

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 859*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Tereza Brožová*

**Fázové změny  
na povrchu tepelných výměníků  
s dutými vlákny**



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

**LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ**

## **FÁZOVÉ ZMĚNY NA POVRCHU TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ S DUTÝMI VLÁKNY**

**PHASE CHANGES ON HEAT EXCHANGER SURFACES  
WITH HOLLOW FIBERS**

**ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS**

<b>OBOR</b>	<b>Inženýrská mechanika</b>
<b>AUTOR PRÁCE</b>	<b>Ing. Tereza Brožová</b>
<b>ŠKOLITEL</b>	<b>prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.</b>
<b>OPONENTI</b>	<b>prof. Ing. Mirko Dohnal, DrSc. Ing. et Ing. Aleš Horák, Ph.D</b>
<b>DATUM OBHAJOBY</b>	<b>14. května 2018</b>

**Brno 2018**

**Klíčová slova:**

Dutá vlákna, kondenzace, tepelný výměník, fázová změna

**Keywords:**

Hollow fibres, condensation, heat exchanger, phase change

**Místo uložení práce:**

Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu  
Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně,  
Technická 2896/2, 616 69 Brno.

© Tereza Brožová, 2018

ISBN 978-80-214-5645-7

ISSN 1213-4198

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>1 Dynamický kontaktní úhel a smáčivost</b>	<b>5</b>
1.1 Výsledky měření pro polymerní vlákna . . . . .	6
<b>2 Měření polymerních výměníků tepla v režimu voda-voda</b>	<b>9</b>
<b>3 Fázové přeměny</b>	<b>13</b>
3.1 Kondenzace . . . . .	13
3.1.1 Kondenzace filmu na vnějším povrchu válcového tělesa . . . . .	13
<b>4 Měření polymerních výměníků tepla v režimu voda-pára</b>	<b>14</b>
4.1 Vliv druhu a počtu vláken . . . . .	16
<b>5 Kondenzace vzdušné vlhkosti</b>	<b>19</b>
5.1 Výsledky výměníku tepla s PA vlákny složeného z 6 vrstev a 8 mm mezer . . .	21
5.2 Výsledky PP výměníku tepla složeného z 6 vrstev a 8 mm mezer . . . . .	22
5.3 Výsledky PP výměníku tepla složeného z 6 vrstev a 3 mm mezer . . . . .	23
5.4 Výsledky PP výměníku tepla složeného z 20 vrstev . . . . .	24
5.5 Vliv materiálu vláken . . . . .	25
5.6 Vliv polohy výměníku . . . . .	26
5.7 Vliv geometrie výměníku . . . . .	27
<b>Závěr</b>	<b>27</b>
<b>Reference</b>	<b>30</b>



# ÚVOD

Proces tepelné výměny mezi dvěma tekutinami o různých teplotách skrze pevnou stěnu se objevuje v mnoha inženýrských aplikacích. Zařízení sloužící k takovéto výměně tepla se nazývá tepelný výměník. V minulosti byla jejich výroba výhradně záležitostí kovozpracujícího průmyslu. Zpravidla se vyrábějí z kovů jako je ocel, hliník a měď. Ty se vyznačují vysokou tepelnou vodivostí, která je způsobena tzv. volnými elektrony, které svým pohybem uvnitř kovu způsobují přenos tepla z jedné části do druhé.

Pro některé aplikace jsou nekorozivní vlastnosti a chemické odolnosti výměníku vůči různým látkám zcela klíčové, proto se začaly vyrábět tepelné výměníky z polymerních materiálů, pro které je specifický nízký součinitel tepelné vodivosti a jsou vnímány spíše jako tepelné izolanty. Avšak s klesající tloušťkou stěny tepelného výměníku klesá i jeho tepelný odpor způsobený volbou materiálu. Polymerní materiály mají několik nesporných výhod ve srovnání s kovovými, mezi které patří např. snadná tvarovatelnost a nízká hmotnost.

Polymerní výměníky z dutých vláken zkoumané v této práci se skládají z polymerních vláken o vnějším průměru 0,5-1,3 mm, jejichž tloušťka stěny je cca 10 % vnějšího průměru. Takový výměník je složen ze stovek těchto vláken, které tvoří velkou teplosměnnou plochu. Vzniká tak kompaktní a účinný tepelný výměník.

Studie se zabývá vlivem smáčivosti vláken na procesy přenosu tepla spojených s kondenzací. Dále se zabývá kotlovými výměníky, které byly zkoumány v režimu voda-voda a pára-voda. Tyto výsledky byly dosaženy ve spolupráci s firmou Spirax Sarco Ltd, UK. Práce se také zabývá kondenzací vzdušné vlhkosti. Tyto výsledky byly dosaženy ve spolupráci s firmou HTS s.r.o., ČR.

## 1 DYNAMICKÝ KONTAKTNÍ ÚHEL A SMÁČIVOST

Vliv smáčivosti na přenos tepla nesmí být zanedbán, neboť při procesech spojených s kondenzací ovlivňuje, zda kondenzát bude na povrchu vlákna utvářet souvislou vrstvu či drobné kapky, které nebudou na vláknu ulpívat.

Smáčivost polymerních vláken, ze kterých se skládají studované tepelné výměníky, byla určena pomocí Wilhelmyho metody [1]. Dynamický kontaktní úhel určený touto metodou se rozlišuje na postupující a ustupující. Postupujícím kontaktním úhlem se označuje úhel, který svírá hladina kapaliny s povrchem nořeného vzorku při jeho noření do kapaliny [2], [3]. Při vynořování vzorku z kapaliny se hovoří o ustupujícím kontaktním úhlu. Tyto úhly se mohou a nemusí lišit. Postupující dynamický kontaktní úhel však bývá zpravidla větší než ustupující dynamický kontaktní úhel. Jejich rozdíl je nazýván hysterezí dynamického kontaktního úhlu. Obecně je tato hystereze chápána jako důsledek drsnosti, rozmanitosti povrchu a přítomnosti povrchových kontaminantů [4].

Kondenzát má tendence na povrchu hydrofilního materiálu formovat tenký film. To zvyšuje tepelný odpor teplosměnných ploch. Hydrofilní materiály mají nižší hysterezi dynamického

kontaktního úhlu. Na hydrofobních materiálech dochází ke kondenzaci po kapkách, což přispívá k zlepšení účinnosti výměníku [5].

V [6] se autoři zabývají studií závislosti postupujícího a ustupujícího úhlu na drsnosti a teplotě vzorku. Pozorovali jejich rovnost při vysokých přehřátí stěn za podmínky kritického toku tepla. Vliv drsnosti vede nejprve ke snížení hodnot kontaktního úhlu a jeho následnému zvětšení se zvyšující se drsností povrchu. Smáčivost povrchu určena dynamickými metodami se může výrazně lišit v závislosti na velikosti smáčeného povrchu [7].

## 1.1 Výsledky měření pro polymerní vlákna

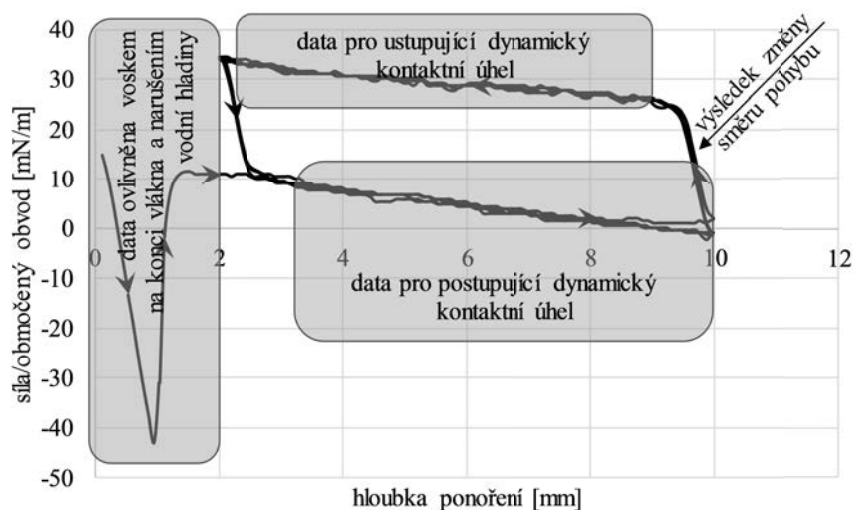
V rámci této studie byla srovnána smáčivost desíti vzorků. Vzorky se lišily materiálem, stářím a povrchovou úpravou. Celkem byly srovnány čtyři různé materiály – polypropylen (PP), polykarbonát (PC), polyamid (PA) a polyether ether keton (PEEK). Pro každý materiál byl zkoumán vliv povrchové úpravy pomocí plazmy. Působení povrchových úprav pomocí fluoru, trapylenu bylo pozorováno na polypropylenových vláknech. Vliv stárnutí vláken byl také zkoumán a to srovnáním čerstvě extrudovaného a 4 roky starého polypropylenového vlákna. Přehled testovaných vzorků polymerních dutých vláken udává tabulka 1.1.

Tabulka 1.1: Přehled testovaných vzorků polymerních dutých vláken.

označení	materiál	vnější průměr [mm]	poznámka
PP	PP	0,6	čerstvě extrudované
PP + trapylen	PP	0,6	povrchová úprava pomocí trapylenu[8]
PP	PP	0,3	měřeno 4 roky po extruzi
PP + fluorizace	PP	0,6	povrchová úprava pomocí fluoru[9]
PP + plazma	PP	0,6	povrchová úprava pomocí plasmy [10]
PC	PC	0,6	
PC + plazma	PC	0,8	povrchová úprava pomocí plasmy
PEEK	PEEK	0,8	
PEEK + plazma	PEEK	0,8	povrchová úprava pomocí plasmy
PA	PA	0,75	
PA + plazma	PA	0,8	povrchová úprava pomocí plasmy

Wilhelmyho metoda se běžně používá k určení smáčivosti vzorků, které nejsou duté. V případě dutého vzorku by vztahové síly působící uvnitř dutiny ovlivnily proces měření. Proto byla dutá vlákna zaslepena pomocí vosku, který poskytl účinné zaslepení bez složité manipulace se vzorkem, při které by mohlo dojít k ovlivnění povrchových vlastností. Každý vzorek byl měřen v rozmezí 0-10 mm, přičemž za počátek vlákna (0 mm) byl považován konec, který byl zaslepen voskem. Během měření pak byly ignorovány první 2 milimetry vlákna a to z důvodu možného vlivu vosku a 1 mm z důvodu narušení vodní hladiny, což způsobilo nestabilitu

měření. Poté byl postupující dynamický kontaktní úhel měřen na dalších 7 mm (rozsah 3-10 mm). Po dosažení desátého milimetru došlo ke změně směru pohybu vzorku. Z toho důvodu byly výsledky pro 9-10 mm ignorovány, neboť byly výrazně ovlivněny hydrodynamickými silami. Ustupující dynamický kontaktní úhel byl pak měřen na 2-9 mm. Po dosažení druhého milimetru došlo opět ke změně směru pohybu vzorku a po dosažení třetího milimetru byl opět měřen postupující dynamický kontaktní úhel. Jeden experiment se skládal celkem ze čtyř cyklů. Vzhledem k tomu, že se předpokládá použití výsledků testů smáčivosti pro výměníky v aplikacích spojených s kondenzací, byla hodnota čtvrtého cyklu brána jako výsledná hodnota.



Obrázek 1.1: Typický průběh Wilhelmyho testu.

U některých vzorků se postupující dynamický kontaktní úhel změřený během prvního cyklu výrazně lišil od úhlů, které byly získány během následujících cyklů. Tento rozdíl byl způsoben rozdílným chováním suchého a mokrého povrchu vlákna. Smáčivost byla měřena za účelem použití těchto vláken k výrobě výměníků tepla spojených s kondenzací, tedy po ustálení procesu výměny tepla nebude mít odlišný dynamický kontaktní úhel suchého povrchu vliv na výsledný proces. Typický průběh testu je znázorněn na obrázku 1.1, kdy na vodorovné ose je vynesena hloubka ponoření vlákna a na svislé ose je pak síla, kterou působila kapalina na obvod vzorku. Mezi 0-2 mm je patrný vliv vosku a hydrodynamické nestability způsobené narušením vodní hladiny. Dále je patrné, že výsledky ve všech 4 cyklech měření se překrývají, tedy dávají shodu měření. Mezi 2-3 mm a 9-10 mm je vidět prudký pokles případně nárůst působící síly, což je způsobeno změnou pohybu.

Důležitým parametrem je také rychlost noření. Pro všechna měření byla stanovena stejná rychlost noření a to 5 mm/min. Dalším důležitým parametrem je také viskozita měřící kapaliny. Kapalina pro měření kontaktního úhlu by měla mít nízký tlak nasycených par, nízkou viskozitu, měla by být čistá, netoxická a neměla by se samovolně znečišťovat. Silikonové oleje nejlépe splňují tyto podmínky, ale jsou známy kontaminací jakéhokoli povrchu nízkomolekulárními částicemi [11], [12], [13]. Voda se proto často používá jako zkušební kapalina s následujícími fyzikálními vlastnostmi: dynamická viskozita 0,001 Pa s, hustota 0,998 g/cm<sup>3</sup>, povrchové napětí



Tabulka 1.2: Naměřené dynamické kontaktní úhly

vzorek	voda		ethylen glykol		glycerol	
	postup.	ustup.	postup.	ustup.	postup.	ustup.
PP	104,8	75	74	52,5	91,8	63,8
PP + trapylen	100	53,4	73,5	38,8	84,3	22,5
PP vlákno 0,3 mm	99,6	73,4	72,6	47,5	93,5	65,2
PP + fluorizace	76,5	23,6	56	18,6	22,3	N <sup>1</sup>
PP + plazma	91,1	20,5	29,1	18,1	49,1	25,2
PC	80	30,1	69,6	27,2	48,2	N <sup>1</sup>
PC + plazma	72,3	37	36	20,4	N <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>
PEEK	81	37,7	N <sup>1</sup>	9,2	76,6	24,6
PEEK + plazma	63,1	31,1	N <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>
PA	78,4	34,6	53,6	15,1	73,5	16,7
PA + plazma	67,8	34	16,9	19,9	10,8	18,4

<sup>1</sup>N označuje případ, kdy přístroj nebyl schopen změřit hodnotu dynamického kontaktního úhlu

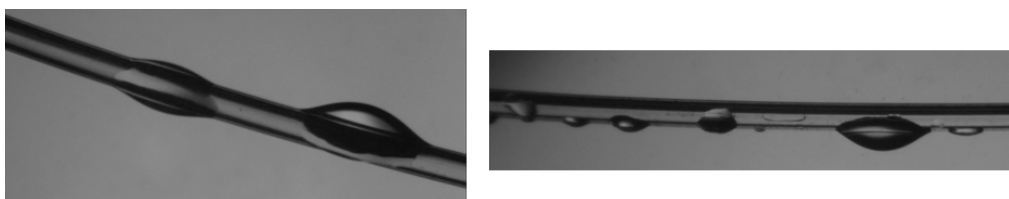
72,8 mN/m. Vzorky byly dále měřeny i v ethylenglykolu (0.018 Pa.s) a glycerolu (1.48 Pa.s). Přehled naměřených dat udává tabulka 1.2.

Vzorky lze rozdělit podle naměřených dat do dvou skupin. První skupina je tvořena polypropylenovým vláknem, vláknem s povrchovou úpravou pomocí trapylenu a vláknem o vnějším průměru 0,3 mm, které bylo o 4 roky starší než ostatní měřené vzorky. Druhá skupina je pak tvořena polykarbonátovým, polyamidovým a PEEK vláknem a vlákny s povrchovou úpravou pomocí fluoru a plazmy. První skupina vykazuje spíše hydrofobní charakter, zatímco druhá skupina se vyznačuje nižšími hodnotami dynamického kontaktního úhlu. Postupující úhly ve vodě se výrazně neliší a pohybují se v rozmezí 80°-105°. Kde se však projevují odlišné materiálové vlastnosti vláken, je ustupující kontaktní úhel. Druhá skupina vzorků dosahuje podstatně nižších hodnot kontaktních úhlů. To znamená, že voda po vlákně vzlíná výše a na vlákno působí větší hydrostatické síly, které vytváří odpor proti směru pohybu, než-li je tomu u skupiny první. To znamená, že kapalina ulpívá na vlákně. Ze srovnání výsledků získaných měření v ethylenglykolu je patrné, že výsledky lze opět rozdělit do dvou skupin, stejných jako v případě měření ve vodě. Struktura výsledků kopíruje strukturu předchozích výsledků, avšak naměřené hodnoty jsou zhruba o 20°-30° nižší. Výrazná změna nastává v případě plazmovaných vzorků, které v ethylenglykolu vykazují silný hydrofilní charakter. Z důvodu extrémně nízkých hodnot dynamického kontaktního úhlu, nebyl použitý tenzometr schopen určit kontaktní úhly v ethylen glykolu u PEEK vlákna a PEEK vlákna ošetřeného plazmou. Tenzometr použitý pro měření dynamických kontaktních úhlů nebyl schopen určit kontaktní úhly v glycerolu u PC a PEEK vlákna, PC a PEEK vlákna ošetřeného plazmou a PP vlákna s povrchovou úpravou pomocí fluoru z důvodu extrémně nízkých hodnot dynamických kontaktních úhlů.

Jak již bylo zmíněno významným faktorem měřící kapaliny je její viskozita. Dalším faktorem je povrchové napětí kapaliny. Povrchové napětí vody je 70 mN/m a glycerolu 63mN/m a

ethylenglykolu jen 48 mN/m.

Významný rozdíl ve tvorbě kapek na vnějším povrchu vláken je možné pozorovat ze srovnání na obrázku 1.2. Zde jsou zobrazeny fotografie PA a PC vláken s povrchovou úpravou pomocí plazmy pod mikroskopem s kapkami vody. Dynamické kontaktní úhly PA vlákna s povrchovou úpravou pomocí plazmy jsou  $67,8^\circ$  a  $34,0^\circ$ , zatímco PC vlákno s povrchovou úpravou pomocí plazmy má postupující a ustupující kontaktní úhly rovny  $72,3^\circ$  a  $37^\circ$ . Je patrné, že PC+plazma vlákno vykazuje mírně hydrofobnější charakter, než-li je tomu u vlákna PA+plazma. To je také patrné z charakteru kapek. Na PC+plazma vláknu má voda tendence vytvářet větší počet menších kapek, kdežto na PA+plazma vláknu se kapku shlukují do větších kapek, které mají snahu se po vlákně rozlévat.



Obrázek 1.2: Fotografie vláken pořízené mikroskopem s kapkami vody na jejich povrchu, PA+plazma (vlevo), PC+plazma (vpravo).

Srovnáním dosažených výsledků v rámci všech měřících kapalin je patrné, že první skupina vykazuje obdobné chování navzdory měřící kapalině. Tedy hydrofobní polymery nejsou velmi citlivé na změnu měřící kapaliny. Naopak druhá skupina se zdá reagovat velmi citlivě na změnu kapaliny. Například plazmované vlákno dosahuje největšího kontaktního úhlu ve vodě v rámci druhé skupiny, v ethylenglykolu naopak jeden z nejmenších a v glycerolu dosahuje průměrnou hodnotu. Otázkou je, který ze zmíněných faktorů má vliv na výsledné chování vzorků. Z pohledu povrchového napětí by se vzorky měřené v glycerolu a ve vodě měly chovat obdobně a výsledky naměřené v ethylenglykolu by měly být výrazně odlišné. Avšak vzorky měřené ve vodě dosahují podobných výsledků jako vzorky měřené v ethylenglykolu. Tyto kapaliny jsou si blízké svojí viskozitou (voda 0,001 Pa.s, ethylenglykol 0,018 Pa.s, zatímco glycerol má viskozitu 1,48 Pa.s). Z tohoto důvodu se zdá, že zásadním faktorem je viskozita kapaliny.

Obrovský potenciál skrývá povrchová úprava pomocí plazmy, která výrazně ovlivňuje smáčivost povrchu. Pro zhotovení výměníku tepla je nezbytné vytvořit ze samostatných vláken svazek. Za tímto účelem se používají různé zalévací hmoty, které musí dokonale přilnout k vláknům. Zvýšením hydrofility vlákna bude tato zalévací hmota lépe přilínat k vláknům a spojení vláken tak bude kvalitnější.

## 2 MĚŘENÍ POLYMERNÍCH VÝMĚNÍKŮ TEPLA V REŽIMU VODA-VODA

Pro tyto měření byly sestrojeny čtyři různé prototypy lišící se počtem, uspořádáním a rozměry vláken. Všechny se však skládají ze svazku dutých vláken, který je umístěn do válcového

kovového pláště, utváří tak kotlový výměník (shell & tubes). Tabulka 2.1 udává vlastnosti jednotlivých výměníků.

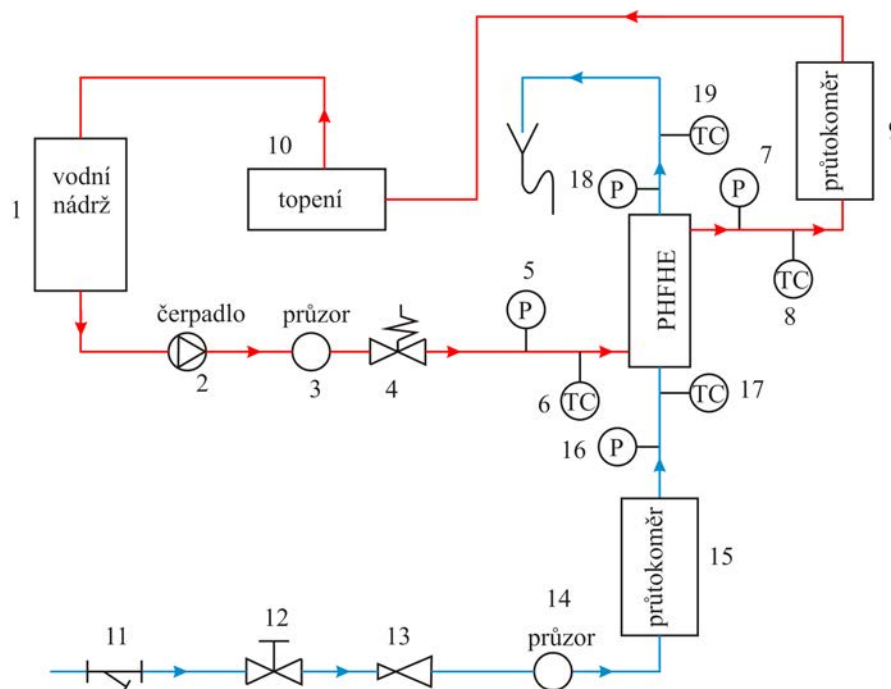
Tabulka 2.1: Parametry polymerních výměníků z dutých vláken pro měření v režimu voda-voda

označení	počet vláken	vnější průměr [mm]	vnitřní průměr [mm]	efektivní délka [mm]	teplosměnná plocha [m <sup>2</sup> ]	vnitřní průměr pláště [mm]
AB1	740	0,8	0,65	280	0,52	40
AB2	820	0,8	0,65	260	0,54	40
HE2	2000	1,3	1,05	240	1,96	80
HE3	4240	0,8	0,65	240	2,56	80

označení	uspořádání vláken	maximální teplota [°C]	maximální tlak [bar]	materiál
AB1	vlákná svírají 45°	80	4	PC
AB2	vlákná jsou paralelní	80	4	PC
HE2	vlákná svírají 45°	80	6,5	PA
HE3	vlákná svírají 45°	80	6,5	PA

Během experimentu byla měřena vstupní a výstupní teplota i tlak média v plášti i uvnitř vláken. Také byly měřeny tlakové ztráty a průtok v plášti i ve vláknech.



Obrázek 2.1: Schéma zapojení při měření v režimu voda-voda.

Obrázek 2.1 znázorňuje zapojení experimentálního standu v průběhu měření. Červená barva reprezentuje okruh teplé vody, okruh studené vody je pak vyznačen barvou modrou. Směr průtoku je označen šipkami. Před testovaným vzorkem, který je označen jako PHFHE, je předřazen řídicí ventil(4), který řídil průtok uvnitř pláště v závislosti na vstupní teplotě do pláště. Tento prvek sloužil pouze jako ochranný prvek, který by v případě vyšší teploty, než-li je teplotní limit výměníku, zastavil průtok teplého média. Teplý okruh byl dále tvořen zásobníkem horké vody (1), čerpadlem (2), průzorem (3), vstupní tlakoměr (5) a termočlánek (6), Výstupní tlakoměr (7) a termočlánek (8), průtokoměr (9), topné těleso (10). Studený okruh pak obsahoval filtr na mechanické částice (11), kulový ventil (12), redukční ventil (13), průzor (14), průtokoměr (15), vstupní tlakoměr (16) a termočlánek (17), výstupní tlakoměr (18) a termočlánek (19). Pohled na reálný stand je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Experimentální stand během měření.

Významným parametrem tepelného výměníku jsou tlakové ztráty, ty výrazně ovlivňují jeho

Tabulka 2.2: Parametry měření pro jednotlivé výměníky.

označení	teplota		průtok v plášti [l/h]	průtok uvnitř vláken [l/h]
	teplota v plášti [°C]	teplota uvnitř vláken [°C]		
AB1	80	20	1080	100; 200; 750; 1000; 1500; 1680
AB2	80	20	1080	100; 200; 750; 1000; 1500; 1680
HE2	80	24	960	100; 200; 750; 1000; 1500; 1830
HE3	80	24	760	100; 200; 750; 1000; 1500; 1760
HE3-50kPa	80	24	600	100; 200; 750; 1000; 1500; 1760

provozní náklady. Běžné přijatelné tlakové ztráty v této aplikační oblasti se pohybují do 50 kPa, ve speciálních případech pak mohou dosahovat až 100 kPa. Proto byly i testy provedeny s ohledem na tuto hranici. V průběhu měření byl průtok v plášti konstantní a maximální možný vzhledem k výkonu čerpadla a tlakovým ztrátám. Průtok uvnitř vláken byl pak proměnlivý. Tabulka 2.2 shrnuje přehled proměřených bodů. Protože tlakové ztráty v plášti pro výměník HE3 byly vyšší než 50 kPa, byl tento výměník proměřen dvakrát, jednou při maximálním možném průtoku a podruhé na hranici 50 kPa, tyto hodnoty jsou pak označeny jako výsledky pro HE3-50kPa.

Tabulka 2.3: Srovnání NTU, součinitele prostupu tepla (HTC), tlakových ztrát v plášti a tepelného výkonu pro jednotlivé výměníky na hranici 50 kPa a 100 kPa tlakových ztrát uvnitř vláken.

označení	NTU	NTU	HTC	HTC	tlakové ztráty v plášti [kPa]
	při 50 kPa uvnitř vláken [-]	při 100 kPa uvnitř vláken [-]	při 50 kPa uvnitř vláken [W/(m <sup>2</sup> K)]	při 100 kPa uvnitř vláken [W/(m <sup>2</sup> K)]	
AB1	0,6	0,32	1020	1043	21
AB2	0,55	0,32	900	934	20,5
HE2	0,78 <sup>1</sup>		587 <sup>1</sup>		48
HE3	2,3	1,92	470	565	98
HE3-50kPa	2,7	1,9	495	554	50
označení	tepelný výkon při 50 kPa uvnitř vláken [kW]	tepelný výkon při 100 kPa uvnitř vláken [kW]			
AB1	17,2	20,8			
AB2	17,2	22,7			
HE2	36,3 <sup>1</sup>				
HE3	30	35,2			
HE3-50kPa	28,9	33			

<sup>1</sup> tlakové ztráty pouze 32 kPa

Dle očekávání s rostoucím průtokem uvnitř vláken se zvyšují tlakové ztráty, ale i tepelný výkon.

Z tabulky 2.1 je patrné, že výměníky AB1 a AB2 jsou srovnatelné, co se týče jejich rozměrů a velikosti teplosměnné plochy. Hlavní rozdíl je v uspořádání vláken. Zatímco výměník AB2 je tvořen větším počtem kratších paralelních vláken, výměník AB1 se skládá z menšího počtu delších vláken, kde jednotlivé vrstvy vláken mezi sebou svírají 45°. Oba vzorky dosáhly srovnatelných výsledků, viz tabulka 2.3.

Další dvojicí srovnatelných výměníků vzhledem k svému objemu jsou výměníky HE2 a HE3. Tyto se významně liší v počtu vláken a velikosti teplosměnné plochy. To je zapříčiněno použitím vláken s různým vnějším průměrem (1,3 mm a 0,8 mm). Tlaková ztráta je důležitým parametrem

každého výměníku tepla. HE3 dosahoval při maximálním průtoku v plášti tlakových ztrát vyšších než 50 kPa, proto byl proměřen na hranici 50 kPa (600 l/h) a při maximálním možném průtoku (760 l/h). Výměník HE2 však dosahuje významně nižší tlakové ztráty a to jak v plášti, tak uvnitř vláken. Proto je lepší variantou menší počet větších vláken. To také potvrzuje cca 3-krát menší hodnota NTU výměníku HE2 ve srovnání s výměníkem HE3.

Testy prokázaly, že výměníky dosahují srovnatelných výsledků s tradičními kovovými výměníky [14]. Nabízejí však takové výhody jako je menší hmotnost, snadná tvarovatelnost, snadná recyklovatelnost a vyšší šetrnost vůči životnímu prostředí.

## 3 FÁZOVÉ PŘEMĚNY

Tato kapitola se zaměřuje na konvekční procesy spojené se skupenskou změnou tekutin, které mohou probíhat na rozhraní pevné látky a kapaliny, pak se jedná o vypařování, anebo na rozhraní pevné či kapalně látky a plynné fáze, v tom případě je řeč o kondenzaci. V těchto případech je latentní teplo nezanedbatelné. Díky kondenzaci a varu lze dosáhnout velkých tepelných výkonů s malými teplotními rozdíly.

### 3.1 Kondenzace

Kondenzace nastává tehdy, dojde-li k poklesu teploty plynné fáze pod teplotu nasycení. Toho můžeme dosáhnout několika způsoby. Kontaktem mezi plynnou fází a studeným povrchem. Kondenzát pak může na povrchu vytvářet buď souvislý film nebo kapky. Hladký povrch hydrofobních polymerních vláken podporuje kondenzaci po kapkách místo filmu kondenzátu, což má za následek mnohem vyšší součinitel přestupu tepla [15]. Kondenzace lze také dosáhnout poklesem tlaku v systému, kdy výpary vytvoří drobné kapky kondenzátu v plynné fázi (mlhu). Další možností je vstřikování kapaliny do horkých výparů, či výparů do kapaliny.

#### 3.1.1 Kondenzace filmu na vnějším povrchu válcového tělesa

Nusseltovo číslo pro kondenzaci laminárního filmu na kouli, či vodorovné trubce závisí na vnějším průměru  $D$  a lze vyjádřit jako

$$\overline{Nu}_D = \frac{\overline{\alpha}_D D}{\lambda_l} = C \left[ \frac{\rho_l g (\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\mu_l \lambda_l (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4}, \quad (3.1)$$

kde  $C = 0,826$  v případě koule [16] a  $C = 0,729$  pro trubku [17]. Kondenzát je ovlivňovaný vlivem gravitace a dochází k jeho hromadění na spodní části tělesa. Zde je jeho vrstva podstatně tlustší. Dochází ke stékání, či skapávání kondenzátu. Je-li kondenzátor tvořen z více trubek, na kterých se sráží kondenzát, může dojít k významnému ovlivnění filmu na ostatních trubkách.

## 4 MĚŘENÍ POLYMERNÍCH VÝMĚNÍKŮ TEPLA V REŽIMU VODA-PÁRA

Kondenzace páry byla testována v rámci odborné stáže ve firmě Spirax Sarco Ltd se sídlem v Cheltenham, UK. To také ovlivnilo povahu testů. Ty byly koncipovány tak, že ve vláknech proudila studená voda a v plášti nasycená vodní pára. Její průtok pak byl řízen v závislosti na výstupní teplotě vody z vláken. Ta byla nastavena na 65 °C případně 80 °C, což jsou standardní teploty používané pro ohřev vody v domácnostech. Na základě těchto testů se pak rozhodne, zda je tepelný výměník z dutých vláken schopný nahradit stávající kovové výměníky v těchto aplikacích.

Pro tyto testy byly vytvořeny dva odlišné prototypy. V obou případech byla vlákna vyrobena z polyamidu. Efektivní délka vlákna byla 240 mm. Prototyp byl zhotoven ze speciální tkaniny polyamidových vláken, jednotlivé vrstvy této tkaniny byly překříženy tak, že vlákna v jednotlivých vrstvách svírala úhel 45°. Oba prototypy se vnějšími rozměry nijak nelišily. Tabulka 4.1 udává parametry obou prototypů.

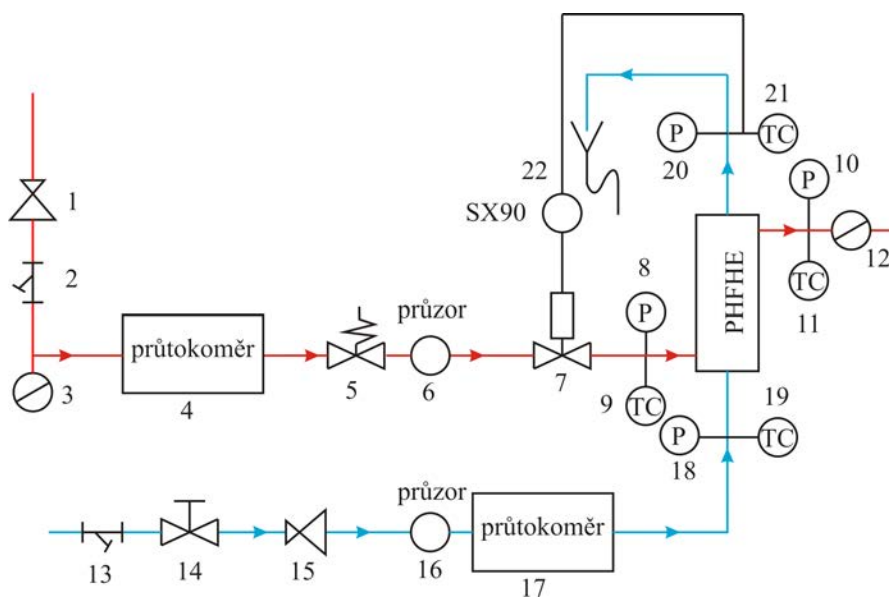
Tabulka 4.1: Parametry polymerních výměníků z dutých vláken pro měření v režimu voda-pára.

označení	počet vláken	vnější průměr [mm]	vnitřní průměr [mm]	teplosměnná plocha [m <sup>2</sup> ]	vnitřní průměr pláště [mm]
	HE5	4100	0,8	0,65	2,48
HE6	2000	1,3	1,05	1,96	80
označení	efektivní délka [mm]	maximální přípustná teplota [°C]	maximální přípustný tlak [bar]		
HE5	240	120	4		
HE6	240	120	4		

Oba tepelné výměníky z dutých vláken byly proměřeny i v režimu voda-voda analogicky s postupem, který byl popsán dříve. Protože předmětem této kapitoly nejsou testy výměníku v režimu voda-voda, ale voda-pára, jsou v tabulce 4.2 uveden přehled výsledků pro průtok 2000 l/h uvnitř vláken a 1000 l/h v plášti. Tyto průtoky byly maximální průtoky, kterých bylo pomocí experimentálního standu dosáhnout. Z tabulky je patrné, že tlakové ztráty výměníků uvnitř vláken přesahují hranici 50 kPa. Naopak vlákna jsou v plášti uspořádána tak, že pro vodu proudící uvnitř pláště nepředstavovala velkou překážku a tlakové ztráty uvnitř pláště dosáhly maximálně 11,7 kPa. Výměník HE5 dosáhl o 30 % vyšší tepelný výkon a o 28 % nižší tlakové ztráty uvnitř vláken než výměník HE6.

Tabulka 4.2: Výsledky pro výměníky HE5 a HE6 v režimu voda-voda pro průtok 2000 l/h uvnitř vláken a 1000 l/h v plášti.

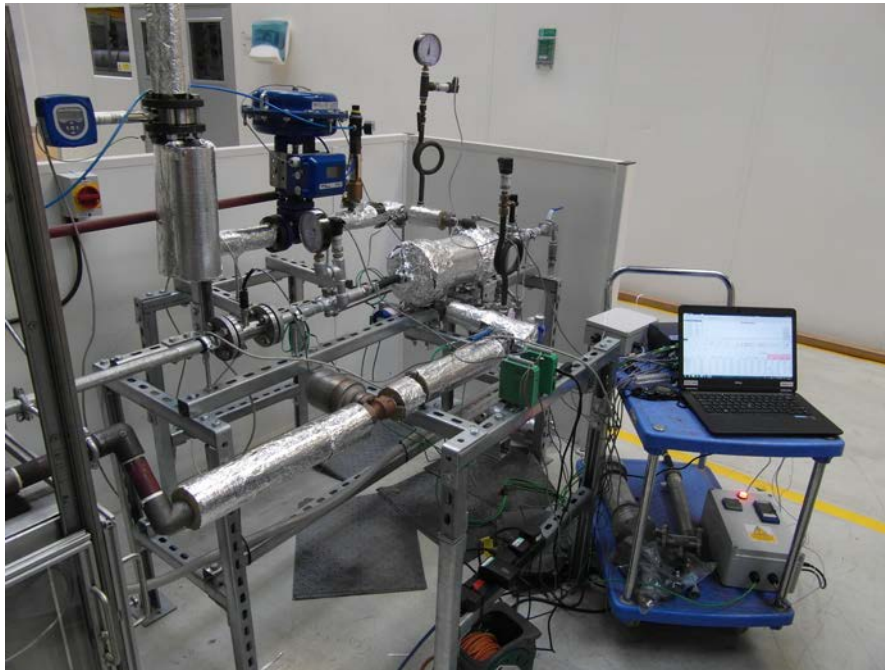
	HE5	HE6
tepelný výkon [kW]	46,9	32,9
součinitel prostupu tepla [W/(m <sup>2</sup> K)]	589,5	388,2
NTU [-]	2	1,5
účinnost [%]	33	22
tlakové ztráty uvnitř vláken [kPa]	64,8	82,7
tlakové ztráty v plášti [kPa]	11,7	7,4



Obrázek 4.1: Schéma zapojení standu pro měření kondenzace vodní páry.

Zkoušky kondenzace páry pak probíhaly podle schéma na obrázku 4.1 je znázorněno schéma zapojení měřicího zařízení, foto standu je pak na obrázku 4.2. Modrá barva představuje okruh vody a červená reprezentuje parní okruh. Testovaný vzorek je označen jako PHFHE. Horkou větev tedy tvoří redukční ventil (1), filtr na mechanické částice (2), parní past (3) (steam trap), průtokoměr páry (4), bezpečnostní ventil (5), průzor (6), řídicí ventil (7), vstupní tlakoměr (8) a termočlánek (9), výstupní tlakoměr (10) a termočlánek (11), parní past (12) (steam trap). Studený okruh se pak byl tvořen filtrem na mechanické částice (13), kulovým ventilem (14), redukčním ventilem (15), průzorem (16), průtokoměrem vody (17), vstupním tlakoměrem (18) a termočlánekem (19), výstupním tlakoměrem (20) a termočlánekem (21). Pro měření byla také použito zařízení SX90, které slouží k ovládání řídicího ventilu (7). Řídicí ventil (7) reguloval průtok páry s ohledem na výstupní teplotu vody, tedy reguloval průtok páry tak, aby výstupní teplota vody z vláken byla 65 °C nebo 80 °C. Bezpečnostní ventil (5) zaručoval, že tlak v plášti (páry) nepřesáhne hranici 0,15 MPa, tedy teplota nasycené páry nebude vyšší než 127 °C. Provozní teplotní limit výměníků byl 120 °C, maximální tlak 0,4 MPa.

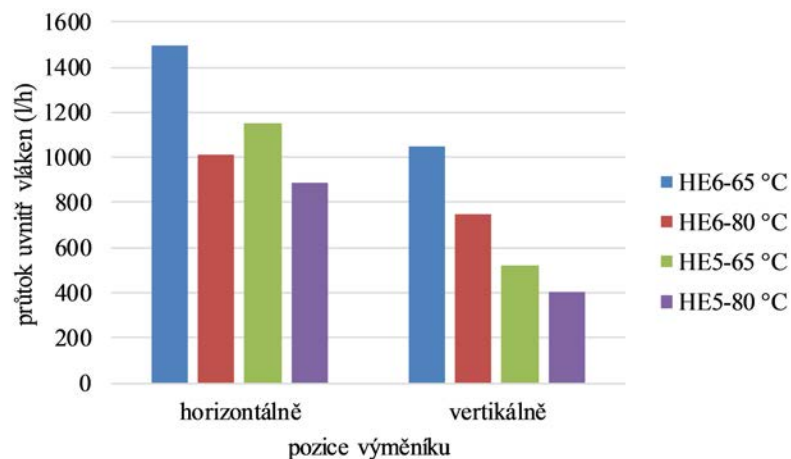




Obrázek 4.2: Stand pro měření kondenzace vodní páry.

## 4.1 Vliv druhu a počtu vláken

Tepelné výměníky HE5 a HE6 byly testovány ve vertikální a horizontální poloze. Následující text poskytuje srovnání vlivu počtu a rozměrů vláken. Experimenty byly provedeny analogicky s předchozím.

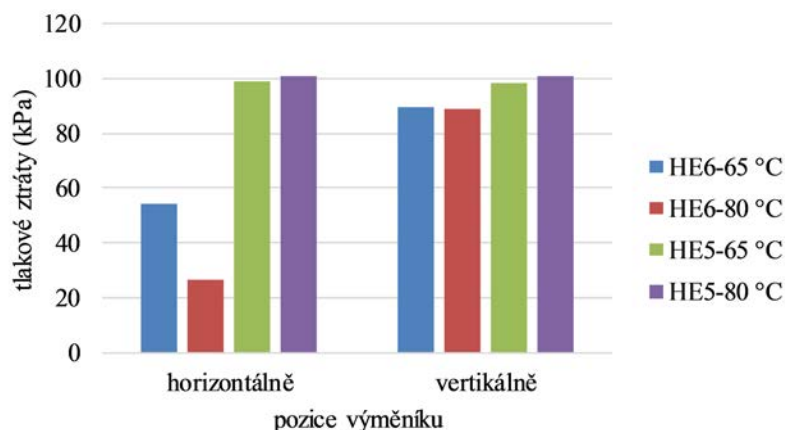


Obrázek 4.3: Maximální průtok ve vláknech, který byl výměník schopen ohřát na požadovanou teplotu (65 °C, 80 °C).

Obrázek 4.3 zobrazuje maximální průtok uvnitř vláken, který je daný výměníkem schopen ohřát na 65 °C, případně 80 °C. Ze srovnání plyne, že ačkoli má výměník HE6 menší počet větších vláken, je schopen ve vertikální poloze ohřát až dvojnásobné množství vody na požadovanou teplotu než výměník HE5. V horizontální poloze není tento rozdíl tak markantní, nicméně

výměník HE6 ohřeje o 350 l/h více na teplotu 65 °C a o 125 l/h více na 80 °C než výměník HE5.

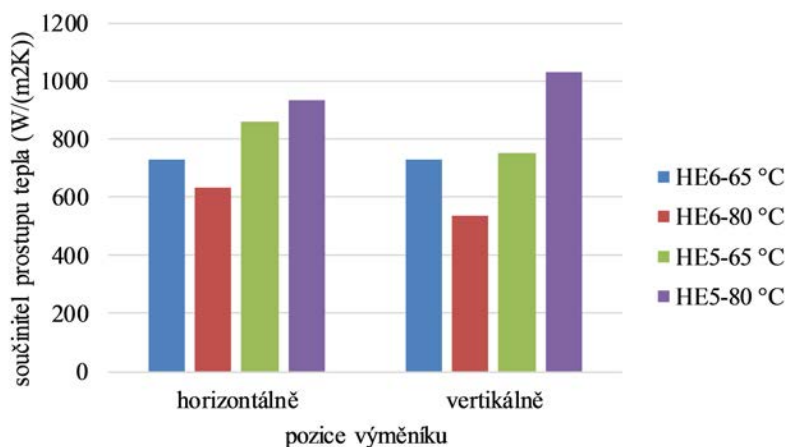
Jak již bylo zmíněno, tlaková ztráta uvnitř vláken a v plášti je důležitým parametrem výměníku tepla, s hranicí 50 kPa, případně 100 kPa v této aplikační oblasti. Obrázek 4.4 zobrazuje tlakové ztráty při maximálním průtoku v plášti. Tlakové ztráty uvnitř vláken nedosáhly hranice 50 kPa v žádném z případů a pohybovaly se v rozmezí 6-30 kPa. Tlakové ztráty v plášti se pak pohybovali velmi blízko hranice 100 kPa ve všech případech vyjma HE6 v horizontální poloze. Z pohledu tlakových ztrát se tedy jeví výměník s menším počtem větších vláken v horizontální poloze jako nejperspektivnější.



Obrázek 4.4: Tlakové ztráty v plášti při maximálním průtoku s ohledem na teplotní limity prototypu.

Tlakové ztráty v plášti, však mohly být částečně způsobeny kondenzátem, který se shromažďoval ve spodní části pláště a blokoval tak jeho odtok. Kondenzát se hromadil díky parní pasti, která je označena na obrázku 4.1 číslem (12).

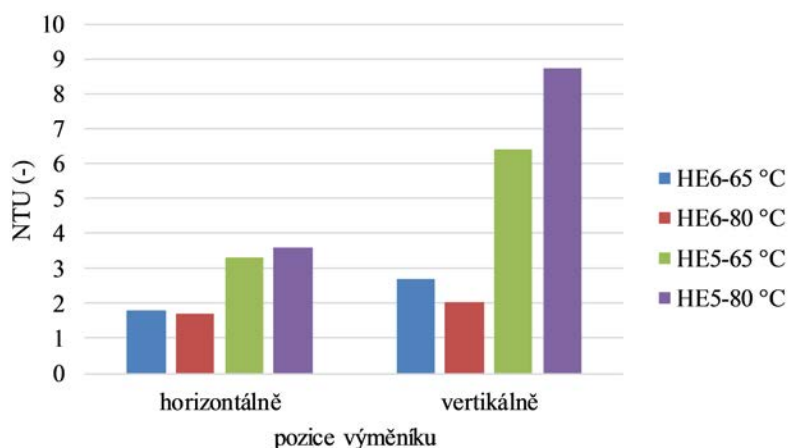
Přehled součinitele prostupu tepla je na obrázku 4.5. Nejvyšších hodnot součinitele prostupu tepla dosáhl výměník HE5 při ohřevu vody na 80 °C, 1033 W/(m<sup>2</sup>K) ve vertikální poloze, 936 W/(m<sup>2</sup>K) v horizontální poloze. HE6 pak dosáhl stejné hodnoty součinitele prostupu



Obrázek 4.5: Součinitel prostupu tepla při maximálním průtoku vody.

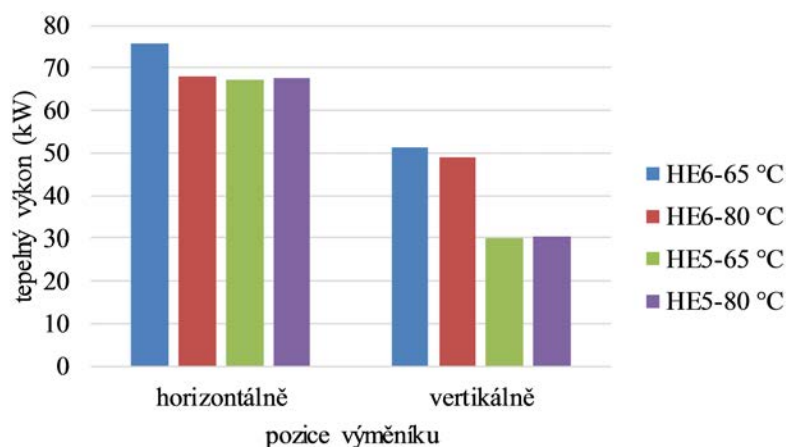
tepla při ohřevu na 65 °C ve vertikální i horizontální poloze a to 730 W/(m<sup>2</sup>K), nicméně v horizontální poloze byl výměník HE6 schopen ohřát o 450 l/h více, než-li v poloze vertikální.

Z obrázku 4.6 je patrné, že výměník HE5 byl nad-dimenzovaný a jeho potenciál nebyl plně využit. Hodnoty NTU jsou jedním ze způsobů klasifikace účinnosti tepelných výměníků. Tyto hodnoty by neměly být extrémně vysoké, neboť to znamená, že pro danou úlohu byl použit zbytečně velký výměník. Z obrázku 4.6 je také patrné, že nejlépe byl využit výměník HE6, jehož hodnoty NTU se pohybují kolem 2.



Obrázek 4.6: NTU při maximálním průtoku vody ve vláknech, který byl výměník schopen ohřát na požadovanou teplotu (65 °C, 80 °C).

Dalším významným parametrem výměníku tepla je jeho tepelný výkon, který je znázorněn na obrázku 4.7. HE5 vykazoval stejný tepelný výkon (cca 68 kW) v horizontální poloze jako HE5 v horizontální poloze s ohřevem na 80 °C. Maximální tepelný výkon (74,5 kW) pak dosáhl HE6 v horizontální poloze při ohřevu vody na 65 °C.



Obrázek 4.7: Tepelný výkon při maximálním průtoku vody ve vláknech, který byl výměník schopen ohřát na požadovanou teplotu (65 °C, 80 °C).

Z uvedených výsledků je patrné, že nejlepší pozice zkoumaných výměníků tepla je horizontální poloha. V té dosahují výměníky nejmenší tlakové ztráty v plášti a nejvyšší tepelný

výkon, což je způsobeno tím, že výměník je schopen ohřát více vody v horizontální poloze. Také menší počet vláken s větším vnějším průměrem se jeví jako perspektivnější varianta. Použitím menšího počtu větších vláken sice dochází k výraznému zmenšení teplosměnné plochy, ale také ke snížení tlakových ztrát uvnitř pláště. Teplota přehřáté páry je silně závislá na tlaku. Vzhledem k teplotnímu limitu výměníku (120 °C) byl průtok páry řízen tak, aby tlak uvnitř pláště nebyl vyšší než 2 bary (to odpovídá 120,21 °C) a nedošlo tak k poškození výměníku. Zásadním parametrem se ukázaly být právě tlakové ztráty, které významně limitují průtok přehřáté páry a tím výrazně snižují tepelný výkon výměníku.

## 5 KONDENZACE VZDUŠNÉ VLHKOSTI

Za účelem určení vlivu geometrie výměníku na průběh kondenzace byly sestrojeny 3 prototypy sestávající se z polypropylenových vláken řazených do řad o stejném počtu vláken s totožnými rozestupy. Jednotlivé prototypy se lišily počtem řad a jejich rozestupy.

Vliv smáčivosti povrchu vláken byl zkoumán pomocí výměníků s totožnou geometrií, ale různým materiálem vláken, konkrétně polypropylen a polyamid. Přehled prototypů a jejich vlastností udává tabulka 5.1.

Tabulka 5.1: Parametry prototypů pro měření kondenzace vzdušné vlhkosti.

parametr	označení			
	PA	PP-6	PP-6-bez-mezer	PP-20
materiál vláken	PA	PP	PP	PP
počet řad vláken	6	6	6	20
počet vláken v jedné řadě	133	133	133	133
celkový počet vláken	798	798	798	2660
vnější průměr vláken [mm]	0,8	0,8	0,8	0,8
rozteče mezi jednotlivými vrstvami <sup>1</sup> [mm]	8	8	3	3

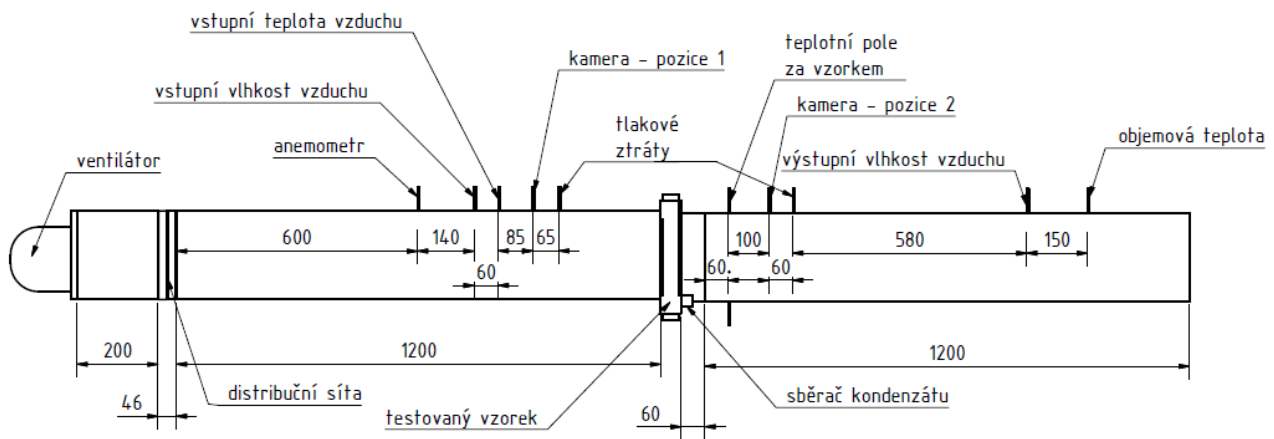
<sup>1</sup>Rozteče mezi vrstvami udávají vzdálenosti středů vláken (v jejich kruhovém průřezu).

Vstupní vlastnosti testovacího vzduchu byly zvoleny jako 27 °C a relativní vlhkost 50 %, což jsou standardní podmínky pro testy klimatizačních jednotek. Pro srovnání vlivu relativní vlhkosti, byly některé experimenty proměřeny i při relativní vlhkosti 80 %. Dalším parametrem byla rychlost vzduchu. Jednotlivé konfigurace byly vždy proměřeny pro 1 m/s a 3 m/s. Dalším parametrem byl také vliv gravitace, proto byly testy prováděny ve třech polohách. Poloha vždy označuje polohu vláken, vlákna byla umístěna svisle, vodorovně a pod úhlem 45°, což označuje polohu, kdy rovina řady vláken svírá úhel se směrem gravitace 45°.

Vzhledem k tomu, že cílem testů bylo pozorovat formu a průběh kondenzace na vnějším povrchu, bylo třeba vlákna po délce co nejvíce podchladiť. Jako chladicí médium byla zvolena voda o teplotě 10 °C a průtoku 500 l/h.

Měření byla provedena v kalorimetrické komoře, která sloužila jako zásobník vzduchu o daných vlastnostech, vnitřní rozměry komory jsou 4 m x 4 m x 3 m. Do komory byl umístěn

větrný tunel s obdélníkovým průřezem 190 mm x 225 mm, totožným s průřezem teplosměnné plochy všech výměníků. Do tunelu byly zabudovány měřící sondy, Pt100, anemometr, vlhkoměr. V průběhu všech experimentů byl pořizován video záznam a fotografie. Pozice měřících snímačů, kamery a zkoušeného vzorku jsou na obrázku 5.1. Na vstupu tunelu byl umístěn ventilátor, který sál vzduch z komory a vháněl jej do tunelu. Hned za ventilátorem jsou distribuční síta, která sloužila k rovnoměrnému rozprostření vzduchu po celém průřezu tunelu. Za nimi následoval anemometr, vlhkoměr a teplotní čidlo pro vstupní teplotu. Vstupní teplota byla měřena dvěma Pt100, jejich průměrná hodnota je pak reportována jako vstupní teplota vzduchu. Výstupní vlhkost a objemová teplota výstupního vzduchu byly měřeny v koncové části tunelu, kde se předpokládá, že vzduch je již promíchaný a má konstantní vlastnosti po průřezu. Objemová teplota byla také měřena pomocí 2 snímačů a jejich průměrná hodnota je pak uváděna jako objemová teplota. Pro měření v jednotlivých polohách byl pak nakláněn celý tunel, viz obrázek 5.2.

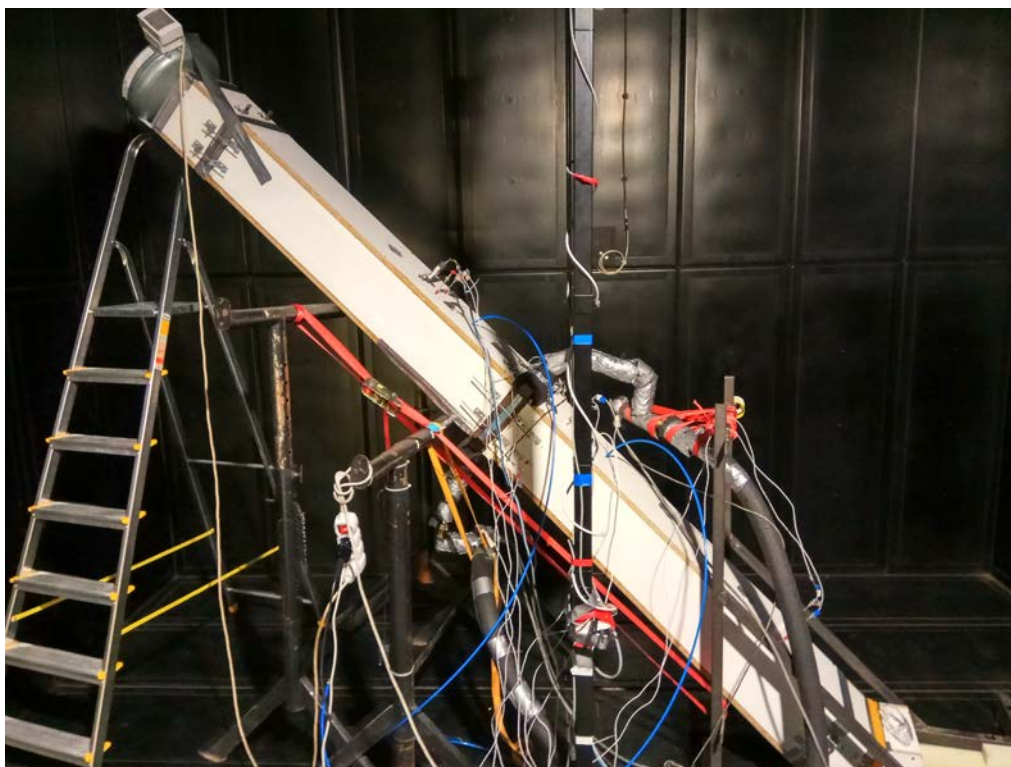


Obrázek 5.1: Schéma větrného tunelu osazeného měřícími sondami.

Dalším významným parametrem byly pak tlakové ztráty. V klimatizačních jednotkách se klade důraz na rozdíl tlakových ztrát, který je způsoben kondenzátem přítomným na teplosměnné ploše. Suchými tlakovými ztrátami jsou označovány tlakové ztráty, kdy na výměníku není žádný kondenzát. Mokrý tlakové ztráty jsou pak měřeny v případě, kdy je výměník v ustáleném stavu pokryt kondenzátem.

Naměřená data pak sloužila ke stanovení základních parametrů vlhkého vzduchu jako jsou tlak nasycených par, absolutní vlhkost, entalpie, hustota, rosný bod, tepelná kapacita, tepelný výkon, absolutní a relativní účinnost odvlhčení. Absolutní účinnost odvlhčení počítá pouze s celkovým množstvím vody ve vzduchu a množstvím vody, které bylo ze vzduchu odstraněno, zatímco relativní účinnost odvlhčení bere do úvahy i teplotu vody uvnitř vláken, neboť to určuje maximální možné odvlhčení vzduchu při 100% účinnosti.

Pro pozdější diskuzi výsledků je nezbytné vysvětlit, co je myšleno kontaktní plochou kondenzátu a vlákna. Kontaktní plochou je myšlena plocha dotyku kondenzátu a vlákna.



Obrázek 5.2: Větrný tunel uvnitř kalorimetrické komory během experimentu v poloze 45°.

## 5.1 Výsledky výměníku tepla s PA vlákny složeného z 6 vrstev a 8 mm mezer

Bylo zjištěno, že použitá PA vlákna mají dynamický kontaktní úhel ve vodě roven  $78,4^\circ$ . Tento materiál má tendence utvářet spíše film kondenzátu než-li velké do prostoru vyčnívající kapky. Obrázek 5.3 zobrazuje rozložení kondenzátu během experimentu s 50 % relativní vlhkostí a rychlostí vzduchu 3 m/s. Je patrné, že náklon vláken přispíval k lepšímu a snazšímu odstranění kondenzátu.



Obrázek 5.3: Vlákna PA výměníku v průběhu experimentu s rychlostí 3 m/s a 50 % relativní vlhkost, vertikální poloha (vlevo), 45° (uprostřed), horizontální poloha (vpravo).

Následující tabulka 5.2 dává přehled naměřených a vypočtených hodnot. Dle očekávání, zvýšení vlhkosti vzduchu vede k vyššímu výkonu výměníku. Součástí měření bylo také nalézt tzv. kritickou rychlost výměníku, tj. rychlost, při které bude docházet k unášení kapek kondenzátu proudem vzduchu. Kritická rychlost byla stanovena vždy ve svislé poloze vláken. V případě



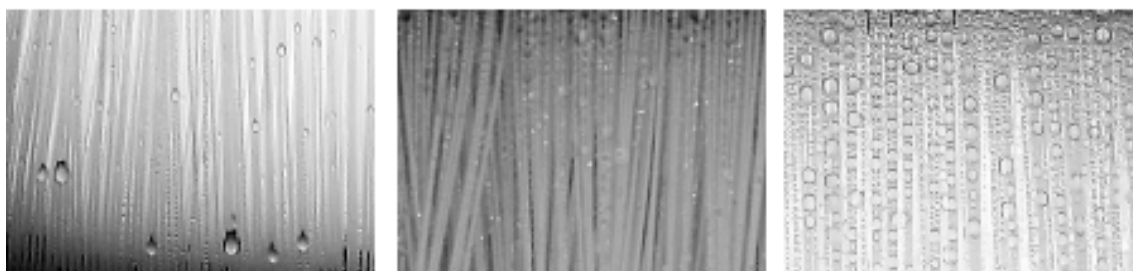
PA výměníku se tuto rychlost nepodařilo nalézt z důvodu nedostatečného výkonu ventilátoru, který odpovídal 5,1 m/s.

Tabulka 5.2: Výsledky pro výměník s PA vlákny.

poloha vláken	rychlost vzduchu [m/s]	relativ. vlhkost vstup [%]	relativ. vlhkost výstup [%]	suché tlak. ztráty [Pa]	mokrý tlak. ztráty [Pa]	výkon [kW]	absolut. účinn. odvlh. [%]	relativ. účinn. odvlh. [%]
svisle	1	50	67	3,6	2,5	0,8	23,6	71,2
	3	50	64	30,4	35,5	0,9	8,7	25,9
	1	80	86	3,6	2,8	1,21	34,7	57,6
	3	80	86	30,4	29,8	1,86	17,1	28,7
45°	1	50	70	3,6	3	0,68	17,1	54,2
	3	50	65	30,4	29,9	1,08	5,6	18,2
vodorovně	1	50	66	3,6	2,2	0,96	30,7	86
	3	50	69	30,4	34,4	0,96	2,2	5,9

## 5.2 Výsledky PP výměníku tepla složeného z 6 vrstev a 8 mm mezer

Bylo zjištěno, že použitá PP vlákna mají dynamický kontaktní úhel roven 104,8°. To by mělo vést ke tvorbě větších kapek s menší kontaktní plochou. To je také možné pozorovat na obrázku 5.4 vlevo, kde kondenzát snadno stéká po vláknech ve svislé poloze a shlukuje se tak do větších kapek. Vpravo je pak vidět, že v případě horizontální polohy vláken, formuje kondenzát kulové kapky.



Obrázek 5.4: Vlákna PP výměníku s 6 vrstvami po 8 mm v průběhu experimentu s rychlostí 3 m/s a 50 % relativní vlhkost, vertikální poloha (vlevo), 45° (uprostřed), horizontální poloha (vpravo).

Tento výměník byl jako jediný testován v 45° a horizontální poloze po a proti směru gravitace. Tedy ventilátor byl umístěn buď tak, že účinkům gravitace napomáhal či je musel překonávat. Při náklonu pod úhlem 45° se vliv gravitace nijak zvlášť neprojevil. Při pohledu na data získaná v horizontální poloze vláken dosahuje výměník stejného výkonu při proudění

vzduchu po i proti směru gravitace. Ačkoli ostatní veličiny jsou rozdílné. To je způsobené vlivem kondenzátu, který nekontrolovaně kapal do koncové části tunelu v případě proudění po směru gravitace a který kapal do vstupní části větrného tunelu v případě proudění proti směru gravitace. To samozřejmě ovlivnilo naměřená data a vlhkost na vstupu uvnitř tunelu nebylo možné brát jako relevantní. Byly proto jako vstupní vlastnosti vzduchu definovány vlastnosti vzduchu na sání ventilátoru.

Kritické rychlosti výměníku pak dosahovaly hodnot 3,6 m/s při 80% relativní vlhkosti a 5,1 m/s při vlhkosti 50 %.

Tabulka 5.3: Výsledky pro výměník s PP vlákny tvořeného 6 vrstvami s 8 mm mezerami.

poloha vláken	rychlost vzduchu [m/s]	relativ.	relativ.	suché	mokré	výkon [kW]	absolut.	relativ.
		vlhkost vstup [%]	vlhkost výstup [%]	tlak. ztráty [Pa]	tlak. ztráty [Pa]		účinn. odvlh. [%]	účinn. odvlh. [%]
svisle	1	50	72	3,2	6	0,87	23,9	66,3
	3	50	71	33,4	56,5	1,26	6	19,2
	1	80	78	3,4	6,2	1,5	44,6	70,9
	3	80	89	32,9	67,5	1,98	17,7	27,8
45°	1-po	50	72	3,2	6,4	0,82	21,6	67,3
	3-po	50	71	33,4	59,2	1,22	4,5	13,9
	1-proti	50	69	3,2	6	0,92	27,8	79,2
	3-proti	50	72	33,4	61,2	1,26	5,7	16,8
vodorovně	1-po	50	72	3,2	7,6	1,02	28,6	94
	3-po	50	75	33,4	70,6	1,79	10,9	33,4
	1-proti	50	63	3,2	12,3	1,05	33,4	98,6
	3-proti	50	51	33,4	64,5	1,89	17,2	55,1

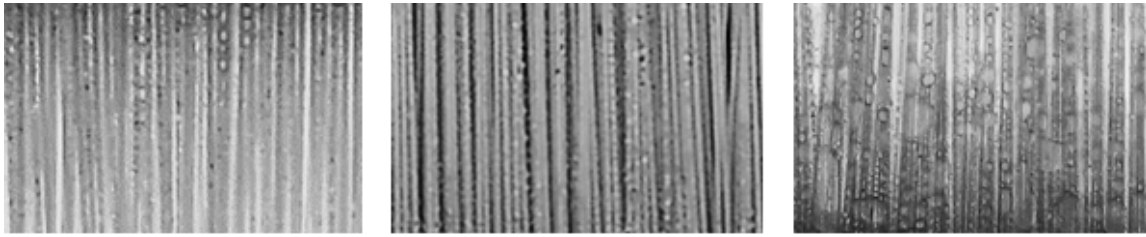
### 5.3 Výsledky PP výměníku tepla složeného z 6 vrstev a 3 mm mezer

Obrázek 5.5 na rozdíl od předchozích fotografií kondenzátu na vláknech zobrazuje vlákna výměníku během experimentů s 1 m/s a 50 % relativní vlhkostí. Ve srovnání z obrázkem 5.4 je vidět, že kondenzát tvoří jen drobné kapičky ve svislé a 45° poloze. Naopak ve vertikální poloze lze pozorovat obrovské kapky kondenzátu, které drží na několika vláknech. To bylo způsobené těsným uspořádáním jednotlivých vrstev a ulpívání kondenzátu napříč vrstvami.

V horizontální poloze výměník opět vykazuje vyšší výkon, to je však patrně způsobeno ovlivněním výstupních vlastností vzduchu padajícím kondenzátem.

Kritické rychlosti výměníku byly určeny jako 2,4 m/s při relativní vlhkosti 80 % a 3,4 m/s při relativní vlhkosti 50 %.





Obrázek 5.5: Vlákna PP výměníku z 6 vrstev a 3 mm mezer v průběhu experimentu s rychlostí 1 m/s a 50 % relativní vlhkost, vertikální poloha (vlevo), 45° (uprostřed), horizontální poloha (vpravo).

Tabulka 5.4: Výsledky pro výměník s PP vlákny tvořeného 6 vrstvami a 3 mm mezer.

poloha vláken	rychlost vzduchu [m/s]	relativ. vlhkost vstup [%]	relativ. vlhkost výstup [%]	suché tlak. ztráty [Pa]	mokrý tlak. ztráty [Pa]	výkon [kW]	absolut. účinn. odvlh. [%]	relativ. účinn. odvlh. [%]
svisle	1	50	73	4,9	9,4	0,7	16,3	53,1
	3	50	70	55,1	83	1,35	8,5	24,4
	1	80	82	4,9	13,4	1,33	39	64
	3	80	87	55,1	111,1	1,78	15,8	26,8
45°	1	50	73	4,9	12,3	0,7	16,4	50
	3	50	69	55,1	82,1	1,25	6,3	22,5
vodorovně	1	50	68	4,9	20,7	1,03	32	94,2
	3	50	76	55,1	110,5	2,12	16	42

## 5.4 Výsledky PP výměníku tepla složeného z 20 vrstev

Obrázek 5.6 zobrazuje výměník s 20 vrstvami během experimentů s 3 m/s a 50 % relativní vlhkostí. Na rozdíl od předchozích výměníků s PP vlákny, nejsou v horizontální poloze zobrazeny shluky kondenzátů do obrovských kapek, které jsou přichyceny k několika vláknům současně. To není způsobeno tím, že k nim nedocházelo, ale tím, že fotografie zobrazuje pohled seshora výměníku. Tedy tu vrstvu, ze které kondenzát skapává na vrstvy pod ním. Je patrné už i při rychlosti 1 m/s dochází ke vzniku velkých kapek.



Obrázek 5.6: Vlákna PP výměníku z 20 vrstev v průběhu experimentu s rychlostí 3 m/s a 50 % relativní vlhkost, vertikální poloha (vlevo), 45° (uprostřed), horizontální poloha (vpravo).

Tabulka 5.5: Výsledky pro výměník s PP vlákny tvořeného 20 vrstvami a 3 mm mezer.

poloha vláken	rychlost vzduchu [m/s]	relativ. vlhkost vstup [%]	relativ. vlhkost výstup [%]	suché tlak. ztráty [Pa]	mokrý tlak. ztráty [Pa]	výkon [kW]	absolut. účinn. odvlh. [%]	relativ. účinn. odvlh. [%]
svisle	1	50	81	25,3	46,9	1,2	33,7	97,6
	3	50	91	228	280	2,82	19,8	52
	1	80	78	25,3	50,5	2,1	57,8	94,1
	3	80	91	228	288	4,66	42,9	70
45°	1	50	75	25,3	68	1,23	36,7	95,8
	3	50	91	228	268	2,66	16,3	53,8
vodorovně	1	50	80	25,3	67,1	1,28	33,6	98,9
	3	50	82	228	284	3,4	30,6	88,8

Výměník s 20 vrstvami se ukázal jako zcela nevhodný. Dosahoval výrazných tlakových ztrát a to až do výše 288 Pa. Kritická rychlost byla určena jen při 80 % relativní vlhkosti. Unášení kondenzátu se začalo projevovat už při rychlosti 2,2 m/s. Při 50 % relativní vlhkosti nebyla kritická rychlost stanovena, neboť z důvodu vysokých tlakových ztrát bylo dosaženo rychlosti vzduchu 3 m/s při maximálním výkonu ventilátoru.

## 5.5 Vliv materiálu vláken

Vliv materiálu vláken lze posoudit srovnáním výsledků pro PA výměník a PP výměník s šesti vrstvami po 8 mm. Výměníky byly po stránce geometrie a počtu vláken identické. Z důvodu názornosti srovnání je následující text rozdělen do dvou sloupců.

### polyamid

78,4° – dynamický kontaktní úhel vláken ve vodě, kondenzát by se měl po vlákně rozlévat

ve svislé poloze jsou vlákna poseta velkým počtem drobných kapiček, během experimentu bylo pozorováno, že kapičky mají tendence se po vláknech rozlévat a utvořit souvisle stékající film, viz obrázek 5.3

ve vodorovné poloze jsou na vláknech patrné menší kapky kondenzátu, ale také jejich shluky,

### polypropylen

104,8° – dynamický kontaktní úhel vláken ve vodě, kondenzát by měl mít tendence vytvářet větší kapky s menší kontaktní plochou

ve svislé poloze se na vláknech tvořily drobné zárodky kapek, ty se však snadno dávaly do pohybu a shlukovaly se tak do větších kapek, které se rychle svezly po vlákně pryč, viz obrázek 5.4

ve vodorovné poloze kondenzát utváří spíše jednotlivé kulaté kapky, které

kdy dochází k přemostění kondenzátu z jednoho vlákna na druhé

po dosažení jisté velikosti skapávají z vláken

Provoz tepelných výměníků spojených s kondenzací na vnějším povrchu je limitován zejména dvěma parametry. Jedním z nich je hlučnost klimatizační jednotky, která je dána především rychlostí proudícího vzduchu. Druhým je pak tzv. kritická rychlost, při které dochází k strhávání kapek kondenzátu do ventilačního potrubí a může způsobit prosakování vody v nežádoucích místech. Proto musí být materiál teplosměnné plochy, na které se sráží kondenzát, vybrán tak, že poskytuje optimální kombinaci odvodu kondenzátu a rychlostního limitu. Následující test je opět rozdělen na dvě poloviny pro větší názornost srovnání kritických rychlostí.

#### **polyamid**

> 5,1 m/s při 50 % relativní vlhkosti – kritickou rychlost se nepodařilo najít (maximální dosažená rychlost vzduchu byla 5,1 m/s)

> 5,1 m/s při 80 % relativní vlhkosti – kritickou rychlost se nepodařilo najít (maximální dosažená rychlost vzduchu byla 5,1 m/s)

#### **polypropylen**

5,1 m/s při 50 % relativní vlhkosti

3,4 m/s při 80 % relativní vlhkosti

Závislost kritické rychlosti na vlhkosti vzduchu je způsobena větším množstvím kondenzátu, který zůstával na vláknech. Pro PA výměník se nepodařilo kritickou rychlost najít, neboť maximální dosažená rychlost vzduchu (5,1 m/s) nebyla dostačující.

Větší kapky tvořící se na PP vláknech mají za následek vyšší tlakové ztráty ve srovnání s PA vlákny. Tento rozdíl se pohybuje od 40 % až do 60 % (v případě nízkých rychlostí).

Z hlediska výkonu, PP výměník dosahuje mírně lepších výsledků než PA výměník. V horizontální poloze při rychlosti 3 m/s je však tento rozdíl značný. PP výměník vykazuje tepelný výkon 1,79 kW a PA výměník pouze 0,96 kW. Tento rozdíl byl však způsoben kondenzátem, který nebylo možné v horizontální poloze jímat, a proto padal koncovou částí tunelu, kde ochlazoval výstupní vzduch, a tak přispíval k výkonu výměníku. Tohoto faktu se dá vhodně využít a významně tak zvýšit výkon výměníku. u.

## **5.6 Vliv polohy výměníku**

Měření ukázala, že výměníky vykazují podobné výsledky ve vertikální a 45° poloze. Významně vyšších výkonů dosahovaly výměníky v horizontální poloze při 3 m/s. To bylo způsobeno kondenzátem, který nebylo možné jímat, a tak volně skapával do koncové části tunelu, kde ochlazoval výstupní vzduch.

Z obrázků 5.3, 5.4, 5.5 a 5.6 je patrné, že sklon vláken má výrazný vliv na odvod kondenzátu, a tedy i na tlakové ztráty.

Nejméně praktická varianta umístění výměníku je horizontální poloha, kdy docházelo k prokapávání či stékání kondenzátu z výše položených vrstev výměníku na ty níže položené. Kondenzát pak na vláknech formoval velké kapky s obrovskou kontaktní plochou. U výměníků, které neměly mezery mezi jednotlivými vrstvami, docházelo i k ulpívání kondenzátu napříč vrstvami.

## 5.7 Vliv geometrie výměníku

Vlivem geometrie výměníku je myšleno vzájemné uspořádání jednotlivých vrstev. Za tímto účelem byly proměřeny tři výměníky s PP vlákny. Dva výměníky byly tvořeny totožným počtem vrstev (6 vrstvami) jeden s vrstvami, mezi kterými byly mezery 8 mm, a druhý s mezerami 3 mm, tedy středy vláken od sebe byly vzdáleny 3 mm, vnější průměr vláken 0,8 mm. Poslední výměník byl tvořen 20 vrstvami z roztečí 3 mm.

Ukázalo se, že rozestupy jednotlivých vrstev mají výrazný vliv na kritickou rychlost pro unášení kapek kondenzátu. Zatímco unášení kondenzátu se u výměníku s 8 mm rozestupy objevilo až při rychlosti 3,6 m/s (80 % relativní vlhkost) a 5,1 m/s (50 % relativní rychlost), jsou tyto rychlosti v případě vrstev s 3 mm rozestupy podstatně nižší. A to 2,4 m/s (80 % relativní vlhkosti) a 3,4 m/s (50 % relativní vlhkosti) pro výměník s 6 vrstvami, u 20 vrstvého výměníku byla kritická rychlost 2,2 m/s (80 % relativní vlhkosti) a při 50 % relativní vlhkosti se nepodařilo zjistit, neboť při maximálním výkonu ventilátoru se podařilo docílit pouze 3 m/s, vlivem velkých tlakových ztrát, a při této rychlosti unášení kondenzátu nenastalo. Z těchto důvodů se výměník s 20 vrstvami ukázal jako zcela nevhodný. Naopak nejvhodnější geometrií výměníku jsou rozestupy mezi jednotlivými vrstvami. Jak již bylo dříve zmíněno, u výměníků s 3 mm rozestupy mezi vrstvami (středy vláken od sebe byly vzdáleny 3 mm, vnější průměr vláken 0,8 mm) docházelo k ulpívání kondenzátu napříč vrstvami, formování větších kapek kondenzátu, které je pak snadnější strhnout vlivem proudícího vzduchu.

Větší rozestupy mezi jednotlivými vrstvami (8 mm) měly také za následek snížení tlakových ztrát při zachování počtu vrstev. Srovnání výměníků, které se skládaly z šesti vrstev a jejichž jediný rozdíl je v rozestupech mezi jednotlivými vrstvami, ukazuje, že pouhým rozestupem vrstev lze dosáhnout snížení tlakových ztrát minimálně o 31 %.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo popsat jakým způsobem probíhá kondenzace na vnějším povrchu vláken a jak kondenzace ovlivňuje přenos tepla. V této studii jsou pevným povrchem myšlena polymerní vlákna, která vytváří tepelný výměník. Během tohoto srážení dochází k formování kapek na vnějším povrchu vláken. Velikost a tvar kapky mají zcela zásadní vliv na přenos tepla. To zda bude kondenzát utvářet spíše velké kapky vystupující do prostoru a mající malou kontaktní plochu s vláknem, či se kapky budou po vlákně naopak rozlévat a budou tak vytvářet tenké kapky s obrovskou kontaktní plochou závisí na povrchových vlastnostech vláken, které pak

ovlivní celkovou smáčivost vláken. Existuje mnoho metod, jak smáčivost měřit. Mnohé z nich však závisí na operátorovi, který svým pohledem určuje velikost kontaktního úhlu. V případě malých kapek na válcovém povrchu s vnějším průměrem cca 0,8 mm, je zcela nemožné zajistit přesnost takovýchto metod. Proto byla zvolena Wilhelmyho metoda, která pracuje nezávisle na obsluze a která je vhodná v případě vláken použitých rozměrů. Výsledky měření ukázaly, že polypropylenové (PP) vlákno má nejvíce hydrofobní povrch ( $104,8^\circ$ ), zatímco nejvíce hydrofilní vlákno ve vodě je polyamidové (PA) vlákno ( $78,4^\circ$ ). PA vlákno dosáhlo srovnatelných výsledků s poly-ether ether ketonovým (PEEK) vláknem. Plazmová úprava vláken vedla ke snížení dynamického kontaktního úhlu a to až o 20 %. Povrchová úprava pomocí fluoru je dalším ze způsobů, jak dosáhnout nižších hodnot kontaktního úhlu. Naopak použití trapylenu na povrch vláken nemá výrazný vliv na jeho výslednou smáčivost.

V rámci práce byl zkoumán vliv geometrie kotlových výměníků na jejich výsledné charakteristiky. Byly srovnány výměníky mající stejně velkou teplosměnnou plochu a stejné vnější rozměry vláken (0,8 mm), vnitřní rozměr pláště 40 mm. Jejich jediný rozdíl byl ve vzájemném uspořádání vláken. Jeden z výměníků byl tvořen rovnoběžnými vlákny, zatímco vlákna v jednotlivých vrstvách druhého výměníku spolu svírají úhel  $45^\circ$ . Z výsledků plyne, že paralelně uspořádaná vlákna a vlákna překřížená nemají vliv na celkový výkon ani tlakové ztráty.

Studie také srovnává výsledky tepelných výměníků s vnitřním průměrem pláště 80 mm v režimu voda-voda. Výměníky se liší počtem a velikostí vláken. Z výsledků je patrné, že právě počet a velikost vláken mají významný vliv na velikost tlakových ztrát uvnitř pláště, to ovlivňuje proudění uvnitř pláště, a tedy přenos tepla. I přesto, že výměník složený z 2000 vláken s vnějším průměrem 1,3 mm má teplosměnnou plochu o 23 % menší než výměník s 4240 vlákny o vnějším průměru 0,8 mm, dosahuje výměník s menší teplosměnnou plochou tepelného výkonu 36,3 kW při tlakových ztrátách 50 kPa uvnitř vláken a pouze 32 kPa v plášti, zatímco podobného výkonu (35,2 kW) druhý výměník dosahuje při tlakové ztrátě 100 kPa uvnitř vláken a v plášti 98 kPa. Proto je výměník s menším počtem větších vláken lepší.

Vliv počtu a velikosti vláken byl také zkoumán v režimu pára-voda. Pro tyto testy byly použity podobné výměníky jako v předchozím odstavci (výměník složen z 4100 vláken s vnějším průměrem 0,8 mm a výměník s 2000 vlákny o vnějším průměru 1,3 mm). Při použití přehřáté páry jsou tlakové ztráty klíčovým parametrem, neboť dochází k nárůstu tlaku uvnitř výměníku a tím i k prudkému růstu teploty přehřáté páry, která je v případě polymerních tepelných výměníků klíčová. Ze studie vyplývá, že optimální geometrií výměníku je 2000 vláken s vnějším průměrem 1,3 mm. Testování v horizontální poloze, vertikální poloze a pod náklonem  $45^\circ$  ukázalo, že v horizontální poloze dochází k nejplynulejšímu odvodu kondenzátu z pláště, což přispívá k nižším tlakovým ztrátám, a tedy k vyššímu výkonu výměníku.

Součástí práce je i studium kondenzace vzdušné vlhkosti. Vzhledem k testům smáčivosti vláken, byly PP a PA zvoleny jako materiály reprezentující hydrofobní (PP) a hydrofilní (PP) polymery. Měření ukázalo, že dle očekávání došlo k tvorbě tenkého filmu kondenzátu na PA vláknech, zatímco u PP vláken se objevila kondenzace po kapkách. Tvorba tenkého filmu s velkou plochou dotyku na PA vláknech umožňuje použít vyšší rychlosti vzduchu aniž by docházelo k

nežádoucím unášením kondenzátu do aerodynamického tunelu. Vliv geometrie výměníku byl zkoumán pomocí srovnání tří výměníků s PP vlákny, které se skládaly z identických vrstev. Dva výměníky byly tvořeny stejným počtem vrstev, jeden s roztečí 5 mm mezi jednotlivými vrstvami a druhý vrstvami těsně jdoucími za sebou, tedy středy vláken byly od sebe vzdáleny 3 mm, vnější průměr vláken 0,8 mm. Ukázalo se, že rozložení vrstev má výrazný vliv na velikost kritické rychlosti, při které začne docházet k unášení kondenzátu do aerodynamického tunelu. Mezery mezi vrstvami přispívají ke zvýšení kritické rychlosti 2,4 m/s → 3,6 m/s pro 80 % relativní vlhkost vzduchu na vstupu a 3,4 m/s → 5,1 m/s pro 50 % relativní vlhkost vzduchu na vstupu. Mezery mezi vrstvami také způsobují pokles tlakových ztrát minimálně o 31 %. Testováním výměníků v poloze vertikální, horizontální a pod náklonem 45° se dle očekávání potvrdilo, že sklon vláken má významný vliv na odvod kondenzátu. Výměníky dosáhly podobných tepelných výkonů v poloze vertikální a pod náklonem 45°. V horizontální poloze, kdy kondenzát volně skapává celou koncovou částí tunelu, byly měřeny vyšší tepelné výkony. To bylo způsobeno dodatečným ochlazováním vzduchu na výstupu vlivem kapajícího kondenzátu. V případě, že se podaří kondenzát vhodně jímat, mohlo by se tohoto procesu využít ke zvýšení výkonu celé klimatizační jednotky.

Autorka se podílela na tvorbě devíti publikací, z nichž nejvýznamnější je publikace v časopise *Journal of Elastomers and Plastics* (IF(2016)=0,787):

BROZOVA, Tereza a Miroslav RAUDENSKY. Determination of surface wettability of polymeric hollow fibres. *Journal of Elastomers and Plastics*. 2018. DOI: 10.1177/0095244318765041. ISBN 10.1177/0095244318765041.

## REFERENCE

- [1] RAME, E. The Interpretation of Dynamic Contact Angles Measured by the Wilhelmy Plate Method. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1997, **185**(1), 245-251. DOI: 10.1006/jcis.1996.4589. ISSN 00219797.
- [2] KWOK, D.Y., NEUMANN, A.W. *Contact angle measurement and contact angle interpretation*. DOI: 10.1016/S0001-8686(98)00087-6. ISBN 10.1016/S0001-8686(98)00087-6.
- [3] KRÁSNÝ, Ivo. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. Zlín, 2010. Master thesis. Tomas Bata University in Zlín. Vedoucí práce Prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
- [4] ADAMSON, Arthur W. *Physical Chemistry of Surfaces*. 6th ed. New York: John Wiley, 1997. ISBN 0-471-14873-3.
- [5] BERGMAN, T., INCROPERA, F.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. vyd. Hoboken, NJ: Wiley, 2011, xxiii, 1048 s. ISBN 978-0470-50197-9.
- [6] KANDLIKAR, Satish G. a Mark E. STEINKE. Contact angles and interface behavior during rapid evaporation of liquid on a heated surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002, **45**(18), 3771-3780. DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00090-X. ISBN 10.1016/S0017-9310(02)00090-X.
- [7] BLAKE, T. D., BRACKE, M., SHIKHMURZAEV, Y. D. Experimental evidence of nonlocal hydrodynamic influence on the dynamic contact angle. *Physics of Fluids*. 1999, **11**(8), 1995. DOI: 10.1063/1.870063. ISSN 10706631.
- [8] TRAPYLEN® and TRAPUR®. *Tramaco GmbH* [online]. [cit. 2016-06-23].
- [9] *Fluor Technik System GmbH* [online]. 2016 [cit. 2016-06-23].
- [10] MOZETIC, M. Surface modification of materials using an extremely non-equilibrium oxygen plasma. *Materials and technology*. 2010, **44**(4), 165-171. ISSN 1580-2949.
- [11] YUAN, Y., LEE, T.R. Contact Angle and Wetting Properties. In: BRACO, Gianangelo a Bodil HOLST. *Surface Science Techniques*. 51. Springer Berlin Heidelberg, 2013, s. 3-34. DOI: 10.1007/978-3-642-34243-1\_1. ISBN 978-3-642-34243-1. ISSN 0931-5195.
- [12] SPORI, Doris Madeleine. *Structural Influences on Self-cleaning Surfaces*. Zürich: ETH, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-006193586>.
- [13] MUKHERJEE, Abhijit a Satish G. KANDLIKAR. Numerical study of single bubbles with dynamic contact angle during nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007, **50**(1-2), 127-138. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.037. ISBN 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.037.
- [14] AMINI, Amir, Tereza BROZOVA, Miroslav RAUDENSKY a Jeremy MILLER. Polymer hollow fibre shell and tube heat exchanger for liquid-liquid applications. In: *13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. Slovenia, 2017, s. 866-874.
- [15] ZARKADAS, D.M., SIRKAR, K.K. *Polymeric Hollow Fiber Heat Exchangers: An Alternative for Lower Temperature Applications* [online]. [cit. 2016-02-01]. DOI: 10.1021/ie040143k. ISBN 10.1021/ie040143k. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie040143k>
- [16] POPIEL, Cz.O., BOGUSLAWSKI, L. Local heat-transfer coefficients on the rotating disk in still air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1975, **18**(1), 167-170. DOI: 10.1016/0017-9310(75)90020-4. ISSN 00179310.
- [17] DHIR, V., LIENHARD, J. Laminar Film Condensation on Plane and Axisymmetric Bodies in Nonuniform Gravity. *Journal of Heat Transfer*. 1971, **93**(1), 97. DOI: 10.1115/1.3449773. ISSN 00221481.

# ŽIVOTOPIS AUTORA

## Osobní údaje

**Datum narození:** 1. 5. 1990  
**Místo narození:** Nové Město na Moravě  
**Trvalé bydliště:** Moravec 77  
592 54 Moravec  
**Telefon:** (+420) 737 064 427  
**E-mail:** Tereza.Brozova@vut.cz  
**Rodinný stav:** svobodná

## Vzdělání

2014 - 2018 **VUT v Brně**, Fakulta strojního inženýrství, Obor Aplikovaná matematika (postgraduální studium, zakončeno státní doktorskou zkouškou)  
2012 - 2014 **VUT v Brně**, Fakulta strojního inženýrství, Obor Matematické inženýrství (zakončeno státní magisterskou zkouškou)  
2012 - 2014 **Universtà degli Studi dell'Aquila**, Italy, Department of Information Engineering, Computer Science and Mathematics (Double Diploma)  
2009 - 2012 **VUT v Brně**, Fakulta strojního inženýrství, Obor Matematické inženýrství (zakončeno státní bakalářskou zkouškou)

## Studijní pobyty

3/2017 - 4/2017 **Spirax Sarco Ltd**, testování modifikovaných (na základě předchozí stáže) polymerních výměníků tepla z dutých vláken  
5/2016 - 7/2016 **Spirax Sarco Ltd**, testování polymerních výměníků tepla z dutých vláken  
9/2012 - 7/2013 **Universtà degli Studi dell'Aquila**, Italy, Department of Information Engineering, Computer Science and Mathematics

## Pracovní zkušenosti

2014 - dosud **VUT v Brně**, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, technik  
2010 - 2014 **BVT Technologies, a.s.**, statistické zpracování dat

## Další schopnosti a dovednosti

**Jazykové znalosti:** Angličtina C1  
Italština A2  
Němčina A1  
**Řidičské oprávnění:** skupina B  
**PC dovednosti:** MATLAB, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, Autodesk Inventor, MS Office



## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na polymerní tepelné výměníky z dutých vláken. Hlavním předmětem zkoumání je vznik a průběh kondenzace na vnějším povrchu vláken a vliv fázové přeměny na přenos tepla. Práce se současně zabývá vlivem geometrie výměníku tepla na přenos tepla a průběh kondenzace. Součástí práce jsou také únavové zkoušky polymerních výměníků z dutých vláken. Práce tedy dává přehled možného uplatnění takovýchto výměníků v průmyslových aplikacích spojených s kondenzací.

## **ABSTRACT**

The thesis focuses on the polymer hollow fibres heat exchangers. The main object of the research is the formation and process of condensation on the outer surface of fibres and the effect of phase change on the heat transfer. The study deals with the influence of the geometry of the heat exchanger on the heat transfer and the condensation process. Fatigue tests of polymeric hollow fibres exchangers are also part of the work. The work provides an overview of the possible use of such heat exchangers in industrial applications associated with condensation.