

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh trubkového výměníku pro potravinářský průmysl

Autor: Lukáš Jouja
Vedoucí práce: Ing. Martin Novák

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš JOUJA**
Osobní číslo: **S19B0323P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Téma práce: **Návrh trubkového výměníku pro potravinářský průmysl**
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování

1. Princip tepelných výměníků.
2. Popis experimentálního zařízení.
3. Stavba experimentálního zařízení.
4. Provedení experimentů na navrhnutém zařízení.
5. Provedení výpočtů.
6. Zhodnocení a porovnání výsledků.
7. Závěr.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- MAREŠ, R. Kapitoly z termomechaniky. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, CD-ROM s. ISBN: 978-80-7043-706-3
- KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. Technická termomechanika: učebnice pro vysoké školy. Praha: Academia, 1973
- NOVOTNÝ, Petr. Pivařka²: průvodce domácího sládka: teorie, rady, návody, recepty. V Brně: Jota, 2019. Populárně naučná. ISBN 9788075655554
- DRÁBKOVÁ, Sylva. Mechanika tekutin [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, [2008] [cit. 2021-04-05]. ISBN 978-80-248-1508-4

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Novák**
Nové technologie – výzkumné centrum

Konzultant bakalářské práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**
Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **29. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Václav Dostál, Sc.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Martinu Novákovi a mému konzultantovi RNDr. Danielu Dudovi, Ph.D. za ochotu a vstřícnost při poskytování cenných rad a informací potřebných pro vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval odboru MIS na NTC, ZČU za poskytnutí zázemí pro měření a provedení numerických simulací.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Jouja	Jméno Lukáš	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Novák	Jméno Martin	
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh trubkového výměníku pro potravinářský průmysl		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	48	TEXTOVÁ ČÁST	33	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY a PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zabývá návrhem a výrobou trubkového výměníku. Zaměřuje se na výměníky používané při domácím vaření piva včetně výhod a nevýhod spojených s rozdílnou konstrukcí. Součástí bakalářské práce je měření téměř čtyř desítek variant průtoků, jehož výstupem je součinitel prostupu tepla. K ověření experimentu je provedena také numerická simulace všech variant. V závěru práce je pak provedeno porovnání a zhodnocení získaných výsledků.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Teplo, výměník, přestup tepla, počítačová simulace, sdílení tepla

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Jouja	Name Lukáš
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Novák	Name Martin
INSTITUTION	ZČU – FST – KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Delete when not applicable	
	Design of double pipe heat exchanger for food industry	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	48	TEXT PART	33	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor's thesis deals with design and manufacturing a double pipe heat exchanger for food industry. It focuses on heat exchangers used in home brewing, including the advantages and disadvantages of different designs. Part of the bachelor's thesis is the measurement of almost forty flow variants, the output of which is the heat transfer coefficient. To verify the experiment, a numerical simulation of all variants is also performed. At the end of the work, a comparison and evaluation of the obtained results are achieved.
KEY WORDS	heat exchangers, heat transfer, computer simulation, heat sharing

Obsah

Zadání BP	2
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	14
2 Způsoby sdílení tepla ve výměnících	15
2.1 Sdílení tepla vedením	15
2.2 Sdílení tepla prouděním.....	15
2.3 Sdílení tepla zářením	15
3 Rozdělení tepelných výměníků	16
3.1 Druhy výměníků podle pracovního pochodu	16
3.2 Rozdělení rekuperačních výměníků podle způsobu proudění.....	18
3.3 Rozdělení podle účelu použití	18
4 Aplikace navrhovaného výměníku.....	19
4.1 Proces vaření piva a zařazení výměníku v procesu.....	19
4.2 Výměníky používané k chlazení mladiny v domácích podmínkách.....	20
5 Popis experimentálního zařízení	23
5.1 Požadavky na konstrukci výměníku.....	23
5.2 Konstrukce výměníku.....	24
6 Stavba experimentálního zařízení	26
7 Měření	28
7.1 Příprava měření.....	28
7.1.1 Kalibrace v pevných bodech	28
7.1.2 Připojení výměníku na vodovodní řad	29
7.1.3 Ověření těsnosti.....	29
7.1.4 Příprava měřícího zařízení	29
7.2 Postup měření	30
7.3 Vyhodnocení naměřených dat	30
7.4 Chyby a nejistoty měření.....	35
7.5 Výsledky.....	36
7.6 Dovolенý průtok při chlazení mladiny	38
8 Numerická simulace výpočet	40
8.1 Příprava numerické simulace.....	40

8.2	Výpočet.....	41
8.3	Výsledky.....	41
9	Zhodnocení a porovnání výsledků	44
9.1	Porovnání s experimentem	44
10	Závěr.....	46
	Seznam použitých zdrojů	47

Přehled použitých zkratk a symbolů

Označení	Jednotky	Název
q	[W/m ²]	měrný tepelný tok
λ	[W/m K]	součinitel tepelné vodivosti
∇T	[K]	teplotní gradient
$T_{\text{tání}}$	[°C]	teplota tání
T_{var}	[°C]	teplota varu
\dot{V}	[l/s]	objemový průtok
V_n	[l]	objem odměrné nádoby
t	[s]	čas plnění odměrné nádoby
\dot{V}	[m ³ /s]	objemový průtok
S_{vstup}	[m ²]	plocha průřezu vstupní trubky
r	[m]	průměr vstupní trubky
\dot{Q}	[kW]	tepelný tok
\dot{m}	[kg/s]	hmotnostní průtok
c_p	[J/kg K]	měrná tepelná kapacita vody
ΔT	[K]	rozdíl vstupní a výstupní teploty
ΔT_s	[°C]	střední teplotní logaritmičkový spád
$\Delta T'$	[°C]	rozdíl teplot prvního konce výměníku
$\Delta T''$	[°C]	rozdíl teplot druhého konce výměníku
\dot{Q}	[W]	tepelný tok
λ_1	[W/m K]	součinitel tepelné vodivosti
S	[m ²]	teplosměnná plocha
T	[°C]	teplota
L	[m]	délka teplosměnné plochy
r_1	[m]	vnitřní (mladina) poloměr válce
r_2	[m]	vnější (chladící voda) poloměr válce
T_{t1}	[°C]	teplota tekutiny uvnitř potrubí
T_{t2}	[°C]	teplota tekutiny vně potrubí
T_1	[°C]	teplota na vnitřní straně potrubí
T_2	[°C]	teplota na vnější straně potrubí
α_1	[W/m ² K]	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně válce

α_2	[W/m ² K]	součinitel přestupu tepla na vnější straně vnitřní
k	[W/mK]	součinitel prostupu tepla
k_{exp}	[W/mK]	součinitel prostupu tepla zjištěný experimentem
d	[m]	průměr teplosměnné plochy
$T_{T in}$	[°C]	teplota chlazené vody na vstupu
$T_{T out}$	[°C]	teplota chlazené vody na výstupu
$T_{S in}$	[°C]	teplota ohřívání vody na vstupu
$T_{S out}$	[°C]	teplota ohřívání vody na výstupu
\dot{V}_T	[m ³ /s]	objemový průtok chlazené vody
\dot{V}_S	[m ³ /s]	objemový průtok ohřívání vody
w_T	[m/s]	rychlost chlazené vody
w_S	[m/s]	rychlost ohřívání vody
\dot{Q}_{IN}	[kW]	tepelný tok chladicí kapaliny
\dot{Q}_{OUT}	[kW]	tepelný tok ohřívání kapaliny
$T_{T out}^{exp}$	[°C]	teplota chlazené vody na výstupu při měření
$T_{S out}^{exp}$	[°C]	teplota ohřívání vody na výstupu při měření
$T_{T out}^{sim}$	[°C]	teplota chlazené vody na výstupu při simulaci
$T_{S out}^{sim}$	[°C]	teplota ohřívání vody na výstupu při simulaci

Seznam obrázků

Obr. 1: Parní kondenzátor [16].....	16
Obr. 2: Ljungströmův ohřívák vzduchu [16]	17
Obr. 3: Chladič přehřáté páry [17]	17
Obr. 4: Schéma souproudého výměníku [18].....	18
Obr. 5: Schéma protiproudého výměníku [18].....	18
Obr. 6: Schéma křížového výměníku [18]	18
Obr. 7: Schéma kombinovaného výměníku [18]	18
Obr. 8: Zlatá pivní cesta [5]	20
Obr. 9: Ponorný spirálový chladič [4].....	21
Obr. 10: Protiproudý chladič [6]	21
Obr. 11: Deskový chladič [6]	22
Obr. 12: Schéma deskového chladiče [7].....	22
Obr. 13: Potrubní systém Profipress [10].....	23
Obr. 14: Díly zakončení výměníku	24
Obr. 15: Koleno s vloženým termočlánkem.....	25
Obr. 16: Řez koncem výměníku.....	25
Obr. 17: Pájení stříbrem	26
Obr. 18: Dílčí celky	26
Obr. 19: Spirála	26
Obr. 20: Jednostranně dokončená spirála.....	27
Obr. 21: Výměník bez měření článků	27
Obr. 22: Výměník před měřením	29
Obr. 23: DEWE 2010	30
Obr. 24: Měřicí ústředna	30
Obr. 25: Grafy teplot v souproudém a protiproudém výměníku.....	32
Obr. 26: Schéma válcové stěny	33
Obr. 27: Graf měřeného součinitele prostupu tepla a průtoku VT	38
Obr. 28: Graf součinitelů prostupu tepla a průtoku VT	39
Obr. 29: Vygenerovaná síť, řez v oblasti vstupu.....	40
Obr. 30: Vygenerovaná síť, detail v problematické oblasti	40
Obr. 31: Velikost rychlosti ve vstupní oblasti u souproudého zapojení.....	43
Obr. 32: Velikost rychlosti ve výstupní oblasti u souproudého zapojení.....	43

Seznam tabulek

Tab. 1: Tabulka s kalibračními hodnotami termočlánků.....	28
Tab. 2: Výsledky měření souproutého zapojení.....	36
Tab. 3: Výsledky měření protiproutého zapojení.....	37
Tab. 4: Výpočet průtoku při chlazení mladiny.....	39
Tab. 5: Výsledky numerické simulace souproutého zapojení.....	41
Tab. 6: Výsledky numerické simulace protiproutého zapojení.....	42
Tab. 7: Porovnání výstupních teplot měření a simulace souproutého zapojení.....	44
Tab. 8: Porovnání výstupních teplot měření a simulace protiproutého zapojení.....	45

1 Úvod

Česko je národ pivařů, proto není divu, že řadu z nich napadla myšlenka vařit si vlastní pivo doma a objevit zatím nepoznaný pivní svět, který je dozajista širší než nabídka běžného výčepu v hospodě. Vzniklo tak domácí pivovarnictví, též nazývané jako homebrewing, jehož oblíbenost neustále roste a počty domácích sládků se stále zvyšují. Každý, kdo začíná s tímto koníčkem se na začátku potýká s problémem, kde a s jakým vybavením pivo vařit. Prvním používaným vybavením je obvykle pouze velký hrnec a kvasná nádoba. S nárůstem životní důležitosti tohoto koníčku, roste obvykle i množství a kvalita používaného vybavení. S rostoucí složitostí narůstá i finanční náročnost takových kusů, proto si mnoho z nadšenců začne vyrábět nové vybavení svépomocí.

Jedním z problematických bodů je chlazení piva předtím, než začne kvasit. K tomuto účelu jsou používány výměníky tepla, které existují v různorodých konstrukčních provedeních a variantách, proto první kapitola této práce obsahuje popis způsobů sdílení tepla v tepelných výměnících, následuje obecné rozdělení výměníků, a protože se tato práce soustředí na rekuperační výměník je za obecné rozdělení zařazeno ještě rozdělení výměníků rekuperačních. Další kapitoly se věnují technologii výroby piva a popisem výměníků, které jsou nejčastěji používány v domácích podmínkách.

Hlavním úkolem této bakalářské práce je provést návrh a výrobu tepelného výměníku, na kterém bude provedeno experimentální měření. K tomu, aby bylo možné provedení měření je nutné vybavit výměník měřením vstupních a výstupních teplot a měřením průtoku obou kapalin protékajících výměníkem. Dále je vhodné provést numerickou simulaci v programu ANSYS Fluent 2022 R1, která slouží k ověření dat z experimentu. V práci je obsažena část týkající se tvorby výpočetní sítě a samotného výpočtu. Konec této práce se zabývá zhodnocením a porovnáním naměřených výsledků.

2 Způsoby sdílení tepla ve výměnících

Výměníky jsou zařízení konstruována k přenosu části vnitřní tepelné energie z média o vyšší teplotě do média o teplotě nižší, tedy ve směru klesající teploty. Ke sdílení tepla může docházet několika způsoby, kterými jsou vedení, proudění a sálání. U výměníků, kterými se zabývá tato práce, je uplatňována především kondukcí a konvekce. [1]

2.1 Sdílení tepla vedením

Tento způsob sdílení tepla je také nazýván kondukcí. Jde o proces sdílení tepelné energie, při kterém je šíření tepla zajištěno přímým kontaktem elementárních částic hmoty, může tedy existovat pouze u pevných látek, u neproudících tekutin a u laminárně proudících tekutin, u kterých však k šíření tepla dochází pouze ve směru kolmém na směr proudění. Velikost tepelného toku charakterizuje Biot-Fourierův zákon, který bývá označován jako základní zákon vedení tepla. Vztah pro Biot-Fourierův zákon je následující. [1]

$$q = -\lambda \nabla T$$

Kde:

q	měrný tepelný tok [W/m^2],
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}/\text{m K}$],
∇T	teplotní gradient [K].

2.2 Sdílení tepla prouděním

Druhý způsob sdílení tepla je označován také jako konvekce. Uskutečňuje se pohybem částic v prostoru, které při svém pohybu zároveň přenášejí svou tepelnou energii. Může tedy probíhat pouze u proudících tekutin, přičemž při laminárním proudění dochází ke sdílení tepla ve směru proudění a při turbulentním proudění je teplo sdíleno všemi směry. Tento způsob sdílení tepla je současně doprovázen vedením tepla mezi částicemi, protože v proudící látce neexistuje teplotní rovnováha. [1]

Konvekci lze rozdělit na

- Volnou konvekci – tekutina je uvedena do pohybu pouze rozdílem hustot mikročástic, tento rozdíl je vyvolán rozdílnou teplotou mikročástic. Intenzita volné konvekce závisí na rozdílu teplot mikročástic, na jejich fyzikálních vlastnostech a na velikosti a tvaru prostoru, ve kterém se pohybují. [2]
- Nucenou konvekci – tekutina je uvedena do pohybu nuceně, u kapalin například čerpadlem, u plynů například ventilátorem. [2]

2.3 Sdílení tepla zářením

Posledním zmíněným způsobem přenosu tepla je sdílení tepla zářením neboli sálání. Jde o elektromagnetické vlnění, které se šíří rychlostí světla v plynném nebo vzduchoprázdném prostředí. Při dopadu na jiné těleso je záření zcela nebo částečně přeměněno zpět na teplo. [1]

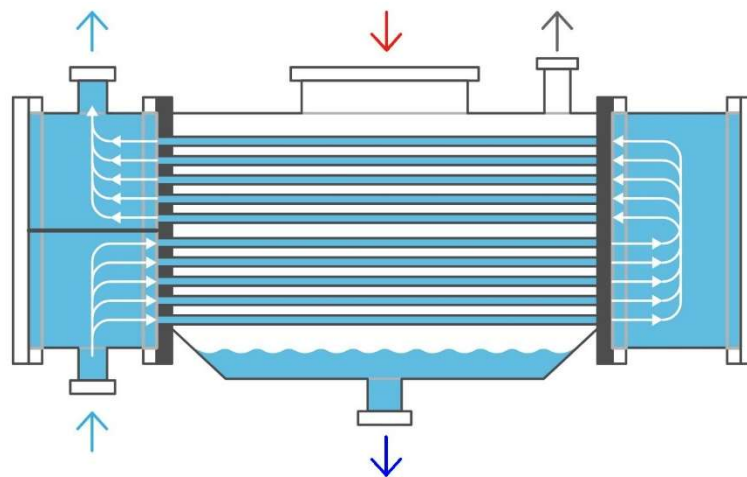
3 Rozdělení tepelných výměníků

Oblast použití výměníků je velice široká. Existuje velké množství různých druhů výměníků, proto je vhodné je rozdělovat podle nejrůznějších kritérií a hledisek. K základnímu rozdělení patří rozdělení podle pracovního pochodu při výměně tepla, dále například podle účelu použití a případně podle způsobu proudění médií v nich. Zmíněná rozdělení jsou stručně rozvedena v následujících podkapitolách.

3.1 Druhy výměníků podle pracovního pochodu

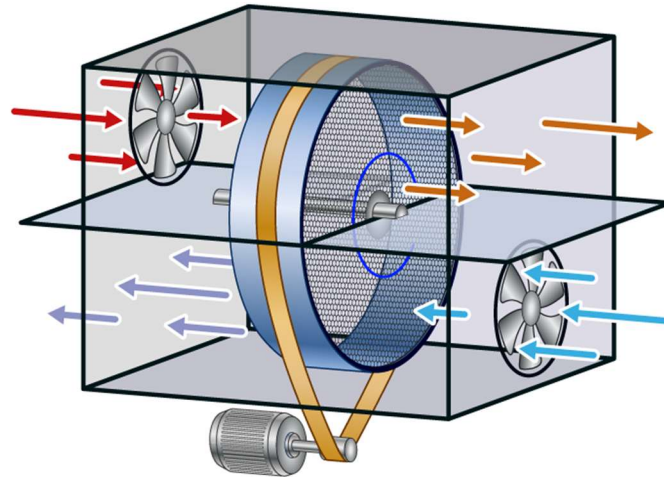
Na základě procesů probíhajících při výměně tepla je možné podle [1] tepelné výměníky rozdělit následovně:

- a) **Rekuprační výměníky** – kdy prostory pro pohyb ohřivaného a ochlazovaného média jsou odděleny pevnou stěnou, která brání vzájemnému kontaktu. Tento druh výměníku je používán například u spalovacích motorů jako chladič chladicí kapaliny motoru, který je ochlazován proudícím vzduchem nebo jako parní kondenzátor v elektrárnách, jehož schéma je zobrazeno na obrázku 1, kde světle modré a bílé šipky znázorňují chladicí vodu proudící ve velkém množství trubek. Na těchto trubkách vně kondenzuje pára vystupující z turbíny, jejíž vstup je znázorněn červenou šipkou. Tmavě modrá šipka značí výstup zkondenzované vody a šedá šipka označuje odsávání parovzdušné směsi.



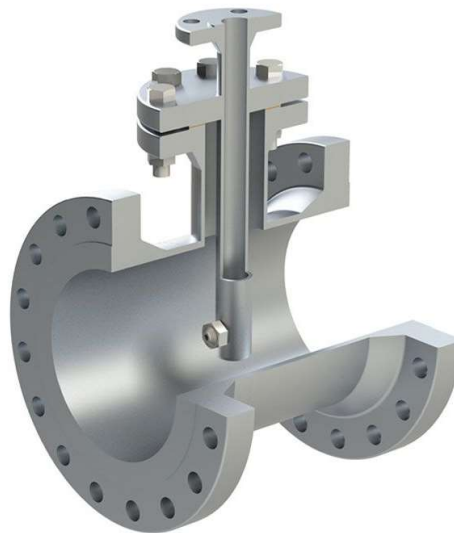
Obr. 1: Parní kondenzátor [16]

- b) **Regenerační výměníky** – u kterých je k povrchu látky absorbující teplo střídavě přiváděna teplejší a chladnější tekutina. Při proudění teplejší látky absorbuje vnitřní výplň výměníku energii, kterou v druhé části periody, kdy kolem výplně proudí chladnější médium odevzdá protékající tekutině. Mezi regenerační výměníky patří například ohříváky spalovacího vzduchu u parních kotlů, jejichž hlavním představitelem je Ljungströmův ohřívák vzduchu, který je zobrazen na obrázku 2. Ohřívák tvoří velký počet tenkostěnných vlnitých plechů, které jsou uloženy v kruhovém, pomalu se otáčejícím rotoru. Několikametrový rotor je uzavřen ve výměníku, který je rozdělen na spalínovou a vzduchovou část. Plocha rotoru je střídavě vystavena proudu horkých spalín, který je naznačen červenými a oranžovými šipkami, a proudu vzduchu zobrazeném šipkami modrých odstínů.



Obr. 2: Ljungströmův ohřívák vzduchu [16]

- c) **Směšovací výměníky** – u nich je spojen přenos tepla s přenosem hmoty, směšují se dvě nebo více tekutin o rozdílných teplotách, které si následně předají tepelnou energii ve snaze vytvořit teplotní rovnováhu. Příkladem mohou být chladiče přehřáté páry nebo chladičí věže. Příkladem vstřikovacího chladiče zobrazuje obrázek 3, toto zařízení tvoří minimum pohyblivých součástí. Zařízení vstřikuje vodu do přehřáté páry a tím reguluje její teplotu, protože vstřikovaná voda odebírá přehřáté páře energii potřebnou pro změnu skupenství.

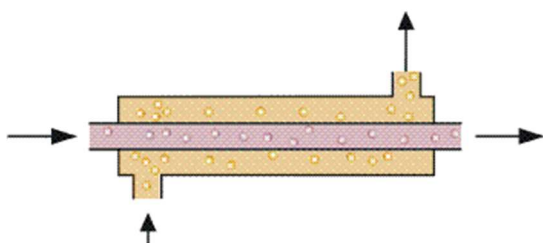


Obr. 3: Chladič přehřáté páry [17]

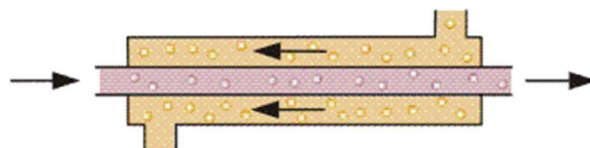
3.2 Rozdělení rekuperačních výměníků podle způsobu proudění

Rekuperační výměníky je dále možné rozdělit podle způsobu proudění pracovních médií následovně:

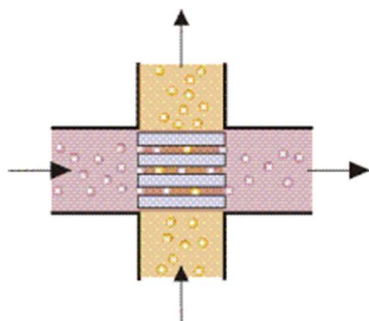
- Souproudé výměníky** – ve kterých jsou směry proudění tekutin rovnoběžné a orientované ve stejném směru, viz obrázek 4.
- Protiproudé výměníky** – kterými tekutiny proudí rovnoběžně, ale v opačném směru, viz obrázek 5.
- Křížové výměníky** – u kterých jsou směry proudění tekutin mimoběžné a zároveň spolu v kolmém průmětu svírají pravý úhel, viz obrázek 6.
- Kombinované výměníky** – v praxi však téměř vždy dochází ke spojení více než jednoho způsobu proudění, proto se lze setkat s vícenásobným souproudým, protiproudým nebo křížovým prouděním, anebo s výměníky s kombinovaným prouděním, právě kombinované výměníky ilustruje obrázek 7.



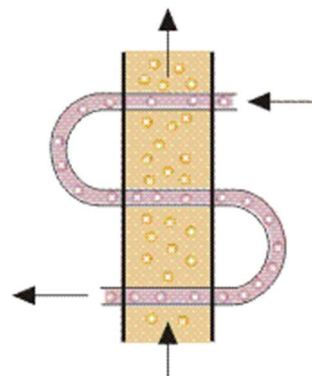
Obr. 4: Schéma souproudého výměníku [18]



Obr. 5: Schéma protiproudého výměníku [18]



Obr. 6: Schéma křížového výměníku [18]



Obr. 7:
Schéma kombinovaného výměníku [18]

3.3 Rozdělení podle účelu použití

Na základě různých aplikací lze dle [3] výměníky tepla rozdělit také na:

- Ohříváky, chladiče – slouží pouze ke změně teploty, nikoli skupenství.
- Výparníky – kapalně médium je ohříváno s cílem dosáhnout plynného skupenství.
- Kondenzátory – plynně teplejší médium je ochlazováno za účelem zkapalnění.
- Přehříváky a přihříváky – slouží k úpravám parametrů páry.
- Sušárny – určené k snížení vlhkosti pevných látek.

4 Aplikace navrhovaného výměníku

V současné době jsou tepelné výměníky využívány téměř ve všech odvětvích průmyslu od energetiky až po potravinářský průmysl. Tato práce je orientována právě na zmíněný potravinářský průmysl, ke kterému neodmyslitelně patří i výroba piva. Produkci piva se nezabývají pouze velké národní a nadnárodní společnosti vystavující milióny hektolitřů piva, ale existuje také mnoho nadšenců se svými minipivovary, u kterých proces vaření piva probíhá často přímo v domácnostech. V následující podkapitole dojde k přiblížení procesu výroby piva, který je s výjimkou několika bodů neměnný, ať už probíhá v jakémkoli měřítku. V následující kapitole je vysvětleno zařazení tepelného výměníku do výrobního postupu.

4.1 Proces vaření piva a zařazení výměníku v procesu

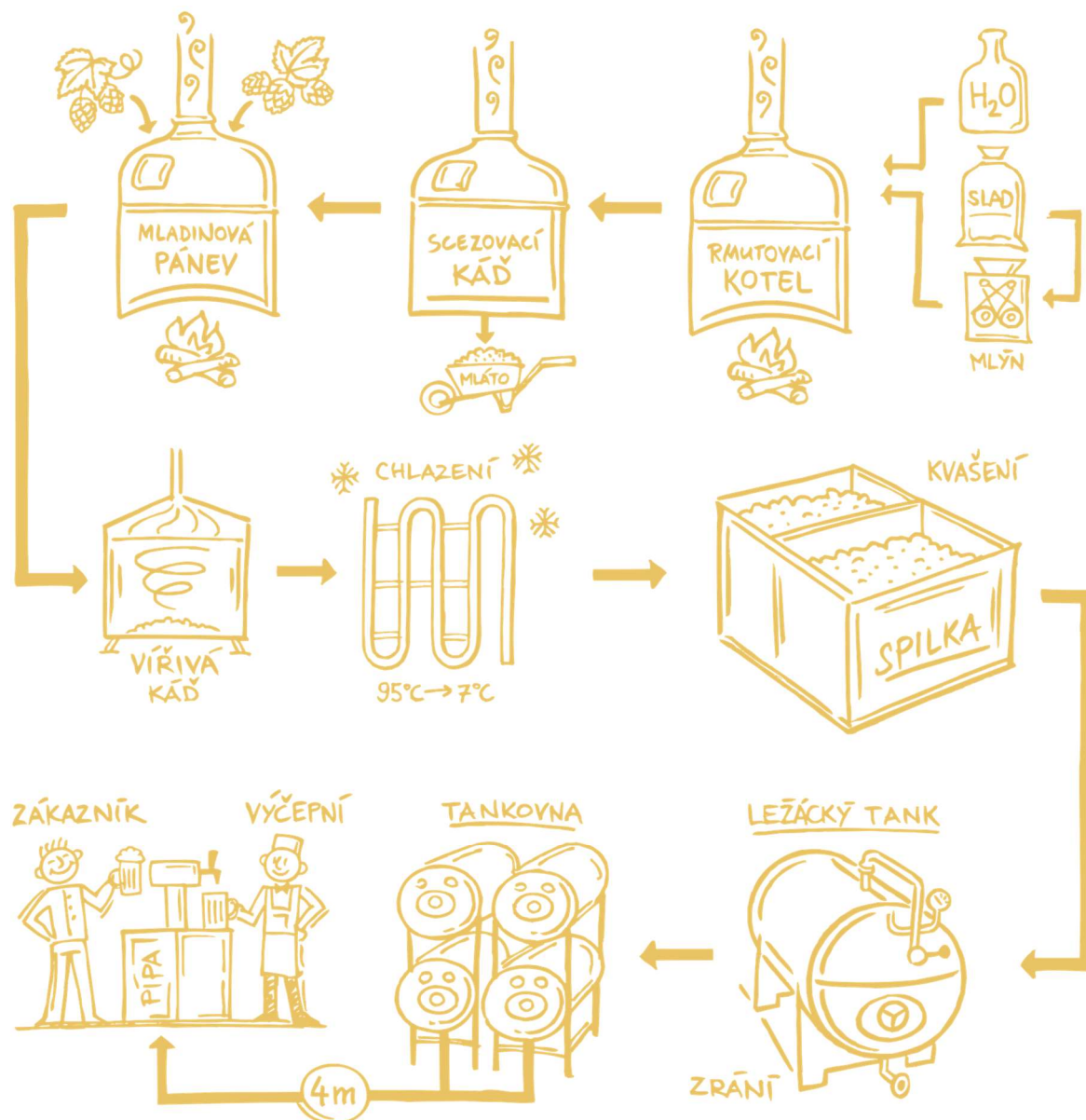
Výroba piva začíná u výběru surovin, kterými jsou slad, chmel, voda a kvasnice. Slad jsou naklíčená obilná zrna, nejčastěji ječná, která jsou po naklíčení a uvolnění škrobu šetrně usušena. Celý postup ilustruje obrázek 8. [4]

Prvním krokem vaření piva je příprava sladu. Obilky jsou nejprve máčeny ve vodě, čímž dojde k nastartování biochemických pochodů. Následným klíčením jsou spuštěny enzymatické procesy přeměňující polysacharidy na zkvasitelné cukry. Proces klíčení je ve vhodný okamžik zastaven sušením. [4]

Dalším krokem je šrotování, tedy mletí sladu. Drcení je nutné pro následnou extrakci nově vzniklých jednoduchých cukrů při rmutování. Rmutování je proces, jehož cílem je přenést obsah sladového šrotu do vody. Při tomto procesu je škrob uvolněný ze sladu enzymy dále štěpen na jednodušší cukry, které jsou ve varní vodě rozpustné. Volba technologie rmutování závisí především na typu vařeného piva, protože pro každý druh piva existuje zažitý charakter a dané zvyklosti postupu jeho vaření. Rmutování lze rozdělit na dva hlavní typy – infuzní rmutování a dekokční rmutování. Dekokční rmutování spočívá v povaření dílčích rmutů a jejich pomalému navrácení do zbylého objemu, čímž je postupně zvyšována teplota celého díla. Podle počtu rmutů lze dekokční rmutování dále dělit na jednormutové, dvourmutové a třirmutové. Dekokční rmutování neodmyslitelně patří k výrobě tradičního českého ležáku. Infuzní rmutování je postup, při kterém je požadované teploty dosaženo pomalým zahříváním celého objemu díla. Jde o energeticky úspornější a méně časově náročný postup, proto jde o oblíbený postup při domácím vaření. Rmutováním vzniká sladina. Po rmutování je třeba oddělit od sladinu mláto, které je tvořeno obaly zrněk a jemnými kaly, proto je sladina scezena a na konec přivedena k varu. [4]

Následuje chmelovar, při němž je postupně do vroucí sladinu přidáván chmel. Výsledkem je horká mladina. Od mladiny je nejprve nutné oddělit kaly. Oddělení kalů probíhá ve vířivé kádi, kde jsou pomocí roztočení mladiny odděleny kaly, které se díky setrvačnému zrychlení usadí ve středu nádoby. Po vířivé kádi probíhá dochlazení na zákvasnou teplotu. [4]

Chlazení probíhá zpravidla v uzavřených chladičích, těmto výměníkům je věnována následující kapitola. Po zchlazení putuje mladina na spilku, kde proběhne hlavní kvašení při teplotě, která závisí na použitých kvasinkách. Při stanoveném stupni prokvašení je kvasný proces zastaven a mladé pivo je přečerpáno do ležáckého sklepa, kde dojde dokvašení a dozrání piva. Na závěr je nutné už jen oddělení kvasinek a příprava piva k distribuci. [4]



Obr. 8: Zlatá pivní cesta [5]

4.2 Výměníky používané k chlazení mladiny v domácích podmínkách

Nejsnazším způsobem chlazení, který nevyžaduje téměř žádnou přípravu, je ponoření nádoby do studené vody. Tento způsob je však vhodný pouze pro malé objemy a je také příliš pomalý. Rychlost je v případě chlazení mladiny velmi důležitá, protože po chlazení následují procesy, při kterých nedojde k varu. Je nutné dodržet sterilitu celého procesu. Nesmí tedy dojít ke kontaminaci mladiny, ta by způsobila znehodnocení piva. Pro větší rychlost chlazení je vhodné použít již zmíněné chladiče. Tyto chladiče lze rozdělit na tři hlavní typy.

Prvním typem je takzvaný chladič had. Jde o měděnou nebo nerezovou spirálu ponořenou do mladiny, kterou protéká studená voda. Výhodou chladičící spirály je možnost sanitace ponořením do vroucí vody. Ponorná spirála je zobrazena na obrázku 9. [4]



Obr. 9: Ponorný spirálový chladič [4]

Druhým typem je protiproudý chladič. Jedná se o měděnou nebo nerezovou spirálu, přes kterou je navlečena hadice. Taková spirála je zakončena pomocí tvarovek tak, aby mohla spirálou odděleně proudit chlazená mladina a v mezikruží mezi spirálou a hadicí mohla v opačném směru proudit studená voda. Díky tomuto řešení je dosaženo vyšší účinnosti. Avšak vzniká zde problém se sanitací, který je nutné řešit doporučenými čistícími prostředky. Protiproudý chladič je zobrazen na obrázku 10. [4]

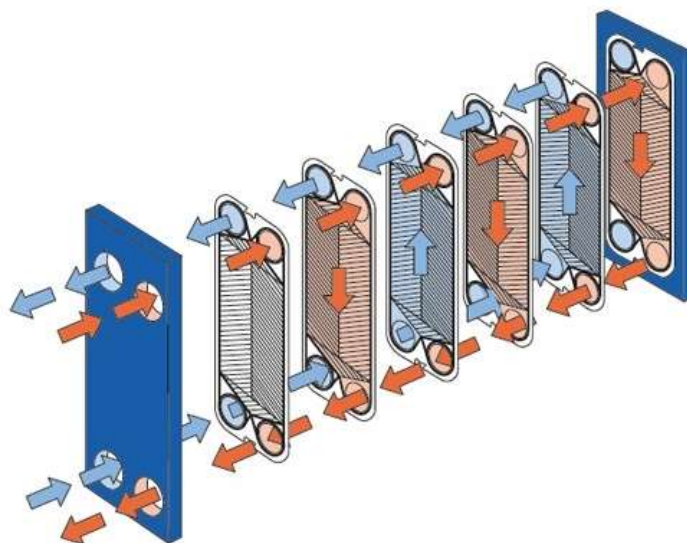


Obr. 10: Protiproudý chladič [6]

Nejúčinnějším typem chladiče mladiny je deskový výměník. Tento výměník pracuje na podobném principu jako protiproudý spirálový chladič, liší se pouze rozdílnou plochou, která obě tekutiny odděluje. Drobnou nevýhodou deskového výměníku je nutnost zabránit vstupu jemných kalů, které mohou ucpat tenké mezery mezi deskami. Schéma proudění v deskovém chladiči zobrazuje obrázek 12. Sanitace ploch, kterých se dotýká mladina, probíhá obdobně jako u protiproudého chladiče. Příklad deskového chladiče zobrazuje obrázek 11. [4]



Obr. 11: Deskový chladič [6]



Obr. 12: Schéma deskového chladiče [7]

5 Popis experimentálního zařízení

V domácích podmínkách je nejčastěji používán zmíněný protiproudý trubkový chladič, jelikož většina nadšených domácích sládků si tento typ výměníku je schopna poměrně levně vyrobit svépomocí. Navíc je jeho účinnost výrazně vyšší než účinnost ponorné spirály. Z těchto důvodů se návrh konstrukce soustředil na výměník typu „trubka v trubce“, který je svým poměrem ceny a účinnosti nejdostupnější. [4]

5.1 Požadavky na konstrukci výměníku

První část požadavků vychází z předpokládaného využití tepelného výměníku při výrobě piva. Protože jde o potravinářské zařízení, je potřeba navrhnout výměník a jeho materiály tak, aby se mladina nedostala do kontaktu s rizikovými materiály pro lidský organismus jako jsou například olovo nebo kadmium, protože tyto prvky mohou nejen dodat pivu nepříjemnou kovovou pachut', ale mohou také způsobit otravu. Olovo má schopnost ukládat se v kostech, játrech a slezině, což postupně vede k chronické otravě olovem, která se projevuje například anémií, hypertenzí nebo poškozením mozku. [8] [9]

Dalším požadavkem jsou dostatečně rozměrné průřezy části určené pro mladinu, protože v mladině i přes veškerou filtraci mohou zůstat jemné kaly a sedimenty, které se mohou usazovat na stěnách výměníku a v krajním případě ho až ucpat. Je tedy nutné, aby se již návrhem konstrukce zamezilo ucpávání výměníku, aby sedimenty mohly bez potíží projít skrz celý výměník a nezpůsobovaly zbytečné problémy při provozu.

Dále je potřebná snadná sanitace výměníku, z důvodů zmíněných v kapitole 4.2, proto je nutné vyhnout se spojům, které není možné snadno propláchnout a vydesinfikovat. Tento požadavek vylučuje použití lisovaných komponentů těsněných o-kroužky například systém Profipress od společnosti Viega s r. o., které není možné snadno vyčistit. Systém Profipress je zobrazen na obrázku 13.



Obr. 13: Potrubní systém Profipress [10]

Druhá část požadavků vychází z technologických potřeb a potřeb měření. Základní vlastností, kterou musí výměník mít pro měření je možnost měřit teploty na vstupu a výstupu obou kapalin. Proto musí být na koncích výměníku připravena místa s dostatečnou tloušťkou stěny, do kterých budou později vytvořeny otvory pro připojení měřicích termočlánků.

Dále je důležitá možnost souproudého i protiproudého zapojení pro vyzkoušení a porovnání těchto dvou zapojení. Pro zajištění průtoku v celém řezu výměníku musí být oba proudy na výstupu škrceny. Z těchto dvou požadavků je jasné, že škrtící ventily umístěné vždy na výstupu musí být snadno demontovatelné, aby byla možná změna toku kapalin. Je potřeba použít takové spoje a materiály, které bez problémů obstojí při předpokládaných teplotách. Tyto teploty se mohou pohybovat kolem 100 °C.

5.2 Konstrukce výměníku

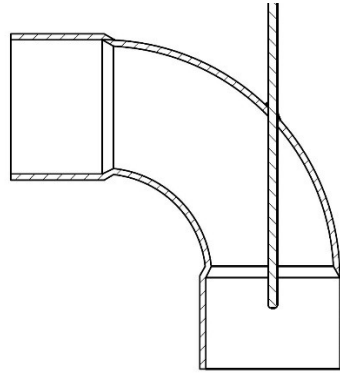
Základ výměníku tvoří měděná trubka z měkké mědi PR16x1 o délce 8,5 metru vytvarovaná do spirály. Tvar spirály snižuje prostorovou náročnost a je relativně snadno vyrobitelný. Tato trubka je vyrobena dle normy ČSN EN 12735, termín „měkká“ je používán, protože trubka je vyrobena téměř z čisté mědi a je proto velmi tvárná. Tyto trubky jsou používány nejčastěji pro chlazení, klimatizace nebo medicínální plyny. [11]

Přes měděnou spirálu je převlečena PVC hadice s vnitřním průměrem 25 mm, která zajistí obtékání a chlazení měděné trubky uvnitř. Plnění výměníku zajišťuje zakončení, které je tvořeno měděnými tvarovkami a závitovými redukcemi. Závitové redukce jsou nutné pro snadnou změnu směru proudění. Pro zhotovení těchto spojů bylo vybráno tvrdé pájení stříbrem, a to pro svoji vyšší teplotní odolnost než měkké pájky. Běžné měkké pájky určené pro pájení vodovodů je možné použít maximálně do teploty 105 °C. Sestavení zakončení obou stran výměníku je zobrazeno na obrázcích 14 a 16. Na obou těchto obrázcích jsou komponenty očíslovány shodně, aby nemohlo dojít k záměně při popisu konstrukce. [12]



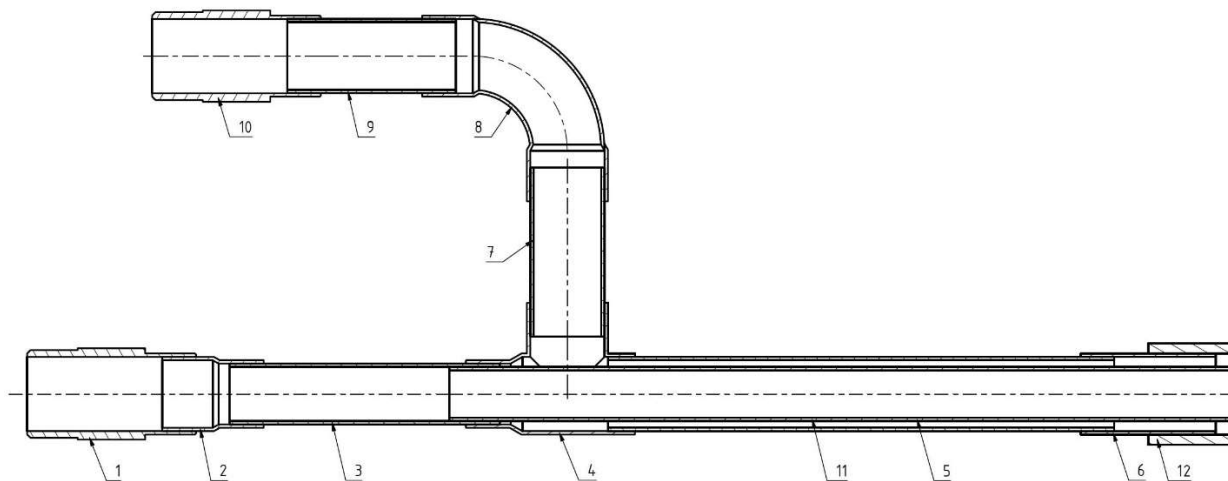
Obr. 14: Díly zakončení výměníku

V následujícím textu je za dílem vždy uvedeno číslo v sestavě na obrázcích 14 a 16 pro lepší orientaci v popisu. K plnění horkým médiem slouží závitová redukce (1), která je redukována přes redukci (2) a trubku (3) na průměr připájitelný na vnitřní trubku spirály (11). Použitím trubky (3) dojde ke zvětšení tloušťky stěny, tato tloušťka zajistí pozdější snazší připojení termočládku. Pro plnění mezikruží chladicí vodou slouží závitová redukce (10) následuje vsuvka (9) pro spojení s kolenem (8), které zajišťuje stejný směr koncovek pro připojení a také vytváří vhodné místo pro vyvrtání otvoru, který slouží pro prostrčení a připájení termočládku. Řez kolenem s vloženým termočládkem zobrazuje obrázek 15.



Obr. 15: Koleno s vloženým termočlánkem

Koleno (8) je spojeno s redukováným T-kusem (4) přes vsuvku (7). Dále je T-kus (4) spojen pomocí vsuvky (5) s redukcí (6), která slouží k připojení hadice hadicovými sponami. Vsuvka (5) působí zdánlivě zbytečně dlouhá, avšak tato délka je nutná pro technologický postup výroby, protože tato vsuvka dovolí lépe chladit navlečenou PVC hadici při posledním pájení na druhém konci výměníku. Více je tento problém popsán v kapitole 6.



Obr. 16: Řez koncem výměníku

6 Stavba experimentálního zařízení

Po nákupu potřebného materiálu a přistavení tlakových lahví začala samotná výroba výměníku. Nejprve došlo ke spájení závitové redukce (1), redukce (2) a vsuvky (3) v jeden z dílčích celků, druhý dílčí celek tvořily díly (4) až (10). Tyto celky a jejich pájení zobrazují obrázky 17 a 18.



Obr. 17: Pájení stříbrem



Obr. 18: Dílčí celky

Následně byla měděná trubka vytvarována s pomocí připravené trubky do spirály o průměru 400 mm, viz obrázek 19.



Obr. 19: Spirála

Na jeden z konců spirály byl navléknut celek II (obrázek 18) a na konec trubky byl připájen celek I (obrázek 18). Po vychladnutí spoje byl jeho povrch očištěn. Celek II (obrázek 18) byl převlečen přes tuto očištěnou část a připájen. Výsledek tohoto kroku zobrazuje obrázek 20.



Obr. 20: Jednostranně dokončená spirála

Dalším krokem mělo být převlečení PVC hadice přes vytvořenou spirálu. Tento krok se ukázal jako neproveditelný, proto bylo nutné narovnění trubky a navlečení v narovnaném stavu. Po navlečení hadice došlo opět k vytvarování spirály. Pro umožnění pájení druhého konce podobně jako je popsáno v odstavci výše bylo využito délky dílu 5 (obrázek 16), přes jehož celou délku byla převlečena hadice, aby vznikl dostatek místa na druhém konci pro nasunutí celku II (obrázek 18) a připájení celku I (obrázek 18). Po očištění byl připájen celek II (obrázek 18). PVC hadice byla během pájení chlazena vodou, aby vlivem tepla nedošlo k jejímu poškození. Po vychladnutí spojů byla hadice přesunuta do požadované polohy a její konce upevněny hadicovými sponami. Na závěr byly závit spirály pro zvýšení tuhosti konstrukce vyvázány stahovacími páskami. Výsledek je zobrazen na obrázku 21.



Obr. 21: Výměník bez měření článků

7 Měření

7.1 Příprava měření

7.1.1 Kalibrace v pevných bodech

Před nainstalováním termočlánků s označením TKDD23D75 od firmy BASTOR na vstupy a výstupy výměníku byla provedena kalibrace termočlánků. Kdy bylo nutné zjistit odchylku kalibrovaného termočlánku od zapůjčeného termočlánku OMEGA SCASS-020-U100 nejméně při dvou různých teplotách, aby bylo možné těmito body proložit křivku posunutých teplot. První kalibrační teplotou byl trojný bod vody. Izolovaná nádoba byla naplněna nadrceným ledem a poté dolita chladnou vodou. Po promíchání byla termočlánkem OMEGA SCASS-020U-100 naměřena teplota 0,5°C, tato teplota je pravděpodobně důsledkem příměsí v použité vodě. Druhým pevným bodem byla teplota varu vody, která vlivem atmosférického tlaku byla 97,0°C. Hodnoty naměřené jednotlivými termočlánky jsou zaznamenány v tabulce 1. Teploty zapsané v ostatních tabulkách jsou již o naměřenou hodnotu korigovány.

Tab. 1: Tabulka s kalibračními hodnotami termočlánků

Termočlánek	$T_{\text{tání}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{var}} [^{\circ}\text{C}]$
OMEGA SCASS-020U-100	0,5	97,0
BASTOR TKDD23D75 I	0,7	95,8
BASTOR TKDD23D75 II	0,7	95,8
BASTOR TKDD23D75 III	0,6	95,9
BASTOR TKDD23D75 IV	0,6	95,8

7.1.2 Připojení výměníku na vodovodní řad

Nejprve byl vyklizen prostor kolem dvou vodovodních baterií a přistaven stůl pod výměník, aby výstupy výměníku byly nad odpady. Následně byly demontovány perlátory z obou baterií a nahrazeny redukcemi ze závitu M24x1 na vnější závit 3/4". Propojení výměníku s redukcemi zajišťovaly dvě hadice zakončené hadičníky s 3/4" závitem. Připojený výměník je zobrazen na obrázku 22.



Obr. 22: Výměník před měřením

7.1.3 Ověření těsnosti

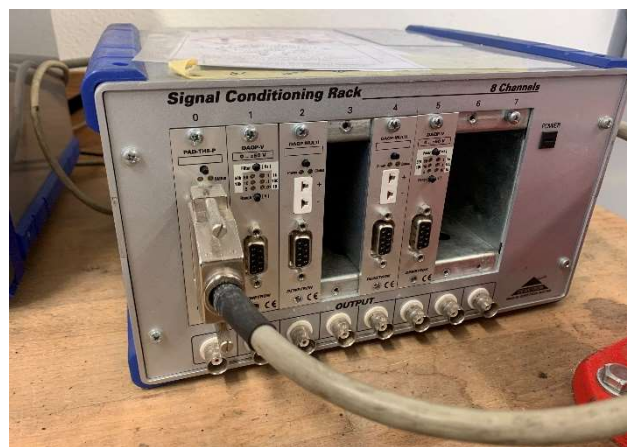
Před samotným měřením byl výměník otevřením obou baterií na plný průtok a pomalým zavíráním výstupních ventilů zcela naplněn vodou, aby došlo ke zvýšení tlaku na maximální možný tlak. Tento krok měl za cíl odhalit případné netěsnosti, které by znemožnily další měření. Byl objeven problém s těsností dvou závitových spojů. Tato netěsnost byla odstraněna použitím většího množství teflonové pásky.

7.1.4 Příprava měřícího zařízení

K měření teplot byl použit systém sběru dat od firmy Dewetron, přístroj DEWE 2010 s měřícím softwarem DEWESoft. Po připojení termočlánků bylo nastaveno rozhraní tak, aby bylo přehlednější a bylo možné snáze zpracovávat získaná data. Použité zařízení je zobrazeno na obrázcích 23 a 24.



Obr. 23: DEWE 2010



Obr. 24: Měřicí ústředna

7.2 Postup měření

Tato kapitola popisuje postup měření, kterým byla naměřena získaná data. Nejprve byl uveden do chodu systém sběru teplot. Následně byly nastaveny průtoky obou kapalin a spuštěn záznam teplot. Po ustálení teplot byly do připravených nádob o objemu 3 litrů vloženy hadice s vytékající vodou, která do té doby odtékala volně do odpadu. Z plnění těchto nádob byl vždy pořízen videozáznam se snímkováním 60 snímků za sekundu, ze kterého bylo možné zpětně po ukončení měření dopočítat průtok v obou větvích výměníku. Při prvním měření byl vždy průtok chlazené vody nastaven na minimum a v další měření na maximum. Díky tomuto kroku byl zjištěn rozsah teplot, na které bylo možné při daném zapojení vodu chladit. Jelikož bylo plánováno deset variant průtoků, byl zvolen takový krok, aby byl co nejlépe pokryt dostupný rozsah.

7.3 Vyhodnocení naměřených dat

K zpracování naměřených dat byl vytvořen program, ve kterém jsou po zadání naměřených dat, tedy teplot a časů, za které se naplnily nádoby, vypočteny průtoky. Dále jsou teploty korigovány o odchylku zjištěnou v kapitole 7.1.1 a jsou vypočteny střední rychlosti na vstupech obou kapalin, které později slouží jako vstupní data pro CFD simulaci. Také jsou vypočteny tepelné toky u obou kapalin. Pro kontrolu je proveden součet těchto tepelných toků. Na konec je vypočten součinitel prostupu tepla.

Výpočet objemových průtoků probíhá pomocí následujícího vztahu, ve kterém je objemový průtok dán podílem objemu nádoby a času, za který se nádoba naplnila.

$$\dot{V} = \frac{V_n}{t}$$

Kde:

\dot{V}	objemový průtok [l/s],
V_n	objem odměrné nádoby [l],
t	čas plnění odměrné nádoby [s].

Střední rychlosti v průřezích vstupních trubek jsou vypočítány následovně.

$$\dot{V} = S_{vstup} \cdot w$$
$$w = \frac{\dot{V}}{S_{vstup}} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot r^2}$$

Kde:

w	střední rychlost [m/s],
\dot{V}	objemový průtok [m ³ /s],
S_{vstup}	plocha průřezu vstupní trubky [m ²],
r	průměr vstupní trubky [m].

Pomocí následujícího vzorce jsou vypočteny tepelné toky pro obě kapaliny. Pro potřeby výpočtů byla měrná tepelná kapacita považována za konstantu s hodnotou 4180 J/kgK, hustota byla považována za konstantu s hodnotou 1000 kg/m³.

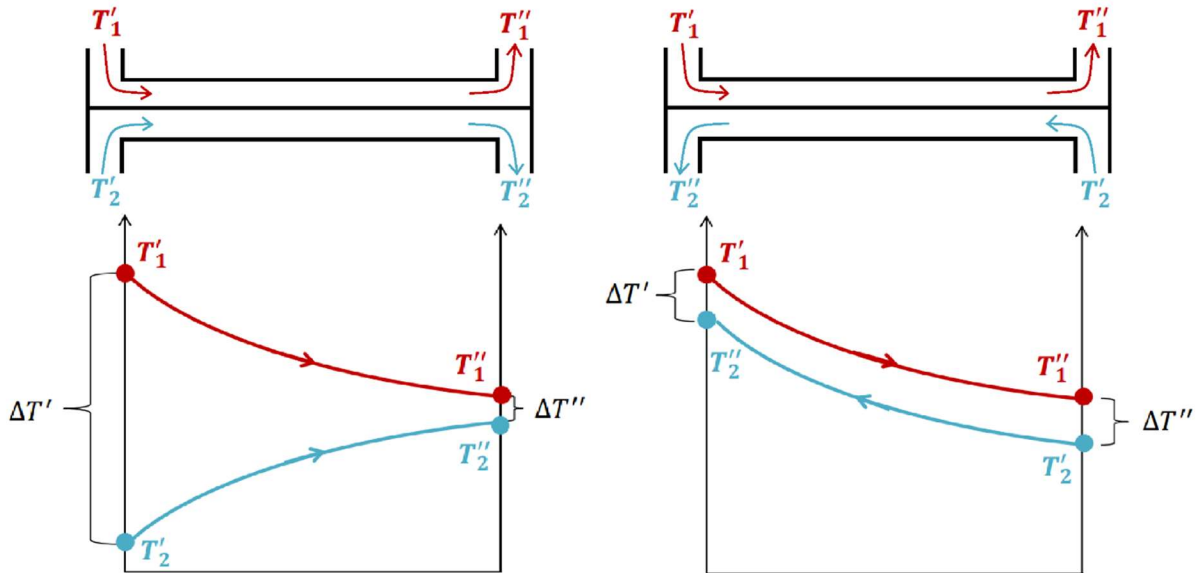
$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

Kde:

\dot{Q}	tepelný tok [kW],
\dot{m}	hmotnostní průtok [kg/s],
c_p	měrná tepelná kapacita vody [J/kgK],
ΔT	rozdíl vstupní a výstupní teploty [K].

Následně jsou hodnoty tepelných toků u obou kapalin sečteny z důvodu kontroly správnosti naměřených dat, zda nedošlo během měření k hrubé chybě.

Dále je vypočten střední teplotní logaritmický spád ΔT_s , jehož výpočet závisí na vzájemném směru proudění kapalin. Rozdíl ve výpočtu zobrazují grafy na obrázku 25. [13]



Obr. 25: Grafy teplot v souproudém a protiproudém výměníku

$$\Delta T_s = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}}$$

Kde:

ΔT_s

střední teplotní logaritmický spád [°C],

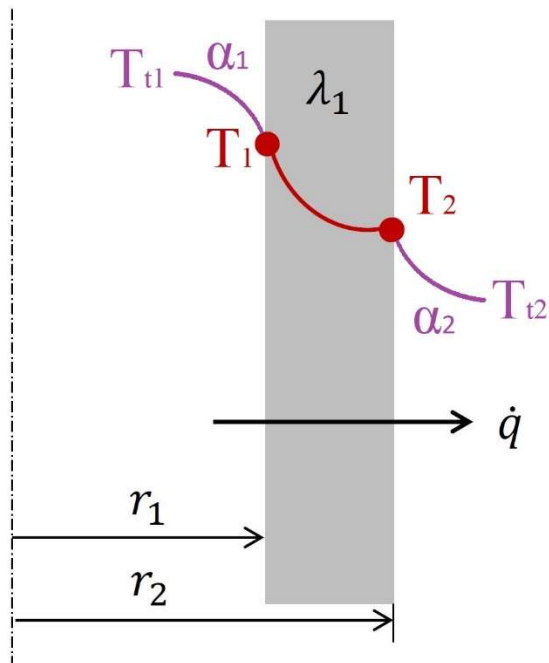
$\Delta T'$

rozdíl teplot prvního konce výměníku [°C],

$\Delta T''$

rozdíl teplot druhého konce výměníku [°C].

Vzorec pro výpočet součinitele prostupu tepla byl odvozen následovně. Nejprve je z Biot-Fourierova zákona odvozen vzorec pro jednoduchou válcovou stěnu, jejíž schéma je na obrázku 26.



Obr. 26: Schéma válcové stěny

Kde:

\dot{Q}	tepelný tok [W],
λ_1	součinitel tepelné vodivosti [W/m K],
S	teplosměnná plocha [m ²],
T	teplota [°C],
L	délka teplosměnné plochy [m],
r_1	vnitřní (mladina) poloměr válce [m],
r_2	vnější (chladicí voda) poloměr válce [m],
T_{t1}	teplota tekutiny uvnitř potrubí [°C],
T_{t2}	teplota tekutiny vně potrubí [°C],
T_1	teplota na vnitřní straně potrubí [°C],
T_2	teplota na vnější straně potrubí [°C],
α_1	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně válce [W/m ² K],
α_2	součinitel přestupu tepla na vnější straně vnitřní [W/m ² K].

Je uvažována závislost plochy na poloměru.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S(r) \cdot \text{grad } T$$

V případě jednorozměrné úlohy lze rovnici zjednodušit do následujícího tvaru.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dT}{dr}$$

Provedení separace proměnných a integrace.

$$\frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L} dr = -\lambda \cdot dT$$

$$T = -\frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln r + C$$

Určení konstanty C z okrajové podmínky pro $r = r_1$ je $T = T_1$.

$$T_1 = -\frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln r_1 + C$$

$$C = T_1 + \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln r_1$$

Určení konstanty C z okrajové podmínky pro $r = r_2$ je $T = T_2$.

$$T_2 = -\frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln r_2 + T_1 + \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln r_1 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{R_1}{R_2}}$$

Sečtením tří následujících vzorců vznikne vzorec pro prostup tepla válcovou stěnou.

$$T_{t1} - T_1 = \frac{\dot{Q}}{2 \pi r_1 L \alpha_1}$$

$$T_1 - T_2 = \frac{\dot{Q}}{2 \pi L \lambda \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$T_2 - T_{t2} = \frac{\dot{Q}}{2 \pi r_2 L \alpha_2}$$

$$(T_{t1} - T_1) + (T_1 - T_2) + (T_2 - T_{t2}) = \left(\frac{\dot{Q}}{2 \pi r_1 L \alpha_1} \right) + \left(\frac{\dot{Q}}{2 \pi L \lambda \ln \frac{r_2}{r_1}} \right) + \left(\frac{\dot{Q}}{2 \pi r_2 L \alpha_2} \right)$$

$$T_{t1} - T_{t2} = \frac{\dot{Q}}{2 \pi L} \left(\frac{1}{r_1 \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \alpha_2} \right)$$

$$\dot{Q} = \Delta T_s 2 \pi L \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1 \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \alpha_2}\right)} = \Delta T_s 2 \pi L k$$
$$k = \frac{\dot{Q}}{2 \pi L \Delta T_s}$$

Kde:

k součinitel prostupu tepla [W/m K],
 d průměr teplosměnné plochy [m],
 ΔT_s střední teplotní logaritmický spád [°C].

7.4 Chyby a nejistoty měření

Tato kapitola vychází z pramenů [14], [15] a je zaměřena na rozdělení chyb, které vznikají při měření jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou veličiny a hodnotou skutečnou. Takový rozdíl je nazýván chybou a vyskytuje se vždy u každého měření. Existuje nepřeberné množství vlivů, které mohou ovlivnit měření. Snahou každého měření by mělo být provádět samotné měření i následné vyhodnocení s co nejmenšími chybami. Chyby lze podle příčin jejich vzniku rozdělit na hrubé, soustavné a nahodilé.

Hrubé chyby

Hrubá chyba vzniká především z nepozornosti, vlivem selhání měřicí aparatury, chybnou obsluhou, nesprávným odečítáním hodnot nebo chybným zápisem dat měření. Hrubé chyby je nutno eliminovat pečlivou formou zpracování.

Soustavné chyby

Tento druh chyb je dán přesností měřícího přístroje nebo metodou zvolenou pro měření. Při opakovaném měření má tato chyba konstantní hodnotu. U těchto chyb může existovat závislost na čase nebo na cyklech měření, protože se chyba může měnit důsledkem opotřebení měřícího přístroje. V případě, že je chyba známa, je možné ji matematicky korigovat. Tyto chyby není vždy snadné odhalit.

Nejistoty měření

K nejistotám řadíme soubor velkého množství drobných rušivých vlivů, jež ovlivňují výsledek. Není možné je zcela odstranit. Lze ji pouze odhadovat při opakovaném měření, použitím statistických nástrojů na zpracování naměřených dat. Minimální počet opakování měření bývá stanoven na pět až deset opakování. Maximální počet měření je omezen podmínkami měření, ať už to jsou náklady nebo čas vyhrazený na provedení a zpracování měření.

Tato bakalářská práce se dále problematikou chyb měření nezabývá, protože zmíněná problematika není jejím cílem. Z tohoto důvodu uvádí práce pouze základní rozdělení a jejich popis.

7.5 Výsledky

Původní plán byl provést dvacet variant měření, deset pro souproudé zapojení a deset pro protiproudé zapojení. Nejprve bylo naměřeno deset variant souproudého zapojení a deset variant protiproudého zapojení. V průběhu vyhodnocování bylo zjištěno, že minimální průtoky u souproudého a protiproudého zapojení si neodpovídají. Z tohoto důvodu bylo naměřeno ještě několik variant pro souproudé zapojení, aby bylo možné sledovat rozdíl mezi zapojeními. Je to také důvod, proč je u souproudého zapojení změřeno více variant než u protiproudého zapojení. Výsledky jsou zobrazeny v tabulkách 2 a 3. Tabulky jsou barevně odlišeny, souproudému zapojení odpovídá oranžová barva a protiproudému zapojení odpovídá modrá barva. Významy zkratk vyskytujících se v záhlaví tabulek jsou:

$T_{T in}$	teplota chlazené vody na vstupu [°C],
$T_{T out}$	teplota chlazené vody na výstupu [°C],
$T_{S in}$	teplota ohřívané vody na vstupu [°C],
$T_{S out}$	teplota ohřívané vody na výstupu [°C],
\dot{V}_T	objemový průtok chlazené vody [m ³ /s],
\dot{V}_S	objemový průtok ohřívané vody [m ³ /s],
w_T	rychlost chlazené vody [m/s],
w_S	rychlost ohřívané vody [m/s],
ΔT_s	střední teplotní logaritmický spád [°C],
\dot{Q}_{in}	tepelný tok chladicí kapaliny [kW],
\dot{Q}_{out}	tepelný tok ohřívané kapaliny [kW],
k	součinitel prostupu tepla [W/m K].

Tab. 2: Výsledky měření souproudého zapojení

$T_{T in}$ [°C]	$T_{T out}$ [°C]	$T_{S in}$ [°C]	$T_{S out}$ [°C]	\dot{V}_T [l/s]	\dot{V}_S [l/s]	w_T [m/s]	w_S [m/s]	ΔT_s [°C]	\dot{Q}_{in} [kW]	\dot{Q}_{out} [kW]	$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}$ [kW]	k [W/mK]
49,91	15,92	10,64	14,60	0,026	0,235	0,17	1,33	11,19	3,90	-3,76	0,15	6,41
52,34	16,43	9,62	14,71	0,032	0,235	0,21	1,33	12,77	5,00	-4,82	0,18	7,20
51,84	16,74	9,72	14,91	0,034	0,235	0,22	1,33	12,84	5,10	-5,06	0,04	7,41
52,55	17,14	9,62	15,21	0,036	0,235	0,23	1,33	13,21	5,50	-5,27	0,22	7,63
52,65	17,85	9,62	15,82	0,041	0,235	0,26	1,33	13,42	6,10	-5,90	0,20	8,37
52,04	18,05	10,03	16,03	0,040	0,235	0,26	1,33	13,19	5,90	-5,71	0,18	8,24
51,84	19,17	9,52	16,94	0,052	0,235	0,34	1,33	13,62	7,29	-7,17	0,13	9,94
52,24	19,68	9,62	17,24	0,054	0,235	0,35	1,33	14,04	7,49	-7,39	0,11	9,92
52,04	19,78	9,62	17,45	0,056	0,235	0,37	1,33	13,82	7,69	-7,58	0,11	10,35
52,85	21,50	10,13	19,48	0,069	0,235	0,45	1,33	13,36	9,19	-9,02	0,17	12,77
54,67	21,91	9,83	19,58	0,068	0,235	0,44	1,33	14,38	9,59	-9,25	0,34	12,26

$T_{T in}$ [°C]	$T_{T out}$ [°C]	$T_{S in}$ [°C]	$T_{S out}$ [°C]	\dot{V}_T [l/s]	\dot{V}_S [l/s]	w_T [m/s]	w_S [m/s]	ΔT_s [°C]	\dot{Q}_{in} [kW]	\dot{Q}_{out} [kW]	$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}$ [kW]	k [W/mK]
54,88	22,52	9,72	20,19	0,074	0,235	0,48	1,33	14,45	10,29	-10,02	0,27	13,15
54,88	22,62	9,72	20,19	0,075	0,235	0,49	1,33	14,63	10,29	-10,12	0,17	13,06
54,88	23,03	9,62	20,59	0,080	0,235	0,52	1,33	14,65	10,79	-10,60	0,19	13,67
52,85	24,45	10,13	22,22	0,100	0,235	0,65	1,33	13,72	11,89	-11,81	0,07	16,17
54,57	24,55	10,54	22,22	0,089	0,235	0,58	1,33	14,20	11,49	-11,20	0,29	14,96
54,98	25,16	9,52	22,72	0,101	0,235	0,66	1,33	14,70	12,98	-12,60	0,39	16,29
53,05	26,68	10,64	24,65	0,123	0,235	0,80	1,33	13,29	13,78	-13,54	0,24	19,26
53,46	26,78	9,83	24,35	0,127	0,235	0,83	1,33	14,28	14,28	-14,17	0,11	18,66
53,96	28,81	9,52	26,38	0,156	0,235	1,01	1,33	14,46	16,58	-16,38	0,20	21,33
55,69	31,55	9,72	29,42	0,194	0,235	1,26	1,33	14,27	19,37	-19,59	-0,22	25,56
55,99	31,75	10,13	29,72	0,190	0,235	1,24	1,33	14,06	19,27	-19,30	-0,03	25,68
55,69	31,75	9,93	29,52	0,196	0,235	1,27	1,33	14,41	19,27	-19,62	-0,34	25,26

Tab. 3: Výsledky měření protiproudého zapojení

$T_{T in}$ [°C]	$T_{T out}$ [°C]	$T_{S in}$ [°C]	$T_{S out}$ [°C]	\dot{V}_T [l/s]	\dot{V}_S [l/s]	w_T [m/s]	w_S [m/s]	ΔT_s [°C]	\dot{Q}_{in} [kW]	\dot{Q}_{out} [kW]	$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}$ [kW]	k [W/mK]
47,08	11,97	9,53	13,27	0,022	0,235	0,15	1,33	11,93	3,68	-3,28	0,40	5,46
50,12	12,68	9,53	14,59	0,030	0,235	0,20	1,33	13,36	4,98	-4,71	0,26	6,79
52,34	12,98	9,53	15,20	0,033	0,235	0,21	1,33	14,18	5,57	-5,38	0,20	7,23
52,75	16,43	9,63	19,46	0,061	0,235	0,40	1,33	16,68	9,66	-9,33	0,33	10,66
49,31	18,66	9,63	22,60	0,096	0,235	0,62	1,33	16,30	12,75	-12,27	0,48	14,37
53,56	19,37	9,53	24,12	0,097	0,235	0,63	1,33	17,89	14,35	-13,89	0,46	14,78
55,28	21,10	9,84	26,86	0,115	0,235	0,75	1,33	18,54	16,74	-16,46	0,28	16,77
54,88	21,81	10,34	27,56	0,121	0,235	0,79	1,33	18,26	16,94	-16,75	0,18	17,28
55,48	22,42	9,94	28,38	0,128	0,235	0,83	1,33	18,86	18,13	-17,74	0,39	17,81
49,21	23,23	9,53	28,07	0,165	0,235	1,07	1,33	17,15	18,24	-17,92	0,32	19,74
55,08	23,74	10,14	29,79	0,150	0,235	0,97	1,33	18,84	19,33	-19,63	-0,30	19,36
49,21	24,04	9,43	28,88	0,178	0,235	1,16	1,33	17,31	19,13	-18,72	0,42	20,47
54,07	25,87	9,73	32,33	0,186	0,235	1,21	1,33	18,80	22,22	-21,87	0,35	21,96

Z výše uvedených tabulek je patrný zvyšující se koeficient prostupu tepla společně s rostoucím průtokem teplé vody. Tento růst je pravděpodobně způsoben nárůstem rychlosti uvnitř výměníku. Dále je možné vidět velmi výrazný rozdíl mezi souproutým a protiproudým zapojením výměníku, kdy při nejnižších průtocích chladí protiproudá varianta o 3,95°C, u maximálních průtoků je to až o 5,88°C. Tento rozdíl je dán odlišným teplotním spádem, rozdíl je zobrazen v grafech na obrázku 25.

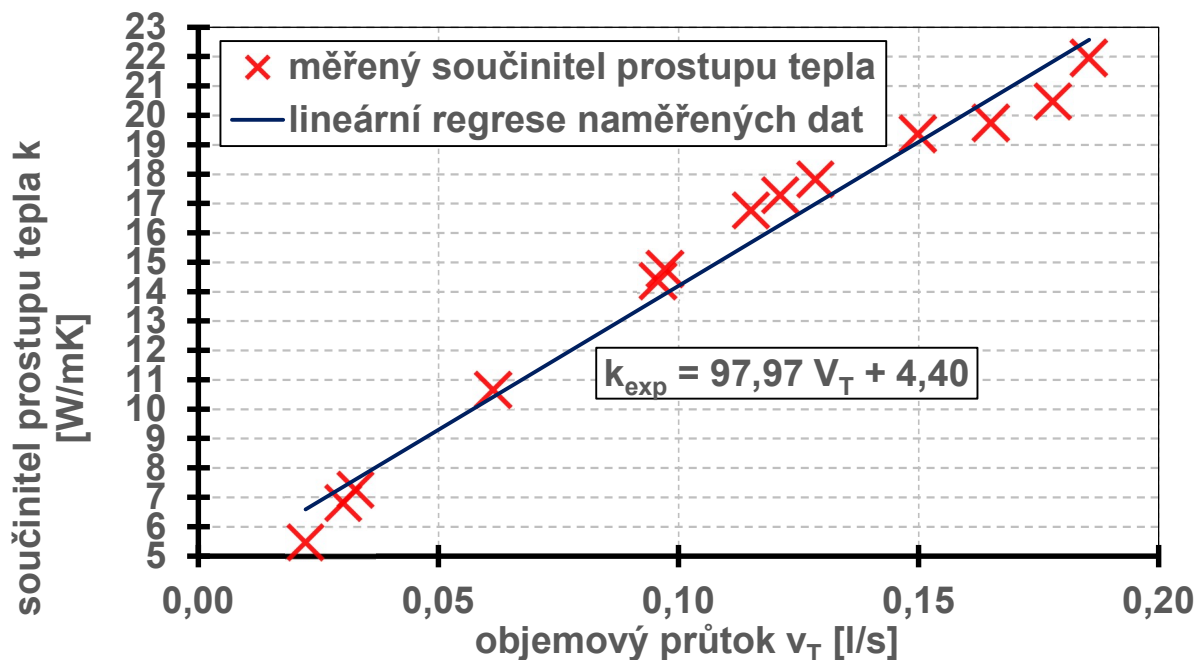
7.6 Dovolný průtok při chlazení mladiny

V této kapitole je proveden výpočet průtoku mladiny, která je ochlazována z 95°C na 15°C, což je teplota, která odpovídá spodní hranici teplot pro svrchní kvašení. Svrchní kvašení probíhá většinou v rozmezí teplot 15°C až 22°C. Předpokládaný průtok studené vody je 0,235 l/s a její teplota je 9,5°C. Hustota vody a měrná tepelná kapacita jsou považovány za konstanty. Hustota vody s hodnotou 1000 kg/m³ a měrná tepelná kapacita s hodnotou 4180 J/kgK. Není uvažován vliv změny kinematické viskozity. Z tabulek 2 a 3 je zřejmý trend poklesu součinitele prostupu tepla k se snižujícím se průtokem. Naměřenými daty je proložena lineární závislost k na průtoku \dot{V}_T . Výpočet průtoku je proveden následujícím postupem. [4]

Nejprve je zvolena hodnota objemového průtoku mladiny v_T , ta je použita k výpočtu součinitele prostupu tepla k_{exp} pomocí funkce $k_{exp} = 97,967 v_T + 4,4011$, tato funkce je získána pomocí lineární regrese naměřených dat v grafu na obrázku 27.

Kde:

\dot{V}_T objemový průtok chlazené vody [m³/s],
 k_{exp} součinitel prostupu tepla [W/mK].



Obr. 27: Graf měřeného součinitele prostupu tepla a průtoku \dot{V}_T

Druhým krokem je výpočet výstupní teploty chladicí vody za předpokladu, že tepelná bilance je rovna nule.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out} &= 0 \\ \dot{V}_T c_p (T_{T out} - T_{T in}) + \dot{V}_S c_p (T_{S out} - T_{S in}) &= 0 \\ \frac{\dot{V}_T c_p (T_{T in} - T_{T out})}{\dot{V}_S c_p} + T_{S in} &= T_{S out} \end{aligned}$$

Třetím krokem je výpočet středního teplotního logaritmického spádu pomocí vzorce, který byl zmíněn v kapitole 7.3. Pro úplnost je uveden níže.

$$\Delta T_s = \frac{(T_{T\ in} - T_{S\ out}) - (T_{T\ out} - T_{S\ in})}{\ln \frac{(T_{T\ in} - T_{S\ out})}{(T_{T\ out} - T_{S\ in})}}$$

K ověření správnosti zvoleného průtoku slouží porovnání součinitele prostupu tepla se součinitelem k_{exp} vypočteným pomocí vzorce odvozeného v kapitole 7.3, viz následující vztah.

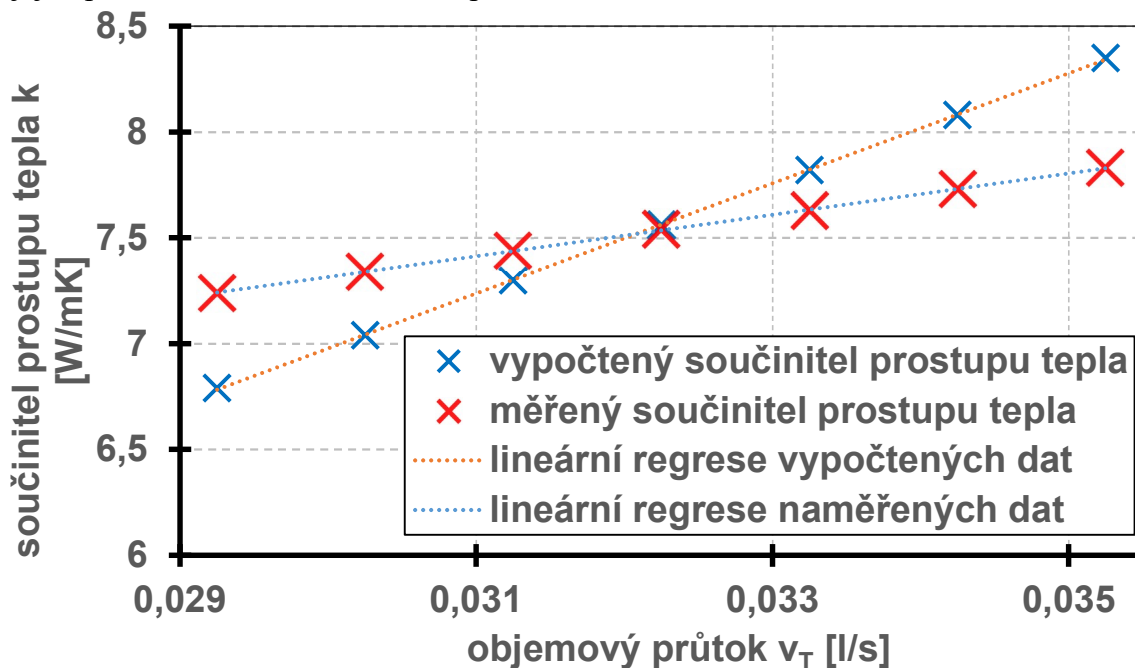
$$k = \frac{\dot{Q}}{2 \pi L \Delta T_s}$$

Postup výpočtu zobrazuje tabulka 4, kde byl iteračním postupem nastavován průtok, aby $|k_{exp} - k| < 0,05$, viz zeleně zvýrazněný řádek. Průběh obou součinitelů prostupu tepla v závislosti na průtoku \dot{V}_T zobrazuje obrázek 28.

Tab. 4: Výpočet průtoku při chlazení mladiny

$T_{T\ in}$ [°C]	$T_{T\ ou}$ [°C]	$T_{S\ in}$ [°C]	$T_{S\ out}$ [°C]	\dot{V}_T [l/s]	\dot{V}_S [l/s]	ΔT_s [°C]	\dot{Q}_{IN} [kW]	\dot{Q}_{OUT} [kW]	k_{exp} [W/m ² ·K]	k [W/m ² K]
95	15	9,5	19,37	0,029	0,235	26,76	9697,6	-9697,6	7,24	6,79
95	15	9,5	19,71	0,03	0,235	26,67	10032	-10032	7,34	7,04
95	15	9,5	20,05	0,031	0,235	26,59	10366,4	-10366,4	7,44	7,30
95	15	9,5	20,39	0,032	0,235	26,50	10700,8	-10700,8	7,54	7,56
95	15	9,5	20,73	0,033	0,235	26,42	11035,2	-11035,2	7,63	7,82
95	15	9,5	21,07	0,034	0,235	26,33	11369,6	-11369,6	7,73	8,08
95	15	9,5	21,41	0,035	0,235	26,25	11704	-11704	7,83	8,35

Vyrobený výměník dle výpočtu výše je schopen, při průtoku chladicí vody 14,1 l/min a její teplotě 9,5°C, ochladit mladinu průtokem 1,92 l/min z 95°C na 15°C.

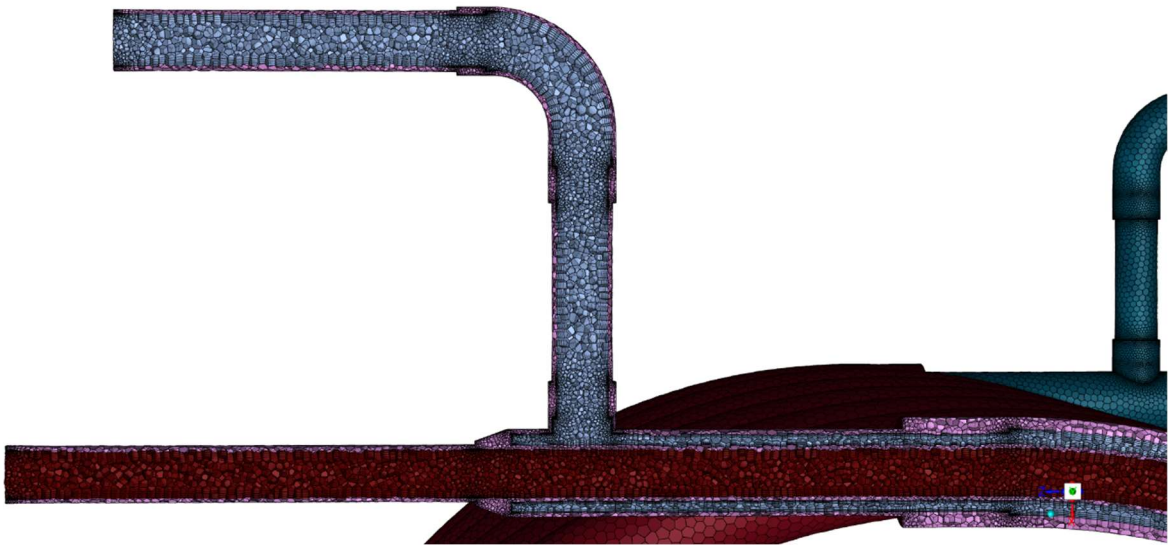


Obr. 28: Graf součinitelů prostupu tepla a průtoku \dot{V}_T

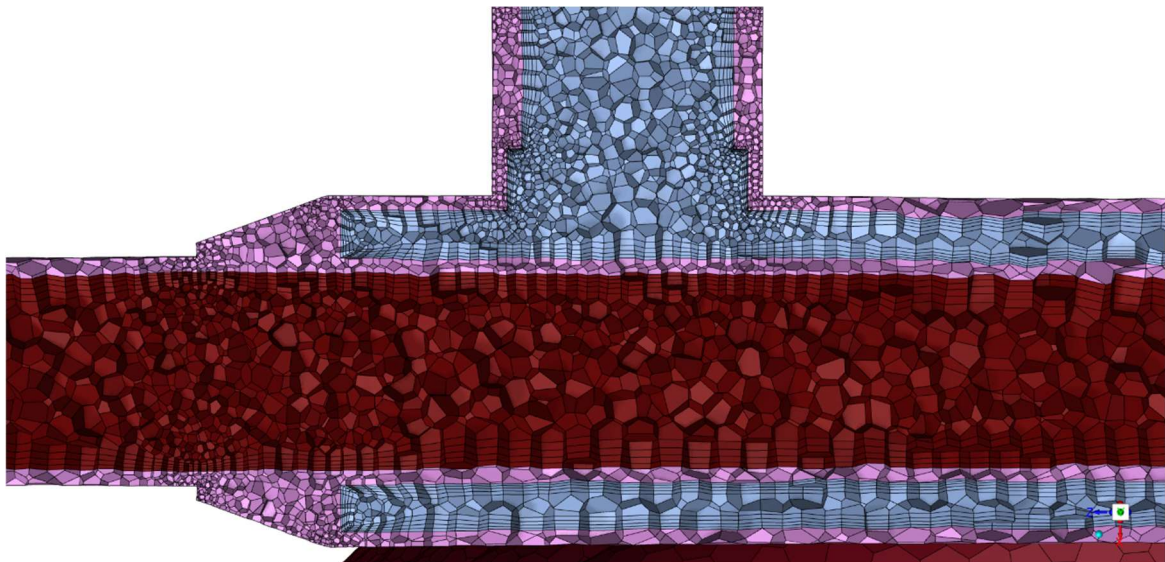
8 Numerická simulace výpočet

8.1 Příprava numerické simulace

Nejprve byl v softwaru Autodesk Inventor Professional 2022 vytvořen model výměníku, který byl importován k dalším úpravám do programu ANSYS SpaceClaim 2022 R1. V tomto programu došlo k úpravám a rozdělení ploch, aby bylo možné později snáze definovat okrajové podmínky. Tvorba sítě, definice okrajových podmínek a samotný výpočet probíhal v programu ANSYS Fluent 2022 R1. Pro tvorbu sítě byly zvoleny polyhedrické buňky s minimální velikostí 0,45 mm. V oblasti mezních vrstev síť tvořily čtyři vrstvy buněk. Výsledný počet buněk byl zhruba 2,2 milionu. Řez vygenerovanou sítí v problematických oblastech je zobrazen na obrázcích 29 a 30.



Obr. 29: Vygenerovaná síť, řez v oblasti vstupu



Obr. 30: Vygenerovaná síť, detail v problematické oblasti

8.2 Výpočet

Fyzikální vlastnosti použitých materiálů a proudícího média byly převzaty z databáze Fluent. Vstupní parametry průtoků byly zadávány pomocí střední rychlosti, která byla vypočtena z naměřeného objemového průtoku při experimentu a rozměrů výměníku. Vstupní teploty byly také převzaty z výsledků měření. Tepelná výměna mezi výměníkem a okolím není předpokládána. K modelování turbulencí byl zvolen model SST k- ω . Výstupní teploty obou tekutin pro každou variantu byly zjištěny pomocí plošného integrálu.

8.3 Výsledky

Výsledky numerické simulace jsou uvedeny v tabulkách 5 a 6. Tabulky jsou barevně rozlišeny stejně jako v kapitole 7.5.

Tab. 5: Výsledky numerické simulace souprůdného zapojení

$T_{T in}$ [°C]	$T_{T out}$ [°C]	$T_{S in}$ [°C]	$T_{S out}$ [°C]	\dot{V}_T [l/s]	\dot{V}_S [l/s]	w_T [m/s]	w_S [m/s]	ΔT_s [°C]	\dot{Q}_{in} [kW]	\dot{Q}_{out} [kW]	$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}$ [kW]	k [W/mK]
49,91	14,78	10,64	14,54	0,026	0,235	0,17	1,33	7,65	3,84	-3,88	-0,04	9,45
52,34	15,04	9,62	14,68	0,032	0,235	0,21	1,33	8,90	4,97	-5,01	-0,04	10,50
51,84	15,42	9,72	15,02	0,034	0,235	0,22	1,33	8,96	5,21	-5,25	-0,04	10,93
52,55	15,60	9,62	15,17	0,036	0,235	0,23	1,33	9,21	5,46	-5,50	-0,04	11,14
52,65	16,34	9,62	15,84	0,041	0,235	0,26	1,33	9,55	6,11	-6,16	-0,05	12,02
52,04	16,53	10,03	16,05	0,040	0,235	0,26	1,33	9,31	5,92	-5,97	-0,05	11,96
51,84	17,74	9,52	17,07	0,052	0,235	0,34	1,33	10,06	7,42	-7,48	-0,06	13,87
52,24	18,14	9,62	17,43	0,054	0,235	0,35	1,33	10,23	7,68	-7,74	-0,06	14,11
52,04	18,35	9,62	17,61	0,056	0,235	0,37	1,33	10,29	7,86	-7,92	-0,06	14,36
52,85	20,48	10,13	19,53	0,069	0,235	0,45	1,33	11,00	9,24	-9,32	-0,08	15,80
54,67	20,53	9,83	19,55	0,068	0,235	0,44	1,33	11,48	9,56	-9,64	-0,08	15,66
54,88	21,31	9,72	20,21	0,074	0,235	0,48	1,33	11,86	10,31	-10,39	-0,08	16,34
54,88	21,43	9,72	20,31	0,075	0,235	0,49	1,33	11,91	10,41	-10,49	-0,08	16,43
54,88	21,89	9,62	20,70	0,080	0,235	0,52	1,33	12,13	10,89	-10,98	-0,09	16,88
52,85	23,75	10,13	22,33	0,100	0,235	0,65	1,33	12,14	12,00	-12,10	-0,10	18,60
54,57	23,52	10,54	22,21	0,089	0,235	0,58	1,33	12,17	11,48	-11,58	-0,10	17,74
54,98	24,18	9,52	22,65	0,101	0,235	0,66	1,33	12,96	12,91	-13,01	-0,10	18,72
53,05	26,23	10,64	24,52	0,123	0,235	0,80	1,33	12,66	13,66	-13,77	-0,12	20,28
53,46	26,22	9,83	24,42	0,127	0,235	0,83	1,33	13,12	14,35	-14,47	-0,11	20,57
53,96	28,42	9,52	26,30	0,156	0,235	1,01	1,33	13,92	16,50	-16,63	-0,13	22,27
55,69	31,80	9,72	29,28	0,194	0,235	1,26	1,33	14,96	19,23	-19,39	-0,15	24,17
55,99	31,94	10,13	29,45	0,190	0,235	1,24	1,33	14,88	19,00	-19,15	-0,15	24,00
55,69	32,02	9,93	29,49	0,196	0,235	1,27	1,33	14,92	19,24	-19,40	-0,16	24,25

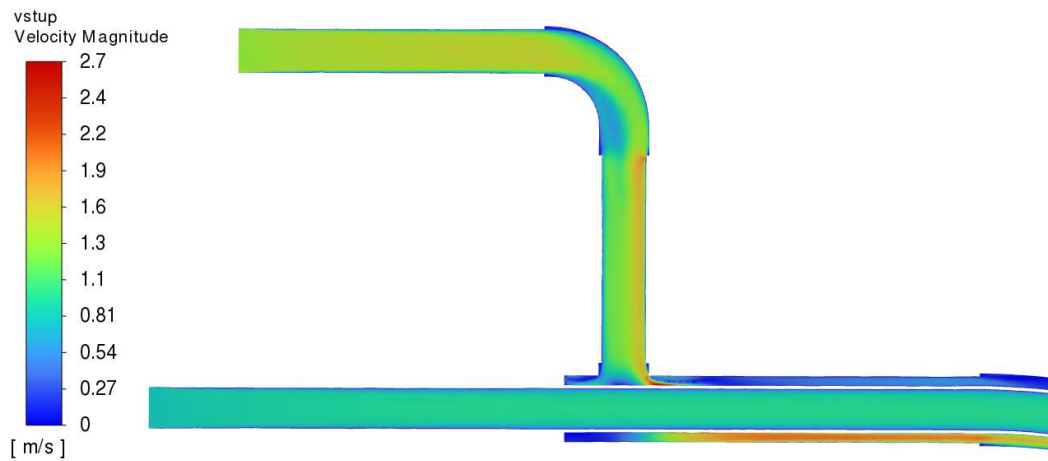
Tab. 6: Výsledky numerické simulace protiproudého zapojení

$T_{T in}$ [°C]	$T_{T out}$ [°C]	$T_{S in}$ [°C]	$T_{S out}$ [°C]	\dot{V}_T [l/s]	\dot{V}_S [l/s]	w_T [m/s]	w_S [m/s]	ΔT_s [°C]	\dot{Q}_{in} [kW]	\dot{Q}_{out} [kW]	$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}$ [kW]	k [W/mK]
47,08	10,13	9,53	13,14	0,022	0,235	0,15	1,33	8,27	3,55	-3,45	0,10	7,93
50,12	10,47	9,53	14,68	0,030	0,235	0,20	1,33	9,49	5,06	-4,99	0,07	9,92
52,34	10,66	9,53	15,39	0,033	0,235	0,21	1,33	10,27	5,76	-5,69	0,07	10,44
52,75	12,86	9,63	20,06	0,061	0,235	0,40	1,33	12,73	10,26	-10,25	0,01	15,08
49,31	15,66	9,63	23,31	0,096	0,235	0,62	1,33	13,66	13,45	-13,47	-0,02	18,45
53,56	16,36	9,53	24,88	0,097	0,235	0,63	1,33	15,23	15,09	-15,11	-0,02	18,57
55,28	18,73	9,84	27,70	0,115	0,235	0,75	1,33	16,51	17,57	-17,60	-0,03	19,94
54,88	19,65	10,34	28,45	0,121	0,235	0,79	1,33	16,40	17,81	-17,85	-0,04	20,35
55,48	20,16	9,94	29,16	0,128	0,235	0,83	1,33	17,02	18,91	-18,95	-0,04	20,83
49,21	21,36	9,53	29,01	0,165	0,235	1,07	1,33	15,64	19,15	-19,21	-0,05	22,96
55,08	22,22	10,14	31,01	0,150	0,235	0,97	1,33	17,39	20,53	-20,58	-0,05	22,13
49,21	22,23	9,43	29,77	0,178	0,235	1,16	1,33	15,89	20,01	-20,07	-0,06	23,62
54,07	24,59	9,73	32,90	0,186	0,235	1,21	1,33	17,82	22,79	-22,86	-0,07	23,97

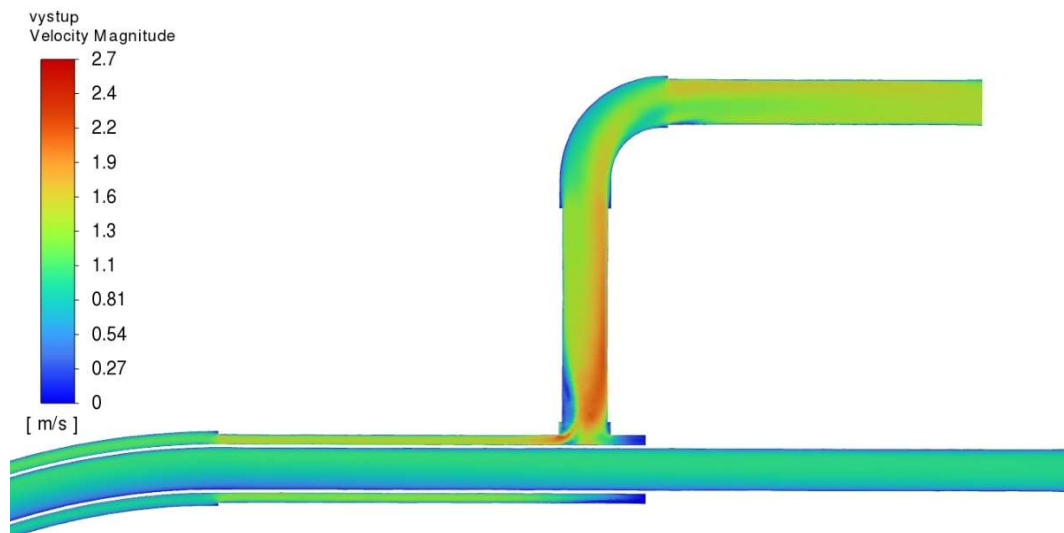
Kde:

$T_{T in}$	teplota chlazené vody na vstupu [°C],
$T_{T out}$	teplota chlazené vody na výstupu [°C],
$T_{S in}$	teplota ohřivané vody na vstupu [°C],
$T_{S out}$	teplota ohřivané vody na výstupu [°C],
\dot{V}_T	objemový průtok chlazené vody [m ³ /s],
\dot{V}_S	objemový průtok ohřivané vody [m ³ /s],
w_T	rychlost chlazené vody [m/s],
w_S	rychlost ohřivané vody [m/s],
ΔT_s	střední teplotní logaritmický spád [°C],
\dot{Q}_{in}	tepelný tok chladicí kapaliny [kW],
\dot{Q}_{out}	tepelný tok ohřivané kapaliny [kW],
k	součinitel prostupu tepla [W/mK].

Na následujících obrázcích 31 a 32 jsou zobrazena rychlostní pole ve vstupní a výstupní oblasti u souproutého zapojení. Na zmíněných obrázcích je vidět odtržení proudu na vnitřním poloměru pravoúhlého kolene. V místě napojení vstupu chladicí kapaliny je patrné lokální urychlení kapaliny v oblasti vtoku do mezikruží. Podobné jevy je možné pozorovat v oblasti výstupu z mezikruží.



Obr. 31: Velikost rychlosti ve vstupní oblast u souproutého zapojení



Obr. 32: Velikost rychlosti ve výstupní oblast u souproutého zapojení

9 Zhodnocení a porovnání výsledků

9.1 Porovnání s experimentem

Výsledné hodnoty výstupních teplot z experimentu a simulace jsou zobrazeny níže v tabulkách 7 a 8, kde vždy řádek reprezentuje jednu variantu nastavení průtoků. Ze zmíněných tabulek je patrné, že dle očekávání chladil výměník účinněji v numerické simulaci. Tento trend je pravděpodobně způsoben nedokonalým vystředěním spirály v průřezu hadice u experimentálního výměníku. Dalším důvodem mohlo být neúplné zaplnění průřezu výměníku i přes regulaci průtoku výstupním ventilem, který měl právě tento jev eliminovat.

Tab. 7: Porovnání výstupních teplot měření a simulace souprůdného zapojení

$T_{T in}$ [°C]	$T_{S in}$ [°C]	$T_{T out}^{exp}$ [°C]	$T_{S out}^{exp}$ [°C]	$T_{T out}^{sim}$ [°C]	$T_{S out}^{sim}$ [°C]	$100 \cdot \frac{ T_{T out}^{exp} - T_{T out}^{sim} }{T_{T out}^{exp}}$ [°C]
49,91	10,64	15,92	14,60	14,78	14,54	7,2%
52,34	9,62	16,43	14,71	15,04	14,68	8,5%
51,84	9,72	16,74	14,91	15,42	15,02	7,9%
52,55	9,62	17,14	15,21	15,60	15,17	9,0%
52,65	9,62	17,85	15,82	16,34	15,84	8,5%
52,04	10,03	18,05	16,03	16,53	16,05	8,4%
51,84	9,52	19,17	16,94	17,74	17,07	7,5%
52,24	9,62	19,68	17,24	18,14	17,43	7,8%
52,04	9,62	19,78	17,45	18,35	17,61	7,2%
52,85	10,13	21,50	19,48	20,48	19,53	4,7%
54,67	9,83	21,91	19,58	20,53	19,55	6,3%
54,88	9,72	22,52	20,19	21,31	20,21	5,4%
54,88	9,72	22,62	20,19	21,43	20,31	5,3%
54,88	9,62	23,03	20,59	21,89	20,70	5,0%
52,85	10,13	24,45	22,22	23,75	22,33	2,9%
54,57	10,54	24,55	22,22	23,52	22,21	4,2%
54,98	9,52	25,16	22,72	24,18	22,65	3,9%
53,05	10,64	26,68	24,65	26,23	24,52	1,7%
53,46	9,83	26,78	24,35	26,22	24,42	2,1%
53,96	9,52	28,81	26,38	28,42	26,30	1,4%
55,69	9,72	31,55	29,42	31,80	29,28	0,8%
55,99	10,13	31,75	29,72	31,94	29,45	0,6%
55,69	9,93	31,75	29,52	32,02	29,49	0,9%

Tab. 8: Porovnání výstupních teplot měření a simulace protiproudého zapojení

$T_{T in}$ [°C]	$T_{S in}$ [°C]	$T_{T out}^{exp}$ [°C]	$T_{S out}^{exp}$ [°C]	$T_{T out}^{sim}$ [°C]	$T_{S out}^{sim}$ [°C]	$100 \cdot \frac{ T_{T out}^{exp} - T_{T out}^{sim} }{T_{T out}^{exp}}$ [°C]
47,08	9,53	11,97	13,27	10,13	13,14	15,4%
50,12	9,53	12,68	14,59	10,47	14,68	17,4%
52,34	9,53	12,98	15,20	10,66	15,39	17,9%
52,75	9,63	16,43	19,46	12,86	20,06	21,7%
49,31	9,63	18,66	22,60	15,66	23,31	16,1%
53,56	9,53	19,37	24,12	16,36	24,88	15,5%
55,28	9,84	21,10	26,86	18,73	27,70	11,2%
54,88	10,34	21,81	27,56	19,65	28,45	9,9%
55,48	9,94	22,42	28,38	20,16	29,16	10,1%
49,21	9,53	23,23	28,07	21,36	29,01	8,0%
55,08	10,14	23,74	29,79	22,22	31,01	6,4%
49,21	9,43	24,04	28,88	22,23	29,77	7,5%
54,07	9,73	25,87	32,33	24,59	32,90	4,9%

Kde:

$T_{T in}$	teplota chlazené vody na vstupu [°C],
$T_{S in}$	teplota ohřivané vody na vstupu [°C],
$T_{T out}^{exp}$	teplota chlazené vody na výstupu při měření [°C],
$T_{S out}^{exp}$	teplota ohřivané vody na výstupu při měření [°C],
$T_{T out}^{sim}$	teplota chlazené vody na výstupu při simulaci [°C],
$T_{S out}^{sim}$	teplota ohřivané vody na výstupu při simulaci [°C].

10 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a vyrobit tepelný výměník vhodný pro použití v domácí výrobě piva, konkrétně při chlazení mladiny na teplotu vhodnou ke kvašení. Nejprve byla provedena rešerše druhů výměníků, které se nejčastěji při domácím vaření piva používají. Dále byl vytvořen seznam požadavků, které musí výměník splňovat, šlo například o vyloučení použití rizikových materiálů, o potřebu snadné sanitace výměníku nebo o vlastnosti potřebné k provedení měření. Poté byla navržena konstrukce spirálového výměníku typu „trubka v trubce“, kdy základ výměníku tvořila měděná trubka PR16x1 o délce 8,5 metru vytvarovaná do spirály. Přes měděnou trubku byla převlečena PVC hadice, která zajistila obtékání a chlazení měděné trubky uvnitř studenou vodou. Oba konce výměníku tvořilo zakončení složené z měděných tvarovek. Zakončení byla na obou koncích shodná, aby bylo možné měřit souprůdou i protiprůdou variantu zapojení. Po nákupu potřebného materiálu byla provedena výroba v domácích podmínkách a za odborného dozoru.

Před osazením termočlánků do výměníku byla zjištěna jejich odchylka. Následovalo připojení na vodovodní řad a zkouška těsnosti. Původně mělo být provedeno měření dvaceti variant průtoků, deset variant pro souprůdé zapojení a deset variant pro protiprůdé zapojení. Tento počet však bylo po vyhodnocení prvních dvaceti variant nutné zvýšit, protože minimální a maximální průtoky si při porovnání obou zapojení neodpovídali. Proto je celkový počet měřených variant třicet devět. Naměřené teploty byly korigovány o dříve zjištěnou odchylku. Ze zjištěných teplot a průtoků byly vypočteny střední rychlosti na vstupu obou tekutin, které sloužily jako vstupní data pro pozdější CFD simulaci, tepelné toky u obou kapalin a součinitel prostupu tepla. Na základě naměřených dat byla odvozena závislost mezi průtokem a koeficientem prostupu tepla. Nyní lze tedy použitím těchto výsledků vypočítat velikost výměníku pro daný průtok horké mladiny. Pro případ vyrobeného výměníku byl vypočten průtok mladiny, která byla chlazená z 95°C na 15°C, což je minimální teplota pro svrchní kvašení. Tento průtok činil 1,92 l/min, přičemž parametry chladicí vody zůstaly stejné jako při měření, tedy průtok 14,1 l/min a teplota 9,5°C.

Pro ověření dat zjištěných měření byla provedena CFD simulace pro všechny měřené varianty průtoků. Nejprve se jednalo o vytvoření modelu a jeho úpravu pro potřeby simulace. Pak již nic nebránilo vlastní simulaci a vyhodnocení výsledků. Při porovnání výsledků experimentu a CFD simulace se ukázalo, že CFD výpočet vykazuje teplotu chlazené vody nižší o 0,2 – 3,5°C oproti měření, viz tabulky 7 a 8. Tento trend byl pravděpodobně způsoben nedokonalým vystředěním měděné spirály v průřezu hadice u vyrobeného výměníku, což mohlo ovlivnit prostup tepla. Dalším faktorem mohl být odvod tepla pláštěm termočlánku, případně nedokonalá realizace zjišťování odchylky termočlánků, což by ovlivnilo naměřené hodnoty.

Návrh, výroba a samotné měření bylo časově i finančně nákladnější cestou ve srovnání s numerickou simulací. Avšak v některých oblastech je použití experimentu nenahraditelné. Právě díky naměřeným výsledkům nebude nutné nákladné experimenty opakovat.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika: učebnice pro vysoké školy*. 1. vyd. Praha: Academia, 1973.
- [2] LINHART, Jiří. *Termomechanika - Stručné učební texty*. Plzeň: ZČU, 2012.
- [3] ROZSYPAL, Štěpán. *Výměníky tepla*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Marek Baláš.
- [4] NOVOTNÝ, Petr. *Pivařka²: průvodce domácího sládky : teorie, rady, návody, recepty*. První vydání. V Brně: Jota, 2019. Populárně naučná. ISBN 9788075655554.
- [5] *Zámecký pivovar Břeclav* [online]. Břeclav: Pivovary Koruny české s.r.o., 2018 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://pivokutnahora.cz/technologie-vareni-piva>
- [6] *Bahnik* [online]. Pardubice: BAHNIK.cz s.r.o., 2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.bahnik.cz/>
- [7] *Energoekonom* [online]. Hradec Králové: CS Technologies, 2022 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.energoekonom.cz/ew/ew_images/image?EwImage=bed14abb-d9b3-47dc-a18c-eeff81e45dd8&Filter=77c1217a-447d-4780-83bd-af3cc79a9487
- [8] *Arnika* [online]. Praha: Arnika, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://arnika.org/olovo>
- [9] *Magazín Bezpečnost Práce* [online]. Praha: Magazín Bezpečnost Práce, 2018 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.bezpecnostprace.info/rizika/snizovani-expozice-olovem/>
- [10] *Viega* [online]. 2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.viega.cz/cs/produkty/Katalog/Potrubni-systemy.html>
- [11] *KME* [online]. Osnabrück: KME GERMANY, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.kme.com/en/>
- [12] *Pájky SALDFLUX* [online]. Beroun: SALDFLUX, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.pajky.cz/>
- [13] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, CD-ROM s. ISBN 978-80-7043-706-3.
- [14] FIŠR, Petr. *Analýza nejistot nepřímých měření*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. František Vdoleček, CSc.
- [15] *Chyba měření*. [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chyba_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD
- [16] *Svět energie* [online]. Tábor: Simopt, 2020 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/>
- [17] *Kadant Johnson* [online]. Kadant, 2021 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z:

<https://fluidhandling.kadant.com/cs/produkty/trysky/chladice-prehrate-pary>

[18] *Heat Exchangers* [online]. Thermopedia, 2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z:
<http://www.thermopedia.com/content/832/>