

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav procesního inženýrství

Ing. Mgr. Marek Vondra

**ZAŘÍZENÍ PRO ZAHUŠŤOVÁNÍ ODPADNÍ VODY
Z BIOPLYNOVÝCH STANIC**

EQUIPMENT FOR THICKENING WASTE WATER FROM BIOGAS PLANTS

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor:	Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel:	prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
Oponenti:	doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc. doc. Ing. Pavel Hoffman, CSc.
Datum obhajoby:	24. 5. 2017

Klíčová slova

Odpařování, digestát, fugát, destilát, bioplynová stanice, odpadní teplo, vícestupňová mžiková destilace, hnojivo, plánovaný experiment

Keywords

Evaporation, liquid digestate, distillate, biogas plant, waste heat, multi-stage flash evaporation, fertilizer, design of experiment

Místo uložení dizertační práce

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

© Marek Vondra, 2017

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

OBSAH

1 ÚVOD.....	4
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI PRODUKCE A ZPRACOVÁNÍ FERMENTAČNÍCH ZBYTKŮ	5
2.1 Provoz bioplynových stanic a nakládání s digestátem.....	5
2.1.1 <i>Produkce tepla a jeho využití</i>	5
2.1.2 <i>Produkce digestátu a jeho využití</i>	5
2.1.3 <i>Zahušťovací potenciál</i>	6
2.2 Postupy pro zahušťování procesních a odpadních vod	6
3 CÍLE PRÁCE A METODIKA	8
4 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE A MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ.....	10
4.1 Popis teoretických základů odpařování.....	10
4.2 Současný stav poznání v oblasti odpařování procesních a odpadních vod.....	10
4.3 Tvorba matematických modelů, porovnání odparek a volba technologie	13
4.4 Návrh integrace odparky do BPS a její hodnocení	16
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE A PŘEDSTAVENÍ PROTOTYPU MSF ODPARKY	18
5.1 Stanovení vybraných fyzikálních vlastností fugátu	18
5.1 Experimentální vývoj odparky	20
6 ZÁVĚR A BUDOUCÍ PRÁCE.....	22
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	24
ŽIVOTOPIS.....	26
PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY	28
ABSTRACT	29
ABSTRAKT	30

1 ÚVOD

Předkládaná dizertační práce je výsledkem čtyřleté výzkumné a vývojové činnosti, která směřovala k vývoji provozuschopné technologie pro zahušťování odpadních vod (digestátu) z bioplynových stanic (BPS). Digestát je vedlejším produktem anaerobní digesce. Obsahuje cenné hnojivé látky, ale v nízké koncentraci. Snížení objemu digestátu a zakoncentrování hnojivých látek slibuje snížení nákladů na skladování a přepravu digestátu. Vyvíjenou technologií byla vícestupňová mžiková odparka, která je v anglické terminologii známa pod zkratkou MSF (Multi-Stage Flash). Mezi hlavní důvody pro volbu této technologie patří její konstrukční jednoduchost, provozní spolehlivost a zejména schopnost upotřebit nízkopotenciální odpadní teplo, kterého je v BPS přebytek. Přestože se jedná o provozně ověřenou technologii, je její užití v BPS zcela novou myšlenkou. Společným jmenovatelem výzkumných a vývojových aktivit byla snaha identifikovat, popsat a eliminovat jednotlivé překážky pro její provozní využití. Výsledkem systematického vývoje je plně funkční prototyp MSF odparky jenž potvrdil použitelnost této technologie pro zahušťování fugátu (kapalné frakce digestátu) a přiblížil výzkum k poslednímu cíli, kterým je pilotní instalace v BPS.

Dizertační práce je členěna do tří stěžejních oddílů. První část je věnována **úvodu do problematiky** BPS a nakládání s fermentačními zbytky. Pozornost je rovněž zaměřena na vybrané metody pro zahušťování digestátu a separaci hnojivých látek. Druhá významná část práce je zasvěcena **teoretickým cílům** a souvisejícím výsledkům. Jedná se o popis teoretických základů odpařování, rešerši současného stavu poznání v oblasti odpařování zemědělských odpadních vod, tvorbu matematických modelů a hodnocení integrace odpařovací technologie do BPS. Třetí část práce pak stojí na **experimentálních základech**. Představeny jsou experimentálně ověřené vlastnosti fugátu a systematická vývojová činnost prototypu vícestupňové mžikové odparky.

Charakter vědecké činnosti byl **na pomezí aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje**. Z hlediska odborného zaměření je práce na pomezí strojního a chemického inženýrství. Částečně se rovněž dotýká zemědělských a environmentálních věd. Teoretických i experimentálních výsledků bylo dosaženo s využitím matematických vztahů a fyzikálních zákonů a principů z oblasti termomechaniky, hydromechaniky a fyzikální chemie. Spojovacím článkem veškeré výzkumné a vývojové činnosti v rámci této práce je multidisciplinární obor **procesního inženýrství**. Z jednotlivých disciplín procesního inženýrství se řešená problematika týká hydraulických, tepelných a difuzních pochodů. Z hlediska funkce lze zkoumanou technologii zařadit mezi separační procesy. Předmětem zkoumání jsou především ustálené stavy systému.

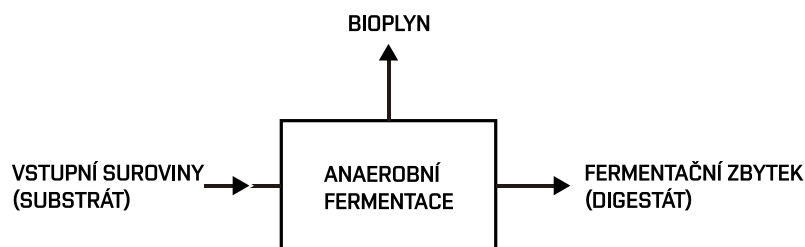
Vývojová činnost probíhala ve spolupráci se společností PBS POWER EQUIPMENT, s. r. o. Výzkumný záměr byl podpořen Technologickou agenturou ČR v rámci Programu na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON pro roky 2017 až 2019.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI PRODUKCE A ZPRACOVÁNÍ FERMENTAČNÍCH ZBYTKŮ

Předkládaná kapitola shrnuje nejdůležitější poznatky na poli provozu BPS a zahušťování procesních a odpadních vod obecně. Uvedené informace a závěry byly výchozím podkladem pro volbu vhodné zahušťovací technologie a následné směřování výzkumných a vývojových aktivit.

2.1 PROVOZ BIOPLYNOVÝCH STANIC A NAKLÁDÁNÍ S DIGESTÁTEM

Základním principem při výrobě bioplynu je tzv. **anaerobní fermentace**, při které dochází za zvýšených teplot a bez přístupu kyslíku k biologickým procesům, jejichž výsledkem je vytvoření směsi plynů, tzv. **bioplynu**. K výrobě bioplynu je možno využít celé řady vstupních surovin, souhrnně označovaných jako **substrát**. Patří mezi ně statková hnojiva a kejda, rostlinné suroviny, cíleně pěstovaná biomasa, čistírenské kaly, biologicky rozložitelný odpad nebo vedlejší produkty živočišného původu [1]. Zbytek po fermentačním procesu je označován jako **digestát**. Tvoří ho zejména nerozložený a částečně rozložený podíl zpracovávaného substrátu a mikroorganismy účastníci se fermentace [2]. Zjednodušené schéma materiálových toků nabízí obr. 1.



obr. 1: Základní schéma toku materiálu v BPS.

2.1.1 Produkce tepla a jeho využití

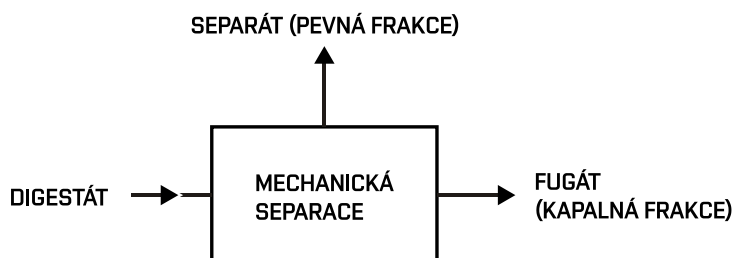
Spalování bioplynu probíhá zpravidla ve spalovacích motorech při souběžné výrobě elektřiny a tepla, jedná se tedy o tzv. **kogeneraci**. Teplo vzniklé spalováním bioplynu je však zpravidla využíváno jen z části, zbytek je **bez užitku vypouštěn do okolí** [3]. Hlavním a často jediným spotřebitelem tepla jsou fermentační nádrže, jejichž tepelný příkon kolísá v závislosti na ročním období, a to mezi 20 a 40 % z celkově dostupného tepla [4]. Rozvody teplé vody jsou proto celoročně připojeny na nouzové chladiče, které zajišťují maření dostatečného množství tepla dle aktuálních potřeb BPS [5].

2.1.2 Produkce digestátu a jeho využití

Ačkoliv nejsou k dispozici přesné statistiky, udává se průměrná roční produkce digestátu v rozmezí 15 až 20 tisíc m³ na 1 MW_{el} instalovaného výkonu v BPS zpracovávajících rostlinnou biomasu [2]. Dosahuje-li současná kapacita BPS v EU 27, Švýcarsku, Chorvatsku a Srbsku celkem 8,3 GW_{el} [6], potom je v těchto zemích ročně produkováno více než 120 mil. m³ digestátu.

Přestože je bez pochyby digestát kvalitním hnojivem, koncentrace hlavních hnojivých látek (N, P, K) je v něm v porovnání s minerálními hnojivy nízká, pohybuje se v řádu několika procent sušiny. Při aplikaci stejného množství živin na plošnou jednotku si digestát vyžádá několikanásobný přejezd aplikační techniky, čímž se zvyšuje časová náročnost, náklady na pohonné hmoty a údržbu strojů, nemluvě o možném poškození půdní struktury [7].

Digestát může být na půdu aplikován přímo, nebo je vhodným způsobem zpracováván a upravován. Základním způsobem zpracování digestátu je jeho **separace na pevnou a kapalnou část (obr. 2)**. Za tímto účelem se používají pásové a šnekové lisy nebo dekantální odstředivky [8]. V kapalně části (tzv. **fugátu**) zůstává většina živin, a to včetně dusíku v nestabilní formě, která je rostlinám dobře přístupná [9]. Fugát má kolem 3 % sušiny a zaujímá většinu původního objemu. Výše uvedené problémy související s velkým množstvím digestátu tak platí i pro jeho kapalnou frakci.



obr. 2: Dělení digestátu na pevnou a kapalnou frakci.

Legislativní pravidla pro nakládání s fermentačními zbytky jsou velice podrobná a přísná. Směřují k minimalizaci jeho svévolného použití. Právní předpisy ČR klasifikují digestát jako organické hnojivo [10] s rychle uvolnitelným dusíkem [11].

2.1.3 Zahušťovací potenciál

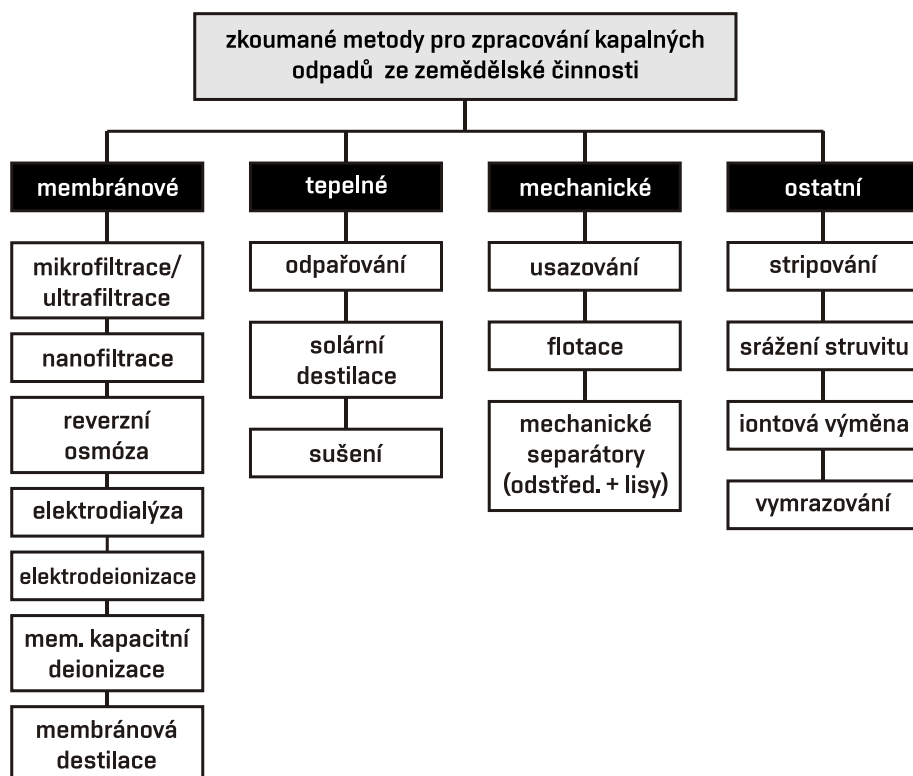
Při předpokládaném celkovém instalovaném výkonu BPS v ČR 403 MW_{el} v roce 2020 [12], **bude v tomto roce vyprodukováno zhruba 6 mil. m³ digestátu**. Uvažujeme-li snahu všech provozovatelů dělit tento digestát na pevnou a kapalnou frakci, průměrný obsah sušiny v digestátu 6 % (objemových), ve fugátu 3 % a schopnost mechanických separátorů oddělit tuhou frakci s 25% obsahem sušiny, pak lze v roce 2020 očekávat produkci cca **5,2 mil. m³ fugátu**.

S využitím vhodné zahušťovací technologie, která by byla schopná produkce koncentráту s 16% podílem sušiny (hranice pumpovatelnosti běžnými čerpadly), lze očekávat redukci objemu fugátu až o 80 % (na 1 mil. m³). **Úspěšné zahuštění fugátu by provozovatelům ušetřilo přes 4 mil. m³ vody ročně a zároveň snížilo objemové požadavky pro nakládání s fugátem na pětinu.**

2.2 POSTUPY PRO ZAHUŠŤOVÁNÍ PROCESNÍCH A ODPADNÍCH VOD

Dizertační práce představila technologické postupy (obr. 3), které přicházejí do úvahy při hledání optimální metody pro zahušťování fermentačních zbytků. V praxi

se lze setkat se spojením dvou a více separačních metod, které dohromady tvoří vhodný systém pro zpracování konkrétní procesní nebo odpadní vody.



obr. 3: Přehled zkoumaných separačních metod.

Při hodnocení separačních metod a volbě konkrétní metody pro další výzkum a vývoj byly mimo jiné zohledňovány požadavky na kvalitu výsledných produktů. Těmi jsou **separovaná voda**, která splňuje požadavky na vypouštění do povrchových vod, a **koncentrát**, který je po zahuštění použitelný jako hnojivo či materiál k jeho výrobě.

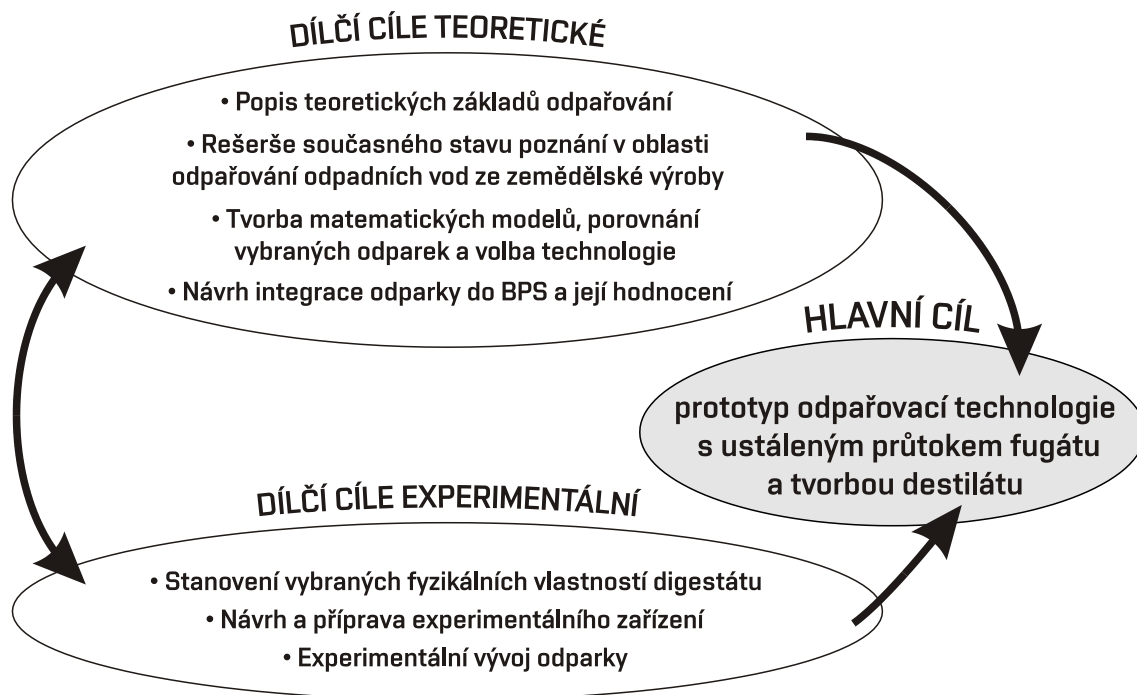
Lze konstatovat, že **žádná z představených separačních metod není schopna samostatně zajistit zahuštění digestátu a zároveň dostát požadavkům na kvalitu výsledných produktů**, tj. separované vody a koncentráту. K tomuto cíli je možné dospět pouze vhodnou kombinací separačních metod.

Při volbě metody nebo kombinace metod, která budou předmětem dalšího výzkumu a vývoje, byla uplatněna kritéria, která autor a spolupracující průmyslový partner považují za klíčová z hlediska komerčního uplatnění v podmínkách ČR. Jsou jimi **jednoduchá konstrukce, provozní spolehlivost a robustnost, využití odpadního tepla, rychlá aplikace a komercializace řešení**. Za cílový segment trhu byla zvolena množina **zemědělských BPS**, jejichž provoz je velkým množstvím digestátu zatížen významně a zpravidla již provozují mechanický separátor. Vstupním materiálem pro vybranou zahušťovací technologii je tedy již částečně předčištěný **fugát**.

Vzhledem k uvedeným požadavkům byla logickou **volba odpařovací technologie**. Ta by měla být schopná fugát zahušťovat bez další předúpravy. Jedná se o časem a mnoha aplikacemi prověřenou metodu, která jako hlavní zdroj energie dokáže upotřebit nízkopotenciální odpadní teplo dostupné v BPS.

3 CÍLE PRÁCE A METODIKA

V rámci dizertační práce byly upřednostňovány cíle, které jsou z pohledu provozuschopnosti zařízení a jeho integrace v BPS maximálně efektivní a účelné. Nebyly proto podrobně zkoumány a popisovány všechny děje a jevy s odpařováním spojené, nebyl vytvořen kompletní teoretický popis zařízení. Místo toho byl kladen důraz na experimentální činnost a řešení vývojových úloh, které se odvíjely od zjištěných provozních nedostatků technologie. **Dílčí cíle** dizertační práce lze rozdělit na teoretické a experimentální, přičemž oba typy výzkumné a vývojové činnosti se navzájem ovlivňovaly a doplňovaly (obr. 4). Teoreticky získané poznatky se promítaly do uspořádání a konstrukce technologie a do plánování experimentů. Prakticky získanými informacemi byly upřesňovány teoretické předpoklady a rozšiřována znalostní základna. Naplnění dílčích cílů bylo předpokladem k dosažení cíle hlavního. **Hlavním cílem** dizertační práce je dospět ve vývoji **odpařovací technologie** do stavu, kdy je **schopná ustáleného průtoku fugátu a kontinuální tvorby destilátu**, při současném využívání nízkopotenciálního odpadního tepla. Tento cíl musí být podepřen ověřenou výpočtovou a znalostníází, na základě které bude možné odpařovací technologii přenést do průmyslového měřítká.



obr. 4: Vztah mezi dílčími cíli a hlavním cílem dizertační práce.

Vědecký základ dizertační práce tvořila posloupnost logicky na sebe navazujících **výzkumných metod**, jejichž cílem bylo ověřit teoretické předpoklady a ze získaných výsledků odvodit odpovídající závěry. Různorodost výzkumných a vývojových činností byla důvodem k uplatnění široké palety výzkumných metod. Převažující metody, které byly charakteristické pro dílčí cíle práce, shrnuje tab. 1.

Dílčí cíl	Výzkumné metody
Popis teoretických základů odpařování a rešerše současného stavu poznání v oblasti odpařování odpadních vod ze zemědělské výroby	analýza, teoretický popis
Tvorba matematických modelů, porovnání vybraných odparek a volba technologie	modelování, komparace
Návrh integrace odparky do BPS a její hodnocení	modelování, analýza
Stanovení vybraných fyzikálních vlastností fugátu	experiment, měření
Návrh a příprava experimentálního zařízení a experimentální vývoj prototypu odparky	experiment, měření, pozorování

tab. 1: Dílčí cíle dizertační práce a převažující výzkumné metody.

4 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE A MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Teoretická část práce zahrnuje teoretický popis základů odpařování, rešerši a srovnání komerčně dostupných odparek pro procesní a odpadní vody, tvorbu matematických modelů pro vybrané typy odpařovacích technologií včetně jejich vyčíslení pro typické provozní podmínky v BPS, zhodnocení a porovnání výsledků, návrh integrace MSF odparky do BPS a její ekonomické zhodnocení.

4.1 POPIS TEORETICKÝCH ZÁKLADŮ ODPAŘOVÁNÍ

Odpařováním se zpravidla rozumí **odstraňování rozpouštědla v podobě páry** z roztoku, suspenze nebo emulze. Odlučovaným rozpouštědlem je nejčastěji voda. Cílem odpařování je obvykle zahuštění netěkavých látek v roztoku, méně pak získání rozpouštědla. Odpařování lze označit za samostatnou **jednotkovou operaci**. Odpařování probíhá v zařízeních zvaných **odparky**. Kromě odpařování lze v rámci technologického celku odparek identifikovat operace **výměny tepla, dopravy tekutin a dělení heterogenní soustavy** pára-kapalina (odlučování kapek). Odpařování zpravidla probíhá jako **kontinuální proces** a hledí se na něj jako na proces **ustálený**. Odpařovací technologie je **heterogenním** systémem.

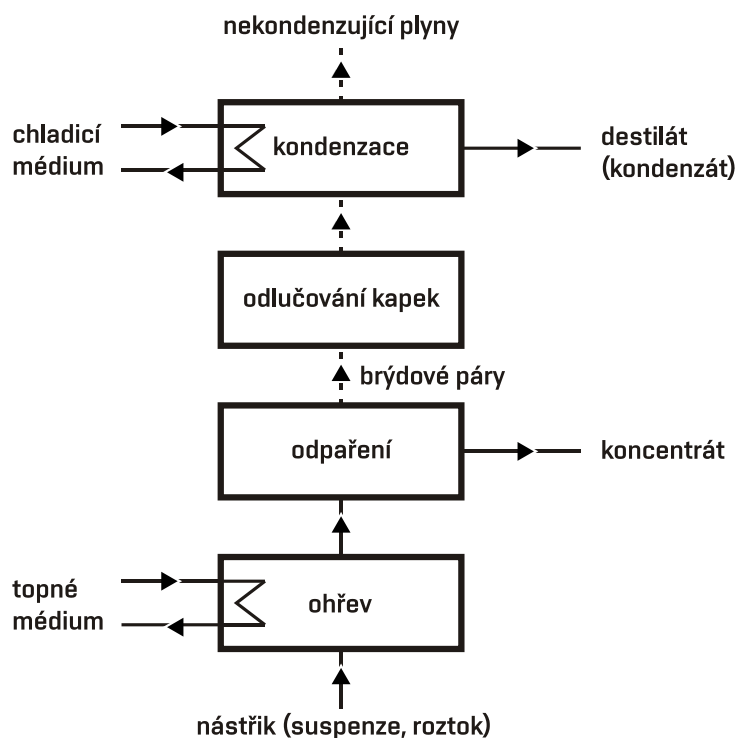
Na vstupu do odparky je kapalný materiál, který má být zahušťován (tzv. **nástřík**), ohřán pomocí **teplonosného média** (vody nebo páry) na teplotu, která je potřebná pro následné **odpařování** rozpouštědla z nástříku. K tomu dochází v **odpařovací komoře** (tělo odparky), jichž může mít odparka jednu a více (vícestupňové odpařování). Odloučené rozpouštědlo v plynné fázi (tzv. **brýdové páry**) je z komory odsáváno přes **odlučovač kapek**, který z proudu tekutiny odstraní drobné kapičky rozpouštědla. Brýdové páry jsou následně ochlazeny chladicím médiem a kondenzují za vzniku **destilátu (kondenzátu)**. Z prostoru kondenzátoru jsou odtahovány **nekondenzující plyny** (vzdušina), které se do systému dostaly vlivem netěsností, anebo byly rozpuštěny v nástříku. Tímto způsobem je rovněž ve vakuových odparkách udržován podtlak. Zbytek nástříku po odpaření se označuje jako **koncentrát** a při vícestupňovém odpařování slouží jako nástřík pro další stupeň. Schematicky je návaznost jednotlivých fází procesu znázorněna na *obr. 5*.

4.2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI ODPAŘOVÁNÍ PROCESNÍCH A ODPADNÍCH VOD

V rámci tohoto dílčího cíle byla důsledně prověřena situace na trhu s průmyslovými odparkami, které jsou komerčně nabízeny pro zahušťování procesních a odpadních vod; a vědecké poznatky v oblasti zahušťování kapalných odpadů ze zemědělské činnosti.

Situace na trhu s průmyslovými odparkami byla monitorována s cílem identifikovat a porovnat běžně používané technologie a vyhodnotit jejich výkonnost. **Rešerše zahrnuje více než 300 modelů odparek odpadních a procesních vod, které jsou v nabídce od 18 lokálních a světových výrobců.** Zpracovaná data

bohužel vycházejí převážně z marketingových materiálů výrobců, nikoliv z reálných provozních podmínek.



obr. 5: Schéma odpařovacího procesu v jednokomorové odpareci.

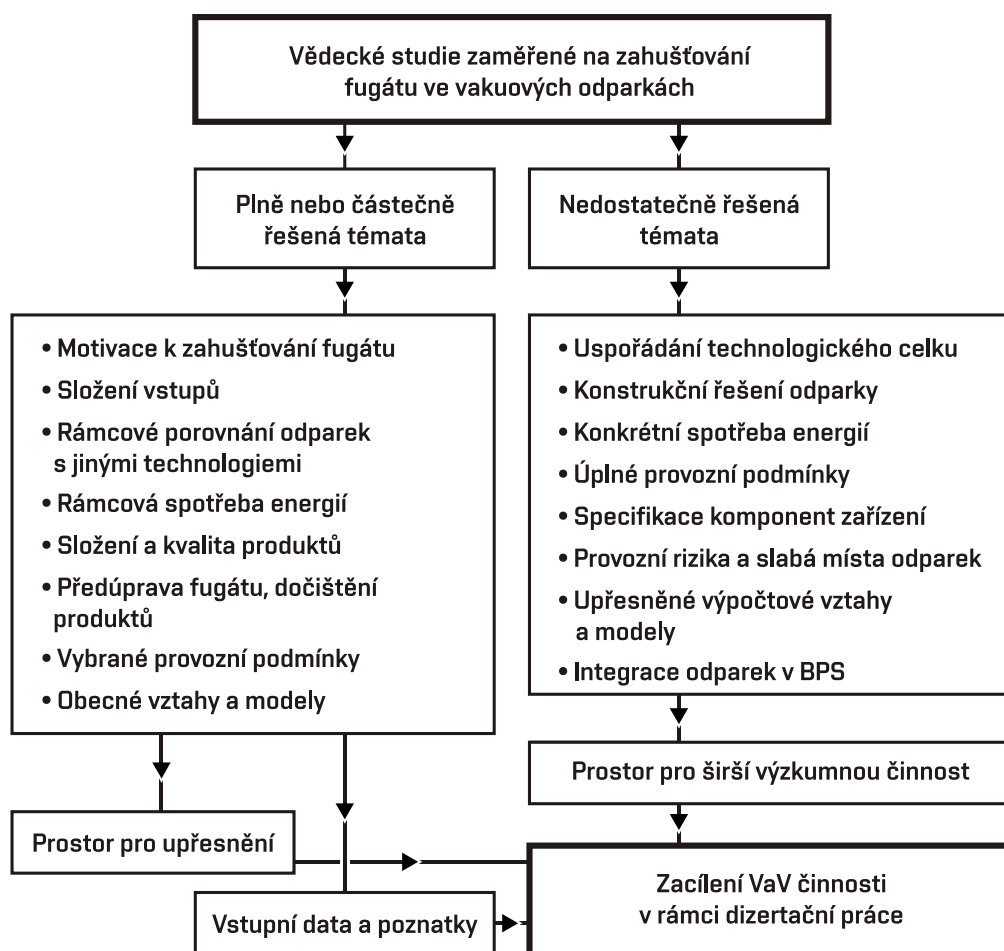
Z výsledků v *tab. 2* lze vyvodit několik závěrů. Energeticky nejefektivnější jsou obecně odparky využívající mechanické komprese páry (MVC). Následovány jsou jednotkami, do kterých je teplo dodáváno tepelným čerpadlem (HP). Energetická náročnost odparek ze zdrojem tepla v podobě horké vody (HV) a vodní páry (VP) klesá s rostoucím počtem stupňů, přičemž hlavní díl spotřeby připadá na energii tepelnou, která se pohybuje v rozmezí 248,5 až 670,9 kWh/m³ kondenzátu. Pakliže je k dispozici odpadní teplo, vychází naopak provoz odparek typu HV a VP nejlépe, neboť spotřeba elektřiny není zvyšována dodatečnými technologiemi, jako v případě MVC a HP. Měrná spotřeba elektřiny při vysokých výkonech a jednostupňovém uspořádání dosahuje až 12,3 kWh/m³ u typu HV a VP. Odparky typu HP a MVC proto nelze obecně k využití v BGP doporučit. Spotřeba elektřiny je u těchto strojů enormní (platí zejména pro typ HP) a jde proti zájmu provozovatelů prodat co největší množství elektrické energie do sítě.

Rešerše vědeckých poznatků byla zaměřena na experimentální výsledky a závěry vědeckých studií, které byly orientovány přímo na odpařování kapalných odpadů ze zemědělství. Na základě provedené rešerše lze konstatovat, že **vakuové odpařování je reálně použitelnou metodou pro zahušťování fugátu z BPS** a za tímto účelem je také již v mnoha provozech využíváno. Dosažení požadované kvality produktů přitom není možné bez předchozí úpravy fugátu (snížení pH) nebo následného zpracování destilátu v dalších technologiích (reverzní osmóza, stripování amoniaku). Přestože dostupné studie jako celek poskytují mnoho zajímavých údajů a závěrů, je jejich přenositelnost do provozního měřítko omezená a poskytuje

provozovatelům BPS pouze obecný informační rámec. Je zřejmé, že **pro posouzení integrace odparky do BPS jsou tyto informace nedostatečné**. Mezery v současném stavu poznání byly podnětem k zacílení výzkumné a vývojové činnosti v rámci předkládané dizertační práce. Schematicky tento vztah ilustruje *obr. 6*.

Zdroj tepla	Počet stupňů	Produkce destilátu [kg/h]	Měrné spotřeba elektřiny [kWh/m ³]	Měrná spotřeba tepla [kWh/m ³]	Celk. měrná spotřeba energií [kWh/m ³]
HP	1	<1000	180,3	0	180,3
HP	1	=>1000	147,5	0	147,5
MVC	1	<1000	86,1	0	86,1
MVC	1	=>1000	37,3	0	37,3
MVC	2-4	=>3000	28,2	0	28,2
HV, VP	1	<1000	26,8	670,9	741,2
HV, VP	1	=>1000	12,3	599,0	685,1
HV, VP	2	<1000	26,2	372,0	398,6
HV, VP	2	=>1000	15,1	360,0	390,0
HV, VP	3	<1000	24,2	251,4	275,0
HV, VP	3	=>1000	15,4	248,5	264,6

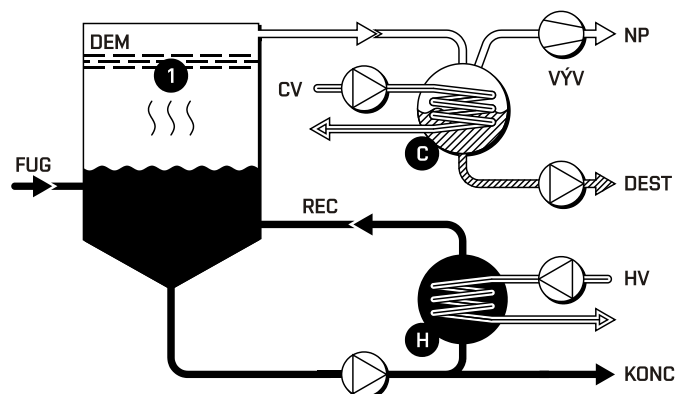
tab. 2: Vybrané parametry odparek pro zahušťování odpadních a procesních vod; měrné spotřeby energií jsou vztaženy na m³ destilátu.



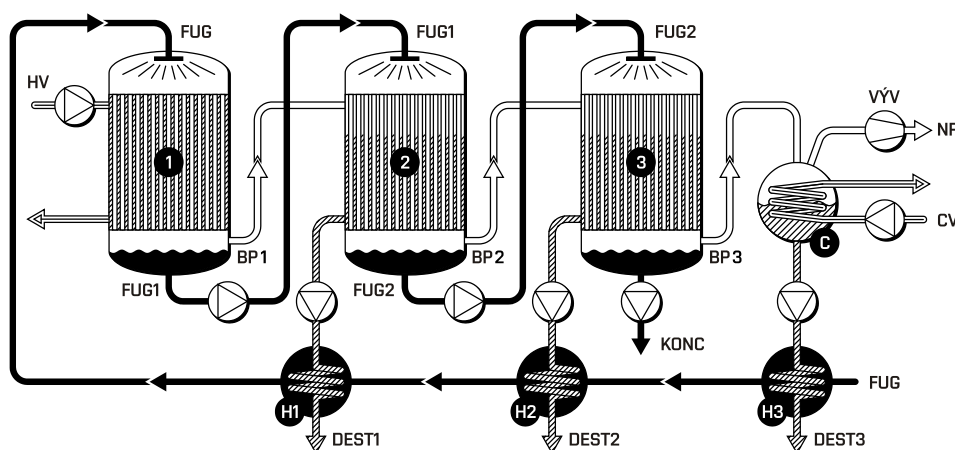
obr. 6: Vliv současného stavu poznání na zacílení dizertační práce.

4.3 TVORBA MATEMATICKÝCH MODELŮ, POROVNÁNÍ ODPAREK A VOLBA TECHNOLOGIE

V rámci tohoto cíle byly sestaveny bilanční matematické modely pro tři vybrané typy průmyslových odparek, které byly zhodnoceny jako vhodné pro zahušťování fugátu. Jedná se o dva typy odparek vhodných pro viskózní kapaliny, a to odparku s **nucenou cirkulací kapaliny** (FCE, obr. 7) a odparku s **padajícím filmem** (FFE, obr. 8). Třetí zkoumanou technologií je **vícetupňová mžiková** odparka (MSF, obr. 9), která není za účelem zpracování odpadních vod běžně používána, ale ve které vidí autor řadu výhod, jež budou dále zmíněny. Veskrze jde o technologie, jejichž uspořádání umožňuje **využití odpadního tepla** v podobě horké vody. Za účelem srovnání vybraných odparek pro zahušťování fugátu byla zvolena vstupní data a okrajové podmínky, které reflektují technické možnosti odparek, fyzikální vlastnosti fugátu a typické provozní podmínky v BPS. Vybrané parametry prezentuje tab. 3.



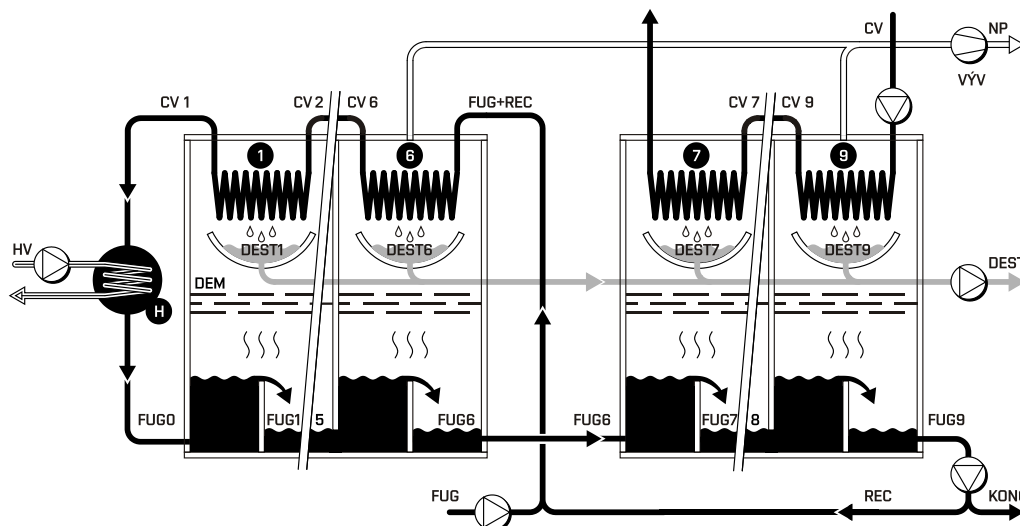
obr. 7: Uspořádání odparky s nucenou cirkulací tak, jak bylo uvažováno v modelu.



obr. 8: Uspořádání 3-stupňové odparky s padajícím filmem tak, jak bylo uvažováno v modelu.

Provozní parametry (výsledky) vybraných odparek pro zvolená vstupní data uvádí tab. 4. Výstupní průtoky destilátu m_{dest} a koncentráty m_{konc} jsou pro všechny tři odparky totožné, jelikož jsou stejné i požadavky na výstupní koncentraci sušiny x_{konc} . Pro dosažení požadované koncentrace ($x_{konc} = 0,12 \text{ kg/kg}$) je u odparek typu FCE a MSF nutná recirkulace kapaliny. V obou případech jsou hodnoty průtoku vysoké

($m_{rec}^{fce} = 21656 \text{ kg/h}$, $m_{rec}^{msf} = 19734 \text{ kg/h}$) a zvyšují nejen investiční náklady (světlost potrubí, rozměry odpařovacích komor, kapacita čerpadel), ale i provozní náklady (spotřeba elektrické energie P_{el}). Toto negativum odpadá u odparky typu FFE, kde k požadovanému zahuštění postačí jeden průtok fugátu odparkou. Spotřebu elektrické energie u FFE ale zvyšuje přečerpávání fugátu za každou komorou, které je nutné pro dopravu kapaliny do horní části odparky. Tlakový spád mezi komorami je pro tento účel nedostatečný. Hodnotu P_{el} u FFE dále zvyšují velké průtoky chladicí (m_{cv}) a ohřevné vody (m_{hv}). Ty jsou způsobeny celkovou energetickou efektivitou daného uspořádání FFE odparky, která je v porovnání s MSF o něco nižší.



obr. 9: Uspořádání 9-stupňové MSF odparky tak, jak byla uvažována v modelu.

max. teplota fugátu T_{fug}^{max}	70	°C	vstupní tepl. chlad. vody T_{cv}^{in}	25	°C
min. teplota fugátu T_{fug}^{min}	40	°C	výst. tepl. chlad. vody T_{cv}^{out}	33	°C
vstupní tepl. fugátu T_{fug}	30	°C	vstupní tepl. horké vody T_{hv}^{in}	90	°C
vstupní konc. sušiny x_{fug}	0,04	-	výst. tepl. horké vody T_{hv}^{out}	75	°C
výstupní konc. sušiny x_{konc}	0,12	-	hmot. průtok fugátu m_{fug}	1500	kg/h

tab. 3: Přehled vybraných vstupních parametrů a okrajových podmínek pro výpočtový model.

Nejvyšší spotřebu tepla (P_{th}) a chladicí vody (m_{cv}) má FCE. Kvůli jednokomorovému uspořádání odparky je rekuperace tepla nulová a téměř celý tepelný příkon zařízení (685 kW) je mařen na kondenzátoru. Tento fakt se projeví i na kapacitě čerpadel a celkové spotřebě elektrické energie (26,4 kW), která je v porovnání s FFE (14,4 kW) a MSF (14,0 kW) největší. Požadavek na teplosměnnou plochu je u FCE (74,5 m²) porovnatelný s MSF (73,3 m²) i FFE (79,9 m²).

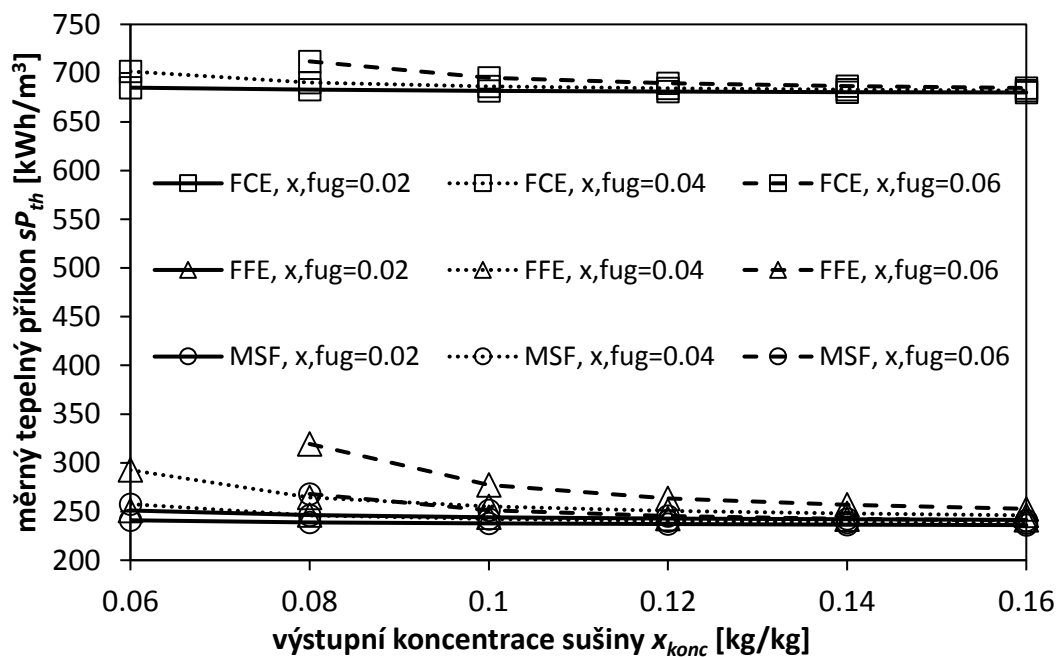
S využitím matematických modelů jednotlivých odparek byly výsledky rozšířeny na různé hodnoty vstupní koncentrace sušiny. Hodnoty koncentrací sušiny ve vstupním a výstupním fugátu lze označit za klíčové z pohledu provozu BPS a rozhodování investorů. Sledován byl vliv koncentrace sušiny na velikost teplosměnné plochy, spotřebu tepla (*graf 1*) a spotřebu elektrické energie (*graf 2*). Pro účely srovnání s jinými studiemi jsou výsledky prezentovány ve formě měrných

hodnot vztažených na m^3 vyrobeného destilátu. Výsledky potvrzují předchozí závěry a pro různé hodnoty x_{fug} a x_{konc} je kvantifikují. S výjimkou teplosměnné plochy u MSF odparky platí, že sledované měrné parametry klesají s rostoucí x_{konc} a klesající x_{fug} (tj. s rostoucí produkcí destilátu). Jedním z důvodů je využití výpočtových konstant, které plně neodpovídají skutečnosti.

		FCE	FFE	MSF
vstupní konc. sušiny x_{fug}	[kg/kg]	0,04	0,04	0,04
vstupní konc. sušiny x_{fug}	[kg/kg]	0,12	0,12	0,12
hmot. průtok fugátu m_{fug}	[kg/h]	1500	1500	1500
hmot. průtok destilátu m_{dest}	[kg/h]	1000	1000	1000
hmot. průtok koncentráту m_{konc}	[kg/h]	500	500	500
hmot. průtok recirkulátu m_{rec}	[kg/h]	21656	0	19734
teplosměnná plocha A	[m^2]	74,5	79,9	73,3
tepelný příkon P_{th}	[kW]	685	277	225
hmot. průtok horké vody m_{hv}	[kg/h]	39358	14412	12904
elektrický příkon P_{el}	[kW]	26,4	14,3	14,0
chladicí výkon CV	[kW]	670	262	225
hmot. průtok chladicí vody m_{cv}	[kg/h]	72093	28166	24237

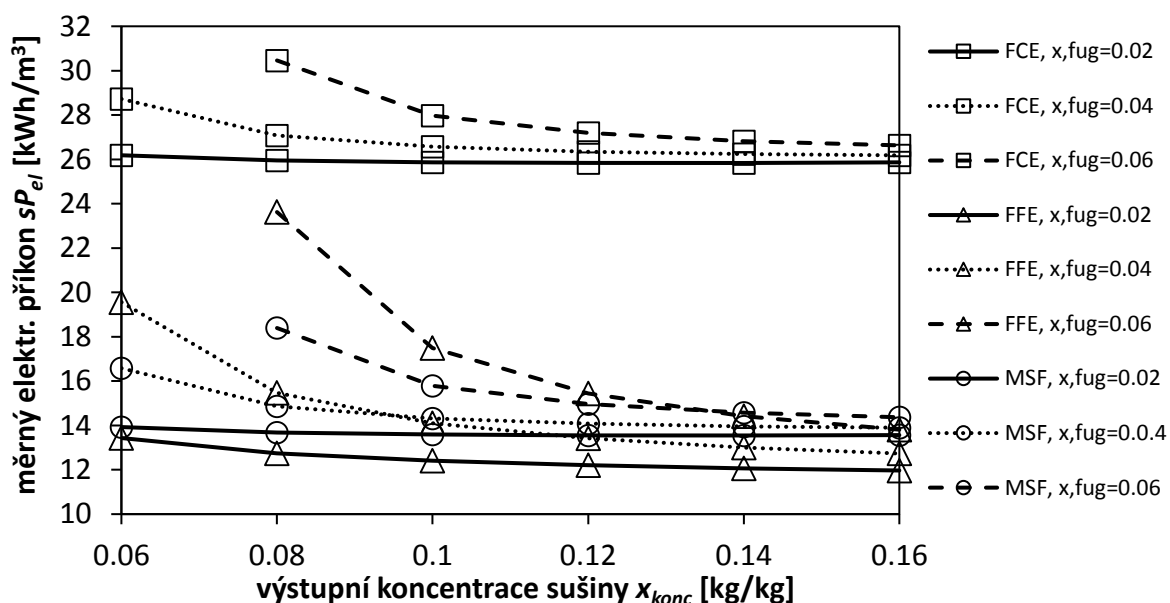
tab. 4: Vypočtené parametry vybraných typů odparek pro stanovená vstupní data.

Vliv koncentrací sušiny na chladicí výkony odparek byl rovněž stanoven. Pro FCE a MSF odparky jsou požadavky na chlazení konstantní, a to 668 kWh/m^3 , respektive 225 kWh/m^3 pro MSF. U FFE chladicí výkon mírně klesá s rostoucí x_{konc} a klesající x_{fug} a pohybuje se mezi 229 a 278 kWh/m^3 .



graf 1: Spotřeba tepla na m^3 vyprodukovaného destilátu jako funkce x_{konc} a x_{fug} .

Výsledky odpovídají jak provedené rešerši komerčních odparek, tak hodnotám, které udávají odborné studie. Srovnávat lze přitom pouze měrné spotřeby elektřiny a tepla. Pro teplosměnnou plochu a chladicí výkon nejsou srovnatelné hodnoty dostupné. Energetické nároky FCE (680 až 712 kWh_{th}/m³, 25,9 až 30,5 kWh_{el}/m³) jsou v souladu s parametry méně účinných jednostupňových odparek uvedených v tab. 2 (671 kWh_{th}/m³, 26.8 kWh_{el}/m³). Parametry FFE (241 – 319 kWh_{th}/m³, 12,0 – 23,6 kWh_{el}/m³) jsou srovnatelné s 3-stupňovými komerčními odparkami (249 – 251 kWh_{th}/m³, 15,4 – 24,2 kWh_{el}/m³). Taktéž výkonnost MSF odparky (236 až 268 kWh_{th}/m³, 13,6 – 18,4 kWh_{el}/m³) je porovnatelná s třístupňovými komerčními odparkami. Nicméně srovnání je v tomto případě problematické, neboť MSF technologie není běžně výrobcí nabízena (pro odpadní vody).



graf 2: Spotřeba elektřiny na m³ vyprodukovaného destilátu jako funkce x_{konc} a x_{fug} .

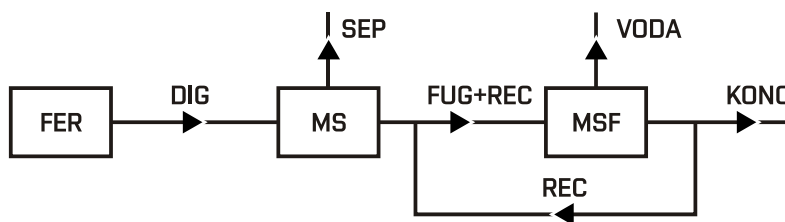
Volba technologie pro další vývoj

Pro experimentální vývoj byla zvolena vícestupňová mžiková odparka (MSF). Mezi důvody, které vedly k volbě tohoto typu odpařovacího zařízení, patří **jednoduchá konstrukce a provozní spolehlivost, nízké požadavky na spotřebu elektrické energie a teplosměnnou plochu, odpařování mimo teplosměnnou plochu, modularita odparky a zkušenosti z předchozích experimentů** [63], které má průmyslový partner se zahušťováním fugátu v MSF odparce a jež naznačily vhodnost technologie pro tento typ odpadních vod.

4.4 NÁVRH INTEGRACE ODPARKY DO BPS A JEJÍ HODNOCENÍ

Integrace odparky v BPS musí dávat v první řadě smysl po technické stránce. Ze zadání je zřejmé, že **odparka bude umístěna za mechanickým separátorem**. Uvažujeme-li využití technologie MSF, která je předmětem výzkumné činnosti, potom je rovněž jasné, že **část koncentráту musí v BPS recirkulovat**. Na jeden průchod není technologie schopná zajistit dostatečné zahuštění fugátu. Možností recirkulace je přitom více a mohou zahrnovat i samotný mechanický separátor.

Varianta, která byla zvolena jako výchozí pro další úvahy a je rovněž součástí matematického modelu, splňuje požadavky na výstupní podíl sušiny, čehož dosahuje recirkulací (REC) části koncentrátu před odparku (obr. 10).



obr. 10: Zvolený způsob umístění MSF odparky do BPS. (FER – fermentor, DIG – digestát, MS – mechanický separátor, SEP – separát, FUG – fugát, KONC – koncentrát, REC – recirkulace)

Druhým nezbytným předpokladem k úspěšnému uplatnění odparek v BPS je **ekonomická opodstatněnost řešení**. Kromě investičních nákladů se integrace MSF odparky finančně dotkne pouze několika málo procesních aparátů a provozních činností, a to nákladů na údržbu odparky a pomocnou chemii, nákladů na přepravu fugátu a příjmů z prodeje fugátu a elektřiny.

Integrace MSF odparky do BPS vykazuje větší potenciál v těch provozech, které jsou nuceny prodávat elektřinu za nižší výkupní ceny. Důvodem je fakt, že rovněž finanční ztráty způsobené začleněním nového elektrického spotřebiče jsou v těchto BPS nižší. Ještě výraznější vliv na rentabilitu investice má přepravní vzdálenost. Pozitivní vliv na ekonomické hodnocení integrace odparky do BPS má rovněž rostoucí kapacita BPS a výstupní koncentrace sušiny. Proti integraci působí rostoucí ceny použitých chemikálií a výkupních tarifů a rostoucí spotřeba elektřiny. Obecně lze konstatovat, že **integrace odpařovací technologie není řešením pro každou BPS** a její ekonomický přínos je třeba posuzovat individuálně.

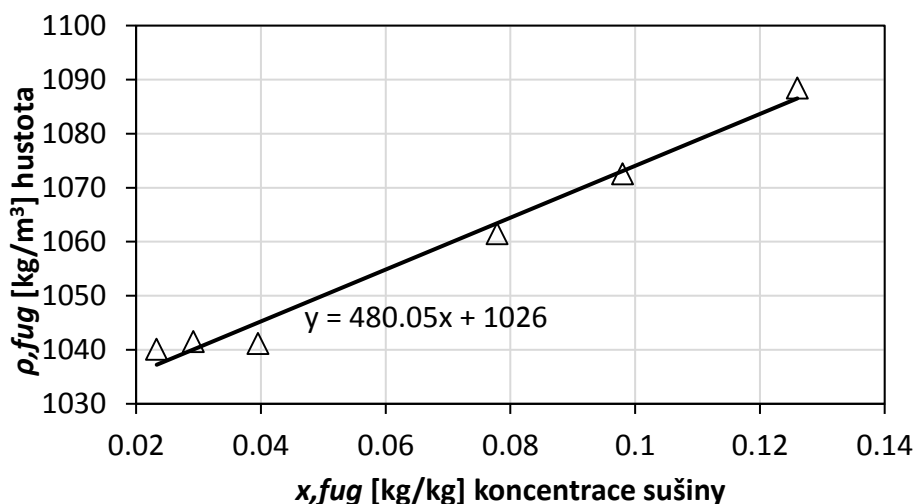
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE A PŘEDSTAVENÍ PROTOTYPU MSF ODPARKY

Experimentální činnost byla nosným prvkem dizertační práce a poskytla mnoho cenných informací a zkušeností. Zahrnovala vývoj dvou prototypů vícestupňové mžikové odparky a měření vybraných fyzikálních vlastností fugátu. Potřebné experimentální zázemí poskytlo regionální výzkumné a vývojové centrum NETME Centre při Fakultě strojího inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Práce na vývoji MSF jednotky probíhala převážně v prostorách Laboratoře energeticky náročných procesů (LENP).

5.1 STANOVENÍ VYBRANÝCH FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ FUGÁTU

Přestože je fugát z velké většiny tvořen vodou a jeho vlastnosti jsou tímto rozpouštědlem výrazně ovlivněny, je jejich upřesnění žádoucí. Problémem fugátu je jeho **nestálé složení**, které je **závislé na skladbě substrátu** vstupujícího do fermentačního procesu a v každé BPS je v podstatě jiné. **Rozdílné** jsou potom i **fyzikální vlastnosti fugátu**, jež jsou projevem jeho chemického složení. Experimentální ověřování **hustoty**, **viskozity** a **pěnivosti** fugátu mělo zejména orientační charakter s cílem získat upřesněné (nikoli přesné) výsledky, které budou dostatečné pro vývojovou činnost.

Pro účely dizertační práce byla **hustota** měřena při pokojové teplotě (cca 20 °C) a sledovala pouze závislost na obsahu sušiny. Z výsledků, které shrnuje *graf 3*, je zřejmé, že hustota fugátu je o něco větší než hustota čisté vody a stoupá s rostoucí koncentrací sušiny.



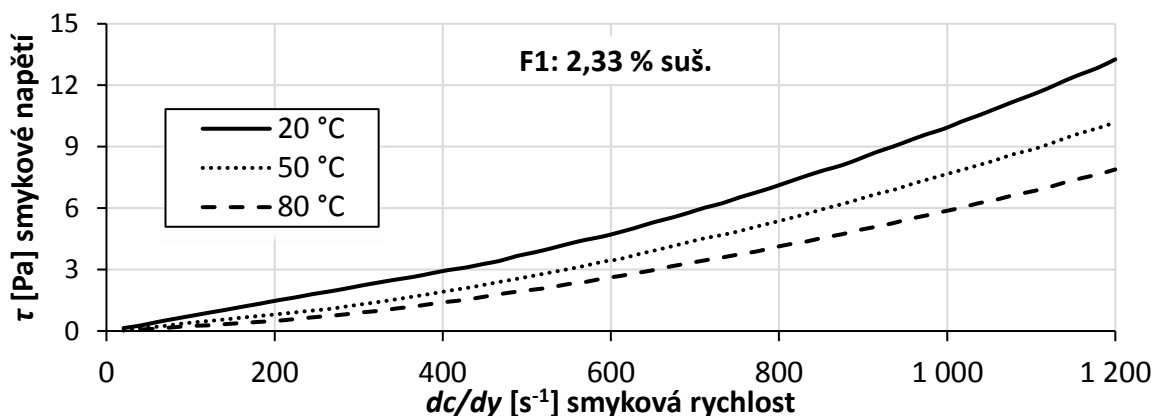
graf 3: Hustota fugátu v závislosti na obsahu sušiny.

Měření **viskozity** fugátu probíhalo v rámci bakalářské práce [15] na rotačním reometru Anton Paar Rheolab QC, se systémem dvou souosých válců. Analyzován byl vliv teploty a sušiny vzorků. Experimenty potvrdily nenewtonský charakter fugátu. Z grafů je zřejmý převládající **nelineární průběh tokových křivek**, ačkoliv při vyšší koncentraci sušiny je tento trend méně výrazný. Lze potvrdit předpoklad, že

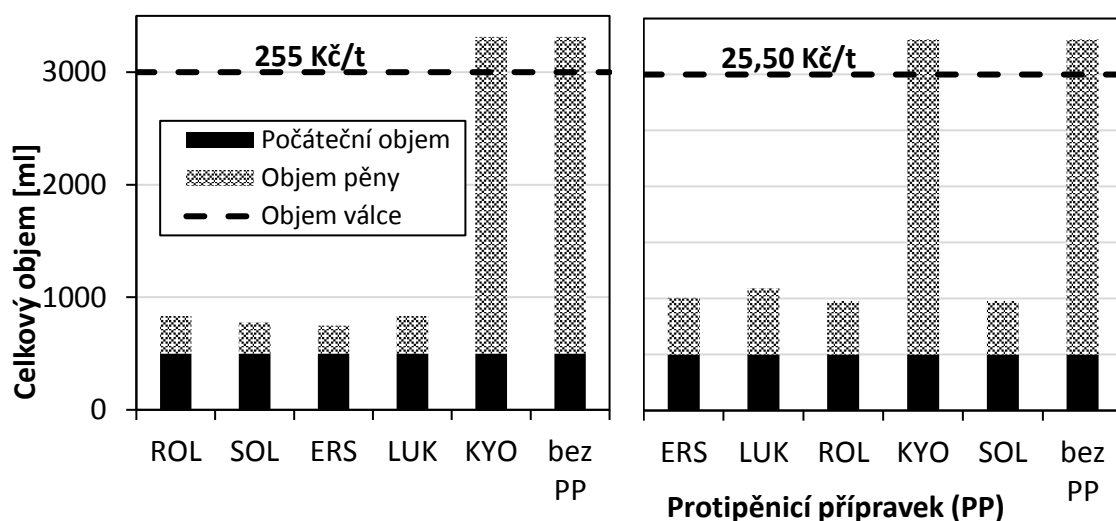
s rostoucí koncentrací sušiny roste zdánlivá viskozita fugátu. Důvodem je přítomnost většího množství dispergovaných částic, které zvyšují tření uvnitř suspenze. Dle očekávání klesá zdánlivá viskozita fugátu s teplotou a je minimálně o řád vyšší než dynamická viskozita čisté vody. Z průběhu tokových křivek lze vyvodit, že při nižších koncentracích sušiny (2,33 %, 3,96 %) má fugát lehce **dilatantní** charakter a viskozita roste se smykovou rychlostí (*graf 4*).

Náchylnost k **pěnění** je jednou ze specifických vlastností fugátu (digestátu), která má zásadní dopady na jeho zahušťování ve vakuových odparekách. V rámci experimentálního měření bylo zjišťováno, jaký **vliv** na pěnění má **koncentrace sušiny**, **stáří fugátu** a použití **protipěnicích přípravků**. Výsledky naznačují **snížování pěnivosti s rostoucí koncentrací sušiny**. Vliv stáří fugátu na jeho pěnivost nebyl prokázán.

Pro zahušťování fugátu v MSF odparce lze doporučit použití některého ze silikonových odpěňovačů nebo rostlinných olejů, s jejichž použitím bylo spojeno **výrazné snížení pěnivosti** (*graf 5*). Čistě přírodní původ olejů je v tomto směru jistou výhodou směrem k možnému dopadu použitých látek na životní prostředí. Otázkou částečně zůstává účinnost protipěnicích přípravků při kontinuálním provozu odparek.



graf 4: Reogram vzorku fugátu s koncentrací sušiny 2,33 %.



graf 5: Pěnivost fugátu s obsahem sušiny 7,1 % při ceně dávky protipěnicího přípravku 255 Kč/t (vlevo) a 25,50 Kč na tunu fugátu (vpravo). (ROL – řepkový olej, SOL – slunečnicový olej, ERS – Erbsloh Schaum-ex, LUK – Lukosan P2, KYO – kyselina olejová)

5.1 EXPERIMENTÁLNÍ VÝVOJ ODPARKY

Vývoj prototypu MSF odparky pro zahušťování fugátu z BPS lze rozdělit do tří vývojových etap. Jednotlivé etapy (obr. 11) jsou ohraničeny významnými zásahy do konstrukce odparky, které se vyznačovaly časovou náročností a podstatným posunem ve smyslu funkčnosti a provozuschopnosti technologie. **Úvodní etapu** lze charakterizovat jako prvotní seznámení se s technologií, které bylo doprovázeno množstvím nezdarů a fakticky nedošlo k plnému zprovoznění odparky. Důvodem byly především mnohé konstrukční nedokonalosti, které vyšly najevo až během úvodních testů.

Pokroku ve výkonnosti odparky bylo dosaženo až zásadními konstrukčními úpravami, které si vyžádaly převoz jednotky do dílen externího dodavatele. Ve **druhé etapě** bylo dosaženo významného pokroku. Odparka byla plně funkční při zahušťování sladké a slané vody, přičemž vysoká byla i dosažená kvalita destilátu. Proces bylo možné důkladně studovat díky nově instalovanému měřicímu systému a použití transparentních prvků. Přesto tyto změny nebyly dostatečné pro úspěšné zahušťování fugátu. K tomuto využití nebyla stávající konstrukce MSF jednotky vyhovující.

1. etapa

Nástřik a úspěšnost: sladká voda (X)

Exp. jednotka: MSF, nerezová, 2 moduly, 8 komor

Hlavní nedostatky: uspořádání ejektorů, svarové netěsnosti, tepelné ztráty, absence měřicí techniky, odtah koncentráту a destilátu

Výsledky: podtlak (až -0,92 barg), průtok koncentráту (0,5 m³/h), odpařování v 1. modulu, nulový průtok destilátu



2. etapa

Nástřik a úspěšnost: sladká voda (OK), slaná voda (OK), fugát (X)

Exp. jednotka: MSF s úpravami, nerezová, 2 moduly, 8 komor, měřicí systém, transparentní prvky

Hlavní nedostatky: odtah koncentráту (čerpadlo), pění fugátu, nevhodná geometrie odpařovacích komor

Výsledky: podtlak (až -0,96 barg), průtok koncentráту (až 2,5 m³/h), tvorba destilátu (až 79 l/h, 2 ppm), nefunkční pro fugát



3. etapa

Nástřik a úspěšnost: sladká voda (OK), slaná voda (OK), fugát (OK)

Exp. jednotka: transparentní MSF, plastová, 1 modul, 3 komory, měřicí systém

Hlavní nedostatky: deformace konstrukce vlivem podtlaku, kapacita ejektorů, znečištění destilátu amoniakem

Výsledky: podtlak (až -0,92 barg), ustálený průtok koncentráту (voda 2,5 m³/h, fugát 0,5 m³/h), tvorba destilátu (voda 80 l/h, fugát 10 l/h)

Poznámka: OK - funkční, X - nefunkční

obr. 11: Shrnutí nejdůležitějších faktů ze 3 etap vývoje MSF odparky.

Bylo proto rozhodnuto o výrobě nového prototypu MSF odparky, který byl svojí geometrií způsobilý pro zpracování intenzivně pěnicího fugátu. Sestavení a zprovoznění nové jednotky bylo úspěšně dosaženo v rámci **třetí etapy**. K hlubšímu pochopení probíhajících dějů přispělo mimo jiné použití transparentních materiálů, které umožnily přímé pozorování odpařovacího procesu. Třetí vývojovou etapu odpařovací technologie lze považovat za **mimořádně úspěšnou**. V rámci této etapy bylo provedeno celkem 6 rozsáhlých experimentů s fugátem. Vůbec poprvé bylo **dosaženo ustáleného průtoku fugátu** MSF odparkou, k čemuž výrazně přispěla konstrukce nové prototypové jednotky, uspořádání systému pro odtah nekondenzujících plynů a použití řepkového oleje jako účinného protipěnicího přípravku. Za běžnou hodnotu průtoku fugátu lze považovat rozmezí **0,4 až 0,5 m³/h**. Ustálený chod odparky byl doprovázen **stabilní tvorbou destilátu bez přítomnosti pevných částic**, která se vytrvale pohybovala mezi **5 až 10 kg/h**. Současný stav technologie je výsledkem množství úprav a změn, kterými MSF odparka v rámci vývojové etapy prošla. Došlo tedy k naplnění hlavního cíle dizertační práce.

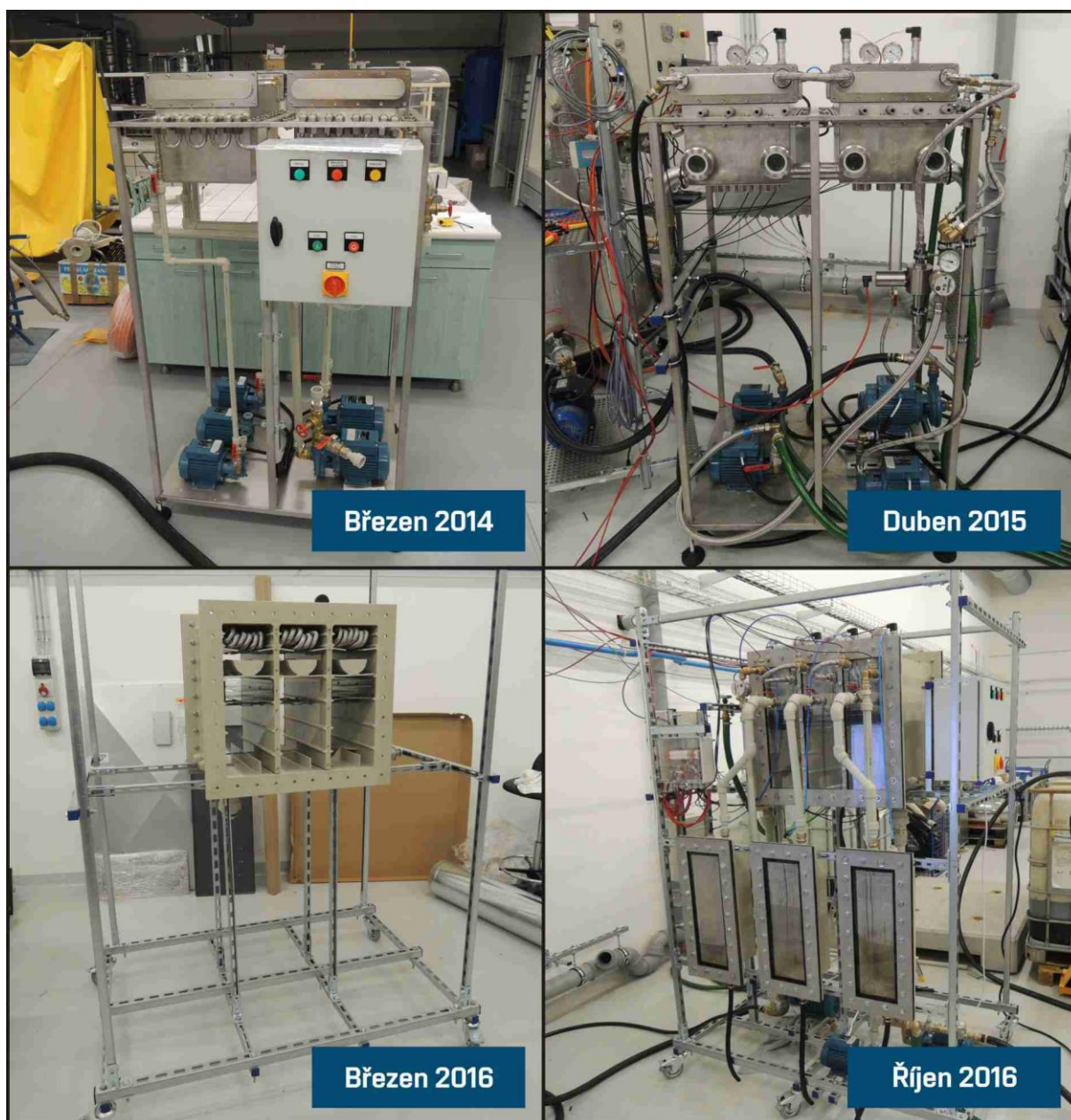
Hlavním identifikovaným **nedostatkem** je v současnosti **kvalita destilátu**, která bude hlavním předmětem budoucí výzkumné činnosti. Problémem je zejména znečištění amoniakálním dusíkem (NH₄-N). Provedené experimenty naznačovaly jeho přítomnost v rozsahu **9 400 až 31 000 mg/l**. V porovnání s jinými studiemi (2 776 mg/kg [3], 3 730 mg/kg [16]) se jedná o poměrně vysoké hodnoty, které ale mají opodstatnění ve vyšším pH a koncentraci amoniakálního dusíku ve vstupním fugátu.

Srovnání energetických nároků prototypu s jinými studiemi je problematické. Spotřeba elektřiny a tepla v prototypu nebyla dosud předmětem podrobného výzkumu, neboť vypovídající schopnost měření by byla velice malá. Měrná spotřeba elektrické energie se nacházela v rozmezí 170 až 500 kWh/m³. Důvodem takto vysoké spotřeby byla nízká účinnost odpaření vycházející z experimentálního charakteru zařízení (pouze 3 komory) a neplnohodnotných provozních podmínek (teplotní spád jen 8 – 10 °C). Druhým důvodem byl pěněním omezený průtok fugátu (0,3 až 0,7 m³/h), který se pohyboval výrazně pod přepravní kapacitou čerpadla koncentráту a neodpovídal dosahovanému příkonu. Lze předpokládat, že hodnota **tepelného příkonu** je rovna hodnotě chladicího výkonu. Měrný chladicí výkon se při testech s fugátem nacházel na úrovni 620 kWh/m³.

Součástí vývojové činnosti bylo systematické budování a zdokonalování experimentálního zázemí, bez něhož by hlavního cíle práce nemohlo být dosaženo. Pokrok ve vývoji experimentální MSF odparky je dobře patrný z *obr. 12*.

6 ZÁVĚR A BUDOUCÍ PRÁCE

Cílem výzkumné činnosti popsané v této dizertační práci bylo řešení některých problémů spojených s provozem bioplynových stanic (BPS). Konkrétně se jedná o nedostatečné využívání odpadního tepla ze spalování bioplynu a nákladné zpracování fermentačních zbytků, které vznikají ve velkých objemech. Další motivací k výzkumu a vývoji v této oblasti jsou environmentální souvislosti tvorby a následného využití fermentačních zbytků, které se promítají do přísných legislativních požadavků.



obr. 12: Vývoj prototypu MSF jednotky v čase. Původní 8-komorová nerezová odparka (nahore) byla nahrazena třístupňovou transparentní jednotkou s plastovým korpusem (dole).

Na základě rešerše separačních metod a důkladné analýzy a srovnání vhodných metod a postupů byla k dalšímu výzkumu vybrána technologie vakuového odpařování. V popisné části práce byly představeny teoretické základy odpařování

v rozsahu nezbytném pro následný experimentální vývoj vybrané odpařovací technologie. Dále byla důkladně zmapována a zhodnocena situace na trhu s odparkami pro zahušťování odpadních a procesních vod. Lze konstatovat, že pro uplatnění v BPS jsou vhodnější odpařovací technologie, jejichž elektrická spotřeba není zvyšována dodatečnými technologiemi typu mechanické komprese páry nebo tepelného čerpadla.

Vybrané typy odparek byly podrobeny důkladnějšímu rozboru. Spolu s popisem základních principů jejich činnosti byly představeny výpočtové modely, na základě kterých lze zhodnotit energetickou a částečně i investiční náročnost těchto technologií. Jako energeticky nejméně efektivní byla zhodnocena jednostupňová odparka s nucenou cirkulací ($680 - 712 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $25,9 - 30,5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$). Výrazně nižší energetické náročnosti dosáhly třístupňová odparka s padajícím filmem ($241 - 319 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $12,0 - 23,6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$) a devítistupňová mžiková odparka ($236 - 268 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $13,6 - 18,4 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$). Pro vývojovou činnost, která je jádrem disertační práce, byla zvolena vícestupňová mžikové odparka (MSF). Mezi hlavní důvody této volby patřily nízké požadavky na teplosměnnou plochu, dobré provozní zkušenosti v oblasti odsolování, jednoduchá konstrukce, modularita a odpařování mimo teplosměnnou plochu.

Nosnou částí práce byla experimentální činnost. Analýza fugátu odhalila jeho newtonský charakter a potvrdila, že viskozita fugátu roste s obsahem sušiny. Stejná závislost byla pozorována u hustoty. Zkoumána byla rovněž pěnivost fugátu.

Hlavním cílem práce bylo dotažení vývoje experimentální MSF odparky do stavu, kdy bude schopná ustáleného průtoku fugátu a kontinuální tvorby destilátu. Tohoto cíle bylo dosaženo s druhou generací prototypu MSF odparky. Naplnění cíle předcházela systematická vývojová činnost, která zahrnovala opakovanou realizaci experimentů a úpravu prototypové odparky. V kombinaci s protipěnicím přípravkem (řepkový olej) bylo dosaženo ustáleného průtoku fugátu ($0,4 - 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$) a kontinuální tvorby destilátu ($5 - 10 \text{ kg/h}$).

Hlavní slabinou odparky v současném stavu je znečištění destilátu amoniakálním dusíkem. Mezi vhodná opatření, která budou v další fázi vývoje zkoumána, patří dočištění destilátu pomocí reverzní osmózy nebo stripování, případně předúprava fugátu formou snížení pH. Navazující výzkumná a vývojová činnost bude probíhat v rámci programu na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje TAČR Epsilon. Je plánováno rozšíření experimentální základny o nový systém ohřevu, který umožní kontinuální testy s plnohodnotnou recirkulací koncentráту. Konstrukce odparky bude vylepšena o nerezové prvky a přesnější regulační ventily. Mezi další úkoly patří upřesnění matematických modelů, stanovení skutečné energetické náročnosti procesu, doplnění znalostí o fyzikálních vlastnostech fugátu a komplexní technicko-ekonomické hodnocení integrace odparky v BPS. Hlavním cílem budoucích prací je instalace pilotní zahušťovací jednotky v BPS.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MARADA, P., V. VEČEŘOVÁ, L. KAMARÁD, P. DUNDÁLKOVÁ a J. MAREČEK. *Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem*. Uplatněná certifikovaná metodika. [online]. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2008. Dostupné z: eagri.cz/public/web/file/32326/ETAPA_IV_Metodika_digestt_FV.pdf
- [2] ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. *Strategická výzkumná agenda oboru bioplyn* [online]. Czech Biogas Association. 2014. Dostupné z: www.czba.cz/files/ceska-biopllynovaasociace/uploads/files/SVA_CzBA_2014_FINAL.pdf
- [3] GUERCINI, S., G. CASTELLI a C. RUMOR. Vacuum evaporation treatment of digestate: full exploitation of cogeneration heat to process the whole digestate production. *Water Science & Technology* [online]. 2014, 70(3), 479–485. ISSN 02731223. DOI:10.2166/wst.2014.247
- [4] RUTZ, D., R. JANSSEN a R. MERGNER. *Sustainable Heat Use of Biogas Plants: a Handbook*. München: WIP Renewable Energies, 2012. ISBN 978-3-936338-29-4.
- [5] CZ BIOM. *Průvodce výrobou a využitím bioplynu* [online]. Praha: CZ Biom - České sdružení pro biomasu, 2009. Dostupné z: www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Pruvodce_vyrobou_vyuzitim_bioplynu_2.pdf
- [6] EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. Number of biogas plants and total installed capacity in Europe 2010-2014 [online]. 2015 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: european-biogas.eu/wp-content/uploads/2016/01/Graph-3-Evolution-biogas.png
- [7] ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. *Strategická výzkumná agenda oboru bioplyn* [online]. Česká bioplynová asociace. Duben 2010. Dostupné z: www.czechinvest.org/data/files/strategicka-vyzkumna-agenda-3848-cz.pdf
- [8] HJORTH, M., K. V. CHRISTENSEN, M. L. CHRISTENSEN a S. G. SOMMER. Solid—liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* [online]. 2009, 30(1), 153–180. ISSN 1774-0746, 1773-0155. DOI:10.1051/agro/2009010
- [9] KOLÁŘ, L., V. VANĚK a S. KUŽEL. Využití odpadů z bioplynových stanic. *Biom.cz* [online]. 2010, 12(7). ISSN 1801-2655. Dostupné z: biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadu-z-biopllynovych-stanic
- [10] ČR. Vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, v platném znění
- [11] ČR. Nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu

- [12] ČR, MPO. *Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů* [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu. Prosinec 2015. Dostupné z: www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/obnovitelne-zdroje/narodni-akcni-plan-pro-obnovitelne-zdroje-energie--169894/
- [13] ČR. Nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech
- [14] DROSG, B., W. FUCHS, T. AL SEADI, M. MADSEN a B. LINKE. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* [online]. IEA Bioenergy, 2015. ISBN 978-1-910154-16-8. Dostupné z: www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web1.pdf
- [15] REBEJ, Miroslav. *Měření vybraných fyzikálních vlastností odpadních vod z bioplynových stanic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Mgr. Marek Vondra.
- [16] CHIUMENTI, A., F. DA BORSO, R. CHIUMENTI, F. TERI a P. SEGANTIN. Treatment of digestate from a co-digestion biogas plant by means of vacuum evaporation: Tests for process optimization and environmental sustainability. *Waste Management* [online]. 2013, 33(6), 1339–1344. ISSN 0956-053X. DOI:10.1016/j.wasman.2013.02.023

ŽIVOTOPIS

Osobní informace

Příjmení, jméno	Vondra, Marek
Datum narození	12. října 1985
Místo narození	Brno
Trvalé bydliště	Klímova 15, Brno

Kontakt

Telefon	+420 776 079 515
E-mail	mva@email.cz

Odborné vzdělání

2013–dosud	Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, doktorské studium, obor Konstrukční a procesní inženýrství
2011–2013	Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, navazující magisterské studium, obor Procesní inženýrství
2008–2011	Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, bakalářské studium, obor Strojní inženýrství
2005–2010	Právnická fakulta, Masarykova univerzita v Brně, magisterské studium, obor Právo a právní věda

Pracovní zkušenosti

2013–dosud	Ústav procesního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně <i>Technický pracovník</i>
2011–2013	Trainee v oddělení Business Development, Siemens s.r.o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery, obor strojní výroba (parní trubíny)

Zahraniční stáže

04–05 2015	Dresden University of Technology, Institute of Power Engineering, Chair for Combustion, Heat and Mass Transfer
------------	--

Znalosti a dovednosti

Jazykové znalosti

anglický jazyk aktivně

Počítačová gramotnost

Kancelářské aplikace: MS Excel, MS Word, MS PowerPoint, web, e-mail

CAD systémy: AutoCAD, SolidWorks

Výpočetní programy: Maple, Mathcad, Minitab

Grafické nástroje: CorelDRAW

Programování: VBA, Python (základy)

Právní systémy: ASPI

Pedagogické zkušenosti

2013–dosud vedení závěrečných prací (bakalářských, diplomových)

2015–dosud vedení vybraných přednášek a cvičení předmětu Procesy, energetika a legislativa

2014 vedení vybraných přednášek a cvičení předmětu Bezpečnostní inženýrství

Další dovednosti

Řidičský průkaz sk. B

Odborná způsobilost v elektrotechnice dle vyhlášky č. 50/78 Sb. §6/11

Zájmy

Sport, sci-fi, kosmologie, vaření, rodina, přátelé

PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY

Články v časopise s impakt faktorem

(článek je v 2. kole recenzního řízení)

VONDRA, M.; MÁŠA, V.; BOBÁK, P. The Energy Performance of Vacuum Evaporators for Liquid Digestate Treatment in Biogas Plants. *Energy*. ISSN: 0360-5442

MÁŠA V., BOBÁK P., VONDRA M., Potential of Gas Microturbines for Integration in Commercial Laundries. *Operational Research*, in press, ISSN: 1109-2858, DOI: 10.1007/s13251-016-0263-8.

Články v recenzovaném časopise

VONDRA, M.; MÁŠA, V.; BOBÁK, P. The Potential for Digestate Thickening in Biogas Plants and Evaluation of Possible Evaporation Methods. In *Proceedings of the 19th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2016)*. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: Aidic Servizi Srl, 2016. s. 787-792. ISBN: 978-88-95608-42- 6. ISSN: 2283-9216.

VONDRA, M.; BOBÁK, P.; MÁŠA, V. Využití odpadního tepla k úpravě odpadních vod z průmyslových procesů. *Vodohospodářské technicko- ekonomické informace*, 2015, č. 6/ 2015, s. 35-43. ISSN: 0322- 8916.

VONDRA, M.; BOBÁK, P. Test Rig Development for Up-to-Date Experimental Study of Multi- Stage Flash Distillation Process. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. Paříž: World Academy of Science, Engineering and Technology, 2015. s. 2398-2398. ISSN: 1307- 6892.

MÁŠA, V.; VONDRA, M. Operational Problems: Biomass Boilers with Oversized Output. In *Proceedings of the 18th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2015)*. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: Aidic Servizi Srl, 2015. s. 331-336. ISBN: 978-88-95608-36- 5. ISSN: 2283- 9216.

KUBA, P.; BOBÁK, P.; MÁŠA, V.; VONDRA, M. Acquisition of Operational Data in Industrial Laundry Facilities. In *Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2014)*. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milan, Italy: Aidic Servizi S.r.l., 2014. s. 1645-1650. ISBN: 978-88-95608-30-3. ISSN: 2283- 9216.

ABSTRACT

This dissertation thesis deals with the development of technology which could tackle two major issues related to biogas plants. These issues concern the insufficient use of waste heat from biogas combustion and its subsequent processing. It also concerns the use of the fermentation residues which are formed in large quantities and whose use is restricted by law. Based on a literary search of separation methods, a vacuum evaporator was selected as the most suitable technology. Its advantages include its simple construction, operational reliability and robustness, low costs of thickening medium pre-treatment, potential for a quick commercial application and, especially, the chance to use a low-potential waste heat. A primary purpose of this technological unit is the reduction in the volume of fermentation residues. Other benefits include the efficient use of waste heat from a biogas plant, which would otherwise be wasted.

Evaporators with a low consumption of electrical energy (which is a main product of a biogas plant) seem to be the best option for applications in the biogas plants. Three of these technologies were subjected to a more thorough analysis, which included the development of computational models and their quantification for conditions in a sample biogas plant. A one-stage evaporator with a forced circulation ($680 - 712 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $25.9 - 30.5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$) was evaluated as the least suitable option in terms of energy demands. The energy intensity of a three-stage evaporator with a falling film ($241 - 319 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $12.0 - 23.6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$) and a nine-stage flash evaporator ($236 - 268 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $13.6 - 18.4 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$) is significantly lower. A multi-stage flash evaporator (MSF) was then chosen for development and will form the central focus of this thesis. The reasons for the choice are as follows: the low requirements on the heat transfer surface, good operational experience in the field of desalination, its simple construction, modularity and evaporation outside the heat transfer surface. A thorough technical-economic evaluation was also performed on the integration of the evaporator into the biogas plant.

The main part of the work included the experimental development of a MSF evaporator prototype. The main objective of this development was to achieve a stable flow rate of the thickening liquid digestate fraction and the continuous formation of the distillate. This was not an easy objective to achieve, especially due to the properties of the liquid digestate, which has a non-newtonian characteristic and increased density and viscosity compared to water. The tendency of the liquid digestate to form foam was also the subject of analysis. The development of the evaporator and first successful operational test are described in the thesis in detail. This required the use of an anti-foaming product. A fully-developed prototype of the MSF evaporator allowed us to achieve continuous operation with a distillate production, reaching from 5 to 10 kg/h at a liquid digestate flow rate of $0.4\text{--}0.5 \text{ m}^3/\text{h}$. The main drawback of this technology is the pollution of the distillate with ammonia nitrogen, and it is for this reason that the basic procedures of its subsequent elimination was selected for further analysis.

ABSTRAKT

Cílem dizertační práce je vývoj technologie, která má přispět k řešení dvou zásadních problémů spojených s provozem bioplynových stanic (BPS). Konkrétně se jedná o nedostatečné využívání odpadního tepla ze spalování bioplynu a nákladné zpracování a využívání fermentačních zbytků, které vznikají ve velkých objemech a jsou svázány řadou legislativních omezení. Na základě rešerše dostupných separačních metod byla jako vhodná technologie zvolena vakuová odparka, mezi jejíž výhody patří jednoduchá konstrukce klíčových zařízení, provozní spolehlivost a robustnost, nízké nároky na předúpravu zahušťovaného média, potenciál k rychlému komerčnímu uplatnění a zejména pak schopnost využít nízkopotenciální odpadní teplo. Primárním účelem této technologické jednotky je redukce objemu fermentačních zbytků. Dalším přínosem jejího provozu je efektivní využívání odpadního tepla z BPS, které by jinak zůstalo nevyužito.

Jako vhodné pro uplatnění v BPS byly identifikovány odparky s nízkou spotřebou elektrické energie, která je hlavním produktem BPS. Tři z těchto technologií byly předmětem důkladnějšího rozboru zahrnujícího tvorbu výpočtových modelů a jejich vyčíslení pro podmínky vzorové BPS. Jako energeticky nejméně efektivní byla zhodnocena jednostupňová odparka s nucenou cirkulací ($680 - 712 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $25,9 - 30,5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$). Výrazně nižší energetické náročnosti dosáhly třístupňová filmová odparka ($241 - 319 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $12,0 - 23,6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$) a devítistupňová mžiková odparka ($236 - 268 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$, $13,6 - 18,4 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$). Pro vývojovou činnost, která je jádrem disertační práce, byla zvolena vícestupňová mžikové odparka (MSF – multi-stage flash). Mezi hlavní důvody této volby patřily nízké požadavky na teplosměnnou plochu, dobré provozní zkušenosti v oblasti odsolování, jednoduchá konstrukce, modularita a odpařování mimo teplosměnnou plochu. Provedeno bylo také důkladné technicko-ekonomické zhodnocení integrace této odparky do BPS.

Hlavní náplní práce byl experimentální vývoj prototypu MSF odparky. Hlavním cílem vývojové činnosti bylo dosažení ustáleného průtoku zahušťované kapalné frakce digestátu, tzv. fugátu a kontinuální tvorby destilátu. Tento cíl nebylo snadné naplnit především kvůli vlastnostem fugátu, který má newtonský charakter a zvýšenou hustotu i viskozitu v porovnání s vodou. Předmětem analýzy byla rovněž pěnivost fugátu. V textu je popsán vývoj odparky i první úspěšný provozní test, při němž bylo nutné použít protipěnicího přípravku. S plně vyvinutým prototypem MSF odparky bylo dosaženo kontinuálního provozu s produkcí destilátu v množství od 5 do 10 kg/h při průtoku fugátu $0,4$ až $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Hlavním nedostatkem vybrané technologie je znečištění destilátu amoniakálním dusíkem. Proto byly analyzovány základní postupy jeho dodatečné eliminace.