

Doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Ústav procesního inženýrství
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2
616 69 Brno

OPONENTNÍ POSUDEK

Doktorské disertační práce pana Ing. Mgr. Marka Vondry Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic

TÉMATICKÉ ZAMĚŘENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Tematické zaměření disertační práce je aktuální, neboť úzce souvisí se zpracováním kapalných zbytků z provozu bioplynových stanic (BPS), jejichž počet v České republice stále roste a přesahuje v současné době 450 stanic, přičemž současně se zvyšuje tlak na aplikaci nových technologií pro nakládání s odpadními vodami i zbytky zpracování. Disertační práce je zaměřena na aplikaci vícestupňové vakuové odparky využívající k částečnému odpaření fugátu nízkopotenciální odpadní teplo, které je bioplynovou stanicí produkováno.

CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A JEJICH SPLNĚNÍ

Cíle disertační práce a zvolená strategie k jejich dosažení jsou přehledně formulovány v kapitole č. 3. Primárním cílem disertační práce bylo navrhnout vhodnou variantu odpařovacího zařízení a na základě experimentálního ověření dospět k provozuschopnému stavu, kdy jednotka bude schopná kontinuálně zahušťovat fugát bez jeho další předúpravy. Faktorem, který ovlivňoval volbu cílů i postup k jejich dosažení, byl zájem spolupracujícího průmyslového partnera (PBS Power Equipment, s.r.o.) na získání podkladů umožňujících zavedení technologie odpařování pro daný účel do praxe. Cíle práce byly zvoleny reálně.

Na základě seznámení se s disertační prací pana Ing. Mgr. Marka Vondry se ztotožňuji s komentářem k vykonaným pracím a k dosaženým výsledkům, které jsou přehledným způsobem uvedeny ve statích 3.1 až 3.3 a 5.3.3 až 5.3.4 a konstatuji, že stanovené cíle byly reálné a byly splněny. Výsledkem vývojových prací je funkční prototyp, jenž potvrdil použitelnost zvolené technologie pro zahušťování fugátu. Při obhajobě uvítám vyjádření disertanta, do jaké míry dosažené výsledky odpovídají představám průmyslového partnera zejména s ohledem na výkonnost zařízení, energetickou spotřebu a kvalitu destilátu.

HODNOCENÍ ZVOLENÉHO POSTUPU ŘEŠENÍ PROBLÉMU A DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Členění práce je logické a obsahuje:

- přehled současného stavu v oblasti separačních technologií pro čištění odpadních vod a v oblasti odpařovacích zařízení
- cíle disertační práce
- teoretický rozbor zahrnující analýzu pracovních podmínek odpařovací stanice na základě matematického modelování a posouzení možnosti integrace odparky do komplexu BPS
- experimentální část zahrnující
 - o popis experimentálních zařízení a jejich postupných úprav (realizovány 2 typy odpařovacích zařízení)
 - o metodiku provádění zkoušek
 - o popis provedených zkoušek (pro realizované 2 typy odparek s modelovými kapalinami i reálným fugátem)
- výsledky měření a jejich diskuse
- učiněné závěry a doporučení pro budoucí úpravy a další postup prací

Na základě analýzy možností, jak dosáhnout zahuštění fugátu, která byla provedena již v rámci první části doktorského studia autora při zpracování *Pojednání o disertační práci*, byla zvolena cesta aplikující vícestupňovou odpařovací stanici na bázi mžikové destilace (MSF). Zdůvodnění cílů a volba postupu jsou logické a svědčí o koncepčním a systematickém přístupu autora k řešení problému.

V dílčích statích kapitoly č. 3 jsou přehledným způsobem uvedeny řešené problémy a hlavní dosažené výsledky jak při teoretickém výzkumu, tak v rámci experimentálních prací.

Na podporu záměru na aplikaci technologie odpařování autor v úvodních pasážích uvedl přehled a princip možných separačních technologií a posoudil rovněž alternativní cesty k dosažení stanoveného záměru, zahrnující membránové metody, tepelné pochody, mechanické i další způsoby

Na základě analýzy možností aplikace výše uvedených postupů dospívá autor k názoru, že přestože odlišných separačních metod existuje velké množství, žádná z uvažovaných technologických úprav není schopna samostatně zajistit zahuštění digestátu a zároveň dostát požadavkům na kvalitu výsledných produktů. Tyto argumenty vedly k preferenci postupu s aplikací odpařovací stanice, v níž bude využito nízkopotenciální odpadní teplo vznikající při kogeneračním využití bioplynu.

V této souvislosti bych chtěl poukázat na stále rostoucí potenciál membránových technologií, které v posledních letech patří mezi nejrychleji se rozvíjejí separační metody i v oblasti čištění odpadních vod.

Kladně hodnotím přístup zvolený pro zpracování kapitol 4.2.1 (Průmyslové odparky odpadních vod) a 4.2.2. (Odpařování zemědělských odpadních vod jako předmět výzkumné činnosti), kde autor na základě obsáhlé rešerše stávajícího stavu v konstrukčním řešení odpařovacích stanic a jejich aplikace pro zpracování zemědělských odpadních vody dokládá, že technologie odpařování je reálně použitelnou metodou pro zahušťování fugátu z bioplynových stanic a za tímto účelem je také již v mnoha provozech využívána. Kladně lze hodnotit rovněž rešerši rekapitulující konstrukční a provozní data více než 300 typů odparek,

která je uvedena v příloze 1.

Pro uplatnění v BPS byly jako vhodné identifikovány odparky s nízkou spotřebou elektrické energie a pro důkladnější rozbor byla vybrána tři alternativní řešení odpařovacích systémů, a to odparka s nucenou cirkulací v jednodukomorovém uspořádání (FCE), odparka s padajícím filmem v třístupňovém uspořádání (FFE) a vícestupňová mžiková odparka (MSF) s až 9 odpařovacími komorami. Pro tyto tři alternativy odpařovacích zařízení byly sestaveny matematické modely v programu MS Excel 2013, které umožnily posoudit pracovní podmínky uzlu odpařování pro vzorovou BPS. Použitý matematický aparát je adekvátní k řešenému problému a je založen na popisu podmínek pro fázovou rovnováhu kapalina-plyn, materiálových a energetických bilancích a na vztazích pro přestup tepla v tepelných výměnících.

S využitím matematických modelů jednotlivých typů odparek (FCE, FFE a MSF) byly provedeny simulační výpočty zaměřené na posouzení zejména vlivu stupně zahuštění fugátu na velikost teplosměnné plochy v aparátech výměny tepla, spotřebu tepelné a elektrické energie v soustavě odpařovací stanice apod. Výsledky srozumitelnou formou autor komentoval v stati 4.3.6.

V diskusi výsledků simulačních výpočtů autor správně poukazuje na skutečnost, že s rostoucím obsahem sušiny v koncentrátu se zhorší tepelně-hydraulické vlastnosti kapaliny, které se následně projeví zejména snížením součinitele prostupu tepla, avšak v práci není komentováno, jakým způsobem autor tuto skutečnost ve výpočtech zohlednil. Nicméně učiněné závěry z provedených simulačních výpočtů mají kvalitativní platnost a na jejich základě a provedené rešerši stavu techniky bylo možno pro experimentální výzkum zvolit vhodnou odpařovací technologii založenou na vícestupňové vakuové mžikové odparce (MSF).

Na základě provedené analýzy a zkušeností spolupracujícího pracoviště (PBS POWER EQUIPMENT, s.r.o.) byl pro experimentální výzkum zvolen typ vícestupňové mžikové odparky (MSF) uplatňující se např. v procesech odsolování. Přestože tento typ odpařovacích zařízení není obvykle k zahušťování odpadních a procesních vod využíván, má výhodu v relativně jednoduché konstrukci a spolehlivosti provozu.

Stěžejní zaměření prací autora spočívalo v experimentálním výzkumu, jehož cílem bylo pro zvolený typ odpařovacího zařízení dosáhnout ustáleného provozu při zahušťování reálného fugátu a kontinuální tvorbu destilátu. Experimentální činnost zahrnovala realizaci a zkoušky dvou prototypů vícestupňové mžikové odparky a v obou případech byly provedeny zkoušky v posloupnosti odpařování sladké vody, slané vody a reálného fugátu. Při vývojových pracích bylo nutno odstraňovat řadu konstrukčních nedostatků a upravovat technologický režim a získané zkušenosti lze považovat za cenný přínos disertanta k vytyčenému cíli. Na základě získaných provozních poznatků s funkcí prvního prototypu odpařovací soustavy bylo přistoupeno k realizaci druhé verze experimentálního zařízení tvořeného jedním modulem s třemi odpařovacími komorami. Inovovaný prototyp odparky zkoušený v druhé etapě již přinesl uspokojivé výsledky. Výsledky finálního testu s reálným fugátem uvedené v kapitole 5.3.3 dokladují, že byl dosažen relativně ustálený provoz odpařovací jednotky s nátokem fugátu 0,11 až 0,39 m³/h při kontinuální produkci destilátu v průměrném množství cca 6,8

kg/h o vlastnostech uvedených v tabulce č. 21. Tato data ukazují, že v laboratorních experimentech docházelo jen k nízkému odpaření a kontrastují s úvodním deklarovaným záměrem práce aplikací odpařovací stanice dosáhnout významnou redukci objemu kapalných odpadů. Měrná spotřeba elektrické energie, vyhodnocená na základě experimentálních dat ve výši 170 až 500 kWh/m³ destilátu, je poměrně vysoká a významně se liší od výchozích předpokladů. V této souvislosti bych uvítal rozvedení názorů autora jakými opatřeními bude možné produkci destilátu a jeho kvalitu zvýšit.

PŘIPOMÍNKY K DISERTAČNÍ PRÁCI A DOTAZY

Zásadní nedostatky technického rázu při rozboru řešené problematiky, provádění a hodnocení experimentálních a provozních zkoušek jsem nenalezl. Uvádím poznámky k méně podstatným bodům:

Ve vztazích pro energetické bilance dílčích stupňů odpařovací stanice není kalkulováno se ztrátovým teplem. Ačkoliv se nebude jednat o zásadní vliv, který vzhledem k velikosti zařízení a uspořádání soustavy očekáván na úrovni cca 1 až 2 % z předávaného tepla, je správné i tento tepelný tok uvažovat.

V kapitole 4.3.5 „Vstupní data a okrajové podmínky výpočtů“ autor zdůvodňuje použití vstupní data pro simulační výpočty, včetně rozdělení na parametry, které mají podstatný a méně podstatný vliv na konečné výsledky. V této souvislosti poukazuji na to, že určení termofyzikálních vlastností vodní páry, jako je saturační teplota a výparné teplo vody, v závislosti na tlaku systému, byla použita data z parních tabulek IAPWS-97. Nezpochybňuji tento postup, ovšem v odborné literatuře jsou k dispozici informace, jak s dostatečnou přesností přímo analyticky určit uvedené závislosti pro vodu.

Po formální stránce je práce logicky strukturovaná, formulace závěrů jsou srozumitelné a výstižné, grafická úprava i zobrazení jsou názorné. V textu je minimum odpustitelných překlepů a z formálních připomínek lze poukázat na to, že v některých případech autor používá tečku pro vyznačení desetinného oddělení, což v česky psaném textu, na rozdíl od anglosaského způsobu psaní, býti nemá. Lze konstatovat, že formální úprava a jazyková úroveň odpovídá požadavkům kladeným na doktorské disertační práce.

Disertační práce má 138 stran a 1 přílohu. Práce se opírá o 118 literárních sdělení, z toho v 6 případech o publikace disertanta, v nichž Ing. Mgr. Vondra vystupuje jako první autor, resp. spoluautor. Z publikací uvádějících Ing. Mgr. Vondru jako prvního autora se ve 2 případech jedná o zveřejnění v impaktovaném časopise, 1x ve sborníku zahraniční konference a 1x v tuzemském časopise. Výčet publikační a pedagogické činnosti disertanta obsahuje dále vedení 5 úspěšně obhájených diplomových prací, z toho 3 diplomové práce se bezprostředně vztahovaly k tématu disertační práce Ing. Mgr. Vondry.

Poznámky a náměty na odpovědi při obhajobě jsou uvedeny v textu a ve stručnosti rekapituluji:

- Motivem pro aplikaci technologie odpařování pro zahušťování odpadní vody je využití nízkopotenciálního odpadního tepla, které, jak autor konstatuje, je bioplynové stanici „téměř zadarmo“. Na obrázku č. 32 je schematicky znázorněno propojení technologických uzlů v komplexu bioplynové stanice spojena. Je logické, že k pokrytí

spotřeby tepla by byla odparka spojena s kogenerační jednotkou. Uvítal bych bližší komentář k vazbě tepelných toků mezi kogenerační jednotkou a odparkou a odhad měrné spotřeby energií pro reálný provoz. Uvádím, že na základě experimentů spotřeba tepla vyhodnocována nebyla a spotřebu elektrické energie vyhodnotil autor na 170 až 500 kWh_e/m³ destilátu, což se řádově odlišuje od předchozích údajů z literatury.

- Uvítal bych názor disertanta na doporučený další postup pro zvýšení výtěžnosti destilátu a zlepšení kvalitativních parametrů destilátu.
- Jsou získané informace dostačujícími podklady pro záměr spolupracujícího průmyslového partnera na realizaci odpařovacích zařízení zkoumaného typu pro zahušťování fugátu v komplexu bioplynové stanice?
- Jak zohlednil disertant reálné vlastnosti fugátu na odhad součinitele přestupu tepla v teplosměnných aparátech?
- Korespondovaly hodnoty tlaku a teploty v odpařovacím prostoru odparky teoretickým představám a bylo možné z těchto dat stanovit teplotní depresi?

ZÁVĚREČNÉ HODNOCENÍ

Doktorská disertační práce pana Ing. Mgr. Marka Vondry zpracovaná na téma *Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic* splnila vytčené cíle a výsledkem vývojových prací je funkční prototyp, jenž potvrdil použitelnost technologie víceetapového odpařování pro zahušťování fugátu. Disertační práce přináší značný objem poznatků i praktických zkušeností využitelných v dalším strojně-technologickém vývoji i praktickém provozu opatřovacích zařízení pro posuzovaný účel. Doktorská disertační práce dosvědčuje, že doktorand má široký přehled o řešené problematice a má předpoklady pro samostatnou a koncepční badatelskou práci v oblasti teorie i praktického výzkumu, tedy splňuje požadavky, které jsou na disertační práce kladeny zákonem o vysokých školách č. 111/1998 Sb. ve znění pozdějších předpisů.

Disertační práci pana Ing. Mgr. Marka Vondry **doporučuji k obhajobě** a v případě úspěšného obhájení doporučuji, aby panu Ing. Mgr. M. Vondrovi byl udělen titul Ph.D.

V Brně dne 11. května 2017


Doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
Ústav procesního inženýrství
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno
e-mail: bebar@fme.vutbr.cz
tel. 541 142 387