



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

POSOUZENÍ INTEGRACE ODPAŘOVACÍ JEDNOTKY DO PROVOZU BIOPLYNOVÉ STANICE

ASSESSMENT OF EVAPORATOR INTEGRATION INTO BIOGAS PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Peťovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Patrik Peťovský**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Posouzení integrace odpařovací jednotky do provozu bioplynové stanice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro provozovatele bioplynových stanic je stále aktuálnějším tématem efektivní nakládání s digestátem, který je kapalným vedlejším produktem výroby bioplynu s vysokým obsahem vody a nízkou koncentrací hnojivých látek. V současné době se digestát vyváží na pole jako kapalné hnojivo. Bakalářská práce představí technologii pro tepelné zahuštění digestátu, tzv. odpařovací jednotku, která je schopna snižovat podíl vody v tomto odpadním proudu při současném zvyšování koncentrace živin. Výhodou této technologie je skutečnost, že může využívat odpadní teplo ze spalování bioplynu, kterého je v bioplynových stanicích přebytek. Kvalita koncentráту umožní jeho využití při zemědělské činnosti. Separovanou vodu bude možné využít znovu v procesu nebo vypustit do povrchových vod.

Cíle bakalářské práce:

1. Představení principu tepelného zahušťování digestátu a rešerše relevantní literatury.
2. Provedení průzkumu trhu a ukázka dosavadních aplikací
3. Výběr konkrétní bioplynové stanice a její materiálová a energetická bilance
4. Koncepční návrh integrace odpařovací jednotky pro tuto BPS stanice
5. Technicko-ekonomické zhodnocení integrace

Seznam doporučené literatury:

DROSG, Bernhard, Werner FUCHS, Teodorita AL SEADI, Michael MADSEN a Bernd LINKE. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing. 1. IEA Bioenergy, 2015. ISBN 978-1-910154-16-8. Dostupné z:

http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECO

VERY_RZ_web1.pdfAUBURGER, Sebastian, Richard WUSTHOLZ, Eckart PETIG a Enno BAHRS. Biogas digestate and its economic impact on farms and biogas plants according to the upper limit for nitrogen spreading—the case of nutrient-burdened areas in north-west Germany. AIMS Energy [online]. 2015, 3(4), 740-759 [cit. 2020-09-14]. DOI: 10.3934/energy.2015.4.740. ISSN 2333-8334. Dostupné z:

<http://www.aimspress.com/article/10.3934/energy.2015.4.740>.

AL SEADI, Teodorita. Biogas handbook. 1. Esbjerg: Syddansk Universitet, 2008. ISBN 978-8-992962-0-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Hlavním výstupním odpadním produktem bioplynové stanice je digestát, který se používá jako hnojivo a dále jej lze zpracovávat. Digestát nelze volně vypouštět do povrchových vod, a s tím jsou spojeny vysoké náklady na dopravu, vyšší počáteční investice na skladovací nádrže v nové bioplynové stanici atd. Cílem bakalářské práce je posouzení vhodného odpařovacího systému do provozu konkrétní bioplynové stanice.

Integrace odpařovacího systému vede k zahuštění digestátu odpařením vody s využitím mařeného tepla produkovaného kogenerační jednotkou. Důsledkem integrace jsou především nižší náklady na přepravu zahuštěného digestátu. Výstupem bakalářské práce je technicko-ekonomické zhodnocení, které posuzuje dobu návratnosti v závislosti na průtoku zahuštěného digestátu. Požadované měrné náklady na úpravu zahuštěného digestátu s uvažovanou dobou návratnosti v rozmezí 5–15 let, nepřesahují hodnoty $210 \frac{\text{Kč} \cdot \text{rok}}{t_{fug}}$. Hodnoty požadovaných nákladů s uvažováním prodeje tepla jsou dokonce záporné. Přičemž minimální hodnota nákladů daná výrobcem se pohybuje okolo $260 \frac{\text{Kč} \cdot \text{rok}}{t_{fug}}$. Integrace odpařovací jednotky do bioplynové stanice Žamberk je z ekonomického pohledu nevýhodná. Práce přináší nové poznatky o potenciálu vícestupňového mžikového odpařování v bioplynových stanicích s krátkou přepravní vzdáleností a s vysokým využitím odpadního tepla.

Klíčová slova

Digestát, bioplynová stanice, fugát, destilát, vícestupňová mžiková destilace, odpařování, technicko-ekonomické zhodnocení

Abstract

The main waste output of the biogas plant is digested which is used as fertilizer. It can be further process. Digestate cannot be discharged freely into surface waters. This problem is associated with high transportation costs and higher costs of storage tanks in the new biogas plant. The aim of this bachelor thesis is to assess a suitable evaporation system for a particular biogas plant.

The evaporation system leads to the concentration of digestate by evaporation water. The system uses heat produced by cogeneration unit. The main consequence of the integration is lower cost for the transport of liquid digestate. The output of the bachelor thesis is a technical and economic evaluation that assesses the payback period depending on the flow of concentrated digestate. The specific costs for adjustment of liquid digestate with regard to the payback period are in the range of 5–15 years. The values do not exceed $210 \frac{K\check{c}\cdot year}{t_{fug}}$. The values considering selling heat are even negative. The minimum value guaranteed by the manufacturer is around $260 \frac{K\check{c}\cdot year}{t_{fug}}$. The integration of the evaporation system into Žamberk's biogas plant is economically disadvantageous. The thesis brings new knowledge about the potential of multi-stage flash evaporation in biogas plants with short transport distances and high utilization of waste heat.

Keywords

Digestate, biogas plant, liquid digestate, distillate, multi-stage flash, evaporation, technical economic assessment

Bibliografická citace

PEŤOVSKÝ, Patrik. *Posouzení integrace odpařovací jednotky do provozu bioplynové stanice*. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131742>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vítězslav Máša.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Posouzení integrace odpařovací jednotky do provozu bioplynové stanice* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Vítězslava Máši Ph.D. a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne

Patrik Pet'ovský

.....

.....

Poděkování

Děkuji tímto mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vítězslavu Mášovi Ph.D. za vřelé a odborné jednání, velkou spoustu cenných zkušeností a podkladů.

Dále děkuji pánům: Bedřichu Markovi za nespočet znalostí a poznatků o provozu bioplynové stanice a Mgr. Ing. Marku Vondrovi, Ph.D. za ochotné jednání a cenné znalosti z oblasti odpařovacích systémů. Děkuji i společnosti PBS POWER EQUIPMENT, s.r.o. za užitečné informace ohledně odpařovacích systémů.

Především chci poděkovat mým rodičům, kteří mi umožnili studovat a bezmezně mě podporují. Děkuji, mami a tati. Velké díky patří také mé sestře Káje, která i v těžkých situacích dokázala být oporou. V poslední řadě bych rád poděkoval všem svým blízkým, kamarádům a chábrům, jenž mě podporují.

Obsah

Úvod.....	1
1. Bioplynová stanice, digestát a princip jeho tepelného zahušťování.....	2
1.1 Bioplynová stanice	2
1.2 Digestát	4
1.2.1 Vlastnosti digestátu	4
1.2.2 Využití digestátu	5
2. Současné aplikace odpařovacích jednotek.....	7
2.1 Popis fungování typu odparek.....	7
2.2 Současná nabídka na trhu odparek	10
3. Metodika.....	12
4. Bioplynová stanice a její bilance.....	13
4.1 Technologické uspořádání zvolené bioplynové stanice	13
4.2 Klíčové provozní parametry pro zamýšlenou integraci odparky	17
4.3 Materiálová a energetická bilance	18
4.3.1 Materiálová bilance.....	18
4.3.2 Energetická bilance	20
5. Návrh integrace odpařovací jednotky do BPS	23
5.1 Výběr odparky a její zasazení do technologického procesu	23
5.2 Metoda zpracování destilátu	26
5.3 Integrace odparky	28
6. Technicko-ekonomické zhodnocení	30
6.1 Náklady v důsledku integrace odparky	31
6.2 Ekonomické přínosy integrace odparky.....	33
6.3 Návratnost	34
Závěr.....	37
Seznam použitých zdrojů	38
Seznam zkratk a symbolů	42
Seznam obrázků.....	45
Seznam Tabulek.....	46

Úvod

Tématem bakalářské práce je posouzení integrace odpařovacího systému na úpravu odpadního produktu bioplynové stanice. Bioplynové stanice (BPS) jsou moderní zařízení na výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Pomocí fermentace z biologicky rozložitelného materiálu vytvářejí bioplyn, ten se následně zpracovává přímo v areálu BPS. Tradiční a mnohem více se vyskytující metodou pro zpracování bioplynu je jeho pálení v kogeneračních jednotkách (KGJ). Zde se uplatňuje do jisté míry využití kombinované výroby elektřiny a tepla, to má za následek vyšší účinnost, na kterou je kladen důraz při výstavbě nové BPS. Druhou metodou je výroba biometanu z bioplynu, jenž je označován za palivo budoucnosti [1]. Boom výstavby BPS probíhal v letech 2008-2013 díky dotacím na výstavbu a garantované výkupní ceně elektrické energie se zeleným bonusem [2].

Odpadním produktem fermentace po anaerobní reakci je digestát. Digestát (tuhá i tekutá složka) je považován za organické hnojivo dle zákona č. 254/2001 Sb., o vodách, a řadí se mezi závadné látky [3]. Povinností těch, kdo zacházejí se závadnými látkami, je učinit přiměřená opatření, aby látky nevnikly do podzemních vod. Digestát je běžně separován na tekutou (fugát) a tuhoun složku, to vede k dalším aplikacím a snížení tekutého objemu. Fugát se nejčastěji používá jako nízkokoncentrované hnojivo, u kterého je nutné zajistit přepravu pro aplikaci na zemědělské půdy.

Mimo přímého použití fugátu jako hnojiva jej lze nadále zpracovávat, ať již stripováním amoniaku, vysrážením struvitu, membránovou filtrací nebo odpařováním [4]. Všechny metody jsou zajímavé a přínosné, ale tato bakalářská práce se zabývá odpařovací jednotkou (odparkou). Největší výhodou použití odparky oproti jiným úpravám fugátu je využití odpadního tepla s minimem elektrické energie. Využívá se sníženého tlaku, kdy je teplota varu kapaliny nižší, a není tak potřeba kapalinu ohřívát jiným způsobem než odpadním teplem. Tyto technologie na úpravu fugátu se v běžných provozech BPS téměř nevyskytují. Postupem času bude možná více kladen důraz na nižší spotřebu vody a zachování její udržitelnosti. Snížená potřeba transportu fugátu má kladný vliv na uhlíkovou stopu při jeho dopravě. Proto je systém odparky zajímavý z ekologického hlediska. Další pohled na systém odparky je ekonomický. Nižší objem fugátu vede k nižším nákladům na jeho dopravu a nižší počáteční investici do skladovacích nádrží u výstavby nové BPS. Vedlejším produktem úpravy vody je výroba roztoku síranu amonného, který lze následně prodávat. Integrace odparky se opírá o dizertační práci Ph.D. Marka Vondry.

Práce zprvu popisuje technologii bioplynové stanice, její odpadní produkt digestát a porovnává současný trend na trhu odpařovacích jednotek. Hlavní část je věnována integraci odpařovací jednotky s ohledem na materiálovou a energetickou bilanci konkrétní bioplynové stanice. Stěžejním výstupem je technicko-ekonomické zhodnocení, které demonstruje vliv nákladů na úpravu fugátu s ohledem na jeho produkci v rozmezí 5–15 let.

1. Bioplynová stanice, digestát a princip jeho tepelného zahuřování

Bioplynová stanice je zařízení, které dokáže pomocí řízené fermentace přetvářet organický materiál na elektrickou energii, teplo a odpadní produkt, který lze nadále používat jako hnojivo. Vstupní složka celého procesu je biomasa tvořená organickými materiály, např. kejda, hnůj, travní senáž a kukuřičná siláž, chlěvská mrva, pivovarské mláto atd.

Česká republika v letech 2008-2013 zažila boom ve výstavbě BPS. Díky dotacím a garantované ceně výkupu elektřiny. V roce 2020 se nacházelo na území ČR 574 bioplynových stanic všech typů (komunální, průmyslové, zemědělské a ČOV) s celkovým instalovaným výkonem 367 MW [5]. Ve srovnání s jadernou elektrárnou Temelín dosahuje instalovaný výkon všech BPS 16,3 %. Bioplyn spadá do kategorie obnovitelných zdrojů energie a zabírá zde podíl 22,9 % [5]. Největší zemědělskou BPS v ČR nalezneme v obci Králíky v okrese Hradec Králové s instalovaným výkonem 2795 kW.

1.1 Bioplynová stanice

Zemědělská bioplynová stanice (BPS) je zařízení na zpracování biomasy a jiných produktů rostlinného nebo živočišného původu. Vstupní složka se nazývá substrát, který můžeme rozdělit na:

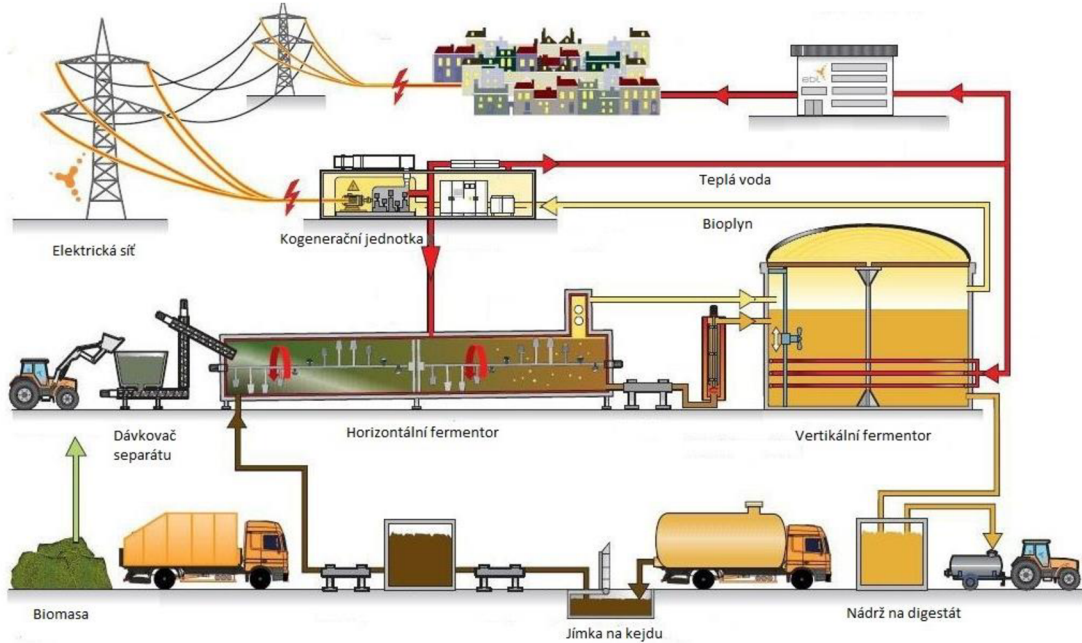
1. Rostlinné zbytky – kukuřičná siláž a travní senáž, odpad ze sadů, sláma
2. Živočišné zbytky – nejvíce využívaná je kejda, kterou je z důvodu rozšiřujících se velkochovů třeba likvidovat, protože je klasifikovaná jako toxický zemědělský odpad. Dále sem patří jateční zbytky.
3. Komunální organické odpady – tráva z veřejných ploch, jídelní zbytky, kaly z čističek odpadních vod
4. Organické odpady z průmyslových objektů – moštárny, mlékárny, cukrovary, lihovary atd.

Pomocí katabolické anaerobní reakce, při zvýšené teplotě, bez přístupu kyslíku a působením mikroorganismů probíhá mikrobiální rozklad, díky čemuž vzniká ve fermentoru ze substrátu bioplyn.

Bioplyn je směs plynů. Tvořen je především *metanem* (CH_4), který je hlavní energeticky využitelnou složkou, a může činit podíl až 75 % [6], přičemž nejbohatší zemní plyny dosahují obsahu metanu 99,72 % (Aljaška). Dalšími plyny obsaženými v bioplynu jsou *sulfan* (H_2S), *oxid uhelnatý* (CO) a *amoniak* (NH_3). Jejich poměry jsou samozřejmě vázány na složení vstupního substrátu.

Proces fermentace trvá několik dní a záleží na velkém počtu proměnných, především ale na celkovém objemu fermentoru a dodávce biomasy. Taková doba se nazývá *Zdržná doba* a nejčastěji se pohybuje okolo 60 dní.

Konstrukce každé BPS se liší, a to v závislosti na typu používané technologie, vstupního substrátu, velikosti a výši investice. Obr. 1.1 schematicky znázorňuje jedno z mnoha uspořádání BPS.



Obr. 1.1 Schéma BPS; převzato [7] a upraveno

Skladovací jímka, její využití je zřejmé z názvu. Aby nemusel být přísun substrátu konstantní a logisticky náročný, slouží jímka pro skladování při zvýšené dodávce.

Přípravná nádrž slouží k úpravě substrátu před vstupem do fermentoru. Úprava probíhá především drcením a rozmělněním na menší částice. Zde probíhá i ředění substrátu a je sem nejčastěji přiváděna kejda. K ředění se může použít tekutý fugát nebo dešťová voda.

Fermentor je prvek, ve kterém probíhá proces fermentace. Je izolován jak teplotně kvůli zvýšené teplotě, tak i od okolního vzduchu, aby zde mohla proběhnout anaerobní reakce.

Dofermentor slouží pro dokončení anaerobního procesu, kdy po cca 60 dnech je digestát čerpán z fermentoru do dofermentorů.

Plynojemy jsou součástí fermentorů a dofermentorů. Jedná se o membránu umístěnou nad částí, kde probíhá fermentace. Od prostoru fermentace jsou většinou odděleny dřevěnou podlahou. Jsou elastické a dle množství plynu mění svůj objem a tvar. Může se jednat i o nádrže na uchování bioplynu. Při vysoké produkci bioplynu mohou být plynojemy vybaveny hořáky, a přebytečný plyn mohou kontrolovaně spalovat.

Zásobní jímka je využívána na zadržování kapalného fugátu. Po naplnění je fugát vyvážen a dále zpracováván. Může se z ní čerpat fugát na ředění vstupního substrátu.

Kogenerační jednotka se nachází ve strojovně. Spalováním bioplynu roztáčí motor, který nadále pohání generátor na výrobu elektrické energie. Při spalování vzniká značné množství tepla, které je z malé části využíváno na výhřev fermentoru, ohřev vody a prostor BPS. Větší část tepla je ale mařena a vypouštěna do okolí.

Jímka na digestát, jak již název napovídá, jedná se o nádrž na zachycování digestátu. Digestát je klasifikovaný jako toxický zemědělský odpad, a proto se musí zachytávat a dále zpracovávat. Před vstupem do jímky se může nacházet separátor, který dokáže rozdělit digestát na pevnou a tekutou část, a tím snížit objem tekuté složky.

1.2 Digestát

Digestát je zbytek fermentačního procesu po anaerobní reakci [8]. Jedná se o suspenzi vody a pevného materiálu, který se nedokázal ve fermentoru rozložit. Chemické složení je především závislé na složení vstupního substrátu.

Proces anaerobní reakce lze považovat za jednu z nejlépe energeticky účinných technologií na výrobu bioenergie. Díky šetrnosti k životnímu prostředí bude využití takového zdroje energie čím dál významnější. Zvýšená produkce digestátu může v budoucnu představovat problém. Je zřejmé, že s vyšší produkcí se zvyšuje potřeba dopravovat digestát na vzdálenější zemědělské půdy, a tím se zvyšuje i cena za dopravu. Jelikož nemůžeme digestát vyvážet v průběhu celého roku, musíme jej skladovat. Vývoz probíhá především na jaře začátkem března, kdy se digestát aplikuje na louky.

Většina BPS nadále digestát upravuje, a to pomocí mechanického separátoru, který dokáže separovat digestát na pevnou (*separát*) a kapalnou část (*fugát*). Následné využití separátu je kompostování, materiál na podestýlku hospodářských zvířat, materiál pro peletu nebo briketu pro spalování [8]. Fugát se používá jako hnojivo zemědělské půdy. Díky lepšímu vstřebávání živin do půdy často v testech předčí minerální hnojivo nebo i kejdu.

1.2.1 Vlastnosti digestátu

Vlastnosti digestátu jsou přímo úměrné vstupnímu substrátu, jak je již zmíněno v předchozí podkapitole. Digestát je v kapalném stavu a obsahuje spoustu živin (dusík, fosfor, draslík, síru, vápník a hořčík). Obvyklé hodnoty vyskytujících se prvků v digestátu, které se běžně kontrolují, jsou znázorněny v Tab.1.

Tab. 1 Složení digestátu a jeho optimální hodnoty

Prvek	Značka	Jednotka	Optimální hodnoty
Sušina		%	5-9
Organická sušina		% v suš.	40-90
pH			≥7,2
Metan	NH ₄	mg·kg ⁻¹	≤ 4000
Dusík	N	mg·kg ⁻¹	≤ 6000
Kyselina octová	CH ₃ COOH	mg·kg ⁻¹	≤2000
Kyselina propionová	C ₃ H ₆ O ₂	mg·kg ⁻¹	≤50
Kyselina máselná	C ₄ H ₈ O ₂	mg·kg ⁻¹	≤50

Za působení anaerobního procesu ve fermentoru se snižuje obsah uhlíkatých látek, díky čemuž dochází ke snížení poměru C:N. Důsledkem je, že digestát obsahuje hůře rozložitelnou organickou hmotu. Digescí se téměř nemění obsah živin digestátu oproti substrátu [9].

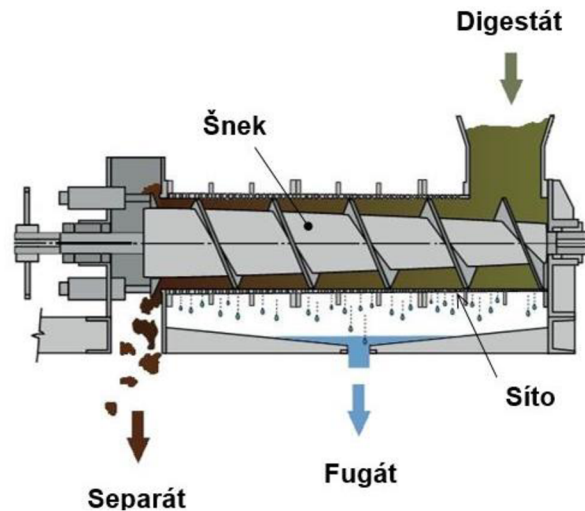
Vlastnost, kterou chceme u digestátu pozorovat, je jeho viskozita. Ta má přímý vliv na jeho schopnost nechat se pumpovat. Přítomnost malých částic má za důsledek chování digestátu jako neneutonské kapaliny a podobnost s kapalinou pseudoplastickou [10]. Se zmenšujícími se rozměry částic viskozita klesá, obzvláště pak při nižším výskytu vláknitých trav ve vstupním substrátu. S narůstající teplotou viskozita u kapalin klesá, zatímco u plynů se zvyšuje. Ve fermentoru se nachází obě tato skupenství, ale s mnohem větším hmotnostním zastoupením kapalně fáze. To má za následek, že u digestátu ve fermentoru a dofermentoru s narůstající teplotou viskozita klesá, jak potvrdila reologická měření [10].

1.2.2 Využití digestátu

Neupravený digestát se nejčastěji používá jako hnojivo na pole. Toto využití není ale tak časté, už kvůli potřebě snížit objem na přepravu a skladování. Většina BPS přichází s řešením v podobě mechanického separátoru, který odděluje digestát na dvě složky, a to *fugát* a *separát*. Obě tyto složky jsou nadále plně využívány.

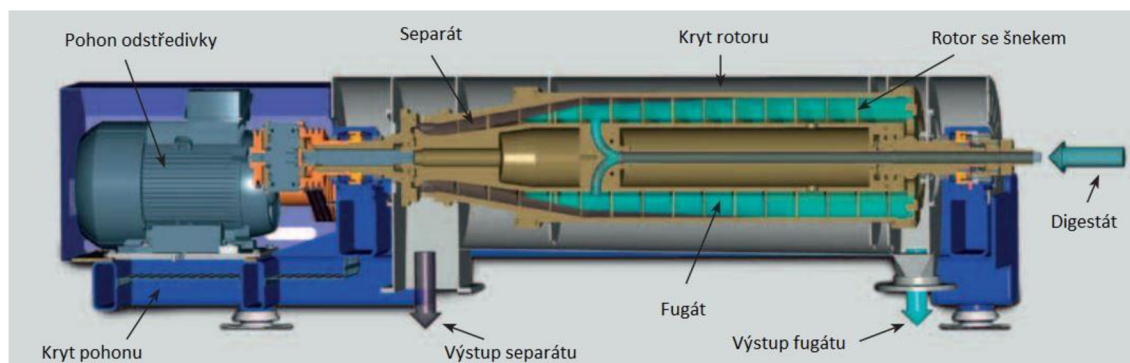
Separace jako taková nedokáže snížit objem digestátu, pouze ho rozděluje a umožňuje tím další využití. Na trhu se nachází více možností, jak digestát separovat, nejčastěji se jedná o separaci za působení vnější síly. Neupravený digestát obsahuje 7 ÷ 8 % sušiny, separát 20 ÷ 30 % sušiny a fugát 3 ÷ 4 % [9]. Díky separaci snížíme potřebu skladování kapalně složky do nádrží o 10 ÷ 30 %, v závislosti na použité technologii a kvalitě vstupního substrátu.

Mezi separátory s vyšší účinností obecně patří **šnekové lisy**, které jsou současně i nejvíce používané v českých BPS. Především díky své relativně nízké pořizovací ceně, spolehlivosti, dlouhé životnosti a nízkým nákladům na provoz [11]. Princip separace pomocí šnekového lisu je založen na působení vnější tlakové síly, kdy je pevná frakce vytlačována postupně se rozšiřujícím šnekem, jak je vyobrazeno na Obr. 1.2. To má za následek zvýšení tlaku, a tím dosažení vyšších účinků separace. Další nezbytnou výhodou je regulace separace pomocí velikosti ok síta, kam jsou větší částice zachytávány.



Obr. 1.2 Schéma šnekového lisu s popisem; převzato z [12] a upraveno

Zástupcem pro působení odstředivých sil je **dekantační odstředivka**, která má velké pole využití. Je sice v BPS méně používaná než šnekový lis, ale nalezneme ji při odvodňování komunálních a průmyslových kalů, v chemickém a farmaceutickém průmyslu, při zpracování minerálů a výrobě olejů atd. Výhodou dekantace odstředivky oproti šneku, je možnost oddělit drobné kalové částice, dokonce i část fosforu, který odchází společně s pevnou fází [13]. Princip odstředivky je jednoduchý, jak je znázorněno na Obr. 1.3. Středem odstředivky je přiváděn digestát, u kterého dochází vlivem odstředivých sil k separování pevných částí. Fugát následně odtéká po postupně se rozšiřujícím bubnu rotoru.



Obr. 1.3 Schéma dekantace odstředivky s popisem; převzato z [13] a upraveno

Tímto byly představeny standartní technologie pro nakládání s digestátem v BPS. Nyní si představíme jejich možné rozšíření o odpařovací jednotku.

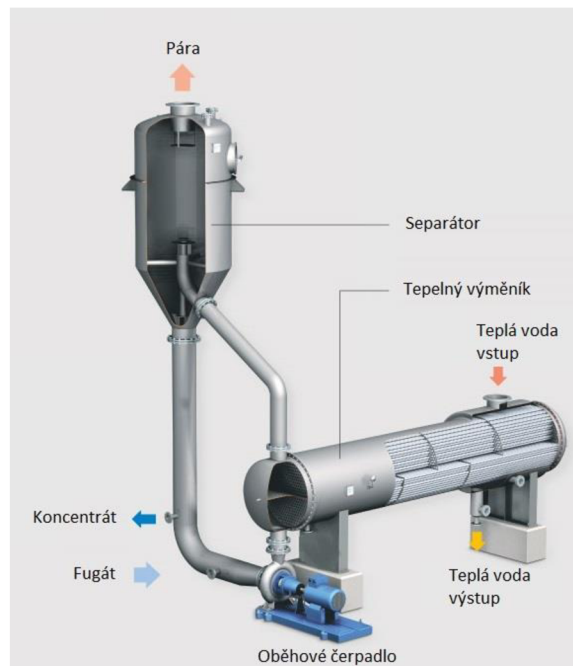
2. Současné aplikace odpařovacích jednotek

Průmyslové využití odpařovacích jednotek (odparek) je poměrně rozšířené v různých odvětvích průmyslu. Například odparky nalezneme na zaoceánských lodích, kde jsou naprosto nepostradatelné při odsolování mořské vody. Další uplatnění nalezneme v potravinářství, papírnickém a chemickém průmyslu. Na trhu se nachází velké množství různých typů. V této kapitole se budeme zabývat pouze typy, jejichž technologie dovoluje využívat odpadní teplo, produkované KGJ. Nebudeme zde popisovat odparku využívající kompresi páry, tepelná čerpadla nebo mechanické prvky (např. míchadla, škrabky). Všechny tyto odparky zvyšují spotřebu el. energie. Typy odparek se liší v mnoha ohledech, např. konstrukcí a technologickým uspořádáním, pořizovací cenou a její návratností. S ohledem na všechna kritéria, která přináší BPS, si popíšeme 3 typy odparek. Jsou to odparky vhodné pro viskózní kapaliny, prvním typem je odparka s **nucenou cirkulací kapaliny** (FCE), druhá je odparka s **padajícím filmem** (FEE) [14]. Třetím typem, který si popíšeme je **vícetupňová mžiková** odparka (MSF), která se běžně nevyužívá ke zpracování fugátu, nicméně právě ta bude podrobněji popisována.

2.1 Popis fungování typu odparek

Odparka s nucenou cirkulací kapaliny

Jedná se o odparku s nejjednodušší konstrukcí, ale i nejméně energeticky efektivní. Skládá se z tepelného výměníku, separátoru a oběhového čerpadla. Fugát je čerpán oběhovým čerpadlem do tepelného výměníku, ten je vybaven dutinami, kterými fugát proudí [15]. Teplo je přiváděné pomocí teplé vody, která



Obr. 2.1 Schéma FCE odparky s popisem; převzato z [15] a upraveno

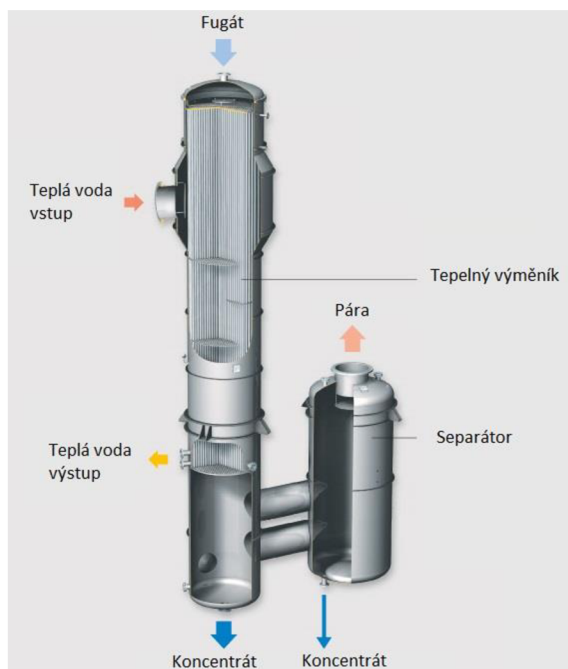
proudí výměníkem a ohřívá dutiny, jak je zobrazeno na Obr. 2.1. Ohřátý a natlakovaný fugát následně putuje do separátoru. Při vstupu do separátoru je tlak rapidně snížen, což má za následek vypařování fugátu, který je následně odváděn ze separátoru. Koncentrát, jenž prošel separátorem FCE, je již odváděn do skladovací nádrže nebo se může přimíchat do vstupu nově příchozího fugátu.

Technologie je jednoduchá a díky úpravám velikostí tepelného výměníku i poměrně univerzální. Průtok fugátu je regulován čerpadlem. Výhodou tohoto uspořádání je vypařování v separátoru, a ne přímo na teplosměnných plochách výměníku [15]. To má pozitivní následek v podobě menšího znečištění teplosměnných ploch.

Odparka s padajícím filmem

Druhým zástupcem využívající odpadní teplo je FEE. Konstrukčně se od předchozí značně liší, jak je zobrazeno na Obr. 2.2. Fugát je přiváděn vrchní částí, pomalým rozléváním se dostane do teplosměnných trubic, kde stékáním vytvoří tenký film. Teplá voda ohřívá tenký film fugátu, který se začne vypařovat. Pára nestoupá nahoru, jak by bylo očekáváno, ale díky toku fugátu klesá dolů. Ve spodní části dochází k částečné separaci páry a kapalného filmu. Směs pokračuje do separátoru, kde dochází k primární separaci na páru a koncentrát [16].

Při použití této technologie je nezbytné, aby celá teplosměnná plocha byla pokryta tenkým filmem, především ve spodní části. Pokud tomu tak není, vzniknou suchá místa, která povedou k tvorbě usazenin a následné nefunkčnosti.



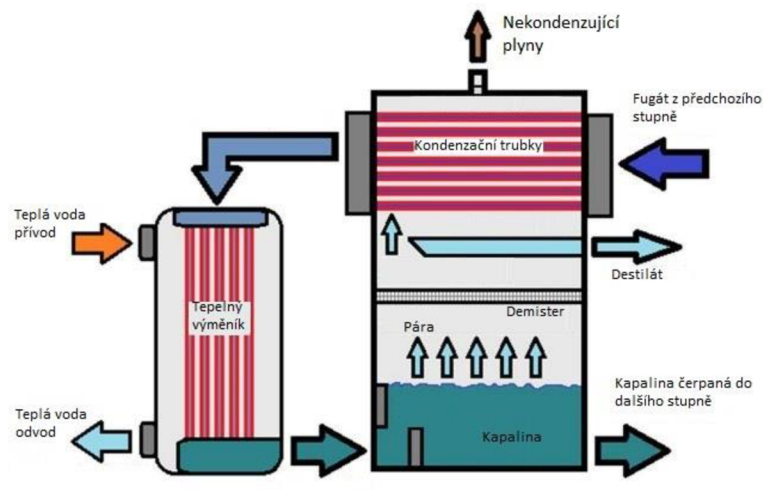
Obr. 2.2 Schéma FEE odparky s popisem; převzato z [16] a upraveno

Konstrukce může být jednostupňová, to ale není tak účinné. Při sériové konstrukci více stupňů, kdy páru ze separátoru využíváme na ohřev dalšího stupně a koncentrát prochází všemi stupni, zvyšujeme účinnost celého procesu.

Většinou se setkáme se třemi stupni, přičemž vždy v dalším stupni je teplota i tlak nižší. Další výhodou jsou malé rozměry, vyžadované pro provoz odparky.

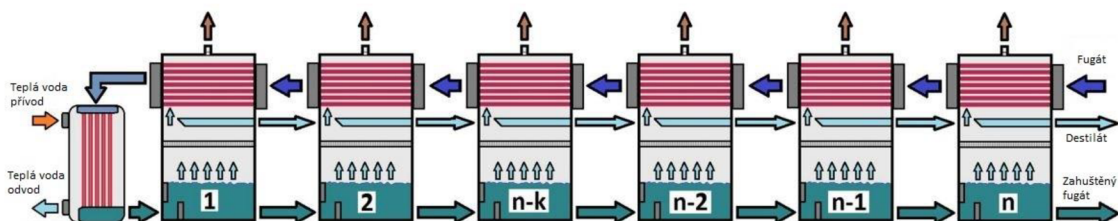
Vícestupňová mžiková odparka

MSF odparka se běžně nepoužívá na zpracování odpadních vod a fugátu. Její největší využití nalezneme při odsolování vod, kde má nenahraditelnou pozici. MSF odparky produkují 26 % z celosvětové produkce destilované vody. Počet komor k odpařování je vyšší než u předchozích dvou odparek, běžně se pohybuje okolo 20 i více komor [17]. Na vstupu se fugát míchá s částí recyklátu a slouží jako chladicí médium v kondenzačních trubkách. Před prvním stupněm se nachází ohřívač, ten ohřívá kapalinu, která vstupuje do prvního stupně. Vypařování zde neprobíhá na teplosměnné ploše, to je výhodou oproti FEE odparkám. U MSF odparky dochází k vypařování za vlivu sníženého tlaku, kdy se část vody mžikově odpaří. Pára následně prochází skrze demistry, kondenzuje se ve vrchní části odparky, a odchází ve formě kondenzátu. Nekondenzující plyny jsou odváděny ven ze systému odparky, jak je vyobrazeno na Obr. 2.3 [18]. Při kondenzaci pára předává chladicí kapalině své kondenzační skupenské teplo, a tím ji dodatečně ohřívá. Celý postup je následně opakován, kapalina je čerpána do dalšího stupně. Nevýhodou použití této technologie s fugátem je pění, které musí být potlačováno speciálními přípravky.



Obr. 2.3 Schéma MSF odparky a ohřívače s popisem; převzato z [17] a upraveno

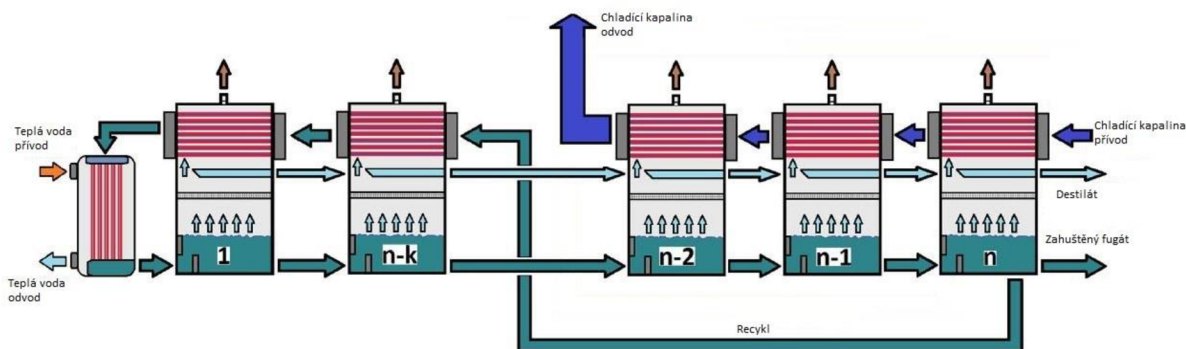
Jeden stupeň nedokáže kapalinu dostatečně zahustit, a proto se volí varianta s více stupni, kdy jsou dvě možnosti, jak zapojení stupňů uskutečnit. První a



Obr. 2.4 Schéma sériového zapojení MSF odparky; převzato z [17] a upraveno

jednodušší zapojení je sériové, kdy kapalina proudí skrze všechny stupně popořadě, jak je zobrazeno na Obr. 2.4.

Druhou možností zapojení je *cirkulace*, to z většiny také využívá fugát jako chladivo, rozdíl nalezneme až u posledních stupňů, jak je zobrazeno na Obr. 2.5. Pro ochlazení posledních stupňů je použita externí chladicí kapalina. To má za následek snížení teploty cirkulujícího koncentrátu a chlazení v přecházejících stupních je efektivnější, a tím je efektivnější celý proces odpařování [18]. Z posledního stupně je část kapaliny recyklována a použita jako chladivo do zbylých stupňů MSF odparky, kde plní úlohu jako v sériové konstrukci.



Obr. 2.5 Schéma cirkulace MSF odparky; převzato z [17] a upraveno

2.2 Současná nabídka na trhu odparek

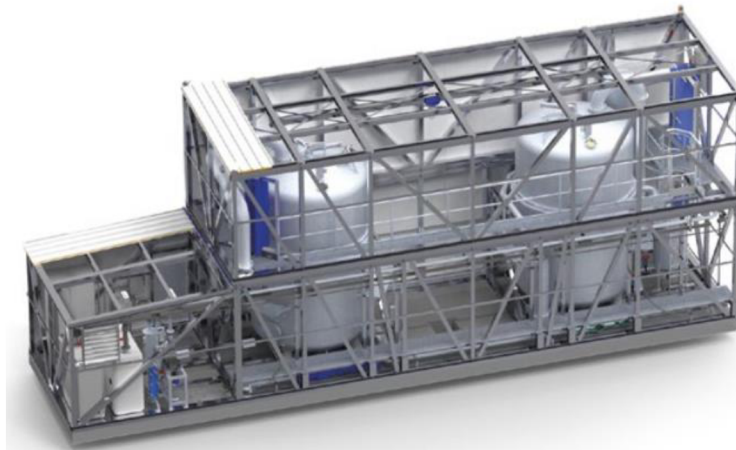
Současná nabídka odparek pro využití v BPS na českém trhu je v začátcích. Pravděpodobná příčina bude v relativně malé vzdálenosti vývozu fugátu na pole. V České republice je vývoz nad 30 km daleko, zatímco v Německu není problém jet i více jak 60 km. Proto v Německu nalezneme firmy, které do BPS odparky dodávají.

Jako první si popíšeme produkty MKR. Jedná se o firmu založenou v roce 1990 a celý její sortiment se zabývá čištěním kalových vod. Své produkty dodávají na všechny kontinenty. Ve výrobní nabídce nalezneme odstředivé separátory, filtrační zařízení a odparky. Odparky využívají systém padajícího filmu a jsou vybaveny odpěňovací turbínou, která má za následek nižší náklady na chemikálie k odpěnění, v některých případech i eliminaci těchto nákladů. V nabídce nalezneme malé odparky pro průtoky 50 l/h ale i vícestupňové systémy s kapacitou 3800 l/h [19]. Odparky MKR řeší i problém s následnou úpravou destilátu, a vytváří tak roztok síranu amonného, více popsáno v podkapitole 5.2. Celý proces je automatizován. Konstrukční uspořádání je znázorněno na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Vícestupňové uspořádání odparky MKR DV1000/2000; převzato z [20]

Další firmou působící na evropském trhu je německý Vapogant. Jedná se o firmu zabývající se BPS. V nabídce produktů nalezneme míchadla, šroubové separátory, dávkovače na biomasu a odparky. Odparky jsou dvoustupňové a konstruované do velikosti dvou kontejnerů (Obr. 2.7), s výjimkou chladičů a nádrže kyseliny sírové, jenž jsou vně. Výhodou takové konstrukce je její integrita, lepší možnosti transportu a manipulace. Celý proces je rovněž řízen zcela automaticky. Problém s úpravou destilátu je řešen pomocí kyseliny sírové 78%, která rovněž vytváří roztok síranu amonného [19]. Jelikož se jedná o firmu konkrétně zaměřenou na BPS, v nabídce odparek nalezneme modely dle využití tepla 400 kW až 500 kW.



Obr. 2.7 Konstruční uspořádání odparky Vapogant; převzato z [20]

Další firmy působící na trhu odparek jsou GEA, Ehaled, ENCON Evaporators, Condorchem envitech.

Pro další postup budeme uvažovat typ odparky MSF, z důvodu nižšího potřebného tepla na ohřev fugátu. V tuto chvíli na trhu nebyla tato technologie nalezena. Pro případnou integraci MSF odparky by tedy bylo nutné nechat vyrobit nové unikátní zařízení.

3. Metodika

Kapitola metodika představuje systematický postup činností vedoucích k technicko-ekonomickému posouzení integrace odpařovací technologie do provozu BPS. Metodika byla aplikována úspěšně na BPS Žamberk. Na základě dalších zkušeností ji bude možné zobecnit a upravit na univerzální postup pro širokou škálu BPS.

1. Základní teoretické poznatky a představení dostupných technologií

Všechny základní informace jsou shrnuty v kapitole 1 a 2. Podstatným vodítkem je dizertační práce Ph.D. Marka Vondry.

2. Definice cílové bioplynové stanice a jejího technologického vybavení (kap. 4.1)

Pro integraci odparky je důležité zjistit, zda BPS disponuje mechanickým separátorem. Ten je klíčový a bez něj nelze pokračovat dál. Následně si zvolit technologii odpařování, na trhu se vyskytuje více možností. Určit, zda je všechno výstupní teplo produkované KGJ mařeno, nebo je z nějaké části využito. Pro naše účely byla zvolena BPS Žamberk. Jedná se o BPS s integrovaným výkonem 1750 kWh a produkcí digestátu přes $5\,095 \text{ kg/h}$.

3. Sběr a vyhodnocení provozních dat (kap. 4.2)

Pro určení odparky jsou potřebná data o produkci el. energie a tepla. Dále je potřeba znát množství vstupního substrátu, obsah sušiny výstupu. Pro pokrytí co největšího rozsahu byly použity data v průběhu celého roku 2019. Hodnoty jako produkce el. energie a množství vstupního substrátu jsou zaznamenávány každý den, pro použití ve výpočtech byly zprůměrovány. Produkce tepla byla vypočítána z tepelné účinnosti motoru. Obsah sušiny v digestátu byl měřen v prosinci 2019. Znat průměrnou přepravní vzdálenost.

4. Stanovení materiálové a energetické bilance procesu (kap. 4.3)

Stanovení materiálové a energetické bilance vychází z připravených hodnot vstupů a výstupů. Materiálová bilance vychází ze zákona zachování hmotnosti a energetická bilance ze zákona zachování energie. Pro určení výhřevnosti plynu je potřeba znát jeho obsah metanu. Důležitými výstupy bilancí jsou hmotnostní tok fugátu a výstupní teplo, které lze použít na ohřev fugátu v odparce.

5. Návrh integrace odparky (kap. 5)

Při návrhu integrace je kladen důraz na umístění MSF odparky do systému. Určení, zda se bude pomocí odparky upravovat celý hmotnostní průtok fugátu, nebo jen jeho část. Zvolíme vyhovující zapojení s ohledem na mechanický separátor a jeho případné úpravy. Určíme možnosti filtrace čpavkové vody dle množství využitelného tepla. Podle hmotnostního toku lze určit parametry odparky jako potřebné teplo, příkon el. energie a velikost teplosměnné plochy.

6. Ekonomické posouzení integrace (kap. 6)

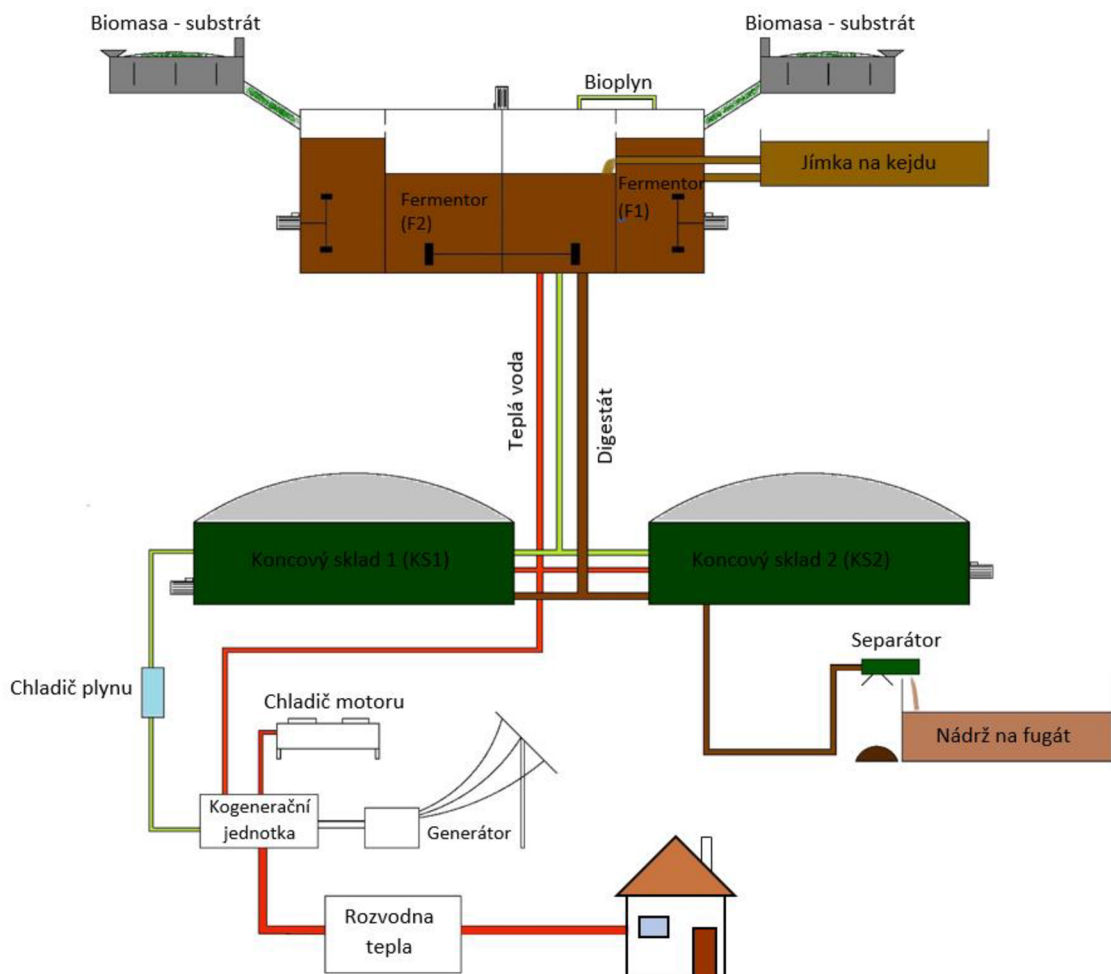
Při výpočtu návratnosti je klíčové si určit hodnoty z rozsahu, dle konkrétních možností BPS.

4. Bioplynová stanice a její bilance

Cílem této bakalářské práce je posoudit integraci odpařovací jednotky (Odparky) a zhodnotit materiálovou a energetickou bilanci při snížení nákladu za dopravu. Pro tyto účely byla zvolena BPS Žamberk. Hodnoty pro materiálovou a energetickou bilanci vycházejí z naměřených hodnot v průběhu celého roku 2019.

4.1 Technologické uspořádání zvolené bioplynové stanice

BPS Žamberk není typické konstrukce jako většina BPS v České republice, jak je vyobrazeno na Obr. 4.1. Součástí BPS je vepřín, ze kterého je do provozu BPS dodávána vepřová kejda. Do provozu vepřína je z BPS dodávána el. energie a teplo pro ohřev prostor vepřína, jak je popsáno v materiálové a energetické bilanci. Dalším zemědělským provozem je 3 km vzdálené kněžství, ze kterého je dodávána hovězí kejda do provozu BPS. V zimních měsících jsou pomocí tepla vyprodukovaného v KGJ vytápěny prostory odborného léčebného ústavu Albertinum. Teplo je přenášeno pomocí ohřevu vody, která proudí ve 2 km dlouhém teplovodním potrubí.



Obr. 4.1 Schéma BPS Žamberk

Jako první si popíšeme dávkovače na biomasu (Obr. 4.2). Oba dávkovače stačí doplnit na začátku dne, poté v průběhu dne automaticky dodávají biomasu do fermentoru F1.



Obr. 4.2 Dávkovač na biomasu; zdroj: fotografie autora

Na schématu BPS si můžeme všimnout netypického uspořádání fermentorů, vnější fermentor F1 o rozměrech $\varnothing 40 \times 5,5$ m a vnitřní fermentor F2 o rozměrech $\varnothing 20 \times 5,5$ m. Systém dopravy kejdy do fermentorů z nádrže na kejdu (Obr. 4.3) je vyřešen většinou pomocí spádu. Princip toku materiálu je pak stejný jako v ostatních BPS. Hustá směs je přivedena do F1, jenž je míchán třemi vertikálními míchadly *Mississippi*kamy. Při naplnění F1 je pomocí přepadu plněný F2, jenž je míchán vertikálním míchadlem. Následně je digestát přečerpáván do koncových skladů KS1 a KS2, které jsou míchány horizontálními míchadly. Ve fermentoru dochází k odsiřování, a to pomocí chloridu železnatého, který je do procesu fermentace přidáván.



Obr. 4.3 Jímka na kejdu; zdroj: fotografie autora

Biomasa je tvořena kukuřičnou siláží, travní senáží, hnojem, cukrovarskými řízky, vepřovou a telecí kejdou. Téměř veškeré vstupní produkty, jak zemědělského, tak i živočišného původu, jsou vyprodukovány na půdě BPS, externě získány jsou cukrovarské řízky a hovězí kejda. Vlastnosti vstupní biomasy jsou podrobněji popsány v materiálové bilanci (kap 4.2).

Zdržná doba procesu fermentace je 80 až 90 dní, v závislosti na poměrech vstupní biomasy. Přičemž dle potřeby funguje přečerpávání z koncových skladů zpět do F1 a F2, jak je znázorněno na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Systém přečerpávání, umístěn mezi fermentorem a koncovými sklady; zdroj: fotografie autora

Bioplyn prochází celým procesem fermentace, z F1 je veden do F2, následně do KS1 a KS2. Před vstupem do strojovny je ochlazován za účelem zvýšení účinnosti spalování (Obr. 4.5).



Obr. 4.5 Chlazení bioplynu, v pozadí KS1 a KS2; zdroj: fotografie autora

Ve strojovně jsou umístěny dva motory značky MWM, znázorněny na Obr. 4.6. Motor TCG 2020 V12 s výkonem 1200 kW, jehož průměrný výkon je 1150 kW. Sekunduje mu motor TCG 2016 V12 o výkonu 600 kW, který se většinou spouští při nedostatku tepla na vytápění. Oba motory mají dohromady maximální tepelný výkon 1785 kWh.



Obr. 4.6 Motory MWM, společný maximálním výkonu 1750 kW; zdroj: fotografie autora

Část vyprodukované elektrické energie je použito na vlastní potřebu BPS a provoz vepřína, avšak 84,7% elektrické energie je prodáváno do sítě, jenž tvoří primární příjem BPS. Teplo generované KGJ je v zimě plně využíváno na vytápění odborného léčebného ústavu Albertinum. To vytváří sekundární příjem, avšak na jaře a na podzim není možné využít veškeré teplo, a je tak zčásti mařeno. V létě je mařeno plně.

Digestát z koncových skladů je veden na druhou stranu areálu k mechanickému separátoru *Bauer S885*. Substrát je průběžně odebírán a následně dále zpracováván. Fugát není nadále recyklován nebo použit při mokré fermentaci, je skladován v nádržích o celkovém objemu cca 15 150 m³ (Obr. 4.7). Tyto prostory na fugát jsou přímo v areálu BPS, nicméně každý den, když z nedalekého Kněžství přivážejí hovězí kejdu, odvázejí si část fugátu ke skladování a dalšímu využití tam.



Obr. 4.7 Mechanický separátor a skladovací nádrže fugátu; zdroj: fotografie autora

4.2 Klíčové provozní parametry pro zamýšlenou integraci odparky

V této podkapitole nalezneme klíčové provozní parametry, které jsou pro určení odparky nezbytné. V následné materiálové a energetické bilanci na ně bude odkazováno.

Tab. 2 zobrazuje vstupní hodnoty do procesu fermentace. Hodnoty jsou zapisovány každý den a jsou zprůměrovány za roku 2019.

Tab. 2 Vstupní hodnoty substrátu za rok 2019

Složky substrátu	Značka	t/rok	t/den
Kukuřičná siláž	\dot{m}_{kuk}	10467	29
Travní senáž	\dot{m}_{trav}	10032	27,5
Hnůj	\dot{m}_{hnuj}	1024,5	2,8
Kejda F1	\dot{m}_{kejda_F1}	14797	40,5
Kejda F2	\dot{m}_{kejda_F2}	13475	37
Cukrovarské řízky	\dot{m}_{cuk_riz}	542	1,5

Produkce el. energie a její dodávka do sítě, vepřína a pro chod BPS pro rok 2019 je popsána v Tab. 3. Hodnoty vycházejí z každodenního zápisu elektroměrů.

Tab. 3 Průměrné hodnoty el. energie za rok 2019

2019	celkem [Mwh/rok]	průměr [kWh/hod]
Vyrobená el. energie	10693	1220,7
el. energie dodaná do sítě	9060	1034,2
dodaná el. energie vepřín	646	73,7
Vlastní spotřeba el. energie	987	112,7

Tab. 4 zobrazuje průměrnou spotřebu tepla na ohřev fermentorů a prostor vepřína. Jedná se o hodnoty určené pro konkrétní roční období.

Tab. 4 Průměrná spotřeba tepla za hodinu v roce 2019

2019	fermentory [kWh/hod]	Vepřín [kWh/hod]
Zima	375	300
Jaro	300	175
Léto	250	100
Podzim	300	150

Specifikace motorů dané výrobcem jsou popsány v Tab. 5. Specifikace jsou důležité pro určení produkovaného tepla

Tab. 5 Specifikace motorů dané výrobcem; převzato a upraveno [27]

Typ motoru	Jednotky	TCG 2020 V12	TCG 2016 V12 C
Výstup el. energie	kW	1200	600
Výstup tepelné energie $\pm 8\%$	kW	1192	593
Elektrická účinnost	%	43	42,7
Tepelná účinnost	%	42,7	42,2
Celková účinnost	%	85,7	84,9

Určení vzdálenosti na převoz fugátu a náklady na jeho převoz jsou popsány v Tab.6. tyto hodnoty jsou potřebné v technicko-ekonomickém zhodnocení (kap.6).

Tab. 6 Přehled vzdáleností a ceny za dopravu

Doprava	Hodnota	Jednotky
Vzdálenost	10	km
Cena za dopravu	80	Kč/t/100km

Parametry pro posouzení ekonomického zhodnocení integrace nalezneme v Tab. 8 (kap. 6).

4.3 Materiálová a energetická bilance

Jedná se o bilanci současných vstupních parametrů do BPS bez odparky. U bilance platí, jestliže uděláme součet výstupních veličin a porovnáme ho s hodnotami vstupu, měl by tento součet být roven nule. Obě tyto bilance vycházejí z hodnot za celý rok, kde byly poskytnuty hodnoty vstupů. Jak je již z názvu patrné, u materiálové bilance (MB) se porovnává množství vstupní veličiny, v našem případě substrátu, s výstupem v podobě fugátu a separátu. U Energetické bilance (EB) sledujeme nejen vyprodukovanou elektrickou energii, jak se může na první pohled zdát. Druhou sledovanou veličinou EB je teplo produkované kogeneračními jednotkami (KGJ).

4.3.1 Materiálová bilance

Princip MB je jednoduchý: co dovnitř vstupuje, musí vystupovat i ven. Hodnoty vstupů jsou každý den zapisovány a je snadné určit jejich denní průměr. Nejvíce zastoupenou složkou je kejda, u které je její hodnota udávána v m^3 . Pro přepočítání na kg byla použita střední hodnota 1080 kg/m^3 [21].

Průtok bioplynu (\dot{V}_{gas}) není měřenou hodnotou, ale je zde vypočítán rovnicí (1) dle průměrné produkce elektrické energie. Pro výpočet uvažujeme energii bioplynu (bp_en_{m3}) $2,25 kWh/Nm^3$ při průměrné roční produkci el. energie (P_{produk}^{el}) $10\,693 MWh/rok$.

$$\dot{V}_{gas} = \frac{P_{produk}^{el}}{bp_en_{m3}} \quad Nm^3/rok \quad (1)$$

Nyní díky výpočtu objemu plynu za normálních podmínek zjistíme hmotnostní průtok plynu (\dot{m}_{gas}), výpočet je znázorněn rovnicí (2). Důležité je zjistit podíl obsaženého metanu v bioplynu. Procentuální podíl metanu v bioplynu je závislý na vstupním substrátu, nejčastěji se pohybuje od 55 % do 70 % [22]. Hodnota metanu obsažena v našem bioplynu je měřena každý den, a její průměrná hodnota je 52,5 %. Hustota metanu (CH_4) za normální teploty a tlaku má hodnotu $0,75 kg/Nm^3$, a je tedy lehčí než vzduch [22]. Další hojně zastoupenou složkou je oxid uhličitý (CO_2). Pro hustotu bioplynu (ρ_{gas}) byla použita hodnota hustoty $1,2 kg/Nm^3$ [23]

$$\dot{m}_{gas} = \dot{V}_{gas} \cdot \rho_{gas} \quad t/rok \quad (2)$$

Dalšími vstupy jsou: kukuřičná siláž, travní senáž, hnůj a cukrovarské řízky. Průměrné roční hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 2. Součet vstupu je popsáno rovnicí (3). Opětovné využití digestátu na vstupu do fermentoru je velmi ojedinělé, a díky konstantním dodávkám kejdy není potřeba, proto jej v materiálové bilanci neuvažujeme.

Součtem všech vstupních složek získáme roční hmotnost substrátu, která prošla fermentory a koncovými sklady. Po anaerobním procesu se celková hmotnost rozdělí na digestát a bioplyn, kdy hmotnost bioplynu máme již vypočítanou. Digestát se nadále separuje v mechanickém separátoru s účinností 20 %, kdy dělí hmotnost digestátu. 80 % *fugát* a 20 % *separát* [24].

$$\dot{m}_{celk} = \dot{m}_{kuk} + \dot{m}_{trav} + \dot{m}_{hnuj} + \dot{m}_{kejda_F1} + \dot{m}_{kejda_F2} + \dot{m}_{cuk_riz} \quad t/rok \quad (3)$$

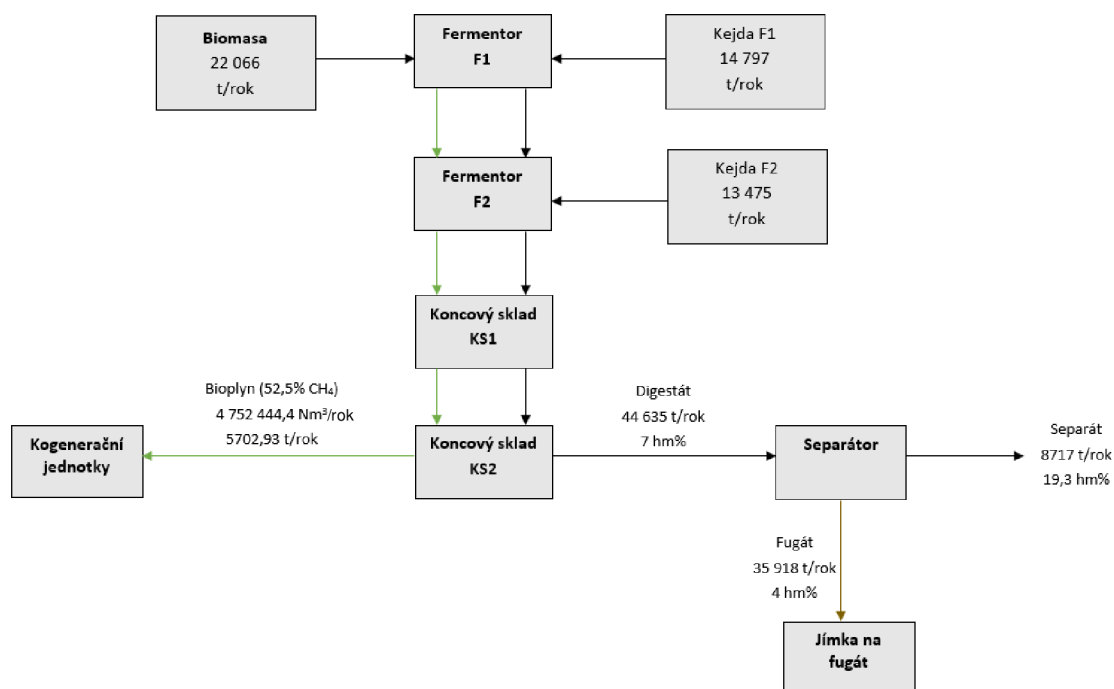
$$\dot{m}_{dig} = \dot{m}_{celk} - \dot{m}_{gas} \quad t/rok \quad (4)$$

$$\dot{m}_{fug} = \dot{m}_{dig} \cdot 0,2 \quad t/rok \quad (5)$$

$$\dot{m}_{sep} = \dot{m}_{dig} \cdot 0,8 \quad t/rok \quad (6)$$

Další hodnotou MB jsou úniky bioplynu při dopravě plynu do KGJ zapřičiněné netěsnostmi spojů a ventilů. Tyto hodnoty se dají měřit v případě, kdy máte měřicí přístroje za výstupem z fermentoru a před vstupem do KGJ. V našem případě hmotnost bioplynu uvažujeme již po malé ztrátě z fermentoru do KGJ, díky výpočtu objemu bioplynu z vyprodukované el. energie. Ztráty jsou závislé na délce potrubí, kvalitě spojů a ventilů. Hodnota ztrát oproti vyprodukovanému množství bioplynu se pohybuje okolo 0,3 % [25].

Vypočítané hodnoty a hmotnostní tok skrze komponenty BPS jsou znázorněny na Obr. 4.8.



Obr. 4.8 Schéma materiálové bilance bioplynové stanice

4.3.2 Energetická bilance

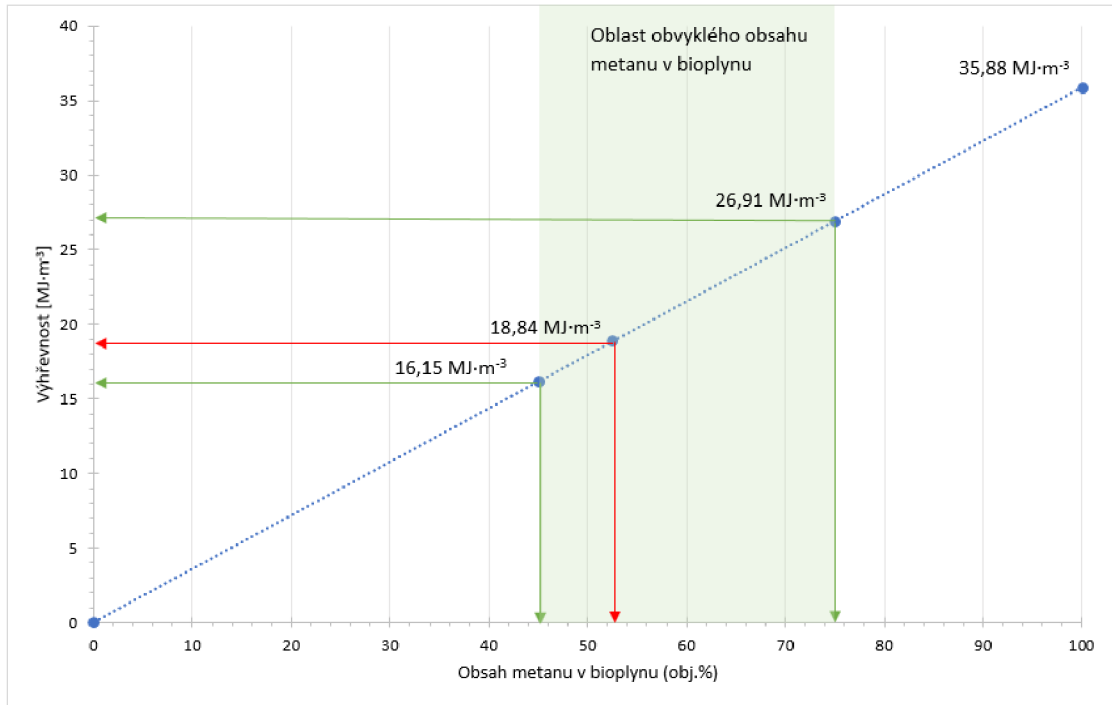
Jak bylo již výše zmiňováno, EB pozoruje jak produkci elektrické energie, tak i energii tepelnou. Produkce, prodej a spotřeba elektrické energie je zaznamenána pomocí elektroměrů. Průměrné hodnoty za rok 2019 nalezneme v Tab. 3. Pro měření toku tepla do fermentorů je zde umístěn měřicí přístroj, který nezaznamenává hodnoty, ale zobrazuje je pouze v reálném čase. Pro hodnoty využití tepla byly použity průměrné teploty, které se zde v průběhu roku objevovaly, ty jsou vyobrazeny v Tab. 4.

Výpočet průměrné roční spotřeby tepla pro fermentory (\dot{Q}_{th_ferm}) a vepřín (\dot{Q}_{th_vepr}) jsou popsány v rovnicích (7) a (8), kdy je hodinová spotřeba vynásobená (RF) ročním fondem pracovní doby 8760 h/rok. Jsou to pouze

orientační hodnoty. Zde lze vzhledem k použitým vstupům předpokládat největší odchylky ve výpočtu EB.

$$\dot{Q}_{th_ferm} = \bar{Q}_{th_ferm} \cdot RF \quad MWh/rok \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{th_vepr} = \bar{Q}_{th_vepr} \cdot RF \quad MWh/rok \quad (8)$$



Graf 1 Výhřevnost bioplynu v závislosti na obsahu metanu; převzato z [26] a upraveno

Důležitým prvkem je určit energii obsaženou v bioplynu. Výhřevnost (H_{gas}), tedy energie obsažená v objemu, je lineární závislost na obsahu metanu v bioplynu, jak vyobrazuje Graf 1. Hodnoty jsou uvedeny za atmosférického tlaku a při teplotě 15 °C [26]. Hodnota výhřevnosti byla určena 18,84 MJ/m³.

Pro výpočet energie bioplynu (E_{gas}) je použita rovnice (9), kdy objem bioplynu známe již z MB.

$$E_{gas} = \dot{V}_{gas} \cdot H_{gas} \quad MWh/rok \quad (9)$$

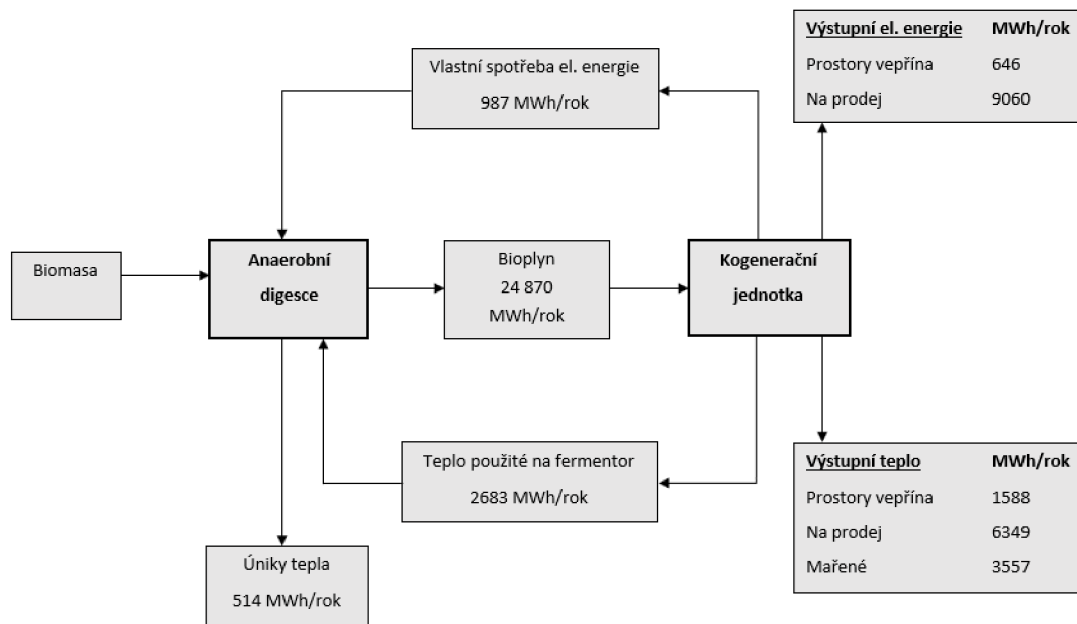
Průměrná hodnota tepelné energie (E_{th}) je vypočítaná dle tepelné účinnosti motoru (η_{th}) její hodnota je 1212 kWh. Výpočet je popsán rovnicí (10). Hodnoty výstupů a účinností motorů nalezneme v Tab. 5.

$$E_{th} = E_{gas} \cdot \eta_{th} \quad MWh/rok \quad (10)$$

Teplo mařené při procesu spalování (E_{disip}) dopočítáme pomocí celkové účinnosti (11). Ověření provedeme součtem výstupní el. energie, tepelné energie a mařené tepelné energie, kdy dostaneme energii obsaženou v bioplynu.

$$E_{disip} = E_{gas} \cdot (1 - \eta_{celk}) \quad MWh/rok \quad (11)$$

V EB uvažujeme i tepelné úniky, které je velice obtížné určit číselně. Ztráty jsou zapřičiněny přenosem tepla na teplovodním potrubím, výměnících tepla atd. Hodnota použitá ve schématu Obr. 4.9 je převzatá ze 4x menší BPS [25]. Nicméně se nejedná o důležitou hodnotu pro návrh odparky.



Obr. 4.9 Schéma energetické bilance bioplynové stanice

5. Návrh integrace odpařovací jednotky do BPS

Na návrh odparky musíme mít širší pohled. Nelze vycházet pouze z technických parametrů. Existuje mnoho proměnných, které výsledky ovlivňují (produkce a sušina fugátu, výstupní teplo KGJ, požadovaná produkce destilátu, využití destilátu atd.), ale i parametry ekonomické (výše investice, výkupní tarify za elektřinu, provozní a servisní náklady, úspora na dopravě atd.) [18]. Jsou zde vlivy, které těžko do návrhu můžeme zahrnout, a to právní či společenské. Mezi právní parametry patří podmínky nitrátové směrnice č. 277/2020 Sb. [28], povolení k provozu atd. Transport fugátu na pole může ovlivňovat komfort obyvatel blízkých obydlí. Při nižší produkci kapalné složky je snížena i potřeba transportu.

Tato kapitola řeší integraci odparky s ohledem na technické parametry. Ekonomické zhodnocení je představeno v kap. 6. Pro výpočet uvažujeme tyto podmínky:

- Celý objem digestátu je zpracováván separátorem a je dělen na separát a fugát.
- Vyprodukovaná elektrická energie je využívána pro chod procesu fermentace BPS a vepřína.
- Teplo z KGJ je využíváno pro ohřev fermentoru, vytápění vepřína a ohřev vody pro odborný léčebný ústav Albertinum.
- Vstupní biomasa je získána z vlastních zemědělských a živočišných produkcí.
- Fugát je skladován v nádržích s míchadly zabraňujícími osazování pevné složky.

5.1 Výběr odparky a její zasazení do technologického procesu

Ve 2. kapitole byly již zmíněny metody odpařování. Pro BPS Žamberk byla vybrána odparka typu MSF, jejíž užití v oblasti úpravy fugátu není obvyklé. Výběr typu odparky vychází z dizertační práce Ph.D. Marka Vondry, kde v porovnání s ostatními typy je teplosměnná plocha nejnižší, a díky tomu konstrukčně levnější. Dalším rozhodujícím faktorem je teplo potřebné na ohřev fugátu. MSF odparka je zajímavá svojí konstrukcí, kdy využívá recirkulát (REC) jako chladicí kapalinu, tím se ohřívá a snižuje tak nároky na ohřev v tepelném výměníku. Jak bylo již zmíněno, využití tepla je v BPS Žamberk na vysoké úrovni především v zimě, kdy je vytápěn areál nedalekého Albertina, zatímco v létě je toto teplo mařeno ve vzduchových chladičích.

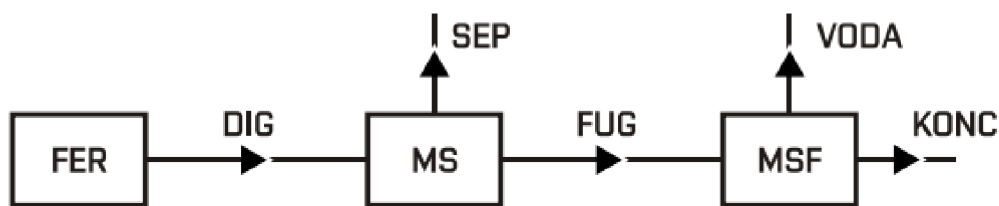
Umístění MSF odparky do procesu musí dávat smysl především z technického hlediska. Odparka musí být umístěna za mechanický separátor, který z digestátu odebere větší částice, které by odparku zanášeli a usazovali se.

Při použití MSF odparky musíme uvažovat recirkulaci kapaliny. Na jeden průchod skrze odparku nelze dosáhnout požadovaného množství sušiny v koncentrátu [18]. Přehled výhod a nevýhod konkrétních zapojení (Tab. 7), vychází z dizertační práce Ph.D. Marka Vondry.

Tab. 7 Možnosti zapojení MSF odparky do systému; převzato a upraveno [18]

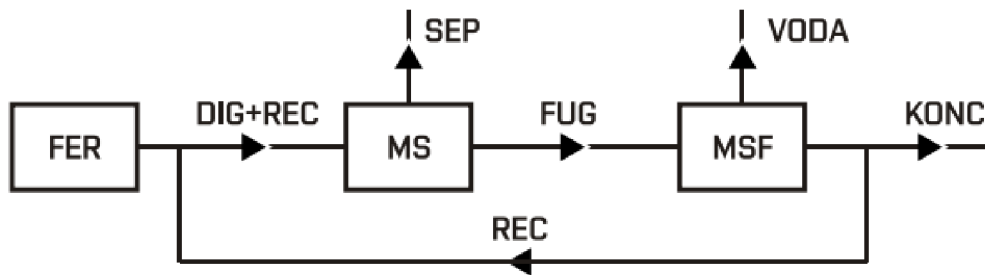
Název	Obrázek	Výhody	Nevýhody
Bez recirkulace koncentrátu	Obr. 5.1	<ul style="list-style-type: none"> Jednodušší konstrukční řešení odparky 	<ul style="list-style-type: none"> Nízké průtoky Nedostatečné zahuštění
Recirkulace před MS	Obr. 5.2	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké průtoky 	<ul style="list-style-type: none"> Nedostatečné zahuštění Dodatečná zátěž pro MS
Úplná recirkulace před MS	Obr. 5.3	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké průtoky Potenciál pro vyšší redukci objemu 	<ul style="list-style-type: none"> Dodatečná zátěž pro MS Nutná úprava MS
Recirkulace za MS	Obr. 5.4	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké průtoky Dostatečné zahuštění Bez dodatečné zátěže pro MS 	<ul style="list-style-type: none"> Složitější konstrukční řešení odparky

Zapojení bez recirkulace koncentrátu je zobrazeno na Obr. 5.1. Jedná se o konstrukčně jednoduché zapojení vhodné pro malé průtoky fugátu a úroveň zahuštění je nedostačující.



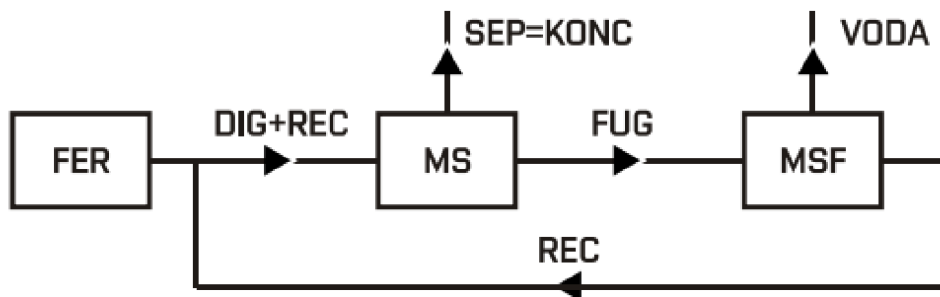
Obr. 5.1 Bez recirkulace koncentrátu; převzato [18]

Jako druhou možností zapojení se nabízí vedení recirkulátu před mechanický separátor Obr. 5.2. Výhodou zapojení jsou vysoké průtoky, ale se zvýšenou dodatečnou zátěží na mechanický separátor. Mísení recirkulátu a digestátu před mechanickým separátorem má za následek nedostatečné zahuštění koncentrátu.



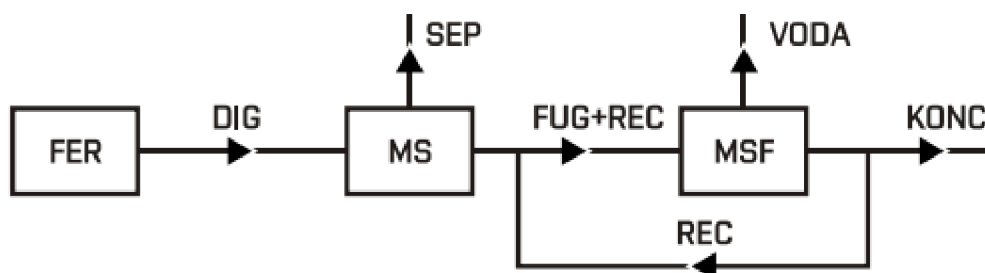
Obr. 5.2 Recirkulace koncentrátu před mechanický separátor; převzato [18]

Třetí možností zapojení zobrazena na Obr. 5.3 je využití celého výstupu z MSF odparkou jako recirkulátu, který je přiváděn před mechanický separátor. Výhodou zapojení jsou vysoké průtoky odparkou a možnosti vyšší redukce objemu. Nevýhodou jsou zvýšená zátěž mechanického separátoru a jeho nutná úprava na získání koncentrátu.



Obr. 5.3 Úplná recirkulace koncentrátu před mechanický separátor; převzato [18]

Čtvrtou možností je přívod recirkulátu za mechanický separátor zobrazenou na Obr. 5.4. První výhodou oproti variantě 2 a 3 je žádná dodatečná zátěž pro mechanický separátor a žádné další nutné úpravy. Další výhody jsou velké průtoky odparkou a jejich dostatečné zahuštění. Nevýhodou se může jevit složitější konstrukční uspořádání oproti variantě 1.



Obr. 5.4 Recirkulace koncentrátu za mechanický separátor; převzato [18]

Využití proudění recirkulátu před mechanický separátor má za následek jeho dodatečné zatížení. Proudění recirkulátu lze uvažovat za vyšší jak $35 \text{ m}^3/\text{h}$, odhad byl učiněn díky 2,7x vyšší produkci fugátu oproti výpočtovému modelu

Ph.D. Marka Vondry [18]. Provozní hodnoty proudění separátorem *S 855* uváděné výrobcem jsou $15 - 25 \text{ m}^3/\text{h}$ [24]. Je tedy zřejmé, že současný separátor by byl nevyhovující, a koupě druhého nebo výkonnějšího separátoru by značně zvyšovala počáteční investici. Další nevýhodou zapojení je zvýšená spotřeba energie pro čerpání vyšších objemů kapaliny a počáteční investice pro větší průměry potrubí. Proto se preferovanou variantou jeví proudění recirkulátu za mechanický separátor, který se nemusí měnit a je dostačující.

5.2 Metoda zpracování destilátu

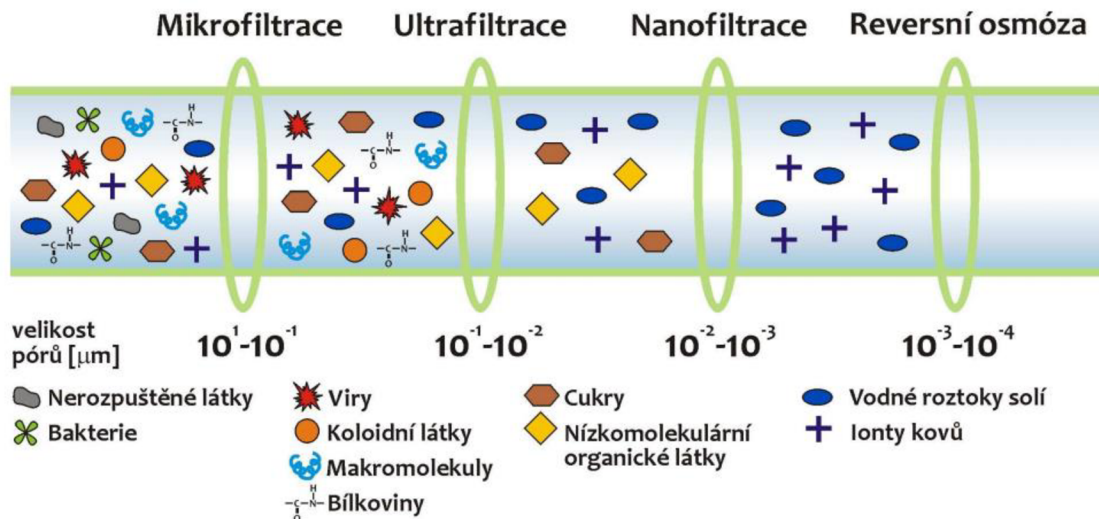
Destilát vycházející z MSF odparky není dostatečně čistý, aby se mohl vypouštět do povrchových vod, použít na oplach zemědělských zvířat nebo jako technická voda. Ve složení se nachází vyšší než dovolené množství amoniaku, a tvoří tak roztok hydroxidu amonného, lidově čpavková voda [29]. Způsobů na úpravu čpavkové vody je více. Zde si popíšeme technologie, které jsou vhodné s ohledem k zamýšlené aplikaci v BPS. V BPS nenalezneme přímé využití technické vody, a proto bude vypouštěna do povrchových vod. Popisované technologie jsou v principu rozdílné, ale všechny mají stejný účel. Čpavkovou vodu čistí a přetváří na čistou vodu s technickým využitím, přičemž vedlejším produktem je roztok síranu amonného (RSA). RSA má své využití v zemědělství, a to v podobě dusíkatého hnojiva, vhodného pro všechny plodiny na neutrálních půdách. Díky pomalejší nitrifikaci oproti jiným hnojivům je vhodnější pro použití na podzim [30]. Představíme si metody membránové filtrace, stripování amoniakem a reakce amoniaku a kyseliny sírové.

Membránová filtrace

Membránová filtrace využívá principu proudění kapaliny skrze membránu díky gradientu tlaku. Větší částice nežli póry jsou zachytávány. Menší částice membránu prochází. Podle velikosti pórů můžeme filtraci dělit na mikrofiltraci (velikost pórů $> 0,1 \mu\text{m}$), ultrafiltraci (velikost pórů $0,1 - 0,01 \mu\text{m}$), nanofiltraci (velikost pórů $0,01 - 0,001 \mu\text{m}$) a reverzní osmózu (RO) (velikost pórů $< 0,001 \mu\text{m}$). Jak je z rozsahu velikosti pórů zřejmé, nejlepší membránovou filtraci získáme pomocí RO.

RO se běžně využívá při odsolování mořské vody za tlaku ($5 - 8 \text{ MPa}$) [31]. Díky mimořádně jemné membráně projdou pouze čisté molekuly vody, cca 95 % ostatních látek (bakterie, viry, těžké kovy, proteiny, olejové emulze, nízkomolekulární látky atd.) neprojdou a jsou odfiltrovány [31], [32]. Před filtrací pomocí RO je potřeba destilát předfiltrovat. První filtrace bývá mechanická nebo uhlíková, kdy jsou zachyceny větší nečistoty, jež by měly za následek rychlé zanášení RO nebo dokonce její poškození. Proto je RO většinou vícestupňová a je tvořena pomocí několika filtrů, jak je znázorněno na Obr. 5.5. Voda filtrovaná pomocí RO je natolik čistá, že je podobná vodě destilované [31].

Proces reverzní osmózy je zcela ekologický a není potřeba žádná dodatečná chemie [34]. Nevýhodou je ucpávání pórů membrány, to vede k nutnosti pravidelné údržby. Náklady na provoz reverzní osmózy se pohybují okolo 0,31 Kč/litr [34]. Cena je oproti ostatním úpravám vyšší, to je zapříčiněno potřebou kvalitních a výkonných čerpadel zajišťující vysoké tlaky, které jsou při RO potřeba.



Obr. 5.5 Vícestupňová filtrace; převzato [33]

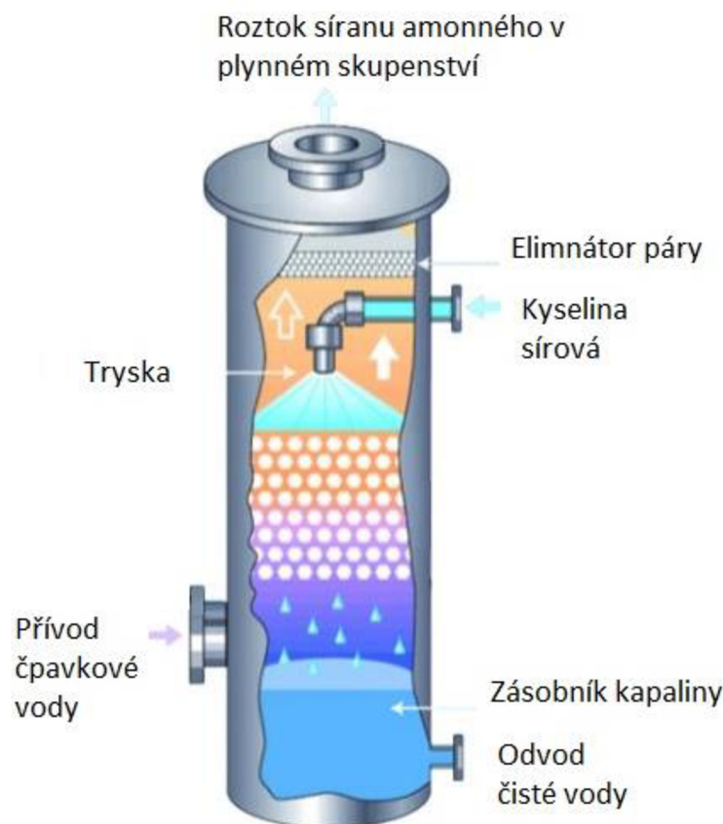
Stripování amoniaku

Jedná se o proces, kdy do znečištěné kapaliny vháníme proud plynné látky, nejčastěji vzduch nebo vodní páru. Molekuly znečišťujících těkavých látek přecházejí z kapalného do plynného skupenství [35]. Při zpracování čpavkové vody lze zvýšit účinnost změnou pH a nárůstem teploty procesu. Nárůst teploty má za následek vyšší spotřebu energie, a tím i cenu procesu. Změna pH ovlivňuje formu, ve které bude amoniak stripován. Žádoucí je vyšší pH, kdy se amoniak uvolňuje ve formě molekul NH_3 , a tvoří tak plynnou fázi. Optimální hodnota pH z pohledu účinnosti a nákladů pro zvyšování pH vápnem je 10,5 [35]. Po stripování následuje proces absorpce amoniaku kyselinou sírovou. Tato varianta úpravy destilátu vyžaduje více tepla než varianty ostatní, a proto není vhodná pro BPS Žamberk.

Reakce amoniaku a kyseliny sírové

Využití čističek amoniaku je velmi rozšířené v potravinářském, farmaceutickém průmyslu, nebo při výrobě hnojiv. Destilát vychází z odparky v plynné formě vodní páry a amoniaku. Proud páry a amoniaku protéká dnem čistící věže, ve které se rozprašuje roztok z trysek, jak je zobrazeno na Obr. 5.6. Tento chemický roztok je pečlivě vybrán, tak aby reagoval s amoniakem ve vodní páře, velmi často se používá 93% kyselina sírová (H_2SO_4) [36]. I když amoniak není nebezpečnou látkou znečišťující ovzduší, je regulován. Roztok síranu amonného odchází v plynné podobě vrchní částí čistící věže, kde kondenzuje do skupenství kapalného [37].

Výhodou použití čističe amoniaku je jeho univerzálnost, výroba roztoku síranu amonného, procesu nevadí vysoké teploty vodních par, nízké náklady na pořízení. Nevýhoda je vyšší riziko koroze a použití chemikálií.



Obr. 5.6 Schéma čistící věže; převzato a upraveno [38]

Na úpravu čpavkové vody bylo vybráno zařízení využívající reakce amoniaku s kyselinou sírovou. Výhodou oproti stripování je nižší spotřeba tepla, která je u BPS Žamberk rozhodující. Oproti reverzní osmóze není potřeba měnit filtrační membrány a údržba je díky tomu jednodušší. Další výhodou jsou nižší pořizovací i provozní náklady. Ve všech případech je potřeba použití kyseliny sírové.

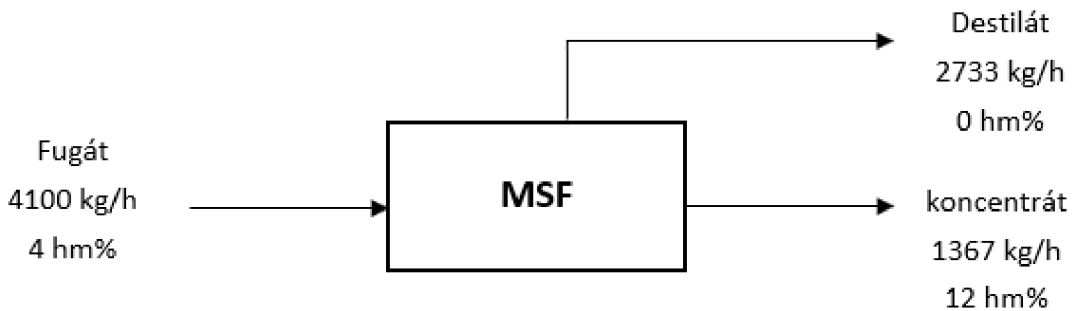
5.3 Integrace odparky

Cílem bakalářské práce není přesné určení všech technologických parametrů odparky. Pro detailní výpočet slouží iterační výpočet, který je poměrně rozsáhlý a zohledňuje velké množství parametrů, které jej ovlivňují. Pro určení průtoku destilátu je důležité určení průtoku koncentráту. To vychází z hmotnostní bilance sušiny, kdy uvažujeme že se hmotnost sušiny vlivem odpaření nemění. Pro následné technicko-ekonomické zhodnocení je potřeba určit zejména hmotnostní průtoky destilátu, koncentráту a jejich obsah sušiny. Hmotnostní tok a sušinu fugátu jsme stanovili na základě materiálové bilance (viz kap. 4.3.1.), obsah sušiny v koncentráту x_{konc} je zvolen 12 kg/kg . Koncentrace sušiny byla volena s ohledem na vlastnosti koncentráту, při vyšším zahuštění se zvyšuje viskozita a negativně ovlivňuje schopnost tečení a tím i vyšší příkony čerpadel [18]. Pomocí hmotnostní bilance, kdy uvažujeme 0 kg/kg sušiny v destilátu,

získáme rovnici pro výpočet hmotnostního průtoku koncentrátu (12). Na výpočet hmotnostního toku destilátu byla použita hmotnostní rovnice (13), kdy hmotnost nekondenzujících plynů zanedbáváme. jedná se o plyny nasáté při separaci vlivem netěsnosti. Materiálová bilance MSF odparky je znázorněna na Obr. 5.7.

$$\dot{m}_{konc} = \frac{\dot{m}_{fug} \cdot x_{fug}}{x_{konc}} \quad \text{kg/h} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{dest} = \dot{m}_{fug} - \dot{m}_{konc} \quad \text{kg/h} \quad (13)$$



Obr. 5.7 Schéma materiálové bilance MSF odparky

Pro určení parametrů odparky je důležitá znalost produkce destilátu. Z uvedeného hmotnostního průtoku destilátu **2733 kg/h** vyplývají tyto klíčové parametry pro návrh odparky: Měrná teplosměnná plocha (sA) o hodnotě **69,7 m²/m³_{dest}**, měrné potřebné teplo (sP_{th}) s hodnotou **243 kWh/m³_{dest}** a měrná elektrická energie na provoz čerpadel a vývěvy (sP_{el}) **14 kWh/m³_{dest}**. Hodnoty byly odečteny z grafů výpočtového modelu Ph.D. Marka Vondry a jsou vztahované na obsah sušiny v koncentrátu 12 kg/kg [18]. Výpočty konkrétních hodnot jsou popsány rovnicemi (14) až (16).

$$A = \dot{m}_{dest} \cdot sA \quad \text{m}^2 \quad (14)$$

$$P_{th} = \dot{m}_{dest} \cdot sP_{th} \quad \text{kWh/hod} \quad (15)$$

$$P_{el} = \dot{m}_{dest} \cdot sP_{el} \quad \text{kWh/hod} \quad (16)$$

Tímto byly získány parametry odparky, které jsou potřebné pro technicko-ekonomické zhodnocení a lze je následně použít při návrhu odparky.

6. Technicko-ekonomické zhodnocení

Tato kapitola pojednává o celkové návratnosti integrace odparky do BPS Žamberk. Blíže si popíšeme předpokládané náklady spojené s instalací a provozem odparky i očekávané výnosy, které integrace může přinést. Výpočty jsou vztahované k hmotnostnímu toku fugátu, který již známe z kap. 4.3.1 a zohledňují procesy, které jsou přímo ovlivněny technologií MSF odparky. Výpočet vychází z hodnot uvedených v Tab. 6. [37]. Zvolené hodnoty vycházejí z konzultace s majitelem BPS a kolegou Markem Vondrou.

Tab. 8 Zvolené hodnoty a jejich rozsahy pro technicko ekonomického zhodnocení

Název	Značka	Rozsah	Zvoleno	Jednotky
Energetická konstanta systému chlazení	$sPCE_{chl}^{el}$	5 ÷ 15	10	W/kWh
Energetická konstanta míchadla	$\Delta sPCE_{mich}^{el}$	-3 ÷ 6	2	W/kW
Energetická konstanta odpařovacího systému	$sPCE_{odpar}^{el}$	8 ÷ 25	14	kWh/t
Cena za chemikálie	sP_{chem}	0 ÷ 104	26	Kč/t
Cena za dopravu	$sV\dot{Y}N_{konc}^{dopr}$		80	Kč/t /100km
Prodejní cena koncentráту	$sV\dot{Y}N_{konc}^{prod}$	20 ÷ 130	52	Kč/m ³
Prodejní cena RSA	$sV\dot{Y}N_{RSA}^{prod}$	260 ÷ 780	780	Kč/t
Produkce RSA	$s\dot{m}_{RSA}$	25 ÷ 35	30	kg/t
Koeficient údržby	$k_{údr}$	5 ÷ 15	6	%
Roční fond pracovní doby	RF		8760	h/rok

Určení počáteční investice do odparky není jednoduché, jelikož se jedná o odparku, která prozatím není vyráběná. Cenu by šlo ovšem odhadovat z MSF odparek na odpaření slané vody. Proto jsou výsledky směřovány k měrné ceně potřebné pro úpravu tuny fugátu ($sINV$). Tato hodnota vychází z ceny celkové investice (INV) podělenou hmotnostním průtokem fugátu za rok (\dot{m}_{fug}). Jedná se o hodnotu, kterou výrobci poskytují u svých odparek a pohybuje se v rozmezí $\left(260 - 1000 \frac{Kč \cdot rok}{t_{fug}}\right)$. Přičemž hodnotu této proměnné ovlivňuje účinnost odpařovacího systému. V případě výsledných hodnot nižších, jak hodnoty udávané výrobcem, se integrace do provozu BPS nevyplatí. Nyní si určíme dvě varianty výpočtu ($sINV$). V jedné nebudeme uvažovat prodej tepla v zimním období a ve druhé variantě jej uvažovat budeme. Postup bude totožný, jen u varianty, kde prodej uvažujeme dáme do výdajů i ušlý zisk. Teplo, které bude použito na chod odparky, by se jinak mohlo prodat.

6.1 Náklady v důsledku integrace odparky

Základní provozní náklady odparky tvoří spotřeba el. energie, cena chemikálií pro úpravu čpavkové vody a náklady na servis a údržbu v průběhu celé životnosti odparky. Pro provoz odparky je důležitá tepelná energie, která ekonomiku neovlivňuje, protože využíváme teplo produkovaná KGJ, které by bylo jinak mařeno.

Spotřeba el. energie

Hlavním parametrem ovlivňující spotřebu el. energie je energie vyžadovaná na systém odpařování. Zde jsou uvažovány čerpadla na rozvod kapaliny v systému, vývěvy na snížení tlaku v komorách atd. Toto navýšení spotřeby energie (17) je závislé na hmotnostním průtoku fugátu a energetické konstantě odparky ($sPCE_{odpar}^{el}$) [37].

$$PC_{odpar}^{el} = sPCE_{odpar}^{el} \cdot \dot{m}_{fug} \quad kWh/hod \quad (17)$$

Druhým parametrem ovlivňující spotřebu el. energie je provoz chladících zařízení. Ty ochlazují poslední stupně MSF odparky, za zvýšením účinnosti systému. Tento provoz je závislý na teple využívaném pro ohřev fugátu (P_{th}) a energetickou konstantou ($sPCE_{chl}^{el}$) [37]. Výpočet spotřeby el. energie pro chladící zařízení popisuje rovnice (18).

$$PC_{chl}^{el} = sPCE_{chl}^{el} \cdot P_{th} \quad kWh/hod \quad (18)$$

Pro skladování koncentrátu je zapotřebí menší objem skladovacích nádrží. oproti skladování fugátu je zde ale zapotřebí vyšší spotřeba el. energie pro provoz míchadel. Míchadla zabraňují usazování pevné části fugátu na dně skladovací nádrže. Vyžadovaná vyšší spotřeba je zapříčiněná vyšší koncentrací sušiny, a tudíž i vyšší viskozitou oproti fugátu. Navýšení spotřeby je závislé na produkci el. energie BPS a energetické konstantě míchadla ($\Delta sPCE_{mich}^{el}$), kdy záporné hodnoty jsou pro BPS, které mají pouze jednu skladovací nádrž fugátu [37]. Výpočet popisuje rovnice (19).

$$\Delta PC_{mich}^{el} = \Delta sPCE_{mich}^{el} \cdot P_{produk}^{el} \quad kWh/hod \quad (19)$$

Tab. 9 Předpokládána spotřeba el. energie na provoz odparky

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Spotřeba elektřiny na systém odpařování	PC_{odpar}^{el}	57,4	kWh/hod
Spotřeba elektřiny na provoz chlazení	PC_{chl}^{el}	6,6	kWh/hod
Změna spotřeby elektřiny na provoz míchadel	ΔPC_{mich}^{el}	2,4	kWh/hod

Z hodnot v Tab.9 je zřejmé, že největší spotřebu el. energie má systém na odpařování. Tuto hodnotu lze ovlivnit lepší těsností systému, nebo použitím čerpadla a vývěvy s nižší hodnotou měrné energie (J/kg).

Součet spotřeby el. energie popisuje rovnice (20).

$$\Delta NÁK_{el} = \Delta PC_{odpar}^{el} + \Delta PC_{mich}^{el} + PC_{chl}^{el} \quad kWh/hod \quad (20)$$

Elektrická energie vyprodukovaná BPS není použita na provoz odparky. Výhodnější se jeví varianta prodeje vyráběné el. energie a nákup el. energie ze sítě. Ceny nákupu (PE_{el}^{kup}) se pohybují okolo $1,4 K\check{c}/kWh$. Přičemž prodejní cena je závislá na zelené dotaci, a pohybuje se okolo $4,1 K\check{c}/kWh$. Pro výpočet roční ceny elektřiny na provoz odparky byla použita rovnice (21).

$$NÁK_{el}^{rok} = \Delta NÁK_{el} \cdot PE_{el}^{kup} \quad K\check{c}/rok \quad (21)$$

Spotřeba chemikálií

Chemikálie se využívají na úpravu čpavkové vody a jsou nezbytnou součástí výdajů. Jejich cena je závislá na použité technologii. Vhodnou a levnou variantou se jeví použití kyseliny sírové. Lze použít i kyselinu dusičnou, která je ale dražší. V úvahu musíme brát i pění v procesu odpařování, jenž je závislé na použité technologii. Pění může být omezeno mechanickým narušením, což ale vede k vyšší počáteční investici. Problematika pění si může žádat další chemické vstupy na její potlačení. Cena kyseliny sírové a přípravku proti pění za rok vychází z hmotnostního průtoku fugátu (\dot{m}_{fug}) a jejich předpokládané ceny vztahované k průtoku fugátu (sP_{chem}) [37]. Roční výdaje za chemikálie popisuje rovnice (22). Hodnota ročního fondu pracovní doby (RF) je $8760 h/rok$.

$$NÁK_{chem}^{rok} = sP_{chem} \cdot \dot{m}_{fug} \cdot RF \quad K\check{c}/rok \quad (22)$$

Výdaje na údržbu

Výdaje na údržbu jsou určovány z počáteční investice do MSF odparky ($k_{údr}$). Výpočet ročních nákladů na údržbu je popsán rovnicí (23), kdy se jedná o součin koeficientu údržby ($k_{údr}$) a počáteční investice (INV), podělené dobou návratnosti (DN). Jak bylo již zmíněno, výpočet je směřován k ceně potřebné na úpravu fugátu s ohledem na dobu návratnosti. Jelikož. Volba koeficientu údržby je založena na nízké potřebě údržby při použití úpravy fugátu pomocí reakce kyseliny sírové s amoniakem.

$$NÁK_{údr}^{rok} = \frac{k_{údr} \cdot INV}{DN} \quad K\check{c}/rok \quad (23)$$

Tab. 10 Předpokládané roční náklady na provoz odparky

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Cena elektřiny za rok na provoz odparky	$NÁK_{el}^{rok}$	815351	Kč/rok
Cena chemikálií za rok na provoz odparky	$NÁK_{chem}^{rok}$	933816	Kč/rok
Předpokládaná cena údržby za rok	$NÁK_{údr}^{rok}$	29509	Kč/rok

Z Tab. 10 je zřejmé, že výdaje na provoz odparky jsou především ovlivněny cenou chemikálií. Cenu by bylo možné snížit například nasmlouváním lepších podmínek při odběru většího množství chemikálií. Předpokládaná cena za roční údržbu byla zpětně dopočítaná ze získané investice s uvažovanou dobou návratu 10 let.

6.2 Ekonomické přínosy integrace odparky

Hlavním přínosem odparky je snížení objemu fugátu se zachováním živin, to vede ke koncentrovanému výstupu. Koncentrát se musí převážet na pole, a právě úspora na přepravě koncentráту je prvním/hlavním ekonomickým přínosem integrace odparky. Dalšími potenciálními příjmy jsou prodej roztoku síranu amonného a navýšení prodejní ceny koncentráту.

Úspora na dopravě

Náklady na přepravu jsou nižší v důsledku transportu koncentráту. Cena za přepravu digestátu byla určena ze studie poskytnuté majitelem BPS [39]. Pro převoz fugátu po zpevněné komunikaci jsou užívány především vozidla Tatra Phoenix. Výpočet vychází z průměrné vzdálenosti mezi BPS a zemědělským objektem, a z rozdílu hmotnostního toku fugátu a koncentráту. Průměrná vzdálenost (VZD_{konc}^{dopr}) je uvažována 10 km. Roční úsporu na dopravě popisuje rovnice (24).

$$VÝN_{dopr}^{rok} = VZD_{konc}^{dopr} \cdot \frac{sVÝN_{konc}^{dopr}}{100} \cdot RF \cdot (\dot{m}_{fug} - \dot{m}_{konc}) \quad Kč/rok \quad (24)$$

Výnos z prodeje koncentráту

Dalším zdrojem příjmů je prodej koncentráту, jenž má oproti fugátu nižší objem při zachování stejných výživových hodnot. Můžeme tedy předpokládat, že cena je přímo úměrná k objemu [37]. Pro výpočet objemového průtoku kapaliny je zapotřebí zjistit hustotu kapaliny, jež byla zjištěna z rovnice (25). Objemový průtok kapaliny (\dot{V}_i) je popsán rovnicí (26). Výpočet ročního výnosu za koncentrát ($VÝN_{konc}^{rok}$) je popsán v rovnici (27) a vychází z rozdílu objemů kapalin a prodejní ceny koncentráту ($sVÝN_{konc}^{prod}$).

$$\rho_i = 4,81 \cdot x_i + 1026,2 \quad kg/m^3 \quad (25)$$

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{m}_i}{\rho_i} \quad m^3/h \quad (26)$$

$$V\dot{Y}N_{konc}^{rok} = sV\dot{Y}N_{konc}^{prod} \cdot RF \cdot (\dot{V}_{fug} - \dot{V}_{konc}) \quad K\check{c}/rok \quad (27)$$

Výnos z prodeje roztoku síranu amonného

Jak bylo již zmíněno, roztok síranu amonného je vedlejším produktem při úpravě čpavkové vody. Lze jej využít jako hnojivo, a tím i snižovat pH půdy, což je žádoucí. Roztok můžeme využívat na hnojení, a tím ušetřit na nákupu hnojiv. Přičemž přebytečné množství, které nevyužijeme na vlastní hospodaření, můžeme prodávat, a zvýšit tak výnos. Produkce roztoku ($s\dot{m}_{RSA}$) je závislá na použité technologii úpravy čpavkové vody a hmotnostním průtokem fugátu [37]. Prodejní cena roztoku ($sV\dot{Y}N_{RSA}^{prod}$) se může lišit s ohledem na poptávku lokálních zákazníků. [37]. Výpočet ročního výnosu z prodeje roztoku je popsán v rovnici (28).

$$V\dot{Y}N_{RSA}^{rok} = sV\dot{Y}N_{RSA}^{prod} \cdot s\dot{m}_{RSA} \cdot \dot{m}_{fug} \cdot RF \quad K\check{c}/rok \quad (28)$$

Tab. 11 Předpokládané roční výnosy

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Úspora na přepravě koncentráту	$V\dot{Y}N_{dopr}^{rok}$	191550	$K\check{c}/rok$
Výnos z prodeje koncentráту	$V\dot{Y}N_{konc}^{rok}$	1212097	$K\check{c}/rok$
Výnos z prodeje roztoku síranu amonného	$V\dot{Y}N_{RSA}^{rok}$	840434	$K\check{c}/rok$

Z Tab. 11 je zřejmé, že největší výnosy plynou z prodeje koncentráту, tato hodnota se dá měnit pouze navyšováním prodejní ceny. Úspora na přepravě koncentráту je nižší z důvodu nízké přepravní vzdálenosti. Při zvýšení přepravní vzdálenosti na 35 km se dostáváme již k úspoře téměř 700 tis. za rok.

6.3 Návratnost

Návratnost nebo také doba návratnosti (DN) je obecně uvažovaná doba, za jak dlouho jsou úspory získané z provozu systému rovny počáteční investici. Jedná se o podíl investice (INV) a rozdílu celkového výnosu a nákladů, jak je popsáno rovnicí (29).

$$DN = \frac{INV}{\Delta V\dot{Y}N - \Delta N\dot{A}K} \quad rok \quad (29)$$

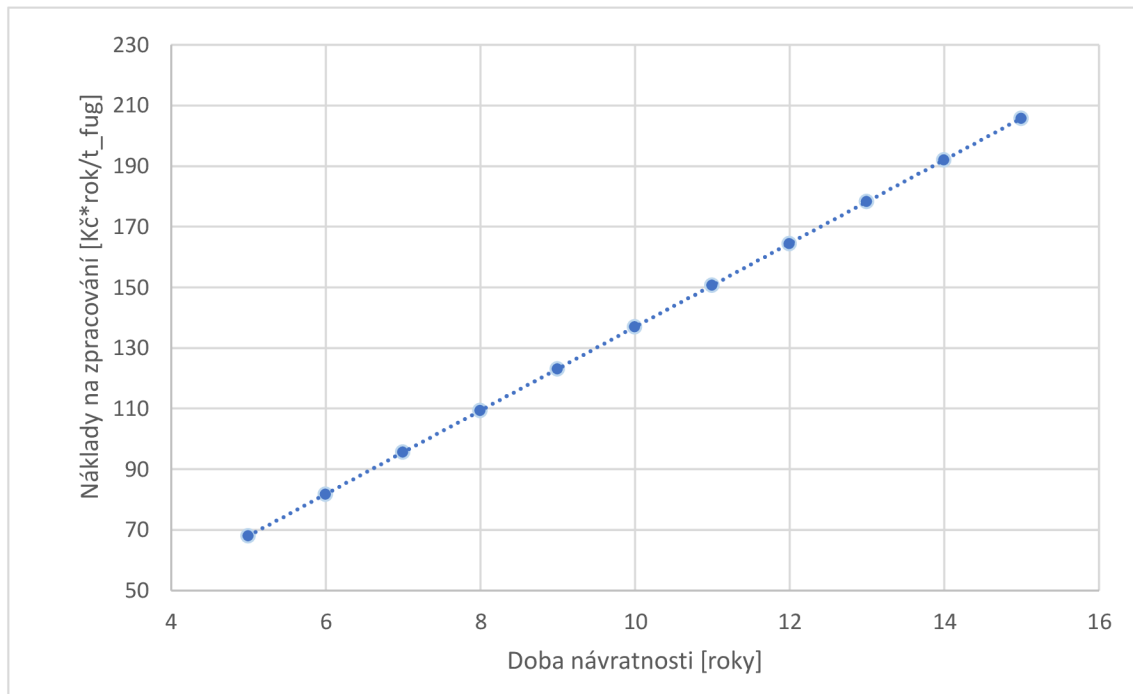
Cena potřebná pro úpravu fugátu za rok s ohledem na dobu návratnosti ($sINV$) byla počítána pro dobu v rozmezí 5–15 let, jak je popsáno rovnicí (30).

$$sINV = \frac{DN \cdot (V\acute{Y}N_{dopr}^{rok} + V\acute{Y}N_{konc}^{rok} + V\acute{Y}N_{RSA}^{rok} - N\acute{A}K_{el}^{rok} - N\acute{A}K_{chem}^{rok})}{\dot{m}_{fug} \cdot RF \cdot (1 + \frac{k_{\acute{u}dr}}{DN})} \cdot \frac{K\check{c} \cdot rok}{t_{fug}} \quad (30)$$

Pro výpočet celkové investice slouží rovnice (31), kdy za hodnoty hmotnostního průtoku fugátu (\dot{m}_{fug}) dosazujeme v jednotkách t/rok .

$$INV = sINV \cdot \dot{m}_{fug} \quad K\check{c} \quad (31)$$

Výsledky vyobrazené v Grafu 2 neuvažují s prodejem tepla. Představují tak mnohem více zastoupenou situaci v ČR, kdy teplo vyrobené KGJ není nadále ve větší míře využíváno, a je mařeno.

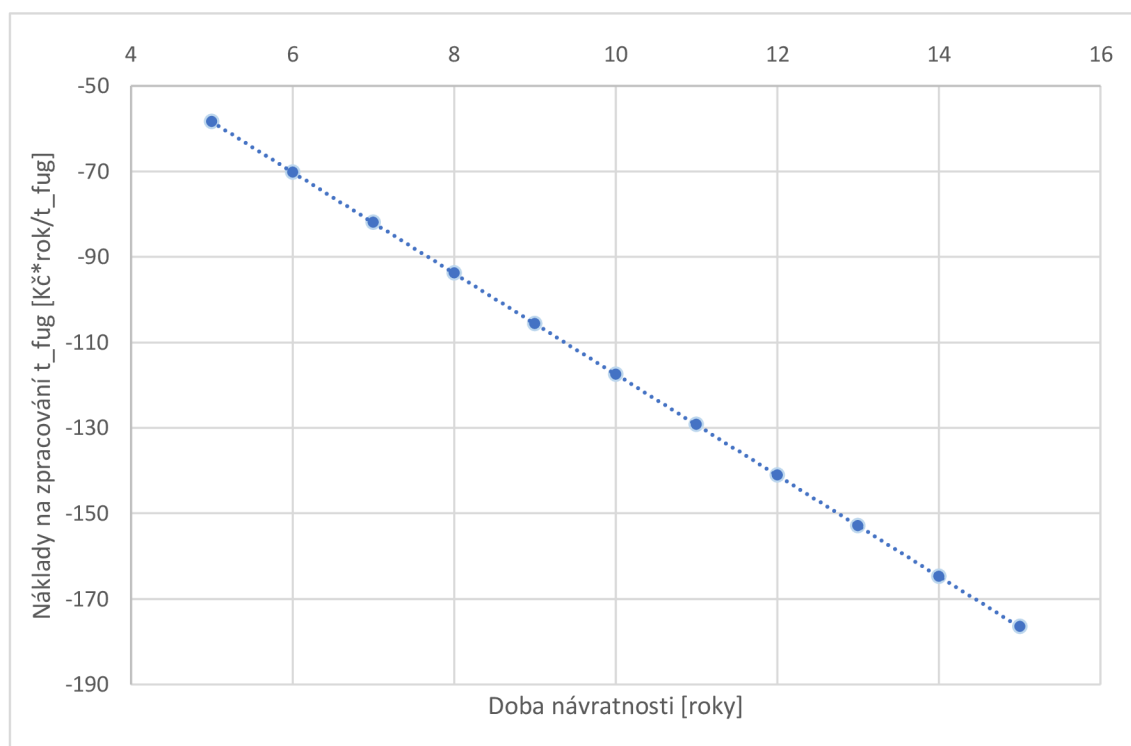


Graf 2 Závislost doby návratnosti na nákladech pro zpracování fug, bez uvažování prodeje tepla

Výsledné hodnoty byly očekávány s ohledem na přepravní vzdálenost 10 km. Pro získání ($sINV$) na minimální hodnoty udávány výrobcí $260 \frac{K\check{c} \cdot rok}{t_{fug}}$ musíme uvažovat dobu návratnosti 19 let. V případě navýšení dopravní vzdálenosti na 35 km se dostáváme na návratnost 10 let. Při snížení průtoku fugátu a zachování stejné koncentrace sušiny se hodnoty ($sINV$) mírně snižují. Z toho lze usoudit, že čím větší průtok, tím lepší účinnost systému.

V případě, kdy se zohledňuje prodej tepla, musíme nejdříve určit období, kdy nám chod odpadky bude odebírat teplo, které by se prodávalo. Vycházíme z předpokladu, že v zimě je veškeré teplo prodáváno. Ušlý zisk za období 3 měsíců ($NÁK_{teplo}^{3_{mes}}$) je popsán v rovnici (31). Kdy ($sNÁK_{teplo}^{3_{mes}}$) je prodejní cena tepla pohybující se okolo 170 Kč/GJ . V ostatních jarních a podzimních měsících není odběr tepla tak velký. Součet tepla na vytápění a chodu odpadky je nižší, než teplo vyprodukované. V letních měsících je prodej tepla minimální. Výsledky uvažující prodej tepla na vytápění jsou zobrazeny na Grafu 3.

$$NÁK_{teplo}^{3_{mes}} = sNÁK_{teplo}^{3_{mes}} \cdot P_{th} \cdot \frac{RF}{4} \quad \text{Kč/rok} \quad (31)$$



Graf 3 Závislost doby návratnosti na nákladech pro zpracování fug, s uvažováním prodeje tepla

Výsledky v grafu 3 dosahují záporných hodnot. To znamená, že provoz odpadky je ztrátový a integrace je nevhodná. Pro získání ($sINV$) na minimální hodnoty udávány výrobcí $260 \frac{\text{Kč} \cdot \text{rok}}{t_{fug}}$ musíme zvýšit dojezdovou vzdálenost na 73 km. Doba návratnosti by byla 12 let.

V případě, kdy uvažujeme návratnost 12 let a minimální hodnoty ($sINV$) dané výrobcem, musíme zvýšit dojezdovou vzdálenost bez uvažování tepla na 25 km. Ve stejném případě, při uvažování tepla, na 73 km. Z toho lze usoudit, že se dojezdová vzdálenost musí téměř 3x navýšit, aby úspora na dopravě vyrovnala ztrátu na prodeji tepla.

Závěr

Hlavním tématem této bakalářské práce je integrace odparky do konkrétní BPS a její technicko-ekonomické zhodnocení. Na trhu existuje několik typů odparek, které se využívají na úpravu zemědělských vod. Pro naše účely byla vybrána odparka typu MSF, která díky své konstrukci potřebuje nejméně tepla na ohřev fugátu.

Byla vytvořena materiálová a energetická bilance BPS, která popisuje tok materiálu a energií a ze které byl určen hmotnostní tok fugátu a množství výstupního tepla. Díky hmotnostnímu toku fugátu lze určit energetické specifikace pro MSF odparku a požadované rozměry teplosměnné plochy. Množství výstupního tepla je potřebné pro zjištění, zda odparka dokáže upravit celý objem fugátu, nebo jen jeho část.

V rámci integrace odparky do systému bylo určeno vedení recirkulátu za mechanický separátor. Výhodou toho technologického uspořádání jsou vysoké průtoky odparkou, dostatečné zahuštění a využití stávajícího mechanického separátoru. Pro úpravu čpavkové vody byla zvolena metoda s čistící věží, využívající reakce kyseliny sírové s amoniakem. Výhodou oproti stripování je nižší spotřeba tepla, která je u BPS Žamberk rozhodující. Oproti reverzní osmóze není potřeba měnit filtrační membrány a údržba je díky tomu jednodušší. Další výhodou jsou nižší pořizovací i provozní náklady. Ve všech případech je potřeba použití kyseliny sírové.

Výsledky technicko-ekonomického zhodnocení při zpracování 100% fugátu nedosahují minimálních nákladů pro zpracování fugátu dané výrobcem. Při uvažování prodeje tepla se dostáváme dokonce do hodnot záporných. V širším pohledu je to výsledek, který byl očekáván. BPS Žamberk má využití tepla v zimním období na velmi vysoké úrovni a vzdálenosti pro transport fugátu jsou ve srovnání se vzdálenostmi například v Německu až 10x nižší. V rámci diskuze byly určeny pro obě varianty minimální přepravní vzdálenosti. S uvažovanou návratností 12 let bez prodeje tepla získáme minimální vzdálenost 25 km. V případě prodeje tepla se tato hodnota téměř 3x navýší, minimální vzdálenost musí být větší jak 73 km.

V současné době je použití odparek velmi výhodné u výstavby nové BPS, kdy do úspor vstupují i nižší náklady na nádrže zadržující fugát. Obecně lze říci, že jsou odparky vhodné především pro BPS bez výrazného využití výstupního tepla a pro delší přepravní vzdálenosti. To se může v budoucnu změnit, až bude kladen větší důraz na hospodaření s vodou.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Biometan: Jak se vyrábí a proč je to palivo budoucnosti?* [online]. 2020 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.plyn.cz/biometan-jak-se-vyrabi>
- [2] *Bioplynky pro pokročilé. Přibývají nápady, jak je provozovat lépe a efektivněji* [online]. 2018 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.euro.cz/byznys/bioplynovce-stanice-pro-pokrocile-1421603>
- [3] Nakládání s digestátem, možnost využití jako kvalitní hnojivo. *CZ Biom* [online]. 2015 [cit. 2021-05-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-digestatem-moznost-vyuziti-jako-kvalitni-hnojivo>
- [4] BUDÍN, O. *Zpracování fermentačních zbytků z bioplynových stanic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017, 68 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Marek Vondra.
- [5] *Česká bioplynová asociace* [online]. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/>
- [6] Zemní plyn. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zemn%C3%AD_plyn
- [7] Biogas in general: Useful information on biogas from FAB industry. In: *FABbiogas* [online]. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: http://www.fabbiogas.eu/en/detail/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=5&tx_comments_pi1%5Bpage%5D=4&cHash=ed433fd3bc4a6c5de461bf39dd7cc4b2
- [8] MIKLAS, V. *Integrace technologie pro zahuřování digestátu v bioplynové stanici* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018, 139 s [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173708. Diplomová práce. Vedoucí práce Marek Vondra.
- [9] *Digestáty a jejich využití v zemědělství* [online]. Praha 5, 2016 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/458518/Digestaty_final2_WEB_optim.pdf
- [10] SCHNEIDER, Nico a Mandy GERBER. Rheological properties of digestate from agricultural biogas plants: An overview of measurement techniques and influencing factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. (121), 3 [cit. 2021-05-03]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120300071>
- [11] Digestát pokaždé jinak. *CZ Biom* [online]. 2020, 2-3 [cit. 2021-05-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://czbiom.cz/wp-content/uploads/2020_01_WEB.pdf

- [12] WILLIAMS, Elijah. *Selecting the Best Dewatering Technology for a Challenging Ash Slurry*. PE, City of Greensboro., 2013. Dostupné také z: <https://slideplayer.com/slide/4475989/>
- [13] *Dekantační odstředivky: Řešení pro ČOV* [online]. Brno: Topinfo, 2011 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: https://www.asio.cz/?download=_/dekantacni-odstredivky/dekantacni-odstredivka-cz-prospekt.pdf
- [14] VONDRA, Marek, Vítězslav MÁŠA a Petr BOBÁK. The energy performance of vacuum evaporators for liquid digestate treatment in biogas plants. *Energy* [online]. 2018, , 147-149 [cit. 2021-05-03]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217311337>
- [15] *Evaporation Technology: Forced Circulation Evaporator* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.gea.com/en/products/evaporators-crystallizers/evaporator-clean-vapor-recover-gas-distilling/forced-circulation-evaporator.jsp>
- [16] *Evaporation Technology FFE: Falling Film Evaporator* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.gea.com/en/products/evaporators-crystallizers/evaporator-clean-vapor-recover-gas-distilling/falling-film-evaporator.jsp>
- [17] NANNARONE, Alessandro, Claudia TORO a Sciubba ENRICO. *Multi-Stage Flash Desalination Process: Modeling and Simulation* [online]. 2017, , 2-4 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318207450_Multi-Stage_Flash_Desalination_Process_Modeling_and_Simulation
- [18] VONDRA, M. *Zařízení pro zahuřování odpadní vody z bioplynových stanic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. Dizertační práce. Vedoucí práce Petr Stehlík.
- [19] *MKR METZGER produkt: Evaporators* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://mkr-metzger.com/products/evaporators>
- [20] *MKR METZGER: From digestate to valuable substance* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://pdf.directindustry.com/pdf/mkr-metzger-gmbh/from-digestate-to-valuable-substance/84397-710946-_7.html
- [21] SYROVÝ, Otakar a Miroslav KAVKA. *Objemové hmotnosti produktů a materiálu* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: http://www.agronormativy.cz/docs/5020001_rslt.html
- [22] DEMSEW, Mitiku Teferra a Wubu WONDWOLEN. Biogas for Clean Energy. *Anaerobic Digestion* [online]. IntechOpen, 2019, , 1-2 [cit. 2021-05-04]. ISBN 978-1-83881-849-4. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.79534

- [23] MUŽÍK, Oldřich a Jaroslav KÁRA. Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR. *CZ Biom* [online]. [cit. 2021-05-04]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>>
- [24] Separator S655/S855. *Röhren und Pumpenwerk BAUER* [online]. Voitsberg/Austria [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: [https://www.bauer-at.com/upload/file/BAU_015_03_FD_Separator_S655-S855_e_preview\[2\].pdf](https://www.bauer-at.com/upload/file/BAU_015_03_FD_Separator_S655-S855_e_preview[2].pdf)
- [25] KISELEV, Andrey, Elena MAGARIL, Roman MAGARIL, Deborah PANEPINTO, Marco RAVINA a Maria C. ZANETTI. *Towards Circular Economy: Evaluation of Sewage Sludge Biogas Solutions* [online]. 2019, 12-13 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/resources8020091>
- [26] *Bioplyn: Složení, vlastnosti, využití* [online]. CZ biom [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplyn.pdf>
- [27] *MWM: Gas engine TCG 2020* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/gas-engines-power-generators/gas-engine-tcg-2020/>
- [28] *Uplatnění nitratové směrnice v podmínkách ČR: Ochrana vody před znečištěním dusičnany ze zemědělství* [online]. 2020 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <http://www.nitrat.cz/zmeny-zranitelných-oblastí-a-upravý-akčního-programu-od-1-7-2020-3.html>
- [29] Amoniak. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Amoniak>
- [30] *Síran Amonný AS21% zemědělské hnojivo* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <http://www.agrozetaservis.cz/hnojiva/siran-amonny-as21-zemedelske-hnojivo>
- [31] Reverse osmosis. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_osmosis
- [32] *Jak funguje reverzní osmóza?* [online]. 2018 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.aqua-shop.cz/zajímavosti/jak-funguje-reverzni-osmoza/>
- [33] PIVOKONSKÝ, Martin. *Pitná voda: Znečištění zdrojů a technologie úpravy* [online]. Praha 6: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, 2010 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: http://www.pivokonsky.wz.cz/Pitna_voda.pdf
- [34] YEO, Kevin. *Cost Analysis of Membrane Bioreactors to Reverse Osmosis Filters* [online]. 2010 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2010final/YeoK_2010.pdf

- [35] ZENDULKA, Štěpán. *Metody separace amoniaku z odpadních vod* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125268>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Marek Vondra.
- [36] *Ammonia Removal Utilizing an Ammonia Scrubber* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://www.gcesystems.com/ammoniascrubber/>
- [37] VONDRA, Marek, Michal TOUŠ a Sin Yong TENG. Digestate evaporation treatment in biogas plants: A techno-economic assessment by Monte Carlo, neural networks and decision trees. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, (238) [cit. 2021-05-04]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619327404#!>
- [38] *Amonia scrubber system* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://wet-scrubber.com/scrubber-application/ammonia-gas-scrubber/>
- [39] *Velký test reálné spotřeby: Traktorová versus nákladní zemědělská doprava. Zjistili jsme, co je na silnici skutečně nejúspornější* [online]. 2020 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.agroportal24h.cz/clanky/velky-test-realne-spotreby-traktorova-versus-nakladni-zemedelska-doprava-zjistili-jsme-co-je-na-silnici-skutecne-nejuspornejsi>

Seznam zkratk a symbolů

Symbol	význam	jednotka
A	teplosměnná plocha	m^2
bp_{en}	měrná energie bioplynu	kW/Nm^3
DN	doba návratnosti	roky
E	energie	kWh
η	účinnost	–
H	výhřevnost	MJ/m^3
INV	počáteční investice	Kč
k	koeficient údržby	–
\dot{m}	hmotnostní tok	t/rok
$NÁK$	náklady	$Kč/rok$
P	výkon	kWh
PE	nákupní cena el. energie	$Kč/kWh$
Q	teplo	kWh
RF	roční fond pracovní doby	h/rok
ρ	hustota	kg/m^3
sA	měrná teplosměnná plocha	m^2/m^3
$s\dot{m}$	měrný hmotnostní tok	kg/t
sP	měrný příkon	kW/m^3
$sPCE$	energetická konstanta	W/kWh
$sVÝN$	měrná prodejní cena	$Kč/rok$
\dot{V}	objemový průtok	m^3/h
$VÝN$	výnos za rok	$Kč/rok$
VZD	vzdálenost přepravy fugátu	km
x	hmotnostní koncentrace sušiny	kg/kg

Indexy	význam
<i>3_mes</i>	tři měsíce
<i>celk</i>	celkový
<i>cuk_riz</i>	cukrovarské řízky
<i>dest</i>	destilát
<i>dig</i>	digestát
<i>disip</i>	disipace
<i>dopr</i>	doprava, přeprava
<i>el</i>	elektrická energie
<i>ferm</i>	fermentor
<i>fug</i>	fugát
<i>gas</i>	bioplyn
<i>hnuj</i>	hnůj
<i>chem</i>	chemikálie
<i>chl</i>	chlazení
<i>i</i>	obecné označení složky
<i>kejda</i>	vepřová a hovězí kejda
<i>konc</i>	koncentrát
<i>kuk</i>	kukuřičná siláž
<i>kup</i>	nákup
<i>m3</i>	metry kubické
<i>mich</i>	míchadla
<i>odpar</i>	odparka
<i>prod</i>	prodej
<i>produk</i>	produkce
<i>rok</i>	rok
<i>RSA</i>	roztok síranu amonného
<i>sep</i>	separát
<i>th</i>	tepelný
<i>trav</i>	travní senáž
<i>údr</i>	údržba
<i>vepr</i>	vepřín

Zkratky	Význam
BPS	bioplynová stanice
DIG	digestát
EB	energetická bilance
F1	fermentor 1
F2	fermentor 2
FCE	odparka s nucenou cirkulací kapaliny
FEE	odparka s padajícím filmem
KGJ	kogenerační jednotka
KONC	koncentrát
KS1	koncový sklad 1
KS2	koncový sklad 2
MB	materiálová bilance
MS	mechanický separátor
MSF	vícetupňová mžiková odparka
RSA	roztok síranu amonného
SEP	separát

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Schéma BPS; převzato [7] a upraveno.....	3
Obr. 1.2 Schéma šnekového lisu s popisem; převzato z [12] a upraveno.....	6
Obr. 1.3 Schéma dekantační odstředivky s popisem; převzato z [13] a upraveno	6
Obr. 2.1 Schéma FCE odparky s popisem; převzato z [15] a upraveno	7
Obr. 2.2 Schéma FEE odparky s popisem; převzato z [16] a upraveno	8
Obr. 2.3 Schéma MSF odparky a ohříváče s popisem; převzato z [17] a upraveno	9
Obr. 2.4 Schéma sériového zapojení MSF odparky; převzato z [17] a upraveno	9
Obr. 2.5 Schéma cirkulace MSF odparky; převzato z [17] a upraveno	10
Obr. 2.6 Vícestupňové uspořádání odparky MKR DV1000/2000; převzato z [20]	11
Obr. 2.7 Konstrukční uspořádání odparky Vapogant; převzato z [20].....	11
Obr. 4.1 Schéma BPS Žamberk.....	13
Obr. 4.2 Dávkovač na biomasu: fotografie autora	14
Obr. 4.3 Jímka na kejdu; zdroj: fotografie autora.....	14
Obr. 4.4 Systém přečerpávání, umístěn mezi fermentorem a koncovými sklady; zdroj: fotografie autora	15
Obr. 4.5 Chlazení bioplynu, v pozadí KS1 a KS2; zdroj: fotografie autora.....	15
Obr. 4.6 Motory MWM, společný maximálním výkonu 1750 kW; zdroj: fotografie autora	16
Obr. 4.7 Mechanický separátor a skladovací nádrže fugátu; zdroj: fotografie autora	16
Obr. 4.8 Schéma materiálové bilance bioplynové stanice	20
Obr. 4.9 Schéma energetické bilance bioplynové stanice	22
Obr. 5.1 Bez recirkulace koncentrátu; převzato [18].....	24
Obr. 5.2 Recirkulace koncentrátu před mechanický separátor; převzato [18] ...	25
Obr. 5.3 Úplná recirkulace koncentrátu před mechanický separátor; převzato [18]	25
Obr. 5.4 Recirkulace koncentrátu za mechanický separátor; převzato [18]	25
Obr. 5.5 Vícestupňová filtrace; převzato [33].....	27
Obr. 5.6 Schéma čistící věže; převzato a upraveno [38]	28
Obr. 5.7 Schéma materiálové bilance MSF odparky	29

Seznam Tabulek

Tab. 1 Složení digestátu a jeho optimální hodnoty	5
Tab. 2 Vstupní hodnoty substrátu za rok 2019	17
Tab. 3 Průměrné hodnoty el. energie za rok 2019.....	17
Tab. 4 Průměrná spotřeba tepla za hodinu v roce 2019	17
Tab. 5 Specifikace motorů dané výrobcem; převzato a upraveno [27].....	18
Tab. 6 Přehled vzdálenosti a ceny za dopravu	18
Tab. 7 Možnosti zapojení MSF odparky do systému; převzato a upraveno [18]	24
Tab. 8 Zvolené hodnoty a jejich rozsahy pro technicko ekonomického zhodnocení	30
Tab. 9 Předpokládána spotřeba el. energie na provoz odparky	31
Tab. 10 Předpokládané roční náklady na provoz odparky	33
Tab. 11 Předpokládané roční výnosy	34