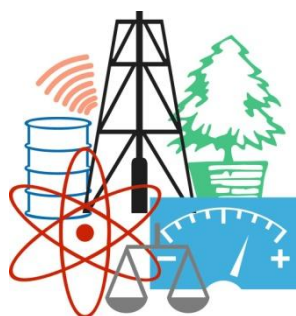


# WASTE FORUM



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 2019

No. 4

Pages 295 – 414

*Patron od the issue / Patron čísla*

wast **en**

**CENTRUM EXPERTŮ**  
**[www.expert.wasten.cz](http://www.expert.wasten.cz)**

## OBSAH / INDEX

Úvodní slovo šéfredaktora / Editorial	297
Pro autory / For authors	298
Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí TVIP 2020	299
<b>Theoretical and Methodological Aspects of Transition to a Circular Economy</b>	<b>300</b>
Teoretické a metodologické aspekty přechodu na oběhové hospodářství <i>Gabriela VACEKOVÁ, Michal PLÁČEK, Jana SOUKOPOVÁ</i>	
<b>Development of operational functional sample of biotrickling filter with integrated heating of circulating liquid phase</b>	<b>308</b>
Vývoj provozního funkčního vzorku biotrickling filtru s integrovaným ohřevem cirkulační kapalné fáze <i>Jiří HENDRYCH, Jiří KROUZEK</i>	
<b>Observation of solid pollutants flowing during solid alternative fuel combustion</b>	<b>319</b>
Pozorovanie prúdenia emisií tuhých častíc počas spaľovania tuhého alternatívneho paliva <i>Nikola KANTOVÁ, Michal HOLUBČÍK, Jozef JANDAČKA, Alexander ČAJA</i>	
<b>Characteristics of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>x</sub> pollutants in urban environment</b>	<b>325</b>
Charakteristiky znečisťujúcich látok PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> a NO <sub>x</sub> v mestskom prostredí <i>Dusan JANDAČKA and Daniela DURCANSKA</i>	
<b>Paulownia Wallachia a jej bioplynový potenciál</b>	<b>333</b>
<i>Paulownia Wallachia</i> and its biogas potenciál <i>Michaela PLEKANCOVÁ, Lucia IVANOVÁ, Petra SZABOVÁ, Hela RUTZKÁ, Igor BODÍK</i>	
<b>Vliv teploty na produkci bioplynu fermentačních zbytků</b>	<b>343</b>
Influence of temperature on biogas production from fermentation residues <i>Martin ŠOTNAR</i>	
<b>The application of treated wastewater for the irrigation of fast-growing trees - field experiments on constructed wetland</b>	<b>350</b>
Opětovné využití odpadních vod při závlaze plantáží rychle rostoucích dřevin – Poloprovozní zkoušky na kořenové čistírně <i>Michal ŠERES, Miloš ROZKOŠNÝ, Hana HUDCOVÁ, Pavel ŠALANDA, Petra INNEMANOVÁ, Pavel SEDLÁČEK</i>	
<b>Waste reduction through using modern methods of construction</b>	<b>361</b>
Znižovanie množstva odpadov pomocou moderných metód výstavby <i>Marcela SPIŠÁKOVÁ, Mária KOZLOVSKÁ</i>	
<b>Seldom Used By-product from Trimming Cement-bonded Particleboard Shows Potential for Modifying Building Materials Composition</b>	<b>368</b>
Vedlejší produkt s potenciálem pro modifikaci složení cementotřískových desek <i>Tomas MELICHAR, Jiri BYDZOVSKEY, Amos DUFKA</i>	
<b>Vliv prachového odpadu s obsahem silikátové matrice a organického plniva na vlastnosti cementových kompozitů</b>	<b>378</b>
Influence of Dust Waste Containing a Silicate Matrix and Organic Filler on Properties of Cement Composites <i>Tomas MELICHAR, Jiri BYDZOVSKEY</i>	
<b>Stavební systém s vysokým obsahem recyklovaných surovin na bázi mikromletého betonu</b>	<b>391</b>
Building system with a high content of recycled materials based on micronized concrete <i>Zdeněk PROŠEK, Jan TREJBAL, Pavel TESÁREK, George KARRA 'A</i>	
<b>Motivácia občanov Slovenska k triedeniu komunálneho odpadu</b>	<b>399</b>
Motivation of citizens of the Slovak Republic to separate municipal waste <i>Michal STRIČÍK, Monika BAČOVÁ, Monika ČONKOVÁ</i>	
<b>WASTen Centrum expertů</b>	<b>414</b>

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.

Vychází od roku 2008, od roku 2017 je indexován v databázi SCOPUS..

Ročník 2019, číslo 4

Vydavatel: CEMC – České ekologické manažerské centrum, z.s., 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, CSc.; doc. Ing. Vladimír Čablík, Ph.D.; prof. Dr. Ing. Miroslav Černík, CSc.; prof. Ing. Tomáš Havlík, DrSc.; prof. Ing. František Hrdlička, CSc.; Ing. Slavomír Hredzák, CSc.; doc. Ing. Emília Hroncová, Ph.D.; prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.; prof. Ing. František Kašťánek, CSc.; 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. 2019. Vychází: 18. 12. 2019

Patronem tohoto čísla je WASTen Centrum expertů – [www.expert.wasten.cz](http://www.expert.wasten.cz)

# Vliv teploty na produkci bioplynu fermentačních zbytků

**Martin ŠOTNAR**

Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno

e-mail: martin.sotnar@mendelu.cz

## Souhrn

Fermentační zbytek z bioplynové stanice má potenciál ke zbytkové produkci bioplynu. Bylo provedeno testování této produkce bioplynu a metanu s dobou testování 180 dní při teplotách 41 °C, 27 °C a 16 °C. Nejvíce bioplynu bylo vyprodukováno vzorkem A při teplotním režimu 41 °C, a sice  $152,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . U metanu stejný vzorek vyprodukoval při 41 °C až  $86,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Statisticky významný rozdíl byl shledán mezi měrnou produkcí bioplynu i metanu u všech variant testu. Dále byla produkce bioplynu a metanu v závislosti na teplotě proložena polynomem druhého stupně. Rovnice polynomu pro bioplyn můžeme napsat ve tvaru  $Y = (-42,927 \pm 38,349) + (5,223 \pm 2,9566) \cdot X + (-0,0181 \pm 0,0510) \cdot X^2$ , ( $R^2 = 0,957$ ) a pro metan  $Y = (-26,85 \pm 27,94) + (2,3296 \pm 2,1541) \cdot X + (0,0033 \pm 0,0372) \cdot X^2$ , ( $R^2 = 0,939$ ). Tyto rovnice umožňují následné určování případů zastřešení a vytápění konkrétních uskladňovacích jímek na fermentační zbytek s ohledem na dobu trvání testu 180 dní. Teoretická produkce elektrické energie kogenerační jednotou při využití průměrné produkce metanu za 180 dní testu, vzniklého při 41 °C je 70 685,0 kWh.

**Klíčová slova:** anaerobní fermentace, fermentační zbytek, metan, produkce energie

## Úvod

Fermentační zbytek je výstupem (sekundárním produktem) anaerobní fermentace na bioplynové stanici. Anaerobní fermentace probíhá ve čtyřech fázích, kterými jsou hydrolyza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze<sup>1</sup>. Výsledkem je ekologické a obnovitelné palivo bioplyn<sup>2</sup> a fermentační zbytek. Tento materiál je složitá směs organických a anorganických substrátů, živin, degradovatelných organických látek a vody<sup>3</sup>. Jeho vlastnosti jsou ovlivněny zejména časem a způsobem skladování fermentačního zbytku, charakteristikou a skladbou vstupních substrátů do procesu anaerobní fermentace a procesními podmínkami, za kterých fermentace probíhá<sup>4</sup>.

Fermentační zbytek uložený v uskladňovací jímce obsahuje bioplynový potenciál, který může zvýšit úroveň produkce bioplynu<sup>5, 6</sup>. Experimentální měření emise bioplynu z uskladňovací nádrže bioplynové stanice o výkonu 1 MWh poukázal na značnou odlišnost  $0,190 - 0,468 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$ .<sup>7</sup> Mimo jiné také dochází k emisím  $\text{NH}_3$ , které u stejných uskladňovacích nádrží bylo  $0,06 - 4,44 \text{ g NH}_3 \cdot \text{m}^{-2}$ .

Uvolňováním hlavních složek bioplynu - metanu ( $\text{CH}_4$ ) do ovzduší je porušována ozonová vrstva v stratosféře. Amoniak ( $\text{NH}_3$ ) navíc způsobuje erozi a okyselení půd, což znamená, že bioplyn a  $\text{NH}_3$  uvolněný z uskladňovacích nádrží na fermentační zbytek představují nebezpečí pro životní prostředí<sup>8</sup>.

Další motivací pro řešení problematiky produkce bioplynu fermentačním zbytkem uskladněným v nádrži je závazek České republiky dle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28 k produkci energie z obnovitelných zdrojů 13 % do roku 2020. Pro Evropskou unii je tato hodnota 20 % do roku 2020. Využitím zbytkové produkce bioplynu fermentačních zbytků se zvyšuje množství energie získané z obnovitelných zdrojů energie.

Využití bioplynu z fermentačního zbytku může mít, vzhledem k prodeji energie z tohoto zdroje energie, i pozitivní ekonomický dopad pro provozovatele bioplynové stanice. Uskladnění fermentačního zbytku v nádržích se provádí z legislativních a technologických důvodů. Vysoušení a spalování fermentačního zbytku je energeticky náročné a naráží na problém nedostatku organické hmoty na zemědělské půdě. Na druhé straně fermentační zbytek potenciálně může obsahovat těžké kovy, patogeny, vysoké dávky dusíku, které ve výsledku omezují aplikaci na půdu<sup>9</sup>. Aplikace fermentačního

zbytku na zemědělskou půdu není možná v kteroukoliv roční dobu. Proto se uskladňovací nádrže dimenzují k uskladnění 120 – 180 dní produkce fermentačního zbytku bioplynovou stanicí<sup>10</sup>.

Cílem této studie je určení produkce bioplynu a metanu z fermentačních zbytků. Byly provedeny testy anaerobní fermentace s dobou zdržení 180 dní při různých teplotách. Tyto výsledky umožní následné určování případů zastřešení a vytápění konkrétních uskladňovacích jímek na fermentační zbytek s ohledem na dobu trvání testu.

## Experimentální část

V této práci byly použity vzorky fermentačních zbytků ze zemědělských bioplynových stanic. Tyto fermentační zbytky byly odebrány vždy při vstupu do uskladňovacích jímek. Tyto zemědělské bioplynové stanice pracují v kontinuálním režimu tekuté anaerobní fermentace s dvoustupňovou technologií. Složení vstupních materiálů do bioplynových stanic bylo především kejda a hnůj hospodářských zvířat (prasečí nebo skotu) a kukuřičná siláž (v součtu ± 90 %).

Pro laboratorní testování bylo využito vybavení celorepublikové referenční laboratoře bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně. Při testování produkce bioplynu a metanu se jednalo o 24 zkušebních fermentorů R1 – R24 o objemu 0,005 m<sup>3</sup>. Testování bylo provedeno podle modifikovaného standardu VDI 4630. Tyto fermentory jsou umístěny ve třech oddělených systémech vyhřívaných vodních lázní. Každý vzorek byl dávkován do více testovacích fermentorů. Jednalo se vždy o dva fermentory v jednom systému. Celkem tři systémy tedy obsahovaly 6 fermentorů se stejným vzorkem a celkem 6 kontrolních fermentorů pro ověření funkčnosti systému. Každý fermentor byl nadávkován 3,3 kg materiálu. Každý systém byl udržován při jiné teplotě. Jednalo se o systém s teplotou 41 °C, dále s teplotou 27 °C a 16 °C s dobou zdržení 180 dní. Vyhodnocení produkce bioplynu je pro srovnání nutné přepočítat na fyzikálně normální podmínky ( $T_0 = 0\text{ °C}$ ,  $p_0 = 101\,325\text{ Pa}$ ).

Obsah sušiny byl stanoven při 105 ± 3 °C dle normy ČSN EN 14 346:2006 za použití elektrické sušárny VENTICELL Standard 111. Obsah organické sušiny (spalitelných látek) byl stanoven spalováním při 550 ± 25 °C dle normy ČSN EN 15 169:2007 v muflové peci LMH 07/12. Analýza složení bioplynu byla provedena měřicím přístrojem Dräger X-am 8600.

Produkce metanu a bioplynu byla vyhodnocena pomocí základních deskriptivních statistik. Je uváděn průměr a rozsah naměřených hodnot. Veškeré statistické analýzy probíhaly na hladině významnosti 5 %, tedy výsledky s p-hodnotou menší než 0,05 jsou považovány za statisticky významné.

## Výsledky a diskuse

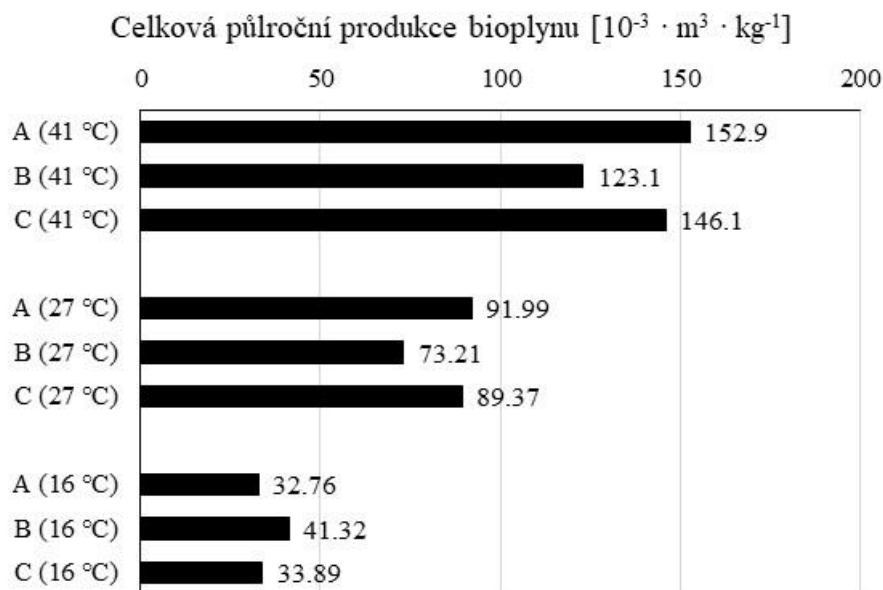
Charakteristika vstupních materiálů je znázorněna v následující tabulce 1, kde uvedené hodnoty jsou aritmetickým průměrem naměřených hodnot.

**Tabulka 1: Charakteristika fermentačních zbytků testu**

Charakteristika	Jednotka	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C
Doba zdržení v BPS	Den	34	60	51
Sušina	%	7,86	7,66	3,99
Spalitelné látky	%	79,86	75,69	72,19
pH	-	7,83	7,79	7,91

Hodnoty, které lze v provozu bioplynové stanice ovlivňovat, jsou doba zdržení materiálu ve fermentoru a sušina materiálu. Sušina je ovlivněna přírodními podmínkami, které určují sušinu vstupní suroviny, např. kukuřičné siláže. Druhou stránkou je ředění vstupní suroviny z technologických důvodů prasečí kejdou, případně technologickou vodou nebo vrácením kapalné frakce fermentačního zbytku.

Proto budou výsledky konfrontovány především s těmito hodnotami. Produkce bioplynu dlouhodobého testu jednotlivých vzorků je na obrázku 1.



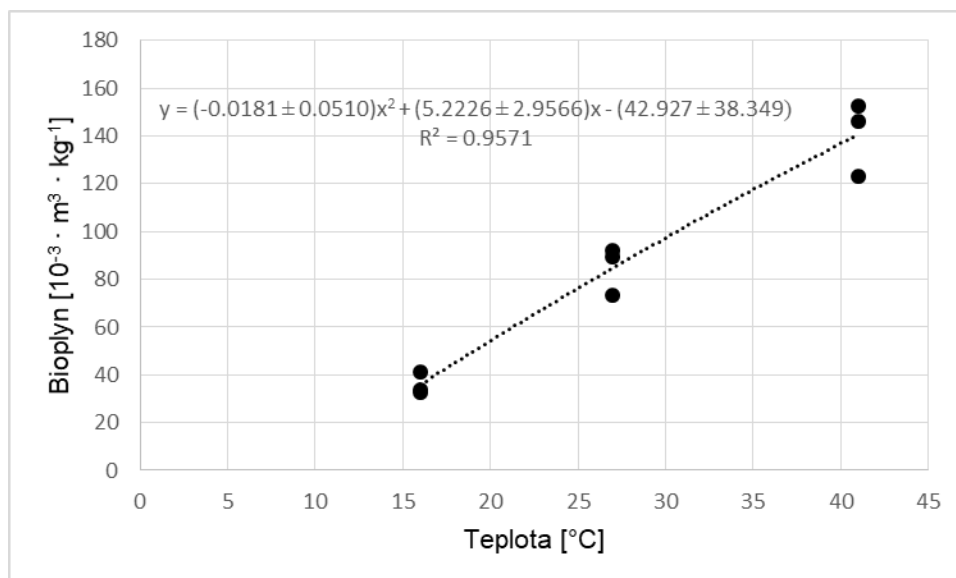
**Obrázek 1: Celková půlroční specifická produkce bioplynu [ $10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ] při různých teplotách. Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.**

Uvedený obrázek 1 zobrazuje celkovou produkci bioplynu jednotlivých vzorků ve třech teplotních režimech, vztaženou na kg organické sušiny. Nejvíce bioplynu bylo vyprodukováno vzorkem A při teplotním režimu 41 °C, a sice  $152,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Tato skutečnost může být dána charakterem materiálu, který měl nejkratší dobu zdržení v bioplynové stanici a nejvíce spalitelných látek. Nejméně bioplynu však bylo naměřeno při teplotě 16 °C opět u vzorku A. Uvedené produkce v jednotlivých teplotních režimech 41 °C, 27 °C, 16 °C statisticky průkazně vykazovaly odlišnosti ( $p < 0,05$ ).

V článku<sup>11</sup> testovali zbytkovou produkci bioplynu fermentačních zbytků při různých teplotách, odebraných z bioplynové stanice s krátkou dobou zdržení. Při teplotě 15 °C a době trvání testu 70 dní dosáhli produkce přibližně  $0,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  čerstvé hmoty. V našem případě by byla průměrná hodnota při teplotě 16 °C a době zdržení 180 dní  $36 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , což odpovídá přibližně  $2,35 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  bioplynu z čerstvé hmoty. Vzhledem k delší době zdržení je hodnota vyprodukovaného bioplynu v našem testu vyšší. Dále pak produkce bioplynu závisí na kvalitě vstupních surovin, organické zátěži fermentoru, doby zdržení původního materiálu ve fermentoru, prostředí a teplotě skladování fermentačního zbytku<sup>12</sup>.

Vzhledem k délce testu půl roku nemá tak výrazný vliv doba zdržení materiálu ve fermentoru před uskladněním v nádrži na fermentační zbytek. Vliv sušiny v případě, kdy se jedná o měrnou produkci, také nelze jednoznačně hodnotit. Rozdíly tak mohou být dány použitou technologií, kvalitou vstupních surovin a další. Pro predikci produkce bioplynu byl vytvořen lineární model produkce bioplynu, vyobrazený na obrázku 2. Tento model je použitelný v intervalu naměřených hodnot.

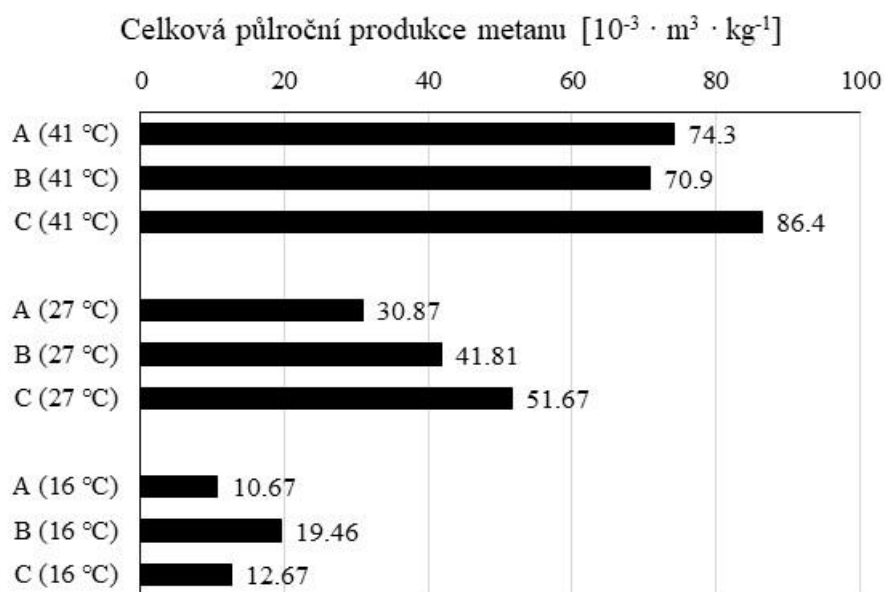
Z obrázku 2 je možné určit, že s rostoucí teplotou roste produkce bioplynu. To je také důvodem, proč provozovatelé bioplynových stanic navyšují, v rámci technologických možností, teplotu anaerobní fermentace používanou pro produkci bioplynu. Naměřená data byla proložena polynomem 2. řádu, který se běžně pro závislost  $V(T)$  u této problematiky používá.<sup>13</sup> Druhá derivace  $d^2Y/dX^2 < 0$  uvádí, že dochází ke zpomalování produkce bioplynu.



**Obrázek 2: Model predikce celkové půlroční produkce bioplynu [ $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] v závislosti na teplotě**  
**Rovnice:  $Y = (-42,927 \pm 38,349) + (5,223 \pm 2,9566) \cdot X + (-0,0181 \pm 0,0510 \cdot X^2)$ , ( $R^2 = 0,957$ )**  
**Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.**

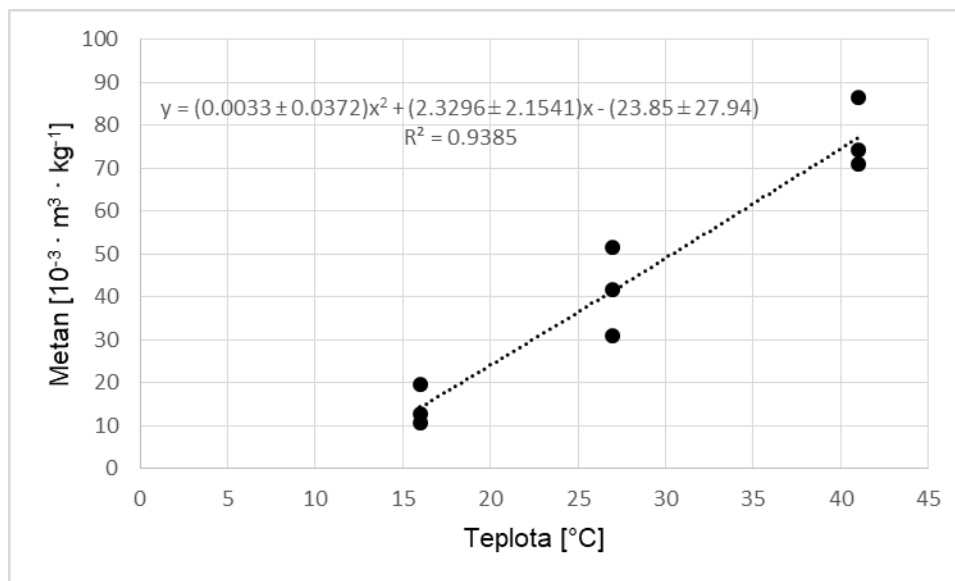
V článku<sup>11</sup> provedli 70 dní testu při různých teplotách. Pokud dosadíme do zjištěné rovnice hodnotu pro teplotu 25 °C z tohoto článku, dostáváme produkci  $76,34 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Naměřená hodnota produkce bioplynu v tomto článku byla přibližně  $58 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je v tomto případě dán rozdílnou dobou trvání testu. V našem případě se za 180 dní testu vyprodukovalo větší množství bioplynu.

Z tohoto modelu je také možné vycházet při kalkulaci nákladů a doby návratnosti investice, při zamýšlení zastřešení a případném ohřevu fermentačního zbytku v uskladňovací nádrži před jeho dalším využitím. Důležitým faktorem při této kalkulaci však není pouze bioplyn, ale především produkce metanu obsaženého v bioplynu. Měrná produkce metanu uvedených vzorků je znázorněna na obrázku 3.



**Obrázek 3: Celková půlroční měrná produkce metanu [ $10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ] při různých teplotách.**  
**Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.**

V průběhu testu za 180 dní vzniklo nejvíce metanu u vzorku C při 41 °C, a sice  $86,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Tento vzorek vykazuje největší potenciál produkce vztažený na kg organické sušiny. Absolutní množství metanu by se však lišilo od vzorků s vyšším obsahem sušiny. Nejméně metanu bylo zjištěno u vzorku a při teplotě 16 °C, zde se jednalo o  $10,67 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Vzhledem k tomu, že produkce bioplynu při 41 °C byla největší u vzorku A, stejně jako při teplotním režimu 27 °C, tak je zřejmé, že se koncentrace metanu u jednotlivých vzorků lišila. Spalitelného metanu tedy bylo při teplotě 41 °C i 27 °C vyprodukováno nejvíce u vzorku C. V teplotním režimu 16 °C to bylo u vzorku B. V článku<sup>7</sup> zjistili při průměrné koncentraci metanu v bioplynu 56 % produkci  $2,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Tato hodnota byla naměřena při průměrné teplotě 29.2 °C z každodenní vsázky fermentačního zbytku do uskladňovací nádrže. Pokud bychom tento materiál naměřili každý den po dobu trvání testu 180 dní, byla by hodnota celkové produkce  $432 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Tato hodnota je vyšší než u našeho testu, protože se nejedná o vsázkové měření, ale kontinuální. Pro predikci produkce metanu byl vytvořen model produkce metanu na obrázku 4.



**Obrázek 4: Celková měrná produkce metanu [ $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] při různých teplotách**  
**Rovnice:  $Y = -(26,85 \pm 27,94) + (2,3296 \pm 2,1541) \cdot X + (0,0033 \pm 0,0372) \cdot X^2$ , ( $R^2 = 0,939$ )**  
**Produkce je vztažena na hmotnostní množství organické sušiny materiálu.**

Celková měrná produkce metanu znázorňuje tendenci produkce metanu ve vztahu k měřeným teplotním režimům. Jedná se o polynom druhého řádu použitelný pro predikci produkce metanu v rozsahu teplot 16 – 41 °C. Druhou derivací uvedené rovnice polynomu druhého řádu  $d^2Y/dX^2 > 0$  uvádíme, že dochází ke zrychlování produkce metanu. Vzhledem k směrodatným odchylkám členů této rovnice je možné dojít k závěru, že se reakce zpomaluje, stejně jako v případě produkce bioplynu.

Teplota používaná pro anaerobní fermentaci na bioplynových stanicích se pohybuje od 35 °C až po běžných 41 °C, 43 °C i více. Udržování vhodné teploty v uskladňovací jímce je otázka investičních a provozních nákladů. Emise metanu za 180 dní z uskladňovací nádrže bioplynové stanice s dobou zdržení 60 dní a teplotě anaerobní fermentace 38 °C byla změřena  $19,23 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .<sup>14</sup> U tohoto testu byla naměřena průměrná teplota v uskladňovací jímce 12,2 °C. Při výpočtu teploty dosažením naměřené produkce metanu v testu z uvedeného článku do vypočtené rovnice polynomu druhého řádu byla získána hodnota 19,26 °C. Uvedené hodnoty odpovídají skutečnostem s ohledem na dobu trvání testu, způsobu měření produkce metanu a proměnlivosti vlastností vstupních surovin.

Celková, průměrná produkce metanu za dobu trvání testu u teplotního režimu 41 °C byla  $77 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . V případě úvahy modelové uskladňovací jímky na fermentační zbytek o objemu 4800  $\text{m}^3$  by v této jímce při jejím naplnění bylo 219 336 kg organické sušiny produkující metan. Celková produkce by tedy byla  $0,077 \times 219\,336 = 16\,888,87 \text{ m}^3$  metanu. Vzhledem k výhřevnosti metanu  $9,965 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  je celkový potenciál energie  $16\,888,87 \times 9,965 = 168\,297,61 \text{ kWh}$ . Při spalování bioplynu obsahujícím metan v kogenerační jednotce se účinnost získání elektrické energie uvažuje přibližně 42 %. Jedná se tedy o 70 685,0 kWh elektrické energie.

## Závěry

Produkce bioplynu a v něm obsaženého metanu je ovlivněna, mimo jiné, teplotou, při které anaerobní fermentace probíhá. Testy anaerobní fermentace fermentačních zbytků byly provedeny při teplotách 16 °C, 27 °C a 41 °C. Statisticky významný rozdíl byl sledován mezi měrnou produkcí bioplynu i metanu všech variant testu. Nejvíce bioplynu bylo vyprodukováno vzorkem A při teplotním režimu 41 °C, a sice  $152,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . U metanu stejný vzorek vyprodukoval při 41 °C až  $86,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Teoretická produkce elektrické energie kogenerační jednotou při využití průměrné produkce metanu za 180 dní testu vzniklého při 41 °C je 70 685,0 kWh.

Při uskladnění fermentačního zbytku do uskladňovací nádrže je možné uvažovat její zastřešení a jímání vzniklého plynu. Získaná data mohou být použita pro následné určování případů zastřešení a vytápění konkrétních uskladňovacích jímek na fermentační zbytek s ohledem na dobu trvání testu 180 dní. Do budoucna je plánováno provedení testů s měřením produkce po určitých časových úsecích.

## Literatura

1. Zhou, J., Zhang, R., Liu, F., Yong, X., Wu, X., Zheng, T., Jiang, M., Jia, H. (2016). Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. *Bioresource Technology*, 217, 44 – 49, ISSN: 0960-8524.
2. Vitázek, I., Klúčik, J., Uhrinová, D., Mikulová, Z., Mojžíš, M. (2016). Thermodynamics of combustion gases from biogas. *Research in agricultural engineering*, 62, 8 – 13, ISSN: 1805-9376.
3. Möller, K. (2015). Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1021 – 1041, ISSN: 1773-0155
4. Marcato, C., E., Mohtar, R., Revel, J., C., Pouech, P., Hafidi, M., Guiesse, M. (2009). Impact of anaerobic digestion on organic matter quality in pig slurry. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(3), 260 – 266, ISSN: 0964-8305
5. Menardo, S., Gioelli, F., Balsari, P. (2011). The methane yield of digestate: effect of organic loading rate, hydraulic retention time, and plant feeding. *Bioresource Technology* 102, 2348 – 2351, ISSN: 0960-8524.
6. Vitez, T., Haitl, M., Karafiát, Z., Mach, P., Fryč, J., Lošák, T., Szostková, M. (2011). Use of bio-enzymatic preparations for enhancement biogas production. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 59(26), 203 – 208, ISSN:1211-8516.
7. Gioelli, F., Dinuccio, E., Balsari, P. (2011). Residual biogas potential from the storage tanks of non-separated digestate and digested liquid fraction. *Bioresource Technology*. 102, 10248 – 10251, ISSN: 0960-8524.
8. Goebes, M. D., Strader, R., Davidson, C. (2003). An ammonia emission inventory for fertilizer application in the United States. *Atmos. Environ.* 37, 2539 – 2550.
9. Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Aboukhas, A., Barakat, A., Carrère, H. (2015). New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *Energy & Environmental Science*, 8, 2600 – 2621, ISSN: 1754-5706
10. Regione Piemonte, (2007). Regolamento 10/R Disciplina generale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti zootecnici e delle acque reflue e programma di azione per le zone vulnerabili da nitrati di origine agricola (Legge regionale 61/ 00).
11. Angelidaki, I., Boe, K., Ellegaard, L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. *Water Science and Technology*, 52(1 – 2), 189 – 194, ISSN: 0273-1223.
12. Hansen, T., L., Sommer, S., G., Gabriel, S., Christensen, T., H. (2006). Methane production during storage of anaerobically digested municipal organic waste. *Journal of Environment Quality*, 35(3), 830 – 836, ISSN: 1537-2537



13. Guo, P., Zhou, J., Ma, R., Yu, N., Yuan, Y. (2019). Biogas Production and Heat Transfer Performance of a Multiphase Flow Digester. *Energies* 12(10):1960, 1 – 18, ISSN: 1996-1073.
14. Maldaner, L., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A., C., Gordon, R., Duke, Ch. (2018). Methane emissions from storage of digestate at a dairy manure biogas facility. *Agricultural and Forest Meteorology*, 258, 97 – 107, ISSN: 0168-1923.

## **Influence of temperature on biogas production from fermentation residues** **Martin ŠOTNAR**

*Mendel University in Brno, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic*  
e-mail: martin.sotnar@mendelu.cz

### **Summary**

*The fermentation residue from the biogas plant has the potential for residual biogas production. This biogas and methane production was tested during 180 days at 41 °C, 27 °C and 16 °C. Most of the biogas was produced by sample a with temperature regime of 41 °C, where the specific production of this sample was  $152.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . The same sample produced at 41 °C volume of  $86.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  of methane. A statistically significant difference was found between the specific biogas and methane production of all test variants. Furthermore, the production of biogas and methane, depending on temperature, was interleaved by a second degree polynomial. The polynomial equations for biogas can be written in the form  $Y = (-42,927 \pm 38,349) + (5,223 \pm 2,9566) \cdot X (-0,0181 \pm 0,0510) \cdot X^2$ , ( $R^2 = 0,957$ ) and for methane  $Y = (-26.85 \pm 27.94) + (2.3296 \pm 2.1541) \cdot X (0.0033 \pm 0.0372) \cdot X^2$ , ( $R^2 = 0.939$ ). These equations allow the subsequent determination of cases of roofing and heating of specific storage wells to the fermentation residue with respect to the test duration of 180 days. The theoretical electricity production by the cogeneration unit using the average methane production for 180 days of the test, generated at 41 °C, overall 70 685.0 kWh.*

**Keywords:** anaerobic fermentation, fermentation residue, methane