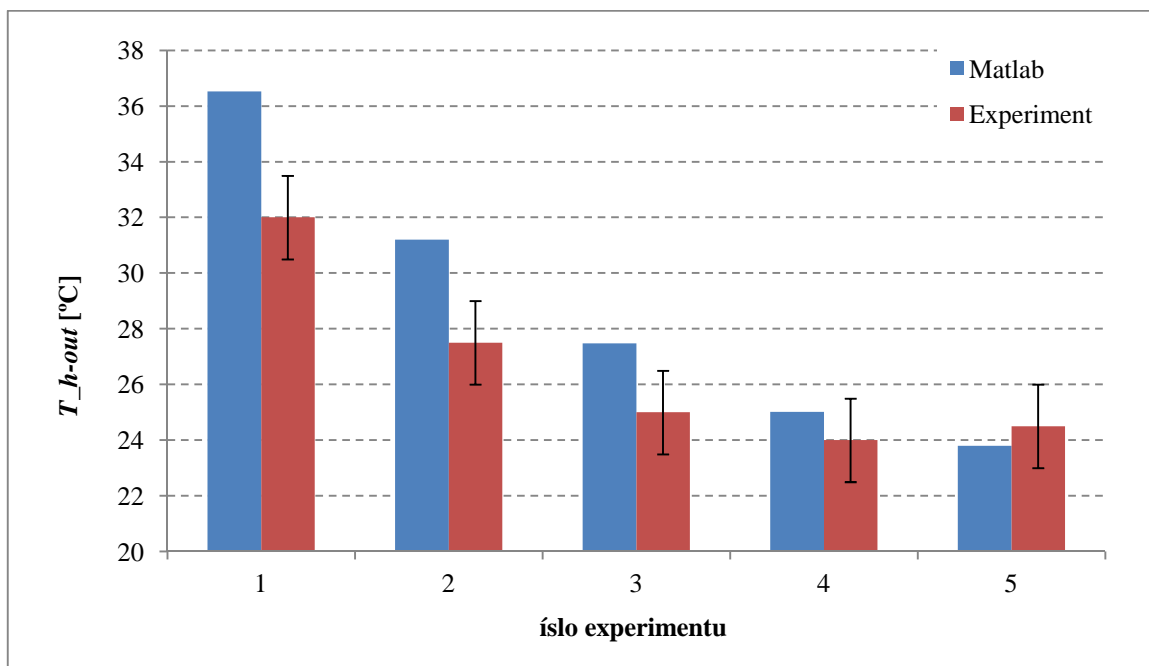
Souproudé uspo ádání						
-	Q_{y-h} [l/min]	Q_{y-c} [l/min]	T_{h-in} [°C]	T_{c-in} [°C]	T_{h-out} [°C]	T_{c-out} [°C]
Experiment 1	0,25	1,09	81	13	32	23,5
Matlab	0,25	1,09	81	13	36,52	23,15
Rozdíl 1	-	-	-	-	4,52 (9,2%)	-0,35 (-3,3%)
Experiment 2	0,25	1,75	80	12	27,5	21,5
Matlab	0,25	1,75	80	12	31,2	18,94
Rozdíl 2	-	-	-	-	3,7 (7,1%)	-2,56 (-26,9%)
Experiment 3	0,25	2,5	80	12	25	19
Matlab	0,25	2,5	80	12	27,48	17,23
Rozdíl 3	-	-	-	-	2,48 (4,5%)	-1,77 (-25,3%)
Experiment 4	0,25	3,5	82	12	24	17,25
Matlab	0,25	3,5	82	12	25,01	16,05
Rozdíl 4	-	-	-	-	1,01 (1,7%)	-1,2 (-22,8%)
Experiment 5	0,25	4,5	86	12	24,5	15,5
Matlab	0,25	4,5	86	12	23,8	15,45
Rozdíl 5	-	-	-	-	-0,7 (-1,1%)	-0,05 (-1,4%)
Experiment 6	0,49	1,09	77,5	13,25	43,5	27,85
Matlab	0,49	1,09	77,5	13,25	48,58	26,13
Rozdíl 6	-	-	-	-	5,08 (14,9%)	-1,72 (-11,7%)
Experiment 7	0,49	1,75	78	12	40	25,5
Matlab	0,49	1,75	78	12	44,15	21,39
Rozdíl 7	-	-	-	-	4,15 (10,9%)	-4,11 (-30,4%)
Experiment 8	0,49	2,5	79	12,5	37,25	22,5
Matlab	0,49	2,5	79	12,5	40,78	19,93
Rozdíl 8	-	-	-	-	3,53 (8,5%)	-2,57 (-25,7%)
Experiment 9	0,49	3,5	78,5	12	35	19
Matlab	0,49	3,5	78,5	12	37,04	17,76
Rozdíl 9	-	-	-	-	2,04 (4,7%)	-1,24 (-17,7%)
Experiment 10	0,49	4,5	77	12	35	16
Matlab	0,49	4,5	77	12	34,57	16,59
Rozdíl 10	-	-	-	-	-0,43 (-1%)	0,59 (14,7%)
Pr m rý rozdíl všech experiment					2,6 (6,3%)	-1,5 (-18%)

Tabulka 8: Porovnání výsledk pro protiproudé uspo ádání

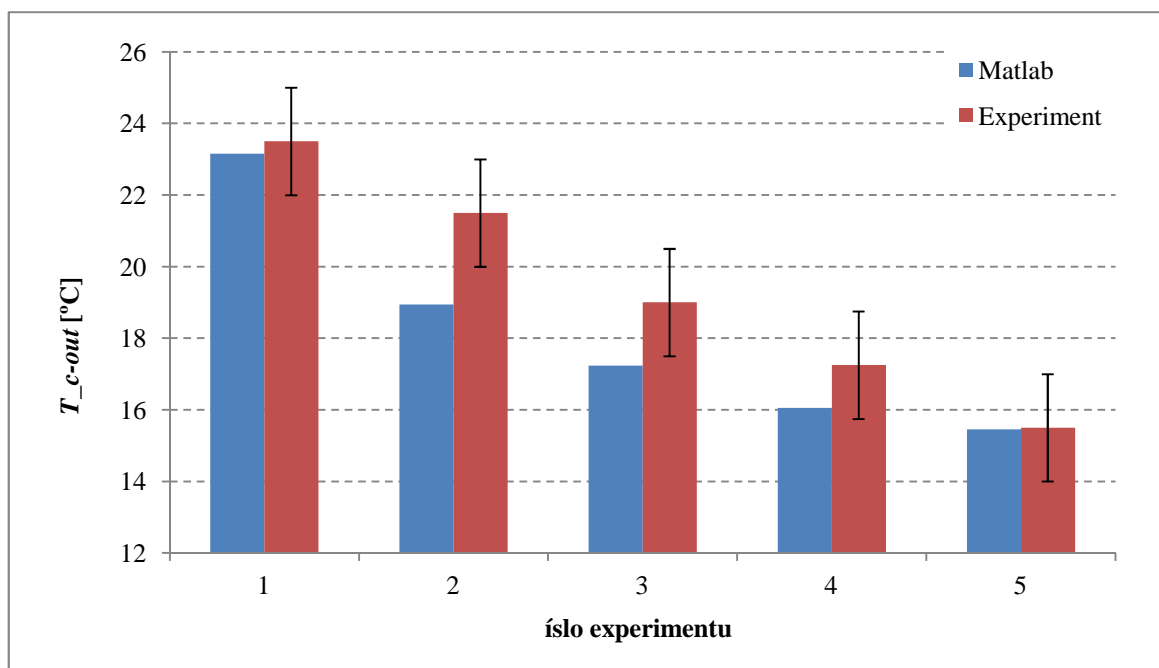
Protiproudé uspo ádání						
-	Q_{y-h} [l/min]	Q_{y-c} [l/min]	T_{h-in} [°C]	T_{c-in} [°C]	T_{h-out} [°C]	T_{c-out} [°C]
Experiment 1	0,25	1,09	84,5	13,75	30	26
Matlab	0,25	1,09	84,5	13,75	34,82	25,09
Rozdíl 1	-	-	-	-	4,82 (8,8%)	-0,91 (-7,4%)
Experiment 2	0,25	1,75	84	12,5	26	21,25
Matlab	0,25	1,75	84	12,5	29,91	20,19
Rozdíl 2	-	-	-	-	3,91 (6,7%)	-1,06 (-12,1%)
Experiment 3	0,25	2,5	83,5	12,5	24	19
Matlab	0,25	2,5	83,5	12,5	26,16	18,21
Rozdíl 3	-	-	-	-	2,16 (2,2%)	-0,79 (-12,2%)
Experiment 4	0,25	3,5	85	12,5	22,5	17,5
Matlab	0,25	3,5	85	12,5	23,79	16,85
Rozdíl 4	-	-	-	-	1,29 (2,1%)	-0,65 (-13%)
Experiment 5	0,25	4,5	90	12,75	22,5	16,25
Matlab	0,25	4,5	90	12,75	22,96	16,46
Rozdíl 5	-	-	-	-	0,46 (0,7%)	0,21 (6%)
Experiment 6	0,49	1,09	78	13,75	45	29
Matlab	0,49	1,09	78	13,75	47,59	27,29
Rozdíl 6	-	-	-	-	2,59 (7,8%)	-1,71 (-11,2%)
Experiment 7	0,49	1,75	77	12	41	23,5
Matlab	0,49	1,75	77	12	42,38	21,61
Rozdíl 7	-	-	-	-	1,38 (3,8%)	-1,89 (-16,4%)
Experiment 8	0,49	2,5	79,5	12,5	38,5	21,5
Matlab	0,49	2,5	79,5	12,5	39,56	20,27
Rozdíl 8	-	-	-	-	1,06 (2,6%)	-1,23 (-13,7%)
Experiment 9	0,49	3,5	80	12	36	19
Matlab	0,49	3,5	80	12	36,18	18,09
Rozdíl 9	-	-	-	-	0,18 (0,4%)	-0,91 (-13%)
Experiment 10	0,49	4,5	77,5	12	34	16
Matlab	0,49	4,5	77,5	12	33,56	16,75
Rozdíl 10	-	-	-	-	-0,44 (-1%)	0,75 (-18,8%)
Pr m rný rozdíl všech experiment					1,7 (3,6%)	-0,82 (-12,4%)

N které rozdílky pro T_{c-out} vyjád ené v procentech dosahují hodnot až 30%. Je to zp sobeno malým rozsahem m ených vstupních a výstupních teplot, ze kterého je tento procentuální rozdíl po ítán.

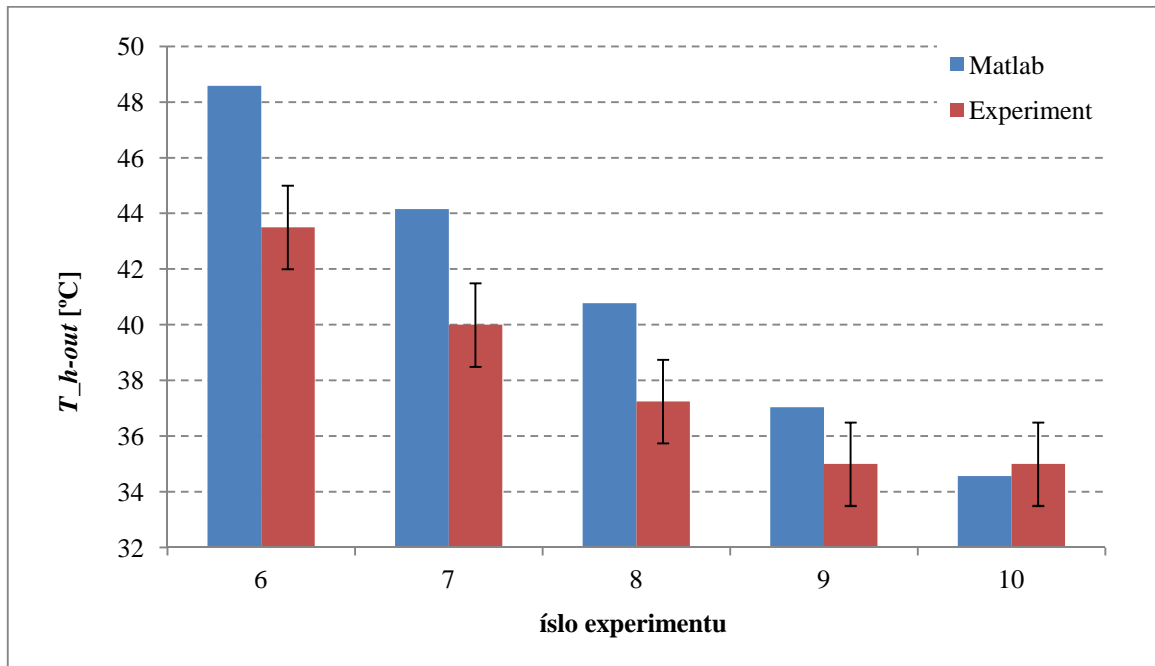
Pro p ehledn jší porovnání dosažených výsledk slouží sloupcové grafy na *Obrázkách 11-18*, které jsou sestrojeny na základ *Tabulek 7 a 8*. Chybové úse ky vyjad ují celkovou chybu p i m ení termo lánkem E_{celk} . Hodnoty E_{celk} jsou dány p edevším nep esností termo lánku a pohybují se v rozmezí 1,5 - 1,51 °C.



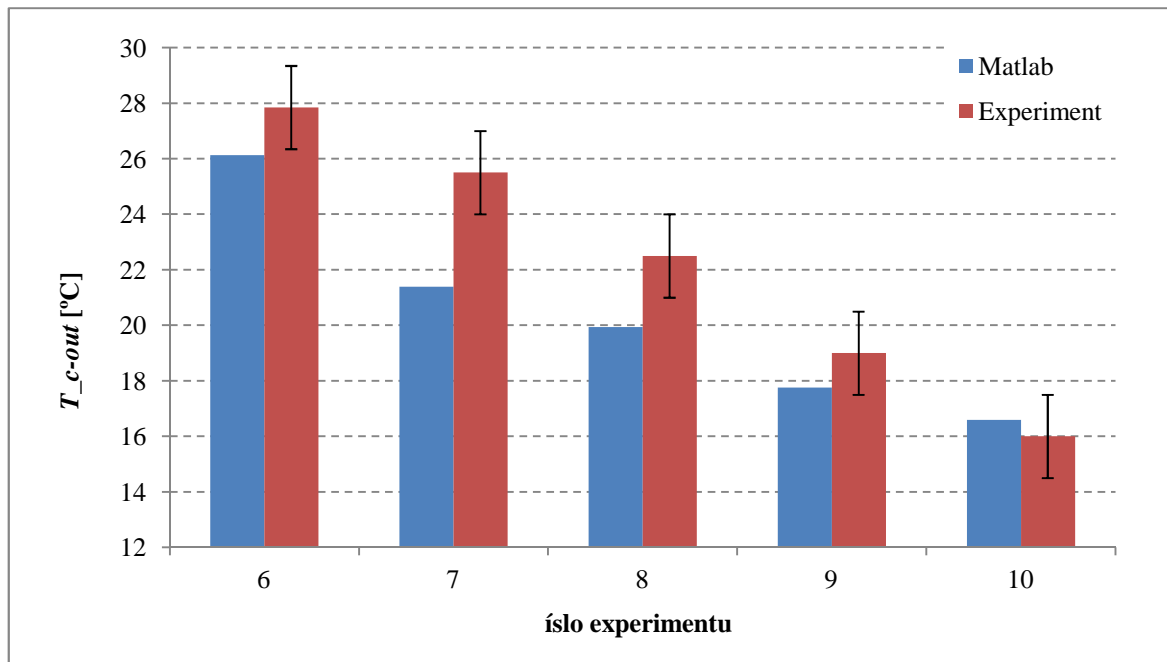
Obrázek 11: Hodnoty T_{h-out} pro souproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min



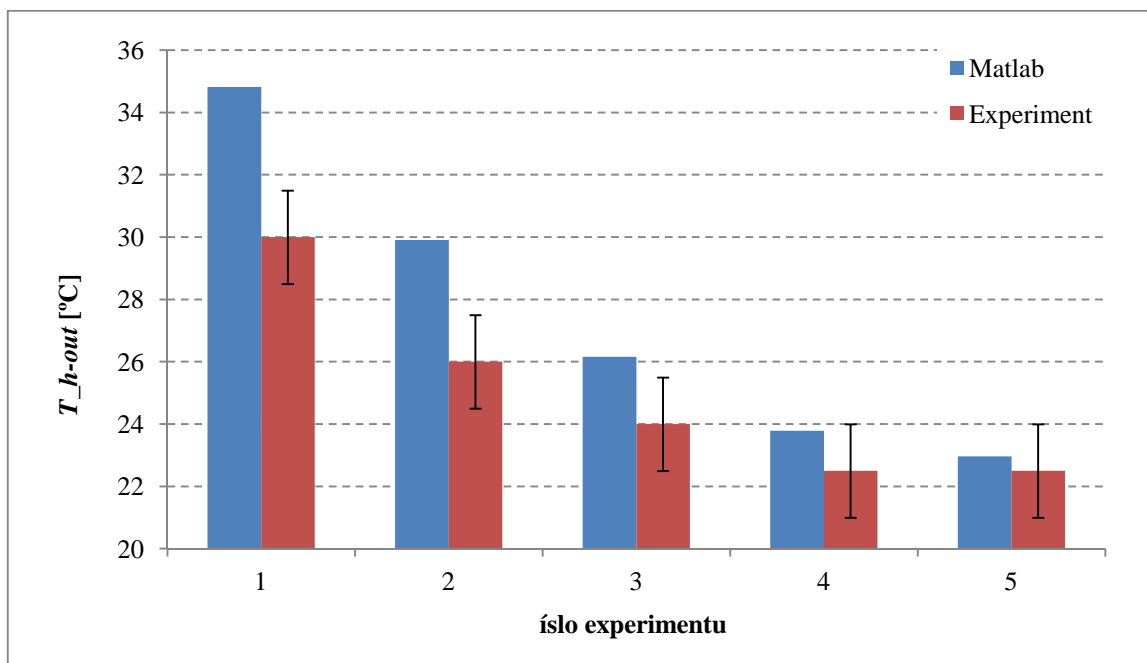
Obrázek 12: Hodnoty T_{c-out} pro souproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min



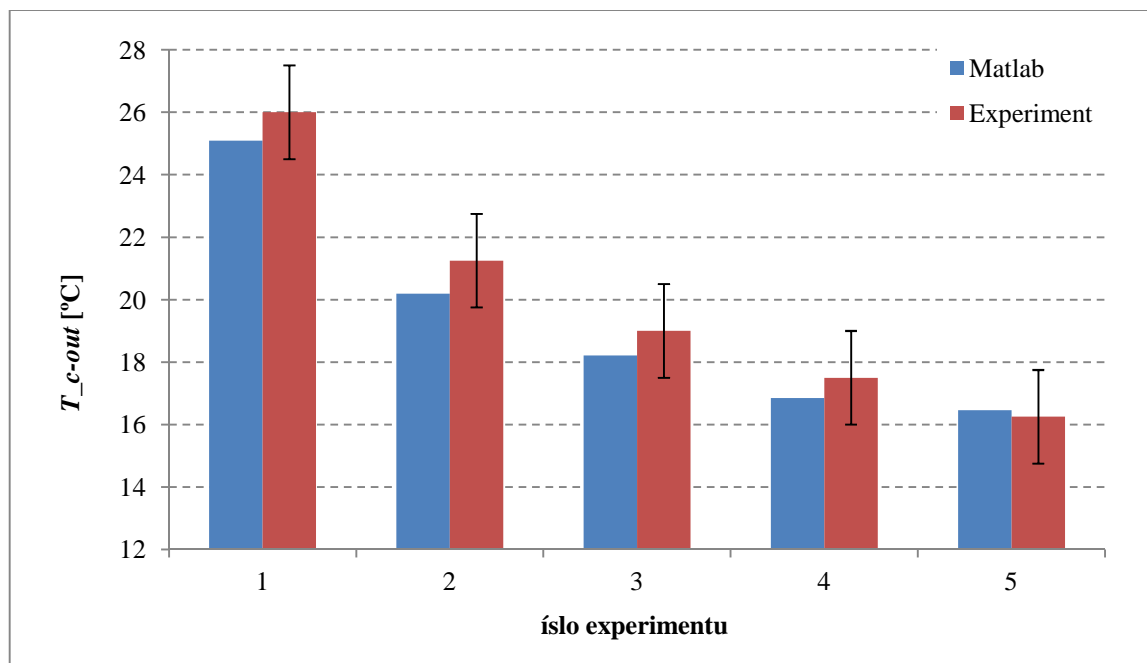
Obrázek 13: Hodnoty T_{h-out} pro souproutý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min



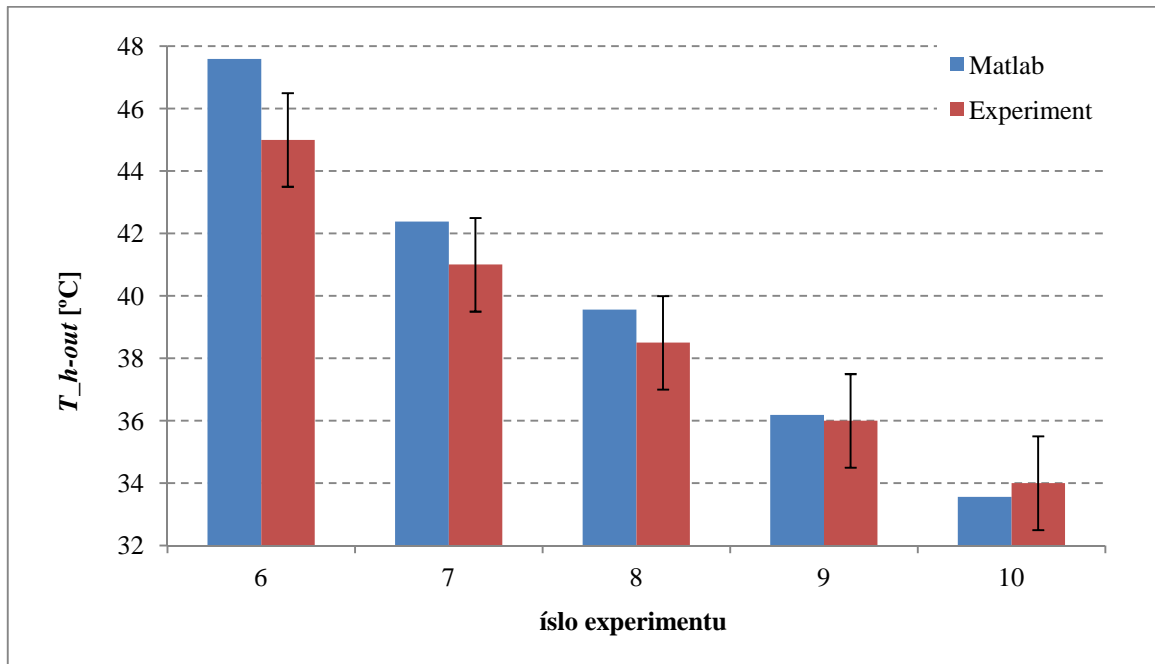
Obrázek 14: Hodnoty T_{c-out} pro souproutý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min



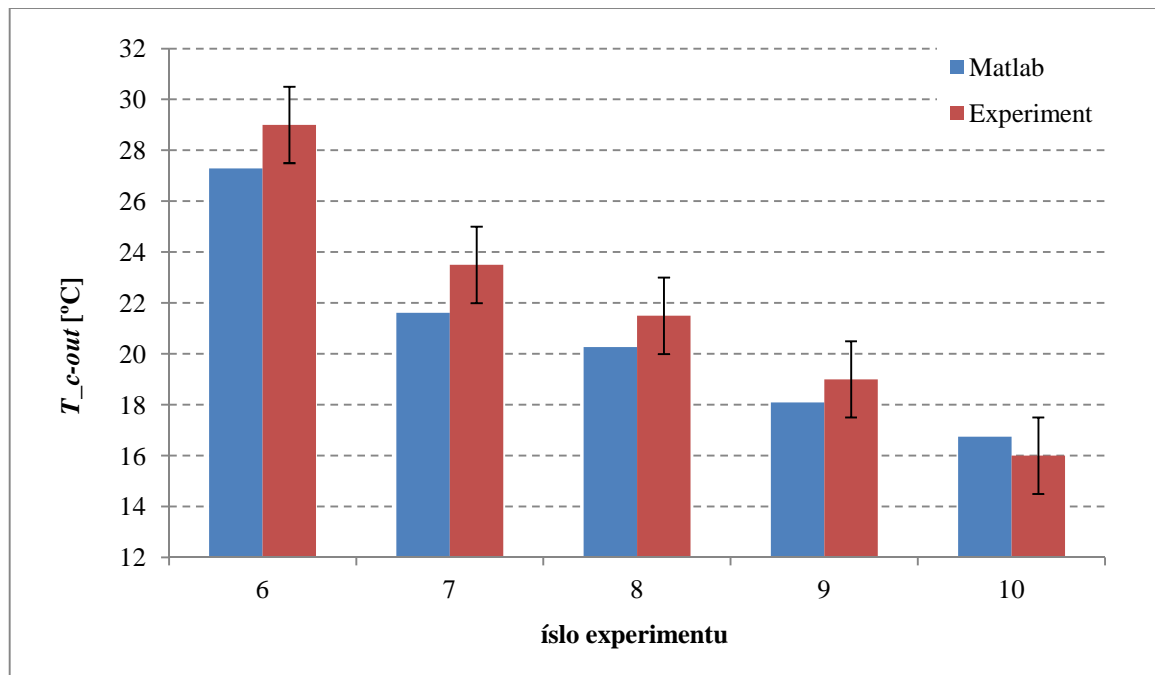
Obrázek 15: Hodnoty T_{h-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min



Obrázek 16: Hodnoty T_{c-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,25$ l/min



Obrázek 17: Hodnoty T_{h-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min



Obrázek 18: Hodnoty T_{c-out} pro protiproudý vým ník - $Q_{v-h}=0,49$ l/min

7.2 Diskuze výsledk

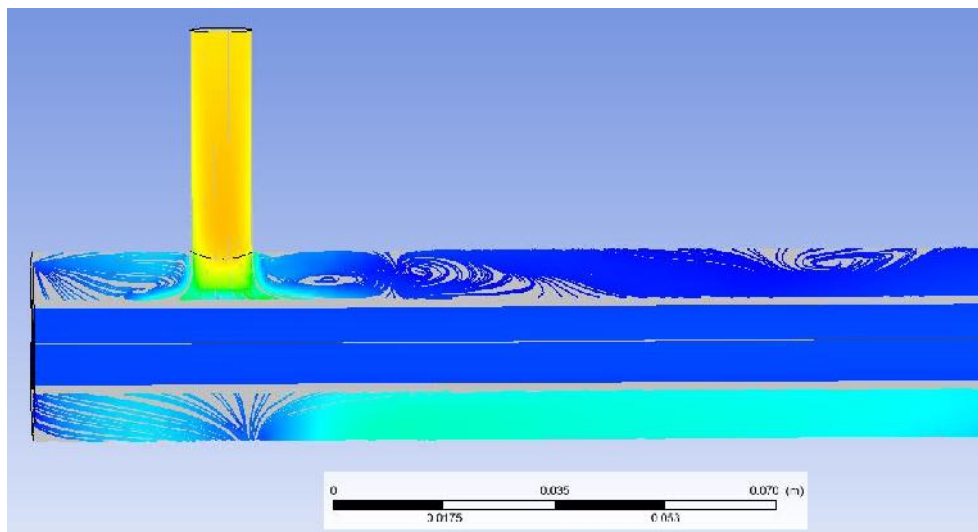
Z naměřených hodnot lze usoudit, že tepelný výměník předává teplo efektivněji než předpokládají výpočty. Z grafů na *Obrázcích 11-18* lze vysledovat, že rozdíl mezi hodnotami dosaženými při experimentu a výpočtovými hodnotami se zmenšuje při rostoucím průtoku chladicí vody Q_{v-c} . Rozdíly mezi výpočty a experimenty mohly být způsobeny jak nepresnostmi měření tak zjednodušujícími předpoklady uvedenými v kapitole 4.2, tj.: tepelná kapacita vody c_v a součinitel tepelné vodivosti mědi jsou konstantní, k výměnu tepla dochází pouze mezi teplotonosnými médii (neuvažujeme ztráty do okolí) a prostory s proudící vodou jsou rovnoběžné.

Jelikož tepelná kapacita vody c_v se v teplotním rozmezí 12-86 °C mění v rozsahu 4188-4201 J·kg⁻¹·K⁻¹ [12], bude příspěvek chyby tohoto zjednodušení minimální. Podobné je to i se součinitelem tepelné vodivosti mědi, kdy v tomto rozmezí teplot mění svoji hodnotu od 395 - 401 W·m⁻¹·K⁻¹ [13].

Aby se minimalizovaly ztráty tepla do okolí, je teplá voda vedena právě uprostřed Cu trubky a studená mezi Cu a PVC. Jelikož je stěna PVC trubky silná 5 mm, materiál je poměrně dobrý izolant a teplota studené chladicí vody se výrazně neliší od teploty okolí, bude výměna tepla s okolím minimální. Toto ale neplatí pro průvod teplé vody do mědi trubky. Tento průvod je znázorněn na *Obrázku 3*. Z obrázku je zřejmé, že z povrchu Cu trubky, která přiléhá ke PVC trubce, bude unikat teplo do okolí. Jelikož teplota vody se pohybuje kolem 80 °C a termolánek měří 7 cm od okraje, je odhadováno ochlazení vody na tomto úseku asi o 1 °C, zvláště když průtoky teplé vody jsou nízké.

Tyto ztráty tepla do okolí potvrzují, že výstupní teplota teplé vody T_{h-out} je nižší než očekávaná. Nevysvětlují ale fakt, že teplota ohřívané vody je vyšší než výpočtová. Pokud by tedy měla platit rovnice tepelné bilance, dalo by se očekávat, že teplota chladicí vody bude nižší, protože k předání tepla nedošlo uvnitř výměníku, ale ještě před ním. Je tedy zřejmé, že pokud i přes ztráty do okolí je výstupní teplota chladicí vody vyšší než výpočtová, musí být tepelný výměník efektivnější než ta, která byla předpokládána.

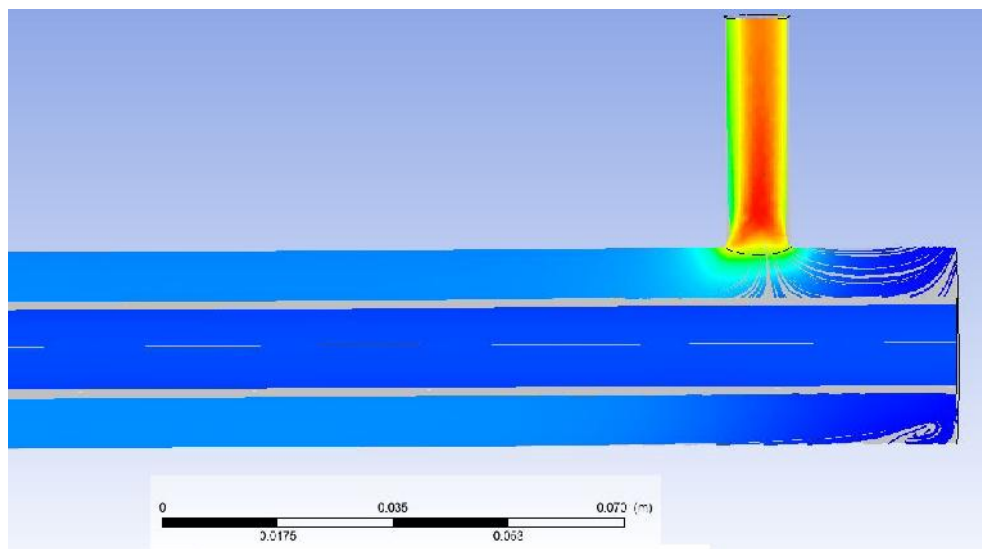
Jelikož byly i výpočty pro zjednodušení předpokládány rovnoběžné prostory s proudící vodou, vzniklá odchylka mohla být způsobena i výpočtovou charakteristikou proudění, který má přímý vliv na koeficient prostupu tepla. Průběh proudění vody v prvních 25 cm výměníku při průtoku 3 l/min byl nasimulován v programu ANSYS a je znázorněn na *Obrázku 19*:



Obrázek 19: Simulace proudění na vstupu výměníku v programu ANSYS

Z Obrázku 19 je zřejmé, že charakter proudění v tomto úseku je turbulentní, a výrazně se liší od ustáleného periodického proudění, které bylo pro tento případ uvažováno ve výpočtech. Díky turbulentnímu proudění bude hodnota Reynoldsova čísla v tísni a tím pádem i v tísni souinitel prostupu tepla na povrchu tepelného výměníku. Tato závislost plyne z rovnic 19 a 24.

Průběh proudění studené vody na výstupu z výměníku je znázorněn na Obrázku 20 a nevznikají v něm turbulence.



Obrázek 20: Simulace proudění na výstupu výměníku v programu ANSYS

Z Obrázků 11-18 je také vidět, že s rostoucím průtokem chladicí vody se teplotní rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami zmenšuje, a při maximálním průtoku 4,5 l/min jsou dokonce hodnoty T_{h-out} vyšší a T_{c-out} nižší než vypočtené.

Simulace v programu ANSYS byly provedeny nad rámec bakalářské práce, ve snaze o bližší pochopení dějů souvisejících s výměnou tepla v tepelném výměníku. Z důvodu nestability simulací ovšem nemohly být dokončeny. Nestabilita byla pravděpodobně způsobena omezeným počtem buněk v meshi, což je omezení pro studentské verze programu ANSYS.

Je nutno zdůraznit, že celé měření je zatíženo nepřesnostmi při měření teploty. Celková chyba při měření teplotním článkem se pohybuje kolem 1,5 °C.

8 ZÁV R

Cílem této bakalářské práce byl návrh, výpočet a zkonstruování tepelného výměníku pro účely výuky na pracovišti UEEN. Výměník má sloužit jako samostatná laboratorní úloha, eventuálně pro dochlazování chladicí vody tepelného čerpadla, které se nachází v solární laboratoři. Jelikož je vnější stěna výměníku průhledná, má být také využit jako názorná pomůcka při zkoumání proudění tekutin.

Úvodní část práce se zabývá významem tepelných výměníků v dnešním průmyslu, jejich nejčastějším použitím a rozdělením podle základních kritérií. Dále jsou uvedeny výchozí podmínky pro konstrukci tepelného výměníku spolu se zvoleným řešením zadání.

Další část se podrobněji věnuje výpočtu průstupu tepla a chování teplotních médií při průtoku výměníkem. Jsou uvedeny vztahy pro určení koeficientu průstupu tepla a metody pro výpočet výstupních teplot teplotních médií v závislosti na jejich průtoku pomocí metody NTU. Při teoretických výpočtech byly uvažovány zjednodušující předpoklady, které zjednodušily postup výpočtu.

Dále je popsán postup konstrukce výměníku a jeho uspořádání. Příloha B obsahuje výkresy soustavy i všech částí, ze kterých je konstrukce sestavena. Konstrukce byla realizována z dostupného materiálu, to je PVC a Cu trubek. Detailnější návrh a výkresy konstrukce výměníku byl proveden v programu Autodesk Inventor Professional. Následuje popis použitých materiálů a postup při proměření vstupních a výstupních veličin tepelného výměníku.

V závěru práce jsou zkoumány rozdíly mezi teoreticky vypočtenými a naměřenými hodnotami. Bylo zjištěno, že pro nižší průtoky chladicí vody tepelný výměník předává teplo efektivněji než předpokládaly výpočty. Teprve pro vyšší průtoky chladicí vody se výpočty blíží k hodnotám získaným z experimentu. V závislosti na průtoku chladicí vody, tepelný výměník chladil vodu z teplot kolem 80°C na teplotu 22-45°C. Chladicí voda měla teplotu na vstupu cca 13°C. Rozdíl oteklavých a naměřených výstupních teplot teplejší vody T_{h-out} se pohybuje v rozmezí 0,18-4,82°C, pro výstupní teploty studené vody T_{c-out} se tyto rozdíly pohybují v mezích 0,21-4,11°C.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] K emu lov k energii pot ebuje. <http://www.vitejtenazemi.cz/> [online]. [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=k_cemu_clovek_energii_potrebuje&site=energie
- [2] ADAMOVS KÝ, Daniel. V ým níky tepla. <http://www.cvut.cz/> [online]. Praha: eské vysoké u ení technické v Praze, Fakulta stavební, 2011 [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-06.pdf>.
- [3] STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan N M ANSKÝ. *Tepelné pochody: Výpo et v ým níku tepla*. 1. vyd. Brno: VUT, 1991. U ební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0363-2.
- [4] JÍCHA, Miroslav. *P enostepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4
- [5] RA EK, Ji í. *TECHNICKÁ MECHANIKA: Mechanika tekutin a termomechanika*. 5. vyd. Brno: VUT v Brn Fakulta elektrotechniky a komunika ních technologií, Ústav elektroenergetiky: NOV PRESS, 2011. ISBN 978-80-214-4343-3.
- [6] LUDVÍK, Bej ek, Miloslav EJKA, Ji í REZ, Eva GESCH EIDTOVÁ a Miloslav STEINBAUER. *M ení v elektrotechnice*.
- [7] ROTAMETR - plová kov ý pr tokom r. <Http://www.energonova.cz/> [online]. [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: http://www.energonova.cz/katalog/mer_mn_tep/ROTAMETR.htm
- [8] *Omegaeng.cz: HSTC série* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=HSTC>
- [9] FRK, Martin, Ing., Ph.D. a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. *P ehled, p esnost a citlivost teplotních senzor v praxi* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/prehled--presnost-a-citlivost-teplotnich-senzoru-v-praxi/>
- [10] Advantech: *Advantechproducts* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.advantech.com/products/1-2mlkno/usb-4718/mod_cb08e924-0165-46dd-8a50-0aebc79ea6c9
- [11] Nationalinstruments: *CalculatingThermocoupleMeasurementError in DMM/SwitchTemperatureMeasurement Systems* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.ni.com/tutorial/3075/en/>
- [12] VAXASOFTWARE: *Heat capacityofliquidwaterfrom 0 °C to 100 °C* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.vaxasoftware.com/doc_eduen/qui/caloresph2o.pdf
- [13] Efunda: *Thermalconductivityof copper* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=Cu

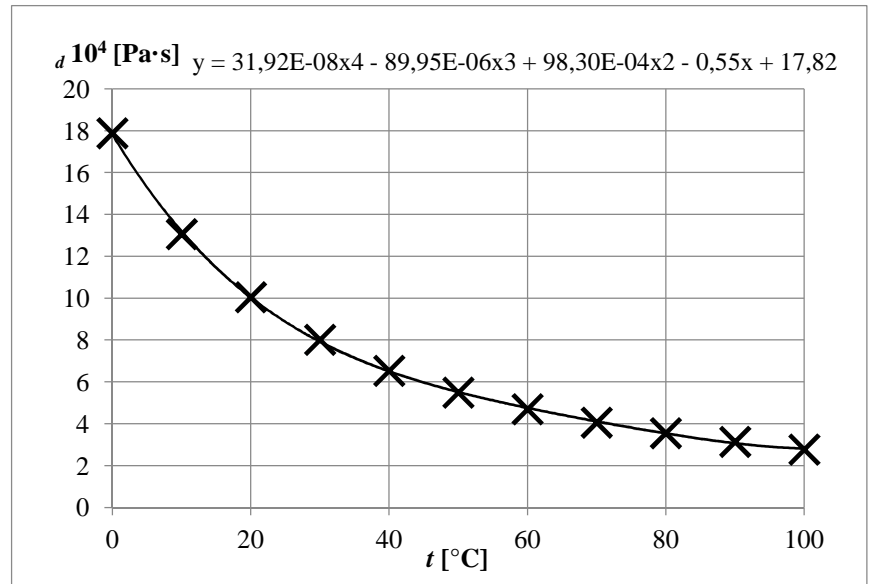
P íloha A

Vstupní hodnoty pro výpo ty jsou initele prostupu tepla

Dynamická viskozita vody

Závislost dynamické viskozity vody na teplot [2]

t_v [°C]	d 10^4 [Pa·s]
0	17,89
10	13,06
20	10,05
30	8,02
40	6,53
50	5,50
60	4,70
70	4,06
80	3,56
90	3,15
100	2,78

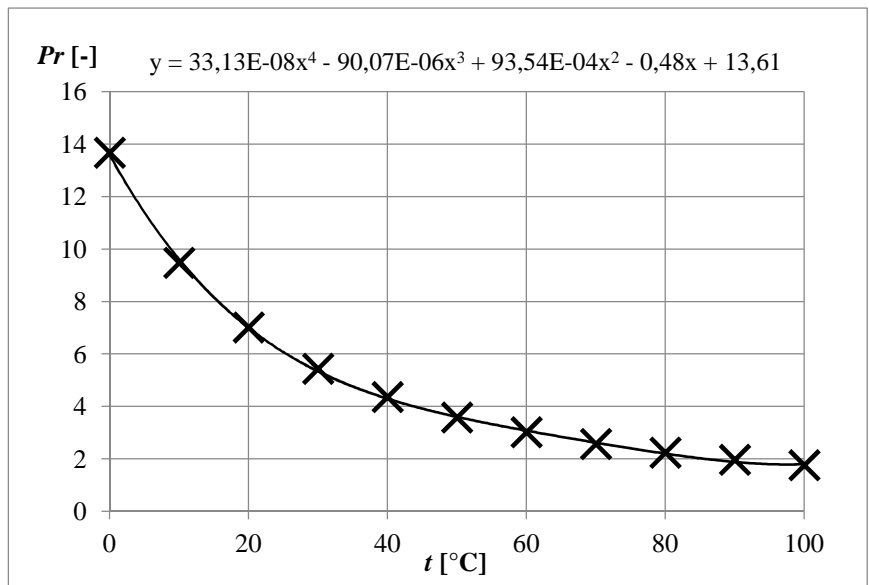


Závislost dynamické viskozity vody na teplot

Prandtlovo íslo vody

Závislost Prandtlova ísla vody na teplot [2]

t_v [°C]	Pr [-]
0	13,67
10	9,47
20	7,01
30	5,43
40	4,35
50	3,57
60	3,01
70	2,56
80	2,23
90	1,96
100	1,75

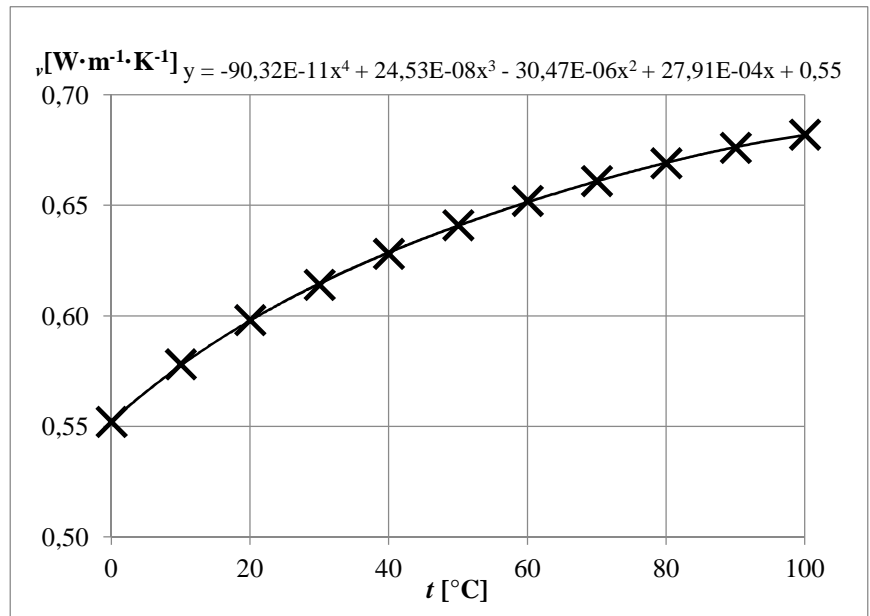


Závislost Prandtlova ísla vody na teplot

Sou initel tepelné vodivosti vody

Závislost sou initele tepelné vodivosti vody na teplot [2]

t_v [°C]	ν [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
0	0,552
10	0,578
20	0,598
30	0,614
40	0,628
50	0,641
60	0,652
70	0,661
80	0,669
90	0,676
100	0,682

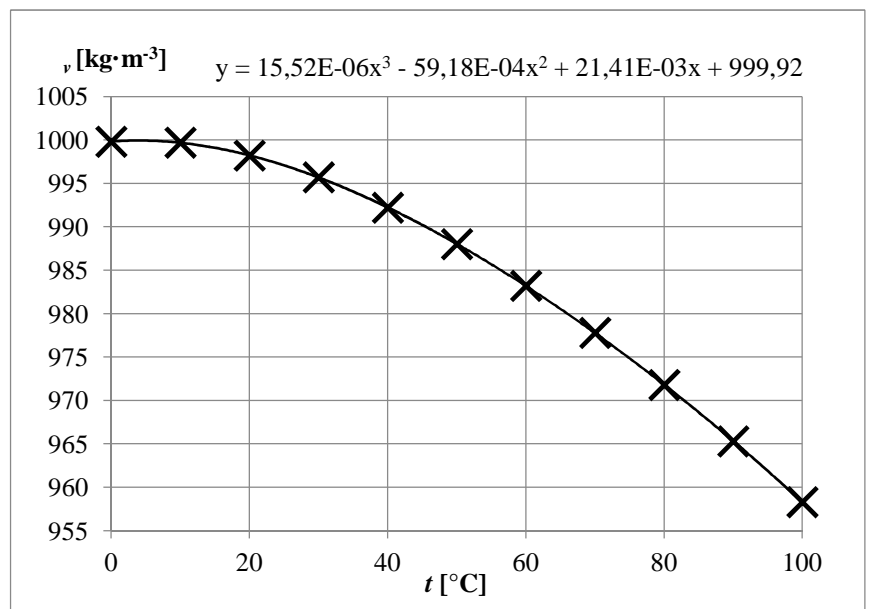


Závislost sou initele tepelné vodivosti vody na teplot

Hustota vody

Závislost hustoty vody na teplot [2]

t_v [°C]	ν [kg·m ⁻³]
0	999,8
10	999,7
20	998,2
30	995,7
40	992,2
50	988
60	983,2
70	977,8
80	971,8
90	965,3
100	958,3

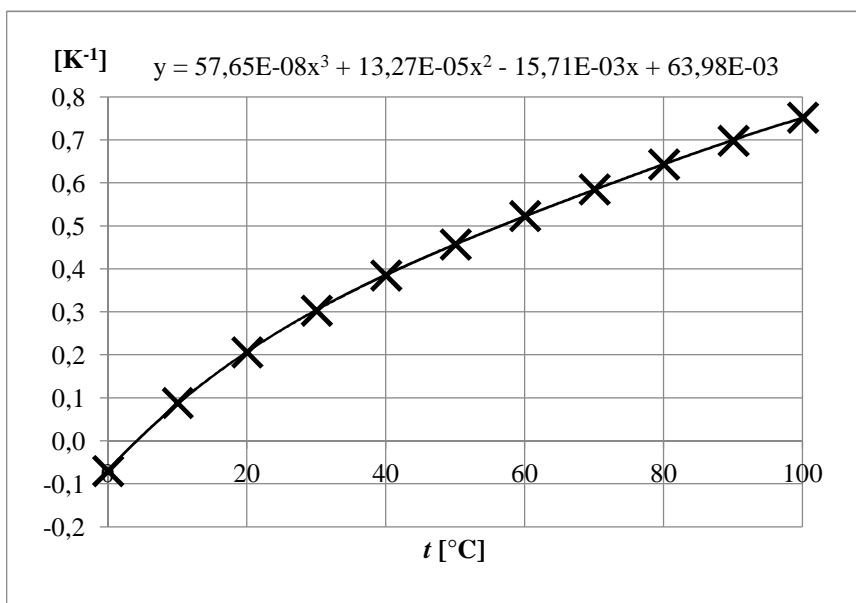


Závislost hustoty vody na teplot

Teplotní souinitel objemové roztažnosti vody

Závislost souinitel objemové roztažnosti vody na teplotě [2]

t_v [°C]	10^3 [K ⁻¹]
0	-0,07
10	0,088
20	0,206
30	0,303
40	0,385
50	0,457
60	0,523
70	0,585
80	0,643
90	0,698
100	0,752

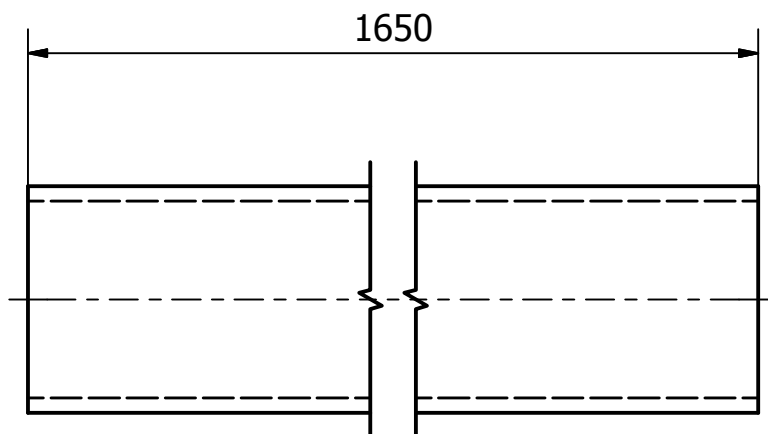
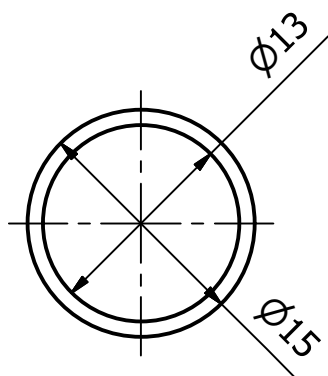


Závislost souinitel obj. roztažnosti vody na teplotě

Příloha B

Výkresy tepelného výměníku

- Výkres .1 - CU trubka
- Výkres .2 - PVC trubka
- Výkres .3 - Plechová vzpěrka
- Výkres .4 - Válcová PVC zátka
- Výkres .5 - Tepelný výměník



Druh dokumentu: VÝKRES

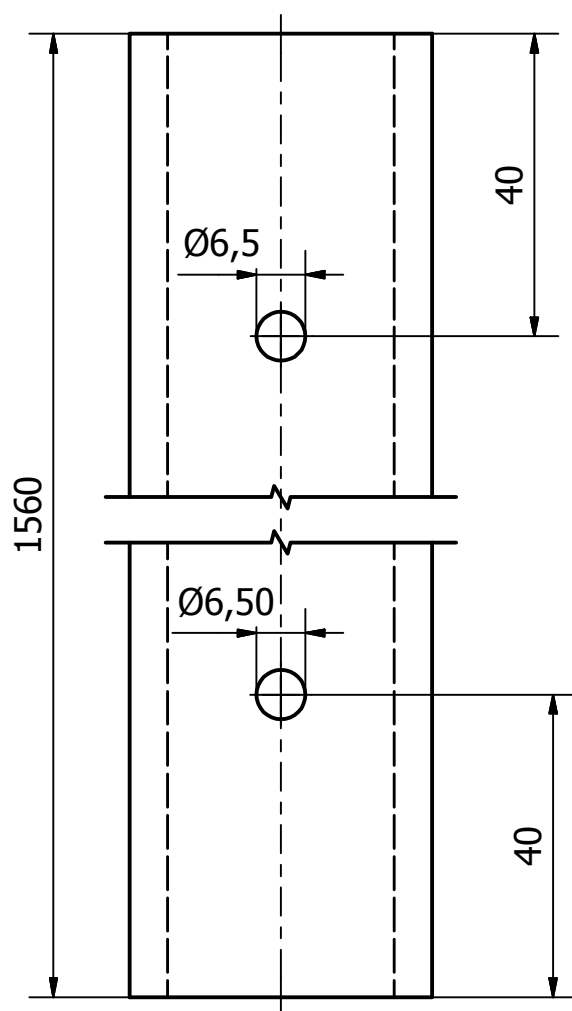
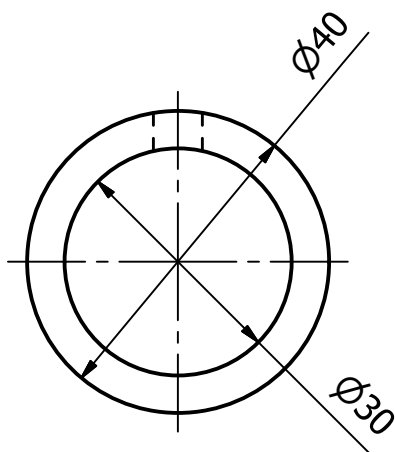
Název: CU TRUBKA

Kreslil: DANIEL TEOFIL

Číslo výkresu: 1/5

Datum: 11.5.2016

Měřítko: 2:1



Druh dokumentu: VÝKRES

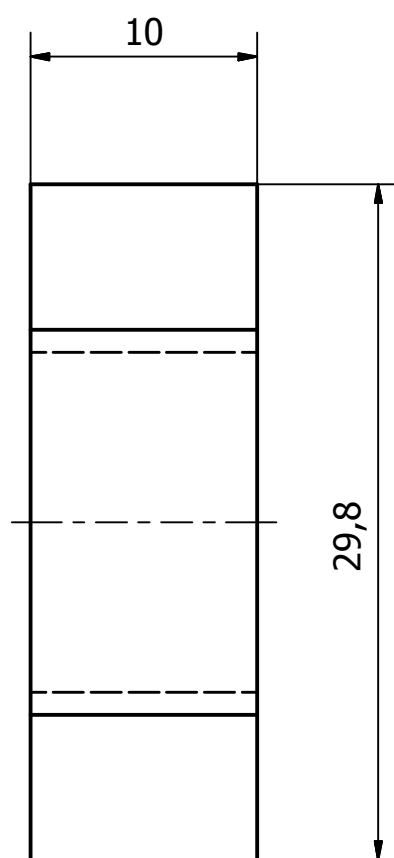
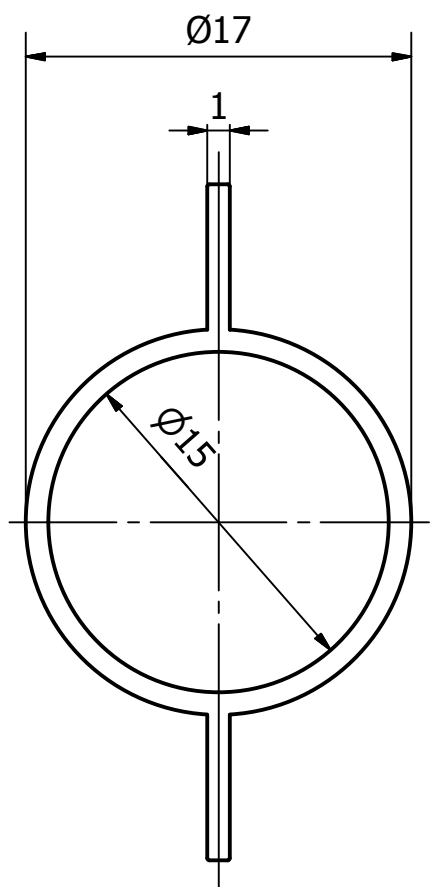
Název: PVC TRUBKA

Kreslil: DANIEL TEOFIL

Číslo výkesu: 2/5

Datum: 11.5.2016

Měřítko: 1:1



Druh dokumentu: VÝKRES

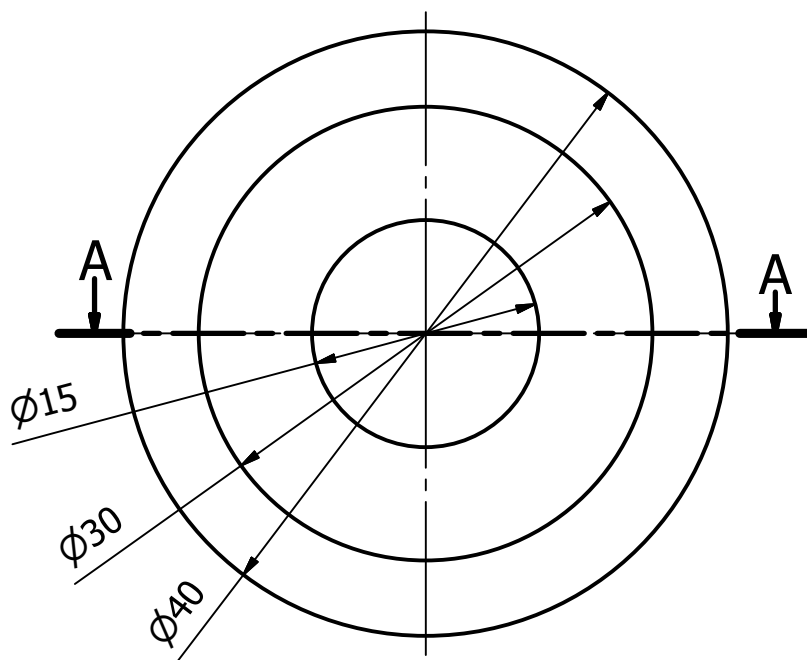
Název: PLECHOVÁ VZPĚRKA

Kreslil: DANIEL TEOFIL

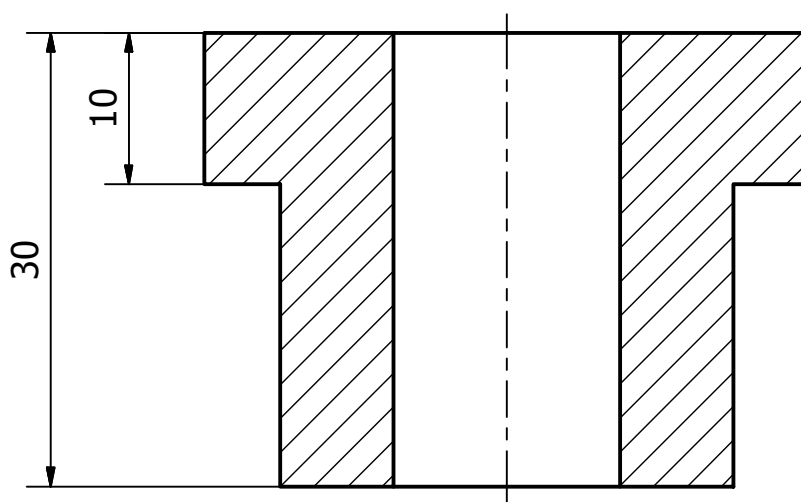
Číslo výkresu: 3/5

Datum: 11.5.2016

Měřítko: 3:1



A-A (2 : 1)



Druh dokumentu: VÝKRES

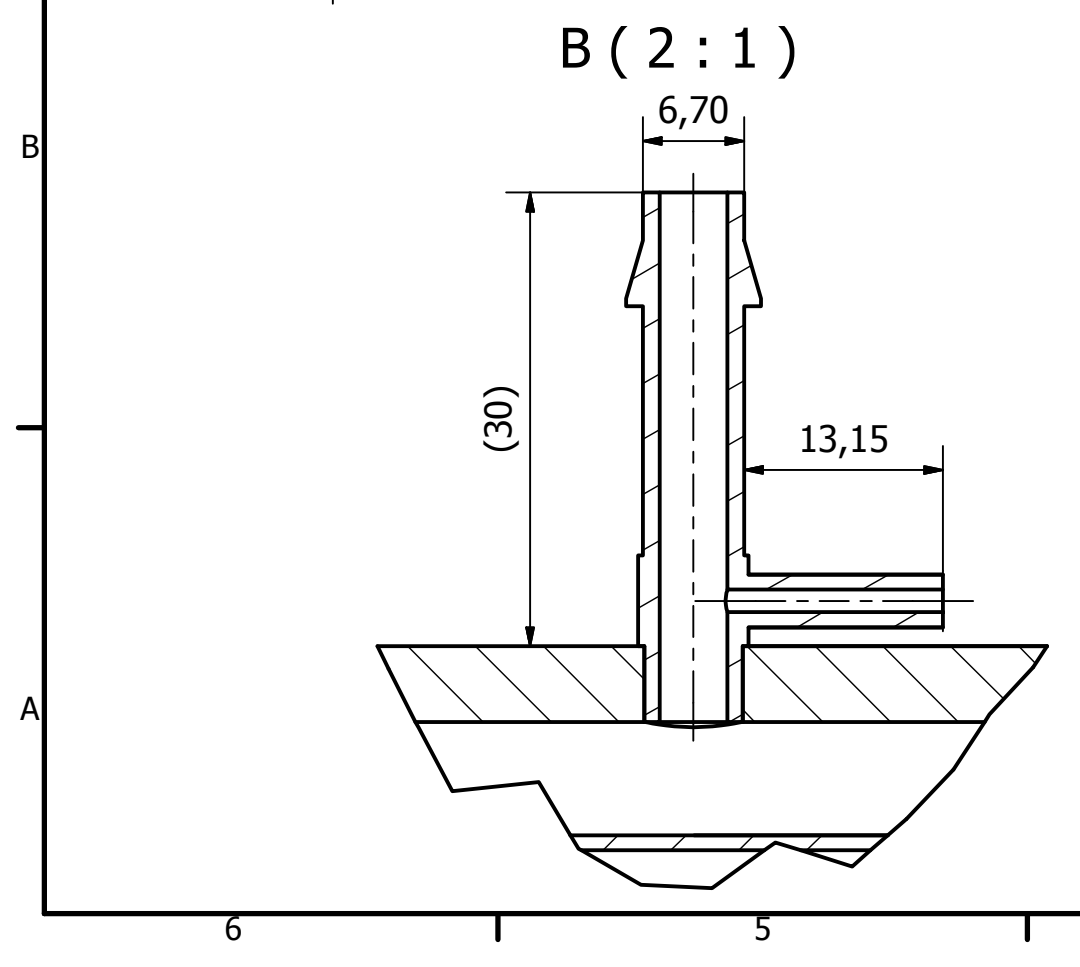
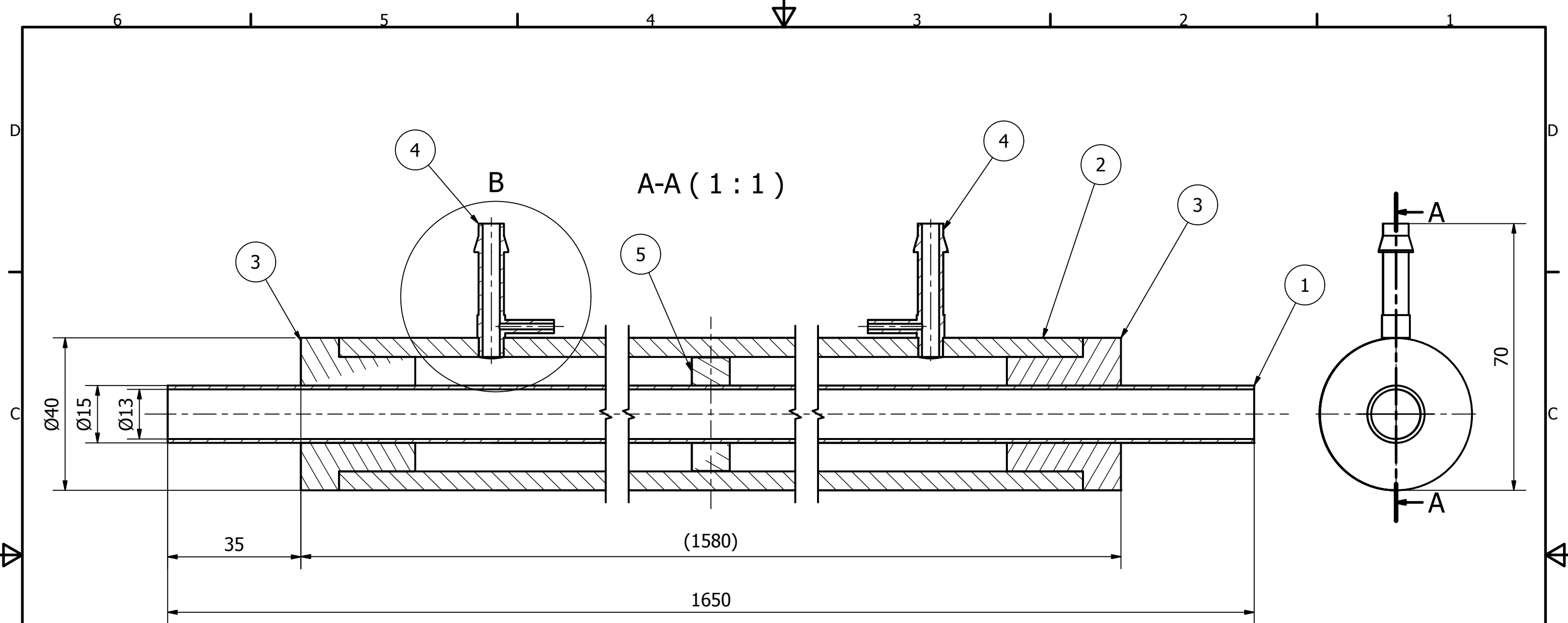
Název: VÁLCOVÁ PVC ZÁTKA

Kreslil: DANIEL TEOFIL

Číslo výkresu: 4/5

Datum: 11.5.2016

Měřítko: 2:1



KUSOVNÍK		
DÍL	POČET	NÁZEV
1	1	CU TRUBKA
2	1	PVC TRUBKA
3	2	VÁLCOVÁ PVC ZÁTKA
4	2	T-KUS
5	1	PLECHOVÁ VZPĚRKA

Druh dokumentu: SESTAVA	Název: TEPELNÝ VÝMĚNÍK
Kreslil: DANIEL TEOFIL	Číslo výkresu: 5/5
Datum: 11.5.2016	Měřítko: 1:1