

Oponentský posudek doktorské disertační práce

Název: „Polymeric hollow fibre heat exchanger design“

Autor práce: Ing. Ilja Astrouski

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

1. Úvod

Hodnocená práce se zabývá chladiči vyrobenými z dutých polymerních vláken (Polymeric Hollow Fiber Heat Exchanger, dále jen PHFHE) a popisuje jejich současné technicko-průmyslové použití. PHFHE jsou srovnávány s neplastovými chladiči (rozuměj kovovými). PHFHE jsou dnes v porovnání s neplastovými chladiči spíše okrajovou záležitostí. Autor v práci uvádí výhody PHFHE, které by mohly jejich praktické použití rozšířit a to zejména díky vysokým hodnotám součinitele přestupu tepla (Heat Transfer Coefficient, dále jen HTC) v tenkých dutých vláknech. Vysoké hodnoty HTC jsou dány zejména malým hydraulickým průměrem dutých vláken a dále pak sníženým tepelným odporem tenkých stěn vláken. Mezi další výhody uváděné autorem lze zařadit nižší hmotnost, lepší chemickou odolnost a též i potenciálně nižší cenu PHFHE. Tyto aspekty mohou vyvážit obvykle předpokládané výhody chladičů vyrobených z kovu. Autor navrhuje dvě oblasti použití dutých vláken. Svazky dutých vláken v množství řádově stovek či tisíců spojených v jeden chladič lze aplikovat v automobilním průmyslu namísto standardních kovových chladičů vyráběných zejména ze slitin hliníku. Další možnou aplikací je tepelný přenos během filtrace odpadních vod s možnou regenerací odpadního tepla. Z výše uvedeného považuji zvolené téma za velmi aktuální a zjištěné nové vědecké poznatky mohou přispět k lepšímu teoretickému porozumění problému, jakož i k aplikaci PHFHE v nových technických oborech.

2. Zhodnocení obsahu práce

Obsah práce je strukturovaně členěn do celkem šesti hlavních kapitol popisujících různé aspekty PHFHE. Autor se soustřeďuje na studium tepelné výměny uvnitř polymerních dutých vláken s jedno-fázovou tekutinou. Dále pak popisuje přestup tepla svazky těchto vláken a zanášení PP vláken chemickým a biologickým materiálem.

V první části jsou uvedeny informace o chladičích a jejich klasifikaci. Autor shrnuje důležitý požadavek na kompaktnost chladiče, tzn. velký poměr teplosměnné plochy vůči celkovému objemu chladiče.

Následující část si všímá současného komerčního rozšíření plastových chladičů. Autor uvádí rozsáhlou marketingovou studii dostupných typů a použití chladičů od celé řady výrobců specializujících se na tento obor. Kapitola obsahuje rešerši dostupných publikací na téma tepelné výměny plastových chladičů a uvádí doposud publikované hodnoty HTC ($10 - 800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ dle typu a aplikace).

Třetí část obsahuje informace o tepelných výměnících vyrobených z polymerních dutých vláken. Kapitola opět obsahuje podrobnou rešerši současné literatury a uvádí se zde výrazný nárůst HTC pro tento typ (až $2\,000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Tento nárůst je vysvětlován zejména malým hydraulickým

průměrem vláken, malou tloušťkou stěn vlákna a vysokou těchto kompaktností chladičů. Z této teorie vyplývá, že součinitel HTC pro vlákna s malým hydraulickým průměrem (< 1 mm) je velmi vysoký a to dokonce i pro laminární proudění. Uváděné hodnoty HTC jsou o jeden až dva řády vyšší než HTC pro vlákna/trubice s větším hydraulickým průměrem (> 2 mm), navíc závislé na rychlosti proudění (laminární vs. turbulentní).

Čtvrtá část práce uvádí teorii přestupu tepla uvnitř dutých vláken. Duté vlákno je zde uvažováno jako mikro-kanál a autor se zabývá tzv. „scaling effects“, které na rozdíl od makro pohledu mohou mít výrazný vliv. Zde je odvozeno, které parametry mají a nemají vliv na přestup tepla uvnitř dutých vláken s malým hydraulickým průměrem.

Pátá část se věnuje výzkumu přestupu tepla a proudění skrze svazky dutých vláken. Pro účely této kapitoly bylo postaveno celkem pět prototypových chladičů z tenkých dutých vláken (S1 nerezové trubičky, P1 až P4 svazky polymerních vláken). Tyto prototypy byly testovány na kalorimetrech ve dvou laboratořích. Výsledky byly srovnávány jednak s hliníkovým automobilovým chladičem a také s rovnicemi popisujícími tuto teorii. Autor uvádí srovnatelné hodnoty HTC a tlakových ztrát chladičového vzduchu v porovnání s automobilovým chladičem. Porovnání měřených dat dává dobrou shodu s rovnicemi publikovanými Grimsonem.

Poslední část se zabývá problémem usazování chemických částic a biologického materiálu na svazcích dutých vláken během filtrace resp. rekuperace tepelné energie z odpadních vod. Opět byly zjištěny vysoké hodnoty HTC, ale současně byly zjištěny dva rozdílné vlivy procesu usazování na velikost HTC. Autor studoval tyto procesy v reálné praxi (odpadní vody ze sprch a prádelny). Z experimentálně zjištěných dat vyplývá, že usazování chemických částic (TiO_2) na hladkém povrchu vláken nemá zásadní vliv na velikost HTC, a to z důvodu nízké adheze plastového povrchu. Naopak usazování biologického materiálu (růst bakterií a řas) má zásadní negativní vliv na velikost HTC. Studie ukazuje, že zásadní vliv tedy má konkrétní složení odpadních vod.

3. Výsledky práce

Práce sumarizuje dosud známé teoretické poznatky. Jedná se o relativně nový obor zkoumání (pozn. PHFHE začaly být zmiňovány v roce 2004), a proto teorie není úplná, popř. některé publikované studie nejsou navzájem v souladu. Práce navíc přináší vlastní zjištěné poznatky a závěry o problematice PHFHE, zejména návrhy jejich dalšího praktického využití. Autor rozvinul dosud známé teoretické znalosti, definoval a prozkoumal důležité faktory pro správnou konstrukci PHFHE. V experimentální části autor postavil prototypové chladiče z polymerních dutých tenkostěnných vláken a měřeními ověřuje své předpoklady. Tímto potvrzuje předpoklad o vysokých hodnotách HTC při tepelné výměně na dutých vláknech. Vysoké hodnoty HTC a zejména schopnost je numericky je „předpovídat“ je klíčová pro další rozšíření PHFHE.

4. Formální a jazyková úroveň práce

Disertační práce na celkem 91 stranách popisuje teoretická východiska a samotné postupy autora. Práce je velmi dobře strukturována a obsahuje velké množství referencí na publikace související s obsahem práce (celkem 66). Přílohy (vzorce, tabulky a obrázky) vhodně ilustrují popisované problémy resp. závěry učiněné autorem. Autor zvolil anglický jazyk, což je další plus.

5. Připomínky a dotazy

Kapitola 1.1 „Basic Heat Exchanger Types and Configuration“ – kapitola klasifikuje různé typy chladičů. Pro větší přehlednost bych doporučil schématické či obrazové znázornění. Tato klasifikace není ve všech oborech ujednocena.

Str. 18 Fig. 11 chyba v odkaze na zdroj obrázku.

V kap. 4.1.5 „Variable property effect“ je krom jiného analyzován vliv chladicího media. Posuzována byla pouze voda. Doporučuji brát v potaz i další používaná chladiva jako např. glykol, oleje a jejich směsi.

V kap. 4.1.7 „Influence of wall roughness“ je analyzován vliv drsnosti povrchu na přestup tepla. Autor udává, že zvýšení drsnosti povrchu dutých vláken zvyšuje tepelnou výměnu o 25-30%. DOTAZ: Jaký je vliv na tlakovou ztrátu ve vlákne? Lze využít změny drsnosti (nebo tvaru povrchu) dutých vláken na zvýšení přestupu vlákna, a to zejména s odkazem na způsob jejich výroby (extruze)?

Str. 37 „Bundles no.2 has a slightly lower pressure drop than bundle no.3“. Z kontextu vyplývá, že svazek č. 2 měl být srovnáván s č. 1. Dále na další straně v grafu na Fig. 20 je tlaková ztráta jako lineární závislost na rychlosti proudění. Neměl by průběh být spíše parabolický? Tento graf udává velký vliv teploty na tlakovou ztrátu a vysvětluje ji dvěma příčinami – změnou viskozity media a změnou průřezu dutého vlákna způsobenou teplotní roztažností. DOTAZ: lze kvantifikovat vliv obou příčin? Jaký vliv má druhý efekt na přestup tepla (změna Reynoldsova čísla)?

Str. 41 graf na obrázku Fig. 23 udává změněné vnější průměry vláken 0mm.

Str. 46 není uvedena laboratoř, ve které bylo měření provedeno. Kalorimetrická měření z různých laboratoří nemusí být plně srovnatelná. DOTAZ: provedl autor korelaci výsledků mezi laboratoří „automotive company“ a „calorimetric chamber of HeatLab“? Jak se lišily? Dále pak vysvětlíte, proč byla vyhodnocována statická tlaková ztráta.

Str. 50 Tab. 4 uvádí tepelný výkon Q, ale neuvádí teploty, za kterých bylo dosaženo. Dále pak není zjevné, zda účinnost ϵ je na straně chlazeného nebo chladicího media.

Str. 54 prosím zaměnit angl. termín „soldered“ za „brazed“.

Str. 56 Fig. 35 – autor srovnává PHFHE vůči automobilovému chladiči z hliníku. Bohužel jsou uvedeny grafy jen pro tlakovou ztrátu vzduchové strany a HTC. Chybí porovnání tlakových ztrát na „vodní straně“ a celkového tepelného výkonu.

Str. 70 Tab. 8 „Properties of tested wastewaters“ – hodnotitel není odborníkem na tuto oblast, ale zajímalo by ho, zda uvedené hodnoty parametrů jsou (ne-)obvyklé a jejich rozsah. Dále by doporučoval uvést schématické nebo obrazové znázornění testovaných svazků č. 1 až 4.

Hodnotitel v práci postrádá diskuzi o dvou z jeho pohledu důležitých oblastech:

- Mechanickou pevnost a odolnost PHFHE v porovnání ne-plastovými tepelnými výměníky.
- Návrh řešení spojování dutých vláken do svazků s velkým počtem vláken.

6. Hodnocení tezí

K předloženým tezím nemám zásadních připomínek. Jsou v souladu s formou a obsahem disertační práce.

7. Závěr

Mnou hodnocená disertační práce splňuje stanovené cíle. Práce je velmi kvalitní a je přínosem pro rozvoj oboru. Výsledky zjištěné v rámci výzkumu mohou být v blízké době aplikovány v několika oborech průmyslové praxe. Proto **doporučuji práci k obhajobě a doporučuji udělení akademického titulu PhD.** panu Ing. I. Astrouskému.

Ve Zlíně 16.4.2015

Ing. et. Ing. Aleš Horák PhD.

Hanon Systems Autopal Services, s.r.o.

Závodní 1007

687 25, Hluk



Oponentský posudek disertační práce

POLYMERIC HOLLOW FIBER HEAT EXCHANGER DESIGN

Doktorand: ILYA ASTROUSKI

školitel: prof. Ing. MIROSLAV RAUDENSKÝ, CSc.

1. Vyjádření k aktuálnosti tématu disertační práce

Nízkoteplotní energie je v průběhu posledních asi 10 – 15 let neustále soustavněji a soustavněji využívána. Důvod je ekonomika reprezentovaná cenou energie a komplexním tlakem ekologů. Uvedená skutečnost má ten důsledek, že se objevují technologie umožňující ekonomické využití nízkoteplotního tepla.

Nové technologie buď představují jenom modifikaci stávajících technologií, např. úprava kovových výměníků tradičně používaných pro výměny tepla na vyšších teplotních hladinách, nebo se jedná o nové trendy, kde zatím není tradice a tím aplikační zkušenosti.

Těchto nových technologií je celá řada a předkládaná disertace zapadá do tohoto obecného trendu. Chci zdůraznit, že disertace se soustředí na neklasický přístup výměny tepla založený na jemných kapilárách. Téma je aktuální.

2. Vyjádření ke splnění cílů disertační práce

Nenašel jsem definici všech cílů ve strukturované formě tak aby bylo jednoznačné, jaké jsou cíle a jejich pod-cíle. Z mého vlastního studia problematiky mohu však konstatovat, že disertace představuje asi nejkomplexnější zpracování tematiky, které je možné najít v otevřených zdrojích. Problém je asi ten, že tak jako disertant tak i konkurence pracuje na podobných tématech a dá se očekávat, že se v brzké budoucnosti objeví konkurující práce.

3. Vyjádření k postupu řešení problému a k výsledkům disertace s uvedením konkrétního přínosu doktoranda

Zde chci znovu zdůraznit, že disertace je orientovaná na nové dosud soustavně nezpracované téma s širokým možným dopadem na praxi. Značná část textu je proto původní, dosud v literatuře neuvedená.

To staví doktoranda do obtížné situace, protože se nemá často s čím porovnávat. Jedna výjimka je velmi specifická výměna tepla v rámci medicínských aplikací.

Z inženýrského hlediska se však jedná o komplexní problém spojený i s výměnou hmoty. Co je však ještě důležitější, v rámci medicínských aplikací, jsou preferována jiná optimalizační hlediska. Ta jsou diktována péčí o zdraví a životy léčených lidí.

Pokud se bude ignorovat tento medicínský aspekt, tak klíčový rozdíl je v tom, že tyto speciální výměníky tepla postavené na polymerních kapilárách se používají jednorázově jenom v průběhu několika hodin. Není je možno sterilizovat. Takže ekonomie provozu je tím totálně deformovaná z pohledu průmyslových aplikací. Není se proto možné inspirovat medicínou.

Práci lze klasicky rozdělit na tři základní části: úvodní teoretické kapitoly, experimentální část a výpočtovou část. Toto tradiční rozdělení však není striktně dodrženo. Nekritizuji tento fakt, protože s ohledem na novost tématu je skutečně vhodnější presentované členění.

Kapitola 3 by mohl být částečně presentována jako podkapitola kapitoly 2, aby bylo jasné, co je současná situace.

Otázky

1)) Na obr. 19 jsou fotky tři svazků. V následující tab. 2 jsou hodnoceny jejich distribuce (asi rozdělení v prostoru) jako: good moderate, good. Toto hodnocení je zjevně expertní odhad. Jak se ale hodnotila další parametr a to objem svazku. Jak je definována porosita u třetího parametru?

2)) Tato otázka má úzkou souvislost technologií výroby. Na tyto vazby se ale bude narážet tím častěji čím se budeme dostávat blíže k reálným aplikacím. V kapitole 4.2.3 zmiňujete přesnosti s jakou je nutno měřit vnitřní průměr kapilár D, viz rovnice (25).

Jak se vypořádáte s faktem, že díky neideální činnosti extruderů s mění vnitřní průměr kapilár podle osy kapiláry. V praxi budete muset experimentem prostě proměřit dostatečně dlouhou kapiláru a tyto, vlastně integrované výsledky, použít pro výpočet

3)) Když myslím na praktické aplikace, ty mne zajímají nejvíce, tak se objevují následující dva základní problémy:

a)) za jakých okolností s prosadí kapilární výměníky které studujete v soutěži s kovovými,

b)) bod a)) budete moci zodpovědět, jenom když budete znát životnost výměníků. Máte o ní nějakou představu?

4. Vyjádření k významu pro praxi nebo rozvoj vědního oboru

Jak již bylo konstatováno, osobně aktuální očekávám zájem o aplikace. Je však nutné zdůraznit, že praktické aplikace jsou vázané na vyřešení celého komplexu problémů. Hlavně budou dva aspekty, které s disertací souvisí, které ale disertace neřeší, nebo téměř neřeší. Jsou to technologie výroby studovaných výměníků a jejich integrace do vyšších technologií, jako jsou například biotechnologie a aklimatizace.

Například technologie výroby a výrobní náklady budou velmi ovlivňovat přestup tepla. Přestup tepla je jenom jedna z optimalizačních kritérií. Vysoký přestup tepla například neospravedlní krátkou životnost nebo nepřiměřeně vysoké náklady.

Uvedená konstatování nesnižují význam velmi průkopnické disertace, naopak. Disertace otevírá cestu ke komplexnějšímu studiu problematiky.

5. Vyjádření k formální úpravě disertace s a její jazykové úrovni

Nejsem angličtinář a tak nejsem schopen posoudit jazykovou úroveň. Z mého hlediska snad mohu konstatovat, že použitá angličtina mi připadá víc než jenom akceptovatelná.

Formální úprava je v pořádku. Disertace může být po vhodné desintegraci jednotlivých témat použitelná jako zdroj textů pro publikace.

6. Vyjádření k tezí disertační práce

Předložené teze vhodně shrnují obsah disertační práce. Jsou zde uvedeny podstatné body a závěry, které lze detailněji prostudovat v kompletním znění.

7. Závěr

Doporučil jsem, aby doktorand zodpověděl v rámci obhajoby několik dotazů.

Konstatuji ale, že splnil požadavky kladené na disertační práce a doporučuji její přijetí k obhajobě.

Mirko Dohnal

Brno 10. 4. 2016