



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

NÁVRHOVÝ VÝPOČET VÝMĚNÍKU TEPLA PRO CHLAZENÍ AGRESIVNÍCH LÁTEK

DESIGN CALCULATION OF HEAT EXCHANGER FOR COOLING OF AGGRESSIVE
SUBSTANCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kůra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Tomáš Kůra
Studijní program:	Procesní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrhový výpočet výměníku tepla pro chlazení agresivních látek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V polovodičovém průmyslu se pracuje s velice agresivními látkami, které se při výrobních procesech zahřívají. S ohledem na ekonomiku provozu a životní prostředí je žádoucí tyto látky znovu použít. Před opětovným použitím je ale potřeba je ochladit na požadované teploty. K tomu je potřeba navrhnout vhodný výměník tepla. Tímto se zabývá firma SMC Industrial Automation CZ s.r.o., která takovéto výměníky navrhuje a nabízí. Jejich návrh je v současné době prováděn spíše na základě odborných odhadů nežli na základě přesných výpočtů. Jelikož se tyto výměníky tepla vyrábí na zakázku, je potřeba každý výměník navrhnout zákazníkovi na míru. To je časově náročná práce, kterou by bylo možné automatizovat. Je proto požadováno vytvořit výpočtový model a pomocí Visual Basic for Applications v prostředí MS Excel i výpočtový nástroj.

Cíle diplomové práce:

- (1) Seznámení se s možnostmi chlazení agresivních látek.
- (2) Výběr vhodného materiálu a typu výměníku tepla pro daný proces.
- (3) Vytvoření matematického modelu pro návrh výměníku tepla.
- (4) Vytvoření výpočtového nástroje pomocí Visual Basic for Applications v prostředí MS Excel.
- (5) Ověření výsledků získaných výpočtovým nástrojem s naměřenými daty

Seznam doporučené literatury:

CAO, Eduardo. Heat Transfer in Process Engineering. 1. vyd. McGraw-Hill Professional, 2009.

KERN, D. Q. Process Heat Transfer. International Student Edition. New York, USA: McGraw-Hill, 1950.

KUPPAN, T. Heat Exchanger Design Handbook. New York: Marcel Dekker, 2000.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem koaxiálního hadicového výměníku tepla. Nejprve jsou představeny dosud známé metody chlazení agresivních látek. Následně je řešena kompatibilita materiálů výměníku s látkami používanými v polovodičovém průmyslu a jakožto i vhodný materiál je podrobněji představen polymer PFA. Práce dále objasňuje přenos tepla, a to jak obecně, tak i konkrétně ve výměnících tepla. Jsou představeny nejen vztahy běžně používané při návrhu výměníků, ale i rovnice pro koaxiální výměníky. Jednotlivé empirické rovnice jsou porovnány s naměřenými daty a na základě toho jsou zvoleny nejvhodnější vztahy pro popis dějů ve zkoumaném výměníku. Následně je v práci popsáno fungování vytvořeného programu ve VBA, který obsahuje tepelný i hydraulický výpočet a pevnostní kontrolu.

KLIČOVÁ SLOVA

přenos tepla, tepelný výměník trubka v trubce, agresivní látky, matematický model, VBA

ABSTRACT

This thesis focuses on the design of a coaxial tube in tube heat exchanger. First, the existing methods of cooling of aggressive substances are presented. Subsequently, the compatibility of the heat exchanger materials with substances used in the semiconductor industry is addressed and the PFA polymer is presented in detail as a suitable material. The paper further explains heat transfer, both in general and specifically in heat exchangers. Not only the relationships commonly used in heat exchanger design are presented, but also equations for coaxial heat exchangers. The individual empirical equations are compared with measured data, and on this basis, the most appropriate relations are chosen to describe the processes in the exchanger under investigation. Then, the work describes the operation of the developed program in VBA, which includes thermal and hydraulic calculations and strength control.

KEYWORDS

heat transfer, tube in tube heat exchanger, aggressive substances, mathematical model, VBA

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŮRA, Tomáš. *Návrhový výpočet výměníku tepla pro chlazení agresivních látek* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154170>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Bohuslav Kilkovský.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Bohuslava Kilkovského, Ph.D. a že jsem použil pouze odbornou literaturu a prameny uvedené v seznamu zdrojů.

V Brně dne 23. května 2024

.....

Bc. Tomáš Kůra

PODĚKOVÁNÍ

Především bych rád poděkoval Ing. Michalovi Dudášovi za jeho pomoc při přípravě experimentu. Dále svému vedoucímu závěrečné práce Ing. Bohuslavu Kilkovskému, Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky. Také firmě SMC za spolupráci, poskytnutí laboratoře a jejího vybavení k měření experimentálních dat. A v neposlední řadě i mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala a umožnila mi věnovat se této práci.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Technologie pro chlazení agresivních látek.....	12
2.1	Ponorné výměníky tepla.....	12
2.2	Plášťové nádoby (jacketed vessels).....	13
2.3	Trubkové výměníky tepla.....	13
2.4	Deskové výměníky tepla.....	14
2.5	Blokové výměníky tepla.....	15
2.6	Koaxiální výměník.....	15
3	Materiály výměníků tepla pro agresivní látky.....	17
3.1	Karbid křemíku.....	17
3.2	Grafit.....	18
3.3	Fluoropolymery.....	18
3.3.1	Polytetrafluoroethylen (PTFE).....	18
3.3.2	Fluorovaný ethylen propylen (FEP).....	19
3.3.3	Perfluoro-alkoxy alkan (PFA).....	19
3.4	Modifikace PFA.....	19
4	Přenos tepla.....	21
4.1	Přenos tepla vedením.....	21
4.2	Přenos tepla prouděním.....	22
4.3	Vztahy pro popis chování výměníků tepla.....	22
5	Vztahy pro výpočet koaxiálních výměníků tepla.....	26
5.1	Geometrické charakteristiky.....	26
5.2	Tepelný výpočet.....	27
5.2.1	Empirické vztahy pro výpočet Nusseltova čísla v trubce.....	28
5.2.2	Empirické vztahy pro výpočet Nusseltova čísla v mezikruží.....	29
5.3	Hydraulický výpočet.....	30
5.3.1	Součinitel tření v zakřivené trubce.....	30
5.3.2	Součinitel tření v zakřiveném mezikruží.....	31
5.4	Pevnostní kontrola.....	31
6	Experimentální měření.....	34
6.1	První měření.....	34
6.1.1	Zapojení měřené soustavy.....	35
6.1.2	Průběh měření.....	37
6.1.3	Výsledky měření.....	37
6.2	Druhé měření.....	38

6.2.1	Zapojení měřené soustavy	38
6.2.2	Průběh měření	40
6.2.3	Výsledky měření	41
7	Porovnání výsledků matematického modelu s naměřenými daty	42
7.1	Tepelný výpočet	42
7.1.1	Přestup tepla na vnitřní straně trubky	43
7.1.2	Přestup tepla na vnější straně trubky	43
7.2	Hydraulický výpočet	45
8	Návrhový algoritmus ve VBA (modelování ve VBA).....	47
8.1	Přehled fungování programu	48
8.2	Uživatelské prostředí	49
8.3	Detailní popis programu	50
9	Závěr	53
	Bibliografie.....	54
	Seznam použitých zkratk a symbolů	61
	Seznam příloh.....	65
	Příloha 1 – Výsledky druhého měření, chiller.....	66
	Příloha 2 - Výsledky druhého měření, termoelektrická lázeň.....	67
	Příloha 3 – Výstupní protokol z programu	68

1 Úvod

Firma SMC je světovým výrobcem prvků pro automatizaci. Jednou z oblastí, které se společnost věnuje, jsou zařízení pro regulaci teploty médií, též nazývané jako chillery. Pro rozšíření oblasti použití chillerů přidává SMC externí výměník určený pro agresivní média. Nejnáročnějším odvětvím pro toto zařízení je polovodičový průmysl, kde je kladen vysoký důraz na teplotní stálost a čistotu látek. V této oblasti se při výrobě používají chemicky velmi agresivní látky a z toho důvodu není možné použít běžné materiály pro výměníky tepla. V současné době navrhuje firma výměníky tepla k těmto zařízením na základě odborného odhadu. Z důvodu peněžních úspor a průkaznosti řešení je dobré navrhovat tyto komponenty na základě výpočtu. Protože je každý výměník principiálně totožný, je proces návrhu vhodný pro automatizaci. Proto vznikl požadavek na vytvoření programu pro výpočet takových výměníků tepla.

Výrobní proces polovodičů je velmi složitý a zahrnuje spoustu technologií. Z důvodu malých rozměrů polovodičů je vyžadována velmi vysoká preciznost při výrobě. Používá se spousta chemických látek, které se v průběhu provozu zahřívají. Aby nezměnily své vlastnosti a bylo je možné znovu použít, je zapotřebí tyto látky ochlazovat. Zároveň je třeba dbát na teplotní roztažnost samotné křemíkové desky (silicon wafer) a tedy na teplotu tekutin, které s ní přichází do kontaktu. [1]

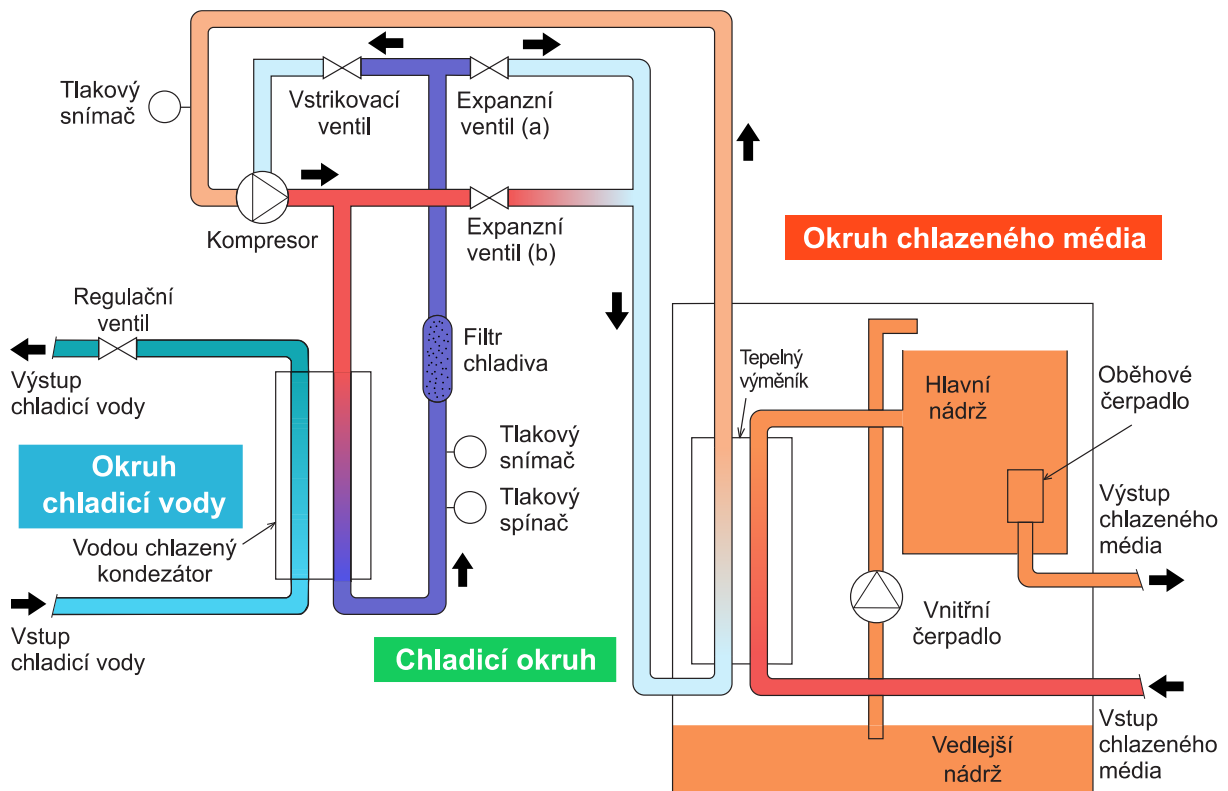
Před výrobou polovodičů se křemíkové desky několikrát čistí a omývají. Pro odstranění všech druhů nečistot se postupně používá máčení v ohřátých chemikáliích jako, trichlorethylen, aceton, methanol, čpavek, kyselina fluorovodíková a kyselina chlorovodíková. Tyto látky se pak musí z desky smýt deionizovanou vodou (DI vodou). DI voda se tak tímto zahřívá a znečišťuje a je potřeba se jí po použití zbavit. [2]

Dalším procesem při výrobě polovodičů je fotolitografie. Při ní se používají fotorezisty, které se skládají z polymeru, senzibilizátoru a rozpouštědla. Ty se na wafer nanášejí roztočením waferu a kápnutím fotorezistu do středu desky. Díky tomuto postupu se na povrchu vytvoří velmi tenká a rovnoměrná vrstva. Jelikož se s teplotou mění i viskozita a tím i tloušťka nanesené vrstvy, je důležité hlídat teplotu fotorezistu. [3] Mezi běžně používané polymery ve fotorezistech patří polymethylmethakrylát (akrylátové sklo), fenolformaldehyd (Novolak) a isoprenový kaučuk. Z rozpouštědel to je xylen nebo acetátová rozpouštědla. [1]

Jedním z dalších procesů je leptání. To se provádí pufrovaným oxidem, který obsahuje kyselinu fluorovodíkovou a fluorid amonný. Rychlost leptání je, mimo jiné, závislá na teplotě, a proto je teplota během leptání důsledně sledována. [2] Dále v procesu najdeme i další látky, jako je například kyselina dusičná, sírová nebo peroxid vodíku. [3]

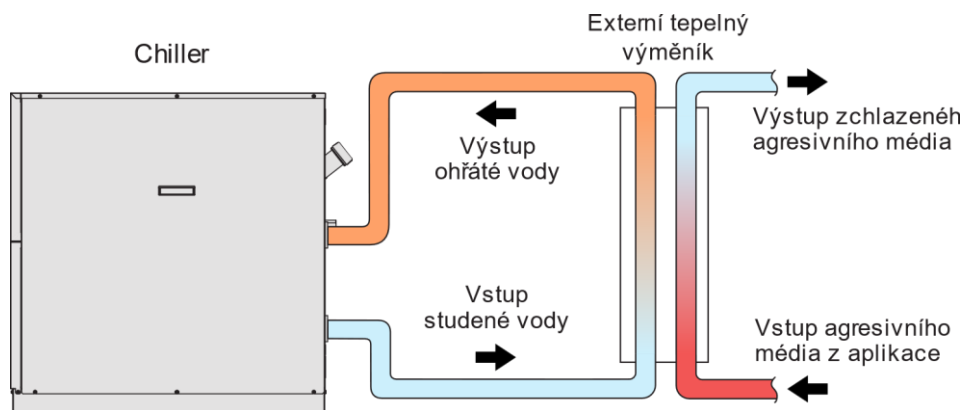
Na Obr. 1.1 je zobrazeno schéma chilleru od SMC určeného pro polovodičový průmysl. Jak je z obrázku zřejmé, jedná se o model chlazený externím zdrojem vody (existuje i vzduchem chlazená varianta). Chiller se skládá ze tří okruhů: okruh chladicí vody, chladicí okruh a okruh chlazeného média. Chladicí okruh je uzpůsoben tak, aby byl schopný médium, jak chladit, tak ohřívat.

Látka z okruhu chlazeného média proudí do externího výměníku, ve kterém protéká také regulovaná agresivní kapalina (jak je zobrazeno na Obr. 1.2). Díky tomuto řešení, je možné použít běžné materiály pro chiller a z chemicky odolných materiálů vyrobit pouze výměník tepla. Tato práce se bude zabývat právě tímto externím výměníkem tepla.



Obr. 1.1 Schéma chilleru HRZ-F pro polovodičový průmysl

Tohoto designu se dá využít nejen v polovodičovém průmyslu, ale obecně všude, kde je požadována vysoká čistota kapalin, nebo kde se obtížně hledá kompatibilní materiál s danou látkou.



Obr. 1.2 Schématické zobrazení zapojení výměníku tepla

Celá práce se bude zabývat návrhem geometricky specifického trubkového výměníku tepla. Ve výměníku nedochází k varu pracovních médií. Ačkoliv je snahou vytvořit co nejobecnější model, je použito empirických vztahů, a proto je třeba dbát na omezení každého vztahu a v důsledku i celého výpočtu.

2 Technologie pro chlazení agresivních látek

Pro chlazení chemicky agresivních látek se zpravidla používají již zaběhlé konstrukce výměníků tepla. Existují různé způsoby řešení chemické odolnosti výměníků. Jednou z možností je nanesení vrstvy fluoropolymeru (jako je například PFA a PTFE) na ocel. [4] Dalšími možnostmi jsou použití karbidu křemíku, grafitu nebo fluoropolymeru pro celou konstrukci. [5] Tato kapitola se bude zabývat spíše konstrukčním řešením a materiály budou blíže rozebrány v kapitole následující.

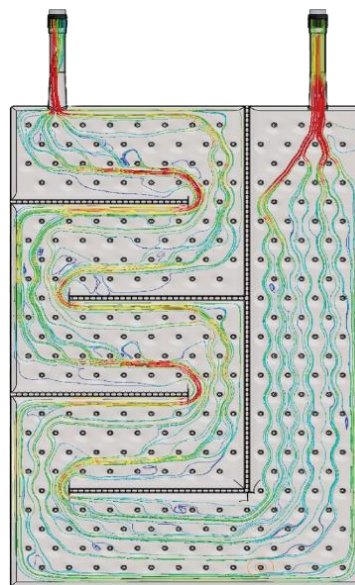
2.1 Ponorné výměníky tepla

Jde asi o nejčastěji používaný způsob chlazení pro agresivní látky. Jedná se o zvláštní typ, kde jedno médium proudí v samotném výměníku a druhé médium se nachází v nádobě, ve které je výměník umístěn. Vyrábí se v různých provedení: deskové, spirálové, svazky trubek.

V případě deskového výměníku se k sobě po obvodu přivaří dva ocelové korozivzdorné prolisované plechy. Tím vznikne jeden kanál pro chladicí médium. Turbulence jsou umocněny právě zmíněným prolisováním plechů. Pro vyšší chemickou odolnost je možné na plechy nanést fluoropolymerovou vrstvu. Na Obr. 2.2 je znázorněna konstrukce a proudění v takovém výměníku. [6] [7]



Obr. 2.1 Ponorný spirálový výměník tepla [8]



Obr. 2.2 Proudění v ponorném deskovém výměníku [6]

Spirálový výměník (Obr. 2.1) není v tomto případě z plechů, jak je běžné pro neagresivní média, ale je to pouze PFA hadice navinutá v rámu. [9]

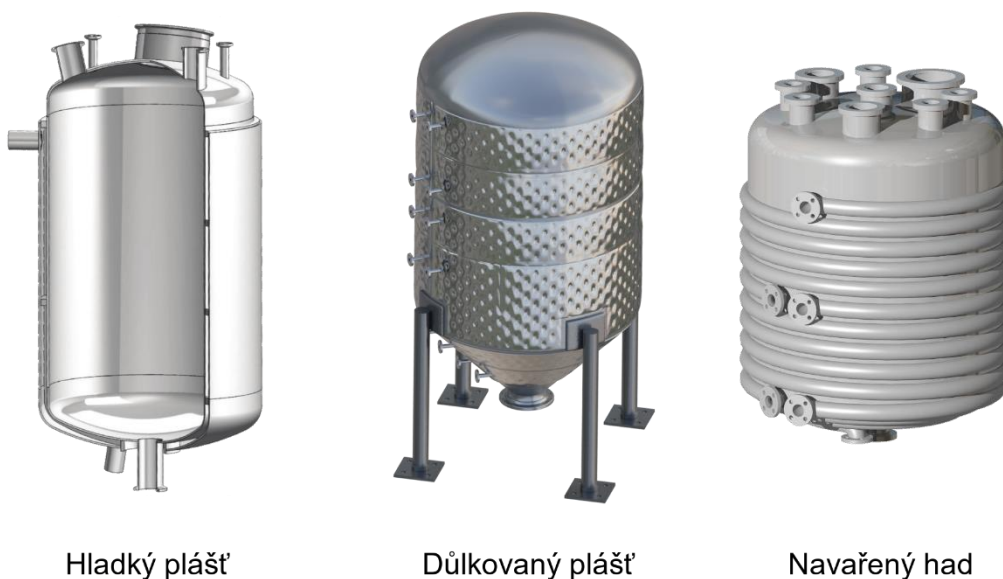
Na Obr. 2.3 je svazkový výměník, který používá hadice spojené trubkovicemi. Aby docházelo k lepší výměně tepla, jsou jednotlivé hadice provlečeny děrovanými deskami tak, aby se vzájemně nedotýkaly.



Obr. 2.3 Ponorný svazkový výměník tepla [10]

2.2 Plášťové nádoby (jacketed vessels)

Jedná se o koncepčně jednoduché řešení. Nádoby, ve které se nachází kapalina, chladíme z vnější strany pomocí chladicího média. Toho lze dosáhnout dvojitým pláštěm (hladkým nebo důlkovaným) nebo navařeným hadem, jak je zobrazeno na Obr. 2.4. Lze se též setkat s možností používající trubku stočenou do šroubovice umístěnou uvnitř nádoby (a zařazenou mezi plášťové nádoby). Taková možnost ale patří k ponorným výměníkům. [11]



Hladký plášť

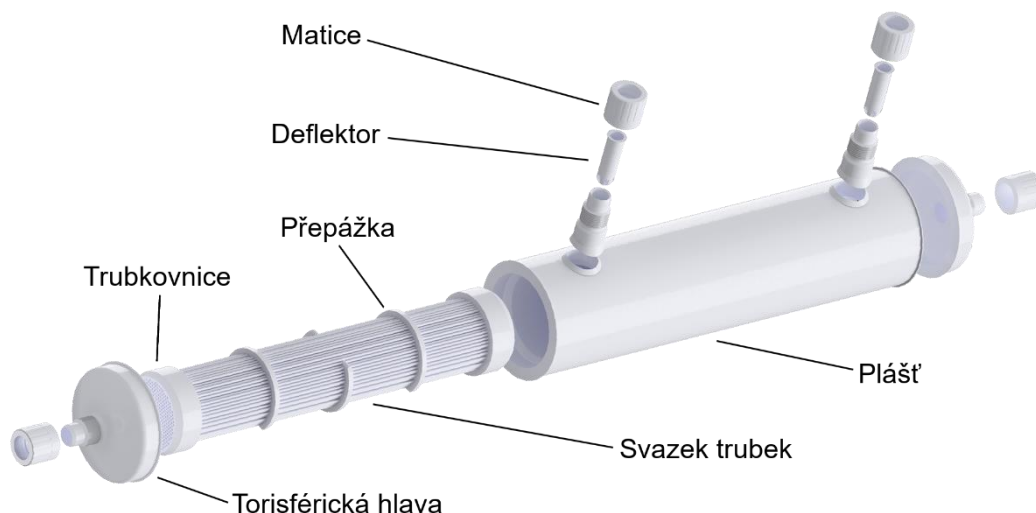
Důlkovaný plášť

Navařený had

Obr. 2.4 Plášťové nádoby [12] [13] [14]

2.3 Trubkové výměníky tepla

Jak sám název napovídá, konstrukcí se jedná o běžný trubkový výměník. Rozdíl spočívá v použitém materiálu. Namísto ocele je výměník vyroben pouze z PFA nebo PTFE, čímž získává vysokou chemickou odolnost a taky není tak náchylný k zanášení. Existuje i možnost výroby pláště a trubek z ocele nebo hliníku a následné nanášení vrstvy PFA na povrchy výměníky. Tím získá vyšší pevnost a může být použit pro vyšší tlaky. Na Obr. 2.5 jsou popsány jednotlivé části PFA trubkového výměníku. [4] [15]



Obr. 2.5 Trubkový výměník z PFA [16]

2.4 Deskové výměníky tepla

Deskové výměníky mají obecně větší teplosměnnou plochu v porovnání se stejně objemným trubkovým výměníkem. Jejich konstrukce zahrnuje sestavu deskových plechů, které vytvářejí kanály pro průchod teplotnosného média. Díky tomu jsou schopny poskytnout vysoký přenos tepla při kompaktním provedení. Deskové výměníky se také vyznačují snadnou rozložitelností, a s tím spojenou jednoduchou čistitelností a opravitelností, což usnadňuje údržbu.

Desky výměníku pro agresivní média se vyrábí buď z karbidu křemíku nebo z grafitu. Pro těsnění se používá polymer PTFE. Aby desky nepraskly z důvodu nadměrného přitlaku, používají se na jednom konci závitových tyčí pružiny, které zajišťují rovnoměrný tlak, jak je ukázáno na Obr. 2.6. [5] [17]



Obr. 2.6 Deskový výměník tepla s grafitovými deskami [18]

2.5 Blokové výměníky tepla

Jedná se opět o kompaktní řešení výměníku tepla. Tyto výměníky se vyrábějí vrtáním kanálů do bloku materiálu. Z ekonomických důvodů je vhodné pro tyto výměníky použít grafit, který se dobře obrábí a má přitom vysokou chemickou odolnost. Pro náročnější podmínky se ale vyrábí i z karbidu křemíku. Na Obr. 2.7 je vyobrazen blokový výměňník. [5]



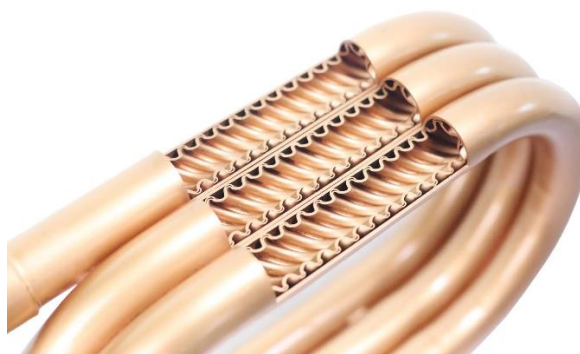
Obr. 2.7 Blokový výměňník tepla z karbidu křemíku [19]

2.6 Koaxiální výměňník

Koaxiální výměňník je v podstatě stočený výměňník typu trubka v trubce (viz. Obr. 2.8). Na Obr. 2.9 lze vidět vnitřní zvlněná trubka, která přispívá k vyššímu přestupu tepla. Za prvé díky většímu povrchu a za druhé díky vytváření turbulencí uvnitř i vně trubky. Dále odstředivé síly působící na tekutinu (díky stočení výměníku) vytváří sekundární proudy, které zvyšují přestup tepla, jak je detailněji popsáno v kapitole 5. Díky tomu mají tyto výměníky vyšší přestup tepla než výměníky s rovnými trubkami. Tyto výměníky se nejčastěji používají jako kondenzátory nebo výparníky. [20] [21]



Obr. 2.8 Koaxiální výměňník [22]



Obr. 2.9 Koaxiální výměňník – řez [23]

SMC využívá pro chlazení agresivních látek výměňník koaxiálního typu. Jedná se o jednoduchou konstrukci, kde je jedna hadice provlečena druhou. SMC používá pro své výměníky fluoropolymery (podrobněji rozebráno v kapitole 3.3). Hlavní výhodou tohoto řešení je možnost vlastních dodávek veškerých komponent. Dále jeho jednoduchost, s tím souvisí nízká cena a rychlost výroby. Jako nevýhodu takového řešení lze považovat nízkou kapacitu ve

srovnání s ostatními typy výměníků, avšak při nízkých výkonech by jiné řešení nebylo ekonomicky výhodné.

Z předchozích odstavců vyplývá, že nejčastějším řešením je modifikace již zaběhlého designu. Zároveň je zřejmé, že vysoké chemické odolnosti se nejčastěji dosahuje úpravou nebo použitím jiného materiálu, než je ocel. Čistě z pohledu výměny tepla je nejlepším řešením deskový výměník, neboť vzhledem ke své velikosti poskytuje největší teplosměnnou plochu. S přihlédnutím k použitým materiálům, které budou podrobněji rozebrány v následující kapitole, by nejvíce vyhovoval ponorný výměník, trubkový výměník nebo koaxiální výměník od SMC. Nicméně, pokud zohledníme složitost zařízení a výrobní náklady, pak je pro nižší výkony optimální volbou ponorný výměník spirálového typu nebo hadicový koaxiální výměník. Koaxiální výměník má oproti ponornému spirálovému výměníku tu výhodu, že na obou stranách teplosměnné plochy se teplo přenáší nucenou konvekcí, která je účinnější než přirozená. Pro nízké průtoky a výkony se tak koaxiální výměník jeví jako optimální řešení.

3 Materiály výměníků tepla pro agresivní látky

SMC prodává PFA výměníky pro aplikace, které ohřívají nebo chladí cokoli jiného než vodu nebo směs vody a ethylenglykolu. Nejvyšší nároky, kterým zařízení musí vyhovět, má polovodičový průmysl. V polovodičovém průmyslu musí být všechny komponenty přicházející do styku s procesními médii nejen chemicky odolné nejružnějším kyselinám, ale musí splňovat i požadavky na čistotu médií, aby nedošlo ke kontaminaci křemíkových desek. Ve výrobních prostorách je udržováno ultra čisté prostředí, neboť i zrnko prachu uvíznuté na čipu způsobí jeho nefunkčnost. [2]

Při výrobě mikročipů se používají velice agresivní kyseliny, jako například kyselina fluorovodíková. Co se týče čistoty, tak velice důležitou látkou při výrobě je DI voda. DI voda je velmi čistá voda zbavená iontů, částic a bakterií. [2] To znamená, že je nutné zabezpečit nízkou abrazi u všech součástí přicházejících do kontaktu s kapalinami a nízkou eluci iontů. Z toho důvodu používá SMC pro své výměníky materiál PFA. Ten má ale bohužel velmi nízkou tepelnou vodivost. Proto se tato kapitola bude zabývat materiály, které mají výbornou chemickou odolnost, a které by mohli nahradit PFA.

Posouzení chemické odolnosti je velice komplexní problém. V praxi není možné posoudit, jak bude materiál s danou látkou reagovat na základě struktury a složení molekuly. Jedinou možností, jak materiály zhodnotit, je podrobit je zkoušce. To je ale dost časově a finančně náročný úkol. Existují však tabulky chemické kompatibility pro různé kombinace materiálů a látek, které prezentují výsledky takovýchto zkoušek. Výsledky uvedené v těchto tabulkách jsou pouze kvalitativní a testují jen některé koncentrace látek. Proto je potřeba k nim přistupovat s rezervou a znát, jak a které faktory ovlivňují daný materiál (například i teplota hraje při chemické kompatibilitě negativní roli).

Z důvodu agresivnosti látek, se kterými budou výměníky pracovat, a požadavku na čistotu médií, nelze použít běžně používané materiály jako jsou různé druhy ocelí. Pro agresivní látky se často používají výměníky z korozi-vzdorné oceli, titanu nebo slitiny niklu (Hastelloy) [24], avšak pro aplikaci v polovodičovém průmyslu je odolnost těchto materiálů nedostatečná. Samotný výměník by sice mohl vydržet, ale kvůli malému množství rozpouštěných kovových iontů by se chlazené médium znečistilo a znehodnotilo vyráběné polovodiče. Bude potřeba najít takové materiály, které odolávají i kyselinám používaných v polovodičovém průmyslu a mají nízkou eluci iontů. Zároveň je z důvodu přenosu tepla žádoucí, aby materiály měly co nejvyšší tepelnou vodivost.

Při výměně tepla je hnací silou teplotní rozdíl mezi stěnami teplosměnné plochy. Ten způsobuje různou teplotní roztažnost na vnitřní a vnější straně trubky/desky. Tento rozdíl v roztažnosti pak vytváří napětí v materiálu, což snižuje provozní tlak tekutin ve výměníku. Ve zkoumané aplikaci se však nepracuje s vysokými tlaky a teplotními rozdíly, a tak je tento fakt zanedbatelný. V jiných případech by ale mohl hrát značnou roli.

3.1 Karbid křemíku

Karbid křemíku (SiC), obchodním názvem Karborundum, je velmi tvrdý, pevný, chemicky odolný keramický materiál s nízkou tepelnou roztažností. [25] Jeho tepelná vodivost se pohybuje zhruba v rozmezí 100 až 250 W/(m·K) v závislosti na použitých aditivech [26], což jej řadí mezi materiály s vynikající tepelnou vodivostí. Díky jeho extrémně vysoké tvrdosti odolává erozi a je tak vhodný pro aplikace vyžadující vysokou čistotu. [27] V praxi se používá pro výrobu trubkových výměníků pomocí spékání (sintrování). Díky svým vlastnostem

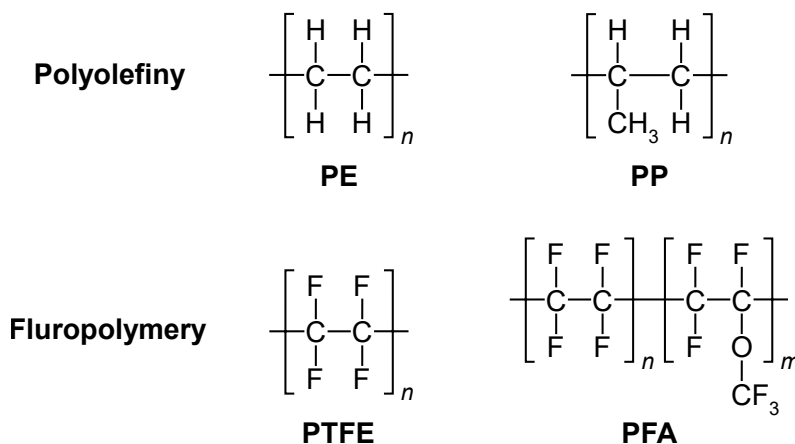
je vhodný pro aplikace, kde je současně požadovaná vysoká chemická odolnost a teplotní stabilita. [28]

3.2 Grafit

Uhlík ve formě grafitu je díky své struktuře měkká pevná látka, která výborně vede teplo a elektrinu. [29] Tepelná vodivost dokonale krystalického grafitu dosahuje až 4 180 W/(m·K), avšak komerčně vyráběný pyrolytický grafit dosahuje 390 W/(m·K). [30] Kvůli své nízké tvrdosti se impregnuje fenolformaldehydovou pryskyřicí (zkratka PF, též známá jako fenolová pryskyřice, fenoplast nebo bakelit). Průmyslově vyráběný impregnovaný grafit má tepelnou vodivost přes 120 W/(m·K). [31] [32] V průmyslové praxi se používá jako levnější varianta SiC neboť se snadno obrábí. [27] [33]

3.3 Fluoropolymery

Fluoropolymery jsou termoplasty, jejichž součástí chemické struktury je fluor. Většina běžných plastů, jako je polyethylen a polypropylen, má ve své struktuře vodík. Tato záměna vodíku za fluor, jak je zobrazeno na Obr. 3.1, přináší řadu výjimečných vlastností, především chemickou inertnost/stabilitu, zvýšenou tepelnou odolnost, nehořlavost a nízký koeficient tření. [34] Obecným pravidlem je, že s rostoucím obsahem fluoru v molekule se zvyšuje jeho chemická odolnost, nehořlavost, světelná stabilita, teplota tavení a teplotní stabilita. A snižuje se dielektrická konstanta a pevnost. [35]



Obr. 3.1 Porovnání struktury fluoropolymerů

Díky nízkému koeficientu tření na jejich povrchu neulpívají nečistoty, což omezuje zanášení a zvyšuje výkon výměníku a díky své inertnosti jsou vhodné pro velmi čisté aplikace. To z fluoropolymerů činí ideální materiály pro výměníky v polovodičovém průmyslu. [24]

Firma SMC Corporation má ve svém portfoliu velké množství materiálů hadic, mezi které patří i chemicky a tepelně odolné hadice vhodné například pro potravinářský, zdravotnický a polovodičový průmysl. Jedná se právě o fluoropolymerové hadice, které firma vyrábí v několika úpravách. V následující podkapitolách budou tyto materiály blíže popsány.

3.3.1 Polytetrafluoroethylen (PTFE)

Je to bílý semikrystalický termoplast, jehož nevýhodou je, že se při zahřátí netaví, a je tedy obtížnější pro zpracování. PTFE se lisuje za studena a následně spéká. [36] [37] Jedná se

o neznámější fluoropolymer, většina ho zná pod názvem Teflon, pod kterým ho prodává firma Dupont. Společnost Daikin ho prodává pod názvem Polyflon.

PTFE je velmi inertní materiál. Reaguje pouze s alkalickými kovy, fluorem za zvýšených teplot, některými sloučeninami fluoru a s jemným prachem hliníku a hořčíku. [38] [39] Teplota skelného přechodu u PTFE je 130 °C. [40] Taví se zhruba při 326 °C, ale při nepřetržitém provozu se nedoporučuje přesáhnout 260 °C. Tepelná vodivost se běžně pohybuje okolo 0,23 W/(m·K). [41]

3.3.2 Fluorovaný ethylen propylen (FEP)

Jedná se průhledný semikrystalický termoplast. Vznikl jako alternativa k PTFE, které nebylo možná zpracovávat tvářením. FEP tak vyměnil teplotní stabilitu za snadnější možnost zpracování. Chemická odolnost je prakticky srovnatelná s PTFE. [35]

Jeho teplota tavení se pohybuje okolo 270 °C. Maximální teplota pro kontinuální provoz je 200 °C, což je v porovnání s PTFE nižší. FEP dosahuje tepelné vodivosti okolo 0,25 W/(m·K). [41]

3.3.3 Perfluoro-alkoxy alkan (PFA)

Jedná se o kopolymer PTFE. Je to semikrystalický průhledný termoplast, který má většinu vlastností podobných s PTFE. Nejpodstatnější rozdíl spočívá v jeho tvářitelnosti, díky které se lépe zpracovává (vstřikováním, odlévání). Dále má díky tváření při výrobě téměř nulovou pórovitost, a proto i nižší propustnost, což je vhodné, pokud v hadicích přepravujeme vysoce agresivní média. V porovnání s FEP a PTFE je dražší. [38] [36] [42] [43] Společnost Daikin ho prodává pod názvem Neoflon také ve variantě určené speciálně pro polovodičový průmysl. [44]

Teplota skelného přechodu u PFA je 90 °C. Teplota tavení se pohybuje okolo 305 °C, avšak maximální teplota nepřetržitého provozu je 260 °C. Jeho tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí 0,19–0,26 W/(m·K). [41] [45] [46]

Z předchozích odstavců je zřejmé, že nejvhodnějším materiálem pro tepelný výměník je karbid křemíku. Avšak kvůli jeho mechanickým vlastnostem se obtížně zpracovává a s tím je spojená i vysoká cena. S přihlédnutím k ceně a možnostem zpracování se nakonec jeví jako optimální volba některý z fluoropolymerů. Zkoumané fluoropolymery mají podobnou tepelnou vodivost pohybující se zhruba v rozmezí 0,20–0,25 W/(m·K). Rozhodujícím faktorem je tedy chemická odolnost, a eluce iontů. Těmto podmínkám nejlépe vyhovuje PFA, které SMC již používá. PFA má navíc, stejně jako PTFE, velmi nízký součinitel tření, což řeší problém se zanášením a díky tomu jsou i sníženy náklady na údržbu zařízení. [47]

3.4 Modifikace PFA

Jak z předchozích kapitol vyplývá, PFA není vhodné nahradit jiným materiálem. Fluoropolymery mají však velmi špatnou tepelnou vodivost a lze je spíše klasifikovat jako izolátory. Proto bylo, a stále je, snahou jejich tepelnou vodivost zlepšovat. Toho se dosahuje přidáváním aditiv do polymerů, například grafitem, karbidem křemíku, oxidem hlinitým nebo nitridem boritým, pomocí kterých se zvýší tepelná vodivost. [48] Přidáním plniv se mění i jiné vlastnosti materiálu než jen tepelná vodivost, často to bývá i zvyšování pevnosti nebo snižování chemické odolnosti. [38]

Již v minulosti vyvinula firma Fluorotherm modifikace FEP a PFA, které mají přibližně 2,7krát vyšší tepelnou vodivost než běžné fluoropolymery. [49] Společnost Daikin Industries též vyvíjí

PFA s vysokou tepelnou vodivostí. Tento anizotropický materiál dosahuje tepelné vodivosti až $2,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ale prozatím není dostupný. [50]

Grafit je považován za ideální výplňový materiál pro PFA díky své inertnosti vůči většině chemikálií, vysoké tepelné vodivosti, podobným kluzným vlastnostem a téměř stejné hustotě jako PFA. Přidaný grafit zvyšuje tvrdost, modul pružnosti i tepelnou vodivost. Ta se při obsahu grafitu 50 % hm. zvýšila až na $2,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Pro porovnání s běžně testovaným obsahem (20 % hm.) kde se tepelná vodivost pohybuje okolo $0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. [51]

Grafen je jednovrstvý materiál z uhlíku, skládající se z atomů uspořádaných do šestiúhelníkové mřížky. Je pružný, a přitom extrémně pevný. Má vynikající elektrickou a tepelnou vodivost a je průhledný pro viditelné světlo. [52] W. Zhang et al. [53] provedli experiment, při kterém zjistili, že PFA s obsahem 20 % hm. grafenových nanodestiček dosahuje tepelné vodivosti až $5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Zároveň autoři poukázali na fakt, že aglomerace částic grafenu při výrobě má negativní vliv na tepelnou vodivost kompozitu. Dále uvedli tři faktory ovlivňující tepelnou vodivost materiálu: vzdálenost vrstev grafenu, pórovitost kompozitu a míra propojení jednotlivých částic grafenu.

Při vytvoření anizotropického kompozitu PFA s obsahem 30 % hm. nitridu boritého byla tepelná vodivost materiálu zvýšena na hodnotu $4,65 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ve směru nanodestiček. [54]

Bohužel žádný ze zdrojů o možnostech modifikací PFA neověřoval chemickou odolnost vzniklého kompozitu, a tak nelze s jistotou říct, jak se budou dané modifikace chovat v provozu. V této oblasti bude potřeba dalšího výzkumu a experimentů, aby se určilo, který materiál lze použít pro polovodičový průmysl. V experimentální části se bude tedy pracovat pouze s čistým PFA.

4 Přenos tepla

Pro popis přenosu tepla existují velmi přesné vztahy, například diferenciální rovnice vedení tepla, které jsou však pro inženýrskou praxi příliš složité a těžko uplatnitelné. V minulosti se otázkou přenosu tepla zabývalo nespočet osobností, které daly vzniknout méně přesným, avšak podstatně jednodušším vztahům. V této kapitole je stručně vysvětlena problematika přenosu tepla a je zde uvedeno několik výpočtových vztahů a podobnostních čísel, které bude potřeba pro návrh matematického modelu.

Přenos tepla je tok tepelné energie z jednoho tělesa nebo látky do druhého v důsledku rozdílu teplot. Existují tři základní mechanismy přenosu tepla: vedení (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (radiace). Ve výměnících tepla se však výměna tepla uskutečňuje výhradně pomocí vedení a proudění, a proto se tato práce nebude sáláním zabývat.

4.1 Přenos tepla vedením

Vedení tepla je proces, při kterém se tepelná energie přenáší materiálem nebo mezi předměty v přímém kontaktu. Probíhá jak v pevných látkách, tak i v kapalinách a plynech. To, jak dobře materiál vede teplo vyjadřuje součinitel tepelné vodivosti. Velikost toho součinitele je závislá na materiálu, teplotě a tlaku. Teplotní závislost je velmi nízká. Pro pevné látky, kapaliny a plyny při nízkém tlaku je i závislost na tlaku zanedbatelná. Proto se teplotní vodivost v praxi uvádí jako konstanta pro daný materiál. [55] Mechanismy vedení tepla se liší podle stavu, v jakém se materiál nachází.

Obecně lze tepelný tok \dot{Q} na ploše A při teplotním gradientu dT/dx zapsat jako [56]:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

kde:	\dot{Q}	Tepelný tok [W]
	λ	Tepelná vodivost [W/(m·K)]
	A	Teplosměnná plocha [m ²]
	$\frac{dT}{dx}$	Teplotní gradient [K/m]

Pevné látky

V pevných látkách probíhá vedení tepla prostřednictvím přenosu energie mezi přilehlými atomy nebo molekulami. Tepelná energie v pevných látkách je ve skutečnosti vibrace jednotlivých částic materiálu. To znamená, že tepelný tok v pevných látkách je přenos vibrací z jedné molekuly (nebo atomu) na druhou. Jedou z možností, jak k tomuto přenosu může docházet, je prostřednictvím interakcí, kdy se sousední částice vzájemně ovlivňují pomocí vazeb mezi atomy. Atom s vyšší kinetickou energií předá část své energie atomu s nižší kinetickou energií, tak aby se energie vyrovnaly. Tímto mechanismem se vibrace šíří materiálem a materiál vede teplo. Tento způsob vedení tepla je dominantní pro nekovové materiály. K přenosu tepla vedením může docházet také pohybem volných elektronů. Proto materiály s vysokou hustotou a silnými vazbami a volnými elektrony, jako například kovy, jsou výbornými vodiči tepla (mají vysokou tepelnou vodivost). [56] [57]

Tekutiny

V kapalinách a plynech je vedení tepla spojeno s pohybem molekul. Tím ovšem není myšlen pohyb způsobený rozdílnou hustotou při rozdílných teplotách tekutiny, který se nazývá

přirozenou konvekcí. Samozřejmě nelze u těchto látek prakticky oddělit vedení tepla od proudění, ale pro vysvětlení to takto prozatím uděláme. Když se oblast tekutiny zahřívá, molekuly získávají energii a pohybují se rychleji. Ty potom narážejí do ostatních molekul, čímž jim předávají část své energie. Zároveň se tímto pohybem samovolně promíchávají (proces difuze). [56] [57]

Vedení tepla je u tekutin ve většině případů minoritním pochodem. Větší roli hraje proudění.

4.2 Přenos tepla prouděním

K tomuto způsobu přenosu tepla dochází výhradně v tekutinách. Na rozdíl od vedení, které spočívá v přímém kontaktu mezi částicemi, se proudění tepla projevuje pohybem samotné tekutiny, čímž dochází k šíření tepelné energie. Proudění tepla lze rozdělit na dva typy: přirozené a nucené.

Přirozené proudění tepla

Jak už bylo zmíněno dříve, při ohřátí tekutin získají molekuly energii a začnou se pohybovat rychleji. Tím vznikne více srážek a vzroste tlak v dané oblasti látky. Jelikož se tlaky mají snahu vyrovnat, začne se tekutina rozpínat. Tím se změní její hustota a začnou na ni působit vztlakové síly vlivem rozdílu hustot v látce. Vzniká tak proud teplejších molekul (konvekční proud), který je vytlačovaný chladnějšími molekulami. Chladnější molekuly přichází do kontaktu s teplým povrchem a celý proces se opakuje. Tím se rozvádí teplo po celé tekutině. Konvekce umožňuje efektivní přenos tepla v tekutinách, neboť díky výměně tekutiny přichází do kontaktu se zdrojem tepla studenější molekuly, což znamená, že se mezi stěnou a kapalinou udržuje větší teplotní rozdíl a tím i větší přenos tepla.

Nucené proudění tepla

Při nucené konvekci je proudění tekutiny vyvoláno vnějším zdrojem, například ventilátorem nebo čerpadlem. Princip přenosu tepla spočívá ve vzniku vírů, které tekutinu promíchávají. Proto je turbulentní proudění ve výměnících žádané. Při nuceném proudění je vždy přítomné i přirozené (na rozdíl od přirozeného, kde nemusí být přítomno nucené). S rostoucí silou nuceného proudění klesá významnost přirozeného. V praxi je přirozené proudění ve výměnících obvykle zanedbatelné a přenos nucenou konvekcí je daleko intenzivnější. Výjimkou jsou například chladicí věže, kde se spoléhá na přirozené proudění vzduchu. [56]

4.3 Vztahy pro popis chování výměníků tepla

Bilanční kalorimetrická rovnice

Tepelný tok z nebo do proudu média popisuje bilanční kalorimetrická rovnice. Jinak řečeno, jde o kvantifikaci množství tepla, které proud média ve výměníku odevzdá nebo přijme.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

kde: \dot{m} Hmotnostní tok [kg/s]
 c_p Měrná tepelná kapacita pro střední teplotu [J/(kg·K)]
 ΔT Rozdíl vstupní a výstupní teploty proudu [°C]

Rovnice prostupu tepla (výkonová rovnice)

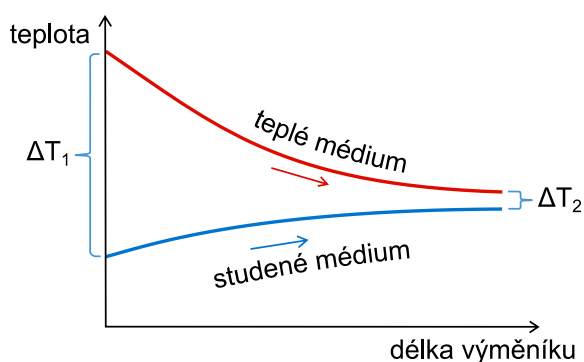
Výkonnost, a tedy chování výměníku tepla je popsána rovnicí prostupu tepla. Tato rovnice říká, kolik tepla projde stěnami výměníku. S její pomocí lze určit parametry, jako jsou výkon nebo rozměry výměníku.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (3)$$

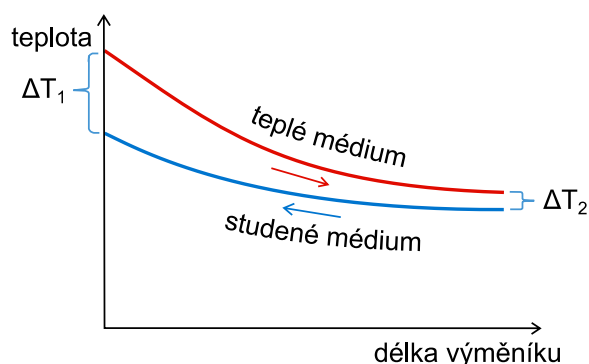
kde: U Součinitel prostupu tepla [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
 ΔT_{LM} Logaritmický střední teplotní rozdíl [$^{\circ}\text{C}$]

Logaritmický teplotní rozdíl se vypočítá podle rovnice (4). Na Obr. 4.1 a Obr. 4.2 je zobrazen průběh teplot v souproutém a protiproutém výměníku a příslušné teplotní rozdíly ΔT_1 a ΔT_2 .

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (4)$$



Obr. 4.1 Teplotní profil souproutého uspořádání



Obr. 4.2 Teplotní profil protiproutého uspořádání

Součinitel prostupu tepla pro trubku

Součinitel prostupu tepla je převrácenou hodnotou součtu tepelných odporů jednotlivých vrstev podílejících se na přenosu tepla. Jedná se o odpory způsobené přestupem tepla z média na stěnu výměníku tepla (zohlednění přenosu tepla prouděním) a odpory vrstev nánosů a materiálu výměníku (zohlednění přenosu tepla vedením). Součinitel přestupu tepla je nutno uvažovat zvlášť pro studené a teplé médium z důvodu rozdílných vlastností medií a rozdílných charakterů proudění. Stejně tak i zanášení je nutno uvažovat pro každou stranu zvlášť, neboť každé médium má jiné zanášecí vlastnosti, a i samotný nános může mít rozdílnou tepelnou vodivost. Vzhledem k použitým kapalinám a materiálu teplosměnné plochy výměníku, uvažovaného v této práci, bude zanášení minimální, ne-li žádné, a tak lze tyto hodnoty zanedbat. Pro vstup tepla trubkou platí následující vztah.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + R_{z1} + \frac{d}{2 \cdot \lambda_w} \cdot \ln \left(\frac{D}{d} \right) + R_{z2} \cdot \frac{d}{D} + \frac{d}{D \cdot \alpha_2}} \quad (5)$$

kde: α_1 Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
 α_2 Součinitel přestupu tepla na vnější straně trubky [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
 R_{z1} Tepelný odpor na vnitřní straně trubky [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]
 R_{z2} Tepelný odpor na vnější straně trubky [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]
 D Vnější průměr trubky [m]
 d Vnitřní průměr trubky [m]

λ_w Tepelná vodivost trubky [W/(m·K)]

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je poměr mezi setrvačnými a viskózními silami v médiu. Prakticky udává charakter nuceného proudění (laminární, turbulentní nebo přechodové). Na to, jaký typ proudění nastane má vliv mnoho faktorů: vibrace potrubí, drsnost povrchu, fluktuace toku. Obecně se uvádí, že laminární proudění u rovných potrubí a kanálů nastává při $Re < 2\,300$ a turbulentní při $Re > 10\,000$. Mezi těmito hodnotami nastává přechodové proudění. Často se ale také uvádí, že při hodnotách Reynoldsova čísla okolo 4 000 je již proudění převážně turbulentní (opět pouze u rovných trubek a kanálů). [58]

$$Re = \frac{L \cdot u \cdot \rho}{\eta} \quad (6)$$

kde: Re Reynoldsovo číslo [-]
 L Charakteristický rozměr [m]
 u Rychlost proudění [m/s]
 ρ Hustota média [kg/m³]
 η Dynamická viskozita média [Pa·s]

Hydraulický průměr

Reynoldsovo číslo počítá s kruhovým průřezem potrubí, avšak alespoň jedno médium ve výměníku tepla proudí vždy v kanále s nekrhovým průřezem. (V případě výměníku trubka v trubce je jedním z průřezů mezikružší, ne kruh!) Proto se používá veličina hydraulický průměr, která hydraulické vlastnosti skutečného kanálu přiřazuje kanálu kruhového tvaru o určitém průměru. Výsledkem je průměr fiktivního kruhového kanálu, který nám dovoluje aproximuje chování nekrhových průřezů. Tento hydraulický průměr je pak možno dosadit do rovnice (6) za charakteristický rozměr L . [59]

$$D_H = \frac{4 \cdot S}{O} \quad (7)$$

kde: D_H Hydraulický průměr [m]
 S Průtočný průřez [m²]
 O Smáčený obvod [m]

Prandtlovo číslo

Prandtlovo číslo je poměr mezi difuzí rychlostního a teplotního pole. Jinak řečeno, je to poměr mezi rychlostí přenosu hmoty a tepla. Z praktického hlediska se využívá k určení převládajícího způsobu přenosu tepla (vedením nebo prouděním). [56]

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda_t} \quad (8)$$

kde: Pr Prandtlovo číslo
 λ_t Tepelná vodivost média [W/(m·K)]

Nusseltovo číslo

Nusseltovo číslo je poměrem mezi přenosem tepla prouděním a vedením. Vyjadřuje, jak zásadní je proudění vzhledem k vedení tepla. Čím je číslo vyšší, tím je proudění podstatnější. [58]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_t} \quad (9)$$

kde: Nu Nusseltovo číslo [-]
 α Součinitel přestupu tepla [W/(m²·K)]
 L Charakteristický rozměr [m]

5 Vztahy pro výpočet koaxiálních výměníků tepla

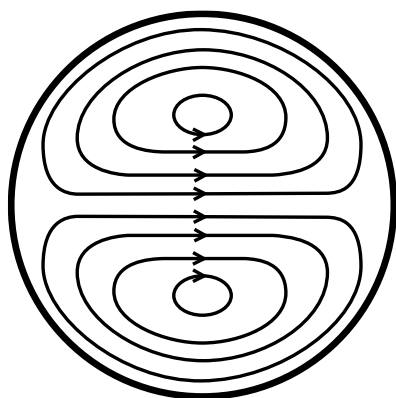
Firma SMC ve svém portfoliu nabízí mimo jiné i koaxiální výměníky tepla, pro které vznikla potřeba vytvořit matematický model. Proto, aby bylo možné navrhnout jakékoliv zařízení, je potřeba znát, jak se dané zařízení chová při provozu. Člověk často intuitivně chápe, co na čem závisí, ale nedokáže to přesně kvantifikovat. K tomu slouží matematické modely, které simulují interakce z reálného světa a převádí je do jednodušší vyčíslitelné formy. S tím už člověk dokáže díky matematice exaktně pracovat.

V procesu ochlazování média jsou ztráty tepla žádoucí, protože tím dochází k dodatečnému snižování teploty daného média. Přestože by bylo možné umístit teplé médium do vnější části výměníku, tato konfigurace by mohla představovat značné riziko. V případě prasknutí hadic by hrozil únik agresivního média do okolí, což by mohlo mít za následek škodlivé účinky na pracovní prostředí a potenciálně i na zdraví lidí. Z tohoto důvodu je agresivní médium umístěno ve vnitřní hadici, což minimalizuje riziko úniku a zajišťuje bezpečnější provoz.

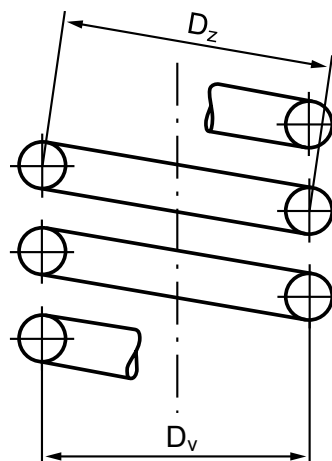
Následující rovnice jsou empirického charakteru. To znamená, že pro konkrétní podmínky může kromě níže uvedených vztahů existovat spousta dalších. Pro účel této práce byly vybrány různé vztahy uváděné v dostupné literatuře. Tyto vztahy byly porovnány a pro model byly použity ty, které nejlépe odpovídali teorii a výsledkům měření.

5.1 Geometrické charakteristiky

Díky zakřivení trubek působí na proudící kapalinu odstředivé síly. Ty v kombinaci s rozdílnými teplotami (a tím i hustotami) média vytváří radiální nebo také Deanovi víry (jak je zobrazeno na Obr. 5.1), které promíchávají kapalinu a zvyšují tak přestup tepla. Toto sekundární proudění mění teplotní profil v trubce a v kombinaci s hlavním tokem posouvá maximální rychlost proudění směrem od středu. Vliv je patrný zejména při laminárním proudění. [60]



Obr. 5.1 Radiální (Deanovi) víry v koaxiálním výměníku (řez kanálem)



Obr. 5.2 Průměr zakřivení vs. průměr vinutí

Zakřivení je definováno poměrem d/D_z (D_H/D_z pro mezikruží), kde d je vnitřní průměr trubky a D_z je průměr zakřivení. Průměr zakřivení D_z není totožný s průměrem vlnutí D_v (viz Obr. 5.2). Průměr zakřivení lze vypočítat ze vztahu (10). Se zvyšujícím se zakřivením se zvyšuje i součinitel přestupu tepla. [60] [21]

$$D_z = D_v \cdot \left[1 + \left(\frac{h}{\pi \cdot D_v} \right)^2 \right] \quad (10)$$

kde: D_z Průměr zakřivení trubky [m]
 D_v Průměr vinutí [m]
 h Stoupání [m]

Zásadní rozdíl mezi průměry D_z a D_v je pouze při vysokém poměru stoupání ku průměru vinutí. Hadicový výměník je konstruován tak, že hadice leží na sobě. Proto bude při výpočtu rozdíl mezi D_z a D_v zanedbán.

Sekundární proudění ve výměníku má také stabilizační efekt na hlavní tok. To znamená, že laminární proudění se vyskytuje i při vyšších Reynoldsových číslech, než jak je tomu u rovného výměníku. Čím vyšší je zakřivení, tím silnější je i sekundární proudění a tím větší je stabilizační účinek. Kritické Reynoldsovo číslo neboli hodnota, při které nastává přechodné proudění, se určí z rovnice (11). [60]

$$Re_{crit} = 2\,300 \cdot \left[1 + 8,6 \cdot \left(\frac{d}{D_z} \right)^{0,45} \right] \quad (11)$$

5.2 Tepelný výpočet

Deanovo číslo

Deanovo číslo vyjadřuje, jak silné je sekundární proudění a jak stabilní jsou Deanovy víry. [61] Se zvyšujícím se Deanovým číslem ve vnitřní nebo vnější trubce se zvyšuje i součinitel prostupu tepla. [62] Laicky by se dalo říct, že Deanovo číslo je pro zahnuté kanály obdobou Reynoldsova čísla pro rovné kanály.

Pro kruhový průřez platí:

$$De = Re \cdot \sqrt{\frac{d}{D_z}} \quad (12)$$

kde: De Deanovo číslo [-]

Pro mezikruží se používá modifikované Deanovo číslo, kde zakřivení je definováno jako poměr mezery mezikruží ku poloměru zakřivení. Takto modifikované Deanovo číslo lze použít pro souproudé i protiproudé zapojení. [63]

$$De = Re \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (d_2 - D_1)}{D_z}} \quad (13)$$

kde: d_2 Vnitřní průměr vnější trubky [m]

D_1 Vnější průměr vnitřní trubky [m]

5.2.1 Empirické vztahy pro výpočet Nusseltova čísla v trubce

Schmidt [64] ve své práci uvedl empirické vztahy pro výpočet Nusseltova čísla v zahnutých trubkách ve všech režimech proudění.

a) laminární oblast

$$Nu = 3,65 + 0,08 \cdot \left[1 + 0,8 \cdot \left(\frac{d}{D_z} \right)^{0,9} \right] \cdot Re \left[0,5 + 0,2903 \cdot \left(\frac{d}{D_z} \right)^{0,194} \right] \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Platné v rozsahu $100 < Re < Re_{krit}$.

b) přechodová oblast

$$Nu = 0,023 \cdot \left[1 + 14,8 \cdot \left(1 + \frac{d}{D_z} \right) \cdot \left(\frac{d}{D_z} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot Re \left[0,8 - 0,22 \cdot \left(\frac{d}{D_z} \right)^{0,1} \right] \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Platné v rozsahu $Re_{krit} < Re < 22\,000$.

c) turbulentní oblast

$$Nu = 0,023 \cdot \left[1 + 3,6 \cdot \left(1 - \frac{d}{D_z} \right) \cdot \left(\frac{d}{D_z} \right)^{0,8} \right] \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

Platné v rozsahu $20\,000 < Re < 150\,000$.

Podle **Dravid et al.** [65] je vstupní region natolik krátký, že je možné ho zanedbat a pro laminární oblast navrhnutí asymptotu závislosti Nusseltova čísla na Deanově čísle (rovnice (17)).

$$Nu = (0,76 + 0,65 \cdot \sqrt{De}) \cdot Pr^{0,175} \quad (17)$$

Platné v rozsahu $50 < De < 2\,000$ a $5 < Pr < 175$.

Kalb a Seader [66] teoreticky zkoumali přenos tepla v zahnutých trubkách. Pro plně vyvinutý turbulentní tok a konstantní teplotu stěny vyvinuli následující vztah.

$$Nu = 0,836 \cdot De^{0,5} \cdot Pr^{0,1} \quad (18)$$

Platné v rozsahu $80 \leq De$ a $0,7 < Pr < 5$.

Ve VDI – Heat Atlas [60] **Gnielinski** esenciálně popisuje přenos tepla v šroubovitě stočených trubkách. Uvádí způsoby, jak vypočítat Nusseltovo číslo pro laminární, přechodové i turbulentní proudění. Pro laminární proudění doporučuje použít Schmidtův vztah. Pro turbulentní proudění mírně upravený vztah pro rovné trubky, který pomocí součinitele tření koriguje pro zahnuté trubky. A z těchto rovnic doporučuje Gnielinski pro přechodové proudění lineárně interpolovat hodnoty mezi Nusseltovými čísly pro Re_{krit} a $Re_{22\,000}$.

a) přechodová oblast

$$Nu = \gamma \cdot Nu_{l,Re_{crit}} + (1 - \gamma) \cdot Nu_{t,22\,000} \quad (19)$$

Platné v rozsahu $Re < Re_{crit}$.

kde: γ Interpoláční koeficient [-]
 $Nu_{l,Re_{crit}}$ Nusseltovo číslo pro laminární proudění při $Re = Re_{crit}$ [-]
 $Nu_{t,22\,000}$ Nusseltovo číslo pro turbulentní proudění při $Re = 22\,000$ [-]

$$\gamma = \frac{22\,000 - Re}{22\,000 - Re_{crit}} \quad (20)$$

b) turbulentní oblast

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,14} \quad (21)$$

Platné v rozsahu $22\,000 < Re$.

Součinitel tření pro zahnuté trubky se pak vypočítá podle upraveného vztahu od Hishra a Gupta. [60]

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} + 0,03 \cdot \left(\frac{d}{D_z}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\eta_w}{\eta}\right)^{0,27} \quad (22)$$

Xin a Ebadian [67] ve své práci navrhly nové vztahy pro výpočet průměrného Nusseltova čísla v šroubovitých trubkách. Své rovnice porovnávali s několika sadami naměřených hodnot a dospěli k následujícímu vztahu pro laminární proudění.

$$Nu = (2,153 + 0,318 \cdot De^{0,643}) \cdot Pr^{0,177} \quad (23)$$

Platné v rozsahu $20 < De < 2\,000$, $0,7 < Pr < 175$ a $0,0267 < d/D_z < 0,0884$.

5.2.2 Empirické vztahy pro výpočet Nusseltova čísla v mezikruží

Kumar et al. [68] na základě matematického modelování navrhly vztah pro výpočet Nusseltova čísla ve vnější části koaxiálního výměníku.

$$Nu = 0,0509 \cdot Re^{0,817} \cdot Pr^{0,3} \cdot \left(\frac{d}{D_z}\right)^{-0,1} \quad (24)$$

Platné v rozsahu $5\,000 < Re < 15\,000$ a $0,74 < Pr < 150$.

Rennie [69] ve své studii uvádí vztah pro výpočet Nusseltova čísla v mezikruží. Přičemž je v tomto případě použito jinak definované Deanovo číslo a sice podle rovnice (26).

$$Nu = 0,075 \cdot De + 5,36 \quad (25)$$

Testované v rozsahu $10 < De < 270$.

$$De = Re \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot D_H}{D_z}} \quad (26)$$

5.3 Hydraulický výpočet

Zahnuté trubky mají v porovnání s rovnými větší tlakovou ztrátu. Tento rozdíl se zahrnuje v třecím součiniteli. Proto i pro koaxiální výměník platí dobře známá Darcy-Weisbachova rovnice pro tlakové ztráty v kruhovém potrubí v mírně upravené podobě:

$$\Delta p = \lambda_z \cdot \frac{\rho \cdot u^2 \cdot l}{2 \cdot D_H} \quad (27)$$

kde: l Délka trubky (výměníku) [m]
 Δp Tlaková ztráta [Pa]
 λ_z Součinitel tření pro zakřivené trubky [-]

5.3.1 Součinitel tření v zakřivené trubce

Mishra a Gupta [70] na základě vlastních měření navrhli následující vztahy pro výpočet součinitele tření v zakřivených trubkách.

a) laminární oblast

$$\lambda_z = \lambda \cdot [1 + 0,033 \cdot (\log_{10} De)^4] \quad (28)$$

Platné v rozsahu $1 < De < 3\,000$, $2,89 \cdot 10^{-3} < d/D_z < 0,155$ a $0 < h/D_z < 25,4$.

kde: λ Darcy-Weisbachův součinitel tření (pro rovné trubky) [-]

b) turbulentní oblast

$$\lambda_z = \lambda + 0,0075 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_z}} \quad (29)$$

Platné v rozsahu $4\,500 < Re < 100\,000$, $2,89 \cdot 10^{-3} < d/D_z < 0,15$ a $0 < h/D_z < 25,4$.

Darcy-Weisbachův součinitel tření pro hladké rovné trubky se vypočítá podle následujících rovnic.

a) laminární oblast

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (30)$$

b) turbulentní oblast

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (31)$$

Zheng et al. [71] se ve své studii zaměřili na tlakové ztráty a rozdíly v přenosu tepla po obvodu stěny výměníku. Na základě svých experimentálně naměřených dat uvádí následující rovnici pro výpočet tlakových ztrát v šroubovitých trubkách.

$$\lambda_z = \frac{0,0791}{Re^{0,25}} + \frac{81\,858}{Re^{1,54}} \cdot \left(\frac{d}{D_z}\right)^{0,48} \quad (32)$$

Testované v rozsahu $7\,000 < Re < 120\,000$, $28,5 < D_z/d < 128,5$.

5.3.2 Součinitel tření v zakřiveném mezikruží

Podle **Xin et al.** [72] neexistuje jasná hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním v potrubí s mezi kruhovým průřezem. Díky tomu na základě svých experimentů vytvořili vztah pro výpočet součinitele tření pro jednofázový tok v potrubí s mezikruhovým průřezem pro široký rozsah Deanových čísel.

$$\lambda_z = 0,02985 + 75,89 \cdot \frac{\left[0,5 - \frac{\arctg\left(\frac{De - 39,88}{77,56}\right)}{\pi}\right]}{\left(\frac{D_z}{d_2 - d_1}\right)^{1,45}} \quad (33)$$

Testované v rozsahu $35 < De < 20\,000$, $1,61 < d_2/D_1 < 1,67$ a $21 < \frac{D_z}{d_2 - d_1} < 32$.

Gomma et al. [73] ve své práci studovali přestup tepla a tlakovou ztrátu v mezikruží koncentrického šroubového výměníku v rozsahu Reynoldsových čísel 5 000 až 19 000. Pro mezikruží v protiproudém zapojení navrhli následující vztah.

$$\lambda_z = 1,097 \cdot De^{-0,25} \cdot \left(\frac{D_H}{D_z}\right)^{0,27} \cdot N^{-0,37} \quad (34)$$

Platné v rozsahu $850 < De < 3\,600$, $0,026 < D_H/D_z < 0,043$ a $2,5 < N < 7,5$.

kde: N Počet otáček vinutí výměníku [-]

5.4 Pevnostní kontrola

Obvykle se při návrhu výměníku provádí i pevnostní výpočet. V tomto případě jsou ale k dispozici maximální povolené tlaky, uváděné v katalogu SMC pro příslušné rozměry hadic. Není tedy potřeba provádět výpočet a stačí pouze zkontrolovat, zda je tlak v hadici nižší než

tlak dovolený. Tyto tlaky jsou uváděny s dostatečnou bezpečností, ale pro pořádek jsou v následujících tabulkách uvedeny i tlaky, při kterých dochází k prasknutí hadic.

Tab. 5.1 Dovolенý tlak pro metrické PFA hadice od SMC [74]

Dovolенý tlak [MPa]		Velikost hadice					
		TL0403	TL0604	TL0806	TL1008	TL 1210	TL1916
Teplota [°C]	20	1	1	1	0,9	0,7	0,6
	100	0,45	0,64	0,43	0,33	0,27	0,24
	200	0,21	0,29	0,2	0,15	0,12	0,11
	260	0,09	0,12	0,08	0,06	0,05	0,05

Tab. 5.2 Dovolенý tlak pro palcové PFA hadice od SMC [74]

Dovolенý tlak [MPa]		Velikost hadice							
		TIL01	TILB01	TIL05	TIL07	TIL11	TIL13	TIL19	TIL25
Teplota [°C]	20	1	1	1	1	1	1	0,7	0,5
	100	0,59	0,92	0,62	0,73	0,62	0,43	0,26	0,19
	200	0,27	0,42	0,28	0,34	0,28	0,2	0,12	0,09
	260	0,11	0,17	0,12	0,14	0,12	0,08	0,05	0,04

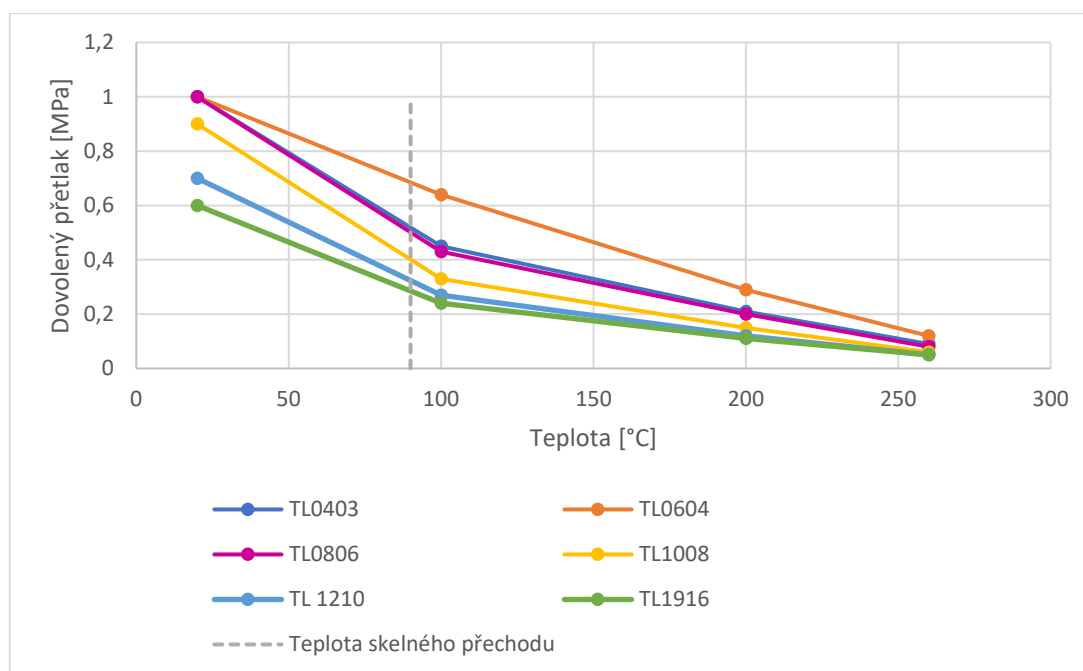
Tab. 5.3 Tlak prasknutí hadic řady TL od SMC [74]

	TL0403	TL0604	TL0806	TL1008	TL 1210	TL1916
Tlak prasknutí [MPa]	4,9	6,9	4,7	3,6	2,9	2,6

Tab. 5.4 Tlak prasknutí hadic řady TIL od SMC [74]

	TIL01	TILB01	TIL05	TIL07	TIL11	TIL13	TIL19	TIL25
Tlak prasknutí [MPa]	6,4	9,9	6,7	7,9	6,7	4,6	2,8	2,0

Na Obr. 5.3 je vykreslena závislost dovolенého přetlaku v hadici na teplotě spolu s teplotou skelného přechodu PFA. Jak již bylo v kapitole 3.3 řečeno, PFA je semikrystalický polymer. V oblasti skelného přechodu PFA dochází výraznému poklesu dovolенého přetlaku. Navzdory tomuto poklesu si materiál zachovává značnou část své pevnosti.



Obr. 5.3 Závislost dovoleného přetlaku hadic řady TL na teplotě

Koaxiální výměník, používaný firmou SMC, se skládá ze dvou na sebe navlečených hadic. Kvůli tomuto designu se hadice navzájem dotýkají, což způsobuje odlišnosti od běžného výpočtu pro výměníky typu trubka v trubce. Bude proto nutné porovnat a případně upravit vztahy tak, aby odpovídaly realitě. Jedna možnost je korigovat teplosměnnou plochu výměníku koeficientem. Druhou možností je úprava empirických vztahů pro výpočet Nusseltova čísla. To, jakým způsobem se výpočet upraví, bude záležet na výsledcích experimentu.

6 Experimentální měření

Jak již bylo v závěru kapitoly 5 naznačeno, aby matematický model odpovídal realitě, bylo potřeba provést měření, pomocí kterých se pak ověří empirické vztahy. Pokud výsledky z rovnic nebudou odpovídat hodnotám z experimentů, bude potřeba upravit koeficienty empirických rovnic.

První měření probíhalo v SMC AT v Korneuburgu, neboť jejich laboratoře jsou nejen lépe vybavené, ale hlavně tam měli i koaxiální výměník určený k měření. Na Obr. 6.1 lze vidět laboratoř Fluid Control, ve které probíhalo měření.



Obr. 6.1 Laboratoř Fluid Control v Rakouském Korneuburgu

6.1 První měření

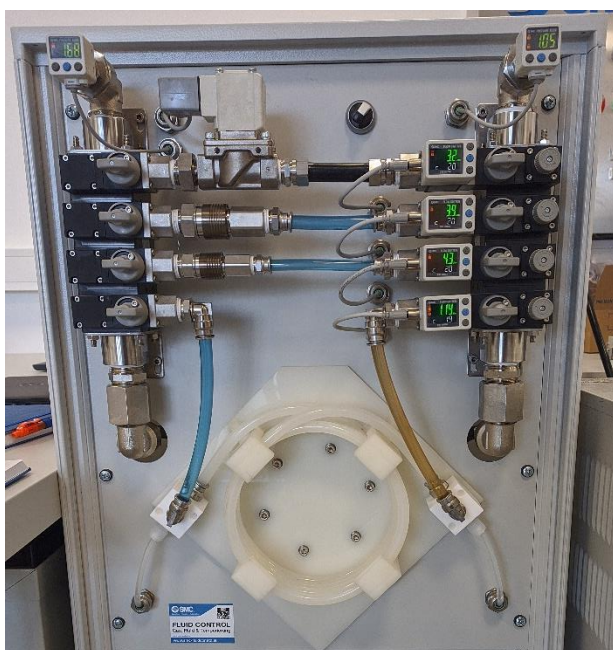
První měření proběhlo 12.1. 2023 v dříve zmíněné laboratoři. Měření probíhalo na výměníku s následujícími parametry:

Vnější průměr vnější hadice:	12 mm
Vnitřní průměr vnější hadice:	10 mm
Vnější průměr vnitřní hadice:	1/4" (6,35 mm)
Vnitřní průměr vnitřní hadice:	5/32" (3,95 mm)
Průměr vinutí výměníku:	180 mm (přibližný údaj)
Počet otáček vinutí:	5,5 (přibližný údaj)
Materiál hadic:	PFA

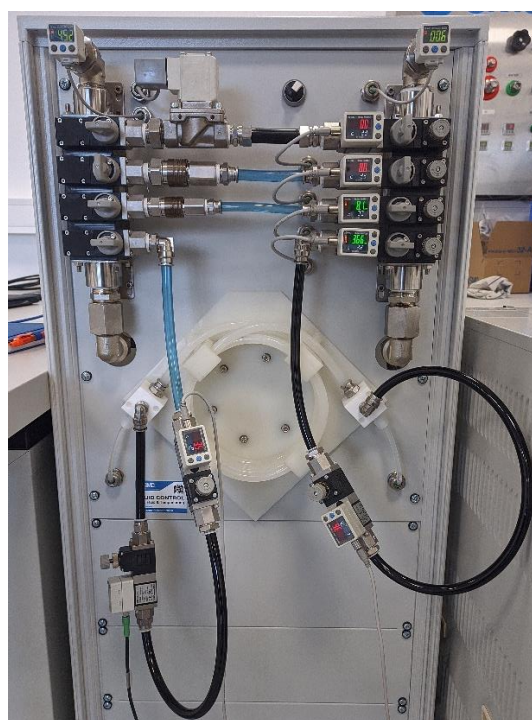
Z důvodu bezpečnosti a ceny experimentu, bylo jako teplotnosné médium zvolena voda pro oba proudy.

6.1.1 Zapojení měřené soustavy

Na Obr. 6.2 lze vidět původní soustavu výměníku tepla s bypassy, průtokoměry, tlakoměry a ventily pro ovládání průtoku. Pro dosažení přesnějších výsledků, bylo zapojení výměníku upraveno, jak je zobrazeno na Obr. 6.3. Snímače teploty a průtoku teplého proudu byly zapojeny přímo za výměník tepla. Studený proud bohužel nebylo možné s dostupným vybavením upravit a snímače tak musely být umístěny dál. Zapojení měřené soustavy je zobrazeno na Obr. 6.4 a Obr. 6.5. Teplý proud byl zapojen do vnější hadice a studený do vnitřní. Teplota teplého proudu byla řízena takzvaným chillerem, který je schopný udržovat teplotu média mezi 5 až 40 °C. Teplota studeného proudu byla řízena chillerem, který dodává médium o požadované teplotě do celé laboratoře. Tento chiller dokáže regulovat teplotu média od 5 do 35 °C. Pro snímání teplot a průtoků byly použity digitální snímače průtoku řady PF3W7 firmy SMC s integrovaným snímačem teploty. Z jednoho snímače však lze zaznamenávat jen jednu veličinu a bylo tak potřeba použít 6 snímačů (4 pro teploty a 2 pro průtoky). Tlaky v tomto experimentu nebyly zaznamenávány.



Obr. 6.2 Původní zapojení výměníku – první měření



Obr. 6.3 Upravené zapojení výměníku – první měření

Pro jednotlivé veličiny byly použity následující snímače: [75]

$T_{h,in}$ – PF3W704 (± 3 °C)

\dot{V}_h – PF3W720 ($\pm 0,42$ l/min)

$T_{h,out}$ – PF3W720 (± 3 °C)

\dot{V}_c – PF3W704 ($\pm 0,105$ l/min)

$T_{c,in}$ – PF3W720 (± 3 °C)

$T_{c,out}$ – PF3W720 (± 3 °C)

S touto volbou snímačů se pojí problém, který je blíže rozebrán v kapitole 6.1.3 Výsledky měření.

Výměník se skládal ze dvou do sebe navlečených hadic.

Vnější hadice – TL1210 (průměr 12x10 mm, materiál super PFA) [74]

Vnitřní hadice – TIL07 (průměr 1/4" x 5/32", materiál super PFA) [74]



Obr. 6.4 Měřená soustava (zepředu) – první měření



Obr. 6.5 Měřená soustava (zezadu) – první měření

Na Obr. 6.6 je vidět, že zaznamenávací zařízení má pouze 5 vstupů pro záznam (2 teploty, 2 tlaky, 1 průtok). Snímače byly pro záznam zapojeny podle následujícího seznamu.

Zapojení snímačů [veličina – vstup záznamového zařízení]:

$T_{h,in}$ – Press 1 (vstup pro tlak)
 $T_{h,out}$ – Press 2 (vstup pro tlak)
 $T_{c,in}$ – Temp 1 (vstup pro teplotu)
 $T_{c,out}$ – Temp 2 (vstup pro teplotu)

\dot{V}_h – Flow rate (vstup pro průtok)
 \dot{V}_c – Manuální záznam (odečítání z displeje snímače)



Obr. 6.6 Zaznamenávací zařízení

6.1.2 Průběh měření

Nejprve byla měřená aparatura modifikována (jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1.1), aby vyhovovala účelům měření. Následně byla připojena ke zdrojům teplé a studené vody a snímače byly připojeny k zaznamenávacímu zařízení. Kvůli nedostatku vstupů na zaznamenávacím zařízení, musel být průtok studeného média zaznamenáván manuálně z displeje snímače. Průtok se však po celou dobu měření značně neměnil a lze ho tak považovat za konstantní. Totéž platí i pro průtok teplého média. Zaznamenávání hodnot se spustilo a postupně se měnily teploty v jednotlivých okruzích tak, aby se proměřil rozsah teplotního rozdílu 15-35 °C.

6.1.3 Výsledky měření

Zaznamenávací zařízení bylo naprogramováno na jiné snímače, než které byly při měření použity. Zařízení počítá s tím, že na vstupy pro teploty jsou zapojeny snímače IFM TA2105 a na vstupy pro tlaky snímače SMC ISE20C. Místo toho ale byly do všech vstupů zapojeny průtokoměry řady PF3W7 od SMC. Hodnoty ve výsledném CSV souboru tak bylo potřeba přepočítat. Pro všechny použité snímače, pro které je záznamové zařízení naprogramováno, je závislost měřené veličiny na výstupním signálu lineární. To značně usnadnilo práci, neboť ze známého měřicího rozsahu a rozsahu výstupního proudu, lze určit rovnice přímky této závislosti. Pomocí této přímky pak lze přepočítávat veličinu na výstupní proud a naopak.

Nejprve se pomocí závislosti výstupního napětí na měřené veličině převedla změřená veličina (teplota a tlak) na proud. Tento proud byl skutečně poslán snímačem do zaznamenávacího zařízení. Následně se proud převedl na skutečnou teplotu, kterou snímač změřil na výměníku.

Na následujících řádcích je uveden příklad přepočtu, konkrétně ze vstupu Temp 1 na hodnotu $T_{c,in}$. Zbylé přepočty mají stejný princip.

Vše vychází ze směrnicového tvaru rovnice přímky:

$$y = k \cdot x + q \quad (35)$$

kde:	y	Závislá proměnná [-]
	k	Směrnice přímky [-]
	x	Nezávislá proměnná [-]
	q	Posunutí [-]

Směrnice přímky k v tomto případě je:

$$k = \frac{I_{m,h} - I_{m,s}}{T_{m,h} - T_{m,s}} = \frac{20 - 4}{150 - (-50)} = 0,08 \quad (36)$$

kde:	$I_{m,h}$	Horní hranice výstupního proudu měřidla [mA]
	$I_{m,s}$	Spodní hranice výstupního proudu měřidla [mA]
	$T_{m,h}$	Horní hranice měřitelného rozsahu měřidla [°C]
	$T_{m,s}$	Spodní hranice měřitelného rozsahu měřidla [°C]

Posunutí q :

$$y = k \cdot x + q \quad (37)$$

$$q = y - k \cdot x \quad (38)$$

$$q = I_{m,s} - k \cdot T_{m,s} = 4 - 0,08 \cdot (-50) = 8 \quad (39)$$

Závislost výstupního napětí na teplotě snímače IFM TA2105 je tedy dána rovnicí:

$$I = 0,08 \cdot T + 8 \quad (40)$$

kde: I Výstupní proud snímače [mA]
 T Snímaná teplota [°C]

Po vykreslení zaznamenaných hodnot do grafu se ukázalo, že teploty nebyly ustálené. K tomu se zřejmě přidala i nepřesnost měřidel a došlo k překřížení teplot vnitřního okruhu (teplý proud se ohříval, viz Tab. 6.1). Na tuto chybu upozornil poslední řádek v tabulce, a proto není možné toto měření považovat za důvěryhodné. Přesto bylo přínosné, neboť na jeho základě bylo eliminováno spoustu nedokonalostí při dalším měření.

Tab. 6.1 Naměřené hodnoty při prvním měření

$T_{c,in}$ [°C]	$T_{c,out}$ [°C]	$T_{h,in}$ [°C]	$T_{h,out}$ [°C]	V_h [l/min]	V_c [l/min]
8,04	9,22	29,84	29,38	3,61	3,11
8,04	9,60	39,93	39,20	3,64	3,12
12,66	14,02	39,97	39,42	3,62	3,12
8,08	9,65	39,26	38,81	3,48	3,12
7,94	8,95	24,91	24,89	3,54	3,12
7,91	8,69	19,95	20,23	3,23	3,12

Všechny zaznamenané a převedené hodnoty z tohoto měření jsou uvedeny v Excelovém souboru 1_Měření 12.1.2023.xlsx.

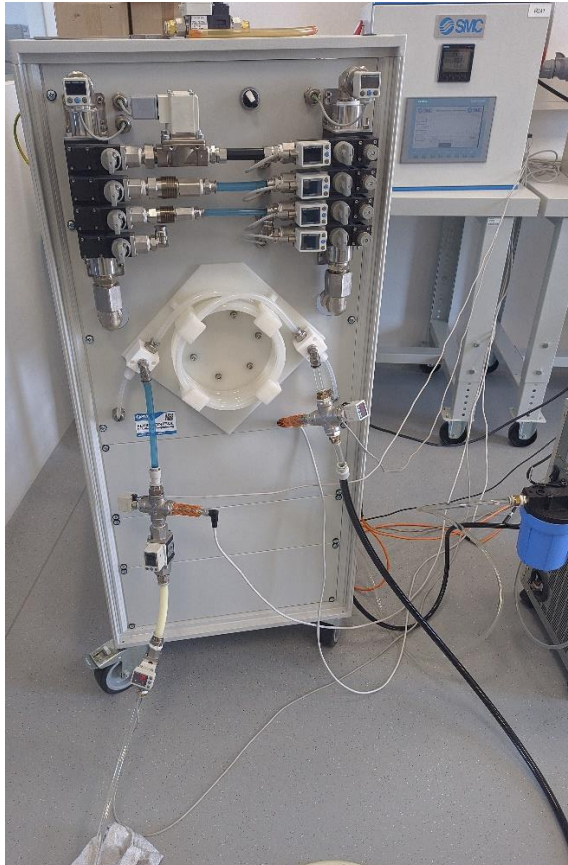
6.2 Druhé měření

Protože první měření mělo příliš nedokonalostí, bylo rozhodnuto provést druhé měření, které tyto nedostatky odstraní. Druhé měření proběhlo 26. a 27.3.2024 opět v laboratoři v Korneuburgu na stejném výměníku jako předchozí měření. Pro oba okruhy byla též použita voda jako teplotnosné médium.

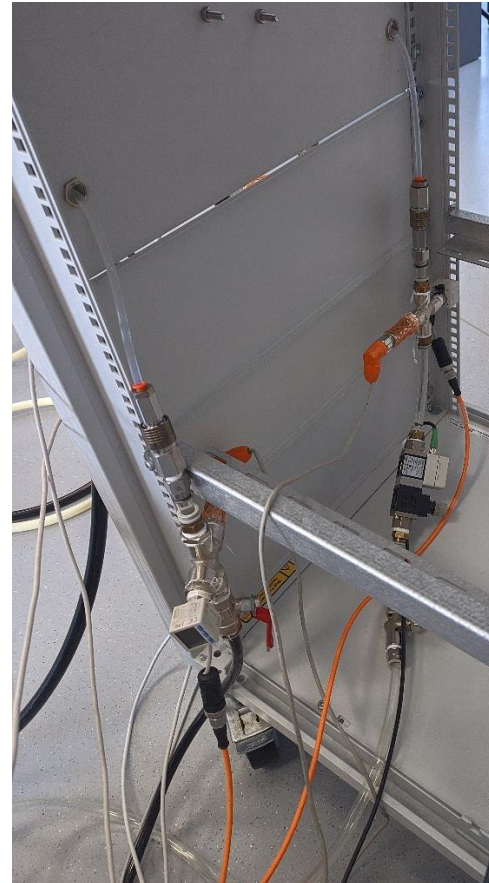
6.2.1 Zapojení měřené soustavy

Z důvodu věrnějšího simulování praktického použití výměníku bylo teplé médium zapojeno do vnitřní hadice (vnitřní okruh) a studené do vnější hadice (vnitřní okruh). Při tomto měření byla k dispozici dvě zaznamenávací zařízení, a tak byly snímány mimo jiné i tlaky před a za výměníkem na obou okruzích. Díky tomu bylo možné určit takové ztráty výměníku a použít tato data pro validaci hydraulických modelů. Snímače tlaku a teploty byly umístěny na společné armatuře (Obr. 6.7 a Obr. 6.8, oranžový snímač – teplota, protilehlý snímač – tlak). Snímače průtoku byly umístěny směrem dál od výměníku, aby tlaková ztráta snímačů nebyla započítána do tlakové ztráty výměníku. Snímače vnitřního okruhu byly tentokrát zapojeny ve větší blízkosti výměníku, čím se snížila chyba měřeného teplotního rozdílu (Obr. 6.8). Pro regulaci průtoku ve vnitřním okruhu byl na vratné větvi za snímači zapojen škrťací ventil. I zapojení vnějšího kruhu bylo upraveno. Místo zapojení bypassů na stojanu výměníku se hned za chiller zapojil jeden větší bypass, čímž se snížila tlaková ztráta celého okruhu a bylo tak možné dosáhnout vyšších průtoků (viz Obr. 6.9). I tak byl průtok moc malý na to, aby bylo dosaženo jiného než laminárního proudění, a tak pro studený okruh nebyl použit škrťací ventil, kterým by se dal regulovat průtok. Průtok ve studeném okruhu byl po celou dobu měření

konstantní. Teplota studeného proudu byla řízena chillerem HRSH090-AF-40-M od SMC, který je schopný udržovat teplotu média mezi 5 až 40 °C. [76] Teplota vnitřního okruhu se řídila chillerem HRS024_AF-20-T též od SMC, který taky dokáže regulovat teplotu mezi 5 a 40 °C. [77] Pro regulaci teploty v rozsahu 40–60 °C byla použita termoelektrická lázeň od SMC INR-244-757 a pro dopravu média pneumaticky poháněné čerpadlo SMC PA5010-F04. [78] [79]



Obr. 6.7 Zapojení snímačů (zepředu) – druhé měření



Obr. 6.8 Zapojení snímačů (zezadu) - druhé měření

Pro jednotlivé veličiny byly v tomto měření použity následující snímače: [80] [81] [75]

$T_{h,in}$ – IFM TA2105 ($\pm 0,5$ °C)
 $T_{h,out}$ – IFM TA2105 ($\pm 0,5$ °C)
 $T_{c,in}$ – IFM TA2105 ($\pm 0,5$ °C)
 $T_{c,out}$ – IFM TA2105 ($\pm 0,5$ °C)

$p_{h,in}$ – SMC ISE20C ($\pm 27,5$ kPa)
 $p_{h,out}$ – SMC ISE20C ($\pm 27,5$ kPa)
 $p_{c,in}$ – SMC ISE20C ($\pm 27,5$ kPa)
 $p_{c,out}$ – SMC ISE20C ($\pm 27,5$ kPa)
 \dot{V}_h – SMC PF3W704 ($\pm 0,105$ l/min)
 \dot{V}_c – SMC PF3W720 ($\pm 0,42$ l/min)



Obr. 6.9 Zapojení vnějšího (chladného) okruhu

6.2.2 Průběh měření

Po zapojení vodních okruhů byly spuštěny chillery a následně i zaznamenávací zařízení, která kontinuálně zaznamenávala hodnoty s frekvencí 0,5 Hz. Pro každé nastavení teplot byla provedena vždy tři měření. Chladný okruh byl udržován při konstantním průtoku a měnil se průtok teplého okruhu. Poté se změnila teplota některého z okruhů a opět se postupně nastavili tři různé průtoky. Tímto způsobem se pokračovalo, dokud nebyl proměřen rozsah 20-40 °C. Veškeré naměřené hodnoty z tohoto dne lze nalézt v souboru 2_Měření 26.3.2024.xlsm.

Bylo snahou změřit výměník ve dvou režimech, režim maximálního výkonu a režim nulových ztrát. Pro nastavení s maximálním výkonem byla teplota chladného okruhu zvolena teplota 5 °C. Dále, protože chladné médium proudilo ve vnější hadici, bylo snahou eliminovat ohřev od vnějšího prostředí. Proto další teplota chladného média byla zvolena 20 °C. To se ukázalo jako nedostatečné, a tak se měření ještě opakovalo pro teplotu 25 °C, která byla zvolena i pro pozdější měření jako režim nulových ztrát.

Druhý den se měřila sestava s termoelektrickou lázní. Zapojily se vodní okruhy a spustil se záznam hodnot. Teplý okruh se opět měřil při třech různých průtocích. Nejprve se měřilo při teplotě 60 °C a následně se teplota snížila na 50 °C. Chladné médium se měřilo opět při jednom průtoku a teplota se tentokrát nastavila na 5 a pak na 25 °C. Pokaždé při nastavení nejnižšího průtoku teplého média se průtok postupem času snižoval. Tato rychlost změny byla bohužel nezanedbatelná (asi 0,02 l/min²), a tak bylo potřeba škrtící ventil během měření průběžně otevírat. Nakonec se podařilo získat pár úseků s téměř neklesajícím průtokem. Toto chování se dvakrát v menší míře projevilo i u středního průtoku. Zaznamenané hodnoty v tomto dni jsou uvedeny v souboru 2_Měření 27.3.2024.xlsm.

6.2.3 Výsledky měření

Díky použití snímačů, na které je zaznamenávací zařízení naprogramováno, nebylo nutné naměřené hodnoty přepočítávat. Po porovnání rozdílů tepelných toků studeného a teplého média při měření s chillerem a při měření s termoelektrickou lázní se narazilo na zvláštní fakt. Při měření s termoelektrickou lázní v režimu maximálního výkonu, kdy studené médium ve vnějším okruhu má teplotu pouze 5 °C, se tepelné toky studeného a teplého média téměř rovnaly. To by nasvědčovalo skutečnosti, že chladný proud se prakticky neohřívá od okolního vzduchu. Přitom při měření s chillerem je jednoznačné, že se studený proud ohřívá i od okolního vzduchu. Teplota v místnosti se nijak dramaticky nezměnila (maximálně o jeden nebo dva stupně). Tuto skutečnost lze ale vysvětlit nepřesností použitých snímačů. Při velikosti variability veškerých veličin bylo možné dosáhnout stavu, kdy studený proud teplo z okolí přijímal, i stavu kdy studený proud teplo do okolí odevzdával. Jelikož byla teplota v místnosti okolo 21 °C a studené médium mělo teplotu zhruba 6 °C, lze s jistotou říci, že studené médium teplo z okolí přijímalo. Při měření s termoelektrickou lázní, tak musel některý ze snímačů měřit značně odlišné hodnoty od skutečných.

Tlaková ztráta na straně studeného média (v mezikruží) byla velmi vysoká, pohybovala se okolo hodnoty 5 bar. Chybu měřidla na vstupu lze vyloučit, neboť tlak změřený na vstupu do výměníku se téměř shodoval s tlakem na výstupu z chilleru. Výstup z výměníku vedl zpět do chilleru, který uchovává médium v uzavřené nádobě. Tlak na výstupu z výměníku tedy mohl být vyšší, než je tlak atmosférický, což znamená, že je možné, že tlakový snímač na výstupu z výměníku byl vadný, neboť při měření ukazoval hodnotu přetlaku okolo 0,28 bar. Dalším důvodem k tak vysoké tlakové ztrátě mohou být bloky na koncích výměníku, které rozvádí médium do vnitřní a vnější hadice. (Lze vidět například na Obr. 6.7.) Ty mohou mít úzké místo a škrtnit tím průtok. Naměřenou tlakovou ztrátu tedy nelze brát v úvahu kvůli těmto dvěma důvodům.

Výsledky měření obsahuje Příloha 1 a Příloha 2.

7 Porovnání výsledků matematického modelu s naměřenými daty

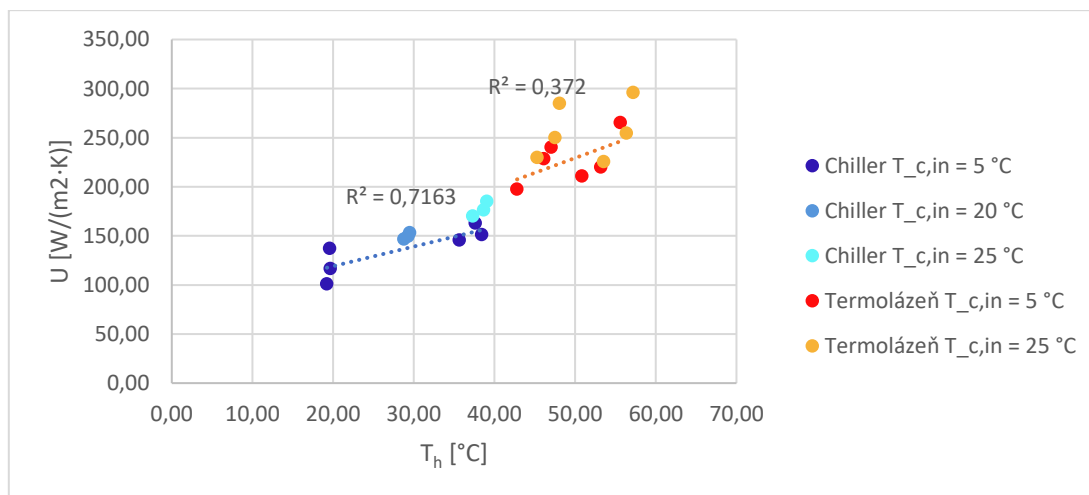
Nyní když jsou známa data z měření je potřeba ověřit platnost empirických rovnic z kapitoly 5. Tato kapitola ukáže, jak jednotlivé empirické rovnice odpovídají naměřeným hodnotám. Na základě tohoto porovnání se pak vyberou nejvhodnější rovnice pro matematický model.

7.1 Tepelný výpočet

Porovnávané empirické rovnice slouží k výpočtu Nusseltova čísla. Pomocí něj lze vypočítat součinitel přestupu tepla, a tedy i součinitel prostupu tepla. Celý problém lze tedy spočívat v tom, jak nejlépe odhadnout součinitel prostupu tepla ve studovaném výměníku.

Při analýze závislostí hodnot součinitele prostupu tepla byly odhaleny tyto závislosti:

- 1) Součinitel prostupu tepla není závislý na logaritmickém teplotním spádu ani na teplotním rozdílu jednotlivých proudů.
- 2) S rostoucím průtokem, a tedy s rostoucí rychlostí proudění, se zvyšuje součinitel prostupu tepla. To odpovídá teorii, že turbulentní proudění rozbíjí mezní vrstvu a umožňuje intenzivnější promíchání tekutiny. Proto je ve výměnících tepla tento typ proudění žádaný i když má vyšší tlakovou ztrátu.
- 3) Na Obr. 7.1 lze vidět, že s rostoucí teplotou horkého i studeného média roste i součinitel prostupu tepla U . Světlejší barvy odpovídají vyšší vstupní teplotě, a tedy i vyšší střední teplotě, studeného média. To lze vysvětlit tím, že s rostoucí teplotou vody klesá její viskozita, a tak se při stejné rychlosti proudění objevuje více turbulencí.



Obr. 7.1 Korelace součinitele prostupu tepla a střední teploty teplého média

Výměníky tepla se většinou vyrábí z dobře tepelně vodivých materiálů, ale v případě, kterým se zabývá této práce, je tomu naopak. Z analýzy odporů jednotlivých vrstev, které se podílejí na přenosu tepla, vyplývá, že odpor stěny hadice výrazně převyšuje odpory mezních vrstev. Podíl odporu stěny se pohybuje okolo 90 % (celou analýzu lze nalézt v souboru Porovnání vztahů.xlsm na listě Analýza prostupu tepla). To má za následek, že i když se vypočítají odpory mezních vrstev pomocí různých empirických rovnic, poměrné rozdíly jsou mezi nimi minimální. V důsledku tedy nemá volba empirické rovnice pro výpočet Nusseltova čísla

zásadní vliv na přesnost výpočtu prostupu tepla a naopak stěna bude mít velký vliv na výkon výměníku.

7.1.1 Přestup tepla na vnitřní straně trubky

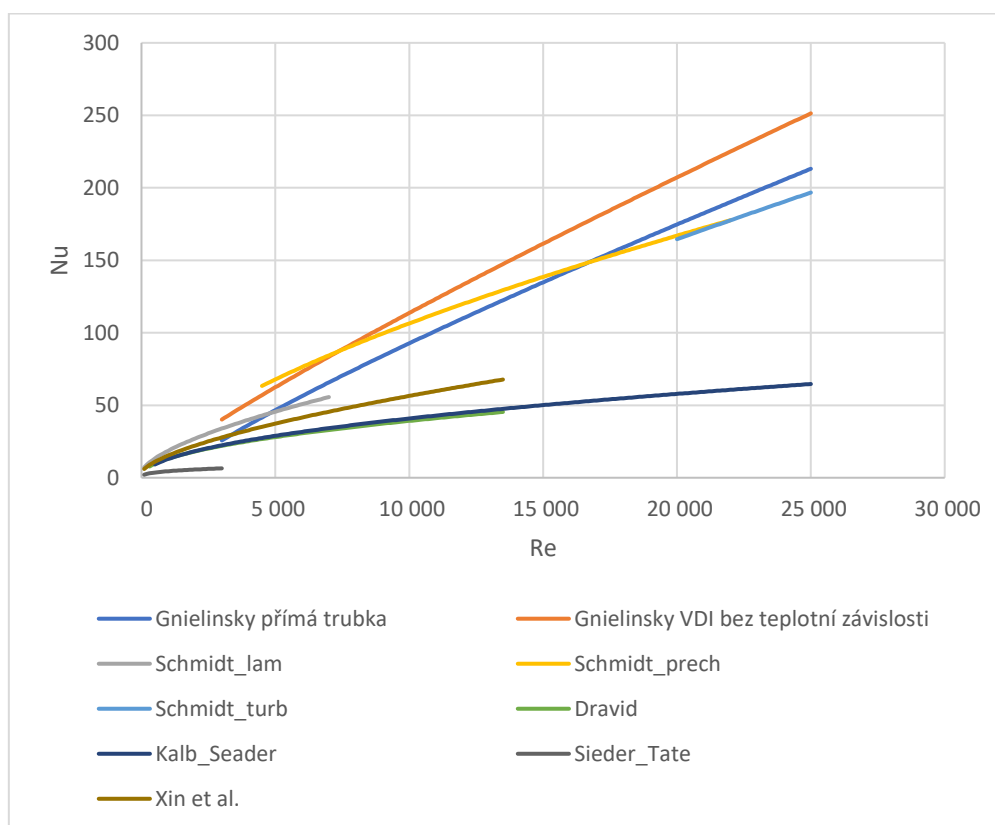
Na Obr. 7.2 je vidět, že jediná rovnice, která odpovídá předpokladu, že v zahnutých trubkách je přestup tepla vyšší než v rovných, je upravená Gnieliskiovo rovnice pro rovné trubky. Pro jednoduchost byla tato rovnice zvolena bez započítání rozdílné teploty mezní vrstvy. Zbytečně by to do výpočtu přidávalo další iterační smyčku a rozdíl na výsledném součinitele prostupu tepla je přitom zanedbatelný.

Ve výsledku, tak byly pro vnitřní stranu výměníku zvoleny následující vztahy, tak jak je uvádí Gnielinski v VDI [60]:

Laminární oblast – Schmidtova rovnice pro laminární proudění

Přechodová oblast – Lineárně interpolované hodnoty mezi Schmidtovou rovnicí při kritickém Reynoldsově čísle a Gnieliskiovo rovnicí při $Re = 22\ 000$

Turbulentní oblast – Gnieliskiovo rovnice pro turbulentní proudění v zahnutých trubkách



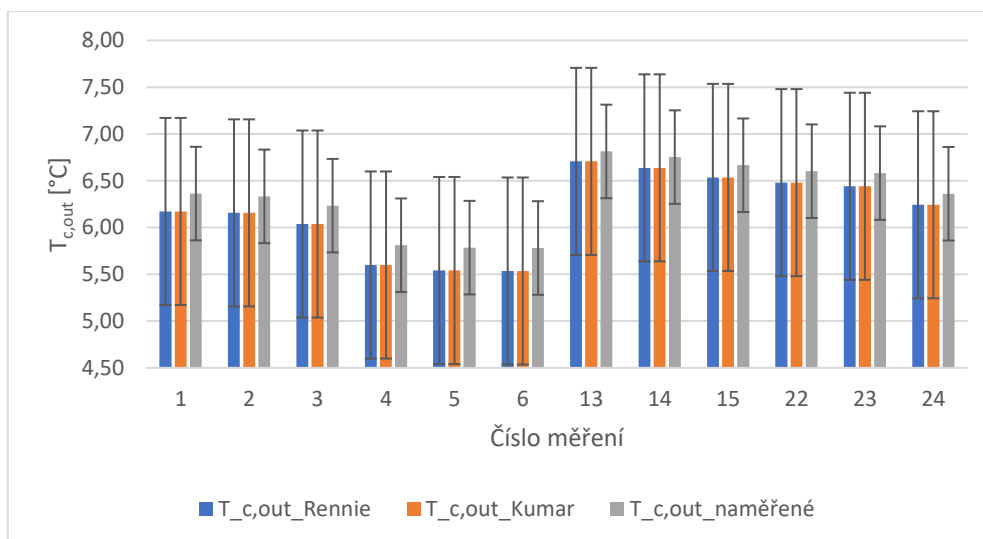
Obr. 7.2 Porovnání empirických rovnic pro zahnuté trubky

7.1.2 Přestup tepla na vnější straně trubky

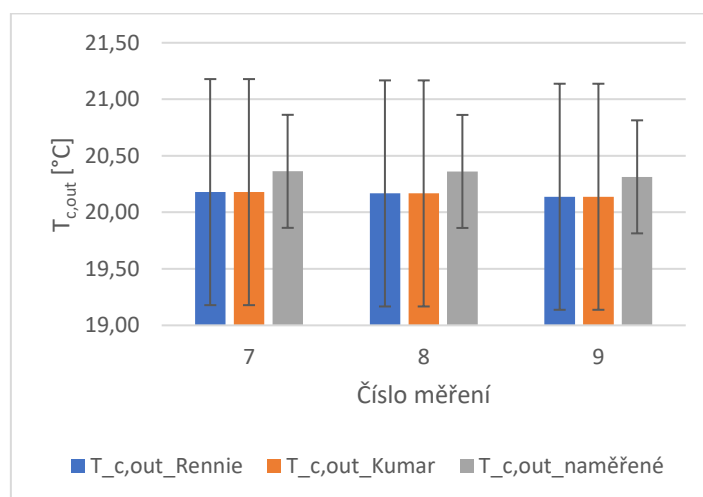
Pro určení součinitele přestupu tepla na vnější straně byly zkoumány dvě rovnice. Z každého měření se vzaly vstupní teploty a průtoky obou médií a odhadovala se výstupní teplota teplého média. Pro každé měření byla vypočítána výstupní teplota studeného média z kalorimetrické

rovnice a porovnána s naměřenými daty. Součinitele přestupu tepla na vnitřní straně se vypočítaly z rovnic zmíněných v předchozí kapitole.

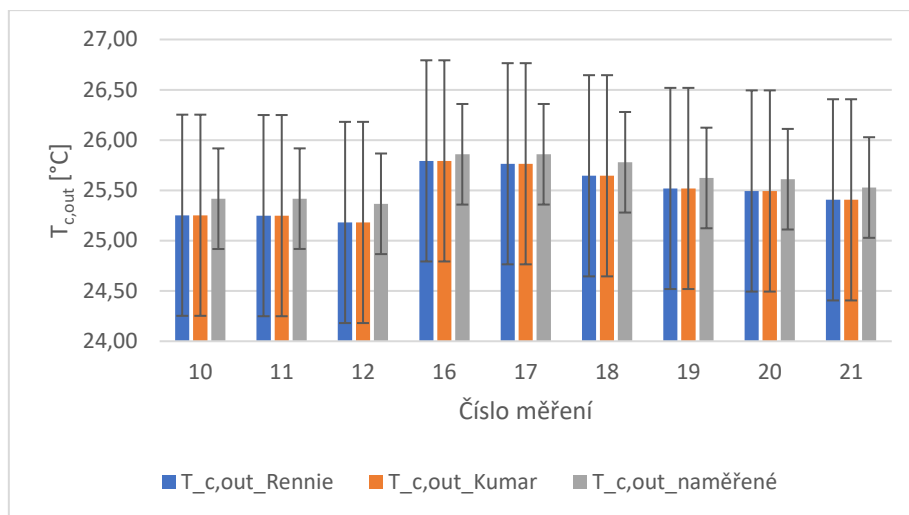
Jak lze vidět na Obr. 7.3, Obr. 7.4 a Obr. 7.5 obě rovnice nemají na výstupní teplotu (a tedy i součinitel přestupu tepla) prakticky žádný vliv. To je způsobeno již zmíněnou špatnou tepelnou vodivostí hadic. Dále si lze všimnout, že podle obou rovnic vychází výstupní teplota nižší, než byla naměřena. Což naznačuje, že součinitel přestupu tepla je ve zkoumané konstrukci vyšší než u koncentrické konstrukce, pro kterou byly vztahy navrhnuty. Bohužel kvůli nedostatečné přesnosti měření není možné toto potvrdit, neboť by se mohlo jednat pouze o chybu způsobenou snímači.



Obr. 7.3 Výstupní teploty pro $T_{c,in} = 5\text{ °C}$



Obr. 7.4 Výstupní teploty pro $T_{c,in} = 20\text{ °C}$

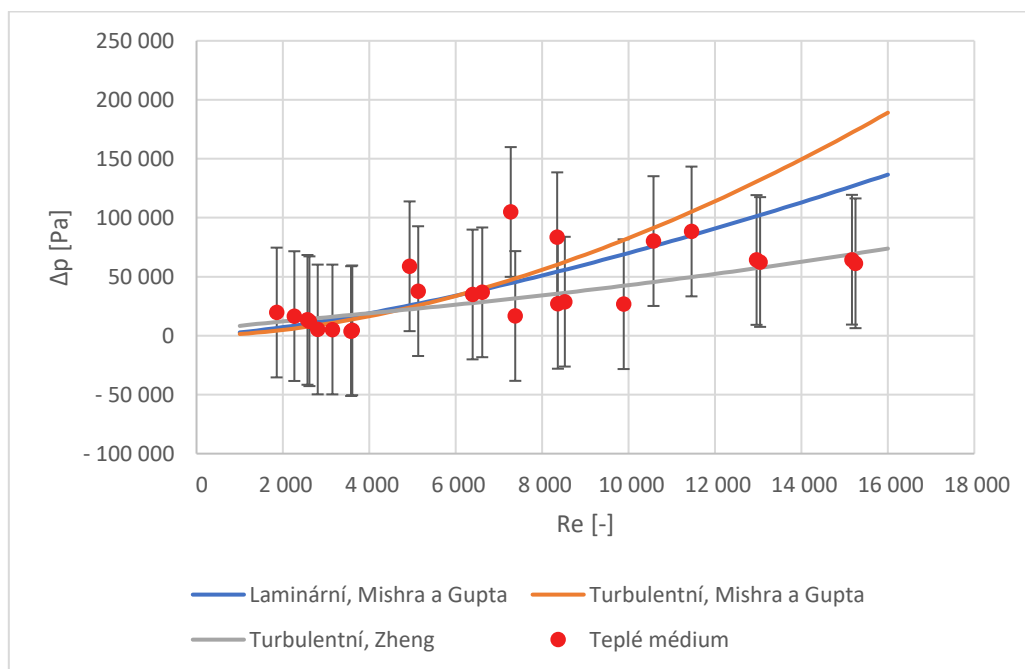


Obr. 7.5 Výstupní teploty pro $T_{c,in} = 25\text{ °C}$

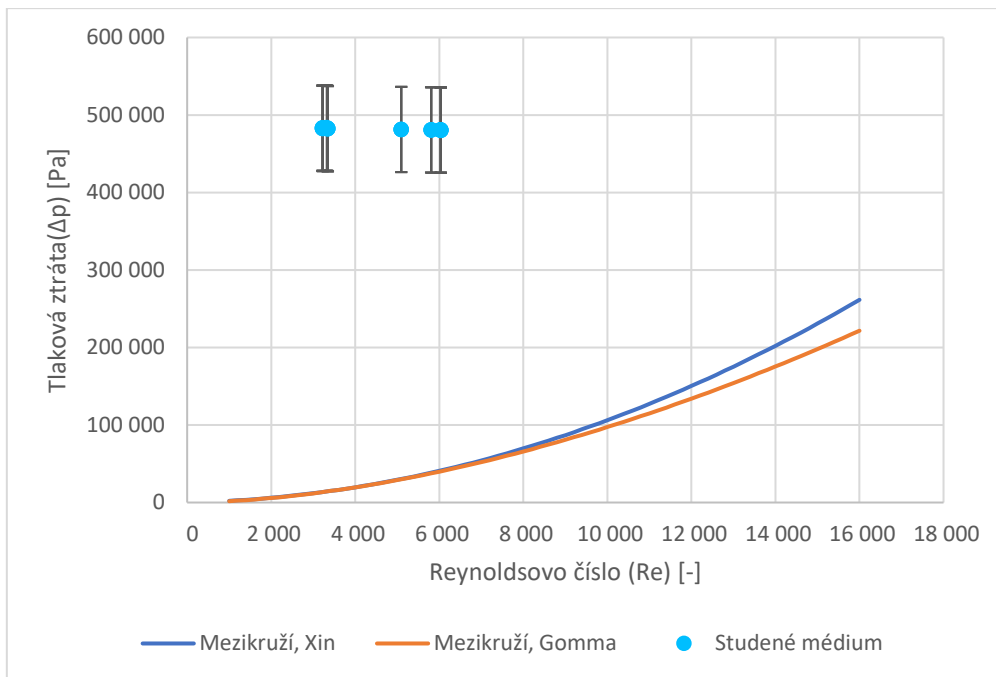
Z předchozích grafů vyplývá, že výsledky z Kumarova vztahu se pro jednotlivá měření zásadně neliší od výsledků z Rennieho rovnice. Při měření se Reynoldsova čísla pohybovala v rozsahu 3 000 až 6 000 a při provozu se očekává, že toto číslo bude ještě vyšší. Proto byla pro matematický model zvolena rovnice (24), kterou ve své práci uvedl Kumar. Tento vztah je použit pro všechny režimy proudění, i když je jeho platnost uváděna pouze v rozsahu Reynoldsových čísel 5 000 až 15 000.

7.2 Hydraulický výpočet

Pro výpočet tlakových ztrát bylo porovnáno několik vztahů uvedených v kapitole 5.3. Z Obr. 7.6 lze vidět, že rovnice pro zahnutou trubku aproximují chování výměníku poměrně přesně. Pro výpočtový model byl proto pro laminární proudění ve vnitřní trubce zvolen vztah (28) od Mishry a Gutpy pro laminární oblast a pro turbulentní proudění je použit vztah (32) od Zheng et al.



Obr. 7.6 Porovnání vztahů pro výpočet tlakových ztrát v trubce



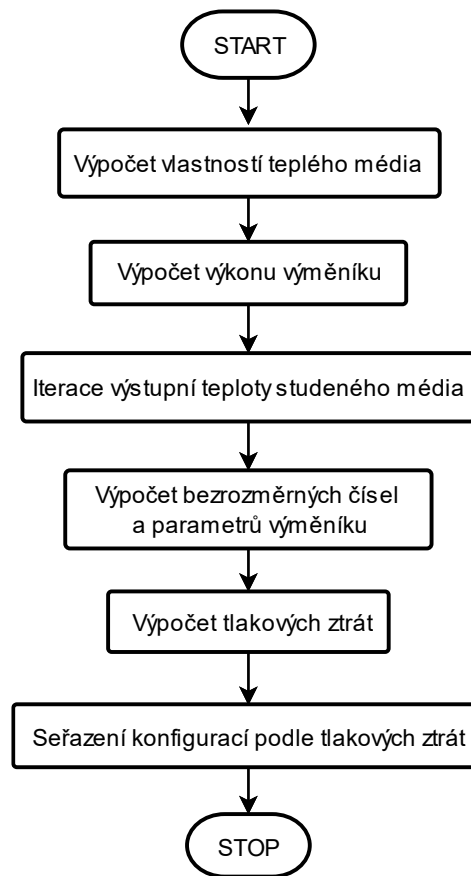
Obr. 7.7 Porovnání vztahů pro výpočet tlakových ztrát v mezikruží

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.2.3, pro mezikruží nelze použít naměřené tlakové ztráty. Na Obr. 7.7 lze vidět, jak naměřené tlakové ztráty silně převyšují hodnoty předpokládané oběma empirickými rovnicemi. Pro matematický model je použit vztah (33) od Xin et al., který je platný v širší oblasti Deanových čísel než vztah (34). Bude potřeba provést další měření pro ověření platnosti tohoto vztahu.

8 Návrhový algoritmus ve VBA (modelování ve VBA)

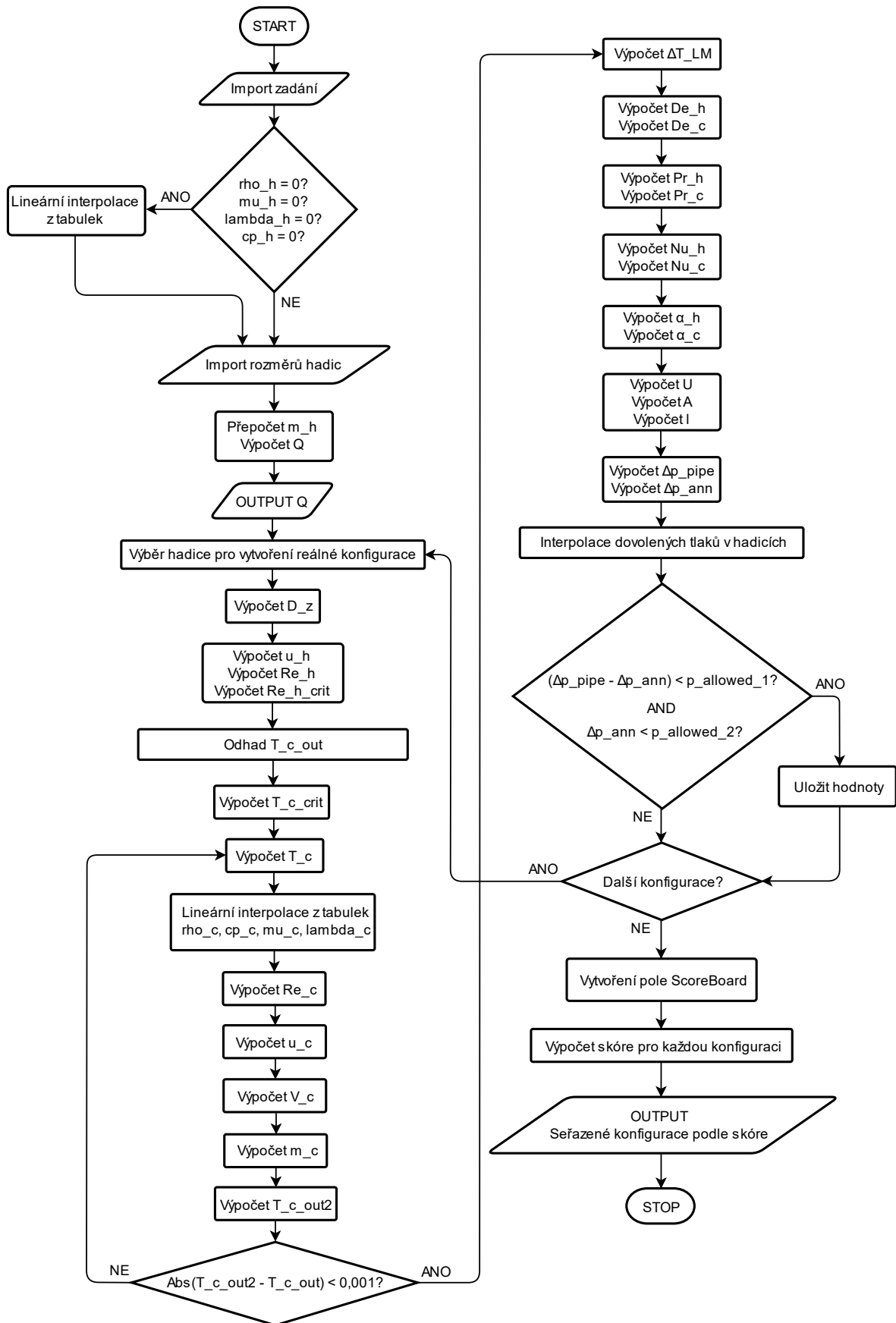
Pro snadné užívání matematického modelu byl vytvořen program napsaný v programovacím jazyce VBA, který se pohodlně ovládá v klasickém prostředí excelu. Tato kapitola ukazuje, jak kód funguje a zároveň je návodem, jak tento výpočtový nástroj používat.

Na Obr. 8.1 je stručně vyobrazeno fungování programu. Pro každou konfiguraci vypočítá program tepelné a hydraulické parametry a následně provede optimalizaci na základě minimalizace tlakových ztrát. Výsledky jsou pak prezentovány dvěma způsoby: velmi zjednodušeným výpisem (viz Obr. 8.3) a výpočtovým protokolem (viz Příloha 3). Výsledkem je nástroj pro návrh tepelného výměníku, který splňuje požadované tepelné výkony a zároveň minimalizuje nároky na čerpací výkon.



Obr. 8.1 Stručný vývojový diagram programu

8.1 Přehled fungování programu



Obr. 8.2 Vývojový diagram programu

Před spuštěním kódu je nutné zadat potřebné údaje na listě Parametry. Následně je možné kód spustit tlačítkem SPOČÍTAT. Nejprve je přečteno zadání. To se převede na základní jednotky a uloží do příslušných proměnných. Následně program zkontroluje, zda byly zadány vlastnosti teplého média. Pokud ne, program tyto hodnoty za pomoci tabelovaných hodnot vody lineárně interpoluje na základě střední teploty. Poté se načtou rozměry hadic, vypočítá se hmotnostní tok teplého média a výkon výměníku. Výkon výměníku se zapíše na první list. Následuje smyčka, ve které se pro každou možnou konfiguraci vypočítají veškeré parametry. Nejdůležitější z těchto parametrů jsou: Reynoldsovo a kritické Reynoldsovo číslo, výstupní teplota média, logaritmický teplotní rozdíl, Deanovo číslo, Prandtlovo číslo, Nusseltovo číslo, součinitel prostupu tepla, délka výměníku a tlakové ztráty v obou částech výměníku. Nakonec se ve smyčce zkontroluje, zda tlakové ztráty nepřekročili maximální dovolený tlak v hadici a pokud ne, tak jsou důležité hodnoty uloženy do pole a pokračuje se další konfigurací. Po propočítání všech konfigurací program ohodnotí jednotlivé možnosti podle tlakových ztrát, seřadí je a vypíše je na samostatný list Všechny možnosti. První možnost z toho seznamu se pak pro pohodlnost automaticky kopíruje na první list Parametry.

8.2 Uživatelské prostředí

Na Obr. 8.3 je vidět, jak vypadá uživatelské prostředí programu. Je poměrně jednoduché. Rozděleno je do dvou částí, zadání a výsledky. Dole se pak nachází tlačítko pro spuštění výpočtu.

Návrh šroubovicového koaxiálního výměníku

Zadání			
Parametry teplého média			
Teplota na vstupu do výměníku	60 °C	Průtok	1 l/min
Teplota na výstupu z výměníku	50 °C		
Průměrná teplota	55 °C		
Hustota při průměrné teplotě	kg/m ³	Tabelovaná vlastnost vody se vypočítá pokud je pole prázdné nebo je v něm číslo 0	
Měrná tepelná kapacita při průměrné teplotě	J/(kg·K)		
Dynamická viskozita při průměrné teplotě	Pa·s		
Tepelná vodivost při průměrné teplotě	W/(m·K)		
Parametry studeného média			
Teplota na vstupu do výměníku	7 °C	Multiplikátor kritického Reynoldsova čísla	0,3 -
Parametry výměníku			
Průměr zakřivení	180 mm	Tepelná vodivost materiálu	0,22 W/(m·K)

Výsledky			
Vnitřní průměr menší hadice	10,000 mm	Délka výměníku	2,220 m
Vnější průměr menší hadice	12,000 mm	Výkon výměníku	686,8 W
Vnitřní průměr větší hadice	22,225 mm	Teplota studeného média na výstupu	8,88 °C
Vnější průměr větší hadice	25,400 mm	Potřebný průtok studeného média	5,22 l/min

Je potřeba zkontrolovat tlaky na vstupech do výměníku. Ty jsou závislé na charakteristikách čerpadel.

Program pouze kontroluje, zda jsou tlakové ztráty nižší než dovolený relativní tlak hadic uváděný SMC.

SPOČÍTAT

Obr. 8.3 Uživatelské rozhraní programu

Proto aby bylo zadání plně specifikované, je potřeba zadat několik hodnot. Zprvce to jsou parametry teplého média, vstupní a výstupní teplota, vlastnosti při střední teplotě a průtok. Pokud je jako teplé médium použita voda (nebo látka s podobnými vlastnostmi), není potřeba zadávat vlastnosti látky, neboť se vypočítají z tabelovaných hodnot. Zadruhé je potřeba zadat vstupní teplotu a požadovaný typ proudění studeného média. Typ proudění má vliv na tlakové ztráty, ale i na potřebnou velikost výměníku. Zatřetí je nutné specifikovat průměr zakřivení a tepelnou vodivost materiálu výměníku. Při malém stoupání je možno považovat průměr vinutí

za průměr zakřivení. V opačném případě už dochází k velké odchylce a je nutné průměr zakřivení vypočítat z rovnice (10).

Po spuštění kódu tlačítkem SPOČÍTAT provede program výpočet a zobrazí parametry nejlepší konfigurace v rámečku Výsledky. Je nutné podotknout, že konfigurace jsou hodnoceny pouze podle tlakové ztráty, a i pevnostní kontrola je provedena pouze na základě těchto ztrát. Je proto nutné při návrhu zkontrolovat skutečné tlaky na vstupu do výměníku, které jsou závislé na zvoleném čerpadle.

8.3 Detailní popis programu

V této kapitole je rozebrán kód programu pro návrh rozměrů výměníku. Detailní popis jednotlivých částí kódu je představen v samostatných podkapitolách, které jsou řazeny tak, aby odpovídaly struktuře samotného kódu.

Inicializace programu

Po spuštění kódu se nastaví indexování od 1 namísto od 0, definuje se nový typ proměnné „Tube“ a také se definuje vektor „Tubes“. Proměnná „Tube“ slouží pro ukládání rozměrů hadic. Obsahuje dva parametry In pro vnitřní průměr a Out pro vnější průměr hadice. Vektor „Tubes“ pak v sobě ukládá parametry všech hadic.

Následně se definují lokální proměnné pro ukládání vstupních dat, mezivýsledků a finálních parametrů výměníku. Zároveň se deklarují některé zkratky pro usnadnění programování.

Načtení zadání

Program načte zadané parametry z uživatelského rozhraní a převede je do základních jednotek.

Výpočet vlastností teplé vody

V této fázi program zkontroluje, zda se střední teplota teplého média nachází v rozsahu 0,01 – 100 °C. Pokud tomu tak není, zobrazí chybové hlášení a ukončí se. Pokud je střední teplota v reálném rozsahu interpolují se lineárně vlastnosti vody z tabulek. Tyto vlastnosti zahrnují hustotu, viskozitu, měrnou tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost.

Načtení parametrů hadic

Program načte vnitřní a vnější průměry hadic, které jsou uloženy na listu „Parametry hadic“ a uloží je do vektoru „Tubes“. V tomto vektoru jsou uloženy jak metrické, tak i palcové hadice. Vzhledem k tomu, že se nejdříve čtou rozměry metrických hadic, tak prvních 6 hadic v tomto vektoru je metrických a zbylé jsou palcové.

Výpočet hmotnostního a tepelného toku teplého média

Hmotnostní tok teplého média se vypočítá na základě zadaného objemového průtoku a hustoty teplé vody. Následně se zkontroluje, zda výstupní teplota teplého proudu je vyšší než vstupní teplota. Pokud ne, zobrazí program chybové hlášení a ukončí se. Tepelný tok se pak vypočítá jako součin hmotnostního toku, měrné tepelné kapacity a teplotního rozdílu mezi vstupem a výstupem teplého média. Jelikož se při výpočtu počítá s ideálním výměníkem, tak jsou ztráty do okolí nulové a tento tepelný tok je rovný výkonu výměníku. Jelikož je výkon pro všechny konfigurace stejný, zapíše rovnou do výsledků na prvním listě.

Vytvoření reálných konfigurací

Touto fází začíná velká smyčka, ve které se pro každou možnou konfiguraci vypočítají veškeré parametry. Program generuje kombinace hadic z vektoru „Tubes“ a kontroluje každou konfiguraci na minimální mezeru mezi trubkami, aby se zajistila dostatečná cirkulace tekutin. Pokud rozměry vyhovují podmínce, zapíše se do dočasných proměnných pro další výpočty. Tyto dočasné proměnné se přepíše novými rozměry hadic při každém opakování smyčky. Následně se vypočítá hydraulický průměr pro mezikruží.

Výpočet Reynoldsova čísla pro teplé médium

Nyní se určí rychlost proudění teplé látky a vypočítá se Reynoldsovo číslo pro na základě jeho rychlosti v hadici, hustoty, viskozity a vnitřního průměru hadice. Taktéž se určí hodnota kritického Reynoldsova čísla pro toto médium.

Iterace výstupní teploty studeného média

Tato podkapitola je poněkud delší, protože zahrnuje několik dílčích kroků. Iterace výstupní teploty studeného média je nezbytná, neboť se vlastnosti studeného média mění v závislosti na jeho teplotě. Nelze tedy určit teplotu bez znalosti vlastností, a naopak vlastnosti nelze určit bez znalosti teploty. Přibližného výsledku lze dosáhnout odhadem, který se s každou iterací zpřesňuje.

Nejprve je odhadnuta stará výstupní teplota (v této iteraci značena T_{c_out} , mimo iteraci je T_{c_out} značena obyčejná výstupní teplota studeného média) a vypočítáno kritické Reynoldsovo číslo pro studený proud. Nová výstupní teplota (T_{c_out2}) je nastavena na stejnou hodnotu jako odhad. Následuje iterační smyčka, která se opakuje, dokud není rozdíl nové a staré výstupní teploty menší než $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Princip iterace:

1. **Přepsání staré výstupní teploty** – Hodnota staré teploty se nyní rovná nové teplotě z předešlého cyklu. Při prvním cyklu se nic nemění. Je vypočítána střední teplota studeného média.
2. **Výpočet vlastností studeného média** – Tak jako u teplého média, program opět zkontroluje, zda se střední teplota studeného média nachází v rozsahu $0,01 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud tomu tak není, zobrazí chybové hlášení a ukončí se. Na základě průměrné teploty studeného média se lineárně interpolují vlastnosti studeného média, jako je hustota, viskozita, měrná tepelná kapacita a tepelné vodivost.
3. **Výpočet Reynoldsova čísla studeného proudu** – Pomocí zadané hodnoty multiplikátoru se vypočítá Reynoldsovo číslo studeného média. Toho se dosáhne prostým násobením čísla multiplikátoru a kritického Reynoldsova čísla.
4. **Výpočet rychlosti proudění, objemového a hmotnostního toku studeného média** – Ze zadaných a dopočítaných hodnot se postupně vypočítá: rychlost proudění, objemový tok a hmotnostní tok.
5. **Výpočet nové výstupní teploty studeného média** – Nová výstupní teplota se určí z kalorimetrické rovnice (2).
6. **Kontrola konvergence** – Pokud se nová výstupní teplota studeného média liší od staré hodnoty více než $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$, celý proces iterace se opakuje. V opačném případě iterace končí a hodnota nové teploty (T_{c_out2}) je uložena do proměnné T_{c_out} .

Výpočet logaritmického teplotního spádu, podobnostních čísel, součinitele prostupu, plochy a délky výměníku

Na základě vstupních a vypočítaných parametrů se provede následující:

- Výpočet logaritmického teplotního spádu (LMTD) – Program vypočítá LMTD. Pokud je výraz pro logaritmus záporný, program zobrazí chybová hlášení a ukončí se.
- Výpočet Deanova čísla pro oba proudy
- Výpočet Prandtlova čísla pro oba proudy
- Výpočet Nusseltova čísla pro oba proudy podle typu proudění
- Výpočet součinitele přestupu tepla pro oba proudy
- Výpočet součinitele prostupu tepla
- Výpočet plochy výměníku
- Výpočet délky výměníku

Výpočet tlakových ztrát ve výměníku

Pro každou konfiguraci výměníku se vypočítají tlakové ztráty pro oba proudy. Výpočet zohledňuje typ proudění (laminární nebo turbulentní) při výpočtu součinitel tření u teplého média. U studeného média, které proudí v mezikruží, je použit vztah platný pro všechny typy proudění.

Výpočet dovolených tlaků hadic

V tomto kroku se lineárně interpolují dovolené tlaky hadic z tabulek. Pokud je střední teplota média menší než 20 °C, program počítá s pevností, jakou má hadice při 20 °C. Pro vyšší teploty jsou již k dispozici tabelované hodnoty.

Uložení výsledků do vektoru Parameter

Pro každou prozkoumanou konfiguraci výměníku se tlakové ztráty porovnají s dovolenými tlaky hadic. Pokud je tlaková ztráta nižší než dovolený tlak, uloží se výsledky do vektoru Parameter.

Výběr optimální konfigurace

Optimální konfiguraci je potřeba vybrat na základě nějakého kritéria. Pro tento účel byl zvolen skórovací systém. Pro každou konfiguraci je vypočítáno skóre, pomocí kterého se následně rozhodne, která z konfigurací je optimální. Volba kritéria hraje zásadní roli při tomto rozhodování. Autor této práce se rozhodl hodnotit konfigurace na základě tlakových ztrát v obou částech výměníku.

Pro hodnocení ve vytvoří pole ScoreBoard se všemi tlakovými spády. Toto pole se následně seřadí od nejvyšší hodnoty po nejnižší. Dále se také vytvoří pole Scores, kde budou uložena hodnocení jednotlivých konfigurací a jejich umístění (číslo sloupce) v poli Parameter. Jako hodnotící funkce byl zvolen převrácený součet tlakových spádů vynásobený součtem pořadí tlakových spádů ve vektoru ScoreBoard. Tím se dává priorita konfiguracím s celkově nižšími tlakovými ztrátami, ale zároveň se bere ohled i na konfigurace, kde jsou obě tlakové ztráty (pro teplé a studené médium) relativně nízké. Jednotlivé konfigurace jsou pak podle hodnocení seřazeny sestupně pomocí algoritmu Bubble sort.

Nakonec jsou všechny seřazené konfigurace vypsány na list Všechny možnosti a na listu Výpočtový protokol se nalézá protokol výpočtu, u kterého je možné zadat číslo konfigurace, pro kterou zobrazí hodnoty.

9 Závěr

Jako nejnáročnější proces z pohledu používaných médií byla zvolena výroba polovodičů. Při výrobě se používají nejen velice silné kyseliny a zásady, ale je zde také dbáno na vysokou čistotu. Pro chlazení takto agresivních látek byl z dostupných technologií nakonec zvolen nejjednodušší typ a sice koaxiální výměník. Z materiálů se pak jako optimální volbou jeví fluoropolymer PFA, který je velice chemicky odolný a lze jej jednoduše zpracovávat vstřikováním. Tato kombinace konstrukce a materiálu výměníku nejlépe vyhovuje, neboť SMC již prodává tyto PFA hadice pro přepravu tekutin. Firma si tak rozšíří své portfolio aplikací, pro které je schopna zařídit kontrolu teploty medií bez žádných dalších investic na vývoj a nové výrobní stroje.

Součástí práce je i výpočtový program pro návrh koaxiálního hadicového výměníku ve VBA. Ten provádí tepelný výpočet, hydraulický výpočet a tlakovou kontrolu, čím usnadňuje a značně zrychluje návrh výměníku. Výstupem je výpočtový protokol, který uvádí parametry medií a geometrii navrženého výměníku.

Matematický model používaný programem byl ověřen pomocí naměřených hodnot na skutečném výměníku, který SMC poskytlo pro účely této práce. Bohužel byla měřena pouze jedna konfigurace, a proto nelze s jistotou říci, že uvedený matematický model bude odpovídat jiným geometriím. Na práci by se tedy dalo navázat hledáním vhodných empirických vztahů pro výpočet Nusseltova čísla v mezikruží a koeficientu tření pro výpočet tlakových ztrát.

Tato práce, díky své teoretické části, poskytuje základ pro další rozhodování firmy v případě požadavku na rozvoj v této oblasti. V průběhu psaní se také ukázalo, že volba materiálu je velice rozsáhlý problém. Na práci by se tedy dalo také navázat hledáním a testováním vhodného materiálu, respektive vhodného plniva PFA a popisem dějů uplatňujících se při kontaktu materiálu s chemikálií. PFA plněné grafitem má nižší chemickou odolnost, takže by bylo nutné vyrobit například dvouvrstvou hadici, aby nedocházelo k narušování teplosměnných stěn a znečišťování chlazeného média. V případě že by se vyráběla hadice na míru, bylo by vhodné ji vyrobit s tenčí stěnou.

Bibliografie

- [1] HONG, Xiao. *Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology (2nd Edition)*. online. 2. vydání. SPIE, 2012. ISBN 978-0-8194-9092-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpISTE0002/introduction-semiconductor/introduction-semiconductor>. [cit. 2024-01-05].
- [2] JAEGER, Richard C. *Introduction to microelectronic fabrication*. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. ISBN 0-201-44494-1.
- [3] OECD, . *Photoresist Use in Semiconductor Manufacturing, Series on Emission Scenario Documents*. online. 9. vydání. Paris: OECD Publishing, 2014. ISBN 9789264221161. Dostupné z: <https://doi.org/10.1787/9789264221161-en>. [cit. 2023-11-05].
- [4] *PFA coated aluminium / SS 316 shell & tube heat exchanger*. online. In: Rotolining. Ankleshwar: Sigma Roto Lining LLP, 2021. Dostupné z: <https://liningcoating.com/pfa-coated-shell-and-tube-heat-exchanger.html>. [cit. 2023-06-01].
- [5] *Heat exchanger manufacturer*. online. In: MERSEN. Courbevoie, France: MERSEN CORPORATE SERVICES SAS, 2023. Dostupné z: <https://www.mersen.com/products/anticorrosion-equipment/heat-exchanger-manufacturer>. [cit. 2023-05-18].
- [6] *Kovové deskové výměníky tepla*. online. In: HENNLICH s.r.o. Litoměřice, 2023. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/meres/kovove-deskove-vymeniky-tepla>. [cit. 2023-05-28].
- [7] Heat Exchanger SYNOTHERM. online. In: *Mazurczak Heat Exchanger SYNOTHERM*. Schwabach: Mazurczak, 2020. Dostupné z: <https://www.synotherm.de/wp-content/uploads/mazurczak-info-550P23EN01-heat-exchanger.pdf>. [cit. 2023-05-28].
- [8] Fluoropolymer Heat Exchanger Immersion Series - Tubing Coil Type: Junkosha Heat Exchanger. online. In: *Junkosha*. 2020. Dostupné z: <https://www.junkosha.com/storage/2023/02/d2c410620d18aa22cfdc1b53c0a72a542f52197f.jpg>. [cit. 2023-06-01].
- [9] *Spirálové polymerové výměníky tepla*. online. In: HENNLICH s.r.o. Litoměřice, 2023. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/meres/spiralove-polymerove-vymeniky-tepla>. [cit. 2023-05-28].
- [10] Fluoropolymer Heat Exchanger Immersion Series - Bundled Type: Junkosha Heat Exchanger. online. In: *Junkosha*. 2020. Dostupné z: <https://www.junkosha.com/en/products/ACH-01>. [cit. 2023-06-12].
- [11] *Jacked Vessels: What You Need to Know*. online. In: American Alloy Fabricators, Inc. Norristown, 2023. Dostupné z: <https://americanalloyfab.com/blog/jacketed-vessels-what-you-need-to-know>. [cit. 2023-05-28].
- [12] Stainless Tank. online. In: *Euro Best Technology*. 2019. Dostupné z: <https://www.eurobest.co.th/knowledge/stainless-tank/>. [cit. 2024-05-21].

- [13] Vertical Tank Jackets. online. In: *Thermal Plate Heat Exchnagers*. 2024. Dostupné z: <https://thermaplate.com/integral-tank-jackets>. [cit. 2024-05-21].
- [14] Final half coil vessel. online. In: *Wikimedia Commons*. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Final_half_coil_vessel.JPG. [cit. 2023-05-30]. Dostupný pod licencií creative commons.
- [15] Fluoropolymer heat exchangers. online. In: *McRae Engineering*. Newark: AMETEK, Inc. Dostupné z: <https://www.mcraeeng.com/files/ametek-fluoropolymer.pdf>. [cit. 2023-06-01].
- [16] Thermo-XTM High Standard Shell and Tube Heat Exchangers. online. In: *ElringKlinger Engineered Plastics*. Bietigheim-Bissingen: ElringKlinger Kunststofftechnik GmbH. Dostupné z: https://www.elringklinger-engineered-plastics.com/fileadmin/user_upload/ekkt/landingpages/produkte-branchen/thermo-x/Thermo-X_11_ro_.png. [cit. 2023-05-28].
- [17] *Plate Heat Exchangers*. online. In: CRP UK. Littleborough: Corrosion Resistant Products Ltd. Dostupné z: <https://www.crp.co.uk/products/plate-heat-exchangers>. [cit. 2023-05-28].
- [18] SGL - Plate Heat Exchanger. online. In: *CRP UK*. Littleborough: Corrosion Resistant Products Ltd. Dostupné z: <https://www.crp.co.uk/wp-content/uploads/2021/10/SGL-Plate-Heat-Exchanger.png>. [cit. 2023-05-28].
- [19] Rohrwärmetauscher SiC. online. In: *DirectIndustry*. Dostupné z: https://img.directindustry.de/images_di/photo-g/29122-4247753.jpg. [cit. 2023-05-31].
- [20] *Coaxial Heat Exchanger*. online. In: Hangzhou Shenshi Energy Conservation Technology. 2024. Dostupné z: <http://www.coaxial-coils.com/oid1736709/Coaxial-Heat-Exchanger.htm>. [cit. 2024-02-19].
- [21] INYANG, U. E. a UWA, I. J. Heat Transfer in Helical Coil Heat Exchanger. online. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2022, roč. 12, s. 26-39. ISSN 2160-0406. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/aces.2022.121003>. [cit. 2024-02-26].
- [22] Coaxial refrigeration coils. online. In: *Westermeyer Industries*. 2022. Dostupné z: <https://i0.wp.com/westermeyerind.com/wp-content/uploads/2020/07/CoaxialCoils.png?w=1175&ssl=1>. [cit. 2024-02-19].
- [23] HZSS's Double Wall Condenser Coil Coaxial Heat Exchanger. online. In: *Hangzhou Coowor Network Technology*. Dostupné z: https://sc01.alicdn.com/kf/HTB13X_Xy.R1BeNjy0Fmq6z0wVXak/212087/HTB13X_Xy.R1BeNjy0Fmq6z0wVXak.jpg. [cit. 2024-02-19].
- [24] Immersion Heat Exchanger Coils for Corrosive/Ultrapure Chemicals - Choosing the Right Strategy. online. In: *Fluorotherm*. Parsippany, 2023. Dostupné z: <https://www.fluorotherm.com/wp-content/uploads/2018/02/1-White-Paper-Immersion-Heat-Exchangers.pdf>. [cit. 2023-06-01].
- [25] Silicon carbide. online. In: *Encyclopedia Britannica*. 2022. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/silicon-carbide>. [cit. 2023-05-28].

- [26] HYUN-SIK, Kim a YOUNG-WOOK, Kim. Thermal conductivity of liquid-phase sintered silicon carbide ceramics: A review. online. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023, roč. 43, č. 9, s. 3855-3874. ISSN 0955-2219. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.03.014>. [cit. 2023-05-28].
- [27] *Graphite vs. silicon carbide SiC heat exchangers: Criteria for proper selection*. online. In: SCAMBIO TERMICO: for Heat Transfer Specialists. 2016. Dostupné z: <http://heatexchan.blogspot.com/2016/02/graphite-vs-silicon-carbide-sic-heat.html>. [cit. 2023-05-28].
- [28] *SiC Ceramic Heat Exchangers*. online. In: CGThermal. Twinsburg, 2021. Dostupné z: <https://cgthermal.com/heat-exchangers/sic-ceramic>. [cit. 2023-06-01].
- [29] Carbon. online. In: *Encyclopedia Britannica*. 2023. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element>. [cit. 2023-05-28].
- [30] PIERSON, Hugh O. *Handbook of carbon, graphite, diamond, and fullerenes: properties, processing, and applications*. William Andrew, 2000. ISBN 9780815513391.
- [31] Impervious graphite properties. online. In: *GAB Neumann*. Maulburg. Dostupné z: <https://www.gab-neumann.com/Impervious-graphite-Properties>. [cit. 2023-05-28].
- [32] MCELIGOT, Donald; SWANK, W.; COTTLE, David a VALENTINE, Francisco. Thermal Properties of G-348 Graphite. online. In: *U.S. Department of Energy: Office of Scientific and Technical Information*. Idaho Falls, 2016. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1330693>. [cit. 2023-05-28].
- [33] *Graphite Heat Exchangers*. online. In: CGThermal. Twinsburg, 2021. Dostupné z: <https://cgthermal.com/heat-exchangers/graphite>. [cit. 2023-06-01].
- [34] *Fluoropolymers*. online. In: Daikin Global. Ōsaka: DAIKIN INDUSTRIES, Ltd., 2023. Dostupné z: <https://www.daikinchemicals.com/solutions/products/fluoropolymers.html>. [cit. 2023-05-28].
- [35] Introduction to Fluoropolymers. online. In: KUTZ, Myer. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*. 1st edition. Elsevier, 2011, s. 49-60. ISBN 978-1-4377-3514-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10004-2>. [cit. 2024-02-14].
- [36] *PTFE vs PFA*. online. In: Fluorocarbon: PTFE & Fluoropolymer Processor & Supplier. Hertford, 2023. Dostupné z: <https://fluorocarbon.co.uk/news-and-events/post/58/ptfe-vs-pfa>. [cit. 2023-06-01].
- [37] 3M DEUTSCHLAND, . Bouncy PTFE - 3M™ Dyneon™ PTFE schmilzt nicht, sondern springt! (English). online. In: *Youtube*. 2013. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=sUKUyoiv8ag>. [cit. 2023-06-26].
- [38] DROBNY, J. a EBNESAJJAD, S. *Technology of Fluoropolymers: A Concise Handbook*. online. 3. vydání. CRC Press, 2023. ISBN 978-1-003-20427-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781003204275>. [cit. 2024-01-06].
- [39] BAL SEAL ENGINEERING, . Chemical Compatibility Guide: Bal Seal® PTFE, Filled PTFE and Polyethylene Seal Materials. online. Dostupné z:

- https://www.balseal.com/wp-content/uploads/2019/03/bal_seal_chemical_compatibility_guideTR_60A.pdf. [cit. 2023-06-21].
- [40] STRASSER, Claire a SCHMÖLZER, Stefan. Complete Thermal Characterization of PTFE: The Combination of DSC, DMA and Rotational Rheometry. online. Dostupné z: https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/8/2/0/b/820bf1c7b7ff9e481461a524ba2210b8e754321a/AN%20246_Complete%20Thermal%20Characterization%20of%20PTFE.pdf. [cit. 2023-06-27].
- [41] *Materials: PTFE, FEP, PEEK, PFA & More*. online. In: Zeus Company Inc. Orangeburg, 2023. Dostupné z: <https://www.zeusinc.com/materials>. [cit. 2023-06-22].
- [42] *The benefits and applications of PFA*. online. In: Fluorocarbon: PTFE & Fluoropolymer Processor & Supplier. Hertford, 2023. Dostupné z: <https://fluorocarbon.co.uk/news-and-events/post/75/the-benefits-and-applications-of-pfa>. [cit. 2023-06-01].
- [43] *What is perfluoroalkoxy polymer? (PFA)*. online. In: Fluorocarbon: PTFE & Fluoropolymer Processor & Supplier. Hertford, 2023. Dostupné z: <https://fluorocarbon.co.uk/news-and-events/post/15/what-is-perfluoroalkoxy-polymer-pfa>. [cit. 2023-06-01].
- [44] DAIKIN INDUSTRIES, . Fluoropolymer: NEOFLON PFA AP-230SH. online. Dostupné z: https://www.daikinchemicals.com/library/pb_common/pdf/tds/Fluoropolymers/NEOFLON_PFA/tds-ap-230sh-E_ver02_May_2019.pdf. [cit. 2023-06-27].
- [45] DUPONT, . Properties Handbook: DuPont Teflon® PFA - fluoropolymer resins. online. Dostupné z: https://www.extremecoatingsolutions.com/wp-content/uploads/2021/06/Teflon_PFA_Handbook.pdf. [cit. 2023-06-21].
- [46] AGC, . Fluon PFA: Technical Brochure, TECH ENG. online. Dostupné z: <https://www.agcce.com/brochurespdfs/sales/PFAMarch2016.pdf>. [cit. 2023-06-22].
- [47] Neoflon PFA AP-231SH. online. In: *Daikin Global*. Ōsaka: Daikin Industries, Ltd. Dostupné z: https://www.daikinchemicals.com/library/pb_common/pdf/tds/Fluoropolymers/NEOFLON_PFA/tds-ap-231sh-E_ver02_May_2019.pdf. [cit. 2023-05-30].
- [48] HE, Y.; FAROKHZADEH, K. a EDRISY, A. Characterization of Thermal, Mechanical and Tribological Properties of Fluoropolymer Composite Coatings. online. *Journal of materials engineering and performance*. 2017, roč. 26, č. 6, s. 2520-2534. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2690-y>. [cit. 2023-06-28].
- [49] *Thermally Conductive H2 Tubing*. online. In: Fluorotherm. 2023. Dostupné z: <https://www.fluorotherm.com/products/fluoropolymer-tubing/h2-tubing>. [cit. 2023-06-27].
- [50] *Thermal conductivity*. online. In: Daikin Global. Daikin Industries, 2023. Dostupné z: <https://daikinchemicals.co.th/en/technical-challenges/thermal-conductivity>. [cit. 2023-06-27].

- [51] HE, Youliang; WALSH, Dan a SHI, Chao. Fluoropolymer composite coating for condensing heat exchangers: Characterization of the mechanical, tribological and thermal properties. online. *Applied thermal engineering*. 2015, roč. 91, s. 387-398. ISSN 1359-4311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.035>. [cit. 2023-06-28].
- [52] AOKI, Hideo a S. DRESSELHAUS, Mildred. *Physics of Graphene*. Netherlands: Springer Nature, 2013. ISBN 9783319026336. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/9781108617567>.
- [53] ZHANG, W.; ZUO, H.; ZHANG, X.; WANG, J.; GUO, L. et al. Preparation of Graphene-Perfluoroalkoxy Composite and Thermal and Mechanical Properties. online. *Polymers*. 2018, roč. 10, č. 7, s. 700. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym10070700>. [cit. 2023-12-25].
- [54] ZHANG, Xinru; CAI, Xinzhi; XIE, Xiaoyu; PU, Changyu; DONG, Xuanzuo et al. Anisotropic Thermally Conductive Perfluoroalkoxy Composite with Low Dielectric Constant Fabricated by Aligning Boron Nitride Nanosheets via Hot Pressing. online. *Polymers*. 2019, roč. 11, č. 10, s. 1638. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym11101638>. [cit. 2023-06-29].
- [55] SERTH, Robert a LESTINA, Thomas. *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb*. 2. vydání. Elsevier, 2014. ISBN 9780123971951. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07242-3>.
- [56] CHHABRA, Raj P. a SHANKAR, V. *Coulson and Richardson's chemical engineering, Volume 1B: Heat and mass transfer : fundamentals and applications*. online. 7. vydání. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. ISBN 978-0-08-102550-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02843-4>. [cit. 2024-02-15].
- [57] JANNA, William S. *Engineering heat transfer*. 3. vydání. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-7202-0.
- [58] ÇENGEL, Yunus A a GHAJAR, Afshin J. *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. Sixth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2020. ISBN 9780073398198.
- [59] LIENHARD IV, J. a LIENHARD V, J. *A Heat Transfer Textbook*. online. 5. vydání. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2020. Dostupné z: <http://ahtt.mit.edu>. [cit. 2023-06-05]. Version 5.10.
- [60] *VDI Heat Atlas*. online. Second Edition. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-77877-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77877-6>. [cit. 2024-02-21].
- [61] KALPAKLI, Athanasia. *Experimental study of turbulent flows through pipe bends*. online, Dissertation thesis. Stockholm, Sweden: KTH Mechanics, Royal Institute of Technology, 2012. Dostupné z: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Aakth%3Adiva-93316>. [cit. 2024-02-27].
- [62] SOBOTA, Tomasz. Experimental and numerical analysis of heat transfer in the helically coiled heat exchanger. online. *International journal of numerical methods for heat &*

- fluid flow*. 2020, roč. 30, č. 6, s. 2935-2951. ISSN 0961-5539. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/HFF-12-2018-0793>. [cit. 2024-02-29].
- [63] RENNIE, Timothy J. *Numerical and experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger*. online, Ph.D. dissertation. Montreal, Canada: McGill University, 2004. Dostupné z: <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/x346d473s>. [cit. 2024-02-27].
- [64] SCHMIDT, E.F. Wärmeübergang und Druckverlust in Rohrschlangen. online. *Chemie Ingenieur Technik - CIT*. 1967, roč. 39, č. 13, s. 781-832. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cite.330391302>. [cit. 2024-03-01].
- [65] DRAVID, A. N.; SMITH, K. A.; MERRILL, E. W. a BRIAN, P. L. T. Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes. online. *AIChE journal*. 1971, roč. 17, č. 5, s. 1114-1122. ISSN 0001-1541. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/aic.690170517>. [cit. 2024-03-04].
- [66] KALB, Charles E. a SEADER, J. D. Fully developed viscous-flow heat transfer in curved circular tubes with uniform wall temperature. online. *AIChE journal*. 1974, roč. 20, č. 2, s. 340-346. ISSN 0001-1541. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/aic.690200220>. [cit. 2024-03-05].
- [67] XIN, R. C. a EBADIAN, M. A. The Effects of Prandtl Numbers on Local and Average Convective Heat Transfer Characteristics in Helical Pipes. online. *Journal of heat transfer*. 1997, roč. 119, č. 3, s. 467-473. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.2824120>. [cit. 2024-05-03].
- [68] KUMAR, Vimal; FAIZEE, Burhanuddin; MRIDHA, Monisha a NIGAM, K.D.P. Numerical studies of a tube-in-tube helically coiled heat exchanger. online. *Chemical engineering and processing*. 2008, roč. 47, č. 12, s. 2287-2295. ISSN 0255-2701. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.01.001>. [cit. 2024-03-05].
- [69] RENNIE, Timothy J. a RAGHAVAN, Vijaya G.S. Numerical studies of a double-pipe helical heat exchanger. online. *Applied thermal engineering*. 2006, roč. 26, č. 11, s. 1266-1273. ISSN 1359-4311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.030>. [cit. 2024-05-03].
- [70] MISHRA, P a GUPTA, S. N. Momentum Transfer in Curved Pipes. 1. Newtonian Fluids. online. *Ind Eng Chem Process Des Dev*. 1979, roč. 18, č. 1, s. 130-137. ISSN 0196-4305. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/i260069a017>. [cit. 2024-03-25].
- [71] ZHENG, Xiong; LU, Xianghui; GAO, Yaxin; JIN, Desheng; HU, Yisong et al. Experimental study on friction pressure drop and circumferential heat transfer characteristics in helical tubes. online. *Frontiers in energy research*. 2023, roč. 11. ISSN 2296-598X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1204850>. [cit. 2024-05-05].
- [72] XIN, Rc; AWWAD, A; DONG, Zf a EBADIAN, Ma. An experimental study of single-phase and two-phase flow pressure drop in annular helicoidal pipes. online. *The International journal of heat and fluid flow*. 1997, roč. 18, č. 5, s. 482-488. ISSN 0142-727X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(97\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)00033-7). [cit. 2024-03-25].
- [73] GOMAA, Abdalla; ALY, Wael I. A.; OMARA, M. a ABDELMAGIED, Mahmoud. Correlations for heat transfer coefficient and pressure drop in the annulus of concentric

- helical coils. online. *Heat and mass transfer*. 2014, roč. 50, č. 4, s. 583-586. ISSN 0947-7411. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1258-0>. [cit. 2024-05-22].
- [74] Fluoropolymer Piping Equipment. online. In: *SMC Europe*. SMC Corporation. Dostupné z: https://static.smc.eu/pdf/LQ-LQ1-LQ3-LVN-T-A_EU.pdf. [cit. 2024-03-31]. Kód katalogu: CAT.EUS70-39A-UK.
- [75] Digital Flow Switch for Water: PF3W Series. online. In: *SMC Europe*. SMC Corporation. Dostupné z: https://content2.smcetech.com/pdf/PF3W-D_EU.pdf. [cit. 2024-03-31]. Kód katalogu: CAT.EUS100-80Dd-UK.
- [76] Circulating Fluid Temperature Controller: Thermo-chiller Type inverter HRSH Series. online. In: *SMC Europe*. SMC Corporation. Dostupné z: https://static.smc.eu/pdf/HRSH-Ddd_EU.pdf. [cit. 2024-03-31]. Kód katalogu: CAT.EUS40-57Ddd-UK.
- [77] Circulating Fluid Temperature Controller: Thermo-chiller Standard Type HRS Series. online. In: *SMC Europe*. SMC Corporation. Dostupné z: https://content2.smcetech.com/pdf/HRS-G_EU.pdf. [cit. 2024-03-31]. Kód katalogu: CAT.EUS40-55G-UK.
- [78] Peltier-Type Thermoelectric Bath: Series INR-244. online. In: *SMC Europe*. SMC Corporation. Dostupné z: https://static.smc.eu/pdf/INR-244-A_EU.pdf. [cit. 2024-03-31]. Kód katalogu: P-EU12-20A-UK.
- [79] Process Pump Automatically Operated Type/Air Operated Type: PA5000 Series. online. In: *SMC Europe*. SMC Corporation. Dostupné z: https://content2.smcetech.com/pdf/PA5000_EU.pdf. [cit. 2024-03-31]. Kód katalogu: CAT.EUS100-137A-UK.
- [80] TA2105: Temperature transmitter. online. In: *Ifm Efector, Inc*. Essen: ifm electronic gmbh, 2023. Dostupné z: https://content2.smcetech.com/pdf/PF3W-D_EU.pdf. [cit. 2024-03-31].
- [81] High-Precision Digital Pressure Switch: ZSE20(F)/ISE20 Series. online. In: *SMC Europe*. SMC Corporation. Dostupné z: https://content2.smcetech.com/pdf/ZSE20-ISE20-E_EU.pdf. [cit. 2024-03-31]. Kód katalogu: CAT.EUS100-114E-UK.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Význam
AT	Rakouská republika
CSV	Comma-separated values (hodnoty oddělené čárkami)
DI voda	Deionizovaná voda
et al.	et alli (a další)
FEP	Fluorovaný ethylen propylen
LMTD	Logarithmic mean temperature difference (logaritmický teplotní spád)
PE	Polyethylen
PF	Fenolformaldehydová pryskyřice
PFA	Perfluoro-alkoxy alkan
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluoroethylen
SiC	Karbid křemíku
SMC	Sintered Metal Corporation
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Spolek německých inženýrů)

Symbol	Význam	Jednotka
A	Teplosměnná plocha	m ²
A ₁	Plocha na vnitřní straně teplosměnné trubky	m ²
A ₂	Plocha na vnější straně teplosměnné trubky	m ²
c _p	Měrná tepelná kapacita pro střední teplotu	J/(kg·K)
D	Vnější průměr trubky	m
D	Vnitřní průměr trubky	m
D ₁	Vnější průměr vnitřní trubky	m
d ₂	Vnitřní průměr vnější trubky	m
De	Deanovo číslo	-
D _H	Hydraulický průměr	m
D _v	Průměr vinutí	m
D _z	Průměr zakřivení	m
f	Součinitel tření	-

Seznam použitých zkratk a symbolů

h	Stoupání	m
I	Výstupní proud snímače	mA
$I_{m,h}$	Horní hranice výstupního proudu měřidla	mA
$I_{m,s}$	Spodní hranice výstupního proudu měřidla	mA
k	Směrnice přímky	-
L	Charakteristický rozměr	m
l	Délka trubky (výměníku)	m
\dot{m}	Hmotnostní průtok	kg/s
m_c	Hmotnostní průtok studeného média	kg/s
m_h	Hmotnostní průtok teplého média	kg/s
N	Počet otáček vinutí výměníku	-
Nu	Nusseltovo číslo	-
$Nu_{l,Re_{crit}}$	Nusseltovo číslo pro laminární proudění při $Re = Re_{crit}$	-
$Nu_{t,22\ 000}$	Nusseltovo číslo pro turbulentní proudění při $Re = Re_{crit}$	-
O	Smáčený obvod	m
$p_{c,in}$	Tlak studeného média na vstupu	kPa
$p_{c,out}$	Tlak studeného média na výstupu	kPa
$p_{h,in}$	Tlak teplého média na vstupu	kPa
$p_{h,out}$	Tlak teplého média na výstupu	kPa
Pr	Prandtlovo číslo pro střední teplotu média	-
Pr_w	Prandtlovo číslo pro střední teplotu stěny	-
q	Posunutí	-
\dot{Q}	Tepelný tok	W
Q_c	Tepelný tok ve studeném médiu	W
Q_h	Tepelný tok v teplém médiu	W
Re	Reynoldsovo číslo	-
Re_{crit}	Kritické Reynoldsovo číslo	-
R_{z1}	Tepelný odpor na vnitřní straně trubky	$m^2 \cdot K/W$
R_{z2}	Tepelný odpor na vnější straně trubky	$m^2 \cdot K/W$
S	Průtočný průřez	m^2
T	Snímaná teplota	$^{\circ}C$

Seznam použitých zkratek a symbolů

T_c	Střední teplota studeného média	$^{\circ}\text{C}$
$T_{c,in}$	Teplota studeného média na vstupu	$^{\circ}\text{C}$
$T_{c,out}$	Teplota studeného média na výstupu	$^{\circ}\text{C}$
T_h	Střední teplota teplého média	$^{\circ}\text{C}$
$T_{h,in}$	Teplota teplého média na vstupu	$^{\circ}\text{C}$
$T_{h,out}$	Teplota teplého média na výstupu	$^{\circ}\text{C}$
$T_{m,h}$	Horní hranice měřitelného rozsahu měřidla	$^{\circ}\text{C}$
$T_{m,s}$	Spodní hranice měřitelného rozsahu měřidla	$^{\circ}\text{C}$
U	Součinitel prostupu tepla	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
u	Rychlost proudění	m/s
\dot{V}_c	Objemový průtok studeného média	l/min
\dot{V}_h	Objemový průtok teplého média	l/min
x	Nezávislá proměnná	-
y	Závislá proměnná	-
α	Součinitel prostupu tepla	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
α_1	Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
α_2	Součinitel prostupu tepla na vnější straně trubky	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
α_h	Součinitel prostupu tepla na straně teplého média	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
γ	Interpolační koeficient	-
Δp	Tlaková ztráta	Pa
ΔT	Rozdíl vstupní a výstupní teploty proudu	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_1	Větší rozdíl teplot médií na jedné straně výměníku	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_2	Menší rozdíl teplot médií na jedné straně výměníku	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_{LM}	Logaritmický teplotní rozdíl	$^{\circ}\text{C}$
η	Dynamická viskozita média	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
η_w	Dynamická viskozita média pro střední teplotu stěny	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
λ	Darcy-Weisbachův součinitel tření (pro rovné trubky)	-
λ_t	Tepelná vodivost média	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_w	Tepelná vodivost trubky	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_z	Součinitel tření pro zakřivené trubky	-

Seznam použitých zkratk a symbolů

ρ Hustota média kg/m^3

Seznam příloh

Příloha 1 – Výsledky druhého měření, chiller

Příloha 2 – Výsledky druhého měření, termoelektrická lázeň

Příloha 3 – Výstupní protokol z programu

Příloha 4 – Záznam prvního měření (1_Měření 12.1.2023.xlsm)

Příloha 5 – Záznam druhého měření – Chiller (2_Měření 26.3.2024)

Příloha 6 – Záznam druhého měření – Termoelektrická lázeň (2_Měření 26.3.2024)

Příloha 7 – Program pro výpočet koaxiálního výměníku (Návrh koaxiálního výměníku.xlsm)

Příloha 8 – Porovnání vztahů pro tlakové ztráty.xlsm

Příloha 9 – Porovnání vztahů.xlsm

Příloha 10 – Všechny rovnice pro Nu.xlsm

Příloha 1 – Výsledky druhého měření, chiller

č. měření	T _{c,in} [°C]	T _{c,out} [°C]	p _{c,in} [bar]	p _{c,out} [bar]	V _c [l/min]	T _{h,in} [°C]	T _{h,out} [°C]	p _{h,in} [bar]	p _{h,out} [bar]	V _h [l/min]
1	5,10	6,36	5,11	0,28	3,69	39,30	37,54	1,60	0,72	1,57
2	5,13	6,33	5,11	0,28	3,69	39,22	36,06	1,70	1,33	0,92
3	5,13	6,23	5,11	0,28	3,70	38,89	32,44	1,78	1,66	0,38
4	5,15	5,81	5,11	0,28	3,73	19,97	19,35	1,70	0,65	1,48
5	5,09	5,79	5,11	0,28	3,72	20,12	19,05	3,02	2,43	1,01
6	5,13	5,78	5,11	0,28	3,73	20,24	18,22	2,68	2,49	0,38
7	19,88	20,36	5,09	0,28	3,93	29,80	29,21	2,37	1,53	1,36
8	19,89	20,36	5,09	0,28	3,93	29,77	28,86	2,50	2,12	0,84
9	19,88	20,31	5,09	0,28	3,93	29,71	27,83	2,62	2,45	0,38
10	24,82	25,42	5,09	0,28	3,99	39,58	38,57	2,30	1,50	1,43
11	24,83	25,42	5,08	0,28	3,99	39,42	37,89	2,44	2,09	0,87
12	24,82	25,37	5,09	0,28	3,99	38,94	35,71	2,55	2,42	0,36

Příloha 2 - Výsledky druhého měření, termoelektrická lázeň

č. měření	T _{c,in} [°C]	T _{c,out} [°C]	p _{c,in} [bar]	p _{c,out} [bar]	V _c [l/min]	T _{h,in} [°C]	T _{h,out} [°C]	p _{h,in} [bar]	p _{h,out} [bar]	V _h [l/min]
1	5,09	6,81	5,12	0,28	3,79	58,01	53,23	1,09	0,45	1,55
2	5,14	6,75	5,11	0,28	3,79	56,90	49,46	1,22	1,06	0,78
3	5,15	6,67	5,12	0,29	3,81	57,51	44,18	1,27	1,23	0,40
4	24,81	25,86	5,09	0,28	4,12	58,92	55,45	1,05	0,44	1,52
5	24,82	25,86	5,09	0,28	4,13	58,58	54,13	1,15	0,88	1,00
6	24,82	25,78	5,09	0,28	4,13	58,25	48,84	1,24	1,20	0,38
7	24,82	25,62	5,09	0,28	4,14	49,26	46,84	1,16	0,54	1,50
8	24,82	25,61	5,09	0,28	4,14	49,10	45,89	1,27	1,00	0,97
9	24,82	25,53	5,09	0,28	4,14	48,67	41,90	0,83	0,77	0,38
10	5,16	6,60	5,11	0,29	3,83	48,85	45,21	1,16	0,52	1,52
11	5,16	6,58	5,11	0,28	3,82	48,68	43,61	0,79	0,50	1,01
12	5,13	6,36	5,10	0,28	3,84	48,54	37,06	0,83	0,78	0,35

Příloha 3 – Výstupní protokol z programu

Protokol výpočtu šroubovicového koaxiálního výměníku			
Návrhový výpočet - určení rozměrů výměníku			
Parametry proudů			
Teplé médium		Studené médium	
Teplota na vstupu do výměníku	60,00 °C	Teplota na vstupu do výměníku	7,00 °C
Teplota na výstupu z výměníku	53,00 °C	Teplota na výstupu z výměníku	7,34 °C
Hustota při průměrné teplotě	984,6 kg/m ³	Hustota při průměrné teplotě	999,8 kg/m ³
Měrná tepelná kapacita při průměrné teplotě	4184 J/(kg·K)	Měrná tepelná kapacita při průměrné teplotě	4200 J/(kg·K)
Dynamická viskozita při průměrné teplotě	4,929E-04 Pa·s	Dynamická viskozita při průměrné teplotě	1,427E-03 Pa·s
Tepelná vodivost při průměrné teplotě	0,6505 W/(m·K)	Tepelná vodivost při průměrné teplotě	0,575 W/(m·K)
Režim proudění	Přechodové -	Režim proudění	Přechodové -
Objemový průtok	1,30 l/min	Objemový průtok	26,26 l/min
Hmotnostní průtok	0,0213 kg/s	Hmotnostní průtok	0,4376 kg/s
Rychlost proudění	0,77 m/s	Rychlost proudění	1,30 m/s
Reynoldsovo číslo	9185 -	Reynoldsovo číslo	12919 -
Kritické Reynoldsovo číslo	6581 -	Kritické Reynoldsovo číslo	8613 -
Prandtlovo číslo	3,17 -	Prandtlovo číslo	10,43 -
Deanovo číslo	1677 -	Deanovo číslo	5136 -
Nusseltovo číslo	57,88 -	Nusseltovo číslo	302,87 -
Součinitel přestupu tepla	6275 W/(m ² ·K)	Součinitel přestupu tepla	12240 W/(m ² ·K)
Tlaková ztráta	4276 Pa	Tlaková ztráta	6441 Pa
Parametry výměníku			
Geometrické charakteristiky		Tepelné charakteristiky	
Vnitřní průměr menší hadice	6,000 mm	Tepelná vodivost materiálu výměníku	0,22 W/(m·K)
Vnější průměr menší hadice	8,000 mm	Výkon výměníku	624,8 W
Vnitřní průměr větší hadice	22,225 mm	Součinitel prostupu tepla	241,34 W/(m ² ·K)
Vnější průměr větší hadice	25,400 mm	Podíl tepelného odporu mezní vrstvy v trubce	3,8 %
Délka výměníku	2,788 m	Podíl tepelného odporu stěny trubky	94,7 %
Průvěr zakřivení	180 mm	Podíl tepelného odporu mezní vrstvy v mezikruží	1,5 %
Teplosměnná plocha	0,0526 m ²		