



ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

**Tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu:
technologie řešící problémy se skladováním
a transportem fermentačního zbytku**

certifikovaná metodika

Pavel Švehla a kol.



© Česká zemědělská univerzita v Praze
Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ
165 00 Praha-Suchbátov
<http://www.af.czu.cz>

Vydavatelství Česká zemědělská univerzita v Praze

ISBN 978-80-213-3155-6

Praha 2021

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu
NAZV QK1710176

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

**Tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu:
technologie řešící problémy se skladováním
a transportem fermentačního zbytku**

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Pavel Švehla a kol.

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Dedikace: Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu NAZV QK1710176 „Dvoustupňová úprava kapalné frakce fermentačního zbytku umožňující racionální využití živin a vody“.

Kolektiv autorů:

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.¹
Ing. Pavel Míchal, Ph.D.¹
Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.²
prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc., dr. h. c.¹
Ing. Michal Touš, Ph.D.²
doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.²
Ing. Liz Mabel Vargas Caceres¹
Ing. Tomáš Rosenberg, Ph.D.¹
Ing. Jan Procházka, Ph.D.³
Miroslav Liberský³

¹ČZU v Praze, FAPPZ, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin

²VUT v Brně, FSI, Ústav procesního inženýrství

³Agro Podlesí, a.s.

Tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu: technologie řešící problémy se skladováním a transportem fermentačního zbytku

Pavel Švehla a kol.

Vydání první, 2021

Vydavatelství: Česká zemědělská univerzita v Praze

Tisk Powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha Suchdol, www.powerprint.cz

Obálka: BPS Č. Janovice s uskladňovací jímkou digestátu a poloprovozní jednotka pro tepelné zahušťování fugátu (foto: Pavel Míchal)

© Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ ČZU v Praze

Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 - Suchdol

tel.: +420 224 382 736, <http://www.af.czu.cz>

ISBN 978-80-213-3155-6

Abstrakt

Certifikovaná metodika je zaměřena na využití tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu jako metody vedoucí k minimalizaci problémů při nakládání s fugátem, resp. s fermentačním zbytkem, vznikajícím při provozu zemědělských bioplynových stanic. Jsou prezentovány výhody tohoto řešení ve srovnání s jinými postupy zpracování fugátu. Zvláštní pozornost je věnována srovnání průběhu procesu s tepelným zahušťováním surového fugátu, resp. fugátu, který nebyl před tepelným zahušťováním podroben biologickému procesu nitrifikace. Na základě výsledků laboratorních a poloprovozních experimentů jsou navrženy optimální podmínky procesu umožňující dosažení požadovaných vlastností produktů zpracování fugátu, tedy tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu a destilátu. Bylo potvrzeno, že prakticky veškeré živiny obsažené v nitrifikovaném fugátu zůstávají v zahuštěném produktu. Obsah sloučenin dusíku i dalších chemických látek v destilátu je naopak velice nízký. Předpokládá se využití zahuštěného nitrifikovaného fugátu jako kapalného, resp. suspenzního, komplexního hnojiva. Destilát může být s výhodou použit jako ředící medium pro optimalizaci sušiny substrátu vstupujícího do anaerobního biologického reaktoru bioplynové stanice nebo jako procesní voda pro různé účely v zemědělském podniku.

Klíčová slova: Fermentační zbytek, fugát, tepelné zahušťování, redukce objemu, ztráty dusíku

Abstract

The certificated methodology is focused on the application of thermal thickening as the method enabling to minimize the problems during the handling with the liquid phase of digestate (LPD) which is produced during the operation of agricultural biogas plants. The advantages of the method as compared with other processes of LPD treatment are presented. The main attention is given to the comparison of the course of the process with thermal thickening of raw LPD (that means the LPD which was not previously exposed to nitrification process). Based on the results of laboratory as well as pilot plant experiments, optimal conditions enabling to reach required quality of the products of thermal thickening of nitrified LPD (thickened nitrified LPD and distillate) are suggested. It was proved that practically all the nutrients contained in original nitrified LPD are conserved in thickened nitrified LPD. On the other hand, the content of nitrogen (as well as the content of other chemical compounds) in the distillate is very low. Thus, the thickened nitrified LPD could be used as complex liquid or suspension fertilizer. Distillate could be advantageously applied for the dilution of the substrate entering the anaerobic reactor of biogas plant with the aim to achieve optimal dry matter content or as the process water for different technological purposes on the farm.

Keywords: Digestate, liquid phase of digestate, thermal thickening, volume reduction, nitrogen losses

OBSAH

I. Cíl metodiky	1
II. Vlastní popis metodiky	1
2.1. Úvod	1
2.2. Testy zaměřené na ověření možnosti využití tepelného zahušťování jakožto metody pro zpracování fugátu.....	5
2.3. Výsledky testů zaměřených na laboratorní simulaci tepelného zahušťování surového fugátu	12
2.4. Výsledky testů zaměřených na laboratorní simulaci tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu	14
2.5. Výsledky poloprovozního ověřování hlavních závěrů laboratorního výzkumu	22
2.6. Využití tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu	24
2.7. Využití destilátu vznikajícího při tepelném zahušťování fugátu	24
2.8. Optimalizace vlastností produktů tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu	25
2.9. Hlavní výhody postupu nitrifikace/tepelné zahuštění.....	27
2.10. Potenciální problémy související se zpracováním fugátu postupem nitrifikace/tepelné zahuštění	28
III. Srovnání novosti postupů	30
IV. Popis uplatnění metodiky.....	30
V. Ekonomické aspekty	31
VI. Seznam použité literatury	33
VII. Seznam publikací, které předcházely metodice	36
VIII. Jména oponentů a názvy jejich organizací	38
IX. Dedikace	38
X. Ostatní náležitosti certifikované metodiky.....	38

I. Cíl metodiky

Cílem předkládané metodiky je seznámit provozovatele zemědělských bioplynových stanic, příslušné orgány státní správy a další zájemce s možností využití tepelného zahuštění jako postupu zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku (tzv. fugátu) podrobeného v rámci jeho předúpravy biologické nitrifikaci. Budou nastíněny benefity spojené s aplikací této metody s hlavním důrazem na výhody tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu ve srovnání s tepelným zahušťováním surového fugátu, tedy fugátu, který před tepelným zahuštěním nebyl podroben nitrifikaci. Zmíněny budou i výhody postupu zpracování fugátu v soustavě nitrifikace/tepelné zahuštění ve srovnání s dalšími metodami přicházejícími v úvahu pro zpracování fugátu. Bude diskutován vliv různých faktorů na kvalitu produktů procesu, tedy tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu a destilátu. Na základě výsledků laboratorních a poloprovozních testů budou definovány podmínky optimální z hlediska minimalizace transferu amoniakálního dusíku i jiných látek do destilátu. Nastíněno bude možné využití tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu i destilátu.

II. Vlastní popis metodiky

2.1. Úvod

Zemědělské bioplynové stanice (BPS) jsou primárně budovány za účelem produkce bioplynu z různých materiálů organické povahy (exkrementy hospodářských zvířat, biomasa zemědělských plodin, travní hmota atd.) s využitím procesu označovaného jako anaerobní fermentace (Straka et al., 2003). Vedle energeticky bohatého bioplynu je vedlejším produktem anaerobní fermentace suspenze obsahující zbytky materiálu, který již byl podroben anaerobnímu rozkladu. Jedná se o tekutý materiál se sušinou obvykle okolo 10 %, který je označován jako fermentační zbytek, resp. digestát. Nakládání s fermentačním zbytkem je spojeno s řadou problémů. Fermentační zbytek je v některých provozech BPS separován na pevnou složku (tzv. separát) a na kapalnou frakci (tzv. fugát). Separát se vyznačuje poměrně vysokou sušinou 20 – 30 % a může být následně využit pro řadu účelů (hnojivo, stelivo, složka pěstebního substrátu apod.). Z celkové hmotnosti fermentačního zbytku zaujímá separát pouze 10 až 20 % (Al Seadi et al., 2013). Sušina fugátu dosahuje zpravidla 0,8 – 4 %, z celkového množství hmoty obsažené původně ve fermentačním zbytku představuje fugát 80 – 90 % (Al Seadi et al., 2013).

2.1.1. Nakládání s fugátem

Další nakládání s fugátem je spojeno s řadou problémů. Fugát obsahuje pestrou škálu živin, což ho předurčuje k využití ve výživě rostlin. Významný může být obsah draslíku i fosforu (Tlustoš et al., 2014; Koszel et Lorencowicz, 2015; Bol-

zonella et al., 2018; Vaneeckhaute et al., 2017; Shi et al., 2018). Z hlediska výživy rostlin je však podstatná zejména skutečnost, že fugát je charakteristický relativně vysokou koncentrací sloučenin dusíku vyskytujícího se převážně ve formě amoniakálního dusíku (N-amon). Komplikací z hlediska racionálního využití živin obsažených ve fugátu představuje právě nízká sušina fugátu, respektive vysoký obsah vody v něm. Produkce velkého objemu fugátu vede k vysokým nárokům na skladovací prostory pro tento materiál. Ty jsou ještě významně zvýšeny skutečností, že současná legislativa omezuje aplikaci fugátu na půdu v zimním období, přičemž omezena je legislativně i dávka dusíku aplikovaná v dané lokalitě (European Commission, 1991; Nařízení vlády č. 262/2012 Sb.). Z těchto důvodů je zpravidla nutno zajistit kapacitu prostor pro skladování kapalného fermentačního zbytku, resp. fugátu, odpovídající množství vyprodukovanému za 4 až 9 měsíců (Al Seadi et al., 2013).

Problém představuje i doprava fugátu z objektu bioplynové stanice na místo, kde bude aplikován na zemědělskou plochu. Uvádí se, že přeprava kapalného fermentačního zbytku či fugátu na vzdálenost větší než 15 – 20 km neúměrně zhoršuje ekonomiku provozu bioplynové stanice (Roth et al., 2021). Ekonomicky únosná vzdálenost pro přepravu je však pochopitelně ovlivněna místními podmínkami. Velká frekvence pojezdů zemědělské techniky související s velkými objemy fugátu, resp. s omezeným obsahem živin v něm, navíc vede k nežádoucímu utužování zemědělské půdy.

Při skladování fugátu i při jeho aplikaci na půdu hrozí významné ztráty dusíku způsobené těkáním amoniaku do ovzduší (Whelan et al., 2010; Nkoa, 2014; Perazzolo et al., 2017; Nicholson et al., 2017; Svehla et al., 2019). Tím dochází nejen ke kontaminaci životního prostředí, ale také ke ztrátě základní živiny.

Za účelem dosažení optimální sušiny materiálu vstupujícího do anaerobního reaktoru BPS je zpravidla substrát potřeba ředit. To platí zejména při zpracování substrátů s vyšší sušinou. V celém procesu anaerobní fermentace tak má významnou úlohu voda, jejíž dostatečný přísun je potřeba zajistit. Jako ředící medium zpravidla bývá používán právě fugát. V takových případech dochází k recirkulaci fugátu, který se částečně vrací zpět do procesu anaerobní fermentace. Toto řešení s sebou však může přinášet řadu komplikací. N-amon obsažený ve vysoké koncentraci ve fugátu se v těchto případech akumuluje v anaerobním reaktoru, přičemž pak může v závislosti na místních podmínkách působit inhibičně na biochemické procesy vedoucí k tvorbě bioplynu. Recirkulace fugátu obecně vede k riziku nárůstu koncentrace látek obsažených ve fugátu v anaerobním reaktoru a k následným inhibičním vlivům (Al Seadi et al., 2013; Hu et al., 2014; Drog et al., 2015). Problémem může být i zbytečná akumulace biologicky inertních nerozpuštěných látek v biologickém reaktoru způsobená recirkulací fugátu, která pak snižuje potenciál produkce bioplynu v rámci daného zařízení (Lindmark et al., 2011; Khan et Nordberg, 2019).

2.1.2. Možnosti zpracování fugátu za účelem racionalizace jeho využití

Optimalizovat využití živin obsažených ve fugátu je možno různými přístupy, které jsou zpravidla založeny na zakoncentrování živin či jejich získání v relativně čisté podobě. Známé jsou fyzikálně-chemické metody vedoucí k získání amonného dusíku, popřípadě k současnému získávání amonného dusíku a fosforu – například stripování amoniaku, srážení struvitu či sorpce na biochar či jiné materiály (Münch et Barr, 2001; Song et al., 2011; Guštin et Marinšek-Logar, 2011; Kizito et al., 2015). Bylo potvrzeno, že významnou část živin obsažených ve fugátu je možno převést do biomasy zelených řas, kterou je možno dále využívat (Prajapati et al., 2014; Tale et al., 2014). Všechny uvedené postupy jsou ale více či méně selektivní, tedy umožňují využít pouze vybrané živiny a jejich efektivita je navíc zpravidla omezená. Fugát, který je zbaven základních živin, se ve většině případů stává těžko využitelným a v podstatě odpadním materiálem. Nezbyvá pak často jiné řešení, než ho přímo v areálu bioplynové stanice nebo v objektu logisticky dostupné čistírny odpadních vod zpracovávat jako odpadní vodu. Čištění takové odpadní vody je přitom velice problematické, neboť obsahuje velké množství špatně sedimentujících nerozpuštěných látek. Extrémně vysoké bývají hodnoty chemické spotřeby kyslíku (CHSK) při poměrně nízké hodnotě biochemické spotřeby kyslíku (BSK). To je způsobeno tím, že velká část organických látek obsažených ve fugátu je inertní vůči biologickému rozkladu. Poměrně vysoký může být i zbytkový obsah sloučenin dusíku a fosforu. Za těchto podmínek zůstává velká část cenných látek obsažených původně v surovém fugátu nevyužita.

Pokud chceme využít všechny cenné látky obsažené v surovém fugátu včetně vody, přichází v úvahu v zásadě pouze aplikace membránových procesů nebo tepelné zahušťování fugátu. Membránové procesy vedou k zahuštění chemických látek původně obsažených ve fugátu do koncentráту, permeát je relativně čistou vodou, jejíž vlastnosti závisí na použité membráně a na dalších podmínkách procesu (Al Seadi et al., 2013; Holloway et al., 2007). Přestože byly v posledních letech vyvinuty speciální varianty pokročilých membránových procesů pro zpracování fermentačního zbytku, resp. fugátu, založené například na tzv. membránové destilaci (Khan et Nordberg, 2018; Khan et Nordberg, 2019), aplikace membránových procesů pro tak heterogenní materiál, jakým je fugát, je stále velice technicky a ekonomicky složitým procesem.

2.1.3. Tepelné zahušťování jako postup zpracování fugátu

Tepelné zahušťování fugátu je po energetické stránce velice náročným procesem. Uvážíme-li však, že řada zemědělských bioplynových stanic provozovaných v ČR nenachází dostatečné uplatnění pro teplo produkované kogeneračními jednotkami, stává se variantou (alespoň ve srovnání s dalšími postupy připadajícími v úvahu pro zpracování fugátu) vcelku reálnou. Jako perspektivní technologické řešení tepelného

zahušťování fugátu se jeví zejména aplikace vakuového odpařování, tedy procesu probíhajícího za sníženého tlaku, který snižuje energetickou náročnost procesu (Bonmatí et al., 2003; Chiumenti et al., 2013; Guercini et al., 2014; Fechter et Kraume, 2016; Vondra et al., 2016; Vondra et al., 2018; Vondra et al., 2019). Významným problémem však je těkavost amoniaku a z ní plynoucí tendence této formy dusíku přecházet při tepelném zahušťování do destilátu. Vysoký obsah N-amon v destilátu je nežádoucí z pohledu dalšího využití tohoto produktu. Zároveň je převedením amoniaku do destilátu o živiny ochuzen tepelně zahuštěný fugát, jehož hodnota jako komplexního hnojiva je tím významně snížena. Intenzita přestupu amoniakálního dusíku do destilátu může být efektivně snížena okyselením fugátu přidavkem minerálních kyselin (Bonmatí et al., 2003; Panvini et al., 2009; Chiumenti et al., 2013). To však významně prodražuje proces zpracování fugátu (Al Seadi et al., 2013; Guercini et al., 2014) a zároveň v konečném důsledku může po aplikaci fugátu v rostlinné výrobě podporovat okyselení půdy (Rorison, 1973; Rice et Herman, 2012). Simonič et al. (2018) dokonce vzhledem k tendenci amoniaku tékat navrhuji zakoncentrovávat při tepelném zahušťování fugátu N-amon nikoliv do zahuštěného fugátu, ale do destilátu. To ovšem vede k tomu, že jsou jednotlivé živiny obsažené v surovém fugátu distribuovány do různých proudů a to komplikuje současné využití všech živin, přičemž se dá předpokládat, že podobně jako v případě některých jiných procesů (viz výše), se frakce chudá na dusík (v tomto případě zahuštěný fugát) stane odpadním materiálem. Z těchto důvodů se jeví jako žádoucí hledat jiné cesty vedoucí ke stabilizaci dusíku ve fugátu a jeho zakoncentrování do proudu tepelně zahuštěného fugátu než je chemická úprava fugátu.

2.1.4. Předúprava fugátu před tepelným zahuštěním biologickou nitrifikací

Alternativním postupem pro předúpravu fugátu před jeho tepelným zahuštěním je převedení amoniakálního dusíku na oxidované formy (N-NO_3^- , popřípadě N-NO_2^-) s využitím činnosti nitrifikačních organismů (Botheju et al., 2010; Svehla et al., 2017; Švehla et al., 2021). Oxidované formy dusíku jsou (za předpokladu vyloučení intenzivnějšího průběhu denitrifikace) z pohledu úniku do atmosféry ve srovnání s N-amon stabilní formou dusíku. Navíc, v důsledku nitrifikace probíhající v prostředí fugátu dochází k poklesu pH, který může dramaticky snížit intenzitu těkání amoniaku i v případě, že významná část dusíku zůstane po zpracování fugátu v nitrifikačním reaktoru ve formě N-amon. Pokud je zbytková koncentrace N-amon v nitrifikovaném fugátu stále vysoká a hodnota pH převyšuje 5, je možno transfer N-amon do destilátu minimalizovat dalším okyselením nitrifikovaného fugátu přidavkem kyseliny podobným způsobem jako v případě surového fugátu (viz výše). Spotřeba kyseliny by však díky produkci H^+ při nitrifikaci měla být u nitrifikovaného fugátu významně nižší než v případě surového fugátu.

Aplikace metody zpracování fugátu založené na nitrifikaci amoniakálního dusíku obsaženého v surovém fugátu a následném tepelném zahuštění nitrifikovaného fugátu využívajícím přebytečné teplo produkované v rámci provozu BPS může z výše nastíněných důvodů minimalizovat ztráty dusíku při manipulaci s fugátem. Prakticky všechny živiny obsažené v surovém fugátu by měly být zakoncentrovány do tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu. Na rozdíl od většiny jiných metod připadajících v úvahu pro zpracování fugátu tato technologie neprodukuje obtížně čistitelnou odpadní vodu. Nitrifikaci je navíc možno za účelem minimalizace ztrát dusíku realizovat i bez následného tepelného zahuštění. Přestože jsou extrémní podmínky panující ve fugátu velice vzdáleny podmínkám optimálním pro nitrifikační organismy, bylo prokázáno, že racionálním řízením provozu nitrifikačního procesu v biologickém reaktoru zpracovávajícím fugát je možno docílit vysoké rychlosti procesu a efektivního převedení N-amon na N-NO_3^- (Svehla et al., 2017; Švehla et al., 2021).

2.1.5. Využití produktů tepelného zahušťování fugátu

Tepelné zahušťování fugátu (resp. nitrifikovaného fugátu) vede ke vzniku dvou hlavních produktů. Vedle tepelně zahuštěného fugátu (či tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu) je produkován destilát. Vlastnosti obou produktů jsou určeny chemickým složením zahušťovaného fugátu a podmínkami odpařovacího procesu. Tepelně zahuštěný fugát je možno využít jako zdroj živin pro výživu rostlin, přičemž se předpokládá minimalizace problémů s velkým objemem fugátu nastíněných výše. Tepelně zahuštěný fugát může mít též charakter pevné hmoty (Chiumenti et al., 2013). Na druhou stranu je však z praktických důvodů často vhodnější koncentrovaný proud vznikající tepelným zahuštěním fugátu produkovat ve formě kapaliny, resp. suspenze.

Destilát vznikající při tepelném zahušťování fugátu, resp. nitrifikovaného fugátu, může být s výhodou použit k ředění substrátu vstupujícího do procesu anaerobní fermentace a redukovat tak spotřebu používané pitné, resp. užitkové, vody. Aplikace destilátu jako ředící vody na místo surového fugátu přitom může eliminovat výše nastíněné problémy s akumulací inhibičně působících látek v anaerobním reaktoru. Destilát ale může být pochopitelně využit jako procesní voda i k jiným účelům, např. pro oplachy různých zařízení či ploch v areálu bioplynové stanice, resp. v areálu zemědělského družstva, které bioplynovou stanicí provozuje.

2.2. Testy zaměřené na ověření možnosti využití tepelného zahušťování jakožto metody pro zpracování fugátu

V laboratorním měřítku byla provedena řada experimentů simulujících v různých podmínkách tepelné zahušťování fugátu. Následně byly výsledky laboratorních testů ověřovány v poloprovozních podmínkách.

2.2.1. Metodika laboratorních testů zaměřených na tepelné zahušťování fugátu

V první fázi probíhalo tepelné zahušťování surového fugátu, v rámci kterého byl posuzován zejména vliv pH na distribuci N-amon mezi produkty procesu. Hlavní část pokusů proběhla následně s nitrifikovaným fugátem, přičemž bylo záměrem porovnat distribuci sloučenin dusíku mezi tepelně zahuštěný fugát a destilát při zpracování surového a nitrifikovaného fugátu.

K pokusům zaměřeným na tepelné zahušťování fugátu v laboratorních podmínkách byla využita odparka BÜCHI Rotavapor R-215 (BÜCHI, Francie) s vakuovou pumpou V-700 a regulátorem podtlaku V-850 (obrázek 1).



Obrázek 1: Laboratorní odparka BÜCHI Rotavapor R-215 s regulátorem podtlaku V-850 a vodní lázní B-491

Pokusy probíhaly za sníženého tlaku (350 ± 40 mBar) s využitím vodní lázně (BÜCHI heating bath B-491, Francie) temperované na teplotu $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při tepelném zahušťování byl produkován zahuštěný fugát a destilát vznikající kondenzací vodní páry v chladiči, který je součástí použité odparky. Zpracovávány byly vzorky fugátu o objemu 200 ml, přičemž ke každému vzorku bylo před zahájením procesu zahušťování nadávkováno 10 – 12 kapek odpěňovače Burst EP 8900® (BASF, Německo). Vzorky byly umístěny do varné baňky ponořené do vodní lázně. V ní baňka rotovala rychlostí 40 otáček za minutu. Díky tomu bylo ve varné baňce dosaženo teploty od-

povídající teplotě varu zpracovávaného vzorku a tlaku v aparatuře. Tato teplota se za daných podmínek pohybovala okolo 65 °C. Následně byly vzorky tepelně zahuštěny na 33 – 50 % původního objemu. Z původního objemu fugátu 200 ml bylo tedy 100 – 136 ml převedeno do destilátu (viz metodika jednotlivých sérií experimentů), zbylý objem připadl na vyprodukovaný tepelně zahuštěný fugát.

2.2.1.1. Laboratorní simulace tepelného zahušťování surového fugátu

Před zahájením vlastního odpařování byly vzorky surového fugátu přídatkem kyseliny sírové o koncentraci 0,1 mol/l okyseleny ze slabě alkalické hodnoty pH typické pro fugát na hodnoty 6,0; 5,0; resp. 4,0 s cílem posoudit vliv pH na distribuci amoniakálního dusíku mezi produkty tepelného zahušťování fugátu (tepelně zahuštěný fugát a destilát). Následně byly vzorky tepelně zahuštěny na 50 % původního objemu. Z původního objemu fugátu 200 ml bylo tedy 100 ml převedeno do destilátu. Testy probíhaly s fugátem produkovaným v rámci tří BPS provozovaných na území ČR (BPS 1, BPS 2 a BPS 3). BPS 1 a BPS 2 zpracovávají převážně cíleně pěstovanou biomasu a exkrementy hospodářských zvířat, BPS 3 využívá jako substrát pro výrobu bioplynu zejména separované bioodpady a biologicky rozložitelné odpady z kuchyní a stravoven (gastroodpad). Základní charakteristiky surového fugátu, se kterým byly experimenty provedeny, jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Základní charakteristiky surového fugátu použitého pro zahušťovací testy (VL - veškeré látky (celková sušina))

zdroj fugátu	N-amon (mg/l)	pH	VL (g/l)
BPS 1	2 500	8,2	14,4
BPS 2	1 900	7,7	51,8
BPS 3	4 750	8,0	23,9

Tepelné zahušťování jednotlivých vzorků bylo realizováno ve třech opakováních, přičemž níže uvedené výsledky jsou aritmetickými průměry z těchto tří opakování.

2.2.1.2. Laboratorní simulace tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu

V rámci testů zaměřených na laboratorní simulaci tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu byl zpracováván fugát, který byl předupraven nitrifikací v laboratorním nitrifikačním reaktoru o provozním objemu 5 litrů. Základní technologické uspořádání tohoto reaktoru bylo popsáno v práci Svehla et al. (2017). Fugát pocházel ze zemědělské bioplynové stanice v Červených Janovicích, která je provozována společností Agro Podlesí, a.s.. Tato BPS zpracovává jako hlavní substráty pro výrobu bioplynu hovězí hnůj a kejdu (cca 70 % vlhké hmoty substrátu), kukuřičnou siláž (cca 20 %) a travní hmotu (cca 10 %). Separace fermentačního zbytku na fugát a separát probíhá v rámci této bioplynové stanice s využitím mechanického šnekového

separátoru FAN. Základní charakteristiky nitrifikovaného fugátu, se kterým byly experimenty provedeny, jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Základní charakteristiky nitrifikovaného fugátu použitého pro zahušťovací testy (VL - veškeré látky (celková sušina); CHSK - chemická spotřeba kyslíku; N-celk - koncentrace celkového dusíku)

parametr (jednotka)	hodnota
pH (-)	6,1 ± 0,05
VL (g/l)	48,5 ± 3,49
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	5 510 ± 151
N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,700 ± 0,260
N-amon (mg/l)	8,90 ± 2,77
N-celk (mg/l)	5 840 ± 170

Experimenty zaměřené na tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu byly provedeny ve třech sériích (série 1, série 2 a série 3), které se lišily v aplikovaném zahušťovacím poměru. V sérii 1 přešlo 50 % objemu nitrifikovaného fugátu do destilátu. V sérii 2 pak přešlo 60 % objemu fugátu do destilátu a v sérii 3 to bylo 67 %. Za těchto podmínek činil poměr objemu vzniklého destilátu a zahuštěného nitrifikovaného fugátu v jednotlivých sériích 1,0; 1,5 a 2,0. Každá série byla provedena ve dvou opakováních, přičemž níže uvedené výsledky jsou aritmetickými průměry z těchto dvou opakování.

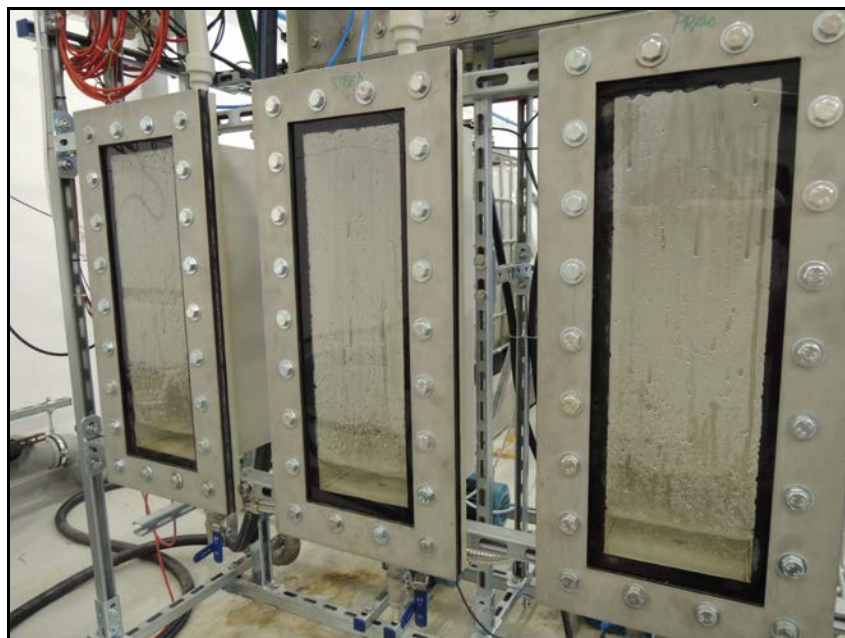
2.2.2. Poloprovozní ověření hlavních závěrů laboratorního výzkumu

Tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu v poloprovozních podmínkách proběhlo ve dvou sériích experimentů. První z těchto sérií (série A) proběhla na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, konkrétně v Laboratoři energeticky náročných procesů na Ústavu procesního inženýrství. Laboratoř se specializuje na vývoj zařízení pro zpracování různých typů procesních a odpadních vod. K dispozici jsou tři typy vakuových odparek (mžiková, cirkulační, filmová), stripovací kolona, absorpční kolona, odplyňovací zařízení, membránové technologie (mikrofiltrace, ultrafiltrace a reverzní osmóza) a přidružená zařízení (čerpadla, vývěvy, zásobní nádrže, moderní měřicí technika umožňující centralizovaný sběr dat z měření nejrůznějších fyzikálních veličin atd.). Fotografie zachycující průběh zahušťování je uvedena na obrázku 2.

Po úspěšné realizaci série A byla další série testů (série B) provedena již přímo v areálu zemědělské bioplynové stanice v Červených Janovicích, která sloužila jako primární zdroj fugátu pro laboratorní testy zaměřené na tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu. Před vlastním tepelným zahuštěním byl v rámci obou popsáných sérií experimentů surový fugát podroben nitrifikaci v poloprovozním nitrifikačním reaktoru o pracovním objemu 1 m³ situovaném v objektu bioplynové stanice v Červených Janovicích. Konstrukce a funkce tohoto reaktoru jsou popsány v práci Švehla et al. (2021).

Zahušťování nitrifikovaného fugátu proběhlo v obou případech s využitím prototypu 3-stupňové mžikové odparky, tzv. MSF odparky (Multi-stage Flash). Odparka je vlastním výrobkem VUT v Brně. Jedná se o vakuovou odparku, ve které nedochází k odpařování rozpouštědla (vody) na teplosměnné ploše. Přehřátá zahušťovaná kapalina (nitrifikovaný fugát) vstupuje do odpařovací komory a vlivem teplotního rozdílu mezi vstupní teplotou fugátu a rovnovážnou teplotou daného odpařovacího stupně dochází k mžikovému odpaření (tzv. flash) části rozpouštědla (vody).

Použitá MSF odparka disponuje odpařovací kapacitou až 80 l destilátu za hodinu a maximálním tepelným příkonem 40 kW. S ohledem na viskozitu a pěnovost fugátu byl výkon odparky v průběhu experimentů omezen na 8 až 18 l destilátu za hodinu a tepelný příkon 7 až 14 kW. Tlak v systému (v poslední komoře 6 až 8 kPa) byl udržován soustavou vodních ejektorů. Pro účely testu byla odparka zapojena bez předehřevu vstupní kapaliny. Koncentrát z poslední komory byl odváděn do vstupní vyrovnávací nádrže, ve které v průběhu experimentu klesala hladina fugátu a rostla koncentrace sušiny. Toto uspořádání umožnilo efektivní a rychlé zahuštění nitrifikovaného fugátu. Odpařená voda ve formě páry byla kondenzována v chladicích sekcích s využitím externí chladicí vody a odváděna ze systému v pravidelných 30 min intervalech. Ve stejných intervalech byly z vyrovnávací nádrže odebírány vzorky koncentrovaného nitrifikovaného fugátu. Hmotnost vstupního nitrifikovaného fugátu, destilátu a výsledného koncentráту nitrifikovaného fugátu byla za účelem materiálové bilance stanovena s využitím můstkové váhy LESAK 1T3030LN-RWP/DR.



Obrázek 2: Fotografie z průběhu zahušťování (sběr destilátu)

Základní charakteristiky nitrifikovaného fugátu, se kterým byly experimenty v jednotlivých sériích provedeny, jsou uvedeny v tabulce 3. V rámci série A bylo

zpracováno 105,5 kg nitrifikovaného fugátu. Poměr objemu vyprodukovaného destilátu a vzniklého zahuštěného nitrifikovaného fugátu činil cca 2,3, vzorek byl zahuštěn cca 3,4x. Při realizaci série B byly testy provedeny s 76 kg nitrifikovaného fugátu. Fugát byl zahuštěn cca 2x, poměr objemu vyprodukovaného destilátu a vzniklého zahuštěného nitrifikovaného fugátu tedy odpovídal cca 1.

Tabulka 3: Základní charakteristiky nitrifikovaného fugátu použitého pro zahušťovací testy v poloprovozních podmínkách (VL - veškeré látky (celková sušina), CHSK - chemická spotřeba kyslíku, N-celk - koncentrace celkového dusíku)

parametr (jednotka)	Série A	Série B
pH (-)	6,90	7,10
VL (g/l)	35,0	53,0
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	2 860	2 700
N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	7,00	3,00
N-amon (mg/l)	33,3	183
N-celk (mg/l)	4 540	3 250

2.2.3. Určení spotřeby kyseliny pro okyselení surového a nitrifikovaného fugátu

Samostatné experimenty byly provedeny za účelem porovnání spotřeby kyseliny při úpravě pH surového a nitrifikovaného fugátu. Pro tyto testy byl použit fugát z bioplynové stanice v Červených Janovicích. Část experimentu s nitrifikovaným fugátem proběhla s materiálem zpracovaným v laboratorním nitrifikačním reaktoru popsáném ve Svehla et al. (2017). Hodnota pH použitého surového fugátu dosahovala 8,3, nitrifikovaný fugát vykazoval hodnotu pH 6,1. Vzorky surového fugátu (resp. nitrifikovaného fugátu) byly titrovány kyselinou chlorovodíkovou do hodnoty pH 3, přičemž byla průběžně sledována spotřeba kyseliny. Ta byla pro surový i nitrifikovaný fugát přepočtena na mmol/l libovolné silné jednosytné kyseliny a graficky vyhodnocena (obrázek 4).

2.2.4. Analytické postupy

Ve vzorcích surového fugátu, nitrifikovaného fugátu, zahuštěného surového fugátu, zahuštěného nitrifikovaného fugátu i destilátu byla sledována zejména hodnota pH, koncentrace různých chemických forem dusíku, hodnota CHSK a měrná elektrická vodivost. Ve vybraných vzorcích byla provedena také prvková analýza a v některých případech bylo realizováno stanovení koncentrace nižších mastných kyselin (NMK). Hlavní část chemických rozborů vzorků byla prováděna ve shodě s postupy uvedenými v práci Horáková et al. (2003). N-amon byl stanovován spektrofotometricky indofenolovou metodou, resp. metodou založenou na reakci s Nesslerovým činidlem. N-NO₃⁻ a N-NO₂⁻ byl kvantifikován spektrofotometricky s 2,6 dime-thylfenolem, respektive s amidem kyseliny sulfanylové a NED dihydrochloridem, N-celk byl stanovován s využitím spektrofotometrické kyvetové metody HACH čís-

lo 10071 (Hach Lange, Germany). Hodnota CHSK byla stanovována dichromanovou metodou v provedení označovaném jako tzv. spektrofotometrická semimikrometoda. Koncentrace veškerých látek (VL, respektive koncentrace celkové sušiny) byla určována standardním gravimetrickým postupem. Hodnota pH byla měřena s využitím přístroje WTW pH 340i s elektrodou SenTix 21 (WTW, Německo) a přístroje WTW Multi 3420 multimetru s pH sondou SenTix 940 (WTW, Německo). Měrná vodivost byla sledována pomocí systému inoLab Cond 730 (WTW, Německo), resp. pomocí WTW Multi 3420 multimetru s vodivostní sondou TetraCon 925 (WTW, Německo). Prvková analýza (stanovení Ca, K, Mg, P, S, As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb a Zn) byla založena na postupu uvedeném v Zakova et al. (2016) s využitím emisního spektrometru (ICP-OES, Agilent 720, Agilent Technologies Inc., USA). Touto cestou byly kvantifikovány tzv. pseudocelkové obsahy prvků. Pseudocelkový obsah Hg byl měřen v souladu s postupem popsáním v Sipkova et al. (2016) s využitím hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS, Agilent 7700x, Agilent Technologies Inc., USA). Stanovení NMK bylo provedeno pomocí plynového chromatografu Thermo Fischer Scientific TRACE 1300 (ThermoFisher, UK) s FID detektorem.

2.2.5. Výpočty

Pro vyhodnocení výsledků provedených experimentů bylo zapotřebí určit procentuální zastoupení dusíku v produktech tepelného zahušťování, tedy v zahuštěném surovém (resp. nitrifikovaném) fugátu a v destilátu. Toto zastoupení bylo vypočteno z níže uvedených vztahů. Pro zastoupení celkového dusíku v zahuštěném fugátu [(% N-celk (zahuštěný fugát))] a pro zastoupení celkového dusíku v destilátu [(% N-celk (destilát))] platí:

$$\% N - celk (zahuštěný fugát) = \frac{\rho_{ZF(N-celk)} \cdot V_{ZF}}{\rho_{ZF(N-celk)} \cdot V_{ZF} + \rho_{D(N-celk)} \cdot V_D} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\% N - celk (destilát) = \frac{\rho_{D(N-celk)} \cdot V_D}{\rho_{ZF(N-celk)} \cdot V_{ZF} + \rho_{D(N-celk)} \cdot V_D} \cdot 100 \quad (2)$$

kde ρ_{ZF} (N-celk) představuje hmotnostní koncentraci celkového dusíku (mg/l) v zahuštěném fugátu, ρ_D (N-celk) je hmotnostní koncentrace celkového dusíku v destilátu (mg/l), V_{ZF} objem zahuštěného fugátu v ml a V_D je objem destilátu v ml.

Obdobně bylo vypočteno i procentuální zastoupení N-amon v produktech tepelného zahušťování fugátu [% N-amon (zahuštěný fugát) pro zahuštěný fugát a % N-amon (destilát) pro destilát]:

$$\% N - amon (zahuštěný fugát) = \frac{\rho_{ZF(N-amon)} \cdot V_{ZF}}{\rho_{ZF(N-amon)} \cdot V_{ZF} + \rho_{D(N-amon)} \cdot V_D} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\% N - amon (destilát) = \frac{\rho_{D(N-amon)} \cdot V_D}{\rho_{ZF(N-amon)} \cdot V_{ZF} + \rho_{D(N-amon)} \cdot V_D} \cdot 100 \quad (4)$$

kde ρ_{ZF} (N-amon) představuje hmotnostní koncentraci amoniakálního dusíku v zahuštěném fugátu (mg/l), ρ_D (N-amon) je hmotnostní koncentrace amoniakálního dusíku v destilátu (mg/l).

2.3. Výsledky testů zaměřených na laboratorní simulaci tepelného zahušťování surového fugátu

V rámci experimentů zaměřených na laboratorní simulaci tepelného zahušťování surového fugátu byla hlavní pozornost věnována hodnocení distribuce N-amon mezi produkty procesu, tedy mezi tepelně zahuštěným fugátem a destilátem. Sledovány byly také další vlastnosti zahuštěného fugátu a destilátu.

2.3.1. Distribuce N-amon mezi produkty procesu

Dominantní formou dusíku ve zpracovávaném surovém fugátu byl jednoznačně N-amon. Této formě dusíku byla tedy při vyhodnocování výsledků provedených experimentů věnována hlavní pozornost. Bylo potvrzeno, že hlavním faktorem ovlivňujícím distribuci N-amon v zahuštěném fugátu a v destilátu i další vlastnosti těchto dvou produktů, je hodnota pH fugátu v okamžiku zahájení odpařovacího procesu. S klesající hodnotou pH vzrůstal podíl N-amon zůstávajícího v zahuštěném fugátu a klesal podíl N-amon přecházejícího do destilátu. Při hodnotě pH 6,0 činilo zastoupení N-amon v zahuštěném fugátu u jednotlivých vzorků 84 – 90 % (viz tabulka 4), zastoupení N-amon v destilátu se pak pohybovalo od 10 do 16 %.

Tabulka 4: Bilance amoniakálního dusíku po zahuštění při různých hodnotách pH surového fugátu

zdroj fugátu	N-amon (mg/l)		N-amon (%)	
	zahuštěný fugát	destilát	zahuštěný fugát	destilát
BPS 1 (okyseleno na pH 6,0)	3 680	710	83,8	16,2
BPS 1 (okyseleno na pH 5,0)	4 080	160	96,2	3,8
BPS 1 (okyseleno na pH 4,0)	4 030	67	98,4	1,6
BPS 2 (okyseleno na pH 6,0)	3 030	460	86,8	13,2
BPS 2 (okyseleno na pH 5,0)	3 420	240	93,4	6,6
BPS 2 (okyseleno na pH 4,0)	3 410	190	94,7	5,3
BPS 3 (okyseleno na pH 6,0)	5 970	650	90,2	9,8
BPS 3 (okyseleno na pH 5,0)	6 250	150	97,7	2,3
BPS 3 (okyseleno na pH 4,0)	7 510	70	99,1	0,9

Lepších výsledků bylo dosaženo při hodnotách pH 5,0 a 4,0. Nejvyšší podíl N-amon v zahuštěném fugátu (více než 99 %) byl pozorován u vzorku z BPS 3 okyseleného na pH 4,0. Zastoupení N-amon v destilátu nepřekročilo při hodnotách pH 4,0 ani 5,0

v žádném ze vzorků 7 %. U vzorků z BPS 1 a BPS 3 zahušťovaných při pH 4,0 pak nepřekročil 2 %.

Bilance dusíku v původním fugátu a v produktech jeho zahušťování naznačuje, že v průběhu tepelného zahušťování docházelo k určitým ztrátám dusíku, které se v jednotlivých experimentech řešených v tabulce 4 pohybovaly mezi 4 a 32 % při průměrné hodnotě 16 %. Tyto ztráty byly patrně způsobeny netěsnostmi použité aparatury a je zapotřebí se jim v případě provozní aplikace procesu vyhnout. Pokud budeme předpokládat, že dusík představující tyto ztráty unikl z plynné fáze před kondenzací destilátu či přímo z destilátu vykazujícího relativně vysoké pH (v některých případech přesahující 9,0, viz tabulka 5), je zřejmé, že reálný podíl dusíku v destilátu může být i výrazně vyšší než jsou výše presentované hodnoty.

Výsledky získané v rámci experimentů provedených se surovým fugátem jsou srovnatelné s literárními údaji. Například Chiumenti et al. (2013) také dospěli k závěru, že hodnota pH fugátu je hlavním faktorem ovlivňujícím průběh odpařovacího procesu a vlastnosti jeho produktů. Zatímco při zahušťování surového neupraveného fugátu charakteristického hodnotou pH v rozmezí 7,6 – 7,9 bylo 78 % N-amon převedeno do destilátu, úprava pH na 5,0 vedla k tomu, že 97,5 % N-amon zůstalo v zahuštěném fugátu. Při hodnotě pH 3,5 tento podíl vzrostl dokonce na 99,2 %. K podobným závěrům došli i Panvini et al. (2009), kteří ale pracovali s materiálem o vyšší hodnotě pH (8,4). Při zpracování neupraveného surového fugátu došlo k transferu 65 % N-amon do destilátu. Okyselení na pH 6,5 vedlo ke snížení přechodu N-amon do destilátu na 15 %. Bonmatí et Flotats (2003) považují za optimální úpravu pH surového fugátu na 4,0. Za těchto podmínek zjistili, že do destilátu přechází pouze cca 0,5 % N-amon původně obsaženého ve zpracovávaném surovém fugátu.

2.3.2. Další vlastnosti produktů procesu

Hodnota pH surového fugátu v okamžiku zahájení odpařování má pochopitelně významný vliv i na další vlastnosti zahuštěného fugátu i destilátu. V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty pH a konduktivity pro tyto produkty tepelného zahušťování fugátu. Hodnota pH zahuštěného fugátu byla ve všech testovaných případech o několik desetin vyšší než hodnota v okyseleném surovém fugátu v okamžiku zahájení odpařovacího procesu. Oproti tomu hodnota pH destilátu ve většině případů vzrostla významně. Například u BPS 1 byl u všech variant provozní hodnoty pH zaznamenán nárůst pH v destilátu o více než 3 jednotky. Důvodem tohoto jevu byl patrně zejména výše diskutovaný transfer NH_3 do destilátu. Na druhou stranu, v případě zahušťování fugátu z BPS 3 při původní hodnotě pH fugátu 4 byla v destilátu zaznamenána hodnota pH 3,8. Právě v této variantě byla v destilátu zaznamenána vůbec nejnižší koncentrace N-amon (viz tabulka 5). Konduktivita destilátu významně klesá s poklesem pro-

vozní hodnoty pH, což jasně prokazuje pokles koncentrace elektrolytů v destilátu se snižujícím se pH při zahušťování. V případě hodnoty pH 5,0 a 4,0, nepřesahovala konduktivita 1 mS/cm a dosahuje tedy hodnot splňujících limit pro pitnou vodu. Na druhou stranu jsou to hodnoty o 2 – 3 řády vyšší než hodnoty typické pro destilovanou vodu (Pitter, 1999). Výrazně vyšší hodnoty převyšující 3 mS/cm byly zaznamenány u všech vzorků zpracovaných při pH 6. Nejnižší hodnota (0,2 mS/cm) byla zaznamenána u destilátu získaného tepelným zahušťováním fugátu produkovaného na BPS 3 při hodnotě pH 4,0. Ve všech vzorcích zahuštěného fugátu byly zaznamenány velice vysoké hodnoty konduktivity pohybující se v řádu desítek mS/cm.

Tabulka 5: Hodnoty pH a konduktivity v produktech tepelného zahušťování surového fugátu (EC - měrná vodivost (konduktivita)).

zdroj fugátu	EC (mS/cm)		pH	
	zahuštěný fugát	destilát	zahuštěný fugát	destilát
BPS 1 (okyseleno na pH 6,0)	39	3,2	6,7	9,3
BPS 1 (okyseleno na pH 5,0)	41	0,7	5,4	8,6
BPS 1 (okyseleno na pH 4,0)	45	0,5	4,4	7,5
BPS 2 (okyseleno na pH 6,0)	19	3,2	6,8	9,1
BPS 2 (okyseleno na pH 5,0)	20	0,9	5,8	8,4
BPS 2 (okyseleno na pH 4,0)	28	0,5	5,1	5,4
BPS 3 (okyseleno na pH 6,0)	48	4,3	6,5	9,3
BPS 3 (okyseleno na pH 5,0)	53	0,9	5,4	7,5
BPS 3 (okyseleno na pH 4,0)	52	0,2	4,4	3,8

2.4. Výsledky testů zaměřených na laboratorní simulaci tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu

Výsledky testů zaměřených na laboratorní simulaci tepelného zahušťování surového fugátu presentované výše naznačují, že přestože byly vzorky okyseleny přidavkem minerální kyseliny, destilát stále může obsahovat významné množství N-amon. Okyselování fugátu navíc prodražuje proces jeho zpracování. Proto byla v rámci výzkumných aktivit v oblasti tepelného zahušťování fugátu hlavní pozornost směřována k testům s nitrifikovaným fugátem, jejichž výsledky jsou prezentovány v následujícím textu.

2.4.1. Distribuce sloučenin dusíku mezi produkty tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu

V podstatě veškeré sloučeniny dusíku obsažené v původním nitrifikovaném fugátu byly zachovány v zahuštěném produktu. Z celkového dusíku přítomného původně v nitrifikovaném fugátu přešlo do destilátu pouze 0,035 – 0,060 %, přičemž byl zaznamenán určitý trend nárůstu této hodnoty s narůstajícím poměrem objemu vyprodukovaného destilátu k objemu vzniklého tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu (tabulka 6). Je tedy zřejmé, že při všech provedených testech bylo více než 99,9 % celkového dusíku obsaženého v nitrifikovaném fugátu zachováno v zahuštěném produktu.

Tabulka 6: Distribuce sloučenin dusíku mezi produkty při laboratorní simulaci tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu.

parametr (jednotka)	série 1	série 2	série 3
% N-celk (zahuštěný fugát)	99,965	99,952	99,940
% N-celk (destilát)	0,035	0,048	0,060

Intenzita transferu sloučenin dusíku ze zpracovávaného fugátu do destilátu byla tedy mnohonásobně nižší než v případě zpracování surového fugátu (viz tabulka 4).

2.4.2. Vlastnosti tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu

V zahuštěném nitrifikovaném fugátu byl sledován zejména obsah sloučenin dusíku. Dále byla hodnocena koncentrace dalších základních živin, pozornost byla věnována také obsahu rizikových prvků v tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu.

2.4.2.1. Obsah sloučenin dusíku

Obsah sloučenin dusíku v tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu byl poměrně vysoký. Koncentrace N-celk vztažená na 1 l přitom podle očekávání rostla společně s rostoucím poměrem objemu destilátu k objemu zahuštěného nitrifikovaného fugátu, přičemž v sérii 3 charakteristické poměrem objemu vzniklého destilátu a zahuštěného nitrifikovaného fugátu 2,0 dosáhla 17,9 g/l. N-NO₃⁻ byl dominantní formou výskytu dusíku v zahuštěném nitrifikovaném fugátu (tabulka 7).

Tabulka 7: Základní charakteristiky tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu v jednotlivých sériích

parametr (jednotka)	série 1	série 2	série 3
pH (-)	6,40 ± 0,05	5,80 ± 0,10	5,80 ± 0,10
VL (g/l)	97,2 ± 5,25	120 ± 6,3	144 ± 8,1
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	11 500 ± 86,0	14 600 ± 285	16 900 ± 569
N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	2,00 ± 0,10	1,00 ± 0,10	1,60 ± 0,60
N-amon (mg/l)	15,4 ± 2,60	14,0 ± 1,50	14,2 ± 3,80
N-celk (mg/l)	12 000 ± 100	15 400 ± 310	17 900 ± 620

Hodnocen byl také hmotnostní obsah celkového dusíku v sušině zahuštěného nitrifikovaného fugátu. Ten dosahoval v jednotlivých sériích 123 – 128 g N/kg_{sušiny}. Dusík tedy představoval 12 – 13 % sušiny zahuštěného nitrifikovaného fugátu. To jsou hodnoty srovnatelné s hodnotami dosahovanými běžně v digestátu, resp. v surovém fugátu (Botheju et al., 2010; Vaneckhaute et al., 2017; Bolzonella et al., 2018; Shi et al., 2018) s tím rozdílem, že v těchto materiálech je hlavní formou výskytu N-amon, nikoliv N-NO₃⁻ jako v případě zahuštěného nitrifikovaného fugátu.

2.4.2.2. Obsah dalších živin

V tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu byl sledován také obsah dalších důležitých živin (P, K, Ca, Mg, S). Výsledky jsou shrnuty v tabulce 8. Zjištěné hodnoty obsahu jednotlivých prvků v sušině jsou obecně ve shodě se závěry prací jiných autorů, které jsou zaměřeny na zemědělské využití fermentačního zbytku, resp. surového fugátu (např. Vaneckhaute et al., 2017; Bolzonella et al., 2018; Khan et Nordberg, 2019). Vzhledem k podstatě funkce nitrifikačního reaktoru a systému pro tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu nelze předpokládat, že by se obsah zmíněných živin významně lišil od obsahu ve fermentačním zbytku, resp. v surovém fugátu. Uvedené prvky v nitrifikačním reaktoru nepodléhají biochemickým přeměnám a vzhledem k tomu, že nejsou těkavé, zůstávají po tepelném zahuštění v zahuštěném nitrifikovaném fugátu a nepřecházejí do destilátu. Zastoupení jednotlivých prvků v sušině bylo u všech sérií tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu velice podobné. Koncentrace živin vztažená na 1 l tepelně zahuštěného fugátu roste s rostoucím objemovým poměrem mezi destilátem a zahuštěným nitrifikovaným fugátem, tedy v pořadí série 1 < série 2 < série 3 (viz tabulka 8). To je pochopitelné, protože v uvedeném pořadí klesá objem kapaliny, ve kterém je obsaženo množství živiny přítomné původně v nitrifikovaném fugátu před zahájením jeho tepelného zahušťování.

Tabulka 8: Koncentrace dalších živin v tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu

parametr (jednotka)	série 1	série 2	série 3
P (mg/kg _{sušiny})	2 360 ± 180	2 180 ± 331	1 960 ± 86
P (mg/l)	229 ± 17,5	262 ± 39,8	281 ± 12,3
K (mg/kg _{sušiny})	52 300 ± 154	50 600 ± 194	50 900 ± 149
K (mg/l)	5 080 ± 15,0	6 080 ± 22,3	7 310 ± 21,4
Ca (mg/kg _{sušiny})	3 490 ± 222	3 540 ± 186	3 280 ± 201
Ca (mg/l)	339 ± 21,6	426 ± 22,4	471 ± 28,8
Mg (mg/kg _{sušiny})	471 ± 58,1	401 ± 73,6	436 ± 65,9
Mg (mg/l)	45,8 ± 5,65	48,2 ± 8,85	62,6 ± 9,46
S (mg/kg _{sušiny})	2 810 ± 112	3 490 ± 54	3 300 ± 100
S (mg/l)	273 ± 10,9	420 ± 6,5	474 ± 14,4

2.4.2.3. Obsah rizikových prvků

Z hlediska aplikovatelnosti tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu na zemědělskou půdu je velice důležitý obsah rizikových prvků v tomto materiálu. V rámci laboratorní simulace tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu byla proto koncentrace těchto prvků v jednotlivých sériích také sledována (tabulka 9). Zjištěné hodnoty splňují s velkou rezervou veškeré požadavky pro použití zahuštěného nitrifikovaného fugátu jako hnojiva dané vyhláškou č. 237/2017 (Ministerstvo zemědělství ČR, 2017; tabulka 9). Nicméně, je zřejmé, že obsah rizikových prvků bude v případě přípravy tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu proměnlivý a bude záviset zejména na obsahu těchto prvků v substrátu, ze kterého se bude v rámci dané bioplynové stanice vyrábět bioplyn. Ten bude určovat obsah rizikových prvků ve fermentačním zbytku i v surovém fugátu. Pomineme-li případný rozklad organických látek obsažených v sušině fugátu vedoucí ke snížení celkového obsahu sušiny, následné zpracování fugátu v soustavě nitrifikační reaktor/tepelné zahuštění již nemá potenciál obsah těchto prvků v sušině významněji změnit. Stejně jako v případě živin (tabulka 8), i u rizikových prvků platí, že zatímco jejich koncentrace vztažená na kg sušiny je srovnatelná pro všechny provedené série tepelného zahušťování, koncentrace vztažená na 1 l zahuštěného nitrifikovaného fugátu mírně roste s objemovým poměrem mezi destilátem a tepelně zahuštěným nitrifikovaným fugátem, tedy v pořadí série 1 < série 2 < série 3.

Tabulka 9: Obsah vybraných rizikových prvků v tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu a jeho srovnání s limitem dle vyhlášky MZe ČR č. 237/2017

parametr (jednotka)	série 1	série 2	série 3	limit
As (mg/kg _{sušiny})	<1,50	<1,50	<1,50	20
As (mg/l)	<0,15	<0,18	<0,22	-
Cd (mg/kg _{sušiny})	<0,05	<0,05	<0,05	2
Cd (mg/l)	<0,005	<0,006	<0,007	-
Cr (mg/kg _{sušiny})	0,98 ± 0,17	1,00 ± 0,25	0,64 ± 0,11	100
Cr (mg/l)	0,095 ± 0,017	0,120 ± 0,030	0,092 ± 0,16	-
Cu (mg/kg _{sušiny})	4,8 ± 0,3	5,3 ± 0,8	5,1 ± 0,0	250
Cu (mg/l)	0,47 ± 0,03	0,64 ± 0,10	0,73 ± 0,00	-
Hg (mg/kg _{sušiny})	0,12 ± 0,010	0,11 ± 0,012	0,11 ± 0,09	1
Hg (mg/l)	0,011 ± 0,0010	0,014 ± 0,0016	0,016 ± 0,0013	-
Mo (mg/kg _{sušiny})	<0,25	0,28 ± 0,04	<0,25	20
Mo (mg/l)	<0,024	0,034 ± 0,005	<0,036	-
Ni (mg/kg _{sušiny})	3,68 ± 0,12	3,58 ± 0,37	3,23 ± 0,01	50
Ni (mg/l)	0,358 ± 0,012	0,431 ± 0,045	0,464 ± 0,001	-
Pb (mg/kg _{sušiny})	1,51 ± 0,18	1,50 ± 0,32	1,45 ± 0,23	100
Pb (mg/l)	0,146 ± 0,017	0,180 ± 0,038	0,208 ± 0,033	-
Zn (mg/kg _{sušiny})	13,4 ± 1,1	11,7 ± 0,8	12,0 ± 2,3	1 200
Zn (mg/l)	1,30 ± 0,11	1,41 ± 0,10	1,72 ± 0,33	-

2.4.3. Vlastnosti destilátu

V destilátu byly sledovány zejména koncentrace různých forem dusíku. Velká pozornost byla věnována také měrné vodivosti destilátu, z jejíž hodnoty je možno usuzovat na celkový obsah elektrolytů v destilátu. Byl sledován také obsah organických látek v destilátu kvantifikovaný hodnotou CHSK a koncentrací nižších mastných kyselin.

2.4.3.1. Obsah sloučenin dusíku

V destilátu byly zaznamenány velice nízké koncentrace N-celk, které v jednotlivých sériích dosahovaly 4,2 – 5,3 mg/l (tabulka 10), přičemž byl zjištěn nepatrný nárůst koncentrace N-celk s nárůstem poměru objemu vyprodukovaného destilátu k objemu vzniklého tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu. Koncentrace tedy byly nejvyšší v sérii 3. Nejvíce zastoupenou formou dusíku v destilátu byl N-amon. Zjištěné hodnoty jsou cca o jeden až dva řády nižší než v případě zpracování surového fugátu (viz tabulka 4).

Tabulka 10: Základní vlastnosti destilátu (EC - měrná vodivost (konduktivita))

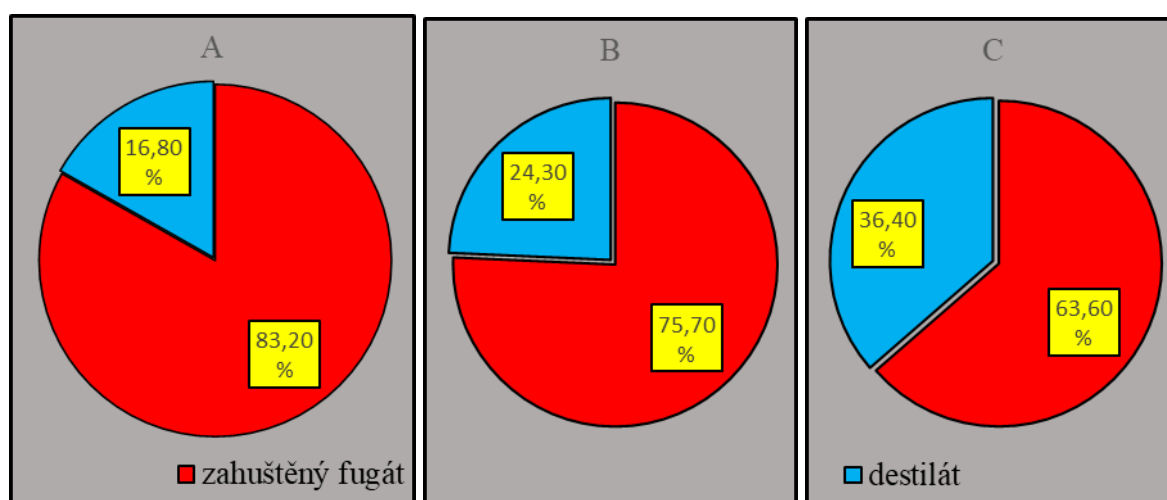
parametr (jednotka)	série 1	série 2	série 3
pH (-)	8,3 ± 0,10	8,0 ± 0,1	7,9 ± 0,1
EC (mS/cm)	0,03 ± 0,007	0,02 ± 0,002	0,01 ± 0,003
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	1,1 ± 0,3	1,9 ± 0,4	1,2 ± 0,6
N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,02	0,06 ± 0,03
N-amon (mg/l)	3,1 ± 0,5	3,0 ± 0,6	4,0 ± 1,3
N-celk (mg/l)	4,2 ± 0,2	4,9 ± 1,0	5,3 ± 0,7
CHSK (mg/l)	180 ± 4	110 ± 3	100 ± 3

Přestože jsou koncentrace N-amon, resp. N-celk, v destilátu získaném při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu vyšší než např. koncentrace v permeátu produkovaném při tzv. membránové destilaci (Khan et Nordberg, 2018), hodnoty jsou velice nízké a nepředstavují sebemenší problém pro technické využití destilátu jako procesní vody například pro úpravu sušiny substrátu pro výrobu bioplynu vstupujícího do anaerobního reaktoru bioplynové stanice.

2.4.3.2. Riziko úniku N-amon do destilátu

Ačkoliv byla koncentrace N-amon v destilátu velice nízká, vyplývá z výsledků experimentů určité riziko zvýšeného transferu N-amon do destilátu. Nitrifikovaný fugát, který byl použit k laboratorní simulaci zahušťovacího procesu, byl charakteristický velice nízkou koncentrací N-amon dosahující 8,9 mg/l. Pokud vypočteme procentuální podíl N-amon, který z použitého nitrifikovaného fugátu při jeho tepelném zahušťování přešel do destilátu, dojdeme u jednotlivých sérií k hodnotě cca 17 – 36 % (obrázek 3), přičemž část N-amon přecházející do destilátu se zvyšovala společně s poměrem objemu produkovaného destilátu k objemu vzniklého zahuštěného nitrifikovaného fugátu,

tedy v pořadí série 1 < série 2 < série 3. Tato skutečnost může představovat velký problém při vyšším obsahu N-amon v nitrifikovaném fugátu. Podmínky panující v nitrifikačním reaktoru a celková efektivita nitrifikačního procesu jakožto postupu předúpravy fugátu před jeho tepelným zahušťováním se tak jeví jako velice důležité z pohledu kvality destilátu. Pro tu je velice důležité, aby účinnost převedení N-amon na N-NO_3^- v nitrifikačním reaktoru byla co nejvyšší. Je potřeba zdůraznit, že při popísaných experimentech byl pro zahušťování použit nitrifikovaný fugát obsahující pouze malé množství N-amon (koncentrace činila 8,9 mg/l). Díky tomu i přes relativně vysoký podíl N-amon přecházejícího do destilátu (obrázek 3) N-celk obsažený v destilátu nepřekročil 0,07 % z N-celk původně obsaženého v zahušťovaném nitrifikovaném fugátu.



Obrázek 3: Distribuce N-amon mezi produkty tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu (A – série 1; B: série 2; C: série 3)

Stejně jako v případě tepelného zahušťování surového fugátu (Bonmatí et Flotats, 2003; Panivini et al., 2009; Chiumenti et al., 2013) bude intenzita přestupu N-amon do destilátu závislá na aktuální hodnotě pH, případně také na teplotě a dalších podmínkách procesu. Lze předpokládat podobný trend obsahu N-amon v destilátu v závislosti na pH při odpařování, jako tomu bylo u testů se surovým fugátem. Zastoupení N-amon ve fugátu dosahující v sérii 1 cca 17 % je velmi blízké zastoupení N-amon v destilátu při tepelném zahušťování surového fugátu při pH 6,0 u vzorku z BPS 1 (viz kapitola 2.3). To činilo cca 16 %. Významné je zjištění, že poměrně velká část N-amon může do destilátu přejít i při velice nízké koncentraci N-amon v nitrifikovaném fugátu. Zjištěná intenzita přestupu N-amon do destilátu je (zejména v případě série 1) ve shodě i se zjištěními dalších autorů zabývajících se tepelným zahušťováním surového fugátu. Například Panivini et al. (2009) zjistili, že při tepelném zahušťování surového fugátu přechází při pH 6,5 okolo 15 % N-amon, což je hodnota srovnatelná s výsledky tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu vykazujícího hodnotu pH 6,1 presentovanými výše. Je ve shodě zejména s výsledky pro sérii 1.

Shrneme-li výše uvedené úvahy, je možno konstatovat, že při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu je z hlediska přestupu N-amon do destilátu zásadní poměr objemu vzniklého destilátu k objemu produkovaného zahuštěného fugátu a hodnota pH fugátu při zahušťovacím procesu. S rostoucím poměrem objemu destilátu k objemu zahuštěného fugátu, resp. s rostoucím stupněm zahuštění fugátu, roste podíl dusíku, který přechází do destilátu. Toto pozorování se jeví jako logické, neboť s rostoucím množstvím vody odpařené z původního nitrifikovaného fugátu roste i množství dusíku, které do vodní páry přechází. Hodnota pH má zásadní význam z důvodu jejího vlivu na distribuci N-NH_4^+ a N-NH_3 v rámci N-amon (Pitter, 1999).

2.4.3.3. Měrná vodivost destilátu

Velice nízké hodnoty měrné vodivosti v destilátu dosahující v jednotlivých sériích 0,01 – 0,03 mS/cm (tabulka 10) jsou o 1 – 2 řády nižší než hodnoty zjištěné v průběhu veškerých experimentů provedených s okyseleným surovým fugátem (viz kapitola 2.3). Jsou srovnatelné s hodnotami zjištěnými v permeátu produkovaném při membránové destilaci surového fugátu (Khan et Nordberg, 2018). To je velice pozitivní zjištění, neboť membránová destilace je po technické i ekonomické stránce velice náročným procesem. Nízké hodnoty měrné vodivosti dokazují, že celkový obsah elektrolytů v destilátu byl ve všech provedených sériích tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu velice nízký.

2.4.3.4. Obsah organických látek v destilátu

Hodnoty CHSK kvantifikující organické látky v destilátu dosahovaly v jednotlivých sériích 100 – 180 mg/l, přičemž s rostoucím poměrem objemu vyprodukovaného destilátu a vzniklého zahuštěného nitrifikovaného fugátu klesaly (tabulka 10). Toto zjištění naznačuje, že část organických látek obsažených původně v nitrifikovaném fugátu je za daných podmínek těkavá a může přejít do destilátu. Zároveň je z výsledků zřejmé, že množství těchto látek je poměrně malé. Mezi látky, u kterých je možno předpokládat při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu transfer do destilátu patří mimo jiné tzv. nižší mastné kyseliny, tedy organické kyseliny s počtem atomů uhlíku 1 – 6 (Straka et al., 2003), podobně, jako tomu bylo v případech, kdy byl tepelně zahušťován surový fugát, resp. fermentační zbytek (Palatsi et al., 2005). Nicméně, při tepelném zahušťování surového fermentačního zbytku byly zaznamenány hodnoty CHSK výrazně vyšší než v případě presentovaných hodnot pro zahušťování nitrifikovaného fugátu. Palatsi et al. (2005) uvádějí rozmezí hodnot 300 – 800 mg/l. Významně nižší hodnoty CHSK zaznamenané ve vzorcích destilátu vznikajícího při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu jsou patrně způsobeny tím, že v biologickém nitrifikačním reaktoru dochází k rozkladu nižších mastných kyselin a dalších těkavých biologicky rozložitelných organických látek. Tyto látky jsou tedy z fugátu odstraněny ještě před zahájením procesu tepelného zahušťování a nemohou se tedy ve zvýšené

míře objevit v destilátu. Tímto mechanismem patrně zpracování fugátu v nitrifikačním reaktoru také přispívá ke zvýšení kvality produkovaného destilátu. Zároveň jsou hodnoty CHSK ve fugátu produkovaném při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu dokonce významně nižší než v permeátu získaném při membránové destilaci fugátu. Ten vykazoval hodnoty CHSK v rozmezí 300 – 500 mg/l (Khan et Nordberg, 2018).

V tabulce 11 jsou shrnuty výsledky rozborů zaměřených na kvantifikaci nižších mastných kyselin ve vzorcích nitrifikovaného fugátu a produktů jeho tepelného zahušťování realizovaného v rámci série 1.

Tabulka 11: Koncentrace nižších mastných kyselin v mg/l ve vzorcích ze série 1

kyselina	nitrifikovaný fugát	zahuštěný nitrifikovaný fugát	destilát
octová	16,4	16,0	7,6
propionová	0	43,0	0
isomáselná	15,5	4,5	9,9
máselná	0	6,5	0
isovalerová	19,5	0	0
valerová	19,0	0	0
kapronová	0	0	0
celkem	70,4	70,0	17,5

Z údajů v tabulce 11 je zřejmé, že při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu může docházet k určitým transformacím nižších mastných kyselin. Například kyselina propionová nebyla v původním nitrifikovaném fugátu vůbec přítomna, přičemž její koncentrace v tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu dosahovala 43 mg/l. Také máselná kyselina byla zjištěna v zahuštěném nitrifikovaném fugátu, ale v původním nitrifikovaném fugátu nebyla přítomna. Produkce nižších mastných kyselin byla v minulosti opakovaně zaznamenána při tepelném zpracování různých organických materiálů. Tento jev byl pozorován například při tepelné hydrolyze přebytečného čistírenského kalu (Bjerg-Nielsen et al., 2018; Yang et al., 2019; Zhang et al., 2019). Pravděpodobně k podobným přeměnám v důsledku podmínek procesu dochází i při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu, přičemž určitá část vznikajících těkavých látek může přecházet do destilátu.

V každém případě je zřejmé, že obsah organických látek v destilátu vznikajícím při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu je poměrně nízký a nepředstavuje sebemenší problém pro využití destilátu jako procesní vody například pro optimalizaci sušiny substrátu vstupujícího do anaerobního reaktoru bioplynové stanice. Je potřeba počítat s tím, že intenzita přechodu organických látek do destilátu může být (podobně jako v případě přechodu N-amon do destilátu) ovlivněna i hodnotou pH při procesu zahušťování. Ta určuje disociaci různých látek, přičemž různé disociační formy organických látek jsou v řadě případů různě těkavé. To platí mimo jiné pro vý-

še diskutované nižší mastné kyseliny, které jsou těkavé ve svých nedisociovaných formách, jejichž zastoupení roste s klesající hodnotou pH.

2.5. Výsledky poloprovozního ověřování hlavních závěrů laboratorního výzkumu

Výsledky testů zaměřených na poloprovozní simulaci tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu v zásadě potvrzují závěry vyplývající z laboratorních testů (viz kapitola 2.4). I v rámci poloprovozních pokusů bylo zjištěno, že více než 99 % sloučenin dusíku zůstává v zahuštěném fugátu (tabulka 12).

Tabulka 12: Distribuce sloučenin dusíku mezi produkty při poloprovozní simulaci tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu

parametr (jednotka)	série A	série B
% N-celk (destilát)	0,62	0,03
% N-celk (zahuštěný fugát)	99,38	99,97
% N-amon (destilát)	62,14	0,51
% N-amon (zahuštěný fugát)	37,86	99,49

Také v poloprovozních podmínkách se potvrdilo, že při aplikaci většího objemového poměru mezi destilátem a zahuštěným nitrifikovaným fugátem (série A) roste zastoupení sloučenin dusíku v destilátu. Tento jev je zřejmý zejména, porovnáme-li zastoupení N-amon v destilátu u obou sérií. Zatímco u série B se pohybuje pouze okolo 0,5 %, u série A dosahuje více než 62 %. To je ještě podstatně vyšší hodnota, než tomu bylo v případě laboratorních testů (kapitola 2.4). Důvodem je patrně skutečnost, že poměr objemu destilátu a zahuštěného fugátu aplikovaný v rámci série A (2,3) byl vyšší než v případě laboratorních testů, kdy tento poměr činil maximálně 2,0. Dalším faktorem, který patrně významně ovlivnil distribuci N-amon do destilátu v jednotlivých sériích, je hodnota pH zpracovávaného nitrifikovaného fugátu. Zatímco v sérii B dosahovala 7,2, v rámci série A došlo k jejímu nárůstu až na hodnotu 8,3, čímž byl významně zvýšen podíl těkavého NH_3 na celkové koncentraci N-amon ve fugátu. V každém případě, i v rámci poloprovozních zkoušek bylo jednoznačně prokázáno, že vysoké hodnoty poměru mezi objemem produkovaného destilátu a vznikajícího zahuštěného nitrifikovaného fugátu jsou spojeny s nárůstem rizika transferu N-amon do destilátu. To může představovat velký problém zejména při vyšším obsahu N-amon ve zpracovávaném nitrifikovaném fugátu.

Důležité vlastnosti produktů tepelného zahušťování pro série A a B jsou shrnuty v tabulkách 13 a 14. Koncentrace jednotlivých látek v produktech zahušťování jsou uvedeny objemově, tedy jsou vztaženy na 1 l. U zahuštěného fugátu jsou zároveň uvedeny koncentrace vztažené na 1 kg sušiny. Ty na rozdíl od objemového vyjádření koncentrace nejsou ovlivněny stupněm zahuštěného fugátu, tedy poměrem objemu produkovaného destilátu a zahuštěného fugátu. U destilátu však vyjádření koncentra-

ce sledovaných látek vztažené na 1 kg sušiny není smysluplné, neboť koncentrace sušiny v destilátu je extrémně nízká.

Tabulka 13: Důležité vlastnosti produktů tepelného zahušťování (série A)

parametr (jednotka)	zahuštěný fugát	destilát
pH (-)	8,3	9,5
CHSK (mg/l)	33 700	< 10
EC (mS/cm)	94,50	0,12
VL (g/l)	126	0,012
N-amon (mg/kg _{sušiny})	420	-
N-amon (mg/l)	42,8	30,1
N-celk (mg/kg _{sušiny})	143 000	-
N-celk (mg/l)	14 600	38,8
P (mg/kg _{sušiny})	1 660	-
P (mg/l)	206	0,31
K (mg/kg _{sušiny})	123 000	-
K (mg/l)	15 300	0,73
Ca (mg/kg _{sušiny})	9 520	-
Ca (mg/l)	1 180	1,00
Mg (mg/kg _{sušiny})	7 060	-
Mg (mg/l)	875	< 0,5
S (mg/kg _{sušiny})	6 980	-
S (mg/l)	867	0,54

Tabulka 14: Důležité vlastnosti produktů tepelného zahušťování (série B)

parametr (jednotka)	zahuštěný fugát	destilát
pH (-)	7,2	8,1
CHSK (mg/l)	101 000	< 10
EC (mS/cm)	25,70	0,018
VL (g/l)	102	< 10
N-amon (mg/kg _{sušiny})	2 340	-
N-amon (mg/l)	290	1,48
N-celk (mg/kg _{sušiny})	50 200	-
N-celk (mg/l)	6 230	2,10
P (mg/kg _{sušiny})	1 640	-
P (mg/l)	167	< 0,1
K (mg/kg _{sušiny})	62 700	-
K (mg/l)	6 400	< 0,5
Ca (mg/kg _{sušiny})	7 500	-
Ca (mg/l)	765	< 0,5
Mg (mg/kg _{sušiny})	5 760	-
Mg (mg/l)	588	< 0,5
S (mg/kg _{sušiny})	1 530	-
S (mg/l)	156	< 0,5

Souhrnně je možno konstatovat, že i z pohledu vlastností tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu a destilátu byly potvrzeny závěry vyplývající z vyhodnocení prů-

běhu laboratorní simulace tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu. Důležité živiny zůstaly zachovány v zahuštěném produktu, přičemž jejich obsah v destilátu byl minimální. V rámci série B byla koncentrace P, K, Ca, Mg i S v destilátu pod mezí detekce použitých analytických postupů. Neměřitelná byla v destilátu i koncentrace Mg v sérii A. Přestože koncentrace P, K, Ca a S v destilátu ze série A měřitelná byla, zjištěné hodnoty byly velice nízké.

Pozitivní je zjištění, že obsah organických látek v destilátu kvantifikovaný parametrem CHSK byl v obou sériích ještě významně nižší než v případě laboratorních testů. V případě série B byla také zaznamenána v destilátu velice nízká hodnota měrné vodivosti s hodnotou srovnatelnou s laboratorními testy. Vyšší hodnoty tohoto parametru u série A souvisí patrně se zvýšeným obsahem N-amon v destilátu (30,1 mg/l).

2.6. Využití tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu

V rámci prezentovaných výsledků bylo potvrzeno, že tepelně zahuštěný nitrifikovaný fugát má parametry vhodné pro jeho využití ve výživě rostlin. Vzhledem k vysokému obsahu sloučenin dusíku i dalších živin může sloužit jako hodnotné komplexní kapalné hnojivo. Za předpokladu použití nekontaminovaných vstupních surovin pro výrobu bioplynu v anaerobním reaktoru bioplynové stanice splňuje obsah rizikových prvků současné legislativní požadavky pro aplikaci tepelně zahuštěného fugátu na půdu. Významnou změnou ve srovnání se surovým fugátem, resp. se surovým tepelně zahuštěným fugátem, je skutečnost, že zatímco v surovém fugátu je dominantní formou dusíku N-amon, v nitrifikovaném, resp. zahuštěném nitrifikovaném, fugátu je dusík přítomen převážně ve formě N-NO_3^- . To pochopitelně přináší určité výhody i potenciální úskalí. Obě formy dusíku jsou rostlinami dobře přijatelné, ale rostlina využívá především formu dusičnanovou, která není toxická a je ve srovnání s N-amon v půdě více pohyblivá. Aplikace takto upraveného fugátu je vhodné především k jarnímu hnojení a k přihnojování na půdu v počátečních fázích růstu. Rostlina má tak k dispozici nejen mobilní dusík, ale celé spektrum živin v přístupných formách. V případě aplikace mimo vegetační období existuje u N-NO_3^- větší riziko vyplavování do povrchových vod. S těmito skutečnostmi je při aplikaci nitrifikovaného fugátu na zemědělskou půdu potřeba počítat. Regulace parametrů soustavy nitrifikace/tepelné zahuštění pro zpracování fugátu může optimalizovat poměr N-amon a N-NO_3^- v tepelně zahuštěném fugátu dle aktuálních potřeb. V této oblasti je však zapotřebí realizovat další navazující výzkum.

2.7. Využití destilátu vznikajícího při tepelném zahušťování fugátu

Celkově je možno konstatovat, že vlastnosti destilátu se jeví jako velice vhodné z hlediska jeho využití jako procesní vody například pro úpravu sušiny substrátu

vstupujícího do procesu anaerobní fermentace, popřípadě pro oplach různých zařízení či ploch. V úvahu přichází i využití jako vody pro závlahu rostlin. Nízký obsah sloučenin dusíku i dalších látek v destilátu eliminuje v případě použití destilátu za účelem úpravy sušiny substrátu pro výrobu bioplynu namísto surového fugátu riziko inhibice aktivity mikroorganismů odpovědných za produkci bioplynu amoniakem či jinými látkami zmiňované v literatuře (Hu et al., 2014; Drosig et al., 2015). Zároveň bude minimalizován zbytečný vnos inertních látek do procesu anaerobní fermentace, který také může zhoršovat efektivitu produkce bioplynu (Lindmark et al., 2011; Khan et Nordberg, 2019). V případě, že v objektu dané konkrétní BPS nebude nalezeno uplatnění pro destilát, připadá za předpokladu splnění emisních standardů, resp. emisních limitů, pro obsah sledovaných znečišťujících látek v úvahu nakládání s destilátem jako s vyčištěnou odpadní vodou a jeho vypouštění do vhodného recipientu. Relativně vysoká kvalita destilátu (viz předchozí kapitoly) však přináší možnost poměrně širokého využití destilátu při různých aktivitách provozovatele BPS, resp. zemědělského družstva provozujícího BPS, a využití destilátu by v současné době, kdy jsou intenzívně diskutovány možnosti úspor při spotřebě vody, mělo být preferováno.

2.8. Optimalizace vlastností produktů tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu

Z hlediska kvality obou produktů tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu je pochopitelně zásadní správné nastavení parametrů soustavy nitrifikace/tepelné zahuštění. Klíčové jsou vlastnosti nitrifikovaného fugátu vstupujícího do procesu tepelného zahušťování. Ty jsou determinovány zejména vlastnostmi surového fugátu vstupujícího do nitrifikačního procesu a podmínkami panujícími v nitrifikačním reaktoru (Svehla et al., 2017; Švehla et al., 2021). Distribuce zbytkového N-amon obsaženého v nitrifikovaném fugátu i těkavých organických látek mezi tepelně zahuštěným nitrifikovaným fugátem a destilátem je závislá zejména na hodnotě pH při procesu zahušťování (viz kapitoly 2.4. a 2.5).

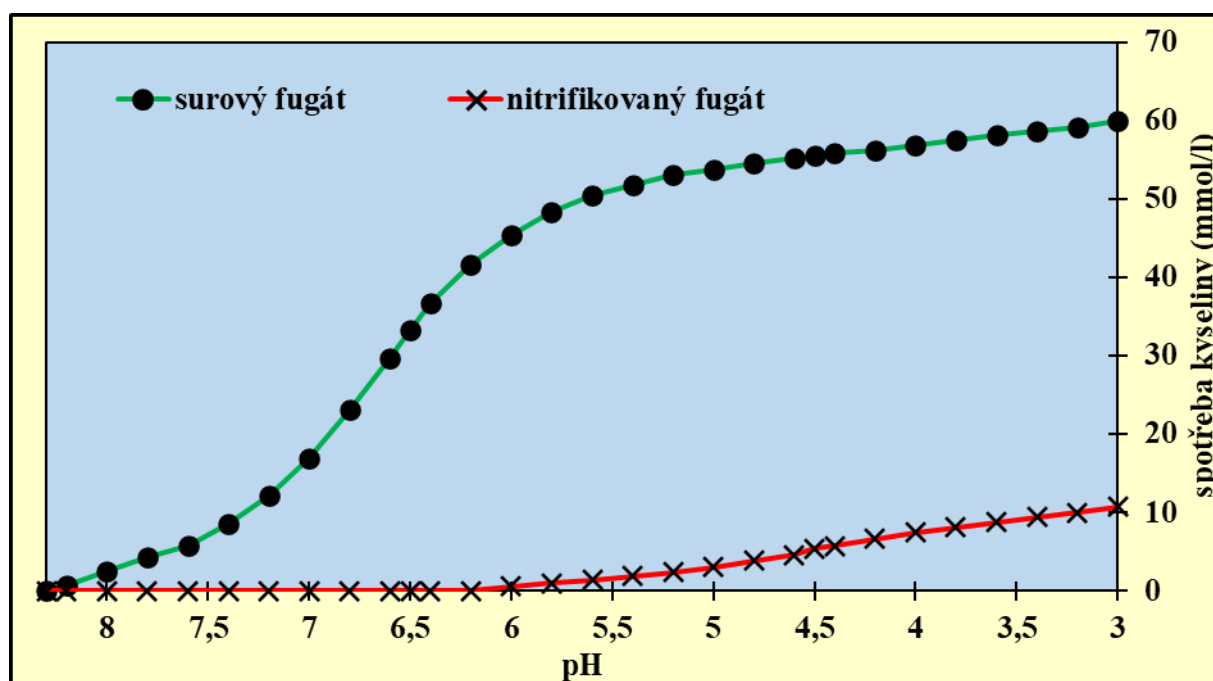
Z hlediska dalšího využití obou hlavních produktů tepelného zahušťování fugátu se jeví jako stěžejní minimalizovat transfer N-amon do destilátu. Za účelem produkce destilátu s minimálním obsahem N-amon (a zároveň tepelně zahuštěného fugátu s maximálním obsahem N-amon) je nezbytně nutné provozovat systém pro nitrifikaci fugátu takovým způsobem, aby obsah N-amon v nitrifikovaném fugátu byl minimální (ideálně v jednotkách či maximálně v několika desítkách mg/l) a/nebo hodnota pH nitrifikovaného fugátu dosahovala co nejnižších hodnot (optimálně nižších než cca 5; viz výsledky experimentů zaměřených na tepelné zahušťování surového fugátu, kapitola 2.3). Tyto vlastnosti nitrifikovaného fugátu je možno ovlivňovat racionálním přístupem k řízení provozu nitrifikačního reaktoru sloužícího ke zpracování fugátu

(Svehla et al., 2017; Švehla et al., 2021), přičemž hodnotu pH nitrifikovaného fugátu je možno optimalizovat též dodatečnou úpravou (viz následující kapitola).

2.8.1. Možnost dodatečné úpravy pH nitrifikovaného fugátu před zahuštěním

Hodnotu pH nitrifikovaného fugátu je možno dodatečně optimalizovat přidavkem silné minerální kyseliny podobně jako v případě tepelného zahušťování surového fugátu (Chiumenti et al., 2013; Panivini et al., 2009; Bonmatí et Flotats, 2003). Pokud budeme okyselovat nitrifikovaný fugát, je možno očekávat podstatně nižší spotřebu kyseliny ve srovnání s okyselováním surového fugátu. Důvodem je produkce H^+ v průběhu nitrifikačního procesu (Pitter, 1999; Botheju et al., 2010; Svehla et al., 2017). Tento předpoklad byl ověřován experimentálně v rámci pokusu, při kterém byla sledována spotřeba kyseliny při okyselování surového a nitrifikovaného fugátu a její vliv na pH okyselovaného materiálu. Výsledky popsání pokusu jsou zaznamenány na obrázku 4.

Z obrázku 4 je zřejmé, že například spotřeba kyseliny pro okyselení nitrifikovaného fugátu na pH 4,0 byla 7,6x nižší než spotřeba kyseliny na okyselení surového fugátu na stejnou hodnotu pH.



Obrázek 4: Spotřeba kyseliny při okyselování surového a nitrifikovaného fugátu

V tabulce 15 je uvedena procentuální úspora kyseliny pro okyselení daného vzorku nitrifikovaného fugátu do dané hodnoty pH ve srovnání se spotřebou kyseliny pro okyselení surového fugátu do stejné hodnoty pH. Z těchto údajů je zřejmé, že s klesající cílovou hodnotou pH sice procentuální úspora kyseliny klesá, nicméně i v případě extrémně nízké hodnoty pH dosahující 3,0 činí tato úspora více než 82 %.

Tabulka 15: Procentuální úspora kyseliny při okyselování nitrifikovaného fugátu

okyselení do hodnoty pH	úspora kyseliny (%)
5,4	94,6
5,0	94,4
4,5	90,3
4,0	86,9
3,6	85,0
3,0	82,2

2.9. Hlavní výhody postupu nitrifikace/tepelné zahuštění

Existuje řada postupů vedoucích k získání živin z fermentačního zbytku, resp. z fugátu. Mezi ně patří například stripování amoniaku, srážení struvitu, sorpce N-amon a/nebo fosforečnanů na různé materiály, inkorporace do biomasy řas a další pokročilé postupy (Vaneckhaute et al., 2017; Bolzonella et al., 2018; Monfet et al., 2018; Shi et al., 2018; Ortakci et al., 2019). Tyto metody mohou racionalizovat využití sloučenin dusíku a/nebo fosforu obsažených ve fugátu. Ostatní živiny obsažené ve fugátu zůstávají ve zbývajícím (v podstatě odpadním) proudu a jejich využití zůstává problematické. Podobně je tomu i s vodou obsaženou v surovém fugátu.

Tepelné zahušťování fugátu představuje společně s membránovými procesy jedinou možnost zpracování fugátu zaručujícími za určitých okolností využití všech cenných látek obsažených v surovém fugátu. Aplikace membránových technologií na tak heterogenní materiál, kterým je fugát, však vyžaduje velice vysoké investiční i provozní náklady a je spojena s řadou technických problémů způsobených zejména kolísajícím a vysokým obsahem nerozpuštěných látek ve fugátu (Vaneckhaute et al., 2017; Khan et Nordberg, 2019). Ačkoliv řadu z těchto problémů je možno eliminovat aplikací speciálních pokročilých modifikací membránových procesů, např. membránové destilace (Khan et Nordberg, 2018; Khan et Nordberg, 2019), systém je stále velice komplikovaný a v praxi tedy velice těžko použitelný. V rámci tohoto postupu je mimo jiné zapotřebí fugát okyselovat na extrémně nízké hodnoty pH dosahující cca 2 - 3.

Pokud aplikujeme tepelné zahušťování na surový fugát (tedy bez předchozí nitrifikace), je zapotřebí tento materiál okyselovat za účelem zachování majoritní části N-amon v zahuštěném produktu a minimalizace jeho obsahu v destilátu. Přestože v případě zahušťování nitrifikovaného fugátu není za určitých okolností zapotřebí dávkovat žádné kyseliny za účelem úpravy pH, intenzita přechodu sloučenin dusíku do destilátu byla v rámci provedených experimentů dokonce významně nižší než v případě jakékoliv realizované úpravy pH surového fugátu (viz kapitoly 2.3 a 2.4). To z ekonomického hlediska naznačuje velký potenciál úpravy fugátu dvoustupňovým postupem nitrifikace/tepelné zahuštění. Díky biologické degradaci nižších mast-

ných kyselin a dalších těkavých organických látek v nitrifikačním reaktoru je i obsah organických látek v destilátu produkovaném při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu velice nízký.

Jednou z hlavních výhod postupu zpracování fugátu kombinací biologické nitrifikace a následného tepelného zahuštění nitrifikovaného fugátu je omezení ztrát dusíku při skladování fugátu. Ty jsou minimalizovány díky stabilitě oxidovaných forem dusíku z pohledu jejich potenciální volatilizace. Je možno předpokládat, že naprosto nevýznamné budou i ztráty dusíku při vlastní aplikaci tepelně zahuštěného fugátu na zemědělskou půdu. Přitom ztráty dusíku při manipulaci se surovým fugátem jsou zpravidla enormní, přičemž mohou v závislosti na podmínkách přesahovat i 60 % (Whelan et al., 2010; Nkoa, 2014; Perazzolo et al., 2017; Nicholson et al., 2017; Svehla et al., 2019).

2.10. Potenciální problémy související se zpracováním fugátu postupem nitrifikace/tepelné zahuštění

Aplikace tepelného zahušťování jakožto postupu pro zpracování fugátu, resp. nitrifikovaného fugátu, s sebou pochopitelně může přinášet i určité problémy. Při vyšším obsahu nerozpuštěných látek ve fugátu dojde k významnému omezení aplikovatelného objemového poměru mezi destilátem a zahuštěným nitrifikovaným fugátem z důvodu konzistence zahuštěného produktu. Například v sérii 3 experimentů, jejichž výsledky byly prezentovány v kapitole 2.4, ve které činil objemový poměr mezi produkovaným destilátem a zahuštěným fugátem 2,0, dosahovala koncentrace veškerých látek téměř 144 g/l. To odpovídá celkové sušině 14,4 %. Čerpání takového materiálu a jeho aplikace na zemědělskou půdu již může představovat významný problém. Právě obsah nerozpuštěných látek v nitrifikovaném fugátu bude tedy do značné míry určovat maximální aplikovatelný objemový poměr mezi destilátem a zahuštěným fugátem. Důležitá je také viskozita zahuštěného produktu. V těchto souvislostech se jako zajímavá jeví alternativa založená na produkci zahuštěného fugátu ve formě pevné hmoty. Tato možnost byla zmíněna například autory Chiumenti et al. (2013), kteří tepelným zahušťováním surového fugátu získaly pevnou hmotu o celkovém obsahu sušiny 59 %. Takový materiál by mohl být použit například i jako složka pro přípravu různých pěstebních substrátů nebo po úpravě jako komplexní minerální hnojivo. Tyto možnosti je však potřeba nejprve ověřit v rámci navazujících výzkumných aktivit.

Dosud provedené laboratorní a poloprovozní experimenty naznačují, že v důsledku různých jevů může při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu docházet k určitým neočekávaným změnám v bilanci N-amon obsaženého v původním nitrifikovaném fugátu a v produktech procesu tepelného zahušťování, tedy v tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu a v destilátu. Teoreticky lze předpokládat, že množství N-amon v produktech zahušťování bude identické jako množství

v nitrifikovaném fugátu vstupujícím do procesu zahušťování. V rámci realizovaných testů však bylo zjištěno, že tento předpoklad nemusí být vždy splněn. Nižší obsah N-amon v produktech může indikovat určité ztráty způsobené netěsností použité aparatury. Zvýšení množství N-amon v produktech oproti stavu v použitém nitrifikovaném fugátu pak může být způsobeno mineralizací organických látek obsažených v nitrifikovaném fugátu a z něj plynoucí transformací organického dusíku na N-amon. Popsaným jevům je zapotřebí věnovat pozornost v rámci navazujících výzkumných aktivit. V každém případě, v rámci dosud provedených experimentů nevedly pozorované nesrovnalosti v bilanci N-amon k významnějšímu ovlivnění bilance celkového dusíku mezi původním nitrifikovaným fugátem a produkty jeho tepelného zahuštění. To je způsobeno zejména tím, že zastoupení N-amon mezi sloučeninami dusíku ve zpracovávaném nitrifikovaném fugátu nebylo při pokusech příliš významné.

Významným problémem může být velká energetická náročnost tepelného zahušťování fugátu. Na druhou stranu, bioplynové stanice jsou zpravidla schopny efektivně využít pouze 20 – 40 % tepla produkovaného kogeneračními jednotkami. Využití přebytečného tepla k tepelnému zahušťování nitrifikovaného fugátu tak představuje zajímavou možnost, jak teplo efektivně zužít (Vondra et al., 2016; Vondra et al., 2018). Průměrná zemědělská bioplynová stanice s instalovaným elektrickým výkonem 0,5 MW disponuje celoročně odpadním teplem o příkonu 0,25 MW a teplotě cca 80 °C. Maximální dostupný tepelný příkon může být v průběhu roku i větší, a to zejména v letních měsících. Uvažujeme-li průměrnou produkci fugátu 20 m³/den, sušinu ve vstupním nitrifikovaném fugátu ve výši 4 % hm. a maximální sušinu ve výstupním zahuštěném nitrifikovaném fugátu ve výši 12 % hm. (bezpečná hranice čerpatelnosti), potom lze teoreticky produkovat 6,7 m³ tepelně zahuštěného nitrifikovaného fugátu a 13,3 m³ destilátu denně, tj. původní objem fugátu bude redukován na 1/3. Při hodinové produkci destilátu 0,56 m³ bude pro zpracování veškeré produkce nutná maximální měrná tepelná spotřeba odpařovací jednotky 446 kWh/m³ destilátu. K dosažení takovéto měrné tepelné spotřeby bude nutné vícekomorové uspořádání odparky, a to minimálně dvoustupňové (s každým stupněm klesá měrná tepelná spotřeba cca o ½). Při zahuštění vstupního nitrifikovaného fugátu na ½ původního objemu (8 % hm. sušiny v tepelně zahuštěném nitrifikovaném fugátu) by potom hodinová produkce destilátu odpovídala 0,42 m³ a maximální měrná spotřeba odpařovací jednotky by byla 595 kWh/m³. I v tomto případě by bylo pravděpodobně nutné uvažovat o minimálně dvoukomorovém uspořádání technologie či o vhodné formě rekuperace tepla. Vícekomorové uspořádání odpařovacích jednotek je standardním řešením pro snižování jejich energetické náročnosti. Díky této flexibilitě je možné tepelně zahušťovat fugát i v těch bioplynových stanicích, které disponují menším tepelným příkonem než 250 kW. Logickým důsledkem však může být nárůst investičních nákladů.

Je zřejmé, že v případě záměru aplikovat v objektu konkrétní bioplynové stanice zpracování fugátu postupem nitrifikace/tepelné zahušťování, je potřeba zohlednit místní podmínky. Na základě jejich zevrubného zhodnocení je pak možno učinit rozhodnutí, zda tato metoda bude v daném případě vhodným řešením.

III. Srovnání novosti postupů

Výše nastíněný postup spočívající v tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu je unikátní nejen v rámci ČR, ale i v celosvětovém měřítku. Veškeré dosavadní výzkumné či provozní aktivity zaměřené na tepelné zahušťování fugátu byly realizovány se surovým fugátem, tedy s fugátem, který před zahájením zahušťovacího procesu nebyl podroben biologické úpravě nitrifikací. Výsledky popsanych experimentů prokázaly oprávněnost použití metody spočívající v nitrifikaci surového fugátu a následném tepelném zahuštění nitrifikovaného fugátu jako postupu vedoucího k významné racionalizaci nakládání s tímto materiálem, přičemž hlavním benefitem vyplývajícím z aplikace této metody jsou minimalizace objemu fugátu a zamezení transferu N-amon do destilátu produkovaného v rámci tepelného zahušťování bez nutnosti chemické úpravy fugátu. Minimalizovány jsou v případě aplikace této metody ztráty dusíku při skladování a manipulaci s fugátem. Postup spočívající v tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu nebyl v minulosti formou certifikované metodiky publikován.

V posledních letech byly testovány různé konkurenční varianty zpracování fugátu za účelem získání živin v koncentrované podobě (viz kapitola 2.1.2). Tyto metody jsou však zpravidla selektivně zaměřeny pouze na získání dusíku či dusíku společně s fosforem. Ostatní živiny a další látky není touto cestou zpravidla možno z fugátu získat a stávají se součástí odpadních proudů produkovaných v rámci zpracování fugátu – odpadních vod. Odpadní vody vznikající při zpracování fugátu je zapotřebí adekvátně čistit, přičemž toto čištění je velice komplikované a ani nejmodernější technologie nejsou zpravidla schopny za ekonomicky přijatelných podmínek zcela zamezit vnosu zbytkového znečištění do životního prostředí. Oproti tomu postup založený na nitrifikaci fugátu a následném tepelném zahuštění nitrifikovaného fugátu diskutovaný v rámci této metodiky nevede k produkci odpadní vody ani jiných odpadních proudů a umožňuje využití všech cenných látek obsažených ve fugátu.

IV. Popis uplatnění metodiky

Tato certifikovaná metodika shrnuje poznatky získané během výzkumu v oblasti aplikace procesu tepelného zahušťování fugátu, který byl v rámci předúpravy podroben biologické nitrifikaci. Diskutovaná metoda umožňuje snížit objem fugátu produkovaného při provozu bioplynových stanic a zároveň minimalizovat ztráty dusíku při manipulaci s tímto materiálem. Snížení objemu fugátu vede k významné úspoře velikosti skladovacích kapacit fugátu, ke snížení nákladů na přepravu a aplikaci fugátu a

ke snížení frekvence pojezdů na půdě. Zabránění ztrátám dusíku snižuje negativní dopad provozu BPS na stav životního prostředí a vede také k úspoře nákladů na aplikaci minerálních dusíkatých hnojiv v zemědělských podnicích provozujících bioplynové stanice.

Metodika je primárně určena provozovatelům zemědělských BPS, kterým přináší shrnutí výhod vyvíjené technologie, a příslušným orgánům státní správy. V rámci metodiky jsou definovány podmínky umožňující dosažení maximální kvality obou produktů procesu tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu, tedy zahuštěného nitrifikovaného fugátu a destilátu. Závěry vyplývající z této certifikované metodiky mohou sloužit jako podklad k návrhu postupu pro výstavbu systému pro tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu v provozních podmínkách panujících v objektech konkrétních zemědělských bioplynových stanic. Racionalizace využití cenných látek obsažených ve fermentačním zbytku navrhovaným postupem zpracování fugátu může ve svém konečném důsledku vést k plošnější aplikaci separace fermentačního zbytku na separát a fugát v objektech BPS, neboť současné problémy spojené s nakládáním s fugátem odrazují řadu provozovatelů BPS od instalace separačního zařízení. Informace prezentované v rámci této certifikované metodiky jsou cenné i pro zemědělskou praxi, neboť metodika je zaměřena mimo jiné na racionalizaci využití dusíku v případě využívání fugátu, resp. fermentačního zbytku, jakožto zdroje živin pro výživu rostlin. V neposlední řadě může být tato práce zdrojem informací pro výzkumné pracovníky a studenty vysokých škol zaměřené na provoz BPS, výživu rostlin a čištění specifických typů odpadních vod, pro které může být mimo jiné i zajímavou inspirací pro navazující výzkumné aktivity.

V. Ekonomické aspekty

Jedním z hlavních ekonomických přínosů provozu systému pro tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu je radikální snížení objemu fugátu a z něj vyplývající úspory nákladů souvisejících s výstavbou uskladňovacích nádrží pro fugát a s přepravou fugátu z objektu BPS na zemědělskou půdu. Pokud budeme uvažovat hypotetickou BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW, denní produkci fugátu 20 m³ s předpokladem nutnosti zajistit skladovací prostory pro produkci fugátu za 5 měsíců provozu BPS, dojdeme k tomu, že je potřeba uskladňovací nádrž o objemu cca 3 000 m³. Výstavba takové nádrže bude spojena s investičními náklady v hodnotě cca 4 825 000 Kč. V případě, že budeme předpokládat zpracování fugátu nitrifikací a následným tepelným zahuštěním na ½ původního objemu, dojde ke snížení požadovaného objemu na 1 500 m³ při pořizovacích nákladech cca 2 915 000 Kč. Dojde tedy k úspoře 1 910 000 Kč. Pokud bychom u stejné bioplynové stanice uvažovali například o nutnosti zajistit skladovací prostory pro produkci fugátu za 10 měsíců provozu BPS, potřebovali bychom nádrž o objemu 6 000 m³ s pořizovacími náklady cca

8 800 000 Kč. Za předpokladu zahuštění fugátu na 50 % by dostačovala nádrž o objemu 3 000 m³ a úspora nákladů by činila 3 975 000 Kč. Pokud by zahušťování probíhalo na 25 % původního objemu, bylo by dostačující zajistit nádrž o objemu 1 500 m³ při úspoře 5 885 000 Kč. Při nákladech za přepravu 1 m³ fugátu z objektu BPS do místa aplikace na zemědělskou půdu a nákladech na samotnou aplikaci fugátu dosahujících dle dostupných informací od provozovatelů BPS celkově cca 50 – 150 Kč/m³ by při denní produkci fugátu 20 m³ za předpokladu zahuštění na ½ původního objemu došlo k úspoře 182 500 až 547 500 Kč za rok, při zahuštění na 25 % původního objemu by tato úspora činila 273 750 až 821 250 Kč. Zde je ale potřeba zdůraznit, že náklady na transport a aplikaci fugátu (a tím pádem i s nimi spojené potenciální úspory) se mohou v rámci jednotlivých provozů dramatickým způsobem lišit. Důležitá může být v tomto směru například skutečnost, zda přepravu a aplikaci fugátu zabezpečuje sám provozovatel BPS, resp. provozovatel příslušného zemědělského družstva, či jsou tyto aktivity realizovány v rámci služeb jinými smluvně vázanými společnostmi.

Uvážíme-li, že diskutovaná technologie v sobě nese potenciál produkce destilátu, který může sloužit jako procesní voda, může v rámci provozu BPS, resp. zemědělského družstva provozujícího danou BPS, vést k úspoře za tuto vodu. Budeme-li i dále předpokládat denní produkci fugátu 20 m³, dojde při zahuštění fugátu na 50 % objemu k produkci 10 m³ procesní vody za den, resp. 3 650 m³ za rok. To při ceně průmyslové užitkové vody 24 Kč za 1 m³ představuje roční úsporu 87 600 Kč. Za předpokladu zahuštění fugátu na 25 % původního objemu bude tato úspora činit 131 400 Kč za rok. Dostupnost a cena užitkové vody je ale pochopitelně velice různorodá v závislosti na lokaci BPS a dalších místních podmínkách.

Dalším potenciálním ekonomickým přínosem je úspora nákladů na minerální hnojiva vyplývající z minimalizace ztrát dusíku při manipulaci s fugátem. Ta byla podrobněji kvantifikována v práci Švehla et al. (2021), v rámci které bylo zjištěno, že při denní produkci fugátu 20 m³ může v závislosti na koncentraci N-amon ve fugátu činit při ceně dusíkatého hnojiva 20 Kč/kg N cca 80 300 – 401 500 Kč za rok. Cena dusíkatých hnojiv přitom v současné době významně roste a úspora tedy aktuálně může být i o několik desítek procent vyšší. V budoucnu lze navíc předpokládat zpřísnění legislativy v oblasti emisí do ovzduší při provozu BPS a souvisejících aktivitách. Při nedodržení nastavených pravidel, resp. nastavených emisních limitů, pak patrně budou hrozit finanční sankce. Z hlediska emisí NH₃ pak navrhovaný postup nabízí řešení, jak těmto sankcím zabránit. I tato skutečnost by pak zlepšila ekonomickou bilanci instalace a provozu daného zařízení.

V případě, že bude za účelem minimalizace transferu N-amon do destilátu vznikajícího při tepelném zahušťování nitrifikovaného fugátu potřeba nitrifikovaný fugát okyselovat přídavkem kyseliny, dojde dle závěrů vyplývajících z kapitoly 2.8.1 k úspoře kyseliny ve srovnání s okyselováním surového fugátu. Dle výsledků presen-

tovaných v této kapitole dojde například při okyselení fugátu na pH 4 k úspoře 86,9 % kyseliny. Pokud uvážíme spotřebu jednosytné kyseliny na okyselení surového fugátu na pH 4 cca 59 mmol/l (viz obrázek 4), bude to představovat spotřebu 39,5 mmol/l kyseliny sírové, která je dvojsytná a ekonomicky nej dostupnější. Další výhodou této kyseliny je spojena s tím, že v ní obsažená síra je žádanou živinou. To odpovídá dávce cca 3,87 g čisté kyseliny na 1 l fugátu. Při denní produkci fugátu 20 m³ to bude znamenat spotřebu čisté kyseliny 77,4 kg. Za předpokladu ceny 37 % roztoku kyseliny sírové 3 Kč/kg bude spotřeba tohoto roztoku činit 209,2 kg. 86,9 % úspora tohoto činidla při zpracování 20 m³ fugátu denně pak bude představovat cca 545 Kč, což odpovídá roční úspoře 198 925 Kč.

Instalace zařízení pro tepelné zahušťování fugátu do objektu bioplynové stanice je pochopitelně spojena s určitými investičními i provozními náklady. Náklady na vakuovou odparku schopnou zpracovat veškerou produkci fugátu v objektu BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m³ je možno odhadnout na 3 000 000 Kč. Tato suma zahrnuje předpokládané náklady na odpařovací komory, tepelné výměníky, čerpadla, vakuový systém, chladič systém, zásobní a vyrovnávací nádrže, potrubí a armatury, elektrické rozvody, systém pro měření a regulaci, uložení v kontejneru nebo pod přístřeškem. Další náklady ve výši cca 600 000 Kč je možno předpokládat v souvislosti s napojením zařízení na rozvod tepla z kogenerační jednotky, stavebními úpravami v místě uložení zařízení, potrubním napojením na sklad digestátu a případně také na recipient pro vypouštění destilátu, připojením elektřiny a případně vody. Provozní náklady spojené s funkcí odparky budou představovat zejména náklady na spotřebu elektrické energie (cca 10 až 15 kWh/m³ fugátu), protipěnicího přípravku (cca 0,5 l/m³ fugátu) a případně chemikálií na proplach a čištění systému.

Závěrem této kapitoly je potřeba zdůraznit, že ekonomická bilance instalace zařízení pro tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu bude silně závislá na místních podmínkách, na vlastnostech zpracovávaného nitrifikovaného fugátu, na cenách živin a energií a na emisních limitech pro N-amon vypouštěný do ovzduší, jejichž zavedení se intenzivně diskutuje.

VI. Seznam použité literatury

- Al Seadi, T., Drosch, B., Fuchs, W., Rutz, D., Janssen, R., 2013. Biogas digestate quality and utilization, in: Wellinger, A., Murphy, J., Baxter, D. (Eds.), The Biogas Handbook - Science, Production and Applications. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 267–301.
- Bjerg-Nielsen, M., Ward, A. J., Møller, H. B., Ottosen, L. D. M., 2018. Influence on anaerobic digestion by intermediate thermal hydrolysis of waste activated sludge and co-digested wheat straw. Waste Manage. 72, 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.021>.
- Bolzonella, D., Fatone, F., Gottardo, M., Frison, N., 2018. Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full scale applications. J. Environ. Manage. 216, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.026>.
- Bonmatí, A., Flotats, X., 2003. Pig slurry concentration by vacuum evaporation: influence of previous mesophilic anaerobic digestion process. J. Air Waste Manage. 53(1), 21–31. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466112>.

- Bonmatí, A., Campos, E., Flotats, X., 2003. Concentration of Pig Slurry by Evaporation: Anaerobic Digestion as the Key Process. *Water Sci. Technol.* 48(4), 189–94.
<https://doi.org/10.2166/wst.2003.0252>.
- Botheju, D., Svalheim, Ø., Bakke, R., 2010. Digestate nitrification for nutrient recovery. *Open Waste Manag. J.* 3, 1-12. <https://doi.org/10.2174/1876400201003010001>.
- Chiumenti, A., da Borso, F., Chiumenti, R., Teri, F., Segantin, P., 2013. Treatment of digestate from a co-digestion biogas plant by means of vacuum evaporation: Tests for process optimization and environmental sustainability. *Waste Manage.* 33(6), 1339–1344.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.023>.
- Drosg, B., Fuchs, W., Al Seadi, T., Madsen, M., Linke, B., 2015. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing*. edited by D. Baxter. Esbjerg, Denmark: IEA Bioenergy.
- European Commission, 1991. Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91/676/EEC). <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/en/ALL/?uri=CELEX:31991L0676/> (accessed 27.11.2018).
- Fechter, M., Kraume, M., 2016. Digestate Treatment Techniques. *Technical Transactions.* 113(1), 95–106.
- Guercini, S., Castelli, G., Rumor, C., 2014. Vacuum evaporation treatment of digestate: full exploitation of cogeneration heat to process the whole digestate production. *Water Sci. Technol.* 70(3), 479-85. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.247>.
- Guštin, S., Marinšek-Logar, R., 2011. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent. *Process Saf. Environ. Prot.* 89 (1), 61-66.
- Holloway, R.W., Childress, A.E., Dennett, K.E., Cath, T.Y., 2007. Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate. *Water Res.* 41, 4005-4014.
- Horáková, M. a kolektiv (2003). *Analytika vody. Vysoká škola chemicko – technologická v Praze.*
- Hu, Y., Shen, F., Yuan, H., Zou, D., Pang, Y., Liu, Y., Zhu, B., Chufo, W. A., Jaffar, M., Li, X., 2014. Influence of Recirculation of Liquid Fraction of the Digestate (LFD) on Maize Stover Anaerobic Digestion. *Biosyst. Eng.* 127, 189–96.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.006>
- Khan, E.U., Nordberg, A., 2018. Membrane distillation process for concentration of nutrients and water recovery from digestate reject water. *Sep. Purif. Technol.* 206, 90-98.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.058>
- Khan, E. U., Nordberg, A., 2019. Thermal integration of membrane distillation in an anaerobic digestion biogas plant – A techno-economic assessment. *Applied Energy.* 239, 1163-1174.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.023>
- Kizito, S., Wu, S., Kirui, W.K., Lei, M., Lu, Q., Baha, H., Donga, R., 2015. Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry. *Sci. Total Environ.* 505, 102-112.
- Koszel, M., Lorencowicz, E., 2015. Agricultural Use of Biogas Digestate as a Replacement Fertilizers. *Agric. Agric. Sci. Procedia.* 7, 119–24.
<https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.004>
- Lindmark, J., Thorin, E., Kastensson, J., Pettersson, C. M., 2011. Membrane filtration of process water at elevated temperatures - A way to increase the capacity of a biogas plant. *Desalination.* 267(2–3), 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.09.020>.
- Ministerstvo zemědělství ČR, 2017, Vyhláška č. 237 ze dne 28. července 2017, kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů. Pages 2669-2671, in *Sbírka zákonů České republiky*, 2017, částka 86. Česká republika.
- Münch, E.V., Barr, K., 2001. Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams. *Water Res.* 35 (1), 151- 159.
- Monfet, E, Aubry, G., Ramirez, A. A., 2018. Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology. *Biofuels.* 9(2), 247-262. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336348>.
- Nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programem ve znění pozdějších předpisů.

- Nicholson, F., Bhogal, A., Cardenas, L., Chadwick, D., Misselbrook, T., Rollett, A., Taylor, M., Thorman, R., Williams, J., 2017. Nitrogen losses to the environment following food-based digestate and compost applications to agricultural land. *Environ. Pollut.* 228, 504-516. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.023>.
- Nkoa, R., 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34(2), 473–492. <https://doi.org/10.1007/s13593-0196-z>.
- Ortakci, S., Yesil, H., A.E. Tugtas, A.E., 2019. Ammonia removal from chicken manure digestate through vapor. pressure membrane contactor (VPMC) and phytoremediation. *Waste Manage.* 85, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.033>.
- Palatsi, J., Campos-Pozuelo, E., Torres, M., Porras, S., Flotats, X., 2005. Full-scale combination of anaerobic digestion and concentration by evaporation in Garrigues (Lleida, Spain): evaluation after 2 years of operation. In: Bernal, M.P., Moral, R., Clemente, R., Paredes, C. (Eds.), *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety*, vol. II. Murcia, Spain, pp. 155–158.
- Panvini, A., Foppa Pedretti, E., Toscano, G., Corinaldesi, F., 2009. Concentratore innovativo per il digestato di fermentazione anaerobica (innovative concentrator for digestate from anaerobic fermentation). *ConDIFA, Quaderni della*.
- Perazzolo, F., Mattachini, G., Riva, E., Provolo, G., 2017. Nutrient losses during winter and summer storage of separated and unseparated digested cattle slurry. *J. Environ. Qual.* 46(4), 879–888. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.07.0274>.
- Pitter, P., 1999. *Hydrochemie*. Vydavatelství VŠCHT, Praha.
- Prajapati, S.K., Kumar, P., Malik, A., Vijay, V.K., 2014. Bioconversion of algae to methane and subsequent utilization of digestate for algae cultivation: A closed loop bioenergy generation proces. *Bioresource Technol.* 158, 174-80.
- Rice, K. C., Herman, J. S., 2012. Acidification of Earth: An assessment across mechanisms and scales. *Applied Geochemistry*. 27(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.001>.
- Rorison, I. H., 1973. The effect of extreme soil acidity on the nutrient uptake and physiology of plants. In: Dost, H. (ed.). 1973. *Acid Sulphate Soil*. Proceedings of the International Symposium on Acid Sulphate Soils. Publication 18. Vol. 1. International Institute Land Reclamation and Improvement. Wageningen. p. 223-254.
- Roth, U., Wulf, S., Fechter, M., Herbes, C., Dahlin, J., 2021. Biogas digestate processing as a contribution to nutrient export from surplus regions – costs and greenhouse gas emissions. *LANDTECHNIK*. 76(2), 68–95. DOI:10.15150/lt.2021.3266.
- Shi, L., Simplicio, W.S., Wu, G., Hu, Z., Hu, H., Zhan, X., 2018. Nutrient Recovery from Digestate of Anaerobic Digestion of Livestock Manure: a Review. *Curr. Pollut. Rep.* 4, 74-83. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0082-z>
- Simonič, T., Simonič, M., 2018. Vacuum Evaporation of Liquid Fraction of Digestate. *Chem. Ind.* 67(13), 85-93. <https://doi.org/10.15255/KUI.2018.022>.
- Sipkova, A., Szakova, J., Hanc, A., Tlustos, P., 2016. Mobility of mercury in soil as affected by soil physicochemical properties. *J. Soils Sediments*. 16, 2234–2241. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1420-7>.
- Song, Y.-H., Qiu, G.-L., Yuan, P., Cui, X.-Y., Peng, J.-F., Zeng, P., Duan, L., Xiang, L.-C., Qian, F., 2011. Nutrients removal and recovery from anaerobically digested swine wastewater by struvite crystallization without chemical additions. *J. Hazard. Mater.* 190, 140-149.
- Straka F. a kolektiv, 2000. *Bioplyn. Příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. GAS s.r.o. Říčany.
- Svehla, P., Radechovska, H., Pacek, L., Michal, P., Hanc, A., Tlustos, P., 2017. Nitrification in a completely stirred tank reactor treating the liquid phase of digestate: The way towards rational use of nitrogen. *Waste Manage.* 64, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.041>.
- Svehla, P., Vargas, L.M.V, Michal, P., Tlustos, P., 2019. Nitrification of the liquid phase of digestate can help with the reduction of nitrogen losses. *Environ. Technol. Inno.* 17, 100514. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100514>.

- Švehla P. a kol., 2021. Minimalizace ztrát dusíku při nakládání s kapalnou frakcí fermentačního zbytku s využitím procesu nitrifikace. Certifikovaná metodika. Vydavatelství Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-3074-0.
- Tale, M., Ghosh, S., Kapadnis, B., Kale, S., 2014. Isolation and characterization of microalgae for biodiesel production from Nisargruna biogas plant effluent. *Bioresource Technol.* 169, 328-335.
- Tlustoš, P., Kaplan, L., Dubský, M., 2014. Možnosti uplatnění upravených složek digestátu. Sborník z 20. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv. 128 s. ISBN 978 80 213 2511 1.
- [Vaneekhaute, C., Lebuf, V., Michels, E., Belia, E., Vanrolleghem, P. A., Tack, F. M. G., Meers, E., 2017. Nutrient Recovery from Digestate: Systematic Technology Review and Product Classification. *Waste Biomass Valori.* 8\(1\), 21-40. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9642-x>.](#)
- Vondra, M., Masa, V., Bobak, P., 2016. The potential for digestate thickening in biogas plants and evaluation of possible evaporation methods. *Chem. Eng. Trans.* 52, 787–792. <https://doi.org/10.3303/CET1652132>.
- Vondra, M., Masa, V., Bobak, P., 2018. The energy performance of vacuum evaporators for liquid digestate treatment in biogas plants. *Energy.* 146, 141-155. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.135>.
- Vondra, M., Tous, M., Teng, S.Y., 2019. Digestate evaporation treatment in biogas plants: A techno-economic assessment by Monte Carlo, neural networks and decision trees. *J. Cleaner Prod.* 238, Article 117870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117870>.
- Whelan, M. J., Everitt, T., Villa, R., 2010. A mass transfer model of ammonia volatilisation from anaerobic digestate. *Waste Manage.* 30, 1808-1812. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.08.012>.
- Yang, D., Dai, X., Song, L., Dai, L., Dong, B., 2019. Effects of stepwise thermal hydrolysis and solid-liquid separation on three different sludge organic matter solubilization and biodegradability. *Bioresource Technol.* 290. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121753>
- Zakova, N., Szakova, J., Tremlova, J., Najmanova, J., Tlustos, P., 2016. The soil-plant- feed transport of selenium and other essential micronutrients in diet of sport and recreational horses at two different locations. *J. Anim. Feed Sci.* 25, 317– 325. <https://doi.org/10.22358/jafs/67805/2016>.
- Zhang, D., Jiang, H., Chang, J., Sun, J., Tu, W., Wang, H., 2019. Effect of thermal hydrolysis pretreatment on volatile fatty acids production in sludge acidification and subsequent polyhydroxyalkanoates production. *Bioresource Technol.* 279, 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.077>.

VII. Seznam publikací, které předcházely metodice

- Míchal, P., 2018. Optimalizace provozu zemědělských bioplynových stanic s využitím alternativních substrátů a inovativních metod pro zpracování fermentačního zbytku. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.
- Míchal, P., Švehla, P., Tlustoš, P., 2017. Zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku biologickou nitrifikací a tepelným zahuštěním. *Waste Forum.* 10. 299-309.
- Míchal, P., Švehla, P., Vargas, C.M.L., Tlustoš, P., 2018. Dvoustupňová úprava fugátu jako cesta k produkci procesní vody. *Vodní Hospodářství.* 68. 44-46.
- Míchal, P., Vargas, C.M.L., Tlustoš, P., Švehla, P., 2018. Shrnutí dosavadních výsledků výzkumu v oblasti zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku nitrifikací a následným tepelným zahuštěním. Sborník z konference Kaly a Odpady 2018, Brno, 20. – 21. 6. 2018, s. 201-205, ISBN 978-80-263-1408-0.
- Míchal, P., Švehla, P., Vargas, C.M.L., Tlustoš, P., 2018. Dvoustupňová úprava kapalné frakce fermentačního zbytku spočívající v jeho nitrifikaci a následném tepelném zahuštění. Sborník z konference Odpadové Vody 2018, Štrbské Pleso, Slovensko, 17. – 19. 10. 2018, s. 178-183, ISBN 978-80-973196-0-1.
- Míchal, P., Vargas, C.M.L., Tlustoš, P., Švehla, P., 2019. How to maintain stable nitrification process in the extreme conditions prevailing in the environment of the liquid phase of digestate.

- Sborník z konference 10th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, Rhodes, 19. – 21. 6. 2019, s. 1-2.
- Míchal, P., Švehla, P., Benáková, A., Humpál, F., Tlustoš, P., 2020. Optimalizace funkce polo-provozní jednotky pro nitrifikaci kapalné frakce fermentačního zbytku. 11. konference ODPADOVÉ VODY 2020, Štrbské Pleso, 14. – 16. 10. 2020, s. 285-289. ISBN 978-80-973196-2-5.
- Nováková, S., 2019. Vliv podmínek panujících v nitrifikačním reaktoru na průběh biologické úpravy kapalné frakce fermentačního zbytku. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.
- Svehla, P., Radechovska, H., Pácek, L., Michal, P., Hanc, A., Tlustos, P., 2017. Nitrification in a completely stirred tank reactor treating the liquid phase of digestate: The way towards rational use of nitrogen. *Waste Management*. 64. 96-106.
- Svehla, P., Vargas, C.M.L., Michal, P., Tlustos, P., 2020. Nitrification of the liquid phase of digestate can help with the reduction of nitrogen losses. *Environmental Technology & Innovations*. 17. 100514.
- Svehla, P., Vargas, C.M.L., Michal, P., Tlustos, P., 2020. Thermal thickening of nitrified liquid phase of digestate for production of concentrated complex fertiliser and high-quality technological water. *Journal of Environmental Management*. 276. 111250.
- Švehla, P., Míchal, P., Vargas Caceres, L. M., Humpál, F., Blabolil, J., Klimiškin, Š., Tlustoš, P., 2020. Zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku ze zemědělských bioplynových stanic nitrifikací a následným tepelným zahuštěním – dosavadní výsledky laboratorních a poloprovozních experimentů. 29. konference KALY A ODPADY 2020, Senec, 18. – 20. 3. 2020, s. 112-119. ISBN 978-80-973196-1-8.
- Švehla, P. a kol., 2021. Minimalizace ztrát dusíku při nakládání s kapalnou frakcí fermentačního zbytku s využitím procesu nitrifikace. Certifikovaná metodika. Vydavatelství Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-3074-0.
- Švehla, P. a kol., 2021. Identifikace parametrů pro výstavbu nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát a úspěšnou iniciaci nitrifikačního procesu. Certifikovaná metodika. Vydavatelství Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-3075-7.
- Vargas, C.M.L., 2018. Optimization of Two-Stage Treatment of the Liquid Phase of Digestate. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.
- Vargas, C.M.L., Švehla, P., Míchal, P., Tlustoš, P., 2018. Porovnání ztrát dusíku při skladování surového a nitrifikovaného fugátu produkovaného v rámci provozu bioplynových stanic. Sborník z konference Odpadové vody 2018, Štrbské Pleso, Slovensko, 17. – 19. 10. 2018, s. 178-183, ISBN 978-80-973196-0-1.
- Vargas, C.M.L., 2018. Optimization of Two-Stage Treatment of the Liquid Phase of Digestate. konference ELLS Scientific Student Conference 2018, Wageningen, Nizozemí, 9. – 10. 11. 2018, poster.
- Vargas, C. M. L., Švehla, P., Míchal, P., Tlustoš, P., 2019. Nitrifikace jako postup zpracování fugátu vedoucí ke snížení ztráty dusíku během jeho skladování. Sborník z konference Odpadové forum 2019, Hustopeče, 19. – 21. 3. 2019, s. 1-10, ISBN: 978-80-85990-33-1.

VIII. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Posudek odborníka v daném oboru vypracoval:

Ing. Jaroslav Kára, CSc. (kara.jaroslav@seznam.cz)

Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i.

Drnovská 507, 161 01 Praha 6

Posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy vypracovala:

Ing. Michaela Budňáková (michaela.budnakova@mze.cz)

Ministerstvo zemědělství ČR (oddělení zemědělských vstupů)

Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1

IX. Dedikace

„Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu/podpory na rozvoj výzkumné organizace č. QK1710176 financovaného NAZV s názvem: Dvoustupňová úprava kapalně frakce fermentačního zbytku umožňující racionální využití živin a vody“.

X. Ostatní náležitosti certifikované metodiky

V souladu se závazným *Postupem pro uznání výsledků typu „N_{met} – Metodika“*, který vydalo Ministerstvo zemědělství – Odbor vědy, výzkumu a vzdělávání dne 1. února 2021, jsou v následujících podkapitolách uvedeny další požadované údaje nebo doplňující informace.

Podíly na vzniku předkládané metodiky

Na zpracování a finalizaci předkládaného výstupu projektu (certifikované metodiky) se členové řešitelského týmu s rolí spoluautorů metodiky zúčastnili níže uvedeným podílem: Pavel Švehla (40 %), Pavel Míchal (20 %), Marek Vondra (15 %), Pavel Tlustoš (13 %), Michal Touš (2 %), Vítězslav Máša (2 %), Liz Mabel Vargas Cáceres (2 %), Tomáš Rosenberg, (2 %), Jan Procházka (2 %), Miroslav Liberský (2 %)

Osvědčení odborného orgánu státní správy

Osvědčení o uznání certifikované metodiky vydalo Ministerstvo zemědělství ČR 17. 12. 2021 (osvědčení č.: MZE-69829/2021-18145).