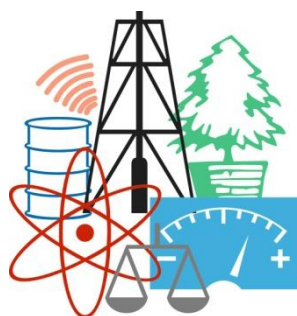


# WASTE FORUM



ELECTRONIC PEER-REVIEWED JOURNAL ON ALL TOPICS  
OF INDUSTRIAL AND MUNICIPAL ECOLOGY

RECENZOVANÝ ČASOPIS PRO VÝSLEDKY VÝZKUMU A VÝVOJE  
Z OBLASTI PRŮMYSLOVÉ A KOMUNÁLNÍ EKOLOGIE

YEAR 2017

No. 4

Pages 219 – 356

## **Patron od the issue / Patron čísla**

**Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2018**  
zahrnující konference APROCHEM a PRŮMYSLOVÁ EKOLOGIE  
a symposium ODPADOVÉ FÓRUM  
6. – 8. 3. 2018, Hustopeče, hotel Centro, [www.tvip.cz](http://www.tvip.cz)



## Úvodní slovo šéfredaktora

Vážení čtenáři,

*máte před sebou první číslo, které mělo uzávěrku po oznámení, že časopis byl zařazen do SCOPUSu. Je nabitě, obsahuje 14 příspěvků, přesně půlka z toho je v angličtině a půlka v češtině. Věřím, že to je především zásluhou zařazení do Scopusu, i když zájem o publikování číslech s uzávěrkou v říjnu byl vždy větší než u ostatních čísel. Další čísla ukážou, kde je pravda.*

*Zhruba za měsíc se můžete těšit ještě na jedno, mimořádné číslo, a to sestavené z příspěvků vybraných z programu konference Technika ochrany prostředí TOP 2017, kterou v září organizovala Strojnická fakulta STU v Bratislavě. Na internetu bude sice vystaveno v lednu 2018,*

*ale protože se připravuje již nyní, bude označeno jako letošní číslo 5.*

*Dostávám dotazy, zda zařazení do Scopusu se týká i již dříve uveřejněných článků. Dostal jsem z Elsevieru informaci, že se to vztahuje na celý ročník 2017.*

*Na závěr si dovoluji všechny čtenáře tohoto časopisu pozvat na Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2018, jehož je náš časopis partnerem. To podstatné o něm se dozvíte z 1. cirkuláře, který je na konci tohoto čísla, další informace pak na [www.tvip.cz](http://www.tvip.cz).*

*Redakční uzávěrka nejbližšího čísla je 8. ledna 2018, dalšího pak 8. 4. 2018.*

**Ondřej Procházka**

## Editorial

Dear readers,

*You have the first number that was closed after the announcement that the magazine was included in SCOPUS. It contains 14 articles, half of which is in English and half in Czech.*

*About one month you can look forward to one extraordinary number, compiled from contributions selected from the Technique of Environmental Protection TOP 2017 conference organized in September by the Faculty of Engineering of the Slovak Technical University Bratislava in Slovakia.*

*Finally, I allow all readers of this magazine to invite to the Week of Research and Innovation for Practice and Environment TVIP 2018, whose magazine is our partner. You will learn about it from the Call for Papers, which is at the end of this issue, further information are on [www.tvip.cz](http://www.tvip.cz). Main lectures are in Czech or Slovak, but lectures in English are also welcome.*

*The editorial closure of the closest issue is January 8, 2018, the next one is April 8, 2018.*

**Ondřej Procházka**

WASTE FORUM – recenzovaný časopis pro výsledky výzkumu a vývoje pro průmyslovou a komunální ekologii  
ISSN: 1804-0195; [www.WasteForum.cz](http://www.WasteForum.cz). Vychází čtvrtletně.

Časopis je na Seznamu neimpaktovaných recenzovaných periodik vydávaných v ČR a v databázi SCOPUS. Vychází od roku 2008.  
Ročník 2017, číslo 4

Vydavatel: CEMC – České ekologické manažerské centrum, IČO: 45249741, [www.cemc.cz](http://www.cemc.cz)

Adresa redakce: CEMC, ul. 28. pluku 524/25, 101 00 Praha 10, ČR, fax: +420/274 775 869

Šéfredaktor: Ing. Ondřej Procházka, CSc., tel.: (+420) 723 950 237, e-mail: [prochazka@cemc.cz](mailto:prochazka@cemc.cz), [wasteforum@seznam.cz](mailto:wasteforum@seznam.cz)

Redakční rada: Ing. Vratislav Bednařík, Ph.D., doc. Ing. Vladimír Čablík, CSc., prof. Dr. Ing. Miroslav Černík, CSc., prof. Ing. Tomáš Havlík, DrSc., prof. Ing. František Hrdlička, CSc., Ing. Slavomír Hredzák, CSc., prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D., prof. Ing. František Kaštánek, CSc., doc. RNDr. Jana Kotovicová, Ph.D., doc. Dr. Ing. Martin Kubal, prof. Ing. Mečislav Kuraš, CSc., prof. Mgr. Juraj Ladomerský, CSc., prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc., prof. Norbert Miskolczi, prof. Ing. Lucie Obalová, Ph.D., Ing. Miroslav Punčochář, CSc., DSc., Ing. Klára Slezáková, Ph.D., Ing. Lenka Svecova, Ph.D., doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc., prof. Ing. Lubomír Šooš, Ph.D., prof. dr. hab. inž. Barbara Tora.

Web-master: Ing. Vladimír Študent

Redakční uzávěrka: 8. 10. 2017. Vychází: 18. 12. 2017

Patronem tohoto čísla je Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2018, 6. – 8. 3. 2018, Hustopeče

## Zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku biologickou nitrifikací a tepelným zahuštěním

**Pavel MÍČHAL, Pavel ŠVEHLA, Lukáš PACEK, Pavel TLUSTOŠ**

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 – Suchbátka, Czech Republic  
e-mail: [michalp@af.czu.cz](mailto:michalp@af.czu.cz); [svehla@af.czu.cz](mailto:svehla@af.czu.cz)

### Souhrn

Tento příspěvek je zaměřen na dvoustupňovou úpravu kapalné frakce fermentačního zbytku (tzv. fugátu) umožňující řešit problémy spojené s velkou produkcí fermentačního zbytku v rámci provozu zemědělských bioplynových stanic, které byly v posledních letech v ČR vybudovány. Tato úprava spočívá v biologické nitrifikaci dusíku obsaženého ve fugátu a následném tepelném zahuštění nitrifikovaného fugátu. Nitrifikace umožní oxidaci významné části amoniakálního dusíku na dusičnany a zároveň vede k poklesu pH fugátu, čímž mohou být minimalizovány ztráty dusíku těkáním amoniaku v průběhu skladování fugátu i jeho aplikace na zemědělskou půdu. Zahuštění využívající přebytečné teplo produkované kogeneračními jednotkami pak vede k radikálnímu snížení objemu fugátu a k produkci destilátu. Zahuštěný fugát s vysokým obsahem dusičnanů může být využit jako cenné hnojivo, přičemž náklady na jeho dopravu jsou podstatně nižší než v případě surového fugátu, sníží se i riziko zhutňování půdy častými pojezdy zemědělské techniky aplikující fugát. Nabízí se i využití destilátu jako procesní vody například pro optimalizaci sušiny substrátu vstupujícího do anaerobního reaktoru bioplynové stanice. V rámci příspěvku jsou prezentovány prvotní výsledky výzkumu v této oblasti. Ty naznačují, že nitrifikační proces může být úspěšně iniciován a může kontinuálně probíhat i v agresivním prostředí fugátu, přičemž nitrifikace vede ke snížení pH fugátu až o několik jednotek. Hlavním faktorem ovlivňujícím vlastnosti produktů odpařovacího procesu je hodnota pH zahušťovaného fugátu.

**Klíčová slova:** Fermentační zbytek, fugát, živiny, nitrifikace, tepelné zahušťování

### Úvod

Fermentační zbytek (často označovaný též jako digestát) produkovaný v rámci provozu bioplynových stanic je v řadě případů separován na dvě složky: na pevnou frakci (tzv. separát) a na kapalnou frakci (tzv. fugát). Separát může být následně dosoušen a využit pro řadu účelů (stelivo, pěstební substrát či jeho složka, surovina pro výrobu kompostu či vermikompostu apod.)<sup>1,2</sup>. Fugát, charakteristický nízkou sušinou do 5 %, představuje v tomto případě v podstatě odpadní proud, přičemž nakládání s ním je spojeno s řadou problémů<sup>3</sup>. Současnou běžnou praxí nakládání s fugátem je jeho relativně dlouhodobé skladování v uskladňovacích nádržích a jeho následná aplikace na zemědělskou půdu. Fugát obsahuje relativně velké množství živin, zejména amoniakálního dusíku (N-amon). Poměrně vysoký je ve fugátu i obsah draslíku, hořčíku a vápníku či fosforu<sup>3-5</sup>. N-amon se vyskytuje ve dvou disociačních formách, kterými jsou amonný kationt ( $\text{NH}_4^+$ ) a nedisociovaný amoniak ( $\text{NH}_3$ , free ammonia - FA). Poměr těchto forem je dán fyzikálně-chemickými podmínkami, přičemž zásadní význam má v tomto ohledu zejména hodnota pH a teplota. Zastoupení těkavého  $\text{NH}_3$  se zvyšuje s rostoucí hodnotou pH a s rostoucí teplotou<sup>6,7</sup>. Fugát je charakteristický mírně zásaditou hodnotou pH (cca 7,5 – 8,5). Za těchto podmínek je již zastoupení nedisociovaného  $\text{NH}_3$  poměrně vysoké, v závislosti na teplotě činí cca 4 – 20 %<sup>6</sup>.

Těkavý  $\text{NH}_3$  při skladování fugátu i přímo během jeho aplikace na půdu uniká do ovzduší, což je nežádoucí jak z environmentálního<sup>8</sup>, tak z ekonomického hlediska (ztráta dusíku). Podíl ztrát může činit až 30 % z celkového množství dusíku původně obsaženého ve fugátu<sup>9</sup>. Živiny jsou přes relativně vysoké koncentrace N-amon, fosforečnanů a dalších látek ve fugátu rozptýleny v poměrně velkém množství balastní vody. To navyšuje náklady na skladování, přepravu a následnou aplikaci tohoto materiálu na půdu. Vysoká frekvence pojezdů zemědělské techniky aplikující velké objemy fugátu je navíc spojena

i se zvýšeným rizikem zhutnění půdy. Problémy s uplatněním digestátu nebo jeho kapalné složky (fugátu) jsou slabým článkem provozu současných BPS. Přitom vyvinutí vhodné technologie pro zpracování fugátu může vést k plošnému využití separace digestátu a celkově i k racionalizaci využití látek v něm obsažených.

Optimalizovat využití živin obsažených ve fugátu je možno různými přístupy, které jsou zpravidla založeny na zakoncentrování živin či jejich získání v relativně čisté podobě<sup>10</sup>. Známé jsou fyzikálně-chemické metody vedoucí k získání amonného dusíku, popřípadě k současnému získávání amonného dusíku a fosforu – například stripování amoniaku, či srážení struvitu<sup>11</sup>. Čistě biologickou metodou je převedení živin obsažených ve fugátu do biomasy řas či vyšších rostlin<sup>12</sup>. Zmíněné způsoby zpracování fugátu jsou však více či méně selektivní, tedy s jejich pomocí jsme schopni získávat pouze jednu (např. stripování amoniaku), dvě (dusík a fosfor při srážení struvitu) nebo několik (inkorporace do biomasy řas) živin. Ostatní cenné látky obsažené v surovém fugátu není možno zpravidla využít. Navíc jsou všechny výše uvedené postupy spojeny s produkcí odpadního materiálu, tedy vody zbavené vybraných živin. Čištění takové odpadní vody je přitom velice komplikované, neboť fugát obsahuje pestrou škálu nejrozličnějších chemických látek. Zásadním problémem z hlediska biologického čištění takového proudu odpadní vody je vysoký obsah těžko biologicky rozložitelných organických látek charakteristický pro materiál, který již prošel anaerobním biologickým rozkladem v biologickém reaktoru bioplynové stanice.

Cestu umožňující zachovat při zpracování fugátu v koncentrovaném proudu v podstatě všechny živiny a současně se vyvarovat produkce odpadní vody může představovat tepelné zahušťování fugátu vedoucí k odpaření významné části balastní vody<sup>13</sup>, popřípadě aplikace membránových procesů (zpravidla ultrafiltrace a reverzní osmóza, resp. jejich kombinace)<sup>3,11,14</sup>. Membránové procesy představují poměrně složité a nákladné systémy. Tento příspěvek se zaměřuje zejména na variantu zpracování fugátu jeho tepelným zahušťováním. To je velice energeticky náročné<sup>15</sup>, nicméně pokud zohledníme skutečnost, že většina zemědělských BPS provozovaných na území ČR nedokáže využívat veškeré teplo produkované kogeneračními jednotkami, naskytá se možnost jeho využití právě pro tepelné zahušťování fugátu vedoucí k zakoncentrování veškerých živin do jednoho produktu omezeného objemu. Destilát získaný v průběhu procesu (kondenzované páry balastní vody) by navíc bylo možno v areálu bioplynové stanice využít jako procesní vodu, zejména pro úpravu obsahu vody v substrátu vstupujícím do anaerobního reaktoru. Abychom při tepelném zahušťování zamezili unikům amoniaku do destilátu, resp. do ovzduší, je však nutné nejprve upravit hodnotu pH fugátu do mírně kyselé oblasti ( $\leq 6,0$ ). Nejjednodušší metodou, jak tohoto cíle dosáhnout, je dávkování minerální kyseliny<sup>13</sup>. Nevýhodou tohoto přístupu je však vysoká spotřeba chemikálií a z ní plynoucí provozní náklady. Problémem může být i okyselování půdy po aplikaci takto upraveného fugátu.

Nabízí se však možnost docílit úpravy pH fugátu před jeho tepelným zahuštěním bez dávkování chemických činidel. Tato možnost spočívá v nitrifikaci N-amon obsaženého ve fugátu. Nitrifikace představuje biochemickou oxidaci N-amon na dusičnany a je součástí přirozeného koloběhu dusíku ve vodním prostředí. Tato biochemická transformace probíhá ve dvou krocích a podílejí se na ní dvě nezávislé skupiny nitrifikačních bakterií. N-amon je nejprve oxidován na dusitanový dusík ( $\text{N-NO}_2^-$ ) činností nitrifikačních organismů (ammonium oxidizing bacteria - AOB) rodů *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* a dalších. Následně je  $\text{N-NO}_2^-$  převáděn na dusičnanový dusík ( $\text{N-NO}_3^-$ ) v rámci činnosti nitratačních organismů (nitrite oxidizing bacteria - NOB) rodů *Nitrobacter*, *Nitrospira* a dalších. Oxidované formy dusíku ( $\text{N-NO}_2^-$  a  $\text{N-NO}_3^-$ ) přitom nejsou těkavé a z tohoto hlediska je možno je považovat za „stabilní“ formu dusíku. Nitrifikace je v kombinaci s denitrifikací i základním principem odstraňování sloučenin dusíku z odpadních vod. Při nitrifikaci, přesněji v průběhu její první fáze - nitritace, jsou uvolňovány ionty  $\text{H}^+$ . V případě vodního prostředí s velmi vysokou koncentrací N-amon a nedostatečnou kyselinovou neutralizační kapacitou (což je i případ fugátu) proto dochází při nitrifikaci k poklesu hodnoty pH<sup>6</sup>. Díky tomu je zároveň s produkcí oxidovaných forem dusíku po nitrifikaci radikálně sníženo riziko ztrát dusíku těkáním amoniaku, neboť i v případě, že významná část N-amon není při nitrifikaci převedena na oxidované formy, zastoupení těkavého  $\text{NH}_3$  je minimální.

Se zpracováním fugátu s využitím nitrifikace nejsou v ČR dosud žádné zkušenosti. Na druhou stranu je však za účelem optimalizace tohoto procesu možno využít výsledky získané při dlouhodobých experimentech zaměřených na zpracování kalové vody či jiných odpadních vod charakteristických

vysokou koncentrací sloučenin dusíku<sup>16-18</sup>. Překážkou pro úspěšnou iniciaci a dlouhodobé udržení nitrifikačního procesu v prostředí fugátu může být vysoká koncentrace N-amon. Ten je sice substrátem pro AOB, ale zároveň na tyto organismy (zejména ve formě FA) od určité koncentrace působí inhibičně. Ještě citlivější jsou v tomto směru NOB. Navíc, přechodná akumulace  $\text{N-NO}_2^-$ , ke které dochází v případě činnosti AOB a současně inhibici aktivity NOB, může nitrifikační organismy sekundárně inhibovat ještě silněji z důvodu zvýšeného výskytu volné kyseliny dusité ( $\text{HNO}_2$ , free nitrous acid – FNA)<sup>6,17</sup>.

Cílem tohoto příspěvku je ověřit možnost iniciace a dlouhodobého udržení nitrifikačního procesu v agresivním prostředí fugátu a posoudit vliv různých faktorů na průběh tohoto procesu. Zároveň si klade za cíl navrhnout optimální podmínky pro tepelné zahušťování surového fugátu tak, aby bylo možno zvolit vhodnou strategii pro dvoustupňovou úpravu fugátu v soustavě nitrifikace – tepelné zahuštění, která bude realizována v dalších fázích výzkumu.

## Experimentální část

Test zaměřený na simulaci nitrifikace v prostředí fugátu probíhal v laboratorním modelu biologického reaktoru zkonstruovaného z plexiskla, jehož pracovní objem činil 1,5 l. Za reaktorem byla zařazena dosazovací nádrž o objemu 0,25 l. K inokulaci systému nitrifikující biomasou byl využit vratný aktivovaný kal odebraný z biologického stupně čištění na městské čistírně odpadních vod. V okamžiku zahájení provozu byl celý objem reaktoru naplněn aktivovaným kalem o koncentraci (NL) cca 10 g/l, teprve poté bylo zahájeno kontinuální dávkování fugátu. Průběh zapracování reaktoru v daných podmínkách (prakticky nulová koncentrace N-amon v reaktoru při zahájení provozu reaktoru) byl analogický s dříve provedeným experimentem s kalovou vodou vznikající při odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu<sup>19</sup>. Reaktor byl provozován jako aktivační systém v režimu směšovací aktivace způsobem analogickým s postupy aplikovanými při biologickém čištění odpadních vod<sup>20</sup>. Provzdušňování aktivační směsi bylo zajištěno vzduchovacím motorkem používaným v akvaristice. Přecherpávání tekutin v rámci modelu bylo realizováno pomocí peristaltických čerpadel. Fugát použitý jako vstup do reaktoru byl odebrán z bioplynové stanice zpracovávající zejména prasečí kejdu, travní hmotu a masokostní moučku. Koncentrace N-amon v použitém fugátu se pohybovala mezi 2,4 a 2,9 g/l, přičemž představovala dominantní chemickou formu dusíku v tomto fugátu. Hodnota pH dosahovala v průměru 8,2. Fugát byl charakteristický velice vysokým obsahem organických látek, přičemž hodnota CHSK odstředěného vzorku činila průměrně 8,3 g/l. Homogenizovaný vzorek vykazoval dokonce hodnoty CHSK okolo 20 g/l. Zatížení reaktoru se v průběhu provozu reaktoru pohybovalo mezi 0,17 a 0,70 kg/(m<sup>3</sup>·d). Tomu odpovídala hydraulická doba zdržení fugátu v reaktoru v rozsahu 4 – 15 dnů. V rámci těchto prvotních experimentů byl reaktor provozován po dobu 54 dnů. Hodnota pH nebyla regulována, což limitovalo celkovou účinnost převedení N-amon na oxidované formy ve shodě s průběhem nitrifikačního procesu v kalové vodě vznikající při odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu<sup>16</sup>.

V průběhu celého experimentu bylo jednou týdně prováděno spektrofotometrické měření koncentrace N-amon ve vstupním fugátu a koncentrací jednotlivých forem dusíku ( $\text{N-amon}$ ,  $\text{N-NO}_2^-$  a  $\text{N-NO}_3^-$ ) na odtoku z reaktoru. Ve stejném intervalu byla sledována i hodnota CHSK fugátu na vstupu a výstupu. Kontinuálně pak byla pomocí měřicího systému Magic XBC (GRYF HB, spol. s r.o.) měřena teplota a hodnota pH v reaktoru. Pravidelně byla také sledována koncentrace kyslíku v reaktoru, která byla ve snaze zabránit limitaci výkonnosti reaktoru a hromadění dusitanů v odtoku<sup>18</sup> udržována na hodnotách převyšujících 2,5 mg/l.

Za účelem posouzení efektivity nitrifikačního procesu byl použit parametr „účinnost převedení N-amon na oxidované formy“ ( $E(\text{ox})$ ), jehož hodnota byla vypočtena dle následující rovnice 1:

$$E(\text{ox}) = \frac{c(\text{N-NO}_2^-) + c(\text{N-NO}_3^-)}{c(\text{N-NO}_2^-) + c(\text{N-NO}_3^-) + c(\text{N-amon})} \cdot 100 \% \quad (1),$$

ve které  $c(\text{N-NO}_2^-)$ ,  $c(\text{N-NO}_3^-)$  a  $c(\text{N-amon})$  představují koncentraci jednotlivých forem dusíku na odtoku z reaktoru.

Koncentrace volného amoniaku -FA ( $C_{\text{FA}}$ ) a volné kyseliny dusité - FNA ( $C_{\text{FNA}}$ ) v mg/l byly vypočteny dle následujících rovnic (rovnice 2 a 3)<sup>6</sup>:

$$C_{\text{FA}} = \frac{17}{14} \cdot \frac{c(\text{N-amon}) \cdot 10^{\text{pH}}}{\exp\left(\frac{6334}{273+T}\right) + 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

$$C_{\text{FNA}} = \frac{46}{14} \cdot \frac{c(\text{N-NO}_2^-)}{\exp\left(\frac{-2300}{273+T}\right) \cdot 10^{\text{pH}}} \quad (3),$$

kde  $c(\text{N-amon})$  a  $c(\text{N-NO}_2^-)$  představuje aktuální celkovou koncentraci N-amon a  $\text{N-NO}_2^-$  v mg/l, T je teplota ve °C a pH aktuální hodnota pH v systému.

K pokusům zaměřeným na tepelné zahušťování fugátu byla využita laboratorní odparka BÜCHI Rotavapor R-215 s vakuovou pumpou V-700 a regulátorem podtlaku V-850. Prvotní pokusy zaměřené na odpařování balastní vody z fugátu probíhaly za sníženého tlaku (300 mBar) s využitím vodní lázně temperované na teplotu 95 °C. Při tepelném zahušťování byl produkovan zahuštěný fugát a destilát vznikající kondenzací vodní páry v chladiči, který je součástí použité odparky. Zpracovávány byly vzorky fugátu o objemu 200 ml. Před zahájením vlastní odpařování byly vzorky přidavkem kyseliny sírové o molární koncentraci 0,1 mol/l okyseleny ze slabě alkalické hodnoty typické pro fugát na hodnoty 6,0; 5,0; resp. 4,0. Následně byly vzorky tepelně zahuštěny na 50 % původního objemu. Z původního objemu fugátu 200 ml bylo tedy 100 ml převedeno do destilátu. Ve vzorcích surového fugátu, zahuštěného fugátu i destilátu byla sledována hodnota pH, koncentrace amoniakálního dusíku a měrná elektrická vodivost (konduktivita).

Testy byly realizovány 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).

V rámci experimentu byl kvantifikován podíl amoniakálního dusíku zůstávajícího v zahuštěném fugátu a jeho podíl přecházející do destilátu. Určovány byly také ztráty dusíku během odpařovacího procesu. Tepelné zahušťování jednotlivých vzorků bylo realizováno ve třech opakováních, přičemž níže uvedené výsledky jsou aritmetickými průměry z těchto tří pokusů.

Veškeré chemické rozborů vzorků byly prováděny ve shodě s postupy uvedenými v práci<sup>21</sup>. N-amon byl stanovován spektrofotometricky indofenolovou metodou,  $\text{N-NO}_3^-$  a  $\text{N-NO}_2^-$  byly kvantifikovány spektrofotometricky s 2,6 dimethylfenolem, respektive s amidem kyseliny sulfanylové a NED dihydrochloridem, hodnota CHSK byla stanovována dichromanovou metodou (spektrofotometrickou semimikrometodou).

## Výsledky a diskuse

### LABORATORNÍ TEST HODNOTÍCÍ NITRIFIKACI FUGÁTU

#### Změny koncentrace sloučenin dusíku v odtoku z nitrifikačního reaktoru

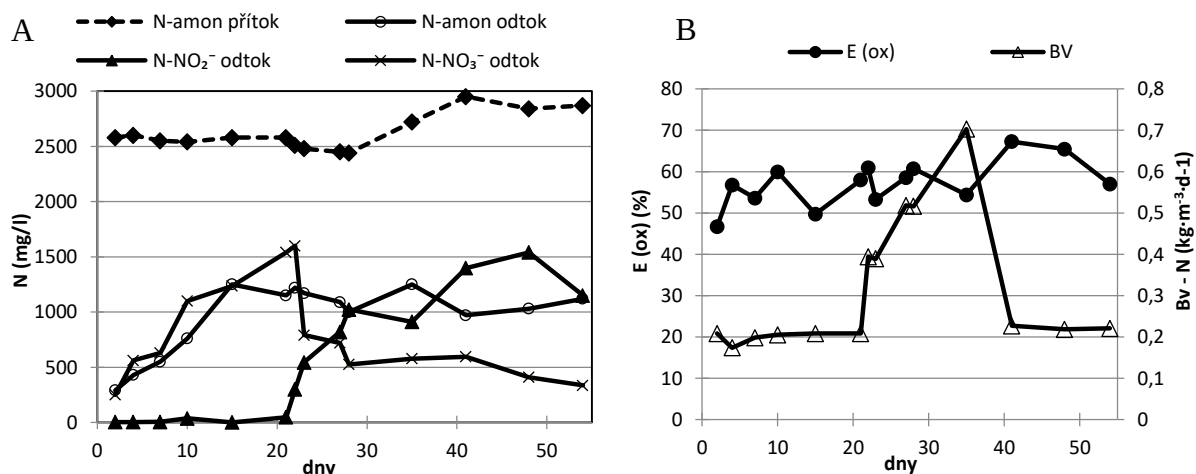
Přes extrémně vysokou koncentraci N-amon a organických látek ve zpracovávaném fugátu se podařilo od počátku experimentu iniciovat nitrifikační proces s dusičnany jako konečným produktem. To svědčí o vysoké aktivitě nitritačních (AOB) i nitratačních (NOB) bakterií. Již dva dny po zahájení experimentu byla v odtoku z reaktoru zaznamenána koncentrace  $\text{N-NO}_3^-$  250 mg/l, přičemž do 21. dne rovnoměrně stoupala až na 1540 mg/l (obrázek 1A). Současně docházelo k nárůstu koncentrace N-amon v odtoku. Z vývoje koncentrací jednotlivých forem dusíku v odtoku je zřejmé, že přibližně polovina N-amon byla v této fázi převedena na  $\text{N-NO}_3^-$  a druhá polovina zůstávala v odtoku. Produkce  $\text{N-NO}_2^-$  byla do 21. dne provozu reaktoru velice nízká. Od 21. dne experimentu byl (patrně v souvislosti se



zvýšením zatížení reaktoru – obrázek 1B a poklesem pH v reaktoru – obrázek 2A) zaznamenán pozvolný nárůst koncentrace  $\text{N-NO}_2^-$ , který byl doprovázen poklesem koncentrace  $\text{N-NO}_3^-$ . Zatímco 21. den byla naměřena koncentrace  $\text{N-NO}_2^-$  47 mg/l, 28. den již činila 1022 mg/l. Koncentrace N-amon v odtoku se od 15. dne ustálila na hodnotách mezi 950 a 1250 mg/l.

Postupný nárůst koncentrace celkového dusíku (sumy N-amon,  $\text{N-NO}_3^-$  a  $\text{N-NO}_2^-$ ) v odtoku z reaktoru v prvních cca 15ti dnech byl zapříčiněn postupným přísunem fugátu bohatého na N-amon do prostředí reaktoru, který byl původně naplněn aktivovaným kalem s koncentrací dusíku nepřevyšující 20 mg/l. V dalším průběhu experimentu byla v některých případech naopak zaznamenána situace, ve které součet koncentrací jednotlivých forem dusíku v odtoku převyšoval koncentraci N-amon v přítoku. K tomu došlo zejména okolo 20. dne provozu reaktoru. Hlavním důvodem tohoto jevu byl patrně provoz reaktoru při relativně nízkém zatížení, kdy při malém průtoku docházelo k zahušťování fugátu odparem vody z reaktoru. Tuto domněnku potvrzuje i skutečnost, že po následném zvýšení zatížení reaktoru (a tím i průtoku fugátu reaktorem) již nebyl tento jev tak významný (obrázek 1). K odparu sice pochopitelně docházelo v průběhu celého experimentu, nicméně při vyšším průtoku reaktorem neměl takový vliv na koncentrace sledovaných látek, neboť objem odpařené vody byl ve vztahu k průtoku zanedbatelný. Určitý vliv na bilanci dusíku v systému mohla mít i případná mineralizace organického dusíku v nitrifikačním reaktoru. Ta by mohla být významná zejména ve fugátu z anaerobních reaktorů bioplynových stanic, ve kterých nedochází k dostatečně účinnému rozkladu organické hmoty. V každém případě je záměrem autorů tohoto příspěvku se v rámci navazujících experimentů podrobněji věnovat biochemickým přeměnám sloučenin dusíku, které by v reaktoru mohly probíhat souběžně s nitrifikací.

Zjištění, že při vhodné volbě strategie zpracování nitrifikačního procesu je možno nitrifikaci okamžitě iniciovat přes extrémní chemické složení zpracovávané vody je ve shodě se závěry plynoucími z experimentů provedených s kalovou vodou vznikající při odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu na velkých městských čistírnách odpadních vod<sup>19</sup>. Výsledky prezentované v rámci tohoto příspěvku tedy potvrzují předpoklad, že v mnoha ohledech bude nitrifikace v prostředí fugátu probíhat podobně jako v případě biologického čištění kalové vody, přestože fugát obsahuje N-amon ve výrazně vyšší koncentraci než kalová voda a několikanásobně vyšší ve fugátu je i hodnota CHSK kvantifikující obsah organických látek.

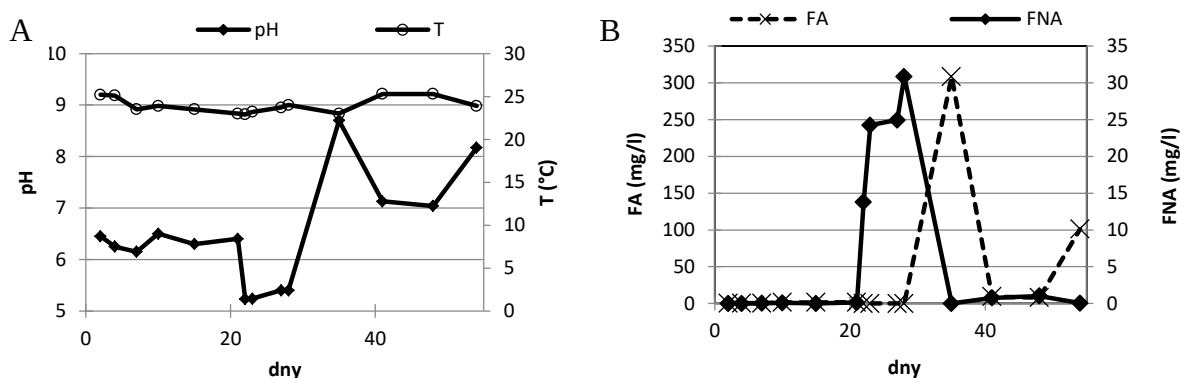


**Obrázek 1: Nitrifikace fugátu – koncentrace N-amon ve vstupním fugátu a koncentrace N-amon,  $\text{N-NO}_2^-$  a  $\text{N-NO}_3^-$  v odtoku z reaktoru (A); objemové zatížení dusíkem - BV a účinnost převedení N-amon na oxidované formy – E (ox) (B)**

### Hodnota pH a její vliv na inhibici nitrifikace

Do 21. dne pokusu se hodnota pH v reaktoru pohybovala mezi 6,1 a 6,5 (obrázek 2A). Následně ale došlo k poklesu pH až na 5,2. To mělo i při relativně nízké koncentraci  $\text{N-NO}_2^-$  (47 mg/l měřeno 21. den) za následek poměrně významný nárůst koncentrace volné kyseliny dusité (FNA), viz obrázek 2B. Již 22. den byla zaznamenána koncentrace FNA dosahující 13,8 mg/l. Přitom již rozmezí koncentrace FNA

0.2 – 2.8 mg/l bývá z hlediska aktivity NOB označováno jako inhibiční<sup>6</sup>. Některé novější studie naznačují, že FNA může inhibovat činnost NOB dokonce při koncentraci 0,037 mg/l<sup>22</sup>. Z tohoto důvodu byla patrně od 21. dne aktivita NOB významně omezena, což se projevilo strmým nárůstem koncentrace N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (obrázek 1A) a současně logicky i dalším vzrůstem koncentrace FNA (obrázek 2B). Ta vzrostla na extrémní hodnoty dosahující až 30,9 mg/l. Za těchto podmínek již ve shodě s Vadivelu et al.<sup>23</sup> došlo i k potlačení aktivity AOB, což se v důsledku absence acidifikace prostředí při jejich činnosti<sup>7</sup> projevilo strmým nárůstem pH až na 8,7 (měřeno 35. den experimentu). Tento nárůst pH na jedné straně eliminoval inhibiční působení FNA, na druhou stranu však vyvolal nárůst koncentrace volného amoniaku (FA) až na extrémní hodnoty dosahující 35. den až 308 mg/l (obrázek 2B).



**Obrázek 2: Nitrifikace fugátu – hodnota pH a teplota v reaktoru (A) a jejich vliv na koncentraci FA a FNA (B)**

Za těchto podmínek již nelze očekávat uspokojivou funkci NOB ani AOB<sup>6,23</sup>. Přesto se v dalším průběhu experimentu činnost reaktoru obnovila, což se projevilo určitým poklesem pH již při dalším měření. I dále však přes významné snížení zatížení reaktoru (obrázek 1B) docházelo k silným fluktuacím v hodnotě pH a tedy i k přechodnému extrémnímu nárůstu koncentrace toxických forem dusíku.

### Účinnost převedení N-amon na oxidované formy

Účinnost převedení N-amon na oxidované formy (E (ox)) se po celou dobu provozu reaktoru pohybovala v rozmezí 47 – 67 %. Omezení účinnosti procesu v podmínkách bez regulace pH je dáno nedostatečnou kyselinovou neutralizační kapacitou zpracovávaného fugátu (respektive příliš nízkým poměrem mezi kyselinovou neutralizační kapacitou a koncentrací N-amon), přičemž pokles pH způsobený nitrifikačním procesem následně limituje aktivitu nitrifikačních organismů<sup>7</sup>. Hodnoty E (ox) zjištěné v rámci tohoto experimentu jsou ve shodě s výsledky získanými při obdobných testech zaměřených na nitrítaci kalové vody<sup>16</sup>.

Zatížení reaktoru se v prvních 21 dnech provozu reaktoru pohybovalo okolo 0,2 kg/(m<sup>3</sup>·d). Následně bylo postupně zvyšováno (obrázek 1B). Při hodnotě 0,70 kg/(m<sup>3</sup>·d) dosažené 35. dne došlo ke strmému nárůstu hodnoty pH (obrázek 2A) svědčícímu o snížení účinnosti nitrifikace (nedochází k tak intenzivní produkci H<sup>+</sup> charakteristické pro nitrifikaci, resp. nitrítaci<sup>7</sup>). Proto bylo zatížení reaktoru sníženo na původní hodnotu okolo 0,2 kg/(m<sup>3</sup>·d). Z provedených experimentů však nebylo možno učinit jednoznačný závěr, zda nárůst hodnoty pH způsobilo primárně přetížení reaktoru či extrémní nárůst koncentrace FNA v této fázi jeho provozu (viz výše).

### Rizika plynoucí z výsledků testu zaměřeného na nitrifikace fugátu a náměty na navazující experimenty

Nízké hodnoty pH jsou příhodné pro tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu. Na druhou stranu je však potřeba brát na zřetel vliv aktuální hodnoty pH v nitrifikačním reaktoru na koncentraci FA a zejména FNA. Jejich inhibiční působení na nitrifikační organismy může v daných podmínkách silně ovlivňovat nejen zastoupení konečných produktů nitrifikace, ale v extrémních případech může vést i ke kolapsu



celého procesu. V rámci dosavadních experimentů bylo také zjištěno, že i prudké změny v zatížení reaktoru dusíkem mohou vyvolat nestabilitu procesu. Systém se jeví jako velice náchylný zejména k inhibici aktivity NOB. Ukázalo se, že razantní nekontrolovaný pokles pH v nitrifikačním reaktoru (v našem případě z hodnoty cca 6,4 na cca 5,2) může vést k masivní akumulaci dusitanů v odtoku z nitrifikačního reaktoru a k riziku kolapsu biologického procesu. Vzhledem k toxickému vlivu  $\text{N-NO}_2^-$  na některé rostliny<sup>24</sup> je však při využití nitrifikovaného a následně tepelně zahuštěného fugátu v zemědělství naším zájmem minimalizovat zastoupení  $\text{N-NO}_2^-$  mezi produkty nitrifikace. V každém případě bude za účelem identifikace optimálních podmínek pro nitrifikaci fugátu zapotřebí v rámci navazujícího výzkumu realizovat dlouhodobější experimenty, při kterých bude biomasa vystavena po delší dobu neměnným podmínkám. Jako perspektivní se jeví zejména varianta s možností kontinuální regulace pH v reaktoru a velice pozvolným zvyšování zatížení reaktoru dusíkem.

## **VLIV PH NA TEPELNÉ ZAHUŠŤOVÁNÍ SUROVÉHO FUGÁTU**

V rámci prvotních experimentů zaměřených na tepelné zahušťování surového fugátu 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 při 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 činil podíl N-amon v zahuštěném fugátu u jednotlivých vzorků 63 – 80 % (viz tabulka 1), podíl N-amon v destilátu 7 – 14 %.

Zbytek (8 – 30 %) pak připadal na ztráty N-amon v plynné formě (viz tabulka 1). Lepších výsledků bylo u BPS 1 a BPS 2 v tomto směru dosaženo při hodnotách pH 5,0 a 4,0, přičemž výsledky při těchto hodnotách nevykazovaly příliš významné rozdíly. U BPS 3 naopak nebyly zaznamenány velké rozdíly u vzorků okyselených na pH 6,0 a 5,0. Výrazně lepší výsledky byly u této BPS naopak zaznamenány při pH 4,0. Úplně nejvyšší podíl N-amon v zahuštěném fugátu (90 %) byl pozorován u vzorků z BPS 2 okyselených na pH 5,0, resp. 4,0. Podíl N-amon v destilátu nepřekročil 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 %. Nejmenší ztráty dusíku (cca 4 %) byly zaznamenány u vzorku z BPS 2 zahušťovaného při hodnotě pH 5,0. Avšak u vzorku z BPS 3 činily ztráty i při pH 4,0 celých 20 %, při hodnotách pH 5 a 6 byly u této BPS ještě výrazně vyšší (tabulka 1). V každém případě je překvapující velký rozdíl mezi ztrátami dusíku u jednotlivých BPS. Zdá se, že v tomto směru mohla hrát roli skutečnost, že při úpravě pH vzorků fugátu před tepelným zahuštěním dávkováním roztoku kyseliny došlo ke změně, resp. nárůstu, objemu vzorku, který byl v rámci těchto experimentů zanedbán. Nárůst objemu fugátu však mohl způsobit u některých vzorků významnější změnu v koncentraci dusíku ve vzorku fugátu a z ní plynoucí zkreslení výpočtu procentuálního zastoupení dusíku v zahuštěném fugátu, destilátu a dusíku připadajícího na ztráty. U vzorků s vyšší hodnotou kyselinové neutralizační kapacity (zejména BPS 3) byly dávky roztoku kyseliny logicky vyšší a to patrně vedlo k určitému zkreslení výpočtu ztrát dusíku. Dalšími faktory ovlivňujícími přesnost výpočtu bilance dusíku může být také omezená možnost ukončit destilaci přesně ve chvíli, kdy byla odpařena ½ původního objemu fugátu a chyba stanovení N-amon, která může dosahovat v daných podmínkách až 5 %. V každém případě bude nezbytné se v rámci navazujících experimentů na všechny faktory ovlivňující přesnost bilance dusíku při odpařovacím procesu detailněji zaměřit a eliminovat jejich vliv.

Výsledky získané v rámci tohoto experimentu jsou srovnatelné s literárními údaji. Například Chiumenti et al.<sup>13</sup> 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 hodnou 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 %.

**Tabulka 1: Balance amoniakálního dusíku po odpaření při různých hodnotách pH vstupního fugátu**

| vzorek | pH<br>(surový fugát) | pH<br>(po úpravě) | koncentrace N-amon (mg/l) |                    |          | N-amon<br>v zahuštěném<br>fugátu (%) | N-amon<br>v destilátu<br>(%) | ztráty<br>N-amon<br>(%) |
|--------|----------------------|-------------------|---------------------------|--------------------|----------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
|        |                      |                   | surový<br>fugát           | zahuštěný<br>fugát | destilát |                                      |                              |                         |
| BPS 1  | 8,2                  | 6,0               | 2 500                     | 3 680              | 710      | 74                                   | 14                           | 12                      |
|        |                      | 5,0               |                           | 4 080              | 160      | 82                                   | 3                            | 15                      |
|        |                      | 4,0               |                           | 4 030              | 67       | 81                                   | 1                            | 18                      |
| BPS 2  | 7,7                  | 6,0               | 1 900                     | 3 030              | 460      | 80                                   | 12                           | 8                       |
|        |                      | 5,0               |                           | 3 420              | 240      | 90                                   | 6                            | 4                       |
|        |                      | 4,0               |                           | 3 410              | 190      | 90                                   | 5                            | 5                       |
| BPS 3  | 8,0                  | 6,0               | 4 750                     | 5 970              | 650      | 63                                   | 7                            | 30                      |
|        |                      | 5,0               |                           | 6 250              | 150      | 66                                   | 2                            | 32                      |
|        |                      | 4,0               |                           | 7 510              | 70       | 79                                   | 1                            | 20                      |

Hodnota pH surového fugátu v okamžiku zahájení odpařování má pochopitelně významný vliv i na další vlastnosti zahuštěného fugátu i destilátu. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty pH a konduktivity pro tyto produkty tepelného zahušťování fugátu. Konduktivita destilátu významně klesá s poklesem hodnoty pH, což jasně prokazuje pokles koncentrace elektrolytů v destilátu. 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<sup>7</sup>. Výrazně vyšší hodnoty převyšující 3 mS/cm byly zaznamenány u všech vzorků zpracovaných při pH 6. Nejnižší hodnota (0,22 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 2: Hodnoty pH a konduktivity v produktech tepelného zahušťování fugátu**

| vzorek | pH           |           | zahuštěný fugát |                         | destilát |                         |
|--------|--------------|-----------|-----------------|-------------------------|----------|-------------------------|
|        | surový fugát | po úpravě | pH              | konduktivita<br>(mS/cm) | pH       | konduktivita<br>(mS/cm) |
| BPS 1  | 8,2          | 6,0       | 6,7             | 39                      | 9,3      | 3,2                     |
|        |              | 5,0       | 5,4             | 41                      | 8,6      | 0,7                     |
|        |              | 4,0       | 4,4             | 45                      | 7,5      | 0,5                     |
| BPS 2  | 7,7          | 6,0       | 6,8             | 19                      | 9,1      | 3,2                     |
|        |              | 5,0       | 5,8             | 20                      | 8,4      | 0,9                     |
|        |              | 4,0       | 5,1             | 28                      | 5,4      | 0,5                     |
| BPS 3  | 8,0          | 6,0       | 6,5             | 48                      | 9,3      | 4,3                     |
|        |              | 5,0       | 5,4             | 53                      | 7,5      | 0,9                     |
|        |              | 4,0       | 4,4             | 52                      | 3,8      | 0,2                     |

#### **Náměty na navazující výzkum v oblasti tepelného zahušťování fugátu**

V rámci výše popsaného experimentu zaměřeného na tepelné zahušťování fugátu byla z hlediska obsahu živin hlavní pozornost věnována N-amon, u kterého je vysoké riziko přestupu z kapalné do plynné fáze. U dalších základních živin (zejména fosforu a draslíku) lze vzhledem k jejich fyzikálně-chemickým vlastnostem předpokládat, že po tepelném zahuštění v podstatě beze zbytku zůstanou v kapalné frakci, resp. v zahuštěném fugátu. Za předpokladu aplikace optimálních podmínek

odpařovacího procesu a zachování cca 80 – 90 % N-amon v tepelně zahuštěném fugátu (viz tabulka 1), je tedy možno očekávat, že zpracování fugátu tepelným zahuštěním nepovede k zásadním změnám v poměru N, P a K v tepelně zahuštěném fugátu ve vztahu k surovému fugátu před jeho úpravou. V každém případě autoři příspěvku počítají s ověřením těchto předpokladů v rámci navazujícího výzkumu.

Zatím byly samostatně simulovány nitrifikace a tepelné zahušťování surového fugátu, přičemž v dalších fázích řešení projektu se počítá s integrací obou procesů, tedy se zpracováním fugátu v soustavě nitrifikace/tepelné zahuštění. Tepelně zahušťován již nebude surový fugát, nýbrž fugát, který byl nejprve podroben biologické předúpravě nitrifikací. To v rámci dosud provedených experimentů nebylo možné, neboť nebylo k dispozici dostatečné množství nitrifikovaného fugátu, jehož vlastnosti navíc nebyly stabilní. V rámci navazujících experimentů se bude potřeba zaměřit na detailnější identifikaci faktorů způsobujících ztrátu dusíku při odpařování. Budou vyvíjeny snahy navrhnout podmínky umožňující docílit ještě nižší intenzity přechodu amoniakálního dusíku do destilátu.

Pozornost bude nutno v rámci navazujících experimentů věnovat také riziku zvýšeného obsahu těžkých kovů a dalších rizikových látek v zahuštěném fugátu. Tepelné zahuštění logicky povede nejen ke zvýšení obsahu živin, ale zároveň i k zakoncentrování těchto látek. Existuje tedy nebezpečí, že i v případě splnění limitů obsahu rizikových látek v surovém, resp. nitrifikovaném, fugátu dle aktuálních legislativních předpisů<sup>25</sup>, těmto předpisům nevyhoví konečný produkt dvoustupňové úpravy fugátu, tedy tepelně zahuštěný nitrifikovaný fugát. V každém případě se jeví jako nezbytné u každého konkrétního vzorku před aplikací upraveného fugátu na zemědělskou půdu provádět testy ekotoxicity<sup>26</sup>.

Z hlediska praktické aplikace tepelného zahušťování fugátu může poměrně zásadní problém představovat velká energetická náročnost tohoto procesu. Z dosud realizovaných zahraničních aplikací pro tepelné zahušťování surového fugátu je zřejmé, že k odpaření 1 kg vody je potřeba přibližně 1 kWh tepla. Dle dostupných zdrojů je proto k realizaci takového systému potřeba cca 75 % zbytkového odpadního tepla produkovaného v rámci provozu BPS<sup>27</sup>. Tento údaj ale nelze považovat za univerzálně platný, bude se měnit v závislosti na místních podmínkách. V každém případě, pro BPS, které nenacházejí jiné uplatnění pro zbytkové teplo, se jeví jako reálné uvažovat o jeho využití pro tepelné zahuštění surového, resp. nitrifikovaného fugátu.

## **Závěry**

Zpracování fugátu v soustavě nitrifikace/tepelné zahuštění představuje perspektivní variantu pro úpravu fugátu produkovaného v rámci provozu bioplynových stanic, která může vést k efektivnějšímu využití tohoto materiálu. Byla potvrzena možnost iniciovat a provozovat nitrifikaci v agresivním prostředí fugátu. V nitrifikovaném fugátu je výrazně snížena hodnotou pH, rozdíl v pH surového a nitrifikovaného fugátu může činit i několik jednotek. To je příznivé z hlediska potenciálního tepelného zahušťování nitrifikovaného fugátu. Na druhou stranu bylo zjištěno, že za určitých okolností hrozí nekontrolovatelné výkyvy hodnoty pH v nitrifikačním reaktoru, které mohou vyvolat masivní akumulaci dusitanů v odtoku či dokonce zastavit nitrifikační proces. Pro další fázi výzkumu bude tedy zapotřebí regulovat pH v reaktoru. Průběh tepelného zahušťování fugátu ovlivňuje zejména hodnota pH zahušťovaného fugátu. V rámci navazujících experimentů bude již tepelně zahušťován nitrifikovaný fugát, přičemž technologické uspořádání odpařovacího procesu bude zapotřebí optimalizovat z hlediska minimalizace obsahu N-amon v destilátu a z pohledu minimalizace ztrát dusíku.

## **Poděkování**

*Příspěvek byl vypracován v rámci řešení projektu podporovaného MZe ČR v rámci NAZV, registrační číslo projektu QK1710176. Autoři děkují poskytovateli dotace za finanční podporu výzkumu.*

## Literatura

1. Tlustoš P., Kaplan L., Dubský M.: Sborník z konference Racionální použití hnojiv 2014. Powerprint s.r.o., Praha. 36 (2014).
2. Drosig B., Fuchs W., Al Seadi T., Madsen M., Linke B.: Nutrient recovery by biogas digestate processing, IEA Bioenergy (2015)
3. Al Seadi T., Drosig B., Fuchs W., Rutz D., Janssen R.: The Biogas Handbook - Science, Production and Applications. Chapter 12 – Biogas digestate quality and utilization. Woodhead Publishing Limited (2013).
4. Botheju D., Svalheim Ø., Bakke R.: The open waste management journal. 3, 1 (2010).
5. Kolář L., Kužel S., Peterka J., Borová-Batt J.: Plant Soil and Environ. 54, 321 (2008).
6. Anthonisen A.C., Loehr R.C., Prakasam T.B.S., Srinath E.G.: J. Water Poll. Contr. Fed 48, 835 – 852 (1976).
7. Pitter P.: Hydrochemie. Vydavatelství VŠCHT, Praha (1999).
8. Renard J.J., Calidonna S.E., Henley M.V.: J. Hazard. Mater. 108, 29 (2004).
9. Hlušek J.: Statková hnojiva. [www.mendelu.cz](http://www.mendelu.cz). (2004)
10. Tampio E., Marttinen S., Rintala J.: J. Clean. Prod. 125, 22 (2016).
11. Došek M., Holba M., Černý M.: Sborník z konference Odpadové Fórum 2015, příspěvek č. (033). Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/index.html>. (2015)
12. Prajapati S. K., Kumar P., Malik A., Vijay V. K.: Bioresource Technol. 158, 174 (2014).
13. Chiumenti A., da Borso F., Chiumenti R., Teri F., Segantin P.: Waste Manage. 33, 1339 (2013).
14. Holloway R.W., Childress A.E., Dennett K.E., Cath T.Y.: Water Res. 41, 4005 (2007).
15. Novák J., Bartlovská L., Cibulka I., Dohnal V., Chuchvalec P., Kolafa J., Malijevský A., Matouš J., Řehák K., Slaviček P., Šobr J., Voňka P.: Fyzikální chemie pro bakalářský a magisterský kurz. VŠCHT, Praha. (2008).
16. Jenicek P., Svehla P., Zabranska J., Dohanyos M.: Water Sci. Technol. 49, 73(2004).
17. Svehla P., Bartacek J., Pacek L., Hrnčirova H., Radechovsky J., Hanc A., Jenicek P.: Chem. Pap. 68, 871.(2014).
18. Pacek L., Švehla P., Bartáček J., Radechovský J., Hrnčířová H., Shejbalová S., Balík J., Jeníček P.: Desalin. Water Treat. 56, 598 (2015).
19. Pacek L., Švehla P., Hrnčířová H., Radechovský J.: Desalin. Water Treat. 57, 15958 (2016).
20. Chudoba J., Dohányos M., Wanner J.: Biologické čištění odpadních vod, SNTL Praha (1991).
21. Horáková M. a kolektiv: Analytika vody. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze (2003).
22. Vadivelu V.M., Yuan Z.G., Fux C., Keller J.: Environ. Sci. Technol. 40, 4442 (2006).
23. Vadivelu V.M., Keller J., Yuan Z.G.: Biotechnol. Bioeng. 95, 830 (2006).
24. Court M.N., Stephens R.C., Wais J.S.: Nature 194, 1263 (1962).
25. Ministerstvo zemědělství České republiky (2014). Vyhláška č. 131/2014 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv [cit. 27. 11. 2017]. Dostupné z: [http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/chronologicky-prehled/Legislativa-MZe\\_puvodni-zneni\\_vyhlaska-2014-131-novela-474-2000.html](http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/chronologicky-prehled/Legislativa-MZe_puvodni-zneni_vyhlaska-2014-131-novela-474-2000.html).
26. Jančula D., Zezulka Š., Došek M., Beklová M., Havelková B., Maršálek B.: Acta Univ. Agric. et Silv. Mendel.Brun. 65, 1183 (2017).
27. Míchal P., Švehla P., Tlustoš P. In Racionální použití hnojiv 2016. Praha: Powerprint, 2016. s. 113 – 116, ISBN: 978-80-213-2691-0

## Treatment of the Liquid Phase of Digestate Using Biological Nitrification and Thermal Thickening

**Pavel MICHAL, Pavel SVEHLA, Lukas PACEK, Pavel TLUSTOS**

Department of Agro-Environmental Chemistry and Plant Nutrition, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, Prague – Suchbát, 165 21, Czech Republic

e-mail: [michalp@af.czu.cz](mailto:michalp@af.czu.cz), [svehla@af.czu.cz](mailto:svehla@af.czu.cz)

### Summary

*This paper deals with two-stage treatment of the liquid phase of digestate (so called fugate or liquid digestate) enabling to solve the problems connected with large production of digestate during the operation of agricultural biogas plants which were constructed intensively during last years in the Czech Republic. The treatment consists of the biological nitrification of ammonia contained in the fugate and consequent thermal thickening of all nutrients contained in fugate pre-treated by the nitrification. Nitrification ensures partial conversion of ammonia to nitrate and simultaneously induces pH decrease in the fugate. By this way, the nitrogen losses during the storage and during the application of fugate to soil which are mainly caused by the volatilization of free ammonia could be minimized. Thermal thickening utilizing excess of heat produced by cogeneration units consequently leads to radical decrease of the volume of fugate where valuable distilled liquor will be produced. Thickened fugate could be applied as fertilizer where the costs for the transport of this material will be reduced significantly in the comparison with raw fugate. Also the risk of the compacting of the soil by frequent driving of agricultural vehicles will be reduced significantly. The distilled liquor produced during the thermal thickening could be used as the process water e.g. for the optimisation of the content of dry matter in the substrate for anaerobic reactor of biogas plant. Primary results of the research in the field of combined treatment of the fugate by nitrification and subsequent thermal thickening are presented within this paper. The results indicated that the nitrification process could be successfully initiated and operated in the aggressive environment of fugate where the pH of fugate could decrease even by several units thanks to initiation of nitrification. The main factor influencing the course of thermal thickening of raw fugate was the pH value reached during the evaporation process.*

**Keywords:** digestate; fugate; nitrogen; nitrification; thermal thickening

### Acknowledgement

*This paper was prepared within the project supported by Ministry of Agriculture of the Czech Republic under NAZV project no.QK1710176. The authors gratefully thank the donor for the financial support of the research.*