



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ TEPLOSMĚNNÉ PLOCHY A JEJÍ ZANÁŠENÍ U VÝMĚNÍKŮ Z DUTÝCH PLASTOVÝCH VLÁKEN

HEAT TRANSFER SURFACES DESIGN AND FOULING OF THE HEAT EXCHANGERS FROM  
HOLLOW PLASTIC FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. LENKA BOKIŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV RAUDENSKÝ, CSc.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lenka Bokišová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

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:

### **Konstrukční řešení teplosměnné plochy a její zanášení u výměníků z dutých plastových vláken**

v anglickém jazyce:

### **Heat transfer surfaces design and fouling of the heat exchangers from hollow plastic fibers**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech se objevily publikace o nové koncepci tepelných výměníků využívajících dutá mikrovlákná. Jedná se o plastová dutá vlákna o vnějších průměrech od 0.3 mm. Výhodou použití ve výměnících je flexibilita vláken, nízká cena a chemická odolnost. Jsou ideální pro aplikace s využitím odpadního nízko potenciálního tepla, vytápění a klimatizaci.

Tepelné výměníky s plastovými trubičkami však musí být konstruovány s ohledem na zásadně jiný charakter teplosměnných ploch a nízkou tepelnou vodivost materiálu vlákna.

Cíle diplomové práce:

S využitím databází dostupných na FSI proveďte literární a patentovou rešerši způsobu fixace a separace vláken v prostoru a rešerši zanášení a čištění výměníků s teplosměnnými plochami typu dutých vláken.

Zpracujte přehled konstrukčních řešení teplosměnných ploch, která zabraňují shlukování vláken a tím snižování výkonu výměníku. Proveďte rozbor možnosti využití „nakadeřených“ vláken s různou křivostí, které rovnoměrně vyplňují profukovaný prostor výměníku.

Proveďte rozbor možností konstrukce tepelného výměníku typu kapalina – vzduch a kapalina – kapalina. Proveďte rozbor možnosti využití dostupných výsledků pro teplosměnné mříže, které jsou řádově větších rozměrů než struktury s dutými vlákny. Navrhněte uspořádání vláken a výpočtovým postupem proveďte rozbor uspořádání teplosměnných ploch s cílem optimalizovat výkon výměníku.

Seznam odborné literatury:

Incropera: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, (jakékoli ze šesti vydání)

Galík R. : Laboratorní výzkum přenosu tepla z dutých vláken, výzkumná zpráva, VUT, 2010

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku  
2011/2012. V Brně, dne 16.11.2011

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## Abstrakt

Tato práce zkoumá možnost využití dutých vláken z polymerů ke konstrukci nových typů výměníků. První část uvádí do problematiky tepelných výměníků a polymerů jako materiálů vhodných pro vytvoření teplosměnných ploch. Dále je nastíněn potenciál dutých mikrovláken malých průměrů, včetně výhod, omezení a návrhů na zlepšení. Významná část byla věnována literární rešerši způsobu fixace a separace vláken v prostoru a rešerši zanášení a čištění výměníků. Zpracován je přehled konstrukčních řešení ploch, která zabraňují shlukování vláken. Uvedeny jsou metody řešení, které jsou připraveny k proměření v Laboratoři proudění a přenosu tepla, včetně rozboru možnosti využití „nakadeřených“ vláken. Další část prezentuje výpočetní postupy pro modely tepelných výměníků typu voda – voda a voda – vzduch a diskutuje vliv snižování průměru trubiček, rychlosti proudění a dalších parametrů na tepelné charakteristiky. Vztahy pro přenos tepla a proudění pro klasické výměníky řádově větších rozměrů je možno použít téměř beze změny. Diskutován je také vliv rozložení vláken a jejich vzdálenosti na přenos tepla.

## Klíčová slova

Tepelné výměníky, dutá plastová vlákna, přenos tepla

## Abstract

This thesis studies a possibility of using hollow fibres for construction of innovative heat exchangers. The first part introduces to the field of heat exchangers and polymers as materials suitable for formation of heat transfer surfaces. Further, the potential of hollow fibres of small diameters is outlined, including the merits, limits and proposals for improving. The significant part of the work is dedicated to the review of methods of fibres fixation and separation and review of fouling and cleaning of heat exchangers. Overviews of design possibilities which prevent fibres clustering have been made. The solutions, which are prepared for experimental research at Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory are stated, including analysis of “curly” fibres application. The next part presents calculations for models of water – water and water – air heat exchangers and discusses influence of fibre diameter, flow velocity and the other parameters on heat characteristics. The heat transfer and fluid flow formulas using for heat exchangers of a bigger order can be employed with small changes. Furthermore, the influence of hollow fibres arrangement and distances on heat transfer is discussed.

## Keywords

Heat exchangers, hollow fibres, heat transfer

## Bibliografická citace

BOKIŠOVÁ, L. *Konstrukční řešení teplosměnné plochy a její zanášení u výměníků z dutých plastových vláken*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 85 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a zdrojů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 23.5.2012

.....





## Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala prof. Ing. Miroslavu Raudenskému, CSc. za ochotu a cenné připomínky při vypracovávání diplomové práce.

Poděkování patří také celé mé rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.



# OBSAH

Úvod .....	13
1 Tepelné výměníky .....	15
2 Důvody a motivace využití plastů pro konstrukci tepelných výměníků .....	16
3 Přehled současných řešení plastových tepelných výměníků .....	17
4 Dutá plastová vlákna .....	21
4.1 Struktura a geometrické vlastnosti vláken .....	21
4.2 Opodstatnění použitelnosti dutých plastových vláken pro konstrukci tepelných výměníků .....	23
4.2.1 Malé dimenze a tloušťka stěn .....	23
4.2.2 Laminární proudění .....	24
4.3 Celkové srovnání tepelných vlastností polymerů a kovů .....	25
4.4 Limity plastových materiálů a způsoby, jak jim předejít .....	26
4.4.1 Omezená teplotní a tlaková odolnost plastů .....	26
4.4.2 Špatná smáčivost plastů .....	26
4.4.3 Tlaková ztráta .....	27
4.4.4 Nízká tepelná vodivost plastů .....	27
5 Vlastnosti plastových materiálů .....	29
5.1 Způsoby zlepšení tepelné vodivosti polymerů .....	30
6 Způsoby fixace a separace vláken .....	35
6.1 Přípravované možnosti řešení .....	44
7 Zanášení a čištění výměníků z dutých vláken .....	47
7.1 Mechanické čištění .....	49
7.2 Povrchové ošetření vláken .....	49
8 Výpočet přenosu tepla .....	51
8.1 Přenos tepla uvnitř potrubí .....	51
8.2 Příčné proudění tekutiny okolo válce .....	56
8.3 Diskuse použitelnosti vzorců pro plastová vlákna .....	60
8.4 Výpočet celkového součinitele prostupu tepla a výkonu výměníku .....	62
8.5 Vliv délky vláken .....	68
8.6 Vliv uspořádání vláken na přenos tepla .....	70
9 Přípravy měření .....	77
Závěr .....	79
Seznam symbolů .....	81
Seznam použité literatury .....	83



## ÚVOD

Hledání alternativních materiálů, konstrukcí a technologií patří k hlavním snahám inženýrského výzkumu. Plasty našly v posledních desetiletích obrovské využití. Díky dobré formovatelnosti, nízké ceně, lehké struktuře a dnes i recyklovatelnosti se jim často dává přednost před jinými materiály. Uplatnění nachází i tam, kde by se to na první pohled mohlo zdát nesmyslné. Přestože jsou polymery tepelnými izolanty, mohou být s výhodou použity jako teplosměnné plochy. Tepelné výměníky z plastů vynikají nad klasické kovové konstrukce kompaktností, lehkou konstrukcí, úsporou prostoru i ceny a zvláště odolností proti zanášení a korozi. Díky těmto výhodám se jim začala věnovat zvláštní pozornost v souvislosti s některými procesy, souvisejícími zejména s tepelnou regenerací agresivních médií. Díky obstojným výkonům a mnoha dalším výhodám se ale vytvořila myšlenka pro jejich rozšíření do všech oblastí, kde jsou dnes tepelné výměníky využívány. Tímto tématem se zabývalo několik výzkumů. Na trhu můžeme narazit na několik výrobců plastových výměníků. Většina z dostupných modelů je určena pro specifické operace, některé ovšem slibují uspokojivou použitelnost i namísto klasických kovových modelů. Takto nacházejí uplatnění v klimatizaci a dalších oblastech techniky prostředí.

V posledních letech se objevilo řešení teplosměnných ploch z plastů ve tvaru dutých mikrovláken. Jedná se o kapiláry z polymerů o velmi tenké stěně a průměrech v řádu desetin mm. Prototyp výměníku s takovými trubičkami byl poprvé publikován roku 2004. Od té doby se teplosměnnými plochami uvedených geometrií zabývalo několik studií. Ty se snažily proudění a přenos tepla vhodně popsat nejprve teoreticky pomocí rovnic a pak získat experimentální výsledky. Bylo zjištěno, že pro modely výměníků s polypropylenovými vlákny je možno dosáhnout srovnatelného součinitele prostupu tepla jako pro běžné pláštěvé výměníky z kovů. Zvýšit přenos tepla stěnou je možno volbou vhodné geometrie teplosměnných ploch. Jinou možností zlepšení vodivosti stěny je modifikace struktury polymerů pomocí vodivé výplně. Několik studií a srovnání s úspěchem ukázalo, že tímto řešením je možno tepelnou vodivost materiálu významně navýšit. Ačkoli mají dutá plastová vlákna pro přenos tepla velký potenciál, jejich účinnému využití brání absence dobrých návrhů konstrukcí. Pro zajištění účinnosti výměníku je nutné použít konstrukční uspořádání, které zajistí dobré obtékání vláken. Prostorová fixace vláken vyžaduje ve většině případů použití pomocných materiálů, které jednak zvyšují hydraulický odpor při proudění přes výměník a jednak působí problémy se zanášením teplosměnných ploch.

Plastové tepelné výměníky nejsou zatím široce rozšířeny. Na rozdíl od teplosměnných ploch běžných konstrukcí jsou zdroje technické literatury, zabývající se tímto tématem, stále omezené. Z tohoto důvodu jejich nynější design a operativní metody nejsou rozhodně optimální a poskytují prostor ke zkoumání a testování jak analyticky, tak experimentálně. Inspirace je hledána v konceptu obvyklých tepelných výměníků, rozdílné materiály a geometrie vybízí k novému pojetí. Tato práce předkládá přehled výhod a současného stavu využití polymerů ke konstrukci tepelných výměníků, zejména v technice prostředí. Poměrně novým typem teplosměnných ploch jsou dutá mikrovlákná. Inovátorství spočívá v malých průměrech a tenkosti použitých vláken. Aplikovat kovové materiály při takových geometriích by bylo možné jen při značném technologickém úsilí. V práci je popsán potenciál využití tenkých dutých plastových vláken, analýza zlepšení jejich tepelně přenosových vlastností a omezení použitelnosti. Významná část je věnována rešerši uspořádání vláken ve výměníku a problémy s jejich separací a zanášením. Na literární rešerši navazuje rozbor principů přenosu tepla v uvažovaných geometriích při srovnání se vztahy používanými pro běžné tepelné výměníky. Diskutována je také relevantnost těchto vztahů. Je uvedeno několik závislostí tepelných charakteristik na rozměrech výměníku a vlastnostech pracovních médií. Znalost

chování výměníku za těchto podmínek může pomoci optimalizaci skutečného modelu a přípravy experimentálního měření.

# 1 TEPELNÉ VÝMĚNÍKY

Tepelné výměníky jsou zařízení, umožňující výměnu tepla mezi dvěma nebo více látkami. Uplatnění nachází ve všech odvětvích průmyslu. Existuje mnoho typů konstrukcí s ohledem na specifické použití. Všechny výměníky tepla musí splňovat požadavky na vysokou tepelnou účinnost, nízkou tlakovou ztrátu, spolehlivost a dlouhou životnost, kompatibilitu materiálu s pracovní látkou a jednoduchost údržby a oprav. K intenzivnímu přenosu tepla by mělo docházet ideálně při zachování malých rozměrů zařízení. Hlavním úkolem při návrhu výměníků je dosažení vysoké účinnosti přenosu tepla za minimální náklady.

Typ tepelného výměníku, uspořádání jednotlivých prvků a výběr materiálu je volen s ohledem na vlastnosti pracovních látek, požadovaný výkon a provozní podmínky. Podle způsobu předávání tepelné energie rozlišujeme výměníky regenerační, rekuperační a směšovací. Rekuperační tepelné výměníky se od ostatních liší úplným oddělením pracovních látek pevnou stěnou. Teplonosná média tak nepřijdou vzájemně do styku, čímž je zamezeno případnému promíchání a znečištění.

V praxi je zavedeno několik základních typů rekuperačních tepelných výměníků. Konstrukčně nejjednodušším je výměník typu trubka v trubce. Jedná se o potrubí, z vnější strany často tepelně izolované, uvnitř kterého je umístěna jedna soustředná trubka, případně svazek několika potrubí menších průměrů. Pracovní látky různých teplot mohou protékat ve smyslu souproudečím nebo protiproudečím. K tepelné výměně dochází přes stěnu vnitřního potrubí. Obměnou výměníku trubka v trubce je výměník spirálový, ve kterém je vnitřní potrubí stočeno do spirály, čímž je dosaženo zvětšení teplosměnné plochy. Výhodou výměníku trubka v trubce je vysoká účinnost přestupu tepla, nevýhodou pak objemnost a spotřeba materiálu.

Průmyslově nejvíce využívaným typem výměníku je plášťový tepelný výměník. Principem „Shell-and-Tube“ výměníku je, že proud jedné tekutiny se rozděluje do velkého počtu malých trubek. Tuto konstrukci uzavírá plášť. Druhé teplonosné médium vyplňuje celý prostor pláště okolo vnitřních trubek a je s nimi v přímém kontaktu. Směr proudění je obecně opačný vůči proudu v úzkých trubkách. Pro zintenzivnění přenosu tepla bývá tekutina v mezitrubkovém prostoru často nucena měnit směr pomocí zabudovaných přepážek. Vnější médium pak ve skutečnosti proudí spíše kolmo na trubky a v rámci celého výměníku uvažujeme křížový proud. Při konstrukci plášťových tepelných výměníků z kovů je potřeba brát zvláštní zřetel na dilataci materiálu.

Dalším typem konstrukce jsou výměníky deskové. Skládají se ze soustavy plátů, uspořádaných paralelně za sebou. Mezery mezi deskami vytváří kanály pro průchod části jednoho z teplonosných médií, obecně protékajících protiproudem v horní a spodní části výměníku. Desky jsou povětšinou ploché, na trhu ovšem existují i spirálové tepelné výměníky, ve kterých jsou desky srolovány do spirály, nebo výměníky lamelové. Vytvoření velkého teplosměnného povrchu na malém objemu umožňuje husté pole žebrovaných trubek nebo desek. Kompaktní výměníky našly široké uplatnění z důvodu vysoké účinnosti, jejich výroba a čištění jsou však poměrně náročné.

Výše uvedené typy tepelných výměníků jsou s úspěchem nasazeny a odzkoušeny v praxi, proto první snahy o vytvoření zařízení k účinné výměně tepla z alternativních materiálů vychází se stejného konceptu. Nejinak je tomu u tepelných výměníků z polymerů. Svými vlastnostmi se tyto materiály od kovů dosti liší, což přináší několik výhod i omezení.

## 2 DŮVODY A MOTIVACE VYUŽITÍ PLASTŮ PRO KONSTRUKCI TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ

Běžně používané tepelné výměníky se vyrábí z různých materiálů, povětšinou z kovů. Často jsou konstruovány jako kompaktní, čímž je dosaženo velké efektivity přenosu tepla. Kovové tepelné výměníky ovšem přinášejí řadu omezení, zejména při použití pro agresivní média. Jejich používáním dochází časem k znehodnocování korozí a zanášením, což snižuje účinnost zařízení.

Nasazení polymerů umožňuje konstrukci výměníků, které jsou lehké, přizpůsobitelné prostoru i objemu a dostupné za poměrně nízké pořizovací náklady. Kromě těchto výhod vynikají nad kovy výbornou chemickou odolností a je proto možné je použít pro jakékoli kapalné či plynné tepelné médium. Uvedené výhody nahrávají dalšímu vývoji a uplatnění tepelných výměníků vyráběných z plastů oproti těm z jiných slitin. Dále je uveden kompletní výčet přínosů teplosměnných ploch z polymerů, vycházející z literatury (zejména [1], [2]):

- Nízká hustota dovoluje vytvořit lehké konstrukce s tenkými stěnami. To je spojeno s nízkou cenou a redukcí nákladů na dopravu a izolaci.
- Vynikající chemická odolnost umožňuje použití i pro korozivní a agresivní média a konstrukci tenkých stěn výměníků.
- Nízké tření při proudění kapaliny zmenšuje tlakovou ztrátu.
- Omezení zanášení a odlupování díky nízké povrchové energii a amorfní struktuře. Takto nedochází ke snížení efektivity během používání.
- Nesmáčivé (kapalina kondenzuje na stěnách ve formě kapek). Smáčivost může být zlepšena změnou povrchových vlastností.
- Dobře tvářitelné, spojovatelné a ohybatelné. To je činí lehce a levně zpracovatelné i do složitých tvarů, umožňuje velkovýrobu.
- Flexibilita
- Netoxické
- Zlepšení tepelné vodivosti lze dosáhnout smíšením materiálu s různými vysoce vodivými náplněmi a vlákny.
- Recyklovatelné, energie na výrobu je nižší, tzn. přínos z ekologického hlediska.

Největším úskalím proti většímu nasazení polymerů pro konstrukci tepelných výměníků je vedení tepla tímto materiálem. Obecně dosahuje tepelná vodivost plastů jen 2–4 % v poměru k hodnotě pro nerez [1]. To vede k významnému nárůstu velikosti teplosměnných ploch a tedy i ceny výměníků. Tato nevýhoda se dá zmírnit nejen úpravou materiálu, ale i vhodnou konstrukcí. Možnosti úpravy jsou uvedeny v dalších kapitolách. Nedostatečné povědomí o výhodách polymerů pro konstrukci teplosměnných ploch a také absence dat z jejich dlouhodobého používání vede ke skutečnosti, že plastové výměníky zatím nenašly široké uplatnění. Na vývoji spolehlivých návrhů konstrukcí a prověření za skutečných podmínek se stále pracuje. V současnosti jsou tepelné výměníky z polymerů používány téměř výhradně v případech, pro které jsou kovové materiály nevhodné. Příklady těchto aplikací a dostupných konstrukcí jsou uvedeny v další kapitole.



### 3 PŘEHLED SOUČASNÝCH ŘEŠENÍ PLASTOVÝCH TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ

Tepelné výměníky z polymerů jsou zatím nasazeny spíše v procesech, ve kterých běžné kovové výměníky nejsou schopny efektivně obstát. Úspěšně se používají pro zpětné získávání tepla ze znečištěných nebo korozivních tekutin, při odsolování mořské vody, v palivových článcích, pro elektrolytické pokovování, solární ohřev vody a několik dalších netradičních aplikací [3], [4]. Dostupných je zatím několik zařízení, odvíjejících se od klasických konstrukcí deskových a trubkových výměníků. Některé z nich jsou aplikovatelné i v oblasti techniky prostředí. Uvedeno je několik typů včetně použití a výhod.

Historie výroby výměníků z polymerů začíná roku 1965, kdy společnost *DuPont* vyrobila první celoplastový tepelný výměník z teflonu. Testovány byly plášťové tepelné výměníky a výměníky s ponornou cívkou [5]. Tato společnost se vývojem plastových výměníků zabývala i dále. *DuPont* ve spolupráci s hlavními dodavateli automobilových součástí vyvinul první celoplastový mezichladič [2]. Tímto způsobem se pokusili o snížení hmotnosti a nákladů, faktorů velmi vítaných ve vývoji efektivních vozidel. Se spirálovým mezichladičem se jim podařilo dosáhnout stejného výkonu, jako mají běžné zařízení tohoto typu, za podobnou nebo nižší cenu. Vyvinutý prototyp je předcházet nízkou hmotností, vyšší odolností proti korozi a trvanlivostí. Velký přínos je spojen s ohebností plastů, která umožňuje přizpůsobit tvar výměníku stísněnému prostoru pod kapotou.

Výhodu pružného designu polymerů a úspory váhy i prostoru využil *DuPont* také pro konstrukci automobilového chladiče. Jednotky jsou tvořeny tenkostěnnými nylonovými trubičkami (tloušťka stěny 0,2 mm, vnější průměr 3,66 mm, Obr. 3.1). Počet trubek zvolili tak, aby byl zachován stejný příčný průtočný průřez pláště jako pro komerčně využívané kovové výměníky. Při 86 nylonových trubkách je tak dosaženo teplosměnné plochy 0,42 m<sup>2</sup> (tj. o 50 % více než pro tepelné výměníky z kovů) a přenosu tepla 4687 W, což představuje 40% nárůst oproti kovovým protivníkům. Krom automobilového průmyslu jsou jednotky tohoto typu aplikovatelné také v lodních motorech, vytápění, větrání a klimatizaci apod.



Obr. 3.1 Automobilový chladič z nylonu, *DuPont* [2]

Plastové výměníky *DuPont* nejsou používány jen do aut. Zapojení spirálového výměníku do klimatizačního systému hotelu na Floridě mělo přinést o 50 % nižší provozní náklady oproti ostatním hotelům s podobnými systémy. Tento údaj vycházel z předpokladu, že u cívky z polymeru nedojde časem ke snížení efektivnosti, způsobené u kovových jednotek korozi materiálu. Další odvětví vývoje *DuPontu* se zabývají chlazením kyseliny sírové v teflonových plášťových tepelných výměnících. Výměník obsahuje 230 kapilár vnějšího průměru 6 mm v plášti z uhlíkaté oceli.

Chemická odolnost plastů je využívána mnoha výrobci v různých typech tepelných výměníků pro rozličné procesy. Příkladem je *Ametek* [6], produkující plášťové a cívkové tepelné výměníky z plastových trubiček vnějšího průměru od 2,54–9,52 mm s 10% tloušťkou stěny (Obr. 3.2). Kompaktní výměníky pro ohřev, chlazení, vypařování a kondenzaci korozních médií prezentoval *George Fisher*. Ideální jsou také pro čisté provozy v potravinářském průmyslu a lékařství. Vyráběny jsou z velké škály polymerů v různých velikostech a typech tak, aby vyhověly široké poptávce. *Placon* zapojil trubkové plášťové výměníky ke zpětnému získávání tepla z agresivního odpadního vzduchu v chemickém, elektrolytickém a elektronickém průmyslu, popř. k ochlazení a následnému ohřevu v sušících procesech. Stejně tak *Fluorotherm* nabízí ohřev či chlazení chemicky agresivních tekutin a proto nachází uplatnění v řadě průmyslových odvětví [2].

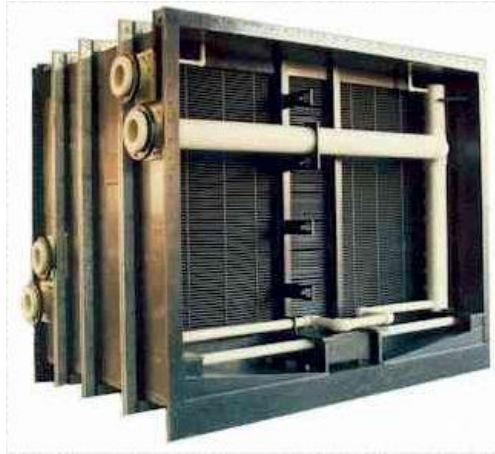


Obr. 3.2 Plášťový výměník Ametek [6]

Z polymerů byly vyrobeny také různé modely deskových výměníků. Dosavadní deskové tepelné výměníky mají desky tvořené z materiálů, které jsou schopny přenášet jen omezené nebo žádné množství vlhkosti z jedné strany desky na druhou. *Dobbs* [7] navrhl nový typ deskového výměníku, který kromě přenosu tepla umožňuje i přenos vlhkosti mezi proudícími médii. Jevu je dosaženo díky konstrukci desek ze speciálních polopropustných membrán polymerů. Díky velkému množství přeneseného tepla z jednoho proudu pracovního média do druhého se plastový výměník stává efektivnější v porovnání s výměníky s deskami z běžných materiálů.

Deskové tepelné výměníky z polymerů nachází uplatnění i v technice prostředí. *Norverg* je jednotka hojně využívaná ve ventilačních a otopných systémech, například v automobilovém chladiči. Výměník je tvořen 60 čtvercovými deskami o rozměrech 45×45 cm ze směsi PP a PVDF. Australské deskové plastové tepelné výměníky *Ficom Pty Ltd.* umožňují snížit energetickou spotřebu na klimatizaci. Navíc se dá bez promíchání vzduchu a znatelného nárůstu nákladů zvýšit podíl čerstvého vzduchu přicházejícího do místnosti až na 100 % [2].

Další typ plastového deskového tepelného výměníku byl navržen designéry v *Milieupartners* pro chlazení vzduchu s kondenzací [8]. Je sestaven z nežebrovaných plastových trubiček s velmi hladkým povrchem (Obr. 3.3), což umožňuje kondenzující vodě volně stékat. Tím dochází k samočistění výměníku. Vhodný je například pro recirkulaci vzduchu v sušičkách nebo v potravinářském průmyslu. Spoustu výhod přináší deskové výměníky od *Greenbox Co.* Konstrukce je celoplastová s deskami tloušťky 0,5 mm a profilovaným vstupem pro dosažení lepší distribuce vzduchu a menší tlakové ztráty [9]. Výměník může být instalován ve vzduchotechnické jednotce pro zpětné získávání tepla, zejména pokud je požadován velký podíl venkovního vzduchu nebo vysoká vnitřní teplota.



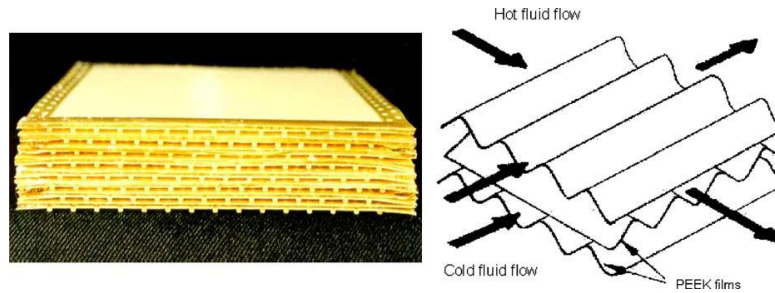
Obr. 3.3 Plastový tepelný výměník Milieupartners [8]

Také pro přenos tepla mezi tekutinami s vysokými nároky na čistotu se využívají plastové deskové tepelné výměníky. *Plastic Magen* zhotovil takovou jednotku v solárních kolektorech pro ohřev bazénové vody. Jednotku tvoří série PP nebo PVDF trubek o vnějším průměru 5 mm a tloušťce stěny 0,5 mm [2].

Na nejmodernější výměníky z plastů se zaměřuje *AB Segerfroj*. Model MonoBlock je z polypropylenových desek spojených sváry. Absence lepení a těsnění umožňuje vytvoření výměníku, který je kompletně z plastu, vzduchotěsný a navíc recyklovatelný [10]. Na výběr je z různých variant velikostí s deskami tloušťky 2,8–7 mm a mezerami mezi nimi 2–10 mm, což umožňuje optimalizovat výměník dle aktuálních požadavků (váha, tepelný výkon, velikost). Celkový tvar výměníku může být čtvercového, kosočtvercového, trojúhelníkového, obdélníkového, kosodélníkového nebo lichoběžníkového průřezu pro přizpůsobení individuálním prostorovým požadavkům. Pracovními médii může být jak vzduch, tak kapalina, protékající křížově nebo protiproudem. Tento model je možno nasadit v mnoha nízkoteplotních aplikacích, např. ke zpětnému získávání tepla a chladicích procesech.

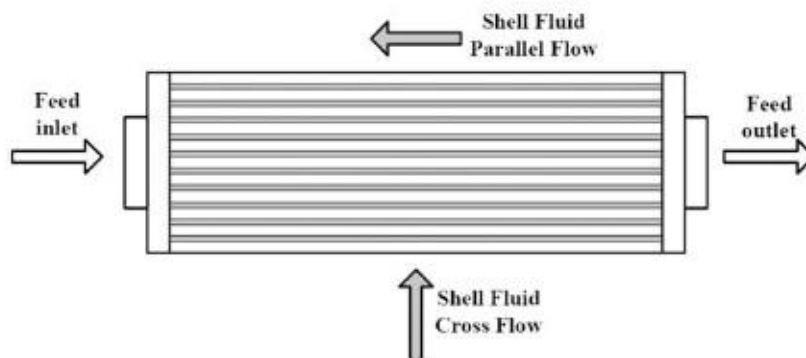
Ke zlepšení prostupu tepla vede ztenčení stěn tepelných výměníků z plastů. Uvažujeme-li plastové tepelné výměníky klasických konstrukcí, tloušťky plastových stěn mohou být sníženy maximálně na 0,5–1 mm, při dalším zúžení dochází k ovlivnění mechanické pevnosti polymerů. Především tomuto se povedlo u tzv. PFCHE (Polymer film compact heat exchangers). Zařízení jsou tvořeny velmi tenkými (100  $\mu\text{m}$ ) vlnitými vrstvičkami polymerů. Pláty jsou naskládány v několika vrstvách nad sebou, tvoříc kompaktní jednotku (Obr. 3.4), odolávající i vyšším tlakům. Profilováním těchto plátů je dosaženo intenzivnějšího promíchání proudu tekutiny a tím dalšího zlepšení přenosu tepla. Povrch je hladký, což brání zanášení. Tenkovrstvé tepelné výměníky jsou vyrobeny z PEEK. Materiál vyniká výbornou chemickou i únavovou odolností [2].

PFCHE se dají využít v řadě odvětví, např. k odsolování, v potravinářském, chemickém, počítačovém a automobilovém průmyslu, v kryogenice. Spousta aplikací se týká také techniky prostředí. Výměník je možné zapojit ke zpětnému získávání tepla, ať už v domácnostech, nebo v chemických procesech, energetice a dalších odvětvích průmyslu. Deskové výměníky z plastových, zvlněných, křížově uspořádaných tenkostěnných plátů mohou být využity ke konstrukci kontaktního výparníku. Toto zařízení mj. zajišťuje čištění vzduchu, poněvadž voda stékající v kapkách drážkami výměníku v kontaktu se vzduchem zachycuje nečistoty a prach. Drážkování je navrženo pod úhlem k umožnění lepšího pohybu tekutiny, která pak skapává do sběrného zářezu. Jednotku je také možno instalovat v kompresorech, v absorpčním chladiči, pro solární kolektory nebo jako chladiče do automobilů.



Obr. 3.4 Drážkované PEEK pláty naskládané přes sebe v jednotce PFCHE [2]

Článek [3] popisuje nový design výměníku z polymerů typu kapalina – kapalina, představen roku 2005. Tento výměník z dutých plastových vláken konceptuálně vychází z konstrukce plášťových výměníků (Obr. 3.5). Je sestaven z tenkých dutých plastových vláken o celkovém vnějším povrchu  $1500 \text{ m}^2$  v plášti bez přepážek o průměru 2,3 cm a délce 11,8 cm. Použitá vnitřní vlákna byla vyrobena z tenké vrstvy PP ( $425/575 \text{ }\mu\text{m}$  vnitřní/vnější průměr) nebo PEEK ( $150/360 \text{ }\mu\text{m}$  vnitřní/vnější průměr). Proudění tekutiny pláštěm může být souproudé, protiproudé nebo křížové. Celkový součinitel přestupu tepla dosahoval hodnoty až  $1360 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Taková jednotka byla schopna přenést až 5,3 kW daleko menším objemu než je tomu u běžných výměníků při podobném zanesení a nižší celkové tlakové ztrátě. Tento typ tepelného výměníku by mohl v některých aplikacích nahradit běžné kovové konstrukce výměníků. Z tohoto důvodu se podobnými plastovými trubičkami, jejich vlastnostmi a možnostmi využití pro tepelné výměníky zabývá v následujících sekcích tato práce.



Obr. 3.5 Koncept výměníku s dutými vlákny [3]

## 4 DUTÁ PLASTOVÁ VLÁKNA

Dutá plastová vlákna malých průměrů s porézní strukturou jsou využívána v modulech pro membránovou filtraci. Probíhá v nich přenos látky přes stěnu z polymerů. Díky analogii s přenosem tepla se vynořila myšlenka použít plastová vlákna také jako teplosměnné plochy. Trubičky určené pro tepelné výměníky jsou velmi ohebné a většinou nepropustné. Jejich povrch bývá hladký, i když jsou zvažovány varianty s vroubenou strukturou nebo povrchy o různé drsnosti. Z vnějšku vlákna silně připomínají rybářské vlasce. Pro zvětšení teplosměnné plochy se mikrokapiláry spojují do svazků. Dostupný prototyp je na Obr. 4.1. Svazek je tvořen zhruba 1000 samostatných dutých plastových vláken. Konce jednotlivých trubiček jsou spojeny dohromady a osázeny do příruby.

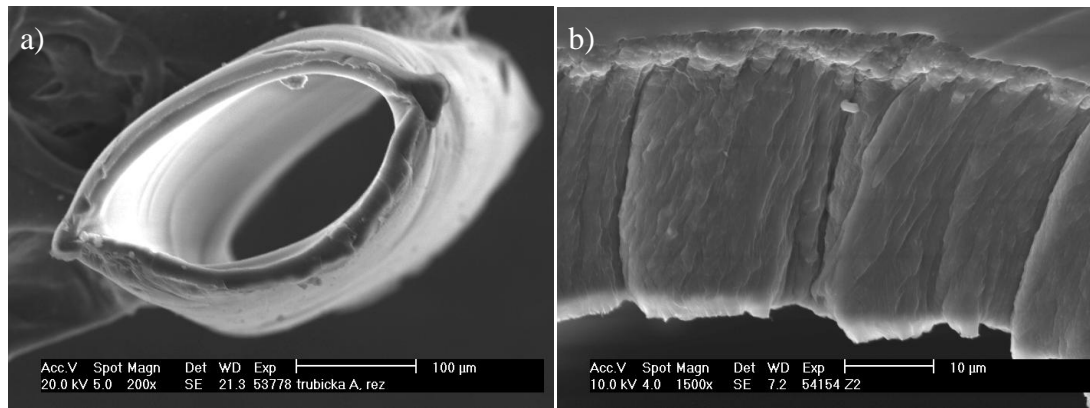


*Obr. 4.1 Svazek dutých plastových vláken*

Informace o vlastnostech vláken a chování v provozu jsou stále nedostatečné pro průmyslové využití. Do dnešního dne je dostupných několik studií, jak s numerickými, tak s experimentálními výsledky. Výměníky s dutými vlákny jsou testovány v laboratorních podmínkách. Zjišťují se optimální parametry k dosažení tepelně přenosových vlastností, srovnatelných s klasickými plášťovými výměníky z kovů. Různými způsoby je hledána cesta ke snížení tepelného odporu plastových stěn kapilár. Pro lepší pochopení vhodnosti použití vláken z polymerů v konstrukci tepelných výměníků byla provedena analýza jejich vlastností.

### 4.1 Struktura a geometrické vlastnosti vláken

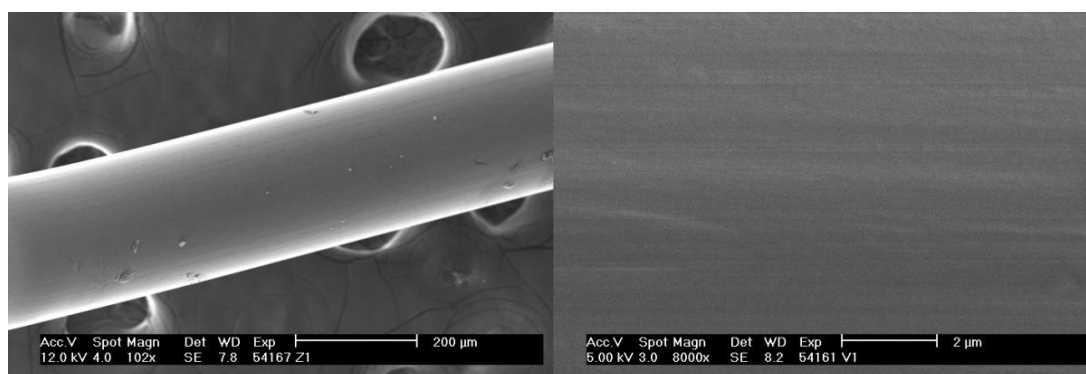
V prvotní studii o dutých vláknech byly mikrotrubičky dimenzí 420/575  $\mu\text{m}$ . Z plastů je však možné vyrábět kapiláry libovolných dimenzí. Vnitřní průměry se pohybují v rozsahu 0,4–0,6 mm, vnější 0,55–0,8 mm. Kvůli velmi malým průměrům je ale poměrně těžké, aby měla všechna vlákna konstantní rozměr. Ověření charakteristických velikostí je možno pouze prozkoumáním pod mikroskopem. Díky tomu jsou dimenze jednotlivých vláken různorodé. Tloušťky stěn jsou pro všechny trubičky přibližně stejné (okolo 150  $\mu\text{m}$ ). Příčný řez jedním takovým vláknem a snímek stěny lze vidět na Obr. 4.2.



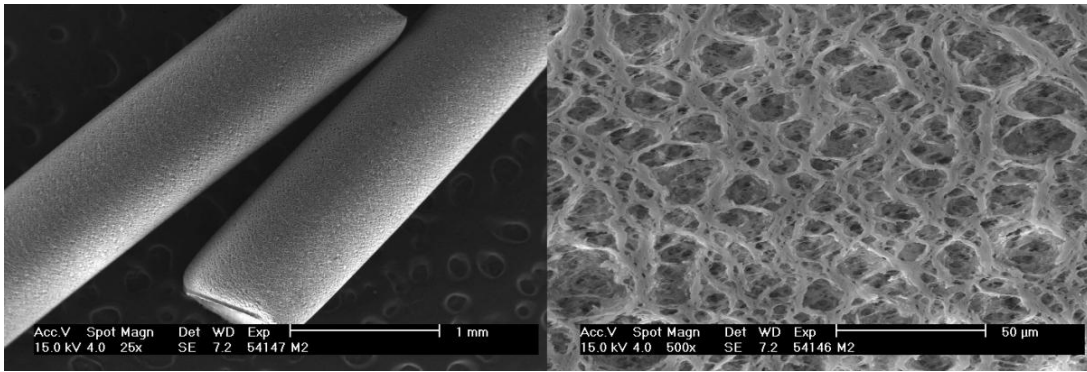
Obr. 4.2 a) Příčný řez trubičkou. Řez je zdeformovaný použitím skalpelu při dělení trubičky;  
b) Snímek stěny plastové trubičky po jejím přetržení za nízké teploty

Na Obr. 4.1 je délka volného vlákna asi 700 mm. Potřebná délka vláken se pro rozdílné aplikace a konstrukce liší. V závislosti na provozních podmínkách se přenos tepla uskutečňuje na různě dlouhých kapilárách. Uzpůsobení délky vláken požadovaným podmínkám (rozdíl teplot mezi médii, rychlosti proudění apod.) vede k redukci tlakové ztráty a spotřeby materiálu. Bylo dokázáno, že k dosažené velké efektivity je dostatečná aktivní délka vláken menší než 30,5 cm [11]. Optimalizací délky vláken v závislosti na vlastnostech médií a geometrických parametrech se tato práce zabývá dále.

Struktura vláken může být jak hladká, tak zvrásněná. Hladký povrch omezuje třecí faktor, a tedy tlakovou ztrátu, a zanášení. Drsnost povrchu naopak ovlivňuje charakter proudění. Nerovnostmi dochází k narušení rychlostní mezní vrstvy, což vede k promíchávání kapaliny a vyšším Nusseltovým číslům [12]. Žebrované trubky z polymerů nejsou příliš efektivní [4]. Povrch dutých vláken je hydrofobní a většinou plynotěsný. Stěna trubiček může být také s mikropóry nebo částečně propustná. Pórovitou strukturou je možno dosáhnout jak přenosu tepla, tak vlhkosti. Tyto vlákna jsou vhodná například v aplikacích, u kterých je potřeba kromě tepelné výměny zabezpečit i zvlhčení plynu [13]. Mikroskopické obrázky možných povrchů kapilár jsou na Obr. 4.3 a Obr. 4.4.



Obr. 4.3 Hladká plastová trubička (a). Povrch hladké plastové trubičky ve zvětšení 8000x (b)



Obr. 4.4 Trubička s nehladkým povrchem (a). Jeden z možných druhů ne-hladkého plastového povrchu (b)

## 4.2 Opodstatnění použitelnosti dutých plastových vláken pro konstrukci tepelných výměníků

Jak bylo uvedeno, plastové materiály jsou dobře formovatelné do různých tvarů, což umožňuje rozličné konstrukce tepelných výměníků. Důvody, proč pro tyto aplikace zaujaly větší pozornost právě dutá plastová vlákna malých dimenzí, jsou popsány v dalším textu.

### 4.2.1 Malé dimenze a tloušťka stěn

Největším úskalím většího nasazení plastů jako vhodných materiálů pro tepelné výměníky je jejich nízká tepelná vodivost. Plasty jsou tepelné izolanty, a proto stěna z nich netvoří bariéru jen proti promíchání médií, ale také proti vedení tepla. Čím je tato bariéra tlustší, tím víc se průchod tepla přes ni blokuje. Proto se stěny teplosměnných ploch pro tepelné výměníky, jakožto i stěny dutých plastových vláken, vyrábí jako velmi tenké filmy.

Tepelný tok přenášený stěnou je závislý na rozdílu teplot médií, velikosti teplosměnné plochy a součiniteli prostupu tepla. Uvažujme v tomto případě pouze vedení stěnou (zanedbejme tedy vliv konvekce a zanášení). Pak pro zlepšení tepelného toku přes přepážku můžeme při daných teplotách médií zvětšit teplosměnnou plochu výměníku nebo zlepšit součinitel prostupu tepla. Zvětšení plochy stěn znamená navýšení celkového rozměru výměníku, větší spotřebu materiálu a tedy i ceny. Snaha je vždy o druhou variantu.

Uvažujme případ válcové stěny. Při zanedbání vlivu konvekce a zanášení je součinitel prostupu tepla roven

$$U_o = \left( \frac{D_o}{2k} \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right) \right)^{-1}. \quad (4.1)$$

Z uvedené závislosti vidíme, že snížit odpor stěny je možno použitím materiálu o vyšší vodivosti, zmenšením charakteristického rozměru a snížením poměru mezi vnitřním a vnějším průměrem (tedy tloušťky stěny):

$$\frac{1}{U_o} \uparrow = \frac{D_o \downarrow}{2k \uparrow} \ln \left( \frac{D_o \downarrow}{D_i \downarrow} \right). \quad (4.2)$$

Zlepšení tepelné vodivosti plastů se dá dosáhnout různými úpravami materiálu pomocí výplní. Tímto hlediskem se budeme v této práci zabývat později v kap. 5.1. Součinitel

prostupu tepla se ale dá zvětšit i použitím materiálů malých dimenzí o malé tloušťce stěny. Proto je snaha tvořit dutá plastová vlákna velmi malých dimenzí.

Pro materiály, u kterých se nedá zvýšit vodivost (či je to na úkor dalších vlastností) je odpor stěny hlavní překážkou lepšího přenosu tepla. Do jaké míry ovlivní tloušťka stěny součinitel prostupu tepla  $U_o$  pro válcovou stěnu z PP ( $k = 0,18 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) je uvedeno v Tab. 4.1 (vypočítáno dle vztahu (4.7) pro  $D_o = 0,72 \text{ mm}$ ,  $h_i = h_o = 4000 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,  $R_{fo} = R_{fi} = 0,00025 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ ).

Tloušťka stěny, $D_o/D_i$	Celkový součinitel prostupu tepla, $U \text{ [W m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{]}$
1,5	485
1,25	636
1,15	738

Tab. 4.1 Závislost součinitele prostupu tepla na tloušťce stěny pro výměníky z PP

Podívejme se nyní na konvektivní přenos tepla. Ke stanovení tepelného toku z nebo do povrchu je třeba znát součinitel přestupu tepla  $h$ . V praxi se určuje z bezrozměrných kritérií podobnosti. Pro přenos tepla je používána kritériální rovnice  $Nu = f(Re, Pr)$ , kde konvekce, charakterizována Nusseltovým číslem, je závislá na Reynoldsově čísle a vlastnostech tekutiny.

Nusseltovo číslo je poměr přenosu tepla konvekcí a vedením

$$Nu = \frac{\dot{q}_{konv}}{\dot{q}_{ved}} = \frac{h\Delta T}{k \frac{\Delta T}{L}} = \frac{hD}{k}. \quad (4.3)$$

Ačkoli je součinitel přestupu tepla přímo úměrný Nusseltovu číslu, vysoké  $Nu$  ještě nezaručuje výborný tepelný přenos. Součinitel přestupu tepla  $h$  se dá také zvýšit zmenšením charakteristického rozměru kanálu. Jak předpovídá teorie přenosu tepla, součinitel přestupu tepla u vnitřního plně vyvinutého laminární proudění roste s klesající plochou průtočného průřezu kanálu.

$$h \uparrow = \frac{Nu \uparrow \cdot k \uparrow}{D \downarrow} \quad (4.4)$$

Využití dutých plastových vláken malých průměrů a tloušťek stěn má svoje opodstatnění nejen z hlediska šetření materiálu a tím nákladů na výrobu. Použití malých dimenzí kanálů zlepšuje přenos tepla. Zmenšovat rozměry je možné jen do té doby, dokud nejsou ovlivněny mechanické vlastnosti materiálu. Zohlednit je třeba také vliv zanášení a tlakovou ztrátu při proudění úzkými kanály.

#### 4.2.2 Laminární proudění

V případě nucené konvekce v kanálech a turbulentním proudění je Nusseltovo číslo, a tedy i prostup tepla, přímo úměrný bezrozměrnému Reynoldsovu číslu

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu}. \quad (4.5)$$



Jedním ze způsobů zlepšení přenosu tepla je prohánění tekutiny výměníkem vysokou rychlostí. Nárůst rychlosti proudění je ovšem spojen s významným nárůstem tlakové ztráty výměníku. V laminární oblasti nezávisí Nusseltovo číslo pro přestup tepla konvekcí na vnitřní stěnu kanálu na rychlosti proudění. V případě stěn z polymerů není třeba dodržovat doporučení rychlosti kapaliny v potrubí nejméně  $1 \text{ m s}^{-1}$  kvůli omezení vzniku naplavenin, jelikož zanášení je potlačeno samotnými vlastnosti materiálu. Při laminárním proudění je dosaženo lepších přenosových charakteristik a výraznějšího prostupu tepla, jak je dokázáno srovnáním s turbulentním prouděním v [2]. Udržováním nízkých rychlostí proudění tekutiny v laminárním režimu se navíc dá omezit tlaková ztráta, která obecně se zmenšujícím průměrem kanálu roste.

### 4.3 Celkové srovnání tepelných vlastností polymerů a kovů

Největší slabinou polymerů jako materiálů pro výrobu tepelných výměníků je jejich nízká tepelná vodivost. Polypropylen má tepelnou vodivost okolo  $k = 0,18 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [14], hodnota pro nerez AISI 302 je  $k = 15,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [15]. Může se proto zdát nesmyslné uvažovat plasty jako vhodné pro konstrukci tepelných výměníků. Součinitel prostupu tepla  $U$  ovšem nezávisí pouze na tepelné vodivosti materiálu. Pro válcovou stěnu platí

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{1}{2\pi k L} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_i}, \quad (4.6)$$

kde  $A_i = \pi D_i L$ ,  $A_o = \pi D_o L$  [15]. Jednoduchou úpravou dostaneme vzorec pro celkový součinitel prostupu tepla

$$U_o = \left( \frac{D_o}{D_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{D_o}{D_i} \cdot R_{fi} + \frac{D_o}{2k} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + R_{fo} + \frac{1}{h_o} \right)^{-1}. \quad (4.7)$$

Proveďme jednoduché srovnání přenosu tepla tenkou vrstvou polypropylenu a stěnou z nerez o stejné tloušťce. Pro tento výpočet uvažujme potrubí malého průměru ( $D_o = 0,6 \text{ mm}$ ;  $D_i = 0,4 \text{ mm}$ ), součinitel přestupu tepla na obou stranách  $h_o = h_i = 4000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , odpory proti vedení tepla vrstvou znečištění  $R_{fo} = R_{fi} = 0,0002 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ . Dosazením těchto hodnot do vzorce (4.7) byl vypočítán celkový součinitel prostupu tepla:

$$U_o = 448 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ pro PP}; \quad (4.8)$$

$$U_o = 883 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ pro nerez}. \quad (4.9)$$

Vidíme tedy, že hodnota  $U_o$  je pro kovový materiál 2 krát větší než pro polymer. Rozdíl je pořád významný, oproti rozdílu v hodnotách tepelných vodivostí už ale není tak velký. Pro celkový přenášený tepelný tok stěnou platí dle [15].

$$\dot{q} = UA\Delta T_{ln}. \quad (4.10)$$

K dosažení stejného přenosu tepla stěnou z PP jako stěnou z nerez při stejném středním rozdílu teplot je tedy třeba dvojnásobné teplosměnné plochy.

Plasty lze pro zvýšení tepelného toku zpracovávat do vláken s tenčí stěnou bez újmy na pevnosti materiálu. Jejich povrchové vlastnosti jsou předpokladem menšího nánosu a tedy nižšího odporu vedení tepla vrstvou znečištění. Reálný poměr mezi součinitelem prostupu tepla pro válcovou stěnu z polymeru a kovu se tím ještě sníží. Nízká tepelná vodivost termoplastů je proto relativní parametr. Tento fakt je v kombinaci s vynikající chemickou

odolností příslibem k tomu, aby se plasty staly alternativním materiálem k produkci kompaktních tepelných výměníků.

Plastové materiály mají výrazně nižší hustotu než kovy (v tomto případě pro srovnání  $\rho_{pp} = 937 \text{ kg m}^{-3}$  [3],  $\rho_{nerez} = 8055 \text{ kg m}^{-3}$  [15]). Vidíme, že  $1 \text{ m}^2$  kovového materiálu je minimálně 8 krát těžší než  $1 \text{ m}^2$  plastu. Přitom kupní cena 1 kg kovové trubky je výrazně vyšší než náklady na nákup 1 kg trubiček z polypropylenu. Z této analýzy vyplývá, že i když je pro dosažení stejného přenosu tepla při použití inovativních plastových materiálů třeba více materiálu, vzhledem k jejich výrazně nižší hustotě a ceně jsou pořizovací náklady plastových výměníků nižší než těch z kovových slitin. Díky nízkým hustotám jsou konstrukce z polymerů lehké a dobře manipulovatelné.

## 4.4 Limity plastových materiálů a způsoby, jak jim předejít

V další kapitole se budeme zabývat určitými omezeními pro aplikaci polymerů jako teplosměnných ploch. Tepelné výměníky z plastů jsou použitelné pro nižší teplotu a tlak. Stěny z těchto materiálů mají nízkou vodivost a jejich povrch je špatně smáčivý. V úzkých kanálech vzniká vysoká tlaková ztráta. Porozumění těmto limitům a způsobů, jak se jim dá předejít, pomůžou při návrhu tepelných výměníků z plastů.

### 4.4.1 Omezená teplotní a tlaková odolnost plastů

Běžné polymery mají nízkou tepelnou odolnost. Nabízí efektivní řešení přenosu tepla pro teploty médií do  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  [1]. Pro použití za vyšších teplot ( $150\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) jsou využívány technické a inženýrské plasty. Vysokoteplotní aplikace vyžadují speciální polymery. Ty nejodolnější jsou mimořádně schopny vydržet teploty nad  $400^\circ\text{C}$  [1]. Z polymerů, které jsou běžně používány pro výrobu tepelných výměníků, má PP nejvyšší teplotu tání [2]. Novějším materiálem s výbornými vlastnostmi je PEEK. Kromě výborné chemické a mechanické odolnosti vyniká také dobrou tepelnou odolností. Jeho pracovní teplota je okolo  $220^\circ\text{C}$ . Potřeba vysokých teplot médií se dá omezit vhodnou volbou pracovních podmínek, zejména úpravou tlaku.

Malá tloušťka stěn teplosměnných ploch z polymerů souvisí s nízkým rozdílem tlaků mezi proudícími médii. Pevnost konstrukce je částečně zajištěna malými průměry a specifickými mechanickými vlastnostmi materiálu. Vyšší tlak by měl být udržován uvnitř trubiček. Zpevnit strukturu konstrukce výměníku se dá také zkrácením vzdálenosti mezi spoji, tedy kratšími plastovými vlákny. V případech, kdy jsou při použití požadovány vyšší tlaky, může tento problém vyřešit tlustší stěna vláken z materiálu vyztuženého výplněmi. Vhodnou výplní se kromě toho zlepší tepelná vodivost stěny [1].

### 4.4.2 Špatná smáčivost plastů

Plasty se jako materiály vyznačují nízkou povrchovou energií. Tato vlastnost z jejich povrchů dělá téměř nesmáčivé. V některých aplikacích je nízká smáčivost výhodou. Například při kondenzaci netvoří kapalina na povrchu film, ale kondenzuje ve formě kapiček. Povrch výměníku tak pojme více kondenzátu. Hladký povrch plastů navíc umožňuje kondenzátu volně stékat. Kondenzace po kapkách zlepšuje tepelnou vodivost stěn. Nízká povrchová energie je příznivý faktor také při problémech s tvorbou vodního kamene. Vodní kámen se tvoří při použití tvrdé nebo slané vody a ve výparnicích. Na hladkém nesmáčivém povrchu plastů je vznik zanášení tohoto typu značně omezený. Při použití výměníku typu vzduch – vzduch nezapříčiňuje rozdíl ve smáčivosti žádný rozdíl v proudění [1].

Pokud je požadována lepší smáčivost stěn výměníku, je možno toho dosáhnout vhodným ošetřením stěn z polymerů. Využívají se k tomu podobné metody jako v polygrafickém průmyslu. Nejrozšířenějším řešením je ošetření korónou. Obloukový výboj, který produkuje ozón, oxiduje materiál, což způsobuje změnu ošetřovaného povrchu. Další z používaných oxidačních povrchových metod je fluorace [1].

#### **4.4.3 Tlaková ztráta**

Udržovat nízkou tlakovou ztrátu je požadavkem tepelných výměníků jakékoli konstrukce. Nucené proudění médií kolem teplosměnných ploch si vyžaduje energii čerpadla či ventilátoru, sloužící k překonání tlakové ztráty. Plasty mají hladký povrch související s nízkým součinitelem tření, který tlakovou ztrátu snižuje. Použití velkého počtu vláken velmi malých průměrů je ovšem spojeno s velkou tlakovou ztrátou. Proto je při konstrukci tepelných výměníků třeba brát zvláštní zřetel na udržování optimálních rychlostí proudění vně i uvnitř vláken a na délku vláken.

#### **4.4.4 Nízká tepelná vodivost plastů**

Nejvýraznější rozdíl mezi plasty a kovy je v hodnotách součinitele tepelné vodivosti. Plasty jako tepelné izolanty mají měrnou tepelná vodivost 100–1000 krát nižší než kovové vodiče [2]. Jak již bylo popsáno výše, tepelný odpor proti vedení se dá snížit zmenšením dimenzí a tloušťek stěn teplosměnných ploch. Mimo to je možno změnit vlastní strukturu materiálu. Smíchání polymerů s vysoce vodivou výplní nebo vlákny může být ovšem na úkor mechanických vlastností a chemické odolnosti plastů, tedy na úkor výhod, kterými předchází kovové materiály. V další kapitole jsou popsány vlastnosti polymerů, používaných pro výrobu tepelných výměníků a metody, kterými se dá tepelná vodivost těchto materiálů zvýšit.



## 5 VLASTNOSTI PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ

Pro výrobu tepelných výměníků je dle [3] a [2] v současné době používáno několik druhů polymerů: PVDF (polyvinylidenfluorid), Teflon neboli PTFE (polytetrafluorethen), PP (polypropylen), PE (polyetylen), PC (polykarbonát), PPS (polyfenylsulfid), PPO (oxid polypropylenu), PEEK (polyetheretherketon). Všechny tyto materiály jsou vysokomolekulární termoplasty. Plasty ve srovnání s běžně používanými kovy vykazují malou pevnost, slabou odolnost proti tečení, nízkou tepelnou vodivost a vysokou tepelnou roztažnost [2]. Z tohoto důvodu se může zdát neopodstatněné uvažovat použití plastů v tepelných výměnících. Několik problémů při návrhu a výrobě dané mechanickými vlastnostmi nicméně předchází řada výhod jako vynikající odolnost vůči chemikáliím a nízká cena plastů.

Materiál	PP	PTFE	PPS	PEEK	PVDF	AISI 302
<i>Fyzikální vlastnosti</i>						
Hustota [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	932	2160	1700	1320	1780	7800
<i>Mechanické vlastnosti</i>						
Mez kluzu [MPa]	31,3	27,5	96,3	102	42,5	864
Tažnost [%]	158	362	4,47	30	65	26,6
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,44	0,496	1,63	4,48	1,8	196
<i>Tepelné vlastnosti</i>						
Tepelná vodivost [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	0,18	0,27	2,44	0,262	0,184	16,4
Max. provozní teplota (krátkodobě) [ $^{\circ}\text{C}$ ]	140	260	260	300		
Max. provozní teplota (dlouhodobě) [ $^{\circ}\text{C}$ ]	100	240	200	250	150	876
Minimální provozní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-30	-223		-50	-52	-165
Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]	163	327	285	335	165	1440

Tab. 5.1 Srovnání materiálových charakteristik PP s různými polymery a nerezí

Dutá vlákna na Obr. 4.1 jsou vyrobena z polypropylenu  $[\text{CH}_2 \text{CH}(\text{CH}_3)]_n$  (PP). Tento termoplast je průhledný; v závislosti na tloušťce může transparentnost materiálu přecházet až do lehce nažloutlé barvy. S několika výjimkami (aromatické uhlovodíky, silné kyseliny, trichloretylen, tetrachloretylen) vyniká velmi dobrou chemickou a mechanickou odolností. Špatná je ovšem odolnost proti UV záření. Tenkost plastových vláken s sebou nese relativně vysoké nebezpečí mechanického poškození. Riziko zamotání jednotlivých trubiček je do jisté míry redukováno kompaktností svazku. Svazky kapilár mohou být vystaveny větším silám v tahu. Materiál je recyklovatelný [16]. PP je netoxický, nebarvící a vykazuje výbornou odolnost proti korozi. Má vysokou teplotu tání (až  $165^{\circ}\text{C}$ ) [2]. Některé fyzikální, mechanické a tepelné vlastnosti tohoto polymeru ve srovnání s několika dalšími plasty a nerez ocelí AISI 302 jsou uvedeny v Tab. 5.1. Tyto hodnoty byly shromážděny z publikací [17], [3] i z internetových databází [18].

Pro konstrukci tepelných výměníků jsou důležité jak tepelné, tak mechanické vlastnosti materiálů. Odlišná povaha plastů se musí zohlednit při návrhu výměníků z těchto materiálů.

Větší pozornosti, věnované zapojení polymerů do konstrukcí tepelných výměníků, stále brání jejich nízká tepelná vodivost. Způsoby snížení tepelného odporu úpravou materiálu se zabývá podrobně [3]. V další kapitole je souhrn některých z nich.

## 5.1 Způsoby zlepšení tepelné vodivosti polymerů

Tato práce se dosud zabývala způsoby zvýšení tepelného toku skrz stěnu z plastů vhodným návrhem geometrie teplosměnných ploch. Tepelný odpor je možno snížit také úpravou vnitřní struktury termoplastů. Tepelná vodivost polymerů může být zvýšena pomocí různých vodivých výplní. Kompozitní materiály umožňují dosažení výjimečných vlastností, které monolitické materiály neposkytují. Tím se stávají zajímavými pro tepelně přenosové aplikace. Je ovšem třeba věnovat pozornost tomu, aby výplně negativně neovlivnily cenu, vlastnosti a chemickou odolnost materiálu.

Kompozity jsou složeny ze dvou nebo více materiálů. Obvykle se jedná o výztuž nebo výplň, sloužící ke zpevnění polymerové matrice. Výztuži bývají různé vlákna, částice nebo destičky. Výsledné vlastnosti materiálu se odvíjí od jednotlivých složek. Zvolením vhodného procesu, základního materiálu a výplně se dá dobře dosáhnout požadovaných charakteristik.

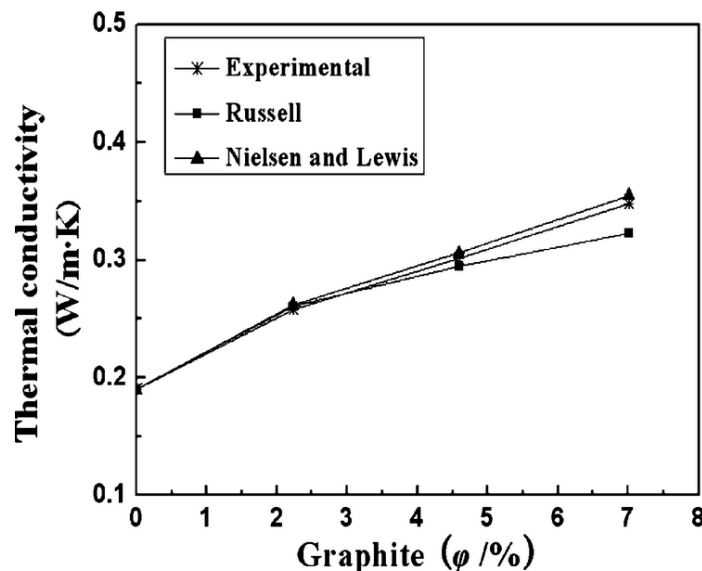
Tepelnou vodivost polymerů je možno zvýšit přidáním kovových nebo keramických částic. Vyztužení částicemi stříbra, mědi, hliníku, oxidu hlinitého, nitridu hlinitého nebo nitridu bóru zlepšuje tepelnou vodivost polymeru až na  $4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Příkladem je studie kompozitu polypropylenu s téměř 60% obsahem hliníku. Kulové částičky Al o velikosti  $8 \mu\text{m}$  zlepšily hodnotu tepelné vodivosti na  $2,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , stejný obsah větších částic ( $44 \mu\text{m}$ ) až na  $4,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Přestože se jedná o téměř 20% zvýšení vodivosti, pro širší využití v tepelně přenosových aplikacích je tepelný odpor takovýchto kompozit stále velký. Přidáním vhodných částic se dá výrazně zvýšit pevnost v tahu a omezit tažnost materiálu.

Vláknité kompozity polymerů nejčastěji obsahují sklo, uhlík nebo aramid. Skelné vaty, tj. plasty vyztužený různě orientovanými skleněnými vlákny v koncentracích 40–70 %, jsou pevné a korozi odolné. Cenově nákladnější variantou jsou kompozity vyztužené vlákny uhlíku. Vynikají výbornými vlastnostmi, jako je nízká hustota, velká pevnost a únavová odolnost a nízká tepelná roztažnost. Tento materiál výborně odolává korozi a je elektricky vodivý. S uhlíkovými vlákny je možno dosáhnout kompozitu o hustotě  $1,66 \text{ kg cm}^{-3}$  a tepelné vodivosti  $245 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . S použitím grafitových vláken byl dokonce vytvořen materiál s vodivostí blízkou mědi ( $370 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) při navýšení měrné hmotnosti na  $1900 \text{ kg m}^{-3}$ . Zajímavým materiálem je kompozit polykarbonátu, pro který se kombinací příměsí sazí, syntetického grafitu a uhlíkových vláken vhodného množství podařilo zvýšit vodivost základního polymeru z  $0,23$  na  $20,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Největší zásluhu na nárůstu tepelné vodivosti mají částice syntetického grafitu, následované uhlíkovými vlákny. Vytvořit kompozit kombinací těchto částic je pak jeden z nejlepších způsobů zlepšení tepelných vlastností polymerů. Ještě lepších vlastností materiálu dosahují kompozity s nanočásticemi uhlíku (zaznamenaná hodnota tepelné vodivosti  $695 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  při hustotě kompozitu  $1500 \text{ kg m}^{-3}$ ). Takové materiály vynikají navíc výbornou pružností a pevností. Účinná metoda produkce nanočásticových kompozit si vyžaduje další výzkum. Jinou metodou je použít polymery jako výplň uhlíkové nebo grafitové báze.

Metody zvýšení vodivosti polymerů jsou shrnuty v [1]. Nejjednodušší a nejlevnější výplně jsou saze. Díky této příměsi je možno tepelnou vodivost materiálu až zdvojnásobit. Množství přidané výplně se ovšem nesmí přehánět, jinak utrpí pevnost a flexibilita produktu. Další možností zlepšení je přimíchání grafitového prášku nebo částic nitridu bóru. Tato varianta v kombinaci s polymery se strukturou kapalných krystalů (LCP) může dosáhnout tepelné vodivosti až  $17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , což převyšuje vodivost nerezi. V [19] zkoušeli vliv

aromatické struktury a výplní z křemíkového prášku, skla nebo uhlíkových vláken na vlastnosti LCP. U modifikované LCP s aromatickou strukturou se ukázala nižší chemická odolnost, ale naopak vysoká mechanická odolnost.

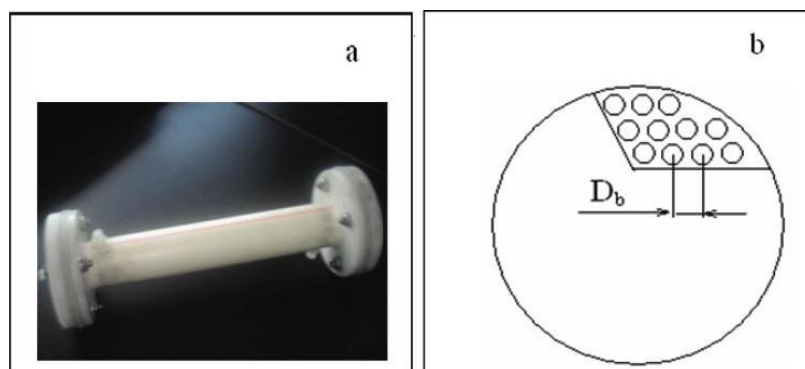
Aplikovat kompozitní materiály pro výměník z dutých plastových vláken se pokusili v [20]. Byly srovnány tepelně přenosové vlastnosti dutých vláken z polypropylenu a PP s příměsí grafitových částic. Zvýšení tepelné vodivosti polypropylenu grafitovým vyztužením bylo popsáno různými modely i experimentálně změřeno. Výsledky jsou graficky znázorněny na Obr. 5.1. Je patrné, že i přidáním malého množství grafitových částic (7 % z celkového objemu) lze navýšit tepelnou vodivost materiálu téměř dvojnásobně. Současně bylo sledováno ovlivnění elasticity materiálu. Pokud je množství příměsi menší než 5 % a částičky jsou dobře rozmístěny v bázi, pevnost dutých vláken v tahu se s přibývajícím obsahem grafitu mírně zvyšuje, přičemž se tažnost nemění. Pokud je koncentrace výplně vyšší než 5 %, pevnostní charakteristiky výrazně klesají (při 20% obsahu až 4 krát oproti čistému polymeru) v důsledku nedostatečného rozptýlu částic v matrici.



Obr. 5.1 Srovnání modelu a experimentálních dat tepelné vodivosti kompozitu PP v závislosti na obsahu grafitových částic  $\phi$  v % [20]

Dále byly v práci testovány zařízení s dutými vlákny z různých materiálů: vlákna s čistého polypropylenu ( $\rho = 910 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\lambda = 0,19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) a 3 kompozity s rozdílným obsahem (5 %, 10 % a 15 %) grafitových částic (průměrná velikost  $15 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 2100 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\lambda = 197 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). Ke zlepšení struktury materiálu a rozptýlu grafitu v matrici byl do kompozitu přidáván ještě modifikátor PP-g-MA v koncentracích 8 %, 10 % a 12 %. Výplně se také mírně zlepšila tepelná stabilita vláken.

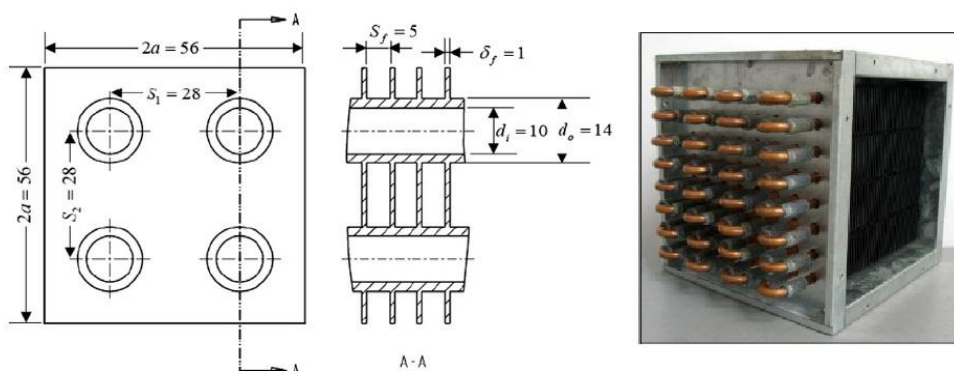
Tloušťka stěn vláken byla  $70 \mu\text{m}$ , vnitřní průměr  $0,73 \text{ mm}$ . Konce asi  $30 \text{ cm}$  dlouhých vláken byly uchyceny v plášti bez přepážek o průměru  $3,2 \text{ cm}$ . Tento plášť obsahoval asi  $300$  vláken s roztečí okolo  $1 \text{ mm}$ . Výsledný design výměníku je na Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Výměník s PP dutými vlákny, studovaný v [20]

Ve studii byl zkoumán především vliv rozdílných materiálů vláken a rychlostí proudění na celkový tepelný tok stěnou. Jako teplotné médium byla na obou stranách použita voda o vstupních teplotách 85 a 18 °C, proudící výměníkem rychlostmi 0,25–0,7 m s<sup>-1</sup>. Výsledky ukazují, že efektivita přenosu tepla se dá lehce zvýšit rychlejším prouděním tekutiny, zejména uvnitř kapilár. S větším obsahem grafitu v kompozitu je tento nárůst výraznější. Lepších tepelných charakteristik bylo dosaženo pro horké médium uvnitř trubiček a pro studené médium na vnější straně v plášti. Důvodem je nižší viskozita teplejší vody. Pro kompozit s 15% obsahem grafitu tak bylo dosaženo celkového součinitele prostupu tepla 1228,7 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> (při rychlosti proudění vody 0,5 m s<sup>-1</sup>), což představuje pětinasobný nárůst oproti vláknům z čistého PP. Pro celou jednotku výměníku to pak znamená 1,1·10<sup>6</sup> W m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>. Tato hodnota je dokonce 1,5 krát větší než pro běžně používané kovové plášťové výměníky. Vytvořením kompozitu se dá přenos tepla u plastových tepelných výměníků výrazně zefektivnit.

Modifikovanými typy polypropylenu, ze kterých byly konstruovány výměníky s žebrovanými trubkami, se zabývali v [4]. Použitím žebrování se dá dobře navýšit velikost teplosměnné plochy. Kromě toho je použití žebor vhodné pro procesy vyžadující vysušení vzduchu. Použitá žebra jsou plastová vlákna malého průměru. Rozměry výměníku byly zvoleny dle parametrických studií o optimální tloušťce a výšce žebor a mezižebrovém prostoru. Geometrické rozměry a výsledná podoba výměníku jsou na Obr. 5.3. Výměník má celkové rozměry 240×240×245 mm s 8×8 kanály. Vnitřní stranou protékala voda, druhé médium byl pak vzduch, křížově proudící mezi žebry.



Obr. 5.3 Výměník s žebrovanými trubkami, studovaný v [4]

Na výrobu takového tepelného výměníku byly použity dva typy modifikovaného polypropylenu o tepelné vodivosti 2,3 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, resp. 16,5 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Další vlastnosti těchto

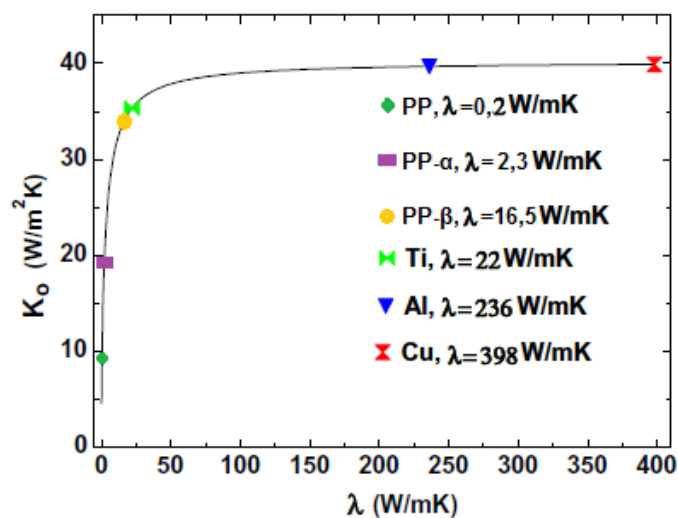


polymerů jsou v Tab. 5.2. Pro srovnání byl testován i výměník z běžného PP. V práci je tedy sledováno chování tří plastových výměníků z materiálů o různé tepelné vodivosti.

Materiál	Tepelná vodivost [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	Hustota [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	Modul pružnosti v ohybu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]
PP - $\alpha$	2,3	1240	5410	37	5620	22
PP - $\beta$	16,5	1500	8274	52	6206	29

Tab. 5.2 Vlastnosti modifikovaného polypropylenu [4]

Výsledky ukazují, že použitím modifikovaného materiálu se dá významně navýšit přenos tepla. Experimentální výsledky se shodují s předpověděnou závislostí celkového součinitele prostupu tepla na tepelné vodivosti materiálu, vycházející ze vztahu pro žebrované výměníky. Graf této závislosti byl vytvořen i pro tepelné výměníky z kovů, konkrétně titanu, hliníku a mědi, viz Obr. 5.4. Ze srovnání vyplynulo, že pokud je tepelná vodivost vyšší než  $15 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ , může být dosaženo více než 95 % výkonu tepelného výměníku z titanu a 84 % z výkonu hliněného nebo měděného výměníku. Tyto poměry jsou v [4] uvedeny přesně v tabulce. Závislost na Obr. 5.4 dává také návod pro volbu materiálu při konstrukci takového žebrovaného výměníku. Vidíme, že na začátku je křivka velmi prudká a volba materiálu má tedy na přenos tepla velký vliv. Zvyšovat tepelnou vodivost příliš nad  $15 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  je ovšem poměrně zbytečné.



Obr. 5.4 Teoretická závislost mezi celkovým součinitelem prostupu tepla a tepelnou vodivostí u žebrovaných výměníků [4]

Zlepšit tepelné vlastnosti stěny se snažili i v novém typu plášťového tepelného výměníku v [21]. Plastová stěna vláken trubiček obsahovala mikropóry. Do pórovité struktury vlákna se tak dostávají molekuly kapaliny, které díky poměrně dobré tepelné vodivosti kapalin zlepšují přístup tepla stěnou. Vodivost stěny tak je 3–4 krát větší než by byla pro samotný polymer [11]. Přesto je zajištěno dobré oddělení pracovních médií stěnou. Pro výměník podobné konstrukce s polypropylenovými vlákny [11] bylo dosaženo součinitele prostupu tepla  $2100 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  při poměrně tlusté stěně vláken. Pro vlákna bez úpravy

vnitřního povrchu byly maximální hodnoty součinitele prostupu tepla 1900–2000 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, což je stále vysoká hodnota, blížíci se limitnímu součiniteli (bez uvažování konvekce) 2600 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> pro tento typ vláken z PP. Výsledky pro vlákna z PEEK byly téměř stejně dobré. Lepšího součinitele prostupu tepla bylo dosaženo jen s použitím pórovitých nesouměrných PES kapilár, jejichž vnitřní průměr byl pokryt souvislými vrstvami polyamidu a silikonu tak, aby odolával vlhkosti.

V závěru této sekce je uvedena tabulka celkových součinitelů prostupu tepla pro dutá vlákna z polypropylenu, které byly do této doby dosaženy a publikovány. Tab. 5.3 vychází z přehledu v [20]. Veličina CVU vyjadřuje celkovou vodivost na jednotku objemu (overall conductance per unit volume).

<i>Typ tepelného výměníku</i>	U [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	CVU [W m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
deskový (desky tloušťky 0,4 mm)	5678	6·10 <sup>5</sup>
plášťový z vysokoteplotního nylonu [5]	1100	6·10 <sup>5</sup>
dutá vlákna z PP [5]	1314	1,8·10 <sup>6</sup>
deskový tepelný výměník z PEEK [5]	900	1,03·10 <sup>6</sup>
dutá vlákna na bázi PP (M4) [20]	1228,7	1,1·10 <sup>6</sup>
HEPP3 (dutá vlákna na bázi PP) [11]	2076	2,9·10 <sup>6</sup>
HEPEEK2 (dutá vlákna na bázi PEEK) [11]	1929	1,0·10 <sup>6</sup>
Membrána 041938 (potažená dutá vlákna) [11]	1100	3,5·10 <sup>6</sup>
PES (potažená dutá vlákna) [11]	2109	1,5·10 <sup>6</sup>

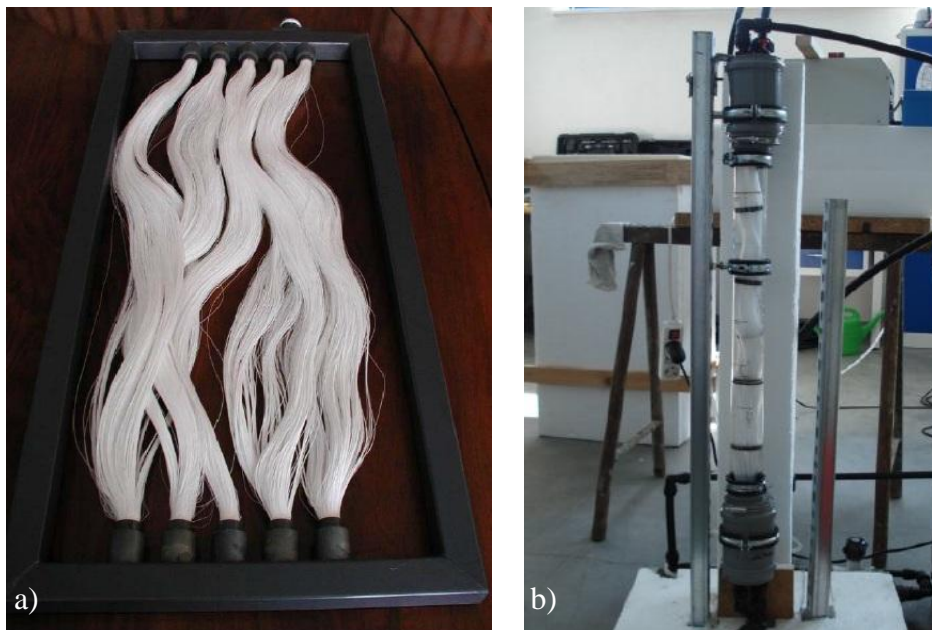
*Tab. 5.3 Srovnání v literatuře uváděných tepelně přenosových vlastností pro plastové výměníky typu voda-voda nebo horký lák-voda [20]*

V několika úvodních kapitolách byl představen potenciál využití plastových materiálů a způsoby, jak dosáhnout dobrých tepelných charakteristik takovýchto materiálů pro geometrie dutých plastových vláken. Volba vhodných teplosměnných ploch ovšem ještě nezaručuje dobrý výkon výměníku. Důležitým faktorem je také vhodné uspořádání těchto vláken do okolního prostoru a zajištění okolního proudění k účinnému přenosu tepla. Přehledem konstrukčních řešení, která zabraňují shlukování vláken a tím snižování výkonu výměníku, se zabývá další kapitola.

## 6 ZPŮSOBY FIXACE A SEPARACE VLÁKEN

Přes velký potenciál dutých polypropylenových vláken k využití pro přenosu tepla v řadě nízkoteplotních operací nejsou výměníky s nimi stále konstruovány. Problémem pro prosazení v průmyslové praxi je absence funkčních návrhů. Největším nedostatkem je vyřešení rozložení vláken v prostoru a separace kapilár, umožňující přístup pracovní látky ke všem plochám. V literatuře najdeme velmi málo článků, zabývajících se touto problematikou. V poslední době těchto vědeckých prací přibývá, nicméně se zabývají spíše vyhodnocením vlivu materiálu a geometrických proporcí teplosměnných ploch z polymerů na přenos tepla. Účinné zafixování vláken ve výměníku je problémem, kterým je třeba se také zabývat.

Výhodou výměníků s dutými vlákny je velká teplosměnná plocha na malém objemu. Účinný přenos tepla je ovlivněn jak rozměrem vláken a tloušťkou stěny, tak uspořádáním trubiček v prostoru. Rozložení ovlivní jednak velikost tepelného toku, tak okolní proudění. Vlákná mají samovolnou tendenci se shlukovat. Hlavní proud okolní tekutiny se pak nerozdělí a účinný přenos tepla bude probíhat jen přes omezený počet kapilár. Aby byl povrch dutých vláken účinně využit k tepelné výměně, je snaha o rovnoměrné rozložení vláken. Optimální rovnoměrné rozložení může být v několika řadách nad sebou nebo šachovnicově. Tyto konfigurace jsou pouze teoretické a s flexibilní povahou dutých vláken je není možné dostatečně dobře dosáhnout. Optimalizovat počet vláken v účinném průřezu je jedním z úkolů. Velký počet kapilár s sebou nese velkou teplosměnnou plochu. Ta ovšem není tak účinná při přílišném nahuštění vláken, kdy se obtékající látka nedostane ke všem povrchům trubiček. Velká hustota vláken zvyšuje tlakovou ztrátu. Zohlednit je také třeba poměr tepelný výkon vs. spotřeba materiálu.



Obr. 6.1 a) Několik svazků dutých vláken uchycených v rámu s přesahem [22]; b) Sestava experimentu k měření svazku dutých vláken rozdělených rozpěrkami před zaizolováním [16]

Povrchová dostupnost mikrovláken je vždy omezená. Významně závisí na tom, jak je svazek sestaven. Vlákná mohou být zcela propnutá nebo uchycena volně (Obr. 6.1a). Při zcela propnutých vláknech je proudění mezi vlákny omezené. Výraznější je mechanické namáhání u spoje, zejména v případě křížového proudu. Pokud jsou vlákna uchycena s určitým přesahem, mají větší tendenci se shlukovat. Jednou z možností zabránění shlukování trubiček

je rozdělení svazku tisíců vláken do řady menších podsvazků. Při menším počtu kapilár může být separace a udržení rovnoběžného rozložení vláken jednodušší. Celková konfigurace výměníku by pak byla vytvořena ze vzájemného uspořádání těchto podsvazků [23]. Takového rozdělení je možno dosáhnout například pomocí různých rozpěrek a přepážek (Obr. 6.2). Implementace prvku tohoto typu do tepelného výměníku ovšem významně zvyšuje tlakovou ztrátu a podporuje vznik zanášení. Navíc hrozí poškození těmito prvky a snižuje se flexibilita vláken.



Obr. 6.2 Oddělení kapilár pomocí rozpěrky [16]

Jinou možností jsou nakadeřená vlákna. Jedná se o svazek mikrovláken, která nejsou rovná, ale zvlněná. Tento kadeřavý svazek vyplňuje prostor mezi spoji konců svazku daleko rovnoměrněji. Při zapojení takového svazku podélně do pláště jsou navíc vlákna nastavena částečně příčně ke směru proudu pracovní látky v plášti. Příklad svazku nakadeřených vláken je na Obr. 6.3). Aplikace takového uspořádání si vyžaduje laboratorní testování.

Vzájemný směr proudění je další hledisko, ovlivňující množství přeneseného tepla. Testovány byly jak konfigurace s tekutinou proudící na vnitřní i vnější straně vláken ve stejném směru, v protiproudu a také při křížovém obtékání. Z hlediska separace vláken je nejefektivnější protiproud [23].

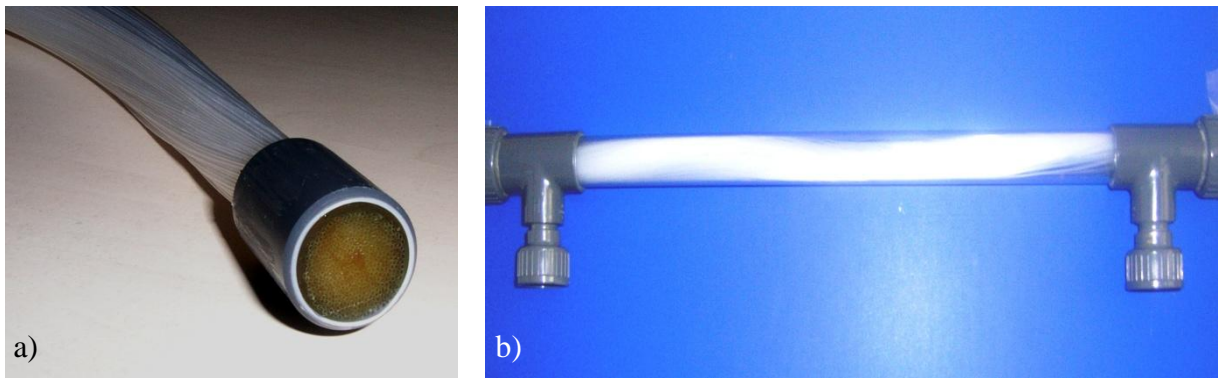


Obr. 6.3 Nakadeřená vlákna [22]

První tepelné výměníky s dutými vlákny byly testovány a popsány v [5]. Obsahovaly 35 nebo 9 dutých vláken z PP (vnitřní/vnější průměr 420/575  $\mu\text{m}$ ) aktivní délky okolo 20 cm. Konce mikrovláken byla zasazena do dvou spojů pomocí epoxidové pryskyřice. Ke zkvalitnění spoje byl vnějšek vláken ošetřen kyselinou. Spoje pak byly zasazeny do FEP potrubí (vnější průměr 7,6 mm), tvořící plášť. Pracovní médium na straně pláště byla voda

nebo glycerol, uvnitř trubek voda nebo denaturovaný alkohol. Proudění výměníkem bylo ve všech případech podélné. Stejní autoři prezentovali výměníky s dutými vlákny z PP shodných dimenzí nebo s vlákny z PEEK (150/360  $\mu\text{m}$  vnitřní/vnější průměr) s konci uchycenými do sběračů [3]. Celkový obsah teplosměnné plochy vláken byl 1500  $\text{m}^2$ . V podstatě se jedná o plášťové výměníky bez přepážek s délkou pláště 11,8 cm a průměrem 2,3 cm. Na třech modelech testovali křížové i souprouté uspořádání.

Vliv příměsí grafitových částic na tepelnou vodivost polypropylenu byl testován také na modelu výměníku s dutými vlákny [20]. Laboratorní výměník obsahoval téměř 300 vláken vnějšího průměru 734  $\mu\text{m}$  a aktivní délky necelých 29 cm v plášti o průměru 3,2 cm (Obr. 5.2). Roku 2007 byla v Německu publikována práce o testování výměníku s dutými vlákny rozdělenými pomocí rozpěrek. Plášť výměníku bylo 800 mm dlouhé potrubí z organického skla (vnitřní průměr 46 mm). Plášť byl zaizolován 10 cm vrstvou polystyrenu. Vlákna jsou rozložena lineárně a pro lepší přenos tepla a rovnoměrné rozložení uchycena na několika místech do rozpěrek (Obr. 6.1b). Vnitřkem vláken proudila teplá voda, pláštěm pak studená voda protiproudem. Aktivní délka vláken byla 710 mm, vnější průměr 310  $\mu\text{m}$  a tloušťka stěny kapilár 16  $\mu\text{m}$ . Svazek se skládal z 1400 mikrovláken s konci zalepenými v PVC trubce (29 mm dlouhé o průměru 20 mm).



Obr. 6.4 Zalití svazku 1000 mikrovláken; b) Nakadeřená vlákna [13]

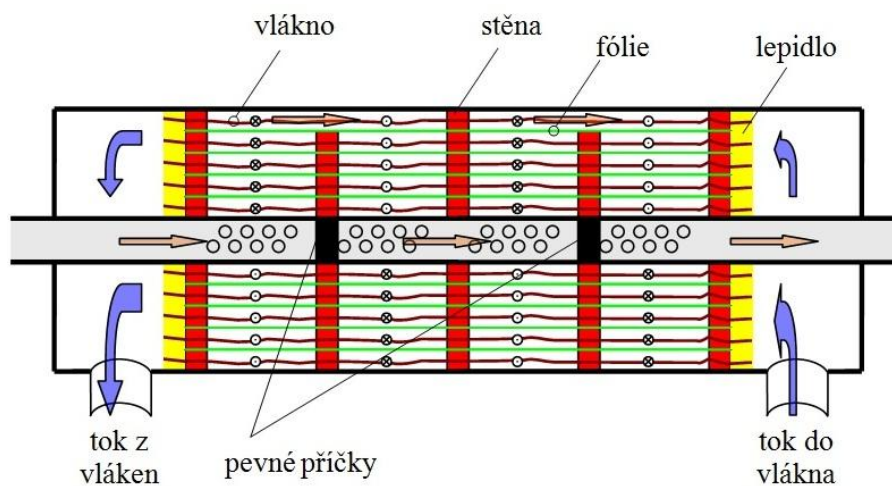
Roku 2009 provedl Galík na modelech výměníků s dutými vlákny sérii asi 50 měření [13]. Objektem zkoumání byl svazek obsahující 300–1400 kusů mikrokapilár s hladkým i porézním povrchem, jejichž konce byly spojeny vlepením do polyuretanové trubky o poloměru 20 mm (takový spoj je zdokumentován na Obr. 6.4a). Počet vláken přitom závisel na rozměru zvolených vláken. Vnější průměry kapilár byly v rozmezí 0,18–0,65 mm. Délka byla pro všechny přibližně stejná (700 mm). Takto vytvořený svazek byl pak vkládán do různých těles, tvořících plášť výměníku. Vlákna byla v modelech mírně propnutá nebo uchycena z přesahem 0–6 % a byl měřen vliv uvolnění na charakteristiky zařízení. Testována byla jednoduchá konstrukce výměníku s pláštěm vytvořeným z PVC potrubí o průměru 20 mm (Obr. 6.4b). Proudění v něm bylo protiproudé, vstup tekutiny do pláště boční, nebo tangenciální. Nejlepší dosažené parametry a k tomu potřebné provozní podmínky pro zařízení typu voda – voda a voda – vzduch jsou uvedeny v Tab. 6.1. Dále bylo zjištěno, že nejvýhodnější výsledky dávají vlákna, pokud je jejich přesah nad minimální délku 4 %. Problémem takového plášťového výměníku bylo, že vlákna byly strhávány proudem tekutiny v plášti a ucpávaly výtokový otvor. Tangenciální vstup byl volen za účelem zvětšení víření, ale způsoboval zatočení vláken, která se pak stahovala k sobě ve spodní části výměníku, takže se toto řešení ukázalo jako nevýhodné. Ke zrovnoměření proudění a distribuce mezi vlákna se u bočního kolmého řešení vkládala do vstupního potrubí trubička. Celkově bylo ale

problémem u takto řešené jednoduché plášťové konstrukce špatné rozložení vláken po průřezu pláště. Proto také obtékání vláken a využití teplosměnných ploch nebylo ideální. K vyřešení oddělení vláken od sebe byla použita lepicí páska a různé drobné předměty. Takové řešení ale stále umožňuje volný pohyb a kmitání vláken v proudu.

Typ výměníku	$V_t$ [l/hod]	$V_{sh}$ [l/hod]	$\Delta p_t$ [kPa]	$\Delta p_{sh}$ [kPa]	$k$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$Q$ [J s <sup>-1</sup> ]
voda – voda	450	270	150	21	1710	30	4450
voda – vzduch	14500	16500	85	17	115	31	130

Tab. 6.1 Naměřené parametry výměníku typu kapalina – kapalina a vzduch – kapalina. Protiproudý plášťový výměník se svazkem 300 vláken o průměru 0,5 mm v 200 mm plášti [13]

Pro zlepšení parametrů proběhly dále v [13] testy složitější konstrukce. Postup výroby byl následující: Základem pláště byla opět trubka z PVC. Do ní bylo vyvrtáno přibližně 100 děr s průměrem 4 mm. Do každé druhé jsou vlepeny těsné příčky tak, aby byl všechn tok přes díry odkloněn do kanálu. Kanál se nachází na folii a je tvořen oboustranně lepicí páskou, ukládanou ve vrstvách mezi polypropylenová vlákna. Takto vytvořená folie se sroluje kolem PVC trubky (20 mm) a vloží do dalšího potrubí z PVC (50 mm). Schéma tohoto zařízení je na Obr. 6.5. Konstrukce je zajímavá nejen z hlediska vyváženého tepelného toku. Sestavení je však finančně náročnější a maximální naměřená hodnota součinitele prostupu tepla je nižší než v případě jednoduchého plášťového výměníku. Aby mohl být takový výměník účinně využit, je třeba jej ještě modifikovat.



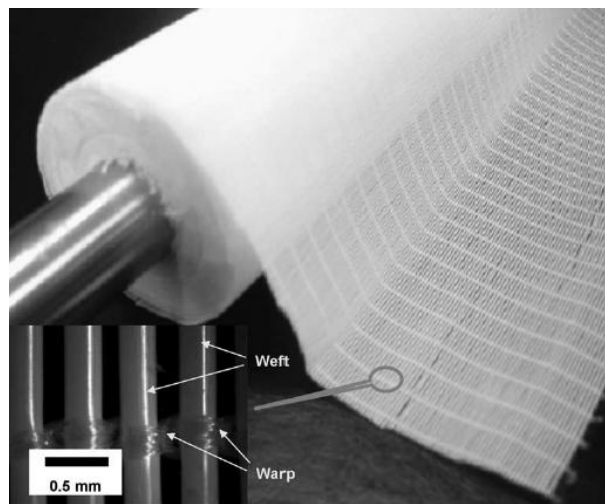
Obr. 6.5 Spirálový výměník s fólií a přepážkami v podélném řezu [13]

Zafixování ohebných plastových trubek pomocí držáků je popsáno v patentu [24]. Vlákna jsou průměru 2–5 mm, na koncích připojena do sběrných trubek. Držáky slouží k udržování vzájemného odstupu mezi trubkami a vytvoření jakési rohože. Tyto úchyty jsou posíleny výztuhami. V jiném patentu [25] byl zmíněný držák předveden jako tvarovaná část s drážkami ve stanovených intervalech, do kterých se zapojují plastová vlákna. Rohožový tepelný výměník s plastovými kapilárami se používá například do klimatizačních jednotek. Taková jednotka byla uvedena v [26]. Sestává z pláště, rozdělovací a sběrné trubky a mezi nimi probíhajícími kapilárními trubkami, spojených do minimálně jedné kapilární rohože.

Kontrolováno je ochlazení nebo ohřátí na straně trubek. Pláštěm proudí kapalné nebo plynné médium. Formováním rohoží pomocí řasení a navíjení do hranatých tvarů, sloužících decentrální klimatizaci a odvlhčení vzduchu, se zabývá [27].

Tepelný výměník, ve kterém je kapalina vedena kapilárami a kapiláry jsou smáčeny kapalinou nebo hydrofobicky sorpčním roztokem, je prezentován v [28]. Kapilární trubky jsou plastové rozměrů 0,5 – 5 mm. Kapiláry mají hydrofilní nebo vodu rozptylující povrch s kontaktním úhlem  $< 20^\circ$ . Vzduch teče kolem kapilár v protiproudu. Pro klimatizaci jsou doporučeny minimálně dvě jednotky tohoto typu. V první je vzduch ohříván, na straně trubek současně kondenzuje voda. Kondenzát je veden sorpčním povrchem do druhého výměníku, kde se odpařuje při chlazení oběhového média a je pak odváděna spolu s ohřátým vzduchem do ovzduší. Pro tuto sestavu je udávána dobrá účinnost. Další zajímavostí je sluneční kolektor k přípravě teplé vody na principu textilních technologií (tkaní, pletení), sestávající se ze tří výrobou spojených materiálů [29]. Je tvořen vrchní vrstvou, která je přes spojovací body spojena s nosnou vrstvou. Mezi těmito vrstvami je zapracována ohebná hadice s teplotou kapalinou (kapiláry, mikrohadičky, ohebné turbky).

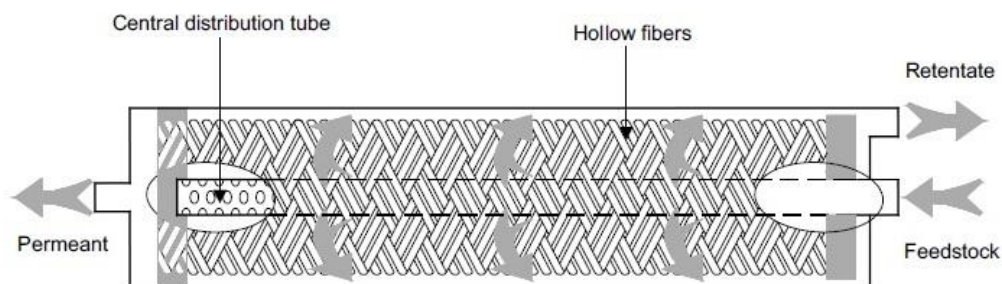
Dutá vlákna s polopropustnou stěnou se využívají k oddělení plynů. Stěna kapilár zde slouží jako membrána, která umožňuje průchod určitým částicím z jedné tekutiny do druhé. Tento proces probíhá bez zahřátí pracovní látky; hnací silou pro průchod složky tekutiny skrz selektivně propustnou přepážku je zde tlak. K separaci plynů dochází na základě různé velikosti molekul. Přestože je tato aplikace dutých vláken odlišná od konceptu přenosu tepla u tepelných výměníků, některé faktory mají oba procesy společné. Jsou jimi snaha o účinný přenos skrz stěnu vláken a efektivní proudění okolo kapilár. Článek [23] uvádí výborný přehled konstrukcí zařízení, sloužících k separaci tekutin membránami dutých kapilár. Díky podobné geometrii vláken se můžeme prací inspirovat při hledání účinného způsobu oddělení vláken a fixace svazků.



Obr. 6.6 Model s tkanými dutými vlákny okolo centrálního distribučního potrubí pro separaci plynů [23]

Dutá vlákna v modulech pro membránovou filtraci jsou samonosná s polopropustnou stěnou z plastického materiálu. Jejich průměr je v rozsahu 0,2–2,5 mm. Membránový modul může obsahovat až 10000 takových vláken. Jsou uspořádány do otevřených struktur, umožňujících udržet jejich jednotnost i při změnách tlaku. Výhodou je velký poměr povrchu membrán/objemu zařízení. Díky těmto výhodám se modulům z dutých vláken dává ve většině případů přednost oproti deskovému nebo vinutému uspořádání membrán. Moduly s dutými

vlákna mohou mít rozdílnou konfiguraci v závislosti na aplikaci, ve které jsou použity. Všeobecnými požadavky jsou odolnost vůči provozním teplotám, tlakům a chemickým reakcím a dlouhá životnost. Vlákna mohou být rozložena rovnoběžně nebo spirálovitě, měla by ovšem vyplňovat průřez pláště rovnoměrně s hustotou 45–60 % obsahu účinného průřezu. Proudění může být souproudé, protiproudé nebo křížové s distribucí pracovní látky do stěny nebo čelní strany pláště. Nejběžnější konfigurace je vyplnění prostoru pláště volnými rovnoběžnými vlákny, uchycenými na obou koncích do trubkovic. Komerčním příkladem je protiproudý typ Mansanto pro separaci vodíku. Plášť modulu je 3 m dlouhý o vnitřním průměru 0,1 m. Modul obsahuje 20 000 kapilár o vnějším průměru 0,45–0,54 mm. Navržen je pro teplotu teplota plynu 30°C.

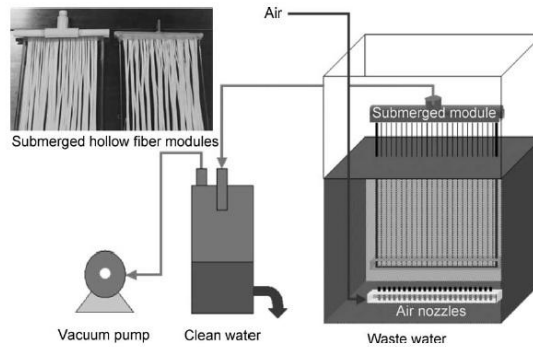


Obr. 6.7 Spirálovitě vinutá vlákna okolo centrální trubky pro přívod látky a separaci plynu [23]

Účinnou modifikací se zapojením radiálního křížového proudění je model obsahující centrální děrované potrubí většího průměru pro přívod suroviny. Tímto je dosaženo účinnější distribuce pracovního média a omezeno shlukování vláken. Aparát je používán spíše pro separaci kapalin než pro plyny. Přiblížit se vinutému modelu je možno se svazkem pletených dutých vláken. Vlákna nejsou v plášti rozložena individuálně, ale uspořádána paralelně, tvoříc jakousi tkaninu (Obr. 6.6). K zafixování kapilár vedle sebe jsou příčně přetažena osnovou. Takto vytvořená tkanina je omotána kolem centrálního potrubí, sloužícího k radiálnímu šíření pracovní látky. Pro tento aparát byl zaznamenán desetkrát větší přenos látky než u běžných modelů s dutými vlákny. Především soustředování proudění lze pomocí přepážek. Možností zefektivnění přenosu látky jsou tkaniny podporující vznik turbulencí. Pro separaci plynu jak z tekutiny, tak z jiného plynu, může být použita kazeta s dutými vlákny spirálovitě obtočenými kolem centrální distribuční trubky. Vlákna jsou položena v několika řadách na sobě a vinuta v každé vrstvě střídavě v opačném směru. Tímto způsobem tvoří jednotlivé vrstvy mezi sebou jakési vložky, což omezuje shlukování proudů (Obr. 6.7).

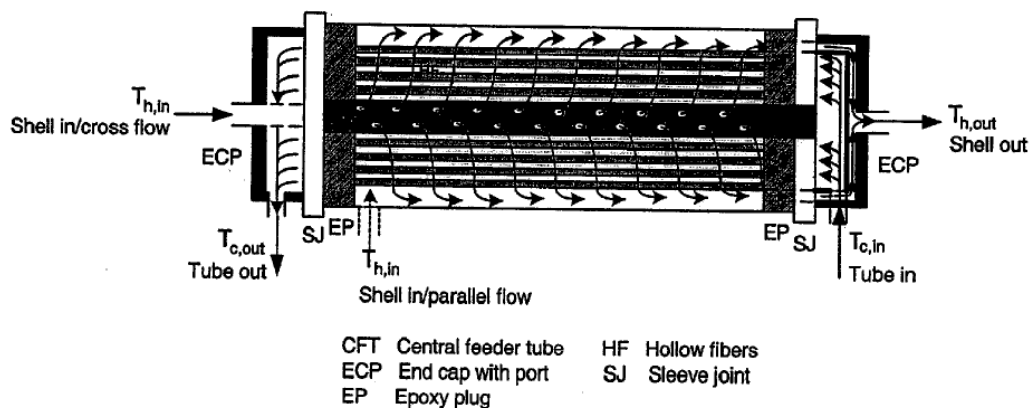
Dosud byly popsány různé typy konfigurací, všechny ovšem uzavřeny pláštěm. Alternativou je neohraničený ponorný model s dutými vlákny, použitý např. pro čištění odpadní vody (Obr. 6.8). Slouží k separaci částic z tekutiny. S tekutinou jsou unášeny také vzduchové bubliny a třením jejich stěn o povrchy vláken je samovolně předcházeno zanášení.





Obr. 6.8 Neohraničený ponorný modul dutých vláken pro čištění odpadních vod [23]

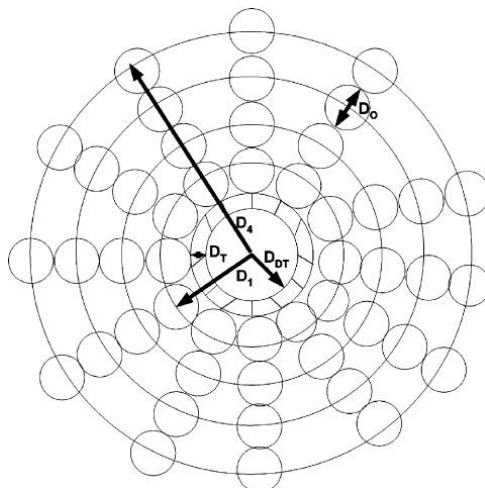
Myšlenka vytvoření křížového proudění díky středovému potrubí, okolo kterého jsou rozestavěny kapiláry, vedla k vytvoření nového typu plášťového výměníku s dutými vlákny. Popsán je v [21] a [11], schematicky znázorněn na Obr. 6.9. Centrální potrubí slouží k lepší distribuci pracovního média a zajištění rovnoměrnějšího obtékání dutých vláken. Druhá tekutina vstupuje do výměníku stranou pláště a poté se proud rozděluje do jednotlivých kapilár. Rozvod tekutiny na straně pláště umožňují otvory po stranách distribučního PP potrubí. Otvory jsou otevřené a postupně se zvětšující úměrně se vzdáleností od vstupu tekutiny do potrubí. Tím je dosaženo rovnoměrné proudění a distribuce vnějšího pracovního média v kolmém směru na mikrokapiláry. V rámci celého výměníku je proudění protiproudé. V [21] šlo o tepelný výměník s dutými vlákny s mikroporézní stěnou, zabráňující průniku kapaliny anebo kontaminaci skrze stěnu dutého vlákna a souběžně zvyšující přenos tepla přítomností kapalných molekul v porézní struktuře dutého vlákna. V tomto systému může na první straně výměníku docházet ke kondenzaci, energie kondenzujících par je pak využita pro ohřev kapaliny, proudící z druhé strany dutých vláken.



Obr. 6.9 Schéma výměníku s dutými vlákny, křížovým prouděním a centrální distribuční trubicí [21]

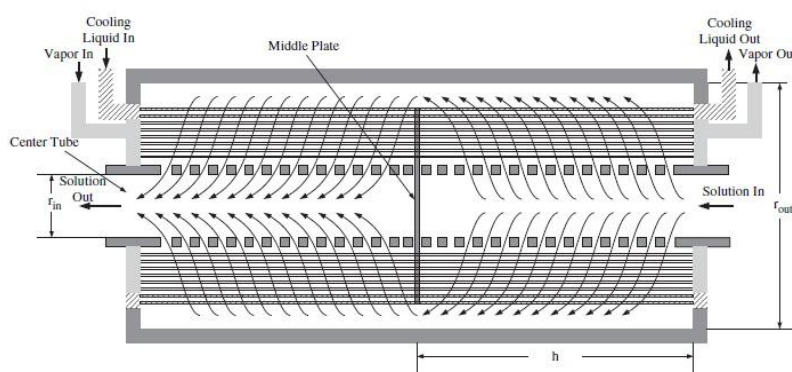
V [11] bylo testováno několik verzí této koncepce tepelného výměníku – model se 79, 400 a 200 kusy PP vláken, 79 mikrokapilárami z PEEK a typ s šesti asymetrickými trubičkami z modifikovaného PES o větším průměru i tloušťce stěny. Dále byly zkoušeny dva větší výměníky s 950 a 2750 vlákny. Použité kapiláry z PP měly tloušťku stěny 75  $\mu\text{m}$  a vnější průměr 575  $\mu\text{m}$ . Uspořádání vláken kolem distribučního potrubí bylo dle Obr. 6.10. Hustota vláken byla pro modely se 79 a 200 vlákny 0,137, resp. 0,18. Modely byly testovány pro pracovní média horký lák – studená voda a pára – studená voda. S touto konstrukcí

dosáhli ve [11] výborných tepelně přenosových vlastností výměníků z PP, PEEK a PES vláken s neporézním povlakem (Tab. 5.3). Lepší celkový součinitel prostupu tepla vykazovaly výměníky s vyšší hustotou vláken. Efektivita zařízení délky menší než 30,5 cm byla blízká 1. Ve srovnání s tepelnými výměníky z kovů dosahovaly tyto výměníky mnohem nižší tlakové ztráty při daleko příznivějším poměru přenos tepla/objemu.



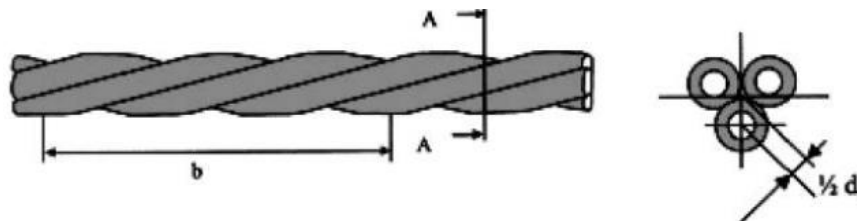
Obr. 6.10 Rozmístění dutých vláken okolo distribučního potrubí při křížovém proudění výměníkem z PP nebo PEEK [11]

Inovativní hybridní zařízení, sloužící současně jako absorbér a tepelný výměník, bylo popsáno v [30]. Této komplexní použitelnosti bylo dosaženo použitím jak propustných, tak nepropustných dutých vláken. Pórovitá vlákna umožňují přenos tepla i vlhkosti, zatímco nepropustná vlákna zajišťují pouze tepelnou výměnu. Popsané zařízení je na Obr. 6.11. Obsahuje centrální přepážku, sloužící k odklonění proudů v plášti. Absorpční roztok je tak nucen před polovinou délky výměníku změnit směr a proudit v mezerách mezi usměrňujícími prvky k povrchu pláště a pak zpět k ose zařízení na opačné straně centrální přepážky. Takto se vzhledem k vláknům vytvoří křížové proudění. Řady trubiček blíže ose určené pro páru jsou přitom propustné, nepropustnými kapilárami blíže pláště pak proudí chladicí kapalina. Dimenze trubiček jsou 300/240 mm, počet a délka vláken se odvíjí od potřeb a požadavků. Vnitřní průměr pláště byl 5,55 cm a vnější průměr centrálního potrubí 2,22 cm.



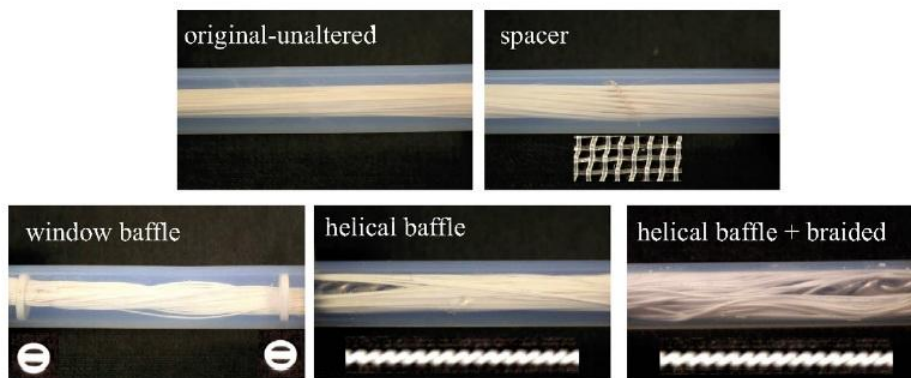
Obr. 6.11 Zařízení s dutými vlákny sloužící zároveň jako tepelný výměník a absorbér [30]

Další možností je vlákna smotávat a vytvořit tak ze tří vláken vlákno jedno (Obr. 6.12). Potenciálem zakřivených trubek pro průmyslové aplikace se zabývá článek [31]. Jsou zde popsány jejich výhody a limity a také způsoby určení součinitele tření a součinitele prostupu tepla. V zakřivených trubkách se k vyrovnání odstředivých sil vytváří sekundární proudění, čímž dochází k lepšímu promíchávání tekutiny uvnitř kanálů a ke zlepšení přenosu tepla. To platí jak pro vlákna na Obr. 6.12, tak pro šroubovitě teplosměnné plochy. Použitím zakřivených trubek je navíc lépe využito prostoru a zvyšuje se poměr teplosměnné plochy/objemu.



Obr. 6.12 Příklad stočených vláken [31]

Zlepšení přenosu tepla a hmoty pomocí přepážek, rozpěrek a kapilárami s modifikovanou geometrií bylo zkoumáno v [32] na membránových destilačních zařízeních s dutými vlákny, vhodných pro odsolování. Bylo zjištěno, že vložení přepážek může zvýšit součinitel přestupu tepla na straně pláště až o 40 %. Přepážkou je zde myšlena vložka se dvěma půlkruhovitými otvory nebo sítko, díky kterým se množství vláken svazku rozdělí do dvou resp. mnoha podvazků (Obr. 6.13). Navíc je díky tomuto prvku v podélném modelu vyprovokováno křížové proudění, zvyšující přenos tepla. Vlákná z PP mají nesmáčivý povrch, takže při vložení do mokrého prostředí odpuzují vodu a mají tendenci přilnout k jiným plastovým povrchům. To zhoršuje využitelnost plochy pro přenos. Vložení rozpěrky mezi vlákna do osy svazku rozevívá svazek, čímž zlepšuje dostupnost vláken uvnitř svazku a využitelnost teplosměnných ploch většího množství vláken. Přídavné prvky s sebou nesou několik nevýhod, jako je zvýšení tlakové ztráty a omezení volného prostoru pro proudění kapaliny pláštěm. Použitím dutých vláken zakřivených geometrií (zkroucené, splétané) je zvýšen tok vláknů o více než 1/3. Nerovná vlákna mohou na obtékající proud působit jako statický mixér, což zvyšuje součinitel přestupu tepla. Navíc je tímto způsobem omezeno ulpívání vláken na sobě. Popsané možnosti designu a konfigurací modulu s dutými vlákny jsou na Obr. 6.13.

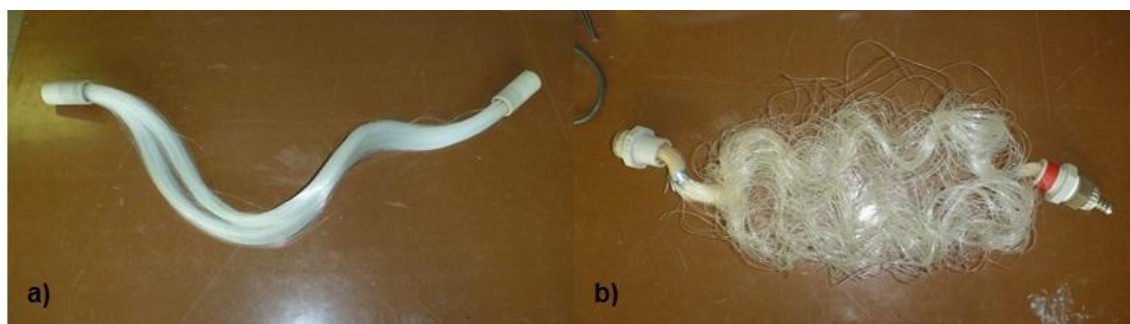


Obr. 6.13 Různé způsoby zlepšení toku dutými vlákny u membránových modulů [32]

Vlákna různých typů pro membránovou destilaci byla popsána v [33]. Byly analyzovány různé vlastnosti, mezi nimi i přenos tepla. Srovnána byla rovná vlákna, zvlněná vlákna, vlákna obklopující centrální potrubí, vlákna zabalená v síti, sloužící jako vložka mezi jednotlivými vrstvami a vlákna, která byla takovýmto prvkem propletená. Poslední typ podával nejlepší výkon.

## 6.1 Připravované možnosti řešení

V Laboratoři přenosu tepla a proudění je k testování připraveno několik typů vláken, ze kterých se sestavují konfigurace vhodné pro laboratorní testování. Základem je svazek mnoha kapilár, jejichž konce jsou spojeny vhodným způsobem. Na Obr. 6.14 můžeme vidět ukázkou rovných i nakadeřených vláken. Svazky na obrázku jsou složeny ze 400 (436) nakadeřených, resp. rovných dutých kapilár. Materiálem vláken byl polypropylen, dimenze 0,54/0,43 mm resp. 0,68/0,55 mm pro rovná resp. nakadeřená vlákna. Délka vláken byla pro oba svazky stejná (0,7 m).



Obr. 6.14 Svazek a) rovných a b) nakadeřených vláken

Nakadeřená vlákna je možno připravit dvojím způsobem. První možností k dosažení křivosti je vytvoření asymetrické stěny, čímž se vlákna mají tendenci kroutit. Další varianta je namotávat vlákna na kovové cívky. Cívky s vlákny se pak vloží do pece a nechá se na ně působit po určitou dobu vyšší teplota. Struktura vláken se přetaví a po zchlazení budou plastové trubičky držet šroubovitý tvar. Takto je možno dosáhnout různé křivosti vláken, viz Obr. 6.15. Spirály na obrázku mají průměr 3 cm, 4 cm a 6,5 cm. Uvnitř zakřivených ploch jsou principy proudění a přenosu tepla ovlivněny odstředivými silami. Výpočtové modely pro rovná vlákna se tím modifikují. To je podrobně popsáno v [31].



*Obr. 6.15 Nakadeřená vlákna s různou křivostí*

K vytvoření modelu výměníku se nabízí umístit příklady svazků na Obr. 6.14 do pláště a měřit tepelné charakteristiky při protiproudém režimu. K dosažení konfigurace křížového uspořádání je vhodné zafixovat vlákna do rámců. Několik ukázek je na Obr. 6.16 a Obr. 6.17. Trubičky je možné vypnout do rámu v jednom směru, k lepšímu využití prostoru a vytvoření průtočných kanálů je ale lepší vést vlákna jak horizontálně, tak vertikálně. Rám tak bude vyplněn sítí propletených vláken. Ty jsou zality v několika řadách. Výplň může být opět z rovných nebo zakřivených vláken.

I při funkčním návrhu geometrií a uspořádání teplosměnných ploch ztrácí tepelné výměníky účinnost tím, jak jsou jejich povrchy při provozu znečišťované. Tento problém se týká všech typů výměníků bez výjimky. Předpokládat ho tedy můžeme i pro plastové výměníky, přestože jejich hladká struktura povrchu tvoří horší podmínky pro vznik tohoto jevu. Od počátečních návrhů by se tedy měly zvažovat způsoby zabránění vzniku nechtěných vrstev na teplosměnných površích a tím snižování charakteristik zařízení. Problémem zanášení a čištění tepelných výměníků se zabývá další kapitola.



*Obr. 6.16 Rám pro fixaci dutých vláken*



*Obr. 6.17 Různé možnosti vyplnění rámu dutými vlákny*

## 7 ZANÁŠENÍ A ČISTĚNÍ VÝMĚNÍKŮ Z DUTÝCH VLÁKEN

Ve většině průmyslových procesů jsou v tekutinách proudících tepelnými výměníky rozptýleny nějaké částice. Některé kombinace média a materiálu výměníku poskytují vhodné prostředí pro chemické reakce, příp. růst mikroorganismů. Stěny výměníku se pak poškozují nebo se na nich usazují nečistoty. Teplosměnné plochy jsou navrhovány tak, aby měly velkou tepelnou propustnost. I když je tepelný výměník dobře navržen a vyroben, jeho účinnost se během provozu snižuje. Nejčastější příčinou je usazování nečistot na stěnách zařízení. Zanášením vzniká nevodivá vrstva a prostup tepla se snižuje. Jev má negativní vliv na účinnost výměníku. Vrstvou nánosu dojde ke zmenšení charakteristického rozměru a zvýšení tlakové ztráty. Výzkumy uvádí, že zanášení je problémem více než 90 % tepelných výměníků [34]. Čistění je pracné, nákladné a často vyžaduje vyřazení zařízení z provozu. Zanášení je tedy nutno zohlednit už při návrhu výměníku. S tepelným odporem nánosu na obou stranách stěny by se mělo počítat při výpočtu celkového součinitele prostupu tepla. Protože design výměníků z dutých plastových vláken je mladá záležitost a bude se dále optimalizovat, je třeba od počátku uvažovat s vlivem znečištění na jejich provoz.

Ke znečištění teplosměnných ploch výměníků může docházet mnoha způsoby. Podle hlavního fyzikálního nebo chemického procesu, který je příčinou, je možno rozlišovat několik mechanismů zanášení. K omezení funkčnosti může docházet koroze, důsledkem chemické reakce, krystalizací, namrzáním, zanášením, napláváním nebo biologickým znečištěním. Způsob čistění a regenerace výměníku se odvíjí od příslušného mechanismu zanášení. Jednotlivé mechanismy jsou popsány dále dle [35] a je rozebrán vliv těchto principů na výměníky z dutých plastových vláken.

Kapalina proudící výměníkem často obsahuje rozpuštěné soli. V případě přesycení se mohou vysrážet a usadit na stěnách výměníku. V případě vody vzniká v důsledku obsahu minerálních látek vodní kámen. Krystalizace je často spojena s vypařováním a změnou teplot. Usazovat na stěnách se také mohou nečistoty obsažené v pracovní látce. K tomuto jevu dochází vlivem dobré přilnavosti nečistot. Přilnavý povrch pak na sebe nabaluje další vrstvy. Použitím tepelných výměníků s dutými plastovými vlákny se podařilo zanášení uvedenými dvěma principy omezit. Plasty mají nízkou povrchovou energii. Z toho důvodu se částice tolik nezachytávají na jejich povrchu. Vysoká roztažnost plastů je v tomto ohledu také příznivým faktorem. Roztahováním a následným smršťováním plastových vláken se změnami teploty se případné usazeniny mohou z povrchu vláken uvolnit. Samočistitelné výměníky produkuje *MilieuPartners*, kdy k čistění dochází volným stékáním kondenzující vody [8]. Zařízení je možno dovybavit integrovaným rozprašováním. Výměník je také možno v případě potřeby jednoduše očistit vysokotlakým proudem vody. Jiné jednotky této společnosti jsou ponorné výměníky s plastovými pláty. Používány jsou k vnější tepelné výměně mezi vysoce korozivními médii nebo naopak při požadavcích na vysokou čistotu médií. Výměníky mohou být čištěny chemicky nebo proudem opačného směru.

Dalším mechanismem je zanášení v důsledku chemické reakce. V tomto případě jedna nebo více složek pracovní látky reagují na stěně výměníku. Počet reakcí významně narůstá se zvyšováním teploty média. Protože se výměníky s dutými plastovými vlákny používají jako nízkoteplotní, možnost zanášení tímto způsobem není příliš vysoká. Jinou chemickou reakcí je koroze. V tomto případě reaguje pracovní látka přímo se stěnou výměníku. Na povrchu se pak vytvoří vrstva, která snižuje přestup tepla. Koroze teplosměnných ploch je obecně velkým problémem, proto je snaha konstruovat výměníky korozivzdorné. Polymery mají výbornou odolnost i proti velmi agresivním médiím a mohou být proto využity i ve velmi korozivních procesech. Příkladem jsou celoplastové výměníky *Chem Resist* [36]. Plášťové výměníky se svazky trubek z PP nebo PVDF nabízí výborné podmínky pro ohřev a chlazení chemicky

agresivních tekutin. Svazky potrubí jsou vyjímatelné, což umožňuje jednoduché čištění a údržbu. Také plášťové výměníky *Fluorotherm* přináší řešení pro aplikace, kde je chemická odolnost stěn vůči agresivním tekutinám kritická. Vnitřní trubky poskytují velkou teplosměnnou plochu. Uspořádání výměníku je čistě protiproudé nebo souproudé. Jednosměrné proudění pláštěm umožňuje kompletní očištění jednotky po dokončení série operací a také eliminuje ustrnulé proudy. Výměník je lehce rozebíratelný, čistitelný, opravitelný [37].

Při pomalém proudění o konstantní teplotě hrozí růst mikroorganismů uvnitř výměníku. Bakterie se pak množí a svými těly vytvoří uvnitř výměníku nános. Při tomto procesu se mohou navíc tvořit další nežádoucí látky, dále se usazující nebo způsobující chemickou reakci či korozi. Úzké teplotní intervaly použitelnosti omezují aplikovatelnost výměníků s dutými vlákny. Byly provedeny první pokusy zapojení těchto výměníků v nízkoteplotních procesech spojených s ošetřením vody v kanalizacích a čističkách odpadních vod [22]. Právě tyto procesy jsou provázeny velkým biologickým znečištěním. Růstu mikroorganismů také nahrává pomalé proudění pracovní látky ve výměnících s dutými plastovými trubičkami. Využití tohoto typu výměníku v podobných aplikacích si vyžaduje prozkoumání problému biologického znečištění a metod, vedoucích k účinnému odstranění.

Zanášení teplosměnných ploch typu dutá vlákna také významně souvisí s uspořádáním vláken v prostoru. Shlukování trubiček nejen snižuje okolní proudění a tedy přenos tepla, ale také nahrává zanášení v těchto místech. Problém velkého nahuštění vláken vzniká zvláště u spojů. Cestou k účinnému přenosu tepla a omezení zanášení je rovnoměrné vyplnění výměníku kapilárami s otevřenými strukturami, umožňující volné proudění vnějšího média mezi vlákny. Účinný způsob, jak toho docílit, je stále otázkou. Jednou z možností je rozdělení vláken pomocí různých rozpěrek. Zařazení podobných prvků ovšem přímo nahrává zanášení. Problém se silným zanesením u výměníku se svazky kapilár zaznamenan na Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Silně zanesený svazek kapilár [22]

Zásadním překážkou sledování vývoje zanášení u plastových tepelných výměníků je jakákoli absence dlouhodobějších záznamů. Můžeme jediné vycházet z dat pro membránové moduly na bázi PP, sloužící k separaci složek tekutiny, a předpokládat, že chování polypropylenových dutých vláken bude podobné. Pro moduly s dutými vlákny k membránové filtraci jsou často popsány způsoby čištění zpětným proudem o vysokém tlaku, které ovšem slouží především k uvolnění částic z pórovité struktury propustných vláken [38]. Stlačeného vzduchu je ale použito například i k odfukování znečišťujících látek z povrchů při čištění



optických vláken [39]. Síla vzduchu není vždy dostatečně efektivní. Navíc nečistoty ve stlačeném vzduchu mohou přispívat k dalšímu znečištění. Proto je u vnějšího obtékání dutých vláken lepší zaměřit pozornost na prevenci zanesení a před vstup tekutiny do pláště vložit vhodný filtr. Tímto se problémy se zanášením omezí a čištění teplosměnných ploch je možno provádět méně často. Další účinnou prevencí proti znečištění a zanášení kapilár je např. zvířené proudění vzduchových bublin mezi vlákny [23]. U flexibilních dutých mikrovláken je možné odstranit usazeniny dynamickým pohybem vláken. Pro mikrovláka byla navrženy dvě metody odstranění organického znečištění, a tím obnovy svazků dutých vláken [22]. Jsou popsány v dalších kapitolách.

## 7.1 Mechanické čištění

Při mechanickém čištění musí být výměník nejdříve rozmontován a poté ošetřen. Nejběžnější metody odstranění nánosu jsou silným proudem vody nebo vzduchu. Pro výměníky se svazky dutých vláken by navržen postup čištění, zahrnující také chemické ošetření [22]. Chemické ošetření je velmi jednoduché. V podstatě jde o vyprání svazků kapilár ve vodě s běžným pracím práškem a následné vysušení teplosměnných ploch po 12 h s pomocí aerace okolního vzduchu. Průběh praní vláken je možno vidět na Obr. 7.2.



Obr. 7.2 Čištění svazků vláken praním [22]

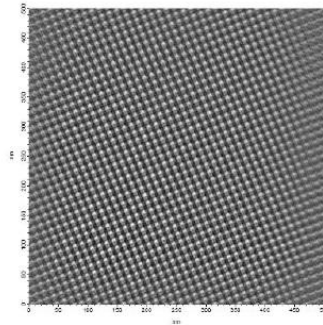
Základní procedurou navrženého mechanického čištění je tzv. šlehání pulzy vzduchu o vysokém tlaku, vstříkovaném mezi trubičky svazku. Svazky kapilár nejsou zcela propnuty. Jejich konce jsou upevněny v rámu s fixní mezerou mezi oběma konci svazku o doporučeném přesahu více než 5 % nad délku vláken. Urychlení vláken může být provedeno jakýmkoli plynem, běžně používaný je vzduch. Metoda je v posledních dvou letech testována v poměrně velké míře. Byly nalezeny vhodné frekvence pulzů pro tento způsob mechanického čištění. Vhodnost použitého algoritmu se nicméně odvíjí od typu organického zanesení, a proto si vyžaduje jeden až dva měsíce ladění, než může být účinně použit. Mechanické čištění pulzním šleháním bylo prozatím prováděno jen v laboratorních podmínkách.

## 7.2 Povrchové ošetření vláken

Práce [22] se zabývá také omezením organického zanášení díky speciálním úpravám povrchu trubiček. Povrchy kapilár mohou být modifikovány fyzikálně nebo chemicky. Příkladem je pokrytí povlakem z hydrofilních polymerů, kopolymerů, proteinů. Modifikace plasmou je dalším způsobem fyzikálního ošetření teplosměnných ploch.

Velkou pozornost v [22] je věnována modifikaci povrchu dutých vláken pomocí tzv. S-vrstvy. Jedná se o povrchovou vrstvu z proteinů. Tyto bílkoviny mají schopnost se samovolně

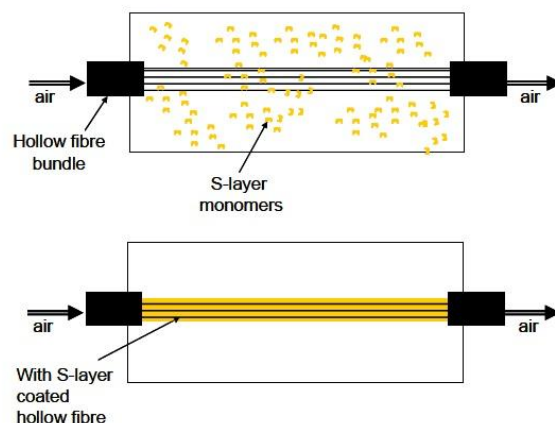
uspořádat a na povrchu buněk bakterií tak vytvořit monovrstvu s pravidelnou strukturou. S-vrstvy mohou být mimo jiné použity i jako povlaky. Na Obr. 7.3 je zobrazena vrstva polymerů, zafixovaná na polypropylenová dutá vlákna.



Obr. 7.3 S-vrstva proteinů bakterie, izolovaná z dolu v Německu, vykrytalizovaná na podkladu [22]

V procesech, při kterých hrozí velká míra organického znečištění (jako jsou čističky odpadních vod) jsou velmi důležité investiční náklady. Může se zdát, že ošetřovat kapiláry, jejichž náklady na materiál a výrobu jsou nízké, povrchovou S-vrstvou je drahé, a tedy neefektivní. Nicméně při biologických procesech produkují bakterie potřebné bílkoviny samovolně. Tímto přirozeným procesem je produkováno až 20 % z celkového množství potřebných proteinů. V rozumných podmínkách pro bakteriální růst jsou náklady na ošetření vláken tímto způsobem rozumné.

V [22] je také popsána metoda nanesení S-vrstvy na dutá vlákna. Svazky vláken byly ponořeny na jeden den za pokojové teploty do 1,5 l roztoku, ve kterém bylo obsaženo 5,25 mg monomerů proteinu. Uvnitř dutých vláken po celou dobu proudil vzduch. Proces ošetření vláken touto metodou zobrazuje Obr. 7.4. Tento proces byl testován v laboratorních podmínkách pouze na jednotlivých vláknech. Celkově ošetřený povrch pro přenos tepla byl přibližně  $0,8 \text{ m}^2$ , proto získané údaje nebyly relevantní ke statistickému vyhodnocení. Výsledkem byla dobře zafixovaná vrstva proteinů, rozložení však nebylo rovnoměrné. Zlepšení pokrytí si vyžaduje další testování.



Obr. 7.4 Postup nanesení S-vrstvy na svazek dutých vláken [22]

## 8 VÝPOČET PŘENOSU TEPLA

Dutá plastová vlákna jsou ve své podstatě válcové trubky malých průměrů. Těmito trubičkami protéká jedna tekutina, okolním uzavřeným prostorem médium další. Proudění kolem kapilárních trubiček je možné souproudé, protiproudé i křížové. První modely tepelných výměníků s dutými vlákny byly navrženy pro podélné proudění. Příčným obtékáním vláken v plášti je možno dosáhnout vyššího součinitele přestupu tepla při nižších Reynoldsových číslech. Proto se další text zabývá pouze výpočty pro model křížového tepelného výměníku. Z literární rešerše vyplynulo, že tepelné výměníky s dutými vlákny byly experimentálně testovány s pracovními médii vzduch, voda, pára, horký lák apod. Použití plastových tepelných výměníků je omezeno na nízkoteplotní operace. Proto byly výpočty provedeny v rozsahu teplot teplotonosných médií 0–100 °C. Uvažovány byly vždy dvě varianty pracovních látek – vzduch a voda. Jejich charakteristické vlastnosti vycházely z tabulek fyzikálních veličin v [15], [40].

V dalším textu jsou rozebrány principy přenosu tepla při vnitřním proudění trubkami malého kruhového průměru a při příčném obtékání kapilár. Diskutován je zejména vliv rozměrů vláken a rychlosti proudění na součinitel přestupu tepla a tlakovou ztrátu. Použité vzorce vychází z literatury [15], [40]. Výpočty a grafy byly zpracovány v programu Microsoft Excel. Ze získaných závislostí jsou usuzovány vlastní závěry. Dále jsou uvedeny souhrnné výpočty modelu výměníku včetně celkového součinitele prostupu tepla, výstupních teplot, účinnosti zařízení a výkonu, provedené pomocí programu. Kromě už výše uvedených vlivů je zkoumána závislost výkonu výměníku na délce a počtu vláken. Nakonec je uveden vliv uspořádání a hustoty vláken v plášti na přenos tepla.

### 8.1 Přenos tepla uvnitř potrubí

Proudění uvnitř trubky je omezeno stěnou. Po vstupu tekutiny do vlákna rovnoměrnou rychlostí se začíná díky vlivu vodivosti stěny tvořit mezní vrstva a zakřivovat rychlostní profil. Vývoj proudění trvá nějaký čas do chvíle, kdy se mezní vrstvy setkají v ose potrubí. Tím skončí vstupní úsek a rychlostní profil se dále nemění, pokud zůstanou podmínky stejné. Proudění je plně vyvinuté. Cílem dalších úvah je obdržet součinitel přestupu tepla, přenášeného při pohybu tekutiny na stěnu trubky.

Pohyb nestlačitelné, viskózní tekutiny uvnitř mikrokanálů obecně popisují Navier-Stokesovy rovnice. Při vnitřním proudění je důležité rozlišovat, zda je plně vyvinuté proudění laminární nebo turbulentní. Režim proudění se posuzuje velikostí bezrozměrného Reynoldsova čísla, které závisí na vlastnostech tekutiny  $\rho$  a  $\mu$ , střední rychlosti jejího proudění  $u_m$ , určené z objemového průtoku, a vnitřním průměru trubky  $D_i$  vztahem

$$Re_D = \frac{\rho u_m D_i}{\mu} . \quad (8.1)$$

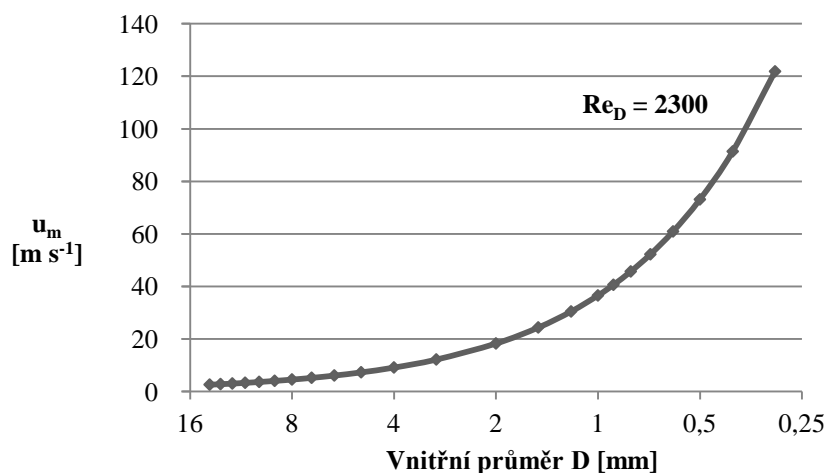
K přechodu z laminárního proudění na turbulentní dochází v potrubích kruhového průměru při minimálních Reynoldsových číslech  $Re_D = 1800–2300$ . Ačkoli několik studií uvádí, že pro potrubí malých průměrů v řádu  $\mu\text{m}$  dochází k tomuto vývoji charakteru proudění při nezvykle nižších limitních  $Re_D$ , většina výzkumů prokázala, že rozměry průtočného průřezu nemají na změnu režimu vliv, pokud není průměr potrubí menší než velikost molekul protékající kapaliny. Například v práci [41] bylo studováno proudění kapalin s různou polaritou v trubičkách o průměrech 50–247  $\mu\text{m}$  a přechod z laminárního na turbulentní proudění nebyl v žádném případě pozorován při jiném rozsahu  $Re_D$ , než je tomu u potrubí mnohem větších dimenzí.

V grafech na Obr. 8.1 a Obr. 8.2 je zobrazena křivka přechodu režimu proudění na turbulentní pro  $Re_D = 2300$  v závislosti na průměru trubiček a střední rychlosti pro vzduch a vodu o teplotě 300 K. Můžeme pozorovat, že při vnitřních průměrech 0,4–0,6 mm se režim proudění změní v turbulentní při rychlostech vody 3–4 m s<sup>-1</sup>, pro vzduch 60–90 m s<sup>-1</sup>. Pracovní média v potrubích výměníků obvykle takových rychlostí nedosahují, proto má v případě vláken malých dimenzí smysl uvažovat s Reynoldsovým číslem menším 1800–2300, tedy s laminárním prouděním.

Od stejných vlastností jako u Reynoldsova čísla se odvíjí délka vstupního úseku, pro laminární režim dána vzorcem

$$\left(\frac{x_e}{D_i}\right) \approx 0,05 Re_D . \quad (8.2)$$

Délka vstupního úseku závisí přímo úměrně na rychlosti proudění a s druhou mocninou na dimenzi potrubí. V případě kapilár vnitřních průměrů 0,4–0,6 mm a uvedených maximálních rychlostí, kdy se ještě uplatňuje laminární proudění, je délka vstupního úseku do 7 cm. Pro průměr trubičky 0,5 mm protékané vodou o teplotě 300 K rychlostí 1 m s<sup>-1</sup> (resp. vzduchem o stejné teplotě rychlostí 20 m s<sup>-1</sup>) je délka vstupního úseku asi 1,5 cm.

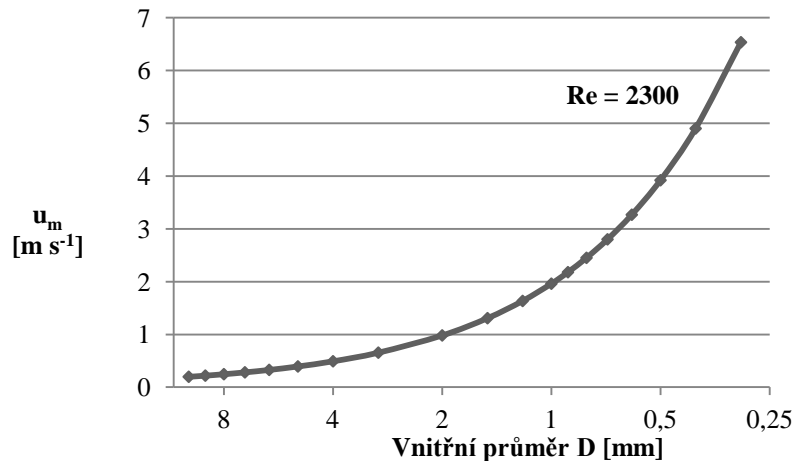


Obr. 8.1 Přechod proudění do turbulentního režimu v závislosti na průměru trubiček a střední rychlosti proudění (vzduch,  $T = 300$  K)

U vnitřního proudění se teplotní profil vyvíjí jinak než rychlostní. Délka teplotního vstupního úseku závisí na vlastnostech kapaliny, shrnutých v Prandtlově čísle:

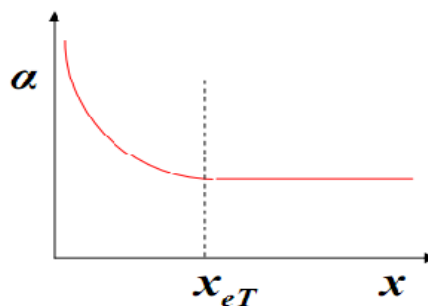
$$\left(\frac{x_{eT}}{D}\right) \approx 0,05 Re_D Pr . \quad (8.3)$$

Pro média s  $Pr > 1$  (např. voda) se tím délka vstupního úseku zvětšuje. Naopak u vzduchu je  $Pr < 1$  a vývoj teplotního profilu je rychlejší než rychlostního. Pro vodu o teplotě 300 K v potrubí o vnitřním průměru 0,5 mm to znamená délku teplotního vstupního úseku 4,3 cm pro rychlost 0,5 m s<sup>-1</sup>, 8,6 cm pro rychlost 1 m s<sup>-1</sup> a 17 cm pro rychlost 2 m s<sup>-1</sup>.



Obr. 8.2 Přechod proudění do turbulentního režimu v závislosti na průměru trubiček a střední rychlosti proudění (voda,  $T = 300 \text{ K}$ )

Uvažovat teplotní vstupní úsek je dosti podstatné, zvláště v případě krátkých kanálů. Přenosové charakteristiky jsou v této oblasti odlišné. V plně vyvinuté oblasti dochází k nižšímu přenosu tepla konvekcí mezi stěnou potrubí a kapalinou než jak je tomu ve vstupním úseku. S vývojem mezní vrstvy součinitel přestupu tepla ve vstupním úseku klesá, v plně vyvinuté oblasti je pak konstantní (Obr. 8.3). Ve vstupním úseku je také jiný průběh tlaku. U vstupu do potrubí je tlak značný, s postupným tvořením mezní vrstvy se zmenšuje a v plně vyvinuté je tlakový spád po délce potrubí konstantní.



Obr. 8.3 Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na vzdálenosti od vstupu tekutiny do potrubí [42]

Součinitel přestupu tepla při konvekci a přirozeném i nuceném proudění je určován z bezrozměrného Nusseltova čísla. Z tepelných úvah pro laminární plně vyvinutý režim uvnitř kruhové trubky je běžně zjednodušován výpočet Nusseltova čísla na dva případy:

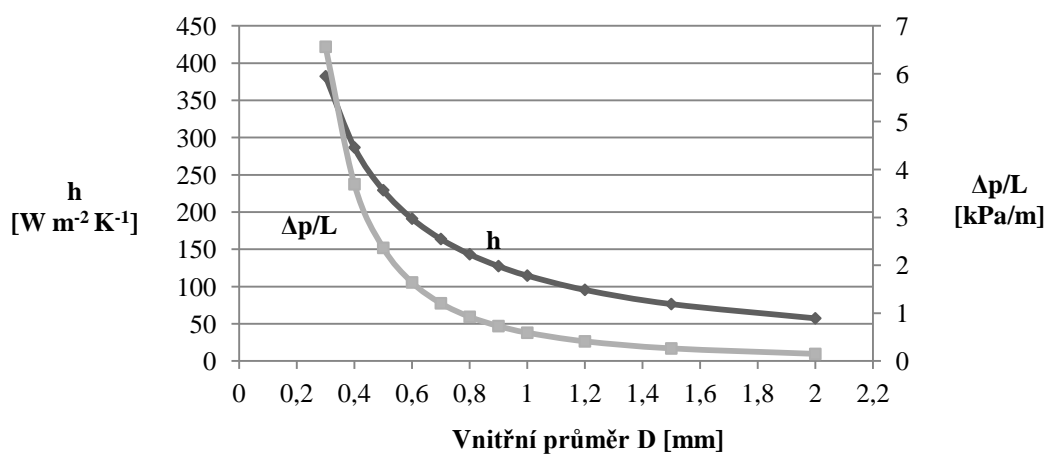
- případ konstantní teploty stěny potrubí -  $Nu = 3,66$
- případ neměnicího se tepelného toku skrz stěnu -  $Nu = 4,36$ .

U tenkých plastových vláken se ve většině případů není možno omezit jen na tyto dvě situace, při značném zjednodušení se jedná spíše o případ konstantního tepelného toku stěnou, tedy  $Nu_D = 4,36$ . Součinitel přestupu tepla na stěnu kanálu se pak vypočítá z Nusseltova čísla dle vzorce

$$h_i = \frac{Nu_D k}{D_i}, \quad (8.4)$$

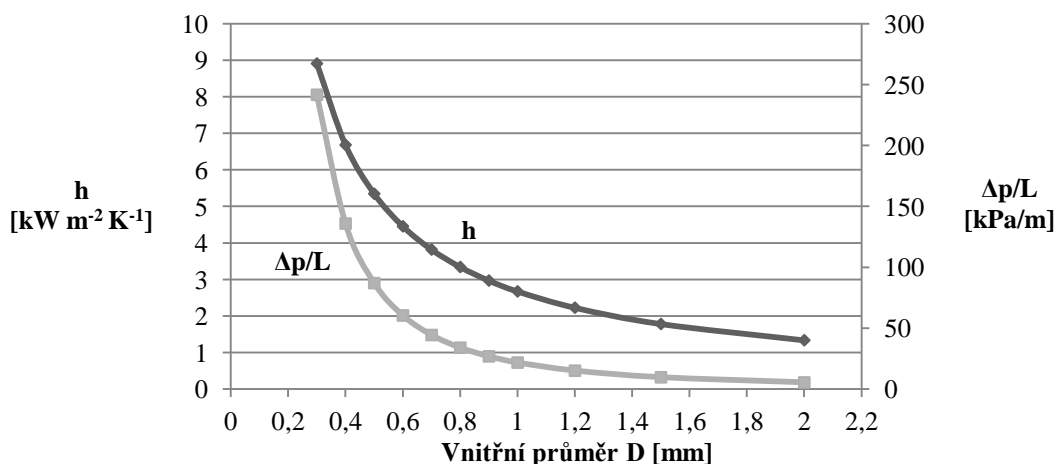
kde  $k$  je tepelná vodivost tekutiny v kanále. Ze vztahu (8.4) vidíme, že součinitel přestupu tepla nepřímo závisí na vnitřním průměru kanálu. Při zmenšujícím průměru se přitom přenos tepla konvekcí zvětšuje. Tato závislost je zobrazena pro vzduch a vodu na Obr. 8.4 a Obr. 8.5.

V této sekci je počítáno s Nusseltovým číslem pro limitní případ konstantního tepelného toku. U teplosměnných ploch z polymerů o nízké tepelné vodivosti je možné použít tuto hodnotu pouze v případě tlustostěnných vláken, nebo pokud je pracovní médium vzduch. V ostatních situacích vede toto zjednodušení k nadhodnocení dané situace i součinitele přestupu tepla. Specifikováním vhodnějšího vztahu pro případ stěny s konečným odporem se zabývá kapitola 8.3.



Obr.

8.4 Závislost součinitele přestupu tepla a tlakové ztráty na průměru potrubí (vzduch,  $T = 300$  K,  $u_m = 1 \text{ m s}^{-1}$ )



Obr. 8.5 Závislost součinitele přestupu tepla a tlakové ztráty na průměru potrubí (voda,  $T = 300$  K,  $u_m = 0,8 \text{ m s}^{-1}$ )

Problémem trubiček malých průměrů je tlaková ztráta. Od ní se odvíjí výkon čerpadla nebo ventilátoru, potřebný na protlačení tekutiny kapilárami. Při plně vyvinutém laminárním proudění roste součinitel tření se zmenšujícím se Reynoldsovým číslem dle vztahu

$$f = \frac{64}{Re_D} . \quad (8.5)$$

Tlaková ztráta závisí na součiniteli tření přímo úměrně

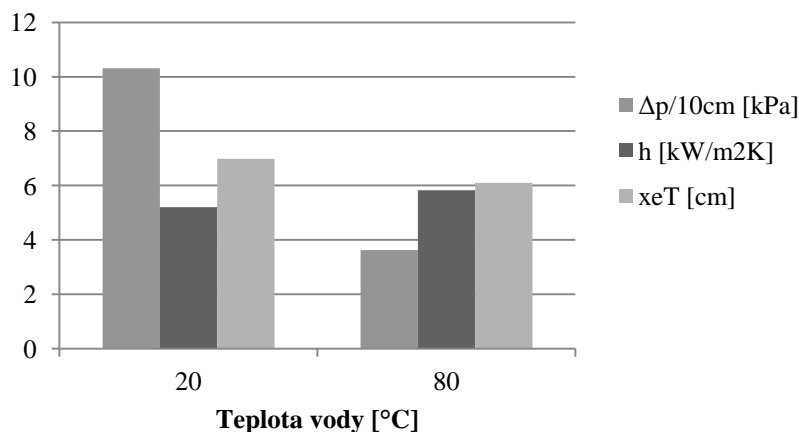
$$\Delta p_i = f \frac{\rho u_m^2}{2D_i} L . \quad (8.6)$$

Po úpravě dostaneme vztah pro tlakovou ztrátu při plně vyvinutém laminárním proudění

$$\Delta p_i = 32 \mu \frac{u_m}{D_i^2} L . \quad (8.7)$$

Vidíme, že tlaková ztráta mezi dvěma body potrubí se významně zvětšuje se zvyšující se střední rychlostí proudění a se snižujícím se průměrem. Při zmenšování průtočného průřezu roste tlaková ztráta výrazněji než součinitel přestupu tepla. Tato závislost je znázorněna na Obr. 8.4 a Obr. 8.5. S klesajícím průměrem narůstá při laminárním režimu součinitel přestupu tepla nepřímo úměrně. Tento nárůst je ovšem spojen s nárůstem tlakové ztráty s druhou mocninou.

Bylo zjištěno, že pro výměník s dutými vlákny je výhodnější, aby uvnitř kapilár proudilo médium s vyšší teplotou [20]. Se zvyšující se teplotou se mění fyzikální vlastnosti pracovních médií. Výrazněji to lze sledovat u kapalin. Se zvyšující se teplotou vody se snižuje její hustota, viskozita a Prandtlovo číslo a zvyšuje tepelná vodivost a tepelná kapacita. To se pak projeví na nárůstu Reynoldsova čísla a součinitele přestupu tepla, ale také snížením tlakové ztráty. Příklad je uvedený v následujícím grafu (Obr. 8.6).



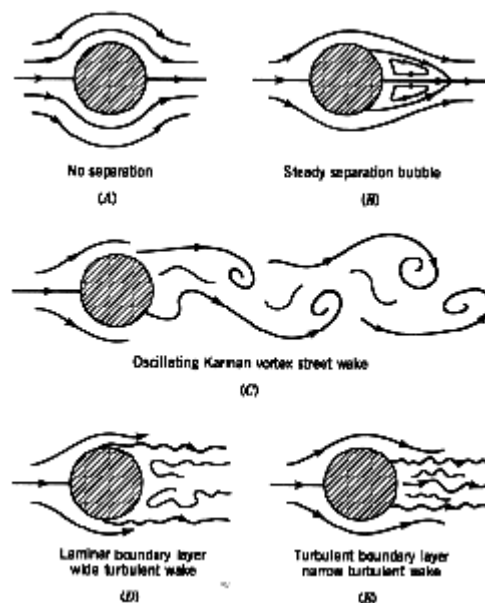
Obr. 8.6 Vliv teploty kapaliny na přenos tepla při vnitřním proudění (voda, rychlost proudění  $0,8 \text{ m s}^{-1}$  uvnitř potrubí o průměru  $0,5 \text{ mm}$ )

## 8.2 Příčné proudění tekutiny okolo válce

Při příčném obtékání válce vzniká tlakový gradient. To znamená, že při proudění kolem válce dochází nejdříve k poklesu a následně ke vzrůstu tlaku. S tím je spojen vývoj mezní vrstvy a změna rychlosti. Tekutina proudící podél přední (náběžné) části je urychlována, na zadní části válce pak zpomaluje. Od bodu zbrzdění k bodu odtržení je nucena proudit podél povrchu válce. V závislosti na rychlosti, kterou kapalina k překážce dorazí, tj. rychlosti nabíhajícího proudu, dochází k odtržení mezní vrstvy na různých místech a v oblasti za válcem se uplatňují různé režimy proudění. Tento vývoj proudění se udává v závislosti na Reynoldsově čísle

$$Re = \frac{v_{\infty} D_o}{\nu}, \quad (8.8)$$

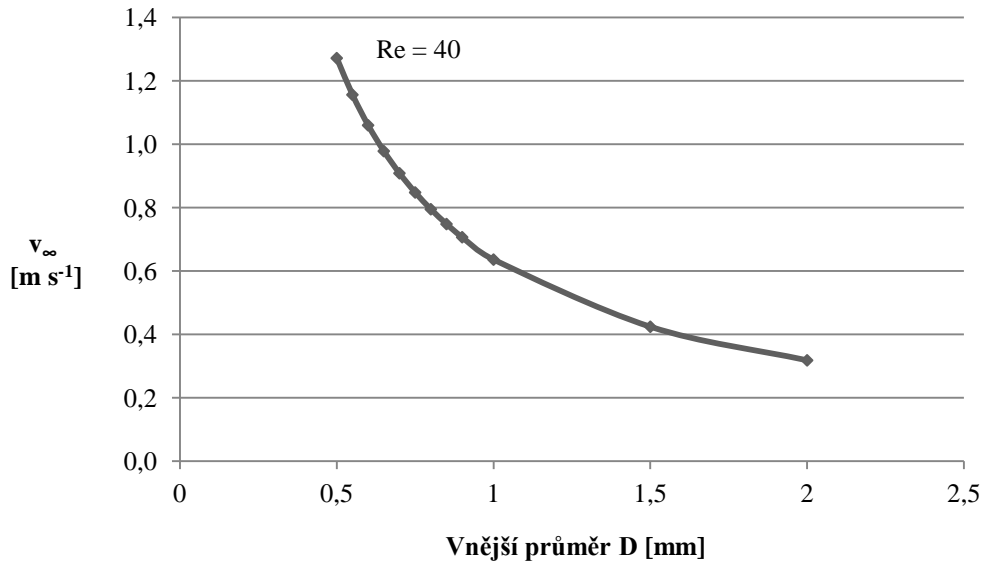
kde  $D_o$  je vnější průměr obtékaného válce. Tvar proudění významně závisí nejen na tom, jakou rychlostí  $v_{\infty}$  tekutina přitéká k válci, ale také na jeho průměru. Při velmi malých Reynoldsových číslech ( $Re_D < 5$ ) se uplatňuje režim neodtrženého proudění, pokud je Reynoldsovo číslo z intervalu  $5 < Re_D < 40$ , v úplavu se vytvoří pár fixovaných Föpplových vírů, při dalším zvýšení  $Re$  se začínají tvořit Kármánovy víry. Pokud je Reynoldsovo číslo větší než  $Re_D = 300$ , Kármánova vírová stezka se mění na turbulentní a rychlostní pole se stává 3D. Při  $Re_D > 2 \cdot 10^5$  přechází laminární mezní vrstva do turbulentní. Některé režimy jsou schematicky znázorněny na Obr. 8.7.



Obr. 8.7 Chování tekutiny v úplavu pro různá  $Re$ : a) 0,2; b) 12; c) 120; d)  $3 \cdot 10^4$ ; e)  $2 \cdot 10^5$  [43]

Pro vlákna malých průměrů je proudění kolem trubek vždy laminární, tvar vírové stezky však významně závisí na rychlosti kapaliny přitékající k válci. Například pro vodu obtékající válec vnějšího průměru 0,7 mm dochází k přechodu z režimu neodtrženého proudění k tvoření fixovaných vírů při rychlosti  $0,007 \text{ m s}^{-1}$ , laminární Kármánova vírová řada se začíná projevovat od  $0,06 \text{ m s}^{-1}$  a při rychlosti  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  je Kármánova vírová řada zcela turbulentní. V následujícím grafu (Obr. 8.8) můžeme vidět, při jakých rychlostech se začíná projevovat Kármánova vírová stezka ( $Re = 40$ ) pro různé vnější průměry potrubí obtékaného vzduchem.





Obr. 8.8 Rychlosti, při kterých se začíná projevovat Kármánova vírová řada ( $Re = 40$ ) v závislosti na průměru válce (vzduch,  $T = 300 \text{ K}$ )

Chování kapaliny v úplavu významně ovlivňuje přenos tepla. Lokální přestup tepla se mění po obtékaném obvodu. Stejně jako úhel odtržení proudu se odvíjí od velikosti  $Re_D$ . Jedná se o nucenou konvekci, součinitel přestupu tepla určujeme ze středního Nusseltova čísla  $Nu_D = f(Re_D, Pr)$ . Dle vztahu podle Žukauskase se vypočítá jako

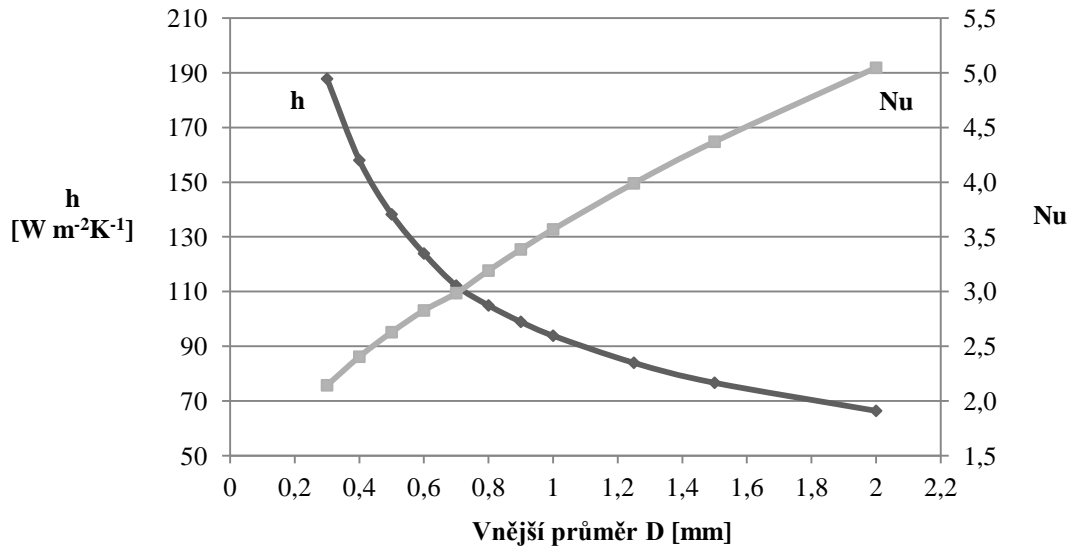
$$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^n \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4} . \quad (8.9)$$

Všechny fyzikální parametry se určují při teplotě prostředí až na  $Pr_w$ , Prandtlovo čísla na povrchu stěny. Hodnoty konstant  $C$ ,  $m$ ,  $n$  se kategorizují podle režimu proudění a jsou uvedeny v závislosti na velikostech  $Re$  a  $Pr$  v tabulce v literatuře [15]. Součinitel přestupu tepla  $h$  závisí na Nusseltovu číslu, tepelné vodivosti kapaliny a obtékaném průměru dle vztahu

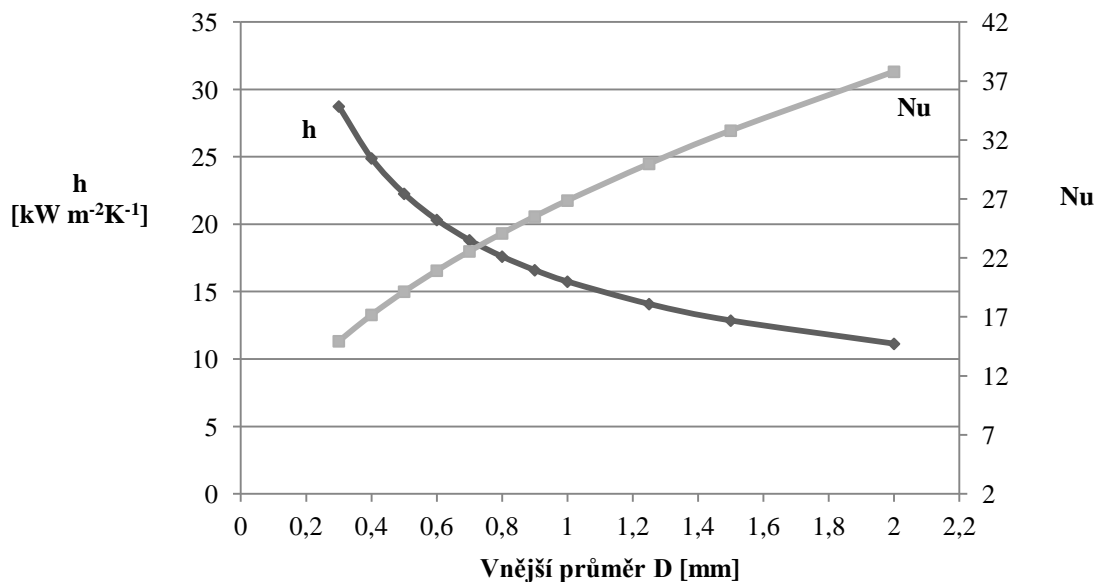
$$h_o = \frac{\overline{Nu}_D k}{D_o} . \quad (8.10)$$

Množství přeneseného tepla můžeme navýšit snížením průměru obtékaných trubiček, zvýšením rychlosti obtékané kapaliny nebo změnou jejich parametrů zvýšením teploty. Z pohledu celkové efektivity výměníku je lepší, když teplejší médium proudí na vnitřní straně vláken. Blíže byl rozebrán vliv změny průměru a rychlosti pítékající tekutiny na přenos tepla.

Při proudění kolem vláken malých průměrů se uplatňuje vždy laminární režim. Na následujících grafech (Obr. 8.9 a Obr. 8.10) můžeme pozorovat, že při zmenšování průměru válce se snižuje Nusseltovo číslo a naopak značně stoupá součinitel přestupu tepla. Nárůst součinitele přestupu tepla je nepřímo úměrný rozměru vláken. Graf byl vytvořen pro hodnoty průměrů 0,3–2 mm válce obtékaného vzduchem (Obr. 8.9) a vodou (Obr. 8.10).

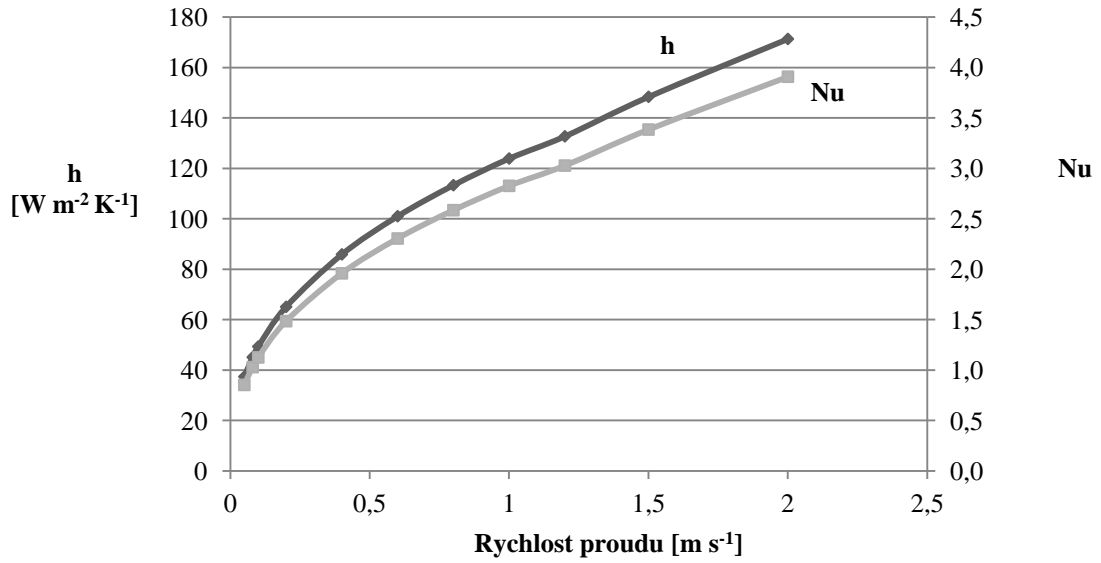


Obr. 8.9 Závislost Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na vnějším průměru vzduchem obtékaného válce ( $v = 1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $T_w = 350 \text{ K}$ )

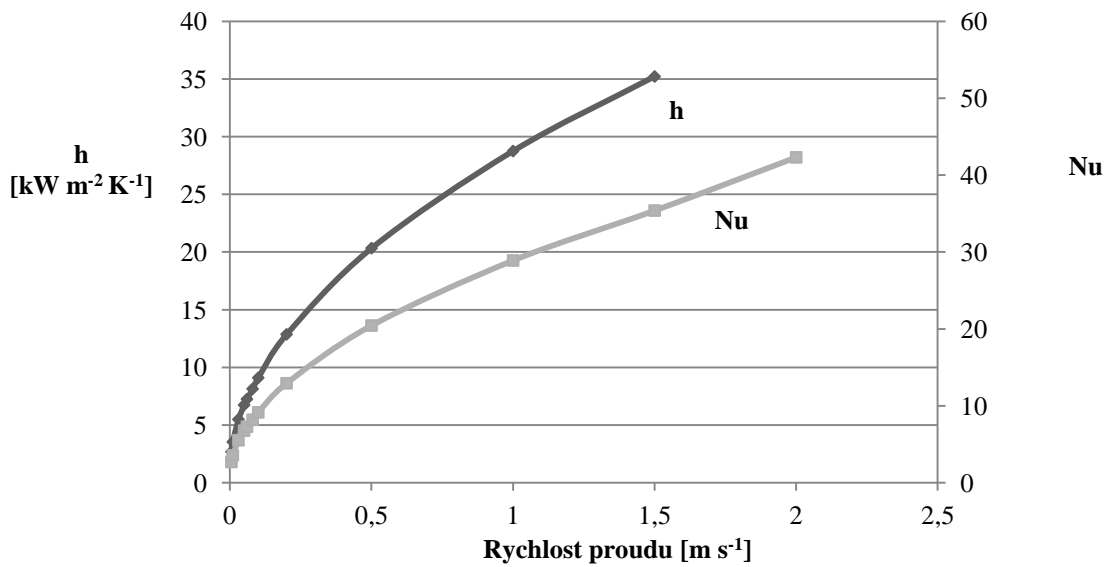


Obr. 8.10 Závislost Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na vnějším průměru vodou obtékaného válce ( $v = 0,5 \text{ m s}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ °C}$ ,  $T_w = 40 \text{ °C}$ )

V dalších grafech (Obr. 8.11 a Obr. 8.12) je zobrazen vliv rychlosti obtékajícího média na přenos tepla přes stěnu válce. S nižší rychlostí přitékání se snižuje i přenos tepla. Tento pokles je víceméně lineární až po hodnotu  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ . Od této rychlosti nastává významný pokles  $h$  i  $Nu$ , a to jak pro obtékání vodou, tak vzduchem. Rychlost tekutiny přitékající k válci by tedy měla být vyšší než  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ . Graf byl vytvořen pro rychlosti  $0,005\text{--}2 \text{ m s}^{-1}$ .



Obr. 8.11 Závislost Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na rychlosti přitékajícího proudu (vzduch  $T = 300 \text{ K}$  obtékající válec průměru  $0,6 \text{ mm}$ ,  $T_{st} = 350 \text{ K}$ )



Obr. 8.12 Závislost Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na rychlosti přitékajícího proudu (voda  $T = 20 \text{ °C}$  obtékající válec průměru  $0,6 \text{ mm}$ ,  $T_{st} = 40 \text{ °C}$ )

### 8.3 Diskuse použitelnosti vzorců pro plastová vlákna

Předchozí úvahy vycházely ze vztahů pro přenos tepla používaných pro klasické tepelné výměníky. Kvůli velmi malým rozměrům bylo často pochybováno o tom, zda je chování tekutiny v mikrokanálech stejné jako u potrubí řádově větších rozměrů. Neobvyklé jevy při proudění a přenosu tepla nebo se snažilo potvrdit či vyvrátit mnoho výzkumů. Například v [44] byl zjištěn přechod režimu proudění dříve než je obvyklé u potrubí větších průměrů, tedy že hodnota kritických Reynoldsových čísel se odvíjí od průměru kanálu. Závislost Nusseltova čísla na  $Re$ ,  $Pr$  a geometrii kanálu byla popsána nejen pro turbulentní, ale i pro laminární proudění. V této práci dospěli k závěrům, že geometrie kanálu a koncentrace pracovní látky má na součinitel přestupu tepla kritický vliv. Studie byla provedena pro pravoúhlé mikrokanály protékané směsí metanolu a vody.

Srovnání experimentálních výsledků pro laminární proudění vody v mikrotrubičkách z nerezů průměru 0,1, 0,3 a 0,5 mm s hodnotami získanými numericky dle klasické teorie přenosu tepla a charakteristik proudění se zabývá práce [45]. Bylo potvrzeno, že pro kapilární zkoumavých dimenzí včetně vstupního úseku je opodstatněno použití klasických přístupů. Lokální hodnoty  $Nu$  byly v dobré shodě s běžnou teorií. Při určování součinitele tření byla prokázána platnost vztahu  $fRe = 64$ . Přechod z laminárního na turbulentní proudění s nižší hodnotou  $Re$  nabyt zaznamenán. Stejně tak vyvrátili změnu režimu proudění z laminárního na turbulentní proudění při neobvykle nízkých  $Re$  v [41] na rozsáhlé sérii experimentů s mikrotrubičkami průměrů 50–247  $\mu\text{m}$ .

K odhalení charakteristik proudění a přenosu tepla pro kapalinu protékající laminárně mikrokanály byla provedena podrobná experimentální a numerická analýza v [46]. Použity byly hladké trubičky z křemenného skla průměrů 50–100  $\mu\text{m}$  a nerezové potrubí s různou drsností dimenzí 373–1570  $\mu\text{m}$ . Měření ukázalo, že pro hladké kanály byl faktor tření v dobré shodě s běžnými předpoklady. U drsných kovových trubek byl vyšší a rostl se zvětšující se drsností. Klasické vztahy pro určení ztráty třením je tak možno použít bez dopouštění se chyby, pokud je relativní drsnost povrchu menší než 1,5 %. Dále bylo zjištěno, že součinitel přestupu tepla pro kovové trubky není v dobré shodě s obvyklými předpoklady, pokud je  $Re$  nízké a tloušťka stěny velká v poměru k poloměru kanálu. V takových případech se totiž výrazněji projevuje vedení tepla stěnou v podélném směru a tuto axiální kondukcii není možno zanedbat.

Vlivem určitých faktorů na proudění a přenos tepla při změně velikostí se zabývá [47]. Kvůli většímu poměru povrchu/objemu nabývají u mikrokanálů na důležitosti některé vlivy jako viskózní síly, způsobující plošší profil rychlosti a větší součinitel tření a Nusseltovo číslo.

Stat' [48] zpochybňuje rozdělování zařízení na mikro a makro. Navier-Stokesovy rovnice platí bez rozdílu, ať se jedná o proudění v kanálech jakýchkoli dimenzí. Při menších rozměrech pouze nabývají na důležitosti určité jevy, které je při větších rozměrech potrubí možné zanedbat. Jsou jimi podélná vodivost, velké gradienty teploty a tlaku podél potrubí a drsnost stěny. Klíčový je první efekt, uplatňující se při relativně velkých tloušťkách stěn vzhledem k průměru.

Výsledky studií k zjištění charakteristik proudění a přenosu tepla v mikrokanálech se vždy neshodovaly. Většina výzkumů ovšem došla k názoru, že se neliší od klasických teorií pro potrubí obvyklých rozměrů. Zvláště pro vlákna hladkých povrchů s malou tloušťkou stěny můžeme bez omezení používat běžné vztahy pro přenos tepla, uvedené v [15] a [40]. Jediný zásadní rozdíl je ve vedení tepla stěnou z polymerů. Při oddělení pracovních médií stěnou z plastů vznikají jiné podmínky pro průchod tepla, jelikož tepelný odpor přepážky z polymerů

je značně odlišný od vodivých kovů. Určení celkového součinitele prostupu tepla za těchto podmínek se zabývali v [5] a [49].

V běžných úvahách o přenosu tepla při nucené konvekci v potrubí jsou obvykle rozlišovány dva případy, tj. konstantní teplota stěny  $T_w$  nebo konstantní tepelný tok přiváděný stěnou  $q_w$ . Tento předpoklad vychází z tepelné analýzy chování média uvnitř konvenčních potrubí z kovů, jakožto materiálů schopných akumulace velkého množství tepla. Zároveň díky výborné tepelné vodivosti kovových materiálů nečiní stěna velkou překážku průchodu tepla (méně než 5 % z celkového součinitele prostupu tepla [5]). Z tohoto důvodu je odpor proti vedení stěnou trubky v analýze konvektivního přenosu tepla často zanedbáván.

V případě vláken z polymerů by se ovšem jednalo o značné zjednodušení situace. Tepelná charakteristika plastů je zcela jiná od kovů. I při malých tloušťkách tvoří stěna významný odpor proti vedení tepla. Konvekce uvnitř kanálu se odvíjí od vnějšího odporu, stejně tak Nusseltovo číslo. Ve většině případů neplatí podmínka konstantního tepelného toku ani konstantní teploty stěny.  $Nu$  pak nabývá hodnot z intervalu mezi těmito limitními případy, tj.  $Nu \in (3,66; 4,36)$ . Zjednodušení celé situace na volbu vyššího Nusseltova čísla dle kapitoly 8.2 vede k nadhodnocení tepelného přenosu výměníku. Uvažovat případ konstantního tepelného toku můžeme jen při větších tloušťkách trubiček nebo pro vnitřní proudění plynu [49].

V literatuře se uvádí dva přístupy řešení problému vnitřní konvekce při laminárním proudění a nezanedbatelném odporu stěny [5]. První přístup je komplexnější, nicméně matematicky dosti složitý. Tímto způsobem bylo dokázáno, že přenos tepla stěnou z polymerů můžeme považovat za radiální, tedy ve všech případech zanedbat vedení tepla stěnou podél potrubí. Při shrnutí vnějších odporů proti prostupu tepla (tj. odporu stěny a odporu vnější konvekci) jako souhrnného vnějšího odporu můžeme na problém nahlížet jako na běžnou konvekci. Stačí pak řešit energetické rovnice pro vnitřní proudění spolu s podmínkou třetího druhu (konvektivní okrajová podmínka na vnitřním povrchu trubky a konstantní teplotě obklopujícího média). Z tohoto přístupu vyplývá, že pro plně vyvinuté proudění je přesnější počítat Nusseltovo číslo pro vnitřní proudění v trubce ze vztahu

$$Nu_{T3} = \frac{\frac{48}{11} + Nu_w}{1 + \frac{59}{220} Nu_w}, \quad (8.11)$$

kde

$$Nu_w = \frac{U_w D_i}{k_i} \quad (8.12)$$

$$\frac{1}{U_w} = \frac{D_i}{D_o h_o} + \frac{D_i}{2k_w} \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right). \quad (8.13)$$

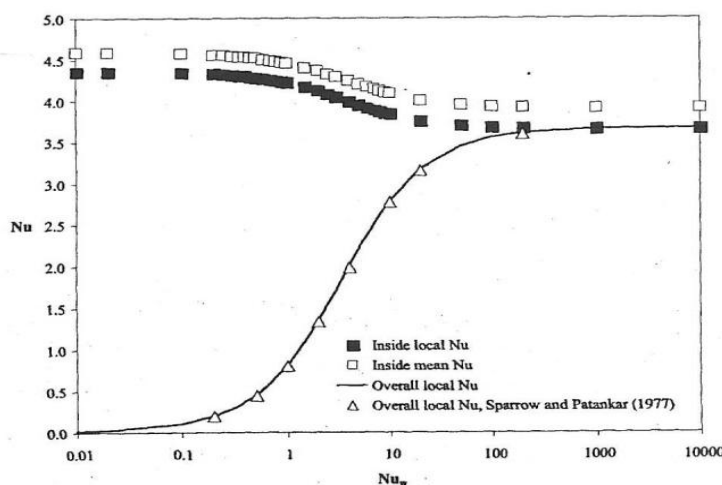
V případě zanesení je možno do rovnice (8.13) přidat odpor nánosů. Dle (8.11) může Nusseltovo číslo u konvektivního přenosu tepla uvnitř potrubí nabývat limitních velikostí 3,66 při  $Nu_w = \infty$  a 4,36 v případě  $Nu_w = 0$ , tedy hodnot pro konstantní teplotu stěny, resp. konstantní tepelný tok. Závislost tohoto lokálního Nusseltova čísla na vnějším odporu daném  $Nu_w$  je znázorněna na Obr. 8.13. Celkové Nusseltovo číslo je pak možno spočítat jako

$$\frac{1}{Nu_{ov}} = \frac{k_i}{U_i D_i} = \frac{1}{Nu_{T3}} + \frac{1}{Nu_w} \quad (8.14)$$

a

$$\frac{1}{U_i} = \frac{A_i \Delta T_{lm}}{Q} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{U_w} \quad (8.15)$$

Dle těchto rovnic stačí k určení celkového Nusseltova čísla znát součinitel přestupu tepla při obtékání trubek. Vztahy jsou platné pro tepelný výměník s trubičkami o průměru menším než 2,5 cm a délce větší než 0,6–0,9 m [49].



Obr. 8.13 Závislost Nusseltova čísla uvnitř potrubí a celkového Nusseltova čísla na Nusseltově čísle stěny o konečném odporu

## 8.4 Výpočet celkového součinitele prostupu tepla a výkonu výměníku

S použitím vztahů (8.11–8.14) byl v Laboratoři přenosu tepla a proudění vyvinut program pro výpočet celkového součinitele prostupu tepla, tlakové ztráty a dalších kritérií k hodnocení účinnosti tepelné výměny pro křížově obtékaný svazek trubek. Tento program je využitý při numerických simulacích uvedených v práci. Na Obr. 8.14 můžeme vidět pracovní okno programu, vytvořeného v grafickém prostředí Delphi. Jako vstupní data se zadávají rozměry zařízení (vnější a vnitřní průměr trubek, jejich počet, rozměry příčného průřezu, z nichž šířka je zároveň účinná délka trubek), materiál, přes který se přenos tepla uskutečňuje a typ pracovních médií na obou stranách včetně vstupních teplot a objemového toku pro vnitřní proudění, resp. rychlosti pro obtékající kapalinu. Výstupem je pak celá řada veličin, počínaje fyzikálními vlastnostmi pracovních médií, které jsou počítány ze vstupních teplot tekutin ve shodě s hodnotami v tabulkách v [15]. Dále objemový tok vně trubek z rozměrů příčného průřezu pláště a průměrná rychlost proudění uvnitř potrubí, určená z objemového toku vnitřním kanálem a účinného průřezu dle vztahu

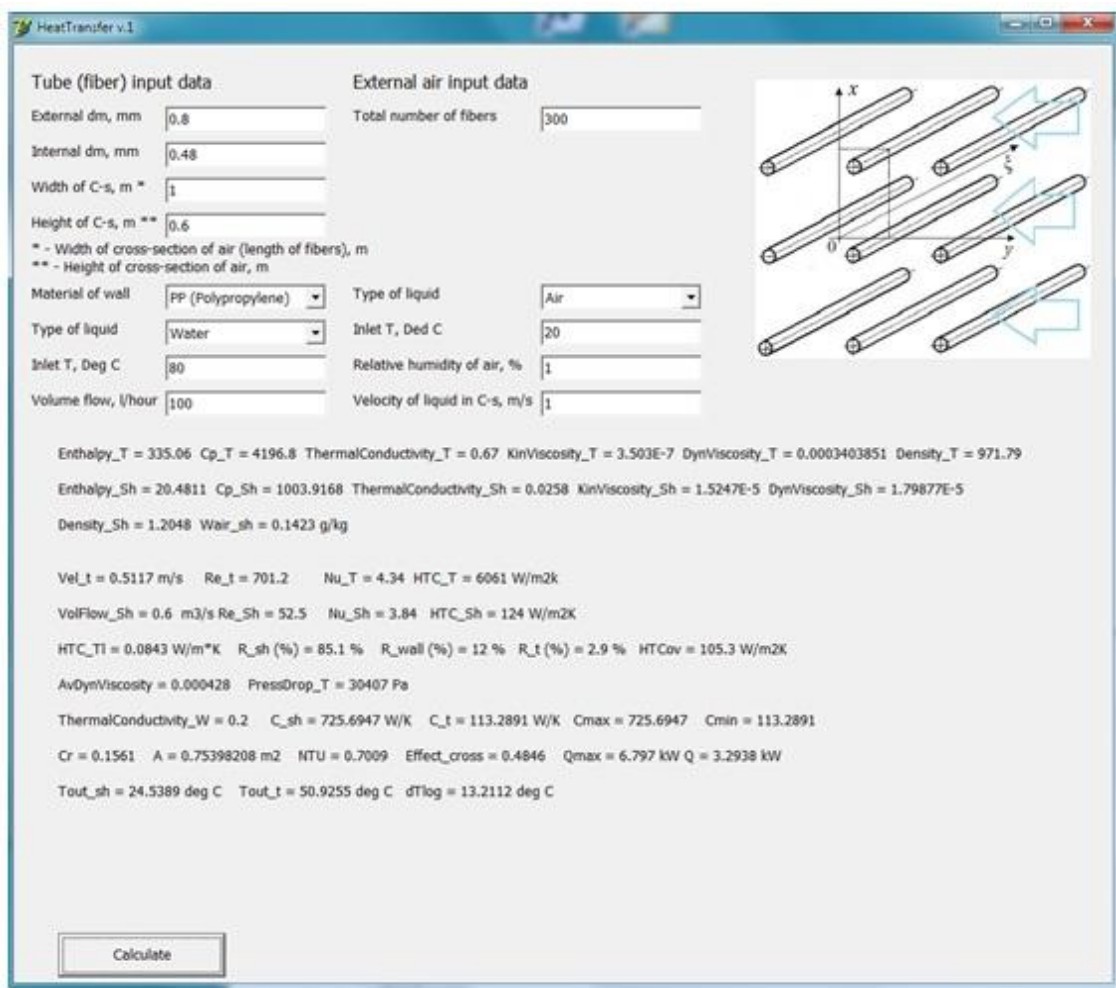
$$u = \frac{\dot{V}_t}{N \cdot \frac{1}{4} \pi D_i^2}, \quad (8.16)$$

kde  $N$  je počet trubek ve svazku. Ze středních hodnot rychlostí je pak možno určit Reynoldsova čísla dle vztahů (8.1) a (8.8), Nusseltova čísla podle (8.11) a vztahu dávajícího přibližně stejné hodnoty jako (8.9) a z nich součinitel přestupu tepla na vnitřní i vnější straně trubek.

Důležitým výstupem programu je celkový součinitel prostupu tepla

$$U_l = \frac{1}{R_l} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_o} = \frac{1}{D_o h_o} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2k_w} + \frac{1}{D_i h_i}, \quad (8.17)$$

podíl jednotlivých odporů na celkovém prostupu tepla stěnou a součinitel prostupu tepla vztažený k největšímu průměru ( $U_{ov}$ ).



Obr. 8.14 Okno výpočetního programu [50]

Celkový návrh výměníku je možno početně řešit buď metodou středního logaritmického spádu nebo metodou  $\varepsilon$ -NTU, založené na efektivnosti výměníku. Efektivnost tepelného výměníku můžeme definovat jako

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}}, \quad (8.18)$$

kde  $\dot{Q}$  je skutečný přenášený tepelný tok výměníku a  $\dot{Q}_{max}$  je maximální možný tok přenášený mezi dvěma látkami ve výměníku. Je možno ho dosáhnout jen teoreticky v nekonečně dlouhém protiproudém výměníku, kdy se teploty obou médií na konci výměníku vyrovnají. Obecný vztah pro maximální přenášený tok ve výměníku je

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{h,in} - T_{s,in}) , \quad (8.19)$$

kde  $C_{min}$  je menší tepelná kapacita z  $C_h$  a  $C_s$ . Samotná efektivnost výměníku je funkcí bezrozměrného parametru NTU a poměru tepelných kapacit pracovních médií  $C_{min}/C_{max}$ . Veličina NTU je počítána z celkové plochy vnějších teplosměnných povrchů

$$A = N \cdot \pi D_o L , \quad (8.20)$$

součinitele prostupu tepla, vztaženého k vnějšímu průměru, a  $C_{min}$  jako

$$NTU = \frac{U_{ov} \cdot A}{C_{min}} . \quad (8.21)$$

Z tepelného toku výměníkem lze lehce dopočítat skutečné výstupní teploty médií:

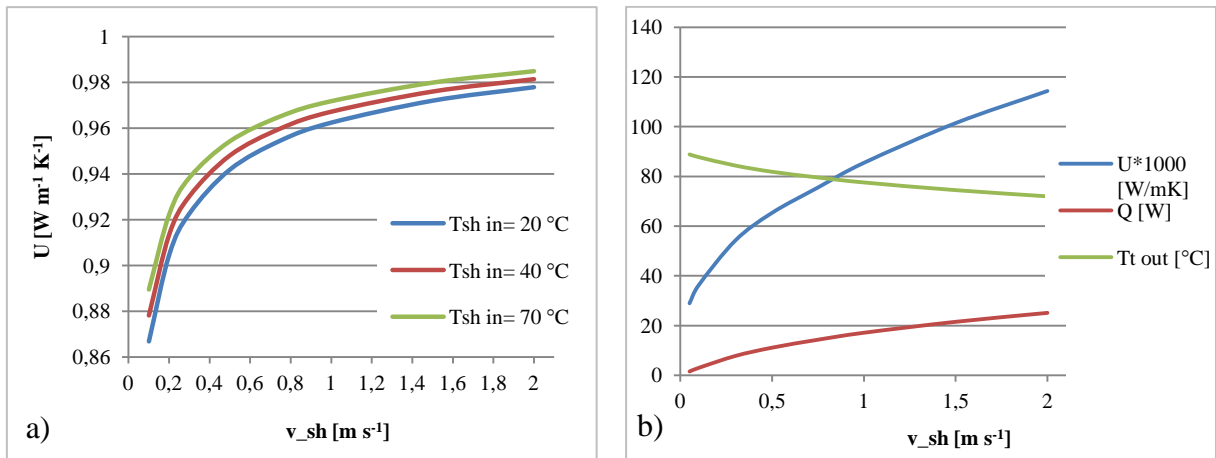
$$T_{h2} = T_{h1} + \frac{Q}{C_t} , \quad T_{s2} = T_{s1} + \frac{Q}{C_s} . \quad (8.22)$$

Posledním důležitým parametrem při hodnocení tepelného výměníku je tlaková ztráta. U proudění v plášti závisí na rozložení vláken, což je zatím nad rámec programu. Významnější je ale tlaková ztráta vznikající prouděním tekutiny uvnitř tenkých kapilár, dána vztahem (8.7), pro celý výměník pak  $N$  násobkem.

S představeným programem lze pohlížet na přenos tepla v tepelném výměníku komplexně. Nyní se několika výpočty a srovnáním pokusíme najít optimální parametry pro návrh tepelného výměníku. Diskutovaným problémem jednotek s dutými vlákny je špatný přenos tepla. Ke zvýšení tepelné účinnosti je třeba snížit tepelný odpor  $R_l$  (určený rovnicí 8.17). S přihlédnutím na zjednodušení mechanismu tepelné výměny dle vztahů 8.11–8.14 zjistíme, že při zvolených dimenzích vláken, materiálu stěny a obou pracovních médií závisí celkový součinitel prostupu tepla pouze na vnějším Nusseltovu číslu, které je funkcí rychlosti proudění kapaliny na straně pláště a charakteristik vnějšího média, odvíjejících se od jeho teploty. Jak se celkový součinitel přestupu tepla mění v závislosti na rychlosti pro různé teploty na vstupu kapaliny do pláště se znázorněno na Obr. 8.15a. Vidíme, že se zvyšující se rychlostí proudění vody v plášti se zvyšuje i součinitel prostupu tepla. Tento narůst je velmi výrazný zhruba do  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ , od této hodnoty se zvyšuje jen pozvolna. Přitom vstupní teplota vody na vnější straně výrazně neovlivňovala přestup tepla. Odtud je usouzeno, že je výhodnější zvolit teplejší médium na stranu kapilár. Rychlost proudění kolem kapilár by z hlediska přenosu tepla měla být vyšší než  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ , ohled se musí brát také na tlakovou ztrátu. Pro vzduch jsou změny viskozity a Prandtlova čísla v rozsahu teplot 0–100°C ještě menší, takže hodnota součinitele prostupu tepla při daných parametrech závisí pouze na rychlosti proudění v plášti. Na Obr. 8.15b je proto závislost tohoto parametru uvedena jen pro jednu teplotu. Navíc v grafu můžeme vidět, jak se v závislosti na rychlosti mění výkon výměníku a teplota na výstupu z kapilár. Růst součinitele přestupu tepla s rychlostí je v případě plynného média výraznější. Nejlepší je pro velké rychlosti proudění. Je proto dobré udržovat rychlost proudění vzduchu v plášti větší než  $1 \text{ m s}^{-1}$ . S rostoucí rychlostí obtékání vláken v plášti se



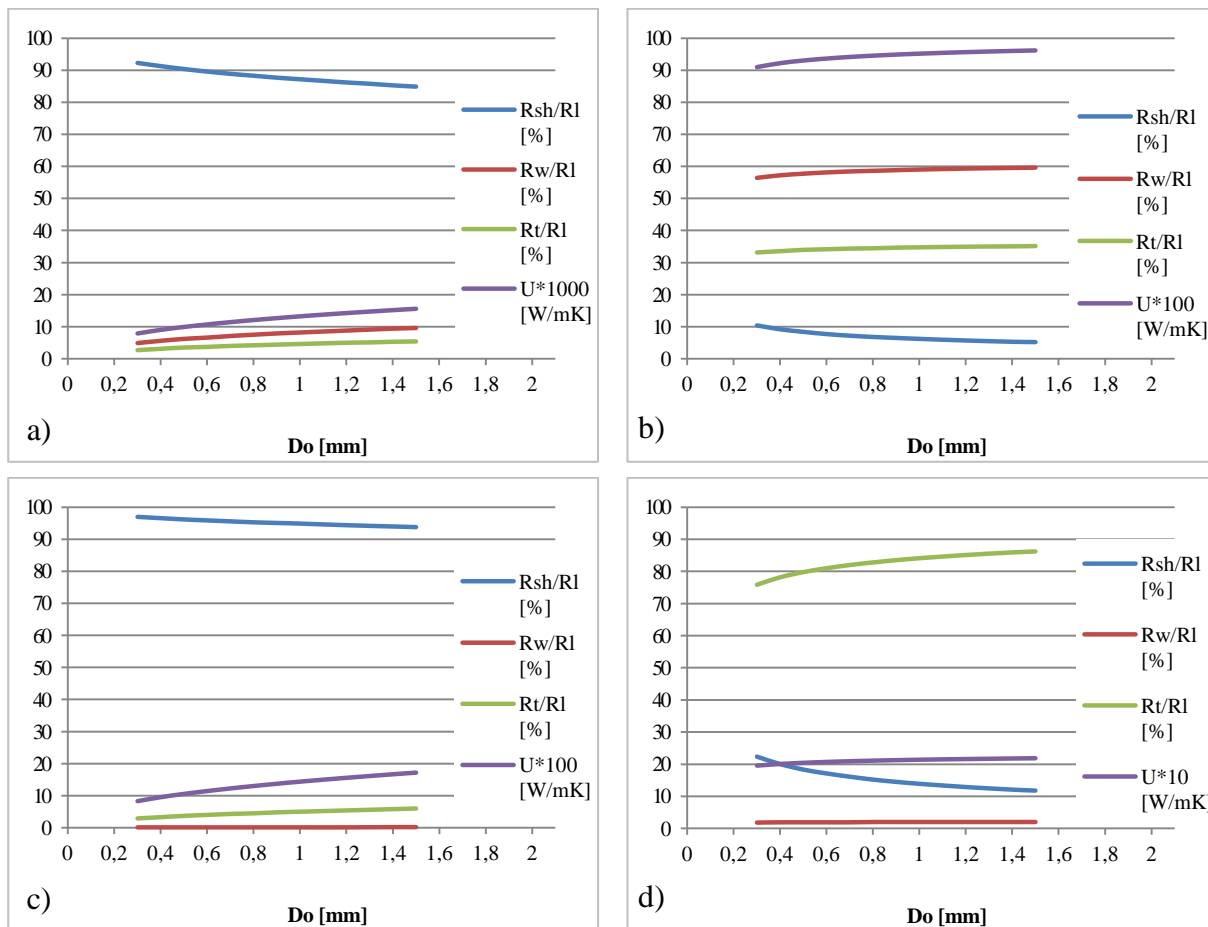
zvyšuje také tepelný výkon výměníku a dochází k lepšímu ochlazení kapaliny na výstupu z vláken. Závěry jsou ve shodě s Obr. 8.11 a Obr. 8.12.



Obr. 8.15 Vliv rychlosti vnějšího příčného proudění a) na celkový součinitel prostupu tepla při různých teplotách vody do pláště; b) na přenos tepla pro vzduch, vstupní teplota 20 °C (model s 2500 PP vláknů délkou 0,6 m dimenzí 0,7/0,56 mm při rychlosti vody uvnitř trubek 0,54 m s<sup>-1</sup> a teplotě 90 °C)

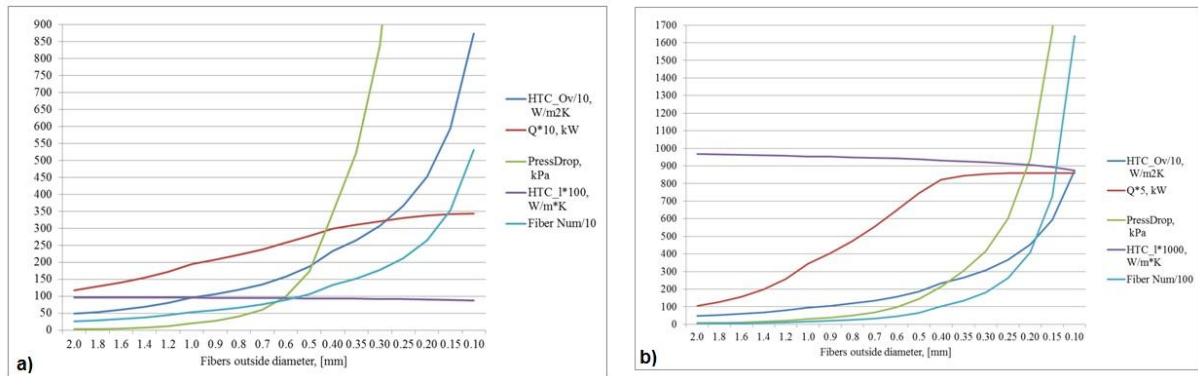
V úvahách nad výsledky zobrazenými na Obr. 8.15 bylo rozebráno, jak prostup tepla z jednoho teplotonosného média na druhé ovlivňují provozní podmínky, tedy rychlost a teplota tekutiny v plášti pro různá pracovní média při zvolených dimenzích a materiálu stěny. V kap. 8.1 a 8.2 bylo ukázáno, že se zmenšujícím se průměrem se zvyšuje součinitel prostupu tepla na vnitřní i vnější straně vláken. Do jaké míry ale ovlivňuje průměr vláken celkový součinitel prostupu tepla a jaký podíl na tom mají lokální konvektivní odpory a odpor stěny proti vedení pro různé materiály a pracovní média bude rozebráno dále. Celkový odpor proti tepelné výměně je dle rovnice (8.17) tvořen lokálními konvektivními odpory na vnější a vnitřní straně teplosměnné plochy a odporu proti vedení stěnou. V případě zanesení výměníku je rozšířen o odpor nánosu; tady ale bylo zanášení zanedbáno. Na Obr. 8.16 můžeme vidět grafy pro kombinace různých materiálů stěny a pracovní látky a průměry vláken 0,3–1,5 mm. Vnitřní průměr tvořil ve všech případech  $0,8D_o$ . Pro srovnání byly zvoleny materiály s výrazně jinou tepelnou vodivostí, a to ocel a PP a jako média na straně pláště voda a vzduch. Z grafů vidíme, že poměrná velikost jednotlivých odporů se s velikostí průměru příliš nemění. Co se ale významně liší, je podíl lokálních členů na celkovém součiniteli prostupu tepla. V případě plastového výměníku dutými polypropylenovými vlákny obtékanými vzduchem tvoří právě přenos tepla ze vzduchu konvekcí největší překážku proti tepelné výměně. Znamená více než 80% z celkového odporu. Odpor nevodivé stěny z polymeru oproti tomu tvoří méně než 10 % (Obr. 8.16a). Situace se zcela mění pro vodu jakožto médium s mnohem vyšší vodivostí. Odpor stěny zde nabývá na významu. Zastupuje více než 50% z celkového odporu proti tepelné výměně. Odpor na vnitřní straně trubek tvoří o něco více než 30% (Obr. 8.16b). Dále byla provedena simulace pro ocelovou stěnu (tepelná vodivost asi 65 krát vyšší) stejných tloušťek (Obr. 8.16d). Její odpor proti vedení je v obou případech velmi malý. U výměníku typu vzduch – voda je to opět odpor vzduchu, který nejvíce brání tepelné výměně (pro malé průměry trubiček téměř 100% zastoupením). V případě vody jako pracovní látky na obou stranách teplosměnné plochy se na odporu proti přenosu tepla významně podílí konvekce na vnitřní straně kanálu. Ve všech případech platí, že se snižujícím se průměrem nabývá na významu lokální odpor proti přenosu tepla konvekcí na vnější straně pláště oproti jiným

lokálním odporům. Celkový součinitel prostupu tepla se při snižování průměru vláken mírně zmenšuje.



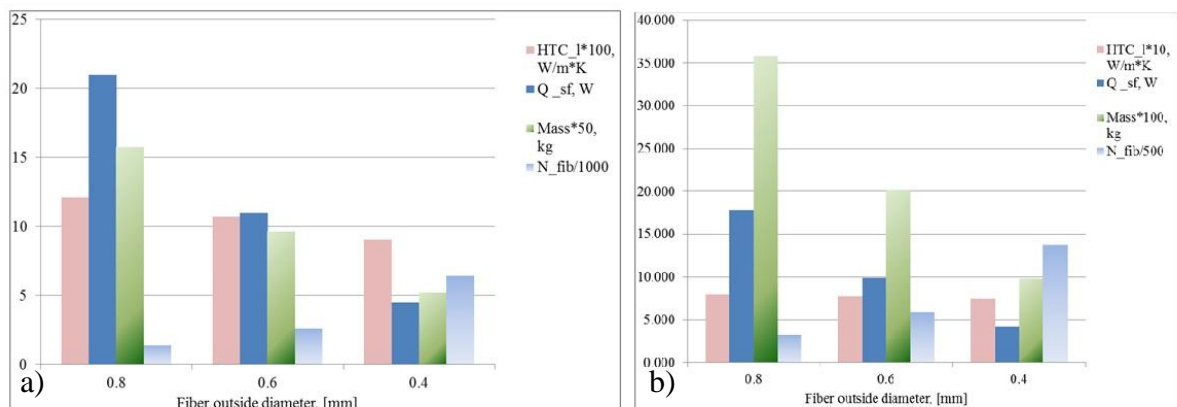
Obr. 8.16 Podíl lokálních odporů na celkovém odporu proti prostupu tepla a) vzduch a PP ( $\lambda = 0,18 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); b) voda a PP; c) vzduch a ocel ( $\lambda = 12 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); d) voda a ocel (model křížového výměníku, objemový tok vody na vnitřní straně 1500 l/hod, rychlost vzduchu/vody v plášti  $2 \text{ m s}^{-1}$ , resp.  $0,6 \text{ m s}^{-1}$ , tepelný spád  $70/20^\circ\text{C}$ )

Dále byl sledován vliv průměru vláken na přenos tepla a tlakovou ztrátu v simulaci výměníku kapalina – kapalina (Obr. 8.17) [50]. Jako konstantní byla v prvním případě zvolena celková vnější teplosměnná plocha ( $1 \text{ m}^2$ ). S klesajícím průměrem tak výrazně narůstal počet trubek. S více vlákny menšího průtočného průřezu značně narůstá energie nutná k překonání vnitřní tlakové ztráty. S vyšším počtem vláken nižších průměrů pozvolna narůstal tepelný výkon výměníku. Díky menším průměrům je možno k dosažení stejné teplosměnné plochy zapojit do výměníku více vláken s větší celkovou délkou. Pro stejný výkon je přitom produkce vláken menších průměrů spojena s menší spotřebou materiálu (Obr. 8.17b). Zároveň můžeme z grafu (Obr. 8.17) vidět, že ke zlomu a výraznému nárůstu tlakové ztráty a počtu vláken a zmenšení strmosti křivky pro výkon dochází, pokud je vnější průměr menší než  $0,6 \text{ mm}$ . Do tohoto rozměru vláken není zvyšování energie, nutné k protlačení média trubičkami malých dimenzí, tak značné a současně se snižujícím průměrem dochází k nárůstu tepelného výkonu.



Obr. 8.17 Vliv průměru vláken na celkový přenos tepla při a) konstantní teplosměnné ploše; b) konstantní spotřebě materiálu (model křížového výměníku typu voda – voda, objemový tok uvnitř trubek 1000 l/hod, rychlost vnějšího proudění  $1 \text{ m s}^{-1}$ , tepelný spád 20/50°C) [50]

Jádrem práce [50] je simulace tepelného výměníku určitého výkonu při různých rozměrech zařízení. V prvním případě je zvolen případ tepelného výměníku kapalina – vzduch o výkonu 29 kW a tlakové ztrátě nepřesahující 20 kPa. Byl ponechán konstantní poměr teplot vstupujících médií (voda/vzduch 90/30 °C) a rychlost vzduchu v plášti  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Ostatní vstupní parametry (dimenze vláken a jejich délka, objemový tok na vnitřní straně a počet vláken) byly měněny tak, aby bylo dosaženo požadovaného výkonu a nebyl přesažen limit na tlakovou ztrátu. Počítáno bylo s kapilárami z polypropylenu ( $\lambda = 0,18 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). Vyšší efektivity výměníku je dosaženo pro nižší objemové toky (nižší rychlosti uvnitř vláken), protože díky pomalejšímu proudění je rozdíl teplot na vstupu a výstupu z trubiček daleko vyšší. Srovnávány byly vždy výměníky s vlákny různých dimenzí při stejné efektivitě zařízení (Obr. 8.18). Vyšší průměr trubek spolu s větší délkou znamenal nižší potřebný počet vláken v plášti, ale také daleko vyšší spotřebu materiálu. Celkový součinitel prostupu tepla byl mírně lepší pro vlákna vyšších průměrů. Trubky větších průměrů mohou být pro stejnou tlakovou ztrátu delší a umožňují vyšší objemový tok při stejném výkonu čerpadla. Trubky menších délek a dimenzí znamenají naopak přenos stejného tepelného výkonu při menší teplosměnné ploše. Výměníky s kratšími vlákny malých průměrů proto vynikají úsporou objemu a materiálu, tedy umožňují vytvořit kompaktní jednotky nízké hmotnosti.



Obr. 8.18 Simulace výměníku - srovnání vlastností pro různé typy vláken při stejné efektivitě. a) model vzduch – kapalina:  $\varepsilon \approx 0,53$  ( $D_{o1} = 0,8 \text{ mm}$   $L_1 = 1,4 \text{ m}$ ,  $D_{o2} = 0,6 \text{ mm}$   $L_2 = 0,8 \text{ m}$ ,  $D_{o3} = 0,4 \text{ mm}$   $L_3 = 0,4 \text{ m}$ ); b) model kapalina – kapalina:  $\varepsilon \approx 0,99$  ( $D_{o1} = 0,8 \text{ mm}$   $L_1 = 1,35 \text{ m}$ ,  $D_{o2} = 0,6 \text{ mm}$   $L_2 = 0,75 \text{ m}$ ,  $D_{o3} = 0,4 \text{ mm}$   $L_3 = 0,35 \text{ m}$ ) [50]

Stejná simulace byla provedena pro výměník typu kapalina – kapalina (Obr. 8.18b). Předpokladem byl výkon 29 kW a tlaková ztráta menší než 60 kPa při rychlosti vody v plášti  $0,05 \text{ m s}^{-1}$  a teplotním spádu  $4/30 \text{ °C}$  s chladnější kapalinou na vnitřní straně. Vlastnosti materiálu stejné jako v předchozím případě. Nalezené efektivity byly výrazně vyšší. Ostatní závěry jsou stejné jako pro simulaci s pracovními médii vzduch – kapalina.

## 8.5 Vliv délky vláken

Ve studii [11] je uvedeno, že výměníky s dutými vlákny typu kapalina – kapalina dosahují efektivity blízké 1 při malé efektivní délce vláken. S pomocí program byl zkoumán vliv délky vláken na efektivitu přenosu tepla a teplotu tekutiny na výstupu z vláken. Cílem bylo srovnání modelů výměníků s různými délkami trubek a zjištění, na jaké délce se uplatňuje přenos tepla nejvíce. Návrhem výměníku s příliš dlouhými vlákny se zvětšuje objem zařízení, potřebné průtočné množství média pláštěm a tlaková ztráta na vnitřní straně vláken.

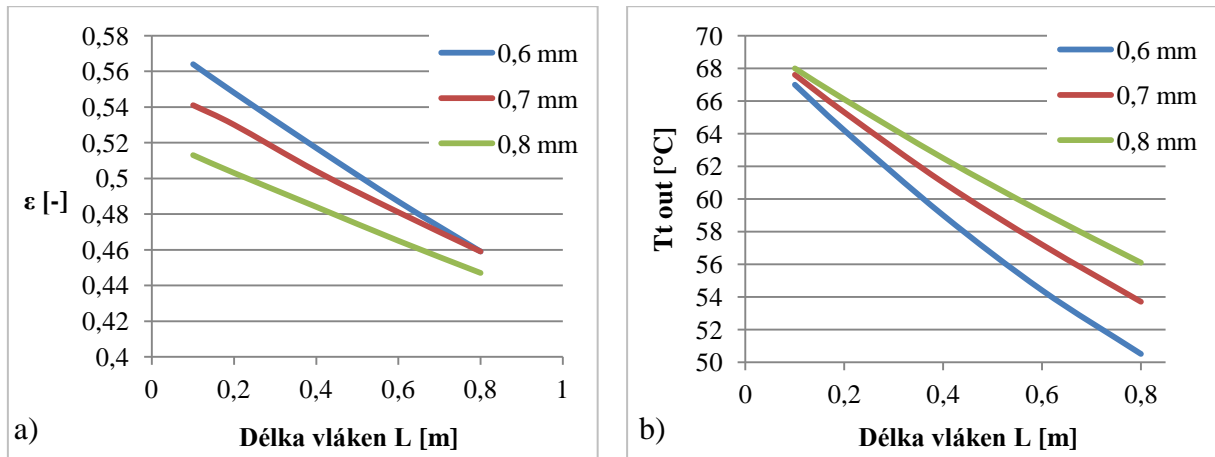
$D_o$ [mm]	L [m]	A [ $\text{m}^2$ ]	$\varepsilon$ [-]	$T_{t\_out}$ [°C]	$T_{sh\_out}$ [°C]	$\Delta p_t$ [kPa]
0,6	0,1	0,47	0,564	67	48,2	2,8
	0,2	0,94	0,548	64,2	47,4	5,6
	0,4	1,88	0,517	59	45,8	11,7
	0,6	2,83	0,487	54,4	44,4	18,3
	0,8	3,77	0,459	50,5	43	25
0,7	0,1	0,55	0,541	67,6	47	2
	0,2	1,1	0,53	65,3	46,4	4,1
	0,4	2,2	0,504	61	45,2	8,6
	0,6	3,3	0,481	57,2	44	13,3
	0,8	4,4	0,459	53,7	42,9	18,2
0,8	0,1	0,63	0,513	68	45,6	1,6
	0,2	1,26	0,503	66,1	45,1	3,2
	0,4	2,51	0,484	62,5	44,2	6,5
	0,6	3,77	0,465	59,2	43,3	10,1
	0,8	5,03	0,447	56,1	42,4	13,8

Tab. 8.1 Srovnání efektivity a výstupních teplot výměníku typu voda – vzduch pro různé délky vláken

Byl simulován přenos tepla pro výměníky se stejným počtem PP vláken (2500) v modelu výměníku s křížovým prouděním typu voda – vzduch (teploty na vstupu  $70/20 \text{ °C}$ ) při proudění vzduchu v plášti o rychlosti  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Výsledky byly získány pro tři rozměry vláken (0,6/0,48 mm; 0,7/0,56 mm; 0,8/0,64 mm). Vnitřní průměr byl stejně jako v předchozích výpočtech vždy 80% vnějšího průměru vláken. Výška pláště byla volena tak, aby bylo udržováno přibližně stejné nahuštění vláken v plášti a vnitřní objemový tok tak, aby rychlost kapaliny uvnitř trubek byla asi  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ . Pro každou variantu dimenzí pak byla srovnána hodnota efektivnosti, teplot na výstupu a tlakové ztráty pro délky vláken v rozmezí 0,1–0,8 m (Tab. 8.1).

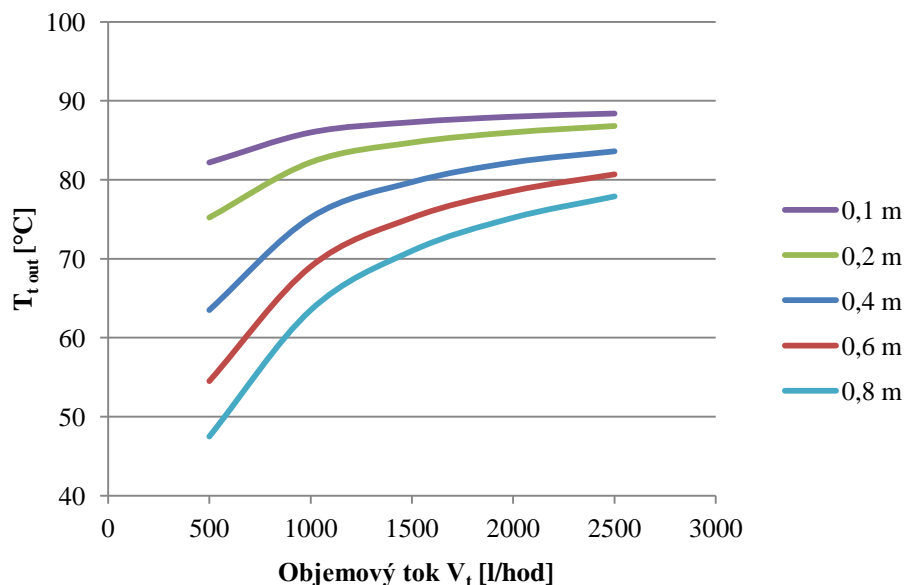
Ze získaných hodnot můžeme vidět, s větší délkou vláken je teplota tekutiny na výstupu z kanálu nižší. Největší efektivity přenosu tepla je ale dosaženo na malé délce kapilár. S postupným zvětšováním délky se sice teploty na obou stranách vláken přibližují, efektivnost výměníku se ale mírně snižuje a přímo úměrně s délkou trubiček se zvyšuje tlaková ztráta. Velký počet vláken znamená poměrně rychlé ohřátí tekutiny v plášti, aniž by se výrazně změnila teplota na vnitřní straně kanálu. V případě krátkých kapilár je třeba zohlednit vstupní

úsek, kde se vnitřní proudění vyvíjí a tepelná charakteristika je tam jiná (kap. 8.1). V závislosti na vlastnostech kapaliny, Reynoldsově číslu a průměru je délka teplotního vstupního úseku pro vnější průměr 0,6 mm 3,5 cm, pro 0,7 mm 4,8 cm a pro 0,8 mm 6,3 cm. Při první variantě (délka 0,1 m) by pak tvořil teplotní vstupní úsek 1/3 resp. 1/2 a 2/3 délky vlákna.



Obr. 8.19 Srovnání a) efektivity výměníku b) teploty na výstupu z trubiček pro různé délky vláken a tři varianty vnějších průměrů (model voda – vzduch s 2500 vlákny různých průměrů, rychlost proudění ve vláknech  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  a v plášti  $2 \text{ m s}^{-1}$ , teploty na vstupu  $70/20^\circ\text{C}$ )

Dalšími výpočty byl srovnáván vliv délky vláken a objemového toku na výstupní teplotu z kanálu. Výsledky jsou zobrazeny v Obr. 8.20 pro model s 2500 vlákny dimenzí 0,7/0,56 mm z PP a pracovní média voda – vzduch ( $90/20^\circ\text{C}$ ) při rychlosti vzduchu v plášti  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Z grafu můžeme vidět, že čím rychleji kapalina vlákny protéká, tím menší teplo předá stěně a tedy i okolnímu médiu. Delší kanál umožňuje větší ochlazení kapaliny. Nejmenšího rozdílu teplot pracovních médií na výstupu z výměníku a největší efektivity je dosaženo pro velmi nízký objemový tok a dlouhá vlákna. S rostoucí rychlostí se efektivity přenosu tepla nejprve snižují, pak se pomalu zvětšují. Na krátké délce vláken se kapalina v kanále nestihne dostatečně zchladit, efektivita přestupu tepla je ale veliká.



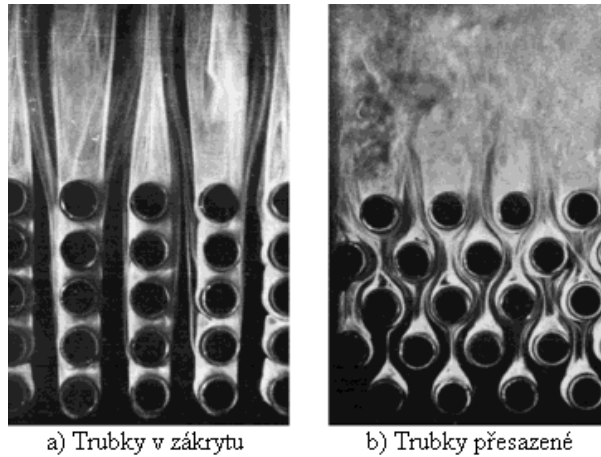
Obr. 8.20 Závislost výstupní teploty z kanálu na celkovém vnitřním objemovém toku při různé délce vláken (model voda – vzduch s 2500 vlákny průměru 0,7/0,56 mm, rychlost proudění v plášti  $2 \text{ m s}^{-1}$ , teploty na vstupu 90/20°C)

## 8.6 Vliv uspořádání vláken na přenos tepla

Program pro simulaci tepelného výměníku má jeden nedostatek. Neuvažuje vzdálenost vláken a jejich vzájemné uspořádání. To je přitom z hlediska vnějšího proudění dosti podstatné. Při větším nahuštění trubek je tvar trajektorií ovlivněn blízkostí trubek. Stejně tak i přenos tepla a tlaková ztráta. Rozšířme nyní tepelné úvahy o proudění kolem jedné trubky na případ obtékání paralelně uspořádaných vláken a pokusme se zjistit, od jaké vzdálenosti můžeme považovat proudění kolem jednotlivých trubek za neovlivněné okolními povrchy.

V případě dutých plastových vláken se nejedná o obtékání jedné trubky, ale o proudění kolmo na  $N$  teoreticky paralelně uspořádaných vláken. Geometrické rozestavení trubek ve svazku i jejich vzdálenost významně ovlivňují přenos tepla a použité vztahy pro jedno vlákno se proto mění. V teoretických výpočtech se uvažují dvě možné konfigurace svazku trubek v příčném proudu tekutiny. V jedné jsou trubky v několika řadách v zákrytu za sebou, tj. ve čtvercových, příp. obdélníkových uspořádáních, v druhé jsou trubičky uspořádány do trojúhelníku a tuto konfiguraci nazýváme šachovnicovou. Proudění kolem trubek se pro jednotlivé konfigurace liší, viz Obr. 8.21.

Rozložení svazku trubek v zákrytu nebo šachovnicově je pouze teoretické. Zvláště v případě trubiček z plastů je díky jejich flexibilitě a velkému počtu komplikované vlákna účinně odseparovat a dosáhnout rovnoměrného uspořádání. Dva modelové případy nám můžou posloužit zejména pro zohlednění vlivu vzdálenosti vláken na přenos tepla a tlakovou ztrátu při návrhu výměníku. Pro zjednodušení bylo tedy v následujících úvahách předpokládáno, že všechny vlákna mají stejný průměr  $D_o$  a svazek vláken je soubor paralelních pevných tyčí tzn., že hustota jejich uspořádání se po délce vláken nemění.



Obr. 8.21 Vliv uspořádání trubek na obrazy proudění [51]

Konfigurace jsou charakterizovány nejen vnějším průměrem trubek  $D_o$ , ale i jejich vzdáleností  $S_T$  (příčná rozteč) a  $S_L$  (podélná rozteč), měřenými mezi osami trubek. Součinitel přestupu tepla se odvíjí nejen od rychlosti přitékající tekutiny a průměru vláken, ale také od jejich pozice ve svazku. Pro první náběžnou řadu se může přibližně spočítat jako pro jednu obtékanou trubku. Dále se významně odvíjí od uspořádání vláken [15]. Protože se  $h$  po vstupu tekutiny do svazku mění, musí být spočítán průměrný součinitel přestupu tepla pro celý svazek. Pro proudění přes svazek trubek o min. 20 řadách navrhl Žukauskas vztah

$$\overline{Nu}_D = C Re_{D,max}^m Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4} . \quad (8.23)$$

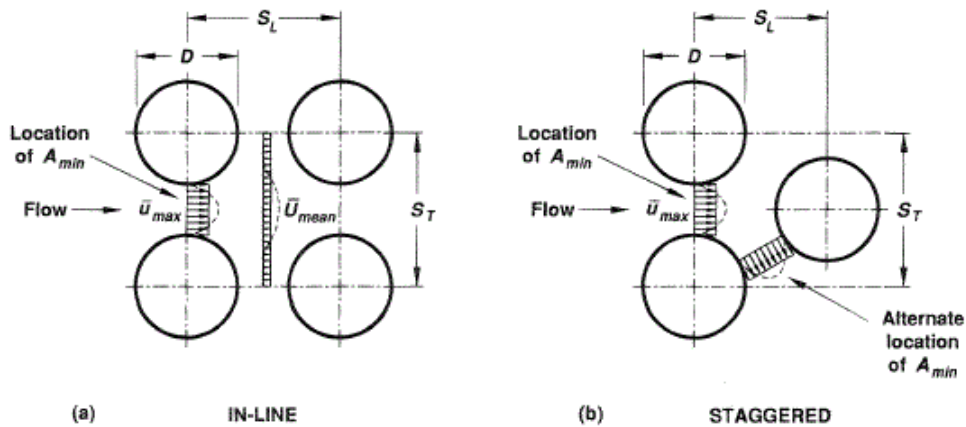
Hodnota Prandtlova čísla  $Pr_w$  se odvíjí od teploty stěny trubek, ostatní fyzikální vlastnosti ve vzorci (8.22) jsou určovány při aritmetickém průměru teplot tekutiny na vstupu a na výstupu z trubkového svazku. Hodnoty konstant  $C$ ,  $m$ ,  $n$  v závislosti na velikosti  $Re$  a  $Pr$  jsou uvedeny v literatuře [15]. Rovnice platí za podmínek  $0,7 < Pr < 500$  a  $1000 < Re < 2 \cdot 10^6$ .

$Re_{D,max}$  je definováno vztahem

$$Re_{D,max} = \frac{V_{max} D}{\nu} , \quad (8.24)$$

kde  $V_{max}$  je maximální střední rychlost spočtená z průtoku v nejužším místě příčného průřezu svazku (Obr. 8.22). Tato rychlost se spočítá z rychlosti přitékající tekutiny do svazku, pro uspořádání v zákrytu a pro šachovnicové uspořádání do rovnostranného trojúhelníka jako

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D_o} V_{\infty} . \quad (8.25)$$

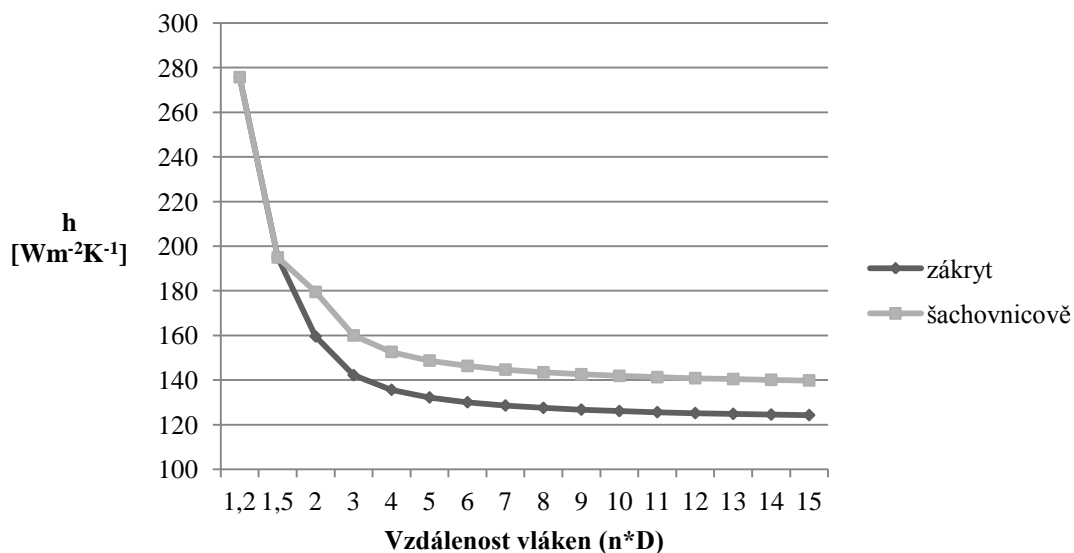


Obr. 8.22 Schematické rozložení trubek svazku u rovnoměrného uspořádání a) v zákrytu; b) šachovnicově [52]

Uvažujeme-li vzdálenost vláken  $S_T$  v násobcích průměru vláken, tj.  $S_T = n \cdot D_o$ , pak je vztah (8.12) možno zjednodušit na

$$V_{max} = \frac{n}{n-1} V_{\infty} . \quad (8.26)$$

Součinitel přestupu tepla roste se zmenšujícím se průměrem. V tomto případě jeho hodnota závisí také na vzájemné vzdálenosti vláken. Při stejném průměru i počáteční rychlosti proudění se hodnota součinitele přestupu tepla zvětšuje při bližším uspořádání kapilár. Tj. nejvyšší je, pokud jsou vlákna těsně u sebe. Tím je ovšem omezena plocha, kolem které médium proudí.



Obr. 8.23 Závislost součinitele přestupu tepla na vzdálenosti vláken  $S_T$  v násobcích průměru (vzduch,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $V_{\infty} = 1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $T_w = 350 \text{ K}$ )

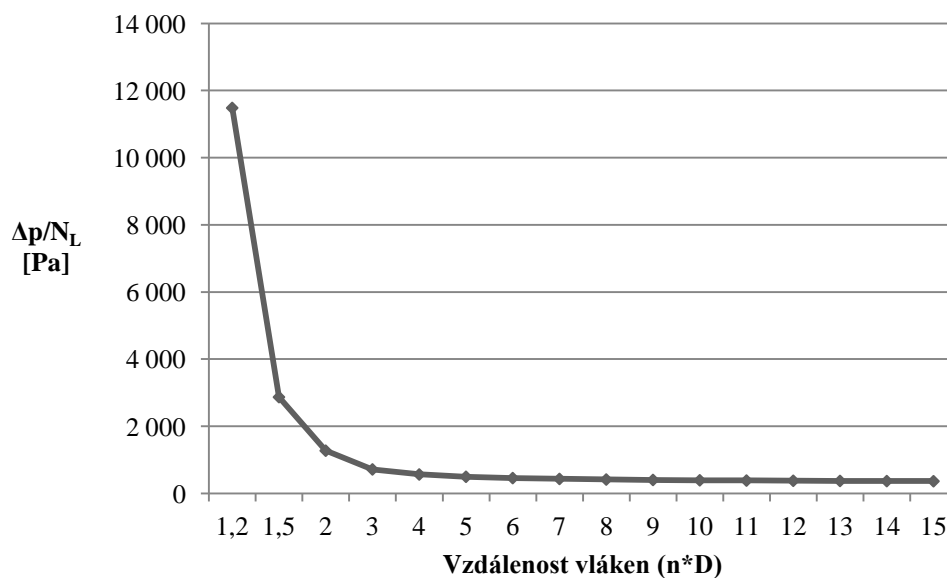
Se zvětšující se vzdáleností Nusseltovo číslo, a tedy i přestup tepla, klesá. Nejdříve značně, od určité vzdálenosti přestává být tento pokles významný. Z výpočtů bylo zjištěno, že



pokud je vzdálenost vláken  $S_T$  větší než 4 průměry, snižuje se při dalším zvětšení vzdálenosti (v násobcích průměru) součinitel přestupu tepla o méně než 4 %. Toto platí pro všechny průměry a obě konfigurace, obtékané jak vodou, tak vzduchem. Závislost je znázorněna na Obr. 8.23 ( $D_o = 0,7$  mm, médium vzduch  $T = 300$  K,  $V_\infty = 1$  m s<sup>-1</sup>, teplota stěny kapiláry 350 K, uspořádán jak šachovnicově, tak v zákrytu). I když použité vztahy pro obtékání jedné trubky a svazku kapilár dávají (vzhledem k jejich vzniku korelací) jiné výsledky, ze zjištěné závislosti můžeme usoudit, že pokud je vzdálenost vláken větší než 4 průměry, můžeme proudění považovat za neovlivněné okolními předměty a zjednodušit na případ proudění kolem izolovaného válce.

U svazku trubek je důležité také uvažovat tlakovou ztrátu při obtékání média příčně kolem vláken. Tato ztráta může být i při malých rychlostech proudění kolem trubiček malých průměrů značná; odvíjí se od ní energetické požadavky na čerpadlo, resp. ventilátor. Tlaková ztráta také závisí na nahuštění vláken u sebe a vzdálenosti, kterou kapalina musí překonat, v tomto případě měřenou počtem řad trubek  $N_L$ . Vztah pro tlakovou ztrátu je

$$\Delta p = N_L \left( \frac{\rho V_{\max}^2}{2} \right) f . \quad (8.27)$$



Obr. 8.24 Závislost tlakové ztráty vzniklé prouděním v plášti na vzdálenosti vláken (voda,  $T = 300$  K,  $V_\infty = 0,8$  m s<sup>-1</sup>,  $T_w = 350$  K)

Součinitel tření  $f$  je možno nalézt v závislosti na Reynoldsově čísle v grafech v literatuře [15]. Pro naše hodnoty  $Re$  je přibližně 1 a můžeme ho tedy ve vztahu zanedbat. Vzorec (8.26) se tím zjednoduší na

$$\frac{\Delta p}{N_L} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{\rho V}{2} . \quad (8.28)$$

Nakolik tlakovou ztrátu pláštěm ovlivňuje vzdálenost vláken je znázorněno na Obr. 8.24. Graf je vytvořen pro vodu a je stejný pro obě konfigurace. Ze vztahu (8.28) vyplývá, že vnější tlaková ztráta nezávisí na rozměru vláken. Průměr trubek pouze ovlivňuje součinitel tření  $f$ . Z grafu na Obr. 8.24 můžeme vidět, že i z hlediska energie na překonání tlakové ztráty je

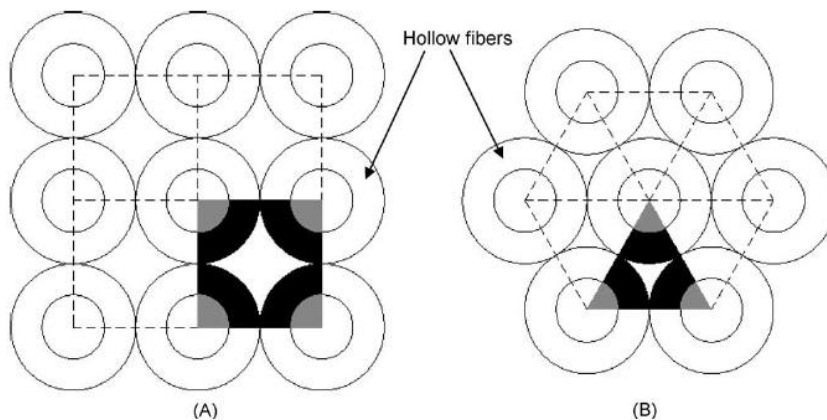
proudění neovlivněno okolními vlákny při uspořádání se vzdáleností vláken větší než 4 průměry.

K souhrnnému hodnocení vzdálenosti vláken v plášti můžeme použít veličinu hustota rozložení  $\phi$  [-]. Definovat ji budeme dle [23] jako

$$\phi = N \cdot \frac{A_t}{A_{sh}}, \quad (8.29)$$

kde  $N$  je počet vláken v plášti,  $A_t$  je plocha příčného průřezu jednoho vlákna a  $A_{sh}$  je plocha příčného průřezu pláště. Nyní určíme hodnotu hustoty pláště tak, aby při rovnoměrném rozložení vláken byla jejich vzdálenost nejméně 4 průměry. Díky tomu budeme moci optimalizovat průřez pláště tak, aby při teoretickém rovnoměrném rozložení vláken nebyly trubičky příliš blízko u sebe na to, aby se ovlivňovaly, ale aby plášť nebyl pro daný počet vláken navržen zbytečně veliký. Nalezneme tak omezení pro použití programu (Obr. 8.14) při výpočtu charakteristik výměníku.

Mějme ideální rovnoměrné uspořádání vláken do čtverce nebo trojúhelníku. V případě těsné konfigurace by rozložení trubiček vypadalo jako na Obr. 8.25, v našem případě je vzdálenost vláken  $S_T = n \cdot D_o$ .



Obr. 8.25 Ideální uspořádání dutých vláken kruhového průměru při maximální hustotě rozložení [23]

Rozdělme si svazek  $N$  vláken na elementární plochy, tj. v případě uspořádání v zákrytu čtverec mezi středy sousedních vláken, v případě šachovnicové konfigurace rovnoměrný trojúhelník (Obr. 8.25). Pak můžeme hustotu rozložení spočítat z těchto elementárních plošek. Pro trubky v zákrytu jako

$$\phi = \frac{\text{plocha vláken v el. čtverci}}{\text{plocha el. čtverce}}, \quad (8.30)$$

tedy pro vzdálenost vláken  $S_T = n \cdot D_o$

$$\phi = \frac{\frac{\pi}{4} D^2}{S_T^2} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2}{n^2 D^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (8.31)$$

Aby bylo proudění v plášti neovlivněno okolními vlákny, musí být jejich vzdálenost větší než čtyři průměry, tj.  $n > 4$  a

$$\phi < \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{4^2} = \frac{\pi}{64} = 0,049. \quad (8.32)$$

Hustota rozložení pro uspořádání vláken svazku v zákrytu tedy musí být menší než 5%.

Proveďme stejný výpočet pro šachovnicové uspořádání:

$$\phi = \frac{\text{plocha vláken v el. trojúhelníku}}{\text{plocha el. trojúhelníku}}, \quad (8.33)$$

pro stranu trojúhelníku  $S_T = n \cdot D_o$

$$\phi = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} D^2}{\frac{1}{2} \cdot S_T \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} S_T} = \frac{\frac{\pi}{2} D^2}{\sqrt{3} \cdot (n \cdot D)^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (8.34)$$

Za podmínky  $n > 4$  je

$$\phi < \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{16} = 0,057. \quad (8.35)$$

Hustota rozložení pro šachovnicové uspořádání vláken svazku tedy musí být menší než 5,7 %.

Získané hodnoty hustot rozložení vláken platí jen při rovnoměrném uspořádání trubiček uvnitř pláště. Zahrnutím vláken na okrajích pláště by se hodnota  $\phi$  zmenšila. Uvažujme tedy dále blíže nespécifikovanou konfiguraci vláken v plášti o hustotě rozložení  $\phi = 5\%$  a spočítejme, jak velkého pláště by bylo potřeba pro tepelný výměník s 2500 PP vlákny dimenzí 0,7/0,56 mm, který jsme diskutovali vzhledem k rychlosti proudění pláštěm v kap. 8.4 (Obr. 8.15). Hustotu rozložení  $\phi$  můžeme pro válcový plášť a vlákna kruhového průřezu spočítat jako

$$\phi = N \cdot \frac{D_o^2}{D_{sh}^2}. \quad (8.36)$$

Odtud

$$D_{sh} = \sqrt{\frac{N}{\phi}} \cdot D_o = \sqrt{\frac{2500}{0,05}} \cdot 0,7 = 157 \text{ mm}. \quad (8.37)$$

U výměníku s 2500 rovnoměrně rozloženými vlákny vnějšího průměru 0,7 mm je obtékání kapilár neovlivněno sousedními povrchy, pokud je průměr pláště větší než 0,16 m.

Ve studiích tepelných výměníků z posledních let můžeme najít modely s daleko větší hustotou vláken. Ve studii [11] byly zkoumány zařízení s hustotou rozložení 0,034–0,247, přičemž model s největším nahuštěním kapilár dosahoval nejlepších hodnot součinitele prostupu tepla. Výměníky s nižší hustotou dovozovaly kapalině v plášti se soustřeďovat, což omezovalo efektivnost přenosu tepla. V takových případech ale není možné považovat vlákna

za individuální a je třeba počítat tepelné charakteristiky výměníku v závislosti na konkrétním uspořádání kapilár v plášti. Dále bylo v [11] uvedeno, že nejvyšších hodnot součinitele prostupu tepla je možno dosáhnout pro velkou teplosměnnou plochu a velkou hustotu rozložení vláken. Pro vlákna malých průměrů to tedy znamená vytvoření výměníku s velkým počtem vláken nahuštěných v malém plášti. Tato efektivní kompaktní teoretická řešení s sebou nesou základní problém dořešení zafixování kapilár do rovnoměrně rozložených konfigurací.

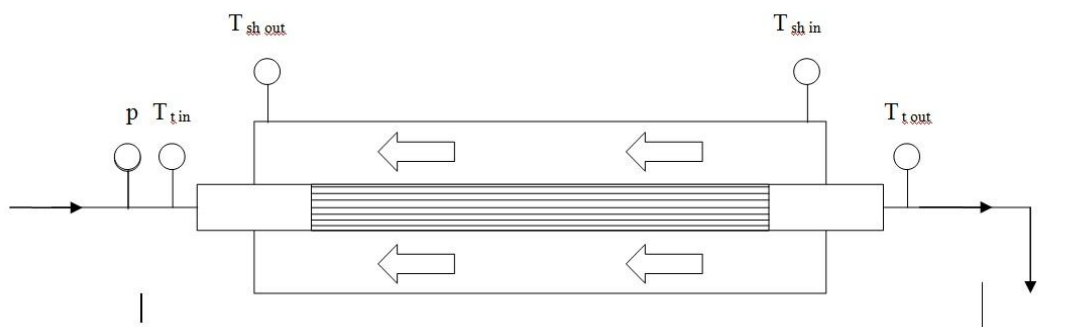
Uspořádání trubiček v plášti v případě svazku flexibilních vláken nemůžeme považovat za rovnoměrné. Prouděním kolem nerovnoměrně rozložených vláken se zabývá [53]. Neohrazená plocha příčného průřezu s vlákny byla rozdělena do elementárních plošek soustředných s vlákny. Distribuce proudění v plášti byla popsána na základě teoretické pravděpodobnostní hustoty rozložení. Výsledky ukazovaly nerovnoměrné rozložení proudění v plášti. Více než 40 % tekutiny se soustřeďovalo v oblasti s velkým obsahem volného prostoru, do malých mezer mezi vlákny se dostalo jen velmi malé poměrné množství tekutiny. Díky tomuto distribučnímu rozložení proudění a rychlosti by bylo možné spočítat lokální součinitel přestupu tepla v každé elementární ploše a z toho pak určit průměrný součinitel. Tento přístup je dosti komplikovaný, navíc výsledky byly získány při zanedbání velikosti pláště, rychlosti přitékající kapaliny a fyzikálních vlastností vláken a za předpokladu, že velikosti elementárních plošek kolem trubiček se po délce nemění, tedy vláken jako paralelních pevných tyčí. Navíc popsané rozložení proudění nabývá více na významu při velké hustotě vláken v plášti.

Teoreticky popsat proudění v plášti mezi flexibilními vlákny, která nejsou rovnoměrně rozložena, je dosti složité. Dostupné modely zanedbávají buď vzájemné ovlivňování vláken, nerovnoměrné rozložení nebo další parametry. Nicméně je zřejmé, že dobrá distribuce proudění a tedy účinný přenos tepla probíhá při rovnoměrném vyplnění prostoru vlákny. Proto by při sestavování tepelných výměníků tohoto typu mělo být vyřešeno rozložení mikrotrubiček v plášti tak, aby byly rozloženy v celém průtočném průřezu pláště a při provozu nedocházelo k jejich shlukování.

## 9 PŘÍPRAVY MĚŘENÍ

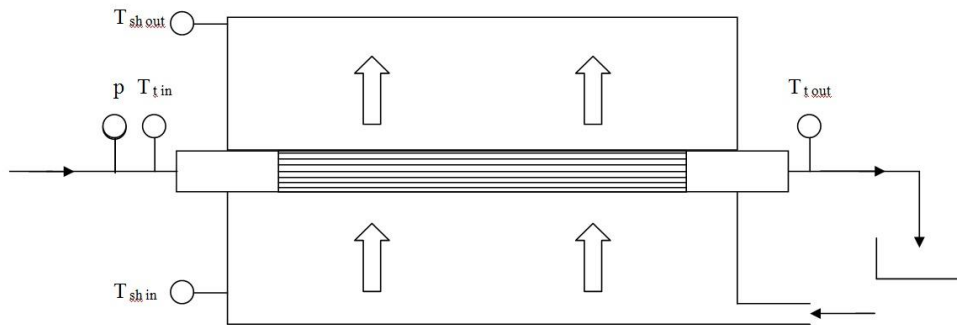
V době, kdy práce vznikala, nebyly bohužel připraveny modely zařízení k experimentálnímu prověření teoretických výsledků tepelných charakteristik výměníků s vlákny malých dimenzí. V Laboratoři přenosu tepla a proudění vznikly konfigurace uspořádání dutých vláken vhodné pro laboratorní prověření (Obr. 6.14, Obr. 6.16, Obr. 6.17). Tyto konfigurace je třeba umístit do vhodného pláště, zajistit přísun pracovních médií stanovených průtoků a opatřit experimentální model měřicími přístroji. K provedení samotného měření a analýzy výsledků nebylo dostatek času a nabízí se možnost dalšího studia.

Prozatím byl v laboratoři sestaven model protiproudého výměníku, ve kterém byly testovány svazky jak rovných tak nakadeřených vláken z Obr. 6.14. Svazek dutých vláken byl umístěn do pláště (PVC trubka) o průměru 100 mm. Záměrem bylo vytvoření plášťového výměníku bez přepážek. Tento model byl testován s vodou na vnitřní straně vláken (chladné médium – kohoutková voda) a s horkým vzduchem dodávaným ventilátorem na straně pláště. Měřenými veličinami byly objemové toky obou médií a vstupní i výstupní teploty. Objemový tok na straně pláště byl určen z rychlosti proudění vzduchu v plášti (měřené digitálním anemometrem) a příčného průřezu potrubí. Objemový tok vody byl stanoven z objemu vody, vytékající ze svazku za jednotku času. Všechny teploty pracovních médií byly měřeny termočlánky. Kromě toho byl před vstupem kapaliny do svazku připojen manometr. Tlaková ztráta se určovala z rozdílu tlaků na vstupu a výstupu do kapilár (tlak na druhém konci vláken byl atmosférický). Schéma měřícího zařízení je na Obr. 9.1. Tato sestava nedává příliš dobré výsledky. Rozdíly teplot na vstupu a výstupu jsou malé. Dochází také k velké tepelné ztrátě nezaizolovanou stěnou pláště. Pro nakadeřená vlákna byly naměřené hodnoty o něco lepší. Modely s nakadeřenými vlákny dávají lepší výsledky, protože tato struktura svazku lépe vyplňuje prostor pláště a umožňuje lepší oddělení vláken. Proudění v rámci celého výměníku je podélné, díky vlnité geometrii proudí ale vzduch v plášti částečně kolmo na vlákna, což zlepšuje přenos tepla. Šíření vzduchu mezi rovnými vlákny bylo špatné.



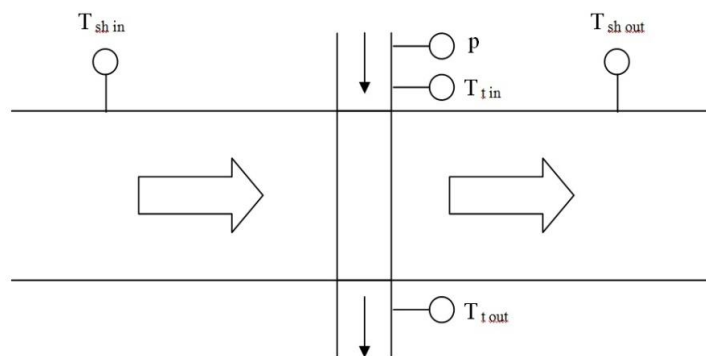
Obr. 9.1 Schéma měření protiproudého výměníku se svazkem dutých vláken

Stejně svazky vláken umožňují sestavení model křížového výměníku. Konce vláken je třeba umístit do vhodné schránky, tvořící plášť. Do vláken by se pak dodávala kapalina přírodním potrubím a měřil se objemový tok a teplota na vstupu a výstupu do kapilár. Svazek je třeba umístit do pláště tak, aby okolní médium proudilo příčně na trubičky (Obr. 9.2). Tekutina v plášti může být vzduch nebo voda. Hodnocení takového výměníku probíhá opět na základě naměřených teplot na vstupu a výstupu a objemových toků obou pracovních médií. Díky proudění tekutiny v plášti kolmo na vlákna je předpoklad vyšší efektivity a lepšího výkonu takového modelu.



Obr. 9.2 Schéma pro měření křížového výměníku se svazkem dutých vláken

Dutá vlákna zasazená do rámu (Obr. 6.16) nabízí řešení jiného zařízení s křížovým prouděním. Rám lze lehce zakomponovat do potrubí o stejném příčném průřezu, jako má rám (Obr. 9.3). Tímto potrubím pak může protékat buď kapalné, nebo plynné médium. Dutá vlákna v rámu jsou dobře zafixována a rovnoměrně s velkou hustotou vyplňují průtočný průřez, což vytváří slibné podmínky pro dobrý přenos tepla.



Obr. 9.3 Schéma pro měření výměníku vytvořeného zasazením rámu s dutými vlákny do potrubí

Popsané experimentální modely jsou v Laboratoři přenosu tepla a proudění připraveny k proměření. V době dokončení této práce byl na takových výměnících zahájen další experimentální výzkum.

## ZÁVĚR

Objektem zájmu diplomové práce byly teplosměnné plochy tzv. dutých vláken. Flexibilní plastová vlákna mají řadu výhod, díky kterým mají potenciál uplatnit se v oblasti techniky prostředí v jednotkách pro vytápění, klimatizaci a využití odpadního tepla. Tepelné výměníky pro tyto aplikace musí splňovat určité požadavky. Jsou jimi malé rozměry, dobrá manipulovatelnost, nízké provozní teploty, nenáročná údržba a vysoká efektivita. Díky miniaturním průměrům vláken, jejich flexibilitě, formovatelnosti a nízké hmotnosti je možné s teplosměnnými plochami tohoto typu vytvořit jednotky, které mají velmi vysoký poměr teplosměnné plochy/objemu a jsou přizpůsobitelné požadavkům na prostor. Nízká hustota plastů je předpokladem lehkých, dobře manipulovatelných konstrukcí. Polymery jsou materiály vhodné pro využití právě při nízkých teplotách. Díky hladkým povrchům a chemické odolnosti dobře odolávají zanášení. Pro výměníky s dutými vlákny tedy zbývá vyřešit otázku efektivnosti zařízení. Zvýšit efektivnost tepelného výměníku můžeme zlepšením tepelné účinnosti nebo snížením tlakové ztráty. Byly prověřeny faktory, které na efektivnost jednotky mají vliv v souvislosti s charakteristikami teplosměnných ploch dutých vláken. K uvedeným výsledkům se dospělo jednak z literární rešerše, jednak řadou výpočtů a simulací pro modely tepelných výměníků s použitím obvyklých vztahů pro tepelnou výměnu. Využití klasických přístupů pro přenos tepla a proudění, vytvořených pro teplosměnné plochy řádově vyšších rozměrů, je možné s minimem omezení.

Dosažení vyššího přenosu tepla stěnou je možno volbou vhodné geometrie teplosměnných ploch. Bylo ověřeno, že malé průměry a tenké stěny dutých vláken zvyšují tepelnou účinnost. Se zmenšujícími se průměry roste lokální součinitel přestupu tepla konvekcí na vnitřní i vnější straně trubiček. Simulace ukázala, že menší dimenze vláken umožňují vytvořit jednotky, které pro dosažení požadované teplosměnné plochy obsahují větší množství vláken a jejich výkon je přitom vyšší. Ze stejného množství materiálu je možno vyrobit více vláken o větší teplosměnné ploše, pokud zvolíme menší průměr. Trubičky jsou tenkostěnné proto, aby tepelné výměně byla kladena co nejmenší překážka. K dosažení lepších přenosových charakteristik a výraznějšího prostupu tepla je v kanálech udržováno laminární proudění nízkých rychlostí. Pro proudění tekutiny pláštěm byl zaznamenán lepší prostup tepla a celkový výkon zařízení, pokud měla pracovní látka vyšší rychlost, zejména v případě vzduchu. Problémem využití polymerů pro konstrukci teplosměnných ploch je obecně velmi nízká tepelná vodivost. Pro různé průměry bylo zkoumáno, jaké procentuální zastoupení na celkovém odporu má odpor špatně vodivé přepážky z polymerů. Bylo zjištěno, že tepelný odpor stěny tvoří významnou překážku tepelné výměně tepla hlavně v případě, kdy jsou plastová vlákna obtékána vodou (okolo 55 %). Pokud je pracovní látka na vnější straně vzduch, je odpor plynného média proti přenosu tepla konvekcí daleko významnější. V literatuře se uvádí mnoho způsobů, jak je možno tepelnou vodivost materiálu zvýšit modifikací struktury polymeru přidáním částic nebo vláken o vysoké vodivosti. Takto lze vyrobit kompozit se srovnatelnou vodivostí, jako mají kovy. Kombinace všech uvedených přístupů nabízí řešení k vytvoření jednotky s nízkým odporem proti tepelné výměně.

Dalším hlediskem při hodnocení efektivnosti výměníku je tlaková ztráta. Dutá vlákna mají hladký povrch a jejich součinitel tření je nízký. Významnější tlaková ztráta vzniká na vnitřní straně vláken. Bylo ověřeno, že se snižujícím průměrem trubiček se výrazně zvyšuje, proto je třeba jí věnovat zvláštní pozornost. Tlaková ztráta v kanálech je možná snížit díky laminárnímu proudění kapaliny nižší rychlostí. Byl také zkoumán vliv teploty kapaliny v kanále na velikost vstupního úseku a tlakovou ztrátu. Výpočty ukázaly, že volbou krátkých vláken je dosaženo efektivního přenosu tepla, ochlazení kapaliny na výstupu z kanálů je však malé. Vnější tlakovou ztrátu výrazně ovlivňuje uspořádání vláken a jejich vzdálenosti. Pro rovnoměrné proudění a přenos tepla je třeba věnovat zvláštní pozornost návrhu uspořádání

vláken v prostoru pláště. Bylo zjištěno, že pokud je rozteč mezi vlákny více než čtyři průměry, můžeme proudění kolem nich považovat za neovlivněné okolím. Další zvětšení mezer mezi vlákny ale nemá na vnější přenos tepla vliv. Velkým rozpětím mezi vlákny narůstá potřebný tepelný tok pláštěm i rozměr celého zařízení.

Na základě literární rešerše byl proveden výzkum zajímavých způsobů fixace a separace vláken v prostoru. Inspirace byla hledána jak v současných vědeckých člancích a patentech o dutých vláknech pro přenos tepla, tak v literatuře o aplikaci těchto ploch pro membránovou separaci plynů. V Laboratoři proudění a přenosu tepla bylo navrženo několik řešení uspořádání, například rám hustě vyplněný řadami vláken, propletenými do sebe. V práci je k nalezení jejich fotodokumentace. Na pracovišti je aktivně zkoumán rozbor možností využití „nakadeřených“ vláken s různou křivostí, které rovnoměrně vyplňují prostor. Problémem všech typů teplosměnných ploch je omezení charakteristik zařízení v provozu vlivem zanášení. Byla provedena rešerše problémů zanášení tepelných výměníků a uvedeny dvě metody pro ošetření teplosměnných ploch typu dutých vláken. Jsou jimi mechanické čištění sérií procesů zahrnujících chemické ošetření a šlehání pulzy vzduchu a povrchové ošetření modifikací pomocí tzv. S-vrstvy.

Výzkum tepelných výměníků s dutými vlákny není kompletní a nabízí mnoho možností ke studiu a otázek k vyřešení. Hledají se další možnosti zafixování a odseparování vláken a připravuje se proměření současných řešení. Dále se nabízí např. návrh kontroly snižování účinnosti těchto teplosměnných ploch a odstraňování usazených částic na straně vzduchu.



**SEZNAM SYMBOLŮ**

$A$	plocha příčného průřezu	$[\text{m}^2]$
$C$	tepelná kapacita	$[\text{J K}^{-1}]$
$c_p$	měrná tepelná kapacita	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
$D$	průměr	$[\text{m}]$
$f$	součinitel tření	$[-]$
$h$	součinitel přestupu tepla	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
$k$	tepelná vodivost	$[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$
$L$	délka potrubí	$[\text{m}]$
$\dot{m}$	hmotnostní tok	$[\text{kg s}^{-1}]$
$n$	počet průměrů (při hodnocení vzdálenosti vláken)	$[-]$
$N$	počet vláken/trubek	$[-]$
$Nu$	Nusseltovo číslo, $Nu = \frac{hD}{k}$	$[-]$
$\Delta p$	tlaková ztráta	$[\text{Pa}]$
$Pr$	Prandtlovo číslo, $Pr = \frac{c_p \mu}{k}$	$[-]$
$\dot{q}$	tepelný tok	$[\text{W m}^{-2}]$
$\dot{Q}$	tepelný výkon	$[\text{W}]$
$r$	poloměr	$[\text{m}]$
$R_f$	odpor vrstvou znečištění	$[\text{m}^2 \text{K W}^{-1}]$
$Re$	Reynolds number, $Re = \frac{\rho u D}{\mu}$	$[-]$
$S$	rozteč	$[\text{m}]$
$T$	teplota	$[\text{K}], [^\circ\text{C}]$
$x_e, x_{eT}$	délka rychlostního (resp. teplotního) vstupního úseku	$[\text{m}]$
$u, v$	rychlost	$[\text{m s}^{-1}]$
$U$	součinitel prostupu tepla	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
$\delta$	tloušťka stěny	$[\text{m}]$
$\varepsilon$	efektivita	$[-]$
$\mu$	dynamická viskozita	$[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$
$\rho$	hustota	$[\text{kg m}^{-3}]$
$\nu$	kinematická viskozita	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$

**Indexy**

---

h	teplá
i	vnitřní
L	podélný
l	lineární
ln	logaritmický spád
m	střední
min	minimální
max	maximální
o	vnější
ov	overall (celkový vztažený k vnějšímu průměru)
sh	na straně pláště
t	na straně trubky
T	příčný
T3	konvektivní okrajová podmínka na vnitřním povrchu kanálu
s	studená
w	stěna
$\infty$	volné

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RAMM-SCHMIDT, L. Taking the heat. *Heat transfer* 1. 2006.
- [2] ZAHEED, L. a JACHUCK, R.J.J. Review of polymer heat exchangers, with special emphasis on polymer film unit. *Applied Thermal Engineering*. 2004, Sv. 24, stránky 2323–2358.
- [3] T'JOEN, C., a další. A review on polymer heat exchangers for HVAC&R applications. *Internal Journal of Refrigeration*. 2009, Sv. 32, stránky 763–779.
- [4] CHEN, L., LI, Z. a GUO, Z.-Y. Experimental investigation of plastic finned-tube heat exchangers, with emphasis on material conductivity. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 33, 2009, stránky 922–928.
- [5] ZARKADAS, D. M. a SIRKAR, K. K. Polymeric Hollow Fiber Heat Exchangers: An alternative for lower temperature applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2004, Sv. 43, stránky 8093–8106.
- [6] Ametek. Polymer heat exchangers. [Online] [Citace: 23. duben 2012.] Dostupné z <<http://www.ametek.com>>.
- [7] DOBBS, G.M. *Plate type heat exchanger*. No. 20020185266 US Patent Application, 2002.
- [8] Milieupartners. Gas and liquid heat exchangers. [Online] [Citace: 24. duben 2012.] Dostupné z <<http://www.milieupartners.nl/glheatex.htm>>.
- [9] Greenbox. Plastic air-to-air plate heat exchangers. [Online] [Citace: 24. duben 2012.] Dostupné z <<http://www.greenbox.uk.com>>.
- [10] AB Segerfrojd. Polypropylene heat exchanger. [Online] [Citace: 24. duben 2012.] Dostupné z <<http://www.segerfrojd.com>>.
- [11] SONG, L., a další. Polymeric Hollow-Fiber Heat Exchangers for Thermal Desalination Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, Sv. 49, stránky 11961–11977.
- [12] LI, Z., a další. Experimental and numerical studies of liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007, Sv. 50, stránky 3447–3460.
- [13] *Laboratorní výzkum přenosu tepla z dutých vláken*. GALIK, R. 2010, výzkumná zpráva, VUT. nepublikovaný výzkum.
- [14] JAMES, M. *Polymer Data Handbook*. místo neznámé : Oxford University Press, Inc., 1999.
- [15] INCROPERA, F. P. a DEWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5th. New York : J. Wiley, 2002. ISBN 0471386502.
- [16] PARTZSCH, A. *Kunststoffhohlfasern und ihre Eignung in Wärmetauschern*. Leipzig : Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik, 2007. Diplomarbeit.
- [17] EHRENSTEIN, G.W. *Polymeric Materials: structure, properties, applications*. Mnichov : Carl Hanser Verlag; Hanser Gardner Publications, 2001.
- [18] Matweb. [Online] [Citace: 12. 4 2012.] Dostupné z <<http://www.matweb.com>>.
- [19] DERONZIER, J.C. a BERTOLINI, G. Plate heat exchangers in liquid-crystal polymers. *Applied Thermal Engineering*. 1997, Sv. 17, stránky 799–808.

- [20] QIN, Y., LI, B. a WANG, S. Experimental Investigation of a Novel Polymeric Heat Exchanger. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012, Sv. 51, stránky 882–890.
- [21] SIRKAR, K.K., a další. *Polymeric hollow fiber heat exchange systems*. US 2007/0107884 A1 United States, 17. May 2007.
- [22] DOHNAL, M., POLLMANN, K. a KUTSCHKE, S. a kol. Feasible de fouling methods of flexible plastic heat exchangers. In *Conference Proceeding Heat Exchangers Fouling and Cleaning - 2011*. 2011, stránky 1–5.
- [23] LI, D., WANG, R. a CHUNG, T-S. Fabrication of lab-scale hollow fiber membrane modules with high packing density. *Separation and Purification Technology*. 2004, Sv. 40, stránky 15–30.
- [24] Herbst, Kevin. *Mattenförmiger Wärmetauscher*. DE102005050293A1 19. duben 2007.
- [25] BAUKE, A., a další. *Abstandshalter von parallel angeordneten, flexiblen Kunststoffrohren zu Kühl- und Heiz Kunststoffmatten oder Kunststoffrohren für Wärmetausche*. DE4423765A1 4. leden 1996.
- [26] AMBORN, G., a další. *Wärmetauscher*. DE102009043308A1 31. března 2011.
- [27] CHAHED, B. *Luftkühl- und luftentfeuchtungsmodul aus kapillarrohrmatten und verfahren zu seiner anwendung*. EP1907762A1 9. duben 2008.
- [28] HERBST, D. *Heat exchanger, method for operating the heat exchanger and use of the heat exchanger in an air-conditioning system*. US2011174467A1 21. červen 2011.
- [29] TUTSCH, M. *Textiler Sonnenkollektor zur Warmwassergewinnung*. DE102008062459A1 17. červen 2010.
- [30] CHEN, J., CHANG, H. a CHEN, S.- R. Simulation study of a hybrid absorbereheat exchanger. *International Journal of Refrigeration*. 2006, Sv. 29, stránky 1043–1052.
- [31] VASHISTH, S., KUMAR, V. a NIGAM, K. D. P. A Review on the Potential Applications of Curved Geometries in Process Industry. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, Sv. 47, stránky 3291–3337.
- [32] TEOH, M. M., BONYADI, S. a CHUNG, T.- S. Investigation of different hollow fiber module designs for flux enhancement in the membrane distillation process. *Journal of Membrane Science*. 2008, Sv. 311, stránky 371–379.
- [33] YANG, X., WANG, R. a FANE, A.G. Novel designs for improving the performance of hollow fiber membrane. *Journal of Membrane Science*. 2011, Sv. 384, stránky 52–62.
- [34] Ingenieure, Verein Deutscher. *VDI Heat Atlas*. 2. edice. Berlin : Heidelberg Springer, 2010.
- [35] MÜLLER-STEINHAGEN, H. *Heat exchanger fouling: mitigation and cleaning technologies*. Essen : PUBLICO Publications, 2000.
- [36] Chem-Resist. Polymer heat exchangers. [Online] [Citace: 24. duben 2012.] Dostupné z <<http://www.chemresist.com>>.
- [37] Fluorotherm. Polymer Heat Exchangers. [Online] [Citace: 24. duben 2012.] Dostupné z <<http://www.fluorotherm.com/immhtex.htm>>.
- [38] BECK, T.W., a další. *Cleaning of hollow fibre membranes*. 6,159,373 12. prosinec 2000. United States Patent.

- [39] CHESWICK, A.J. a CUNEY, E. *Method of cleaning optical fibers and connectors and apparatus used therefor*. 6,053,985 25. duben 2000.
- [40] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. Brno : CERM, 2001. str. 160. ISBN 80-214-2029-4.
- [41] SHARP, V.K. a ADRIAN, R.J. Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes.
- [42] JÍCHA, M. Přednášky přenosu tepla. [Online] únor 2012. Dostupné z <<http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/prenostepla/ExternalConvectionInCrossFlow.pdf>>.
- [43] Drag of Blunt and Streamlined Bodies. *eFluids bicycle aerodynamics*. [Online] [Citace: 11. 5 2012.] Dostupné z <[http://www.eFluids.com/eFluids/bicycle/bicycle\\_pages/blunt.jsp](http://www.eFluids.com/eFluids/bicycle/bicycle_pages/blunt.jsp)>.
- [44] PENG, X.F. a PETERSON, G.P. Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1996, Sv. 39, stránky 2599–2608.
- [45] LELEA, D., NISHIO, S. a TAKANO, K. The experimental research on microtube heat transfer and. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004, Sv. 47, stránky 2817–2830.
- [46] LI, Z., a další. Experimental a numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007, Sv. 50, stránky 3447–3460.
- [47] GUO, Z.-Y. a LI, Z.-X. Size effect on microscale single-phase flow and heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003, Sv. 46, stránky 149–159.
- [48] HERWIG, H. a HAUSENER, O. Critical view on "new results in micro-fluid mechanics": an example. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003, Sv. 46, stránky 935–937.
- [49] ZARKADAS, D. M. a SIRKAR, K. K. Incremental Heat Transfer Number for Laminar Flow in Circular Tubes with Boundary Condition of the Third Kind and Simple Design Formula for Shell-and-Tube Laminar Flow Heat Exchangers with Constant External Resistance. *I.J.Trans.Phenomena*. 2005, Sv. 7, stránky 297–306.
- [50] ASTROUSKI, I. a RAUDENSKÝ, M. The study of polymeric hollow fiber heat exchangers. *Konference ve Svatce*. 2012.
- [51] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E. a ŠTETINA, J. *Vizualizační a optické měřicí metody*. [Online] květen 2007. [Citace: 13. května 2012.] Dostupné z <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>>.
- [52] BEALE, S. Tube banks, crossflow over. *Thermopedia*. [Online] [Citace: 13. květen 2012.] Dostupné z <<http://www.thermopedia.com>>.
- [53] ZHENG, J., XU, Y. a ZHIKANG, X. Flow distribution in randomly packed hollow fiber membrane module. *Journal of Membrane Science*. 2003, Sv. 211, stránky 263–269.