

Mendelova univerzita v Brně

Agronomická fakulta

Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky



Anaerobní zpracování biologicky rozložitelných materiálů

Diplomová práce

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Koutný

Vypracoval:

Bc. Vojtěch Veškrna

Brno 2015

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Anaerobní zpracování biologicky rozložitelných materiálů vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v příloženém seznamu zdrojů.

Souhlasím, aby byla práce uložena v knihovně Mendelovy univerzity v Brně a zpřístupněna ke studijním účelům.

V Brně, dne

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Koutnému, vedoucímu diplomové práce, za poskytnutí odborné pomoci při zpracovávání této práce.

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu Postdoktorské pozice v technických a ekonomických oborech na MENDELU (CZ.1.07/2.3.00/30.0031).

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o výzkumu, při němž byly anaerobní fermentací zpracovávány hlízy slunečnice topinamburu z oblasti města Třebíče v kraji Vysočina. Výzkum probíhal v Republikové referenční laboratoři Mendelovy univerzity v Brně. Testy byly prováděny po dobu 23 dní při teplotě 42°C. V průběhu testů bylo měřeno množství vzniklého bioplynu a jeho složení.

U nadzemní silážované části bylo při zatížení 0,12 kg.kg⁻¹ vyprodukováno 0,437 m³_N bioplynu a 0,218 m³_N metanu.

Z hlíz bylo vyprodukováno 0,641 m³_N bioplynu a 0,41 m³_N metanu z kilogramu suché hmoty.

Klíčová slova: anaerobní fermentace, slunečnice topinambur, kukuřičná siláž, bioplyn

ABSTRACT

This work is about an experiment in which were processed anaerobic fermentation of tubers of Jerusalem Artichoke grew near city Třebíč region Vysočina. The research was conducted in the Republic Reference Laboratory Mendel University in Brno. Tests were conducted for 23 days at 42°C. Biogas production and methane abundance were daily monitored during the test.

From aboveground part of jerusalem artichoke was ensiled by material load 0.12 kg.kg⁻¹ produced 0.437 m³_N biogas and 0.218 m³_N methane.

From the tubers were produced 0.641 m³_N biogas and 0.41 m³_N methane per kilogram of dry matter.

Key word: anaerobic fermentation, jerusalem artichoke, maize silage, biogas

OBSAH

1 ÚVOD.....	7
2 CÍL PRÁCE	8
3 MATERIÁL.....	9
4 METODIKA	11
4. 1 Evidence materiálu.....	11
4. 2 Dezintegrace a homogenizace.....	12
4. 3 Stanovování hmotnosti.....	13
4. 4 Stanovení sušiny a podílu spalitelných látek	14
4. 5 Silážování nadzemních částí rostlin	16
4. 6 Kalorimetrie	18
4. 7 Metodika testů.....	19
5 VÝSLEDKY	24
5. 1 Test číslo 1	24
5. 2 Test číslo 2	31
5. 3 Test číslo 3	37
5. 4 Zhodnocení výsledků testů.....	44
6 DISKUZE	46
7 ZÁVĚR.....	49
8 POUŽITÉ ZDROJE.....	51
SEZNAM TABULEK	53
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	54

1 ÚVOD

Bioplyn, jenž obsahuje metan, představuje jeden z obnovitelných zdrojů energie, která se v tomto případě získává z biologicky rozložitelných materiálů. Tyto materiály jsou rozkládány mikroorganismy, které disponují širokým spektrem enzymů, díky kterým štěpí makromolekulární látky jako např. sacharidy, proteiny a lipidy na nízkomolekulární sloučeniny a v konečné fázi na bioplyn, což je směs plynů, především metanu, oxidu uhličitého, vodíku, sulfanu a dalších (Tesařová, 2010).

Bioplyn vzniká jak řízenými procesy v tzv. bioplynových stanicích, tak i neřízeně například v tělesech skládek komunálních odpadů, ve kterých jako zdroj organické hmoty slouží biologicky rozložitelné složky komunálních odpadů.

Provozování bioplynových stanic je v dnešní době poměrně rozšířené. Bioplyn, který v tomto zařízení vzniká, se spaluje v kogeneračních jednotkách, které pak vyrábí elektrickou energii a odpadní teplo. Zisky z prodeje elektřiny do elektrické rozvodné sítě představují hlavní příjem financí. Nejrozšířenější materiál, který se dnes v bioplynových stanicích používá je siláž z odrůd kukuřice, speciálně šlechtěných pro tato zařízení (Petříková, 2012).

Alternativní zdroje energie, ke kterým patří i výroba bioplynu z cíleně pěstovaných rostlin, budou mít v budoucnu stále větší význam, neboť zásoby neobnovitelných zdrojů jsou omezené. Proto se již dnes testují různé druhy rostlin jakožto potenciálních energetických plodin. Pro tuto diplomovou práci byla zvolena rostlina slunečnice topinambur, která byla testována jako materiál pro anaerobní fermentaci za účelem výroby bioplynu.

2 CÍL PRÁCE

Cílem tohoto výzkumu bylo ověřit, zda dosahuje bioplyn, vznikající při anaerobní fermentaci testovaného materiálu svým složením a kvantitou hodnot, které jsou dostatečné pro provoz bioplynových stanic. Výsledky testů tedy byly porovnány s hodnotami produkce bioplynu z kukuřičné siláže, což je v dnešní době nejrozšířenější materiál v zemědělských bioplynových stanicích.

V případě, že anaerobní fermentace materiálu z topinamburu dosáhne stejné nebo vyšší měrné produkce bioplynu při minimálním obsahu metanu 50%, lze topinambur považovat za plodinu s potenciálem pro využití v bioplynových stanicích.

3 MATERIÁL

Jako materiál pro anaerobní fermentaci byly zvoleny podzemní hlízy i nadzemní část rostliny (stonky, listy, případně i květy) slunečnice topinamburu.

Topinambur je rostlina morfologicky podobná slunečnici, je nenáročná na podmínky prostředí, snáší vlhké i suché oblasti, hlízy nejsou poškozovány ani silnými mrazy, je proto vhodná pro pěstování i v podhorských i horských oblastech. Dorůstá výšky 2,5 m a délka vegetační doby činí 4 – 8 měsíců. Při pěstování na produkci biomasy se může založit i víceletá kultura. Hlízy i zelená hmota jsou dobře silážovatelné, v závislosti na agrotechnických opatřeních činí průměrný výnos hlíz 2,9 – 5,1 kg.m⁻² (Biom).



Obr. 1 Porost topinamburu

Zdroj:http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=4422&typ=html

Dříve se hlízy této rostliny používaly jako krmivo pro hospodářská zvířata, dnes jsou například jednou z ingrediencí tvořících směsi náhražkových kávovin, kterým souhrnně říkáme melty.

Rostliny, které byly použity pro potřeby výzkumu, byly vypěstovány na soukromé zahradě v oblasti Třebíčska v kraji Vysočina. Pozemek leží v mírně teplé oblasti, roční úhrn srážek činí asi 560 mm, průměrná roční teplota je 7,5 °C, nadmořská výška je 448 m. n. m. Průměrný výnos hlíz byl 3,4 kg z 1m², výnos hmoty nadzemních částí rostlin byl 6,8 kg z 1m².



Obr. 2 Hlízy topinamburu

4 METODIKA

4. 1 Evidence materiálu

Části topinamburu, které sloužily jako materiál pro anaerobní fermentaci, byly nejprve v laboratoři zaevidovány pod šestičíselným kódem. První dvojčíslí znamená rok, ve kterém byl materiál přinesen do laboratoře, zbývající čtyři čísla pak uvádějí aktuální pořadí daného materiálu. Tento kód byl zapisován do evidenčního deníku, kde je uveden název materiálu, jeho číslo, datum evidování a osoba, která daný materiál opatřila.

V dalších procesech testování, jako například stanovování obsahu sušiny, stanovování podílu spalitelných látek a kalorimetrii je již materiál udáván pouze pod tímto přiřazeným číselným označením.

Šestičíselným kódem jsou pak označovány i fermentační zbytky, které vznikly anaerobní fermentací daného druhu materiálu.

4. 2 Dezintegrace a homogenizace

Pro dosažení co nejvyšší výtěžnosti anaerobní fermentace musí být organické látky obsažené v materiálu co nejlépe dostupné pro mikroorganismy podílející se v reaktorech na vzniku bioplynu.

Proto byl materiál z hlíz topinamburu dezintegrován pomocí kuchyňského mixéru tak, aby rozměry částic vzniklé směsi byly menší než 0,002 m. Dezintegrací materiálu se zvýší poměr plochy k objemu částice materiálu. Díky tomu se zrychlí rozpouštění daných živin v tekutém prostředí reaktoru a zvětší se i aktivní plocha, kterou mohou obsadit mikroorganismy.

Nadzemní části rostlin byly upraveny kuchyňským robotem na velikost částic přibližně odpovídající rozměrům zpracovávané kukuřice sklízecí řezačkou při zemědělské sklizni na siláž.

Veškerá hmota, ať už z hlíz, nebo z nadzemních částí rostliny pak byla po dezintegrování důkladně promíchána, aby byla zajištěna homogenita vzorku.

4.3 Stanovování hmotnosti

K vážení byla použita laboratorní analytická váha, která je schopna určit hmotnost vážené látky s přesností na $1 \cdot 10^{-7}$ kg. Tyto váhy pracují na principu tenzometrického stanovení, kdy vlivem hmotnosti vážené látky dojde k deformaci tenzometru umístěného pod miskou váhy. Velikost deformace tenzometru je přímo úměrná změně jeho elektrického odporu. Podle míry změny elektrického odporu je pak určena hmotnost vážené látky (Koutný, 2010).

Veškeré hodnoty naměřených hmotností byly zapisovány do vážního deníku v gramech s přesností na čtyři desetinná místa. Hodnoty hmotností dávkovaného materiálu jsou v této práci již převedeny na kilogramy a jsou uváděny s přesností na tři desetinná místa.



Obr. 3 Laboratorní váha

4. 4 Stanovení sušiny a podílu spalitelných látek

Aby byly výsledky měření objektivní a testy opakovatelné, bylo nutné jednotlivé produkce bioplynu i metanu přepočítávat na kilogram sušiny dávkovaného materiálu. Stanovení obsahu sušiny bylo prováděno také u inokula, což je materiál, který má obsah reaktoru naočkovat kulturami mikroorganismů podílejících se na tvorbě bioplynu. Díky tomu lze spočítat látkové zatížení, které udává poměr obsahu sušiny dávkovaného materiálu k obsahu sušiny inokula.

Obsah sušiny a podílu spalitelných látek byl stanovován současně s nadávkováním materiálu do fermentorů. Pokud by byl obsah sušiny stanovován předem, zbylý materiál by vysychal a tím by se stanovená hodnota sušiny lišila od skutečné hodnoty v daném čase dávkování.

Stanovení sušiny i podílu spalitelných látek bylo provedeno ve trojím opakování, výsledky pak byly zprůměrovány.

Laboratorní keramické kelímky byly umyty a vyžehány v žihací peci, tak aby byly zbaveny všech zbytků předešlých vzorků. Po jejich jednotlivém zvážení byly naplněny materiálem. Do vážního deníku byla zapsána čísla kelímků a k nim přiřazeno šestičíselné označení příslušného vzorku. Posléze byly naplněné kelímky opět zváženy z důvodu stanovení hmotnosti materiálu uvnitř.

Kelímky s naváženým materiálem byly umístěny do laboratorní pece, kde byly sušeny při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti. Tento postup se nazývá gravimetrické stanovení sušiny a vychází z normy ČSN EN 14346. Po stanovení hmotnosti kelímků s vysušenými vzorky byl obsah sušiny spočítán podle následujícího vztahu.

Výpočetní vztah pro stanovení sušiny:

$$Suš = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 [\%]$$

m_1 hmotnost prázdného kelímku [kg]

m_2 hmotnost kelímku s naváženým vzorkem [kg]

m_3 hmotnost kelímku s vysušeným vzorkem [kg]

Kelímky s vysušenými vzorky byly poté umístěny do žíhací pece, kde byly vzorky vyžihány při teplotě 505 °C do konstantní hmotnosti. Po vyžihání byly kelímky se zbytky vzorků opět zváženy. Protože hoří pouze organická část vysušeného materiálu, zůstanou v keramickém kelímku pouze nespálené minerální popeloviny. Po stanovení rozdílu hmotnosti vzorku po vyžihání lze tedy obsah spalitelných látek určit dle níže uvedeného početního vztahu.

Výpočet podílu spalitelných látek:

$$SL = \frac{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_1)}{(m_3 - m_1)} \times 100 [\%]$$

m_4 hmotnost kelímku s vyžiháním vzorkem [kg]

4. 5 Silážování nadzemních částí rostlin

Aby bylo porovnání s výsledky anaerobní fermentace kukuřičné siláže s rostlinami topinamburu objektivní, bylo rozhodnuto, že nadzemní části rostlin budou fermentovány nejen v čerstvém stavu, ale i silážované.

Silážování se běžně provádí jako prostředek pro konzervaci daného materiálu. Ten je tak uchováván ve šťavnatém stavu a zachovává si živiny a minerální látky při nízkých ztrátách. Mimo to ještě proces silážování zajišťuje minimální degradaci dusíkatých látek u bílkovinných siláží a škrobu u siláží sacharidových (Doležal, 2006).

Materiál byl proto dezintegrován kuchyňským robotem na velikost částic podobných jako u kukuřičné siláže a po promíchání pak umístěn do přípravku na laboratorní silážování.

Tento přípravek sestával z novodurové trubky o průměru 0,125 m a délce 0,7 m, která byla na obou koncích vzduchotěsně uzavřena. Oxid uhličitý, který při silážovacím procesu vzniká, byl odváděn hadicí v horní části přípravku do nádoby s vodou. Toto odvádění plynu fungovalo jako sifonový uzávěr, díky kterému mohl vznikající oxid uhličitý unikat ven z přípravku přes vodní sloupec v nádobě, ale do přípravku se nemohl dostávat vzduch, který je při silážování nežádoucí, neboť podporuje hnilobné procesy v silážovaném materiálu.

Během silážovacího procesu se z materiálu uvolňuje kapalina, která se také nazývá silážní šťáva. Tuto tekutinu je třeba ze siláže odvádět, protože má nízkou hodnotu pH z důvodu vysokého obsahu organických kyselin, které při silážování vznikají. Pokud by nebyla šťáva odváděna, docházelo by k inhibování celého procesu. Proto byl na dno silážovacího přípravku umístěn perforovaný kovový podstavec, který tak vytvářel druhé dno, pod kterým se mohla silážní šťáva shromažďovat (Jakobe, 1987).

Při silážování rozkládají mikroorganismy bez přístupu vzduchu sacharidy obsažené v materiálu za vzniku oxidu uhličitého a kyseliny mléčné. Kyselina mléčná pak funguje v siláži jako konzervační prostředek.

Obsah sušiny pro proces silážování by se měl pohybovat mezi hodnotami 22-50 %, což v případě čerstvé nadzemní části topinamburů nebyl problém. Díky tvorbě organických kyselin dochází v siláži ke snížení hodnoty pH a to zhruba na hodnotu 3,7-5,2. Výživná hodnota siláží je ve srovnání s původní plodinou zpravidla nižší, neboť dochází ke ztrátám organických látek, které jsou během silážování rozkládány (Doležal, 2006).

Nadzemní části topinamburů byly v laboratoři silážovány po dobu jednoho měsíce za teploty 19 °C.



Obr. 4 Silážovací přípravek

4. 6 Kalorimetrie

Pouze pro informaci bylo stanovováno spalné teplo pomocí kalorimetru, jak u vstupních surovin, tak u výstupního materiálu po anaerobní fermentaci.

Před samotným stanovováním spalného tepla na kalorimetru je třeba vzorek nejdříve dokonale vysušit v laboratorní peci, kde se suší vzorky pro stanovení sušiny. Vysušený vzorek je poté třeba namlít na jemný prášek pomocí elektrického nožového mlýna, ve kterém je vzorek roztírán rotujícím nožem mlýna o síto a rozemletý materiál propadáva dolů do násypky. Z prášku se pak na speciálním přípravku vylisuje tableta, která svými rozměry odpovídá zařízení kalorimetru. Tabletě je nutné zvážit, neboť se spalné teplo přepočítává na kilogram sušiny vzorku.

V kalorimetru pak probíhá nahřívání komory, ve které analýza probíhá a následné spálení tablety v prostředí čistého kyslíku. Přístroj měří teplo, které se uvolnilo spálením daného množství vzorku. Jelikož stanovuje spalné teplo, měří i množství tepla, které je obsaženo ve vodní páře, která při procesu spalování vzniká a kterou je tedy třeba zkondenzovat. Výsledné spalné teplo je pak udáváno v megajoulech na kilogram suchého vzorku. Měření spalného tepla se provádí ve trojím opakování, výsledky se poté zprůměrují.

4. 7 Metodika testů

Testy, které probíhaly v Republikové referenční laboratoři Mendelovy univerzity, byly založeny na principu vsázkových reaktorů o objemu 0,003 m³, do nichž bylo nadávkováno inokulum a příslušné množství testovaného materiálu z topinamburu. Jako inokulum posloužil materiál odebraný z primárního fermentoru bioplynové stanice v Čejčce. Tato zemědělská bioplynová stanice využívá jako materiál pro anaerobní fermentaci směs prasečí kejdy a kukuřičné siláže. Podíl sušiny materiálu v reaktorech udržují na hodnotě kolem 4 % (Veškrna, 2014).

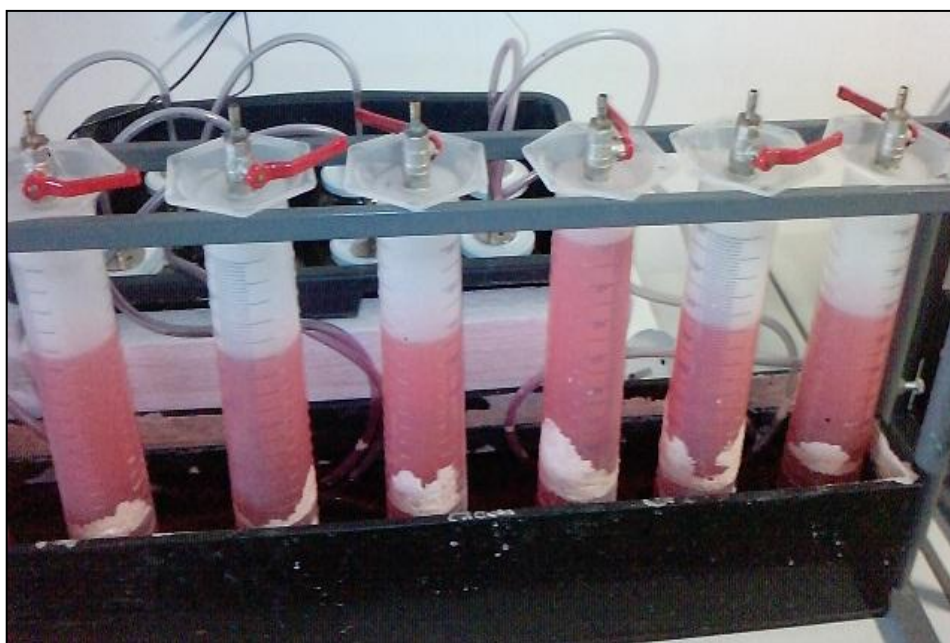


Obr. 5 Vsázkové reaktory

Vznikající bioplyn byl skladován v plynojemu s vodním uzávěrem, který funguje na principu zvonu. V tomto případě plastového odměrného válce o objemu 0,002 m³ otočeného dnem vzhůru, který je zasunut do nádoby s vodou, ve které jsou soli, které mají zabránit rozpouštění bioplynu ve vodě. Do odměrného válce je zavedena hadice přivádějící bioplyn z fermentoru. Na začátku testu je válec naplněn vodou, v průběhu fermentace je voda vytěšňována vznikajícím bioplymem a její hladina ve sloupci klesá.

Díky tomu, že je odměrný válec výrobcem opatřen kalibrovanou stupnicí, lze jednoduše a rychle odečítat objem nově vzniklého bioplynu.

Vodní sloupec způsobuje ve válci podtlak, pro potřeby výzkumu je však třeba získávané údaje o objemu produkovaného bioplynu převádět na tzv. normální metry krychlové neboli m^3_N . Normální metr krychlový je objem jednoho metru krychlového plynu při normálních podmínkách, tj. při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $101\,325\text{ Pa}$. Proto je nutné hodnoty objemu odečtené z vodního plynojemu přepočítat na hodnoty odpovídající normálním podmínkám.



Obr. 6 Plynojemy

Obecný vztah pro přepočet objemu bioplynu na normální podmínky:

$$v_1 = \left(\frac{p_2 \times v_2}{p_1} \right) \times \frac{T_1}{T_2}$$

v_1objem bioplynu za normálních podmínek [m^3]

v_2objem bioplynu v plynojemu [m^3]

p_1tlak bioplynu za normálních podmínek [Pa]

p_2tlak bioplynu v plynojemu [Pa]

T_1teplota bioplynu za normálních podmínek [K]

T_2teplota bioplynu v plynojemu [K]

Pro potřeby této práce bylo dále nutné přepočítat produkci bioplynu na měrnou produkci bioplynu, tj. produkci bioplynu vztaženou na kilogram sušiny materiálu, od které rovněž odečítáme průměrnou produkci bioplynu kontrolních reaktorů, abychom zjistili objem bioplynu, který byl vyprodukován pouze z dodaného množství materiálu.

Vztah pro výpočet měrné produkce bioplynu:

$$v_{mb} = \frac{v_{bs} - \frac{(v_{bk1} + v_{bk2})}{2}}{(suš \times m_s)}$$

v_{mb}měrná produkce bioplynu [m^3/kg]

v_{bs}produkce bioplynu reaktoru s materiálem [10^{-3}m^3]

v_{bk1}produkce bioplynu kontrolního reaktoru 1 [10^{-3}m^3]

v_{bk2}produkce bioplynu kontrolního reaktoru 2 [10^{-3}m^3]

$suš$sušina testovaného materiálu [-]

m_shmotnost dávky materiálu [10^{-3}kg]

Výpočet měrné produkce metanu je obdobný jako v předchozím případě, pouze se do vztahu dosazuje produkce metanu za normálních podmínek.

Vztah pro výpočet měrné produkce metanu:

$$v_{mm} = \frac{v_{ms} - \frac{(v_{mk1} + v_{mk2})}{2}}{(suš \times m_s)}$$

v_{mm}měrná produkce metanu [m^3/kg]

v_{ms}produkce metanu reaktoru s materiálem [$10^{-3}m^3$]

v_{mk1}produkce metanu kontrolního reaktoru 1 [$10^{-3}m^3$]

v_{mk2}produkce metanu kontrolního reaktoru 2 [$10^{-3}m^3$]

suš.....sušina materiálu [-]

m_shmotnost dávky materiálu [$10^{-3}kg$]

Reaktory, ve kterých probíhala anaerobní fermentace, byly temperovány ve vodní lázni na teplotu 42 °C, což je hodnota teploty, která vyhovuje mezofilním metanogenním organismům. Podporováním této skupiny mikroorganismů sice celková produkce bioplynu klesá, ovšem kvalita bioplynu charakterizovaná především obsahem metanu vzroste (Schulz, 2004).

Anaerobní fermentace probíhala 23 dní. Každých 24 hodin byl zaznamenáván přírůstek objemu vzniklého bioplynu pomocí vodního plynojemu a složení bioplynu. Obsah metanu, oxidu uhličitého a sirovodíku byl stanovován pomocí přístroje Dräger X-am 7000.



Obr. 7 Dräger X-am 7000

5 VÝSLEDKY

5.1 Test číslo 1

V tomto testu bylo zvoleno dávkování 0,020 kg surového materiálu a druhé dávkování 0,040 kg materiálu. Obojí dávkování bylo provedeno ve trojím opakování a výsledky po skončení testů zprůměrovány. Dávka inokula z bioplynové stanice v Čejči byla 2 kg.

Tabulka 1 zobrazuje konkrétní dávkování materiálu u jednotlivých reaktorů a látkové zatížení. Látkové zatížení udává množství sušiny dávkovaného materiálu v kilogramech na kilogram sušiny inokula.

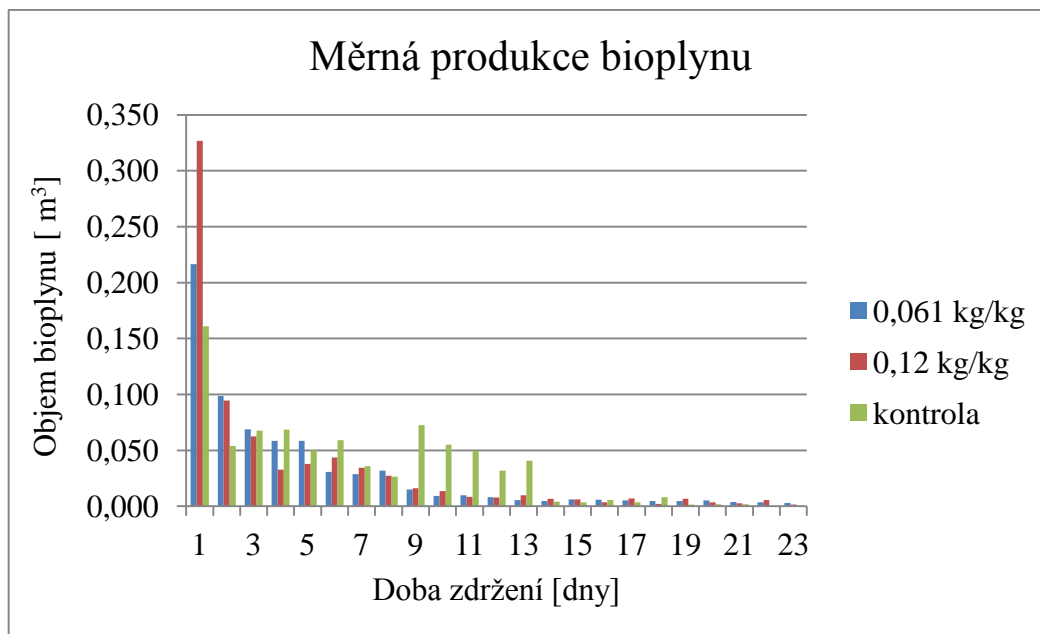
Tabulka 1 Test číslo 1 Dávkování materiálu a látkové zatížení

Reaktor č.	1	2	3	4	5	6
Množství inokula [kg]	2	2	2	2	2	2
Sušina inokula [%]	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Dávka topinamburu [kg]	0,02	0,021	0,02	0,041	0,04	0,04
Sušina topinamburu [%]	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7
Látkové zatížení [kg.kg ⁻¹]	0,062	0,064	0,060	0,124	0,123	0,123

V následující tabulce je podrobně rozepsána produkce bioplynu u všech reaktorů v tomto testu za každý jednotlivý den. Jsou to hodnoty měrné produkce reaktorů, to znamená, že od těchto hodnot je odečtena průměrná produkce kontrolních reaktorů a jsou přepočítány na kilogram sušiny dávkovaného materiálu.

Tabulka 2 Test číslo 1 Měrná produkce bioplynu

	0,02kg	0,02kg	0,02kg	0,04kg	0,04kg	0,04kg
den	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg
1	0,234	0,432	0,314	0,183	0,237	0,230
2	0,100	0,078	0,105	0,110	0,095	0,091
3	0,066	0,054	0,067	0,048	0,080	0,078
4	0,038	0,035	0,025	0,065	0,052	0,058
5	0,035	0,035	0,044	0,056	0,041	0,079
6	0,031	0,038	0,062	0,017	0,030	0,045
7	0,037	0,028	0,039	0,023	0,035	0,027
8	0,031	0,018	0,032	0,015	0,061	0,020
9	0,017	0,010	0,021	0,015	0,019	0,010
10	0,016	0,012	0,013	0,015	0,004	0,008
11	0,011	0,005	0,010	0,015	0,007	0,008
12	0,005	0,009	0,010	0,015	0,005	0,005
13	0,015	0,007	0,007	0,009	0,004	0,004
14	0,009	0,003	0,008	0,006	0,003	0,006
15	0,008	0,006	0,004	0,014	0,003	0,001
16	0,004	0,002	0,004	0,012	0,002	0,003
17	0,012	0,004	0,004	0,010	0,003	0,002
18	0,002	0,002	0,002	0,012	0,001	0,001
19	0,011	0,003	0,005	0,010	0,002	0,003
20	0,002	0,006	0,002	0,007	0,005	0,003
21	0,004	0,002	0,002	0,007	0,002	0,002
22	0,006	0,004	0,006	0,006	0,002	0,002
23	0,002	0,002	0,001	0,005	0,002	0,001
celkem	0,695	0,792	0,788	0,677	0,690	0,686



Obr. 8 Test číslo 1 Měrná produkce bioplynu

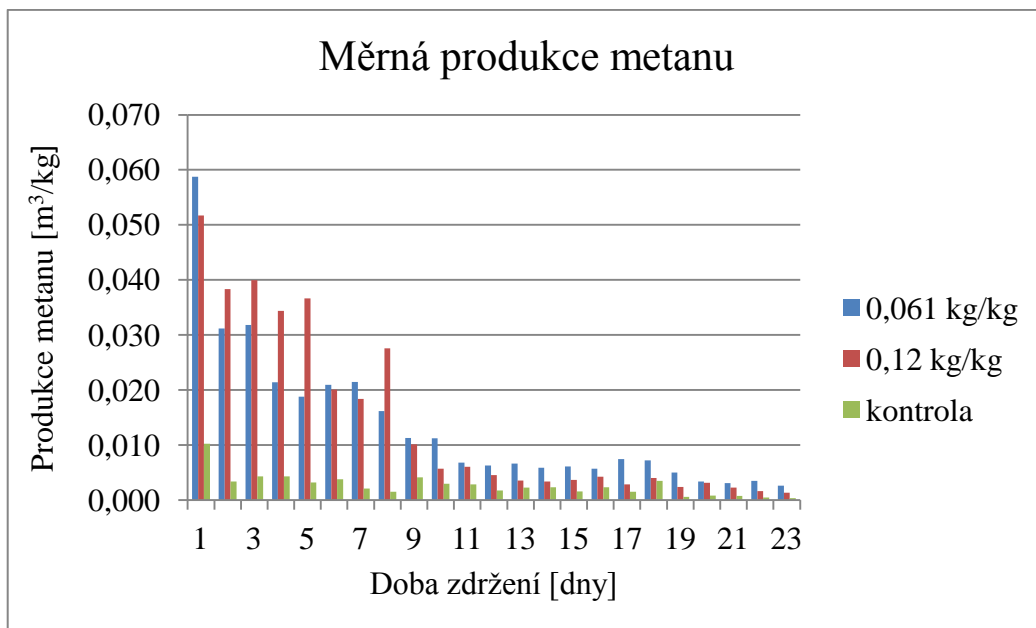
Jak je z grafu číslo 1 zřejmé, měrná produkce bioplynu byla nejvyšší první den testu a postupně se plynule snižovala. Nejvyšší množství bioplynu bylo produkováno prvních osm až devět dní, poté byla produkce velmi nízká a dalo by se říci skoro konstantní.

Vysoká počáteční produkce bioplynu by mohla být způsobena tím, že nejdříve jsou mikroorganismy rozkládány složky materiálu, které obsahují ve svých chemických vazbách nejvíce energie (sacharidy, lipidy) a až poté, co jsou tyto látky rozloženy, přechází mikroorganismy k rozkladu složitějších látek, především bílkovin.

Produkce bioplynu u kontrolních reaktorů byla v některých dnech dokonce vyšší než u reaktorů s materiálem, je však nutno podotknout, že obsah metanu byl u kontrolních reaktorů podstatně nižší, což dokládají následující grafy.

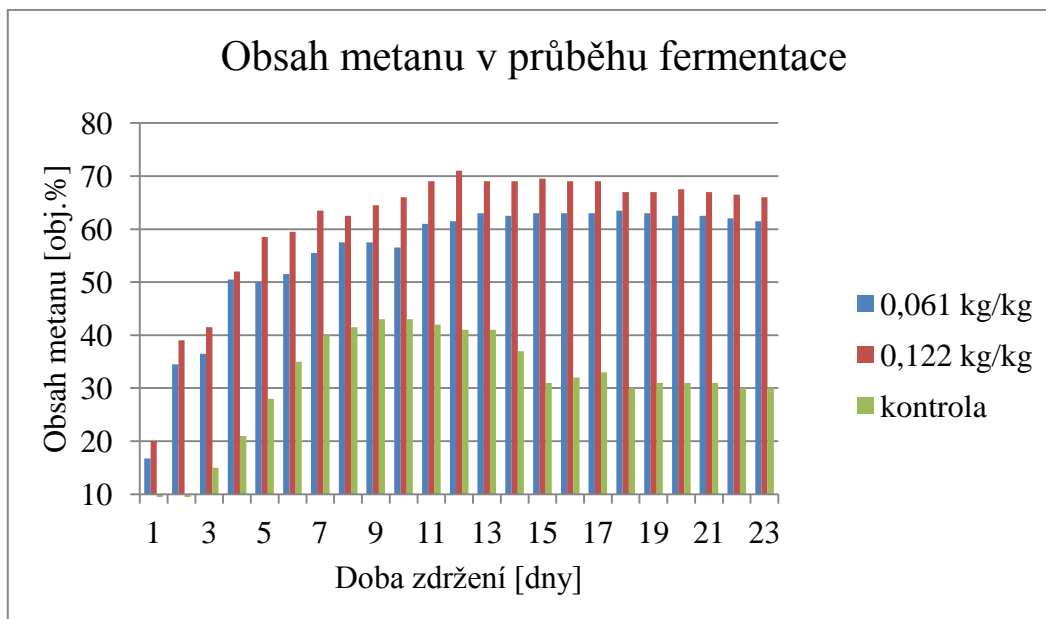
Tabulka 3 Test číslo 1 Měrná produkce metanu

	0,02kg	0,02kg	0,02kg	0,04kg	0,04kg	0,04kg
den	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg
1	0,063	0,062	0,059	0,047	0,056	0,052
2	0,033	0,030	0,031	0,039	0,040	0,037
3	0,034	0,029	0,032	0,037	0,042	0,041
4	0,020	0,019	0,025	0,036	0,033	0,035
5	0,018	0,019	0,019	0,038	0,026	0,047
6	0,019	0,024	0,020	0,010	0,020	0,030
7	0,022	0,017	0,025	0,014	0,023	0,018
8	0,019	0,011	0,019	0,029	0,040	0,014
9	0,012	0,009	0,013	0,007	0,014	0,009
10	0,013	0,011	0,010	0,005	0,005	0,007
11	0,008	0,005	0,008	0,005	0,006	0,007
12	0,005	0,007	0,007	0,005	0,004	0,004
13	0,008	0,006	0,006	0,003	0,004	0,004
14	0,008	0,004	0,006	0,002	0,003	0,005
15	0,008	0,006	0,005	0,005	0,004	0,002
16	0,007	0,005	0,006	0,005	0,004	0,004
17	0,009	0,006	0,008	0,003	0,003	0,003
18	0,007	0,007	0,008	0,004	0,004	0,004
19	0,008	0,003	0,005	0,003	0,002	0,002
20	0,002	0,005	0,003	0,003	0,004	0,003
21	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002
22	0,004	0,003	0,004	0,002	0,001	0,001
23	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001
celkem	0,331	0,291	0,324	0,306	0,340	0,333



Obr. 8 Test číslo 1 Měrná produkce metanu

Stejně jako u měrné produkce bioplynu je i zde vidět pokles měrné produkce metanu od prvního dne testu, kdy byla nejvyšší. Nejvíce metanu vzniklo opět prvních osm až devět dní. U dávkování 0,04 kg materiálu byla celková produkce metanu nepatrně vyšší, zřejmě z důvodu vyšší dávky organických látek, které mohly mikroorganismy využít pro svůj metabolismus a tím i pro tvorbu metanu. Produkce metanu u kontrolních reaktorů byla zhruba stálá oproti produkci bioplynu, která probíhala podobným způsobem jako produkce bioplynu u reaktorů s materiálem a postupně se snižovala.



Obr. 9 Test číslo 1 Obsah metanu v průběhu fermentace

Zatímco u kontrolních reaktorů byl obsah metanu v bioplynu s výjimkou několika dní s vyšší produkcí bioplynu stálý, u reaktorů s dávkou materiálu se podíl metanu v prvních dnech testu, kdy je produkce bioplynu nejvyšší postupně zvyšoval a až ke konci testu byl stálý.

Pokud má být bioplyn spalován v kogeneračních jednotkách, je spodní hranice obsahu metanu 40 %, v některých případech může být dokonce jen 30 % (TEDOM).

V této práci byla stanovena minimální hodnota obsahu metanu v bioplynu pro výrobu elektrické energie na 50 %. Čím je podíl metanu v bioplynu vyšší, tím se zvyšuje účinnost výroby elektrické energie a prodlužuje se i doba životnosti kogenerační jednotky, kde díky kvalitnějšímu palivu dochází k menšímu opotřebování pracovních součástí. Životnost je bezpochyby také důležitý faktor pro potenciál využití bioplynu k výrobě elektřiny.

Této minimální hodnoty podílu metanu dosáhly reaktory přibližně od čtvrtého dne testu, tedy zhruba v polovině doby s největší měrnou produkcí.

Shrnutí testu číslo 1

Průměrná produkce bioplynu u látkového zatížení $0,06 \text{ kg.kg}^{-1}$ byla $0,758 \text{ m}^3$ bioplynu na kilogram sušiny materiálu. Průměrný obsah metanu byl 41,6 %, měrná produkce metanu činila $0,315 \text{ m}^3$ na kilogram sušiny materiálu.

U látkového zatížení $0,12 \text{ kg.kg}^{-1}$ byla průměrná produkce bioplynu $0,684 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ a průměrný obsahu metanu 47,7 %, tedy $0,326 \text{ m}^3$ z kilogramu sušiny materiálu.

Nejvyšší produkce dosahovaly reaktory v prvních osmi až devíti dnech, kdy bylo vyrobeno více než 80 % bioplynu a více než 70 % metanu. Zbývající dny testu sice byl procentuální podíl metanu vysoký, produkce bioplynu však byla malá.

Při vyšším látkovém zatížení vzrostla produkce metanu na úkor nižší produkce bioplynu, což znamená vyšší procentuální podíl metanu v bioplynu a tím pádem lepší kvalitu bioplynu z hlediska jeho využití v kogeneračních jednotkách.

5. 2 Test číslo 2

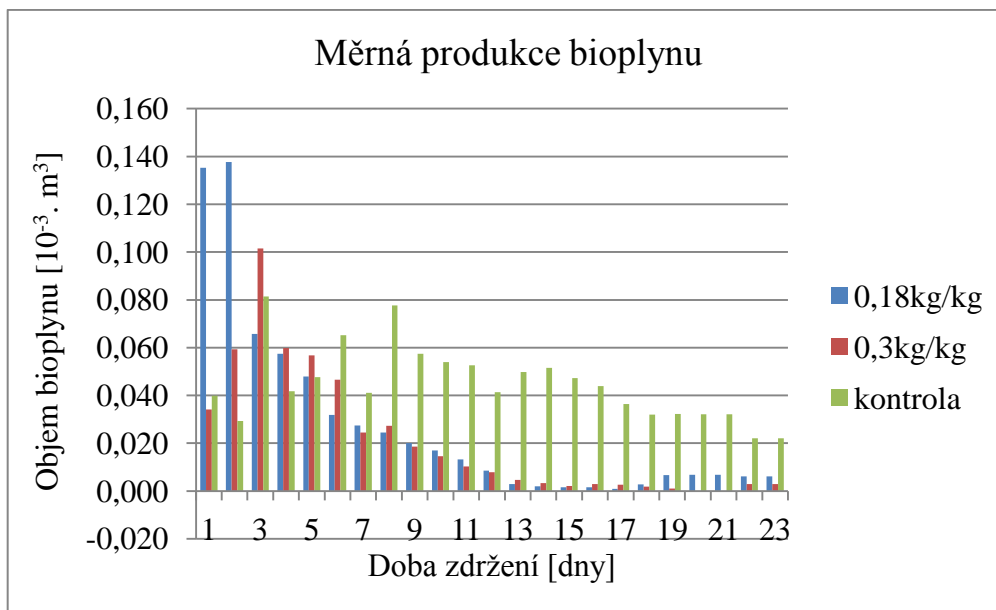
V tomto testu bylo zvoleno vyšší dávkování materiálu z hlíz topinamburu, aby tak bylo možno sledovat, zda se bude se zvýšeným látkovým zatížením zlepšovat kvalita bioplynu. Dále bylo přistoupeno i k testování anaerobní fermentace syrových nadzemních částí rostlin topinamburu (stonku, listů, květů).

Tabulka 4 Test číslo 2 Dávkování a látkové zatížení

	Hlízy			Nadzemní nesilážovaná část		
	1	2	3	4	5	6
Reaktor č.	1	2	3	4	5	6
Množství inokula [kg]	2	2	2	2	2	2
Sušina inokula [%]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Dávka topinamburu [kg]	0,06	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1
Sušina materiálu [%]	21	21	21	21,3	21,3	21,3
Látkové zatížení [kg.kg ⁻¹]	0,18	0,18	0,18	0,3	0,3	0,3

Tabulka 5 Test číslo 2 Měrná produkce bioplynu

	0,06kg	0,06kg	0,06kg	0,1kg	0,1kg	0,1kg
den	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg
1	0,127	0,168	0,111	0,035	0,033	0,034
2	0,143	0,135	0,135	0,059	0,059	0,059
3	0,038	0,086	0,073	0,101	0,101	0,102
4	0,062	0,069	0,041	0,060	0,060	0,060
5	0,053	0,053	0,039	0,058	0,055	0,058
6	0,035	0,035	0,025	0,047	0,047	0,045
7	0,028	0,026	0,028	0,024	0,025	0,024
8	0,026	0,018	0,030	0,032	0,025	0,024
9	0,021	0,016	0,023	0,018	0,020	0,018
10	0,018	0,014	0,018	0,015	0,015	0,014
11	0,016	0,010	0,013	0,011	0,010	0,010
12	0,012	0,004	0,010	0,008	0,008	0,008
13	0,005	0,000	0,004	0,005	0,004	0,004
14	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003
15	0,001	0,004	0,000	0,003	0,002	0,002
16	0,001	0,003	0,001	0,003	0,002	0,003
17	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,003
18	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002
19	0,001	0,005	0,014	0,001	0,000	0,002
20	0,004	0,005	0,011	0,000	0,000	0,000
21	0,004	0,005	0,011	0,000	0,000	0,000
22	0,001	0,006	0,011	0,003	0,002	0,003
23	0,001	0,006	0,011	0,003	0,002	0,003
celkem	0,576	0,729	0,618	0,494	0,480	0,482



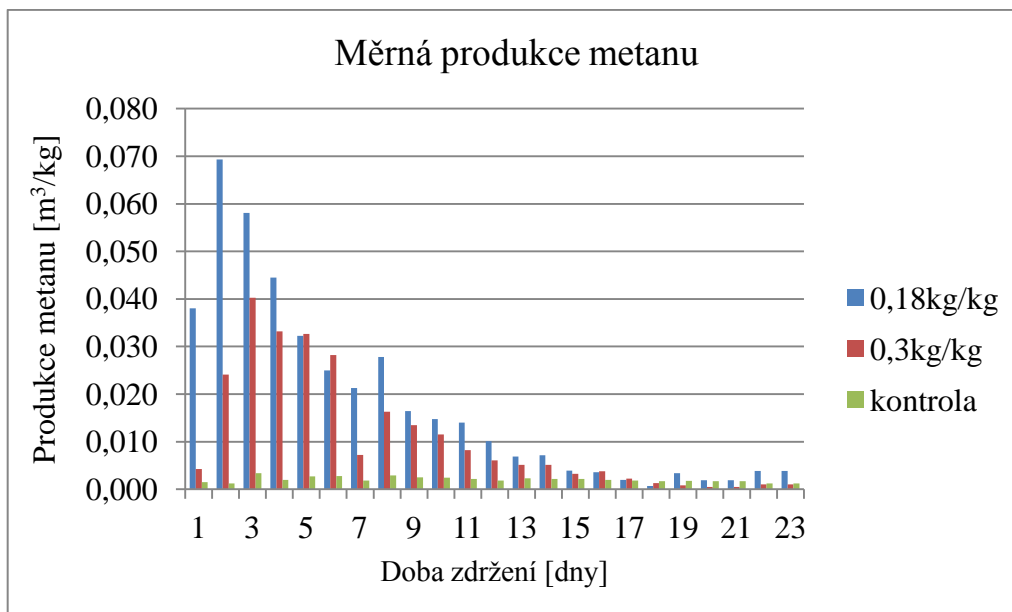
Obr. 10 Test číslo 2 Měrná produkce bioplynu

Proces tvorby bioplynu reaktorů s materiálem z hlíz probíhal podobným způsobem jako v předchozím testu. Produkce bioplynu v reaktorech s nadzemní částí topinamburu však nebyla maximální hned první den jako v případě hlíz, ale postupně se zvyšovala, vrcholu dosáhla třetího dne a teprve poté začala postupně klesat. V obou případech testovaného materiálu bylo opět více než 80 % bioplynu vyrobeno během prvních devíti dnů i přesto, že u nadzemní části dosáhla produkce maxima později než u hlíz.

Přibližně v období počáteční maximální produkce bylo množství bioplynu vznikajícího v kontrolních reaktorech nižší než u reaktorů s materiálem, ale od šestého dne začala převažovat produkce kontroly.

Tabulka 6 Test číslo 2 Měrná produkce metanu

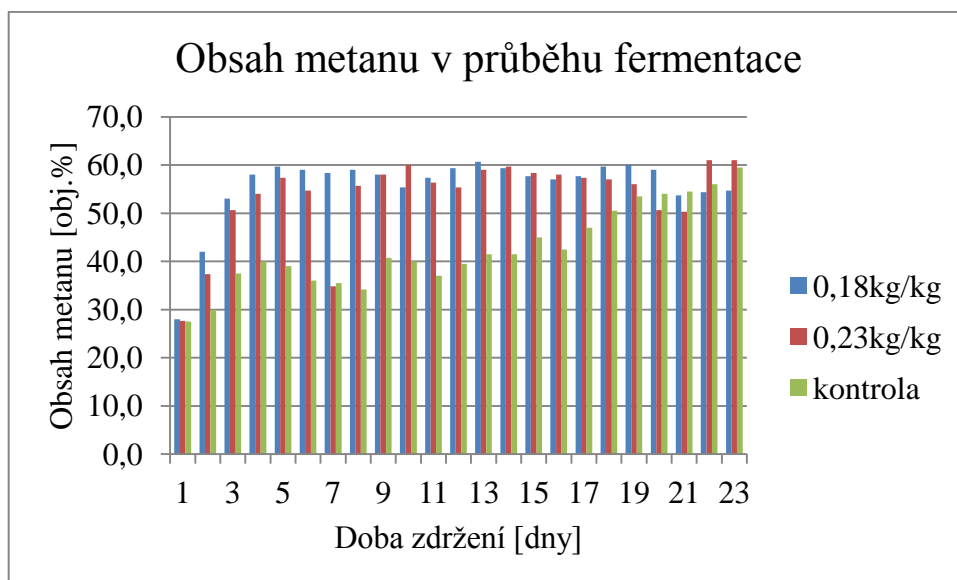
	0,06kg	0,06kg	0,06kg	0,1kg	0,1kg	0,1kg
den	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg
1	0,033	0,044	0,037	0,004	0,005	0,003
2	0,079	0,047	0,082	0,023	0,025	0,024
3	0,021	0,112	0,041	0,054	0,053	0,014
4	0,043	0,045	0,045	0,034	0,034	0,032
5	0,033	0,036	0,028	0,034	0,031	0,032
6	0,026	0,028	0,021	0,031	0,029	0,024
7	0,022	0,020	0,022	0,005	0,010	0,006
8	0,029	0,023	0,031	0,011	0,020	0,017
9	0,016	0,015	0,018	0,014	0,015	0,012
10	0,014	0,013	0,017	0,012	0,012	0,011
11	0,015	0,012	0,016	0,009	0,009	0,008
12	0,012	0,007	0,011	0,006	0,006	0,006
13	0,008	0,005	0,008	0,006	0,005	0,005
14	0,006	0,006	0,009	0,005	0,005	0,005
15	0,005	0,002	0,005	0,004	0,003	0,003
16	0,003	0,003	0,005	0,004	0,004	0,004
17	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001
18	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,000
19	0,001	0,002	0,007	0,001	0,001	0,000
20	0,001	0,002	0,003	0,000	0,000	0,001
21	0,001	0,002	0,003	0,000	0,000	0,001
22	0,001	0,004	0,007	0,002	0,001	0,000
23	0,001	0,004	0,007	0,002	0,001	0,000
celkem	0,369	0,436	0,426	0,267	0,273	0,211



Obr. 11 Test číslo 2 Měrná produkce metanu

Na rozdíl od grafu měrné produkce bioplynu, kde byla po většinu doby testu produkce kontroly vyšší, v případě měrné produkce metanu se držela kontrola na velmi nízké úrovni a zachovávala si přibližně konstantní průběh. U reaktorů s dávkovaným materiálem produkce nejprve stoupala a po dosažení maxima začala opět pozvolně klesat.

Obzvláště produkce metanu nadzemní části topinamburu je téměř shodná s produkcí bioplynu, což znamená, že procentuální podíl metanu v bioplynu při fermentaci nadzemní části zůstával konstantní.



Obr. 12 Test číslo 2 Obsah metanu v průběhu fermentace

Shrnutí testu číslo 2

Průměrná produkce bioplynu u látkového zatížení 0,18 kg.kg⁻¹ byla 0,641 m³ bioplynu na kilogram sušiny materiálu. Průměrný obsah metanu byl 63,9 %, celková produkce metanu činila 0,410 m³ na kilogram sušiny materiálu.

Oproti předchozím testům hlíz topinamburu, kde bylo dávkování 0,02 a 0,04 kg se celková produkce bioplynu snížila, zatímco produkce metanu zůstala téměř stejná. Podíl metanu tedy vzrostl a tím se zlepšila kvalita bioplynu jakožto paliva pro kogenerační jednotky.

Fermentace nadzemních částí topinamburu, kde bylo látkové zatížení 0,23 kg.kg⁻¹, vykazovala průměrnou produkci bioplynu 0,485 m³.kg⁻¹ a průměrný obsahu metanu 51,6 %, tedy 0,250 m³ na kilogram sušiny materiálu.

Průměrná koncentrace metanu je nad hranicí 50 % a tím by tedy bioplyn z tohoto materiálu mohl sloužit pro energetické využití. Při porovnání výsledků, s ohledem na látkové zatížení, však dosahuje lepších výsledků bioplyn vyrobený anaerobní fermentací hlíz.

5.3 Test číslo 3

Protože proces silážování nadzemních částí rostlin topinamburu probíhal po dobu jednoho měsíce, byl proveden třetí test, ve kterém byla fermentována pouze tato siláž.

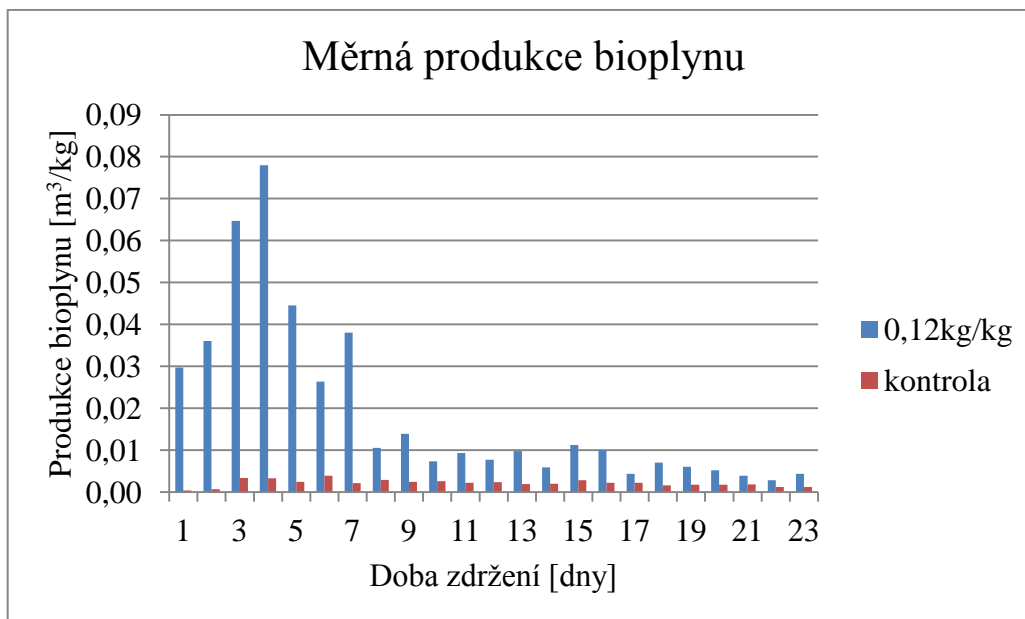
Je zajímavé, že sušina silážovaného materiálu klesla z původních 21,3 % u čerstvého materiálu z nadzemních částí na hodnotu 14,01 %. Tento pokles, je zřejmě způsoben jednak přeměnou části organické hmoty na oxid uhličitý a jednak i zvýšením obsahu vody o množství, které vznikne při biologickém procesu silážování.

Tabulka 7 Test číslo 3 Dávkování a látkové zatížení

	Silážovaná nadzemní část		
Reaktor č.	1	2	3
Množství inokula [kg]	2	2	2
Sušina inokula [%]	3,6	3,6	3,6
Dávka materiálu [kg]	0,06	0,06	0,06
Sušina [%]	14,01	14,01	14,01
Látkové zatížení [kg.kg ⁻¹]	0,12	0,12	0,12

Tabulka 8 Test číslo 3 Měrná produkce bioplynu

	0,06kg	0,06kg	0,06kg
den	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg
1	0,030	0,024	0,035
2	0,035	0,031	0,042
3	0,066	0,046	0,082
4	0,080	0,056	0,098
5	0,050	0,026	0,058
6	0,031	0,006	0,043
7	0,012	0,085	0,017
8	0,003	0,009	0,020
9	0,026	0,013	0,002
10	0,009	0,007	0,005
11	0,007	0,005	0,015
12	0,007	0,004	0,012
13	0,009	0,006	0,015
14	0,004	0,003	0,010
15	0,010	0,007	0,017
16	0,009	0,007	0,015
17	0,002	0,000	0,011
18	0,003	0,008	0,010
19	0,005	0,005	0,009
20	0,000	0,002	0,014
21	0,001	0,003	0,007
22	0,000	0,000	0,009
23	0,004	0,002	0,007
celkem	0,404	0,356	0,552

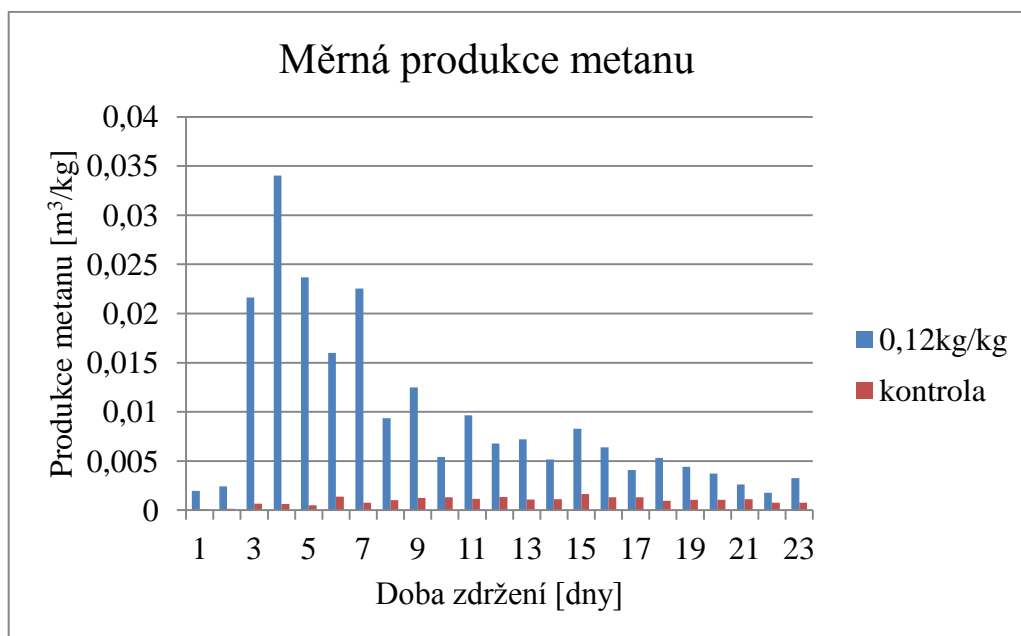


Obr. 13 Test číslo 3 Měrná produkce bioplynu

Graf číslo 7 ukazuje, že produkce bioplynu u topinamburu vykazovala trend předchozího testu nadzemní části, kdy bylo maximálních hodnot dosaženo kolem třetího dne testu. Opět bylo největší množství bioplynu (cca 82 %) vyprodukováno během prvních devíti dnů, po nichž produkce výrazně klesla. Produkce bioplynu vyrobeného ze silážovaného topinamburu byla několikanásobně vyšší než produkce u kontrolních reaktorů. Tato převaha je však způsobena nezvykle nízkou produkcí kontrolních reaktorů.

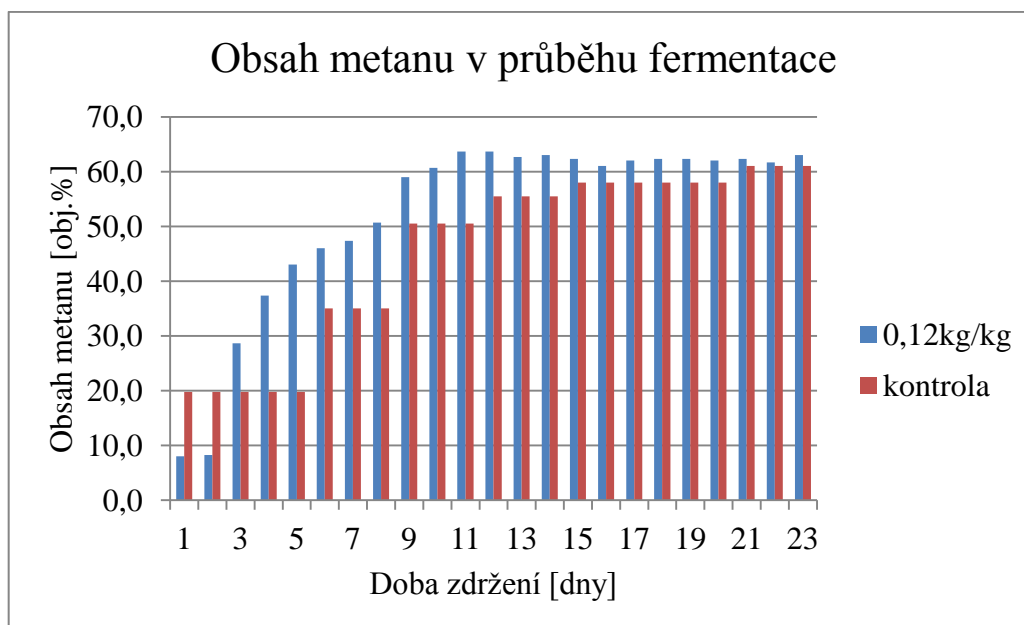
Tabulka 9 Test číslo 3 Měrná produkce metanu

	0,06kg	0,06kg	0,06kg
den	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg
1	0,002	0,001	0,002
2	0,003	0,002	0,003
3	0,022	0,012	0,030
4	0,039	0,025	0,039
5	0,026	0,018	0,028
6	0,016	0,011	0,021
7	0,008	0,041	0,018
8	0,005	0,009	0,015
9	0,022	0,013	0,002
10	0,008	0,007	0,001
11	0,008	0,006	0,015
12	0,006	0,005	0,009
13	0,007	0,005	0,010
14	0,004	0,004	0,007
15	0,007	0,005	0,012
16	0,005	0,004	0,010
17	0,002	0,003	0,007
18	0,004	0,007	0,006
19	0,003	0,004	0,006
20	0,002	0,002	0,007
21	0,001	0,002	0,005
22	0,000	0,000	0,006
23	0,004	0,002	0,004
celkem	0,205	0,187	0,262



Obr. 14 Test číslo 3 Měrná produkce metanu

I v případě metanu výrazně převažuje produkce u reaktorů s dávkovaným materiálem oproti kontrolním reaktorům. Průběh tvorby je podobný jako u předešlého grafu číslo 7, ale pokles produkce metanu je pozvolnější a během prvních devíti dnů, kdy je nejvyšší tvorba bioplynu, bylo vyrobeno zhruba 69 % metanu, což je o 10 % méně než v případě nesilážované nadzemní části.



Obr. 15 Test číslo 3 Obsah metanu v průběhu fermentace

Rozdíl mezi obsahem metanu u kontrolních reaktorů a reaktorů s materiálem je přibližně stejný jako u předchozích testů. Jediná změna v tomto testu tedy byla velmi nízká produkce kontrolních reaktorů.

Shrnutí výsledků testu číslo 3

Průměrná měrná produkce bioplynu silážovaného materiálu byla $0,437 \text{ m}^3$ na kilogram sušiny. Oproti nesilážované nadzemní části, jejíž průměrná produkce činila $0,485 \text{ m}^3$ na kilogram sušiny, je tedy tvorba bioplynu ze siláže o 10 % nižší.

Metanu bylo průměrně vyprodukováno $0,218 \text{ m}^3$ na kilogram sušiny což je o 13 % méně než v případě nesilážovaného materiálu.

Obsah metanu cca 50 % je tedy pouze o 1,6 % nižší než v testu číslo 2.

Veškerý pokles v produkci bioplynu či metanu v testu číslo 3 by mohl být způsoben právě tím, že nadzemní části byly silážovány.

Během procesu silážování totiž dochází k biologickým procesům způsobeným mikroorganismy. Hlavním procesem je mléčné kvašení, během kterého jsou bakteriemi rozkládány sacharidy za nepřístupu vzduchu. Oproti jiným druhům kvašení v tomto případě dochází především k tvorbě kyseliny mléčné a oxidu uhličitého. Díky těmto dvěma látkám se siláž konzervuje, ovšem na jejich vznik byla spotřebována část obsažených sacharidů a tím pádem bylo poté v siláži těchto látek méně.

Jelikož je produkce bioplynu i metanu vztahována na kilogram sušiny, dala by se tak vysvětlit nižší produkce bioplynu i metanu u silážovaného materiálu.

5. 4 Zhodnocení výsledků testů

Tabulka 10 Přehled výsledků všech testů

	Hlízy			Nadzemní část rostlin	
				Nesilážované	Silážované
Látkové zatížení [kg.kg ⁻¹]	0,06	0,12	0,18	0,23	0,12
Měrná produkce bioplynu[m ³ .kg ⁻¹]	0,758	0,684	0,641	0,485	0,437
Měrná produkce metanu [m ³ .kg ⁻¹]	0,315	0,326	0,410	0,250	0,218
Celkový podíl metanu v bioplynu [%]	41,6	47,7	63,9	51,6	50

Jak je z tabulky číslo deset zřejmé, anaerobní fermentace hlíz topinamburu vykazovala při vyšším látkovém zatížení lepších výsledků jak z hlediska kvality bioplynu, tak z hlediska jeho kvantity.

Pokud by měla být stanovena hodnota látkového zatížení, s maximální výtěžností, tedy případu, kdy by bylo dosaženo nejvyšší měrné produkce bioplynu s nejvyšší měrnou produkcí metanu, muselo by být provedeno více testů s postupným zvyšováním dávek materiálu až do té doby, dokud by měrná produkce nezačala s rostoucí dávkou materiálu klesat.

Výsledky testů byly mimo jiné porovnány i s prací pana Ing. Adama Škody z Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, ve které se rovněž zabýval anaerobní fermentací hlíz topinamburu, nadzemní části i směsi těchto dvou materiálů.

Při látkovém zatížení $0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$ dosáhl u anaerobní fermentace hlíz produkce bioplynu $0,335 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ a $0,219 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ produkce metanu. Obsah metanu v bioplynu tedy dosáhl průměrné hodnoty přes 65 %, ovšem kvalita tohoto bioplynu byla kompenzována kvantitou (Škoda, 2010).

Jak je zřejmé z výše uvedené tabulky, obsah metanu byl v tomto testu oproti výsledkům pana Škody o 1,1 % nižší, ovšem měrná produkce metanu byla o $0,191 \text{ m}^3$ z kilogramu sušiny vyšší, což je výrazný rozdíl.

Fermentací nadzemní části topinamburu pan Škoda získal $166,2 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ bioplynu a $115,7 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ metanu při obsahu metanu 69,9 %. Opět jako v předchozím případě vykazovala měrná produkce bioplynu i metanu nižší hodnoty při vyšším procentuálním zastoupení metanu. Látkové zatížení zvolil opět $0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$.

V případě nadzemní části topinamburu bylo v tomto testu vyprodukováno o $0,134 \text{ m}^3$ metanu více než ve srovnávaných výsledcích pana Škody.

Tyto rozdíly mohou být způsobeny rozdílnou kvalitou materiálu, použitou metodou testování a zřejmě i podstatně nižším látkovým zatížením v případě této diplomové práce.

Z výše uvedeného srovnání vyplývá, že hodnota látkového zatížení maximální výtěžnosti bioplynu z hlíz topinamburu je mezi hodnotami $0,18$ a $0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$. U nadzemní části mezi hodnotami $0,23$ a $0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$.

6 DISKUZE

Protože cílem této práce bylo zhodnocení potenciálu využití rostliny slunečnice topinamburu jakožto materiálu pro bioplynové stanice, ve kterých se v současné době nejvíce využívají energetické odrůdy kukuřice, je třeba na závěr obě tyto rostliny porovnat.

Odrůdy kukuřice šlechtěné pro bioplynové stanice dosahují výnosů 2,2 až 2,5 kilogramu suché hmoty z jednoho metru čtverečního (Honsová, 2013).

Na univerzitě ve slovinském Mariboru bylo testováno patnáct různých druhů energetických odrůd kukuřice a anaerobní fermentací byly zjišťovány měrné produkce bioplynu a metanu u každého druhu zvlášť. Průměrná měrná produkce bioplynu činila $0,544 \text{ m}^3_{\text{N}}$ z kilogramu sušiny, přičemž nejvyšší měrné produkce dosáhla odrůda s názvem PR37F73 ($603 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$) a nejméně odrůda NK THERMO ($455 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$). Průměrná měrná produkce metanu byla $0,309 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$, nejvíce pak opět u odrůdy PR37F73 ($349 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$), nejmenší měrnou produkci metanu vykazovala odrůda NK THERMO ($251 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$). Průměrná hodnota obsahu metanu v bioplynu byla 56,8 % (Oslaj at al., 2010).

Při těchto výsledcích lze tedy pro pozdější porovnání uvažovat průměrnou výtěžnost 1,2 až $1,4 \text{ m}^3_{\text{N}}$ bioplynu a 0,7 až $0,8 \text{ m}^3_{\text{N}}$ metanu z jednoho metru čtverečního zemědělské půdy.

Z topinamburu lze pro anaerobní fermentaci využívat jak nadzemní část rostliny tj. stonek s listy a květy, tak i podzemní hlízy, které jsou zásobárnou živin, především sacharidů a bílkovin. Při sklizni celé rostliny včetně hlíz, lze tedy z jednoho metru čtverečního získat přibližně 1,3 až 2,1 kilogramu suché hmoty (Biom).

Anaerobní fermentací nadzemní silážované části topinamburu bylo získáno $0,437 \text{ m}^3_{\text{N}}$ bioplynu z kilogramu sušiny a $0,218 \text{ m}^3_{\text{N}}$ metanu. Z hlíz bylo vyprodukováno $0,641 \text{ m}^3_{\text{N}}$ bioplynu a $0,41 \text{ m}^3_{\text{N}}$ metanu z kilogramu suché hmoty. Z jednoho metru čtverečního lze anaerobní fermentací celé rostliny získat 1,4 až $2,2 \text{ m}^3_{\text{N}}$ bioplynu a 0,8 až $1,3 \text{ m}^3_{\text{N}}$ metanu.

Tyto hodnoty platí v případě, že by byla sklízena celá rostlina topinamburu. To však znamená náročnější technologii a vyšší náklady než u sklizně kukuřice, protože kromě nadzemní části, kterou lze sklízet sklízecí řezačkou, sklizeň podzemních hlíz vyžaduje techniku navíc.

Pokud by však byla sklízena pouze nadzemní část, hlízy by zastávaly v půdě funkci vegetativního orgánu a porost topinamburu by tak mohl být pěstován jako víceletá plodina. V tomto případě by tedy byly náklady na sadbu nižší a sklizeň by byla časově i finančně méně náročná, logicky by však poklesla výtěžnost bioplynu a metanu a snížil by se finanční zisk z jednotky osázené plochy, protože by hlízy nebyly využívány jako materiál do bioplynové stanice.

Jestliže by byla z topinamburu sklízena podobně jako u kukuřice pouze nadzemní část rostlin, která by byla pro skladování upravena silážováním, snížila by se výtěžnost bioplynu z jednoho hektaru na přibližně 5600 až 9100 m³_N a v případě metanu by klesla výtěžnost na zhruba 2800 až 4500 m³_N.

Hmotnost sadby hlíz topinamburu na jeden hektar činí přibližně 2500 kilogramů. Při ceně 40 až 45 korun za kilogram sadbových hlíz lze tedy za jeden rok ušetřit na hektaru 100 až 110 tisíc korun.

Spálením nadzemní části rostlin v kalorimetru byla stanovena hodnota spalného tepla na 16,5 MJ na kilogram sušiny. Materiál z vysušených hlíz dosáhl spalného tepla 15 MJ z kilogramu suché hmoty. Nižší hodnota spalného tepla u hlíz topinamburu by mohla být způsobena nižším obsahem celulózy, která tvoří u rostlin sekundární pletiva a tím pádem je její obsah vyšší v částech jako je stonek a listy. Spalné teplo fermentačního zbytku z nadzemní části i z hlíz bylo zhruba 13 MJ z kilogramu suché hmoty.

Většina tepelné energie se uvolňuje při hoření organických látek v materiálu. Proto byly hodnoty spalného tepla nižší u fermentačního zbytku, který prošel procesem anaerobní fermentace, při kterém jsou organické látky odbourávány mikroorganismy za vzniku bioplynu.

Protože spalné teplo zahrnuje energii obsaženou ve vodní páře, která vznikla při spalování daného materiálu, je hodnota využitelné tepelné energie materiálu ještě menší. V tomto případě tedy méně než 13 megajoulů z kilogramu sušiny.

Z důvodu nízké výhřevnosti a pak také díky velkému obsahu vody ve fermentačním zbytku, by bylo jeho sušení podstatně velkým finančním nákladem. Nebylo by proto zřejmě ekonomicky efektivní využívání fermentačního zbytku jako paliva. Lepším způsobem využití je zapravení jej do orné půdy jako organického hnojiva. Díky tomu se mohou zlepšit fyzikální vlastnosti půdy, jako je soudržnost a schopnost zadržování vody.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověřit, jaké kvality dosahuje bioplyn, vznikající při anaerobní fermentaci testovaného materiálu ze slunečnice topinamburu.

V praktické části této diplomové práce byly testovány různé vzorky z materiálu rostliny slunečnice topinamburu a to jak hlízy, tak nadzemní část. Veškerý materiál pro testování byl sklizen ze soukromé zahrady v oblasti Třebíčska. Průměrný výnos hlíz byl 3,4 kg z 1m², výnos hmoty nadzemních částí rostlin byl 6,8 kg z 1m².

Slunečnice topinambur je vytrvalá rostlina z čeledi hvězdnicovité s hlízovitým oddenkem. Morfologicky je podobná rostlině slunečnici roční, která je také členem čeledi hvězdnicovité. Výška rostliny je 0,5-2,5 m. Hlízy jsou většinou nepravidelné s bílou nebo červenou slupkou. Hlízy obsahují 13-20 % polysacharidu inulínu, fruktózy a glukózy, 7 % bílkovin a 1 % vlákniny.

Topinambur často zplaňuje, roste prakticky na všech půdách i v půdách méně kvalitních nebo lesních. Délka vegetační doby je 4 až 8 měsíců. Vyžaduje chladnější, vlhčí klima. Lze jej pěstovat i na pozemcích, které není možné z různých důvodů dočasně zemědělsky využívat. Hlízy topinamburu se vyznačují vysokou odolností vůči mrazu (až do -30 °C). Při pěstování na produkci biomasy se může založit i víceletá kultura. Hlízy i zelená hmota jsou dobře silážovatelné. V závislosti na agrotechnických opatřeních činí sklizeň celé rostliny včetně hlíz z jednoho metru čtverečního přibližně 1,3 až 2,1 kilogramu suché hmoty (Biom).

V rámci této práce byly nadzemní části použity jak v syrovém stavu po sklizení, tak i jako silážované. Silážování probíhalo po dobu jednoho měsíce při teplotě 19 °C ve speciálním přípravku, který byl pro potřeby této práce vyroben. Nařezané stonky a listy byly v přípravku stlačeny tak, aby byl vytěsněn vzduch z materiálu. Navrch bylo umístěno závaží a na dně přípravku byl umístěn perforovaný podstavec, který tvořil druhé dno, pod kterým se mohly shromažďovat silážní šťávy.

U nadzemní silážované části bylo při látkovém zatížení 0,12 kg.kg⁻¹ vyprodukováno 0,437 m³_N bioplynu a 0,218 m³_N metanu. V tomto případě je 50 % zastoupení metanu v bioplynu dostatečné pro využití v kogeneračních jednotkách.

Nejvyšší měrné produkce metanu bylo u anaerobní fermentace hlíz dosaženo při látkovém zatížení $0,18 \text{ kg.kg}^{-1}$, konkrétně $0,41 \text{ m}^3_{\text{N}}$ metanu. Obsah metanu v bioplynu dosáhl hodnoty 64 %, což je výborná kvalita bioplynu.

Díky tomu, že byl obsah metanu v bioplynu tak vysoký, bylo by efektivnější zpracovávat v bioplynové stanici směs materiálu z hlíz a ze silážované nadzemní části. Tím by obsah metanu v bioplynu klesl.

Protože byl při anaerobní fermentaci samotné silážované nadzemní části obsah metanu 50 %, dá se předpokládat, že fermentací směsi by byl obsah metanu přinejmenším na této hodnotě (Straka, 2006).

Hlízy topinamburu by mohly být případně využívány jako materiál pro kofermentaci. To znamená, že k jiné surovině, například k biologicky rozložitelnému odpadu, který produkuje při anaerobní fermentaci nedostatečně kvalitní bioplyn, by se přidával materiál z hlíz. Tím by se zvýšila měrná produkce bioplynu, nebo procentuální podíl metanu a bioplyn by tak mohl být spalován v kogenerační jednotce (Steinhauser et al., 2008).

Hodnoty produkcí těchto testů lze srovnat s výsledky anaerobních fermentací energetických odrůd kukuřice z výše citovaného článku. Energetické odrůdy kukuřice jsou v dnešní době nejrozšířenějším materiálem a jsou využívány převážnou většinou zemědělských bioplynových stanic.

Z hlediska srovnaných výtěžností lze tedy rostlinu slunečnici topinambur považovat za potenciální plodinu pro výrobu elektrické energie z bioplynu.

8 POUŽITÉ ZDROJE

DOLEŽAL, Petr. Konzervace, skladování a úpravy objemných krmiv: (přednášky). 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2006, 247 s. ISBN 80-7157-993-9.

HONSOVÁ, Hana: Pěstování kukuřice na výrobu bioplynu. Biom.cz [online]. 2013-09-16 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pestovani-kukurice-na-vyrobu-bioplynu>>. ISSN: 1801-2655.

KOUTNÝ, Tomáš. *Anaerobní zpracování biologicky rozložitelných materiálů*. Brno, 2010. Mendelova univerzita v Brně.

JAKOBE, Petr a Petr JAKOBE. Konzervace krmiv. 1. vyd. Praha: SZN, 1987, 262 s.

OSLAJ, Matjaz, Bogomir MURSEC a Peter VINDIS. Biogas production from maize hybrids. Biomass and Bioenergy [online]. 2010, issue 11 [cit. 2015-04-05]. DOI:10.1016/j.biombioe.2010.04.016.

PETŘÍKOVÁ, Vlasta: Plodiny pro zemědělské bioplynové stanice. Biom.cz [online]. 2012-02-27 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/plodiny-pro-zemedelske-bioplynové-stanice>>. ISSN: 1801-2655.

SCHULZ, Heinz. Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady. 1. české vydání Ostrava. ISBN 80-861-6721-6.

STEINHAUSER, A. -- DEUBLEIN, D. Biogas from waste and renewable resources. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 443 s. ISBN 978-3-527-31841-4.

STRAKA, F. -- DOHÁNYOS, M. Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]. Praha: GAS, 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.

ŠKODA, Adam, ZÁBRANSKÁ, Jana, POKORNÁ, Dana, DOHÁNYOS, Michal: Topinambur hlíznatý jako substrát pro bioplynové stanice. Biom.cz [online]. 2010-07-21 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/topinambur-hliznaty-jako-substrat-pro-bioplynove-stanice>>. ISSN: 1801-2655.

TESAŘOVÁ, Marta. Biologické zpracování odpadů. Vyd. 1. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2010, 129 s. ISBN 978-80-7375-420-4.

VEŠKRNA, Vojtěch: Anaerobní zpracování hlíz slunečnice topinamburu. In International scientific student's conference. Technická fakulta SPU Nitra: 2014, s. 245--249. ISBN 978-80-552-1176-3.

Normy:

ČSN EN 14346. Charakterizace odpadů - Výpočet sušiny stanovením podílu sušiny nebo obsahu vody. Praha: Český normalizační institut, 2007.

WWW:

Biom. Topinambur hlíznatý (*Helianthus tuberosus* L.) - netradiční alternativní plodina pro průmyslové a energetické využití. [online]. 2002-03-04 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/topinambur-hliznaty-helianthus-tuberosus-l-netradicni-alternativni-plodina-pro-prumyslove-a-energeticke-vyuziti>>. ISSN: 1801-2655.

TEDOM. Stacionární motory. [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://cz.tedomengines.com/stacionarni-motory-palivo-bioplyn.html>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Test číslo 1 Dávkování materiálu a látkové zatížení	24
Tabulka 2 Test číslo 1 Měrná produkce bioplynu	25
Tabulka 3 Test číslo 1 Měrná produkce metanu	27
Tabulka 4 Test číslo 2 Dávkování a látkové zatížení	31
Tabulka 5 Test číslo 2 Měrná produkce bioplynu	32
Tabulka 6 Test číslo 2 Měrná produkce metanu	34
Tabulka 7 Test číslo 3 Dávkování a látkové zatížení	37
Tabulka 8 Test číslo 3 Měrná produkce bioplynu	38
Tabulka 9 Test číslo 3 Měrná produkce metanu	40
Tabulka 10 Přehled výsledků všech testů	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Porost topinamburu.....	9
Obr. 2 Hlízy topinamburu.....	10
Obr. 3 Laboratorní váha.....	13
Obr. 4 Silážovací přípravek	17
Obr. 5 Vsázkové reaktory	19
Obr. 6 Plynojemy.....	20
Obr. 7 Dräger X-am 7000.....	23
Obr. 8 Test číslo 1 Měrná produkce metanu.....	28
Obr. 9 Test číslo 1 Obsah metanu v průběhu fermentace.....	29
Obr. 10 Test číslo 2 Měrná produkce bioplynu	33
Obr. 11 Test číslo 2 Měrná produkce metanu.....	35
Obr. 12 Test číslo 2 Obsah metanu v průběhu fermentace.....	36
Obr. 13 Test číslo 3 Měrná produkce bioplynu	39
Obr. 14 Test číslo 3 Měrná produkce metanu.....	41
Obr. 15 Test číslo 3 Obsah metanu v průběhu fermentace.....	42