

**Universita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav
pro životní prostředí**



Přepřacování fermentačních zbytků z bioplynové stanice na alternativní palivo
metodou biosušení

Production of an alternative fuel from digestate using bio-drying method

Vedoucí práce: RNDr. Petra Innemanová, Ph.D.

Bc. Vítězslav Rákosník

Srpen 2017

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přejeté) informace budou řádně citovány. Rovněž prohlašuji, že předložená diplomová práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

Datum a podpis

Poděkování

Autor by na tomto místě velice rád poděkoval vedoucí práce paní RNDr. Petře Innemanové, Ph.D. za zájem, připomínky a čas, který vedení práce věnovala.

Dále veliké poděkování patří Mgr. Vojtovi Pilnáčkovi, bez jeho pomoci by bylo zprovoznění bioreaktoru na biosušení krajně obtížné. Velké poděkování patří Ing. Hance Šimáčkové za pomoc při analýze poměru C/N. Dále by autor rád poděkoval Ing. Pavlu Pouchovi z firmy Papouch za zapůjčení většiny potřebných komponent, BPS Kosová Hora, BPS Krásná Hora a BPS Mokrovraty za poskytnutí substrátu pro tento projekt.

Zvláštní poděkování patří autorově rodině, která po celou dobu práce na projektu poskytovala perfektní zázemí a oporu.

Obsah

1. Úvod	1
2. Literární rešerše	3
2.1. Biosušení	3
2.2. Biologické procesy	4
2.3. Energetické využití produktu biosušení	5
2.4. Princip sušení a faktory ovlivňující jeho proces	6
2.5. Systém aerace	6
2.5.1. Způsob aerace	6
2.5.2. Intenzita aerace	7
2.6. Doba zdržení v bioreaktoru	8
2.7. Inokulace	9
2.8. Chemické a fyzikální vlastnosti odpadu	9
2.9. Další možnosti využití procesu biosušení v odpadovém hospodářství	10
2.10. Bioplyn a vedlejší produkt jeho výroby – digestát	10
2.10.1. Bioplyn	10
2.11. Biosušení digestátu	13
3. Experimentální část	16
3.1. Použité přístroje	16
3.2. Použité chemikálie	16
3.3. Odběr separátu na bioplynových stanicích	17
3.4. Popis jednotlivých bioplynových stanic (BPS)	17
3.4.1. Kosova Hora	17
3.4.2. Krásná Hora	18

3.4.3.	Mokrovraty	18
3.5.	Popis laboratorního bioreaktoru a nastavené podmínky.....	19
3.6.	Spouštění jednotlivých experimentů	21
3.6.1.	Popis spouštění jednotlivých experimentálních cyklů	21
3.6.2.	Porovnání účinnosti procesu při optimalizaci vybraných vstupních parametrů	22
3.6.3.	Popis spouštění experimentálních cyklů po optimalizaci vstupní sušiny substrátu	23
3.6.4.	Popis spouštění experimentálních cyklů po optimalizaci vstupní sušiny a poměru C/N substrátu	23
3.7.	Stanovení vstupních a výstupních veličin	23
3.7.1.	Stanovení sušiny.....	23
3.7.2.	Respirace.....	24
3.7.3.	Ztráta žíháním	25
3.7.4.	Stanovení pH půdy ve vodném výluhu.....	26
3.7.5.	Poměr C/N	26
4.	Výsledky	28
4.1.	Vývoj teploty v bioreaktoru u jednotlivých experimentálních cyklů	28
4.1.1.	Vývoj teploty v bioreaktoru u cyklů se samotným separátem.....	28
4.1.1.1.	Kosova Hora.....	28
4.1.1.2.	Krásná Hora	30
4.1.1.3.	Mokrovraty.....	33
4.1.2.	Vývoj teploty v bioreaktoru u cyklů s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N substrátu	34
4.2.	Účinnost vysušení separátu	36
4.3.	Vstupní veličiny a jejich vliv na maximální teplotu separátu.....	37
4.4.	Závislost dosažené maximální teploty a sledovaných vstupních parametrů	40

5. Diskuze	43
5.1. Biosušení neupraveného separátu.....	43
5.2. Biosušení separátu po úpravě vstupních parametrů	45
6. Závěr.....	47
Reference	49

Abstrakt

Bioplyn představuje jeden z obnovitelných zdrojů energie, jehož podíl ve využívání v posledních dekádách prudce narůstá. Bioplyn vzniká anaerobní digescí organického materiálu v bioplynových stanicích a je nejčastěji využíván k výrobě tepla a elektřiny. Stejně jako u ostatních obnovitelných zdrojů energie však existuje i v jeho případě řada nevyřešených otázek. Jednou z nejaktuálnějších je otázka dalšího využití digestátu - vedlejšího produktu jeho výroby. Zpravidla je digestát přímo aplikován jako organické hnojivo na zemědělskou půdu, objevují se však i snahy o využití jeho pevné složky (tzv. separátu) jako dalšího zdroje energie, případně jako podestýlky pro hospodářská zvířata. S tím jsou však spojeny další problémové aspekty, zejména přeprava a skladování tohoto biologicky nestabilního materiálu s vysokým podílem vody. Řešení těchto problémů by mohla představovat úprava separátu procesem biosušení, při kterém je substrát vysušován teplem vznikajícím při mikrobiálním rozkladu organické hmoty a umělou aerací.

Předmětem experimentální části této práce bylo otestovat proces biosušení na neupravených separátech z různých bioplynových stanic zemědělského typu a dále na separátu z vybrané bioplynové stanice po optimalizaci vstupního složení za účelem jejich dalšího využití jako alternativního paliva. Optimalizace substrátu před vstupem do procesu byla zaměřena na zvýšení podílu vstupní sušiny a poměru C/N smícháním s již předsušeným separátem, resp. slámou. Na základě výsledků lze konstatovat, že neupravený ani optimalizovaný separát nebyl pro účel dalšího využití jako alternativního paliva při procesu biosušení dostatečně účinně vysušen. Došlo však ke zlepšení jeho organoleptických vlastností, zejména odstranění zápachu a proto není vyloučené, že studovaný proces by mohl být lépe využitelný pro účel přepracování separátu na podestýlku pro hospodářská zvířata. Dílčím cílem práce bylo prověřit, zda může být respirační aktivita mikroorganismů přítomných v separátu vhodným ukazatelem jeho použitelnosti pro úpravu biosušením. Tento předpoklad nebyl jednoznačně potvrzen k z důvodu anomálního výsledku testů z BPS Makovraty.

Klíčová slova: Biosušení, digestát, separát, bioplyn, bioplynové stanice

Abstract

Biogas represents one of the renewable sources of energy, which has been growing on use rapidly over the past decades. Biogas is produced during anaerobic digestion of organic material in biogas plants and it is most frequently used for heat and electricity production purposes. There are still plenty of unresolved questions as it is with the other renewable sources of energy. One of the most actual topics is the question of the subsequent usage of a digestate – side product of the biogas production process. Digestate is generally applied as an organic fertilizer for farmlands, but there are tendencies to use its solid phase for another energy producing processes or eventually as farm animal bedding, which is unfortunately connected with few problematic aspects such as transportation and storing of the biologically unstable material with high amount of water in it. Answer to those challenges could be provided by the bio-drying of the digestate's solid phase – substrate is dried up by heat produced during the microbial decomposition of organic matter and artificial aeration.

The main objective of the experimental part of this thesis was to comprehensively test the process of bio-drying of unmodified solid phase of digestate from different biogas plants with agricultural origin for the purpose of using it as an alternative fuel. Furthermore the testing was conducted as well on the solid phase of digestate from chosen biogas plant after optimization of its input composition. Optimization of the substrate before the process was focused on the increasing of dry matter content in the composition and C/N ratio by mixing with pre-dried solid phase of digestate and straw respectively. Based on the received results we can summarize that neither unmodified nor optimized solid phase of digestate was bio-dried enough for the purpose of using it as an alternative fuel. However there was an improvement in its organoleptic attributes – especially elimination of the unpleasant smell and therefore it is not excluded, that the investigated process could be more easily used for transformation of the solid phase of digestate into the farm animal bedding. The partial object of this thesis was to examine, whether respiratory activity of the microorganisms present in the solid phase of digestate could be a suitable indicator of usability of the bio-drying process. This assumption wasn't positively confirmed due to anomalous test results from biogas plant Mokrovraty.

Key Words: Bio-drying, digestate, solid phase of digestate, biogas, biogas plants

1. Úvod

Neustále rostoucí spotřeba energie a nutnost nahrazovat z environmentálních i geopolitických důvodů fosilní paliva vedla v posledních dekádách k prudkému navýšení podílu obnovitelných zdrojů energie (Moriarty and Honnery, 2016). Jedním z obnovitelných zdrojů elektrické energie je bioplyn, který vzniká anaerobní digescí organického materiálu v bioplynových stanicích. Produkce bioplynu v Evropské unii stále roste a bioplyn se tak již stal nepostradatelnou součástí tzv. energetického mixu, který přispívá k energetické bezpečnosti členských států (Velis et al., 2009; Tambone et al., 2011; Piwowar et al., 2016). V prostředí ČR tvoří bioplyn čtvrtinu celkové produkce obnovitelných zdrojů energie (ČBA, 2017).

Spolu s trendem stoupajícího počtu bioplynových stanic roste také produkce digestátu – vedlejšího produktu při výrobě bioplynu, pro který je nutné hledat další využití (Pivato et al., 2016; Dahlin et al., 2017). Hlavní problémový aspekt jeho dalšího využití je logistika. Důvodem je vysoká vlhkost digestátu a s ní spojená biologická nestabilita, která způsobuje technologickou náročnost jeho přepravy a skladování. To se spolu s náklady na přepravu vstupní biomasy negativně podepisuje na celkové ekonomické bilanci procesu výroby bioplynu (Bialowiec et al., 2015).

Nejčastějším využitím je proto v současnosti přímá aplikace digestátu jako organického hnojiva v zemědělství, které má potenciál snížit spotřebu minerálních hnojiv a zajišťuje koloběh živin v prostředí (Bialowiec et al., 2015; Dahlin et al., 2017). Využití digestátu jako organického hnojiva dále nahrává skutečnost, že zdrojem organického materiálu pro výrobu bioplynu je nejčastěji odpad ze zemědělské výroby, pro bioplynové stanice je proto typická vysoká míra decentralizace v rurálních regionech (Holm-Nielsen et al., 2009). Navzdory tomu vyvstává při tomto využití celá řada problémů spojených s již zmíněnou logistikou a omezenou aplikovatelností v některých oblastech či podmínkách.

V některých případech je digestát následně mechanicky separován a vzniká tak pevná část, takzvaný separát a kapalná část, takzvaný fugát. Zatímco fugát může být využíván jako tekuté hnojivo nebo částečně vrácen zpět do technologie, separát může být použit k výrobě

hnojiv (komposty, sušené výrobky), substrátů, alternativních paliv i jako stelivo (Pančíková, 2016).

Poslední dva zmíněné způsoby využití jsou však značně komplikovány již zmíněnou vysokou vlhkostí, která přetrvává i po oddělení kapalné složky, a nebyla jim doposud věnována přílišná pozornost (Bialowiec et al., 2015).

Optimální způsob, jak lze efektivně snížit vlhkost organického substrátu, stabilizovat jej, snížit jeho objem a současně maximalizovat obsah organické složky za účelem dalšího využití odpadu by mohl být proces biosušení. Jedná se o aerobní proces, který k sušení využívá teplo vznikající při mikrobiálním rozkladu organické hmoty v kombinaci s umělým provzdušňováním substrátu. Svojí povahou je biosušení podobné kompostování, to je však zaměřeno na minimalizaci obsahu organické složky. (Velis et al., 2009). Biosušení nabírá na popularitě zejména při zpracování směsného komunálního odpadu (Adani et al., 2002; Zhang et al., 2008a; Rada et al., 2010; Tambone et al., 2011; Tom et al., 2016), v posledních letech se však objevují pokusy aplikovat proces také na kaly z čistíren odpadních vod (Winkler et al., 2013; Zhang et al., 2015). V případě aplikace na digestát z bioplynových stanic však neexistuje dostatečné množství studií (Bialowiec et al., 2015).

Tato práce si klade za cíl otestovat využitelnost procesu biosušení separátu ze zemědělských bioplynových stanic za účelem jeho dalšího využití jako paliva. Jedná se o případovou studii, jejíž dílčí cíle jsou následující:

- a. Na základě laboratorních testů biosušení separátu z různých lokalit zjistit účinnost procesu biosušení pro tento substrát. Tento dílčí cíl vychází z předpokladu, že vzhledem ke kontinuálnímu režimu provozu bioplynových stanic obsahuje výstupní substrát (který z principu není 100% proreagovaný) dostatečné množství jednoduchých organických sloučenin potřebných pro vývin metabolického tepla pro proces biosušení.
- b. Ověřit, zda respirační aktivita jednotlivých substrátů může sloužit jako ukazatel účinnosti procesu biosušení
- c. Porovnat účinnost procesu biosušení vybraného substrátu po úpravě klíčových vstupních parametrů (sušina, poměr C/N).

2. Literární rešerše

2.1. Biosušení

Biologické sušení (zkráceně biosušení) je, stejně jako kompostování, proces aerobního rozkladu organické hmoty. Účelem biosušení je vysušení a stabilizace odpadu různého původu, která vede k zvýšení energetického obsahu jeho pevné složky. Posléze může pevná složka sloužit jako palivo a stát se tak alternativním zdrojem energie. Jeho popularita v Evropě za posledních dekády rychle vzrostla v souvislosti s vývojem legislativy EU v oblasti energetického využívání odpadů a obnovitelných zdrojů energie (Velis et al., 2009; Tambone et al., 2011). Jak však poznamenává Tom et al. (2016), svoje využití může biosušení nalézt i v rozvojových zemích, které se potýkají v souvislosti se zvyšující se urbanizací a průmyslovým rozvojem s prudkým nárůstem množství odpadu a jeho akumulací. Jak totiž uvádí Wang et al. (2009) a Bialowiec et al. (2015), transformace komunálního odpadu na palivo biosušením má potenciál snížit jeho původní hmotnost o 25-35 %. Navzdory těmto skutečnostem byla v minulosti procesu biosušení věnována malá pozornost a stále není příliš probádán (Garg et al., 2009; Velis et al., 2009). Zejména z pohledu zpracování jiného, než komunálního odpadu a čistírenských kalů, kterým je věnována většina současných studií.

Celý proces biosušení lze definovat jako aerobní proces, který vede k redukci vlhkosti odpadu za současného minimálního rozkladu organických látek. Částečný aerobní rozklad zde slouží pouze jako zdroj tepla pro své sušení. Tím se biosušení liší od kompostování, které je zaměřeno na maximalizaci rozkladu organické složky. V literatuře se lze nicméně setkat s pojetím biosušení jako jedné z variant kompostování (Velis et al., 2009). Dalším rozdílem oproti kompostování v užším slova smyslu je postupně se snižující obsah vody, pouze částečná stabilizace výstupního materiálu a podstatně kratší doba zdržení, která souvisí s vyšší intenzitou provzdušňování (Rada et al., 2010; Tom et al., 2016).

Při biologickém sušení jsou využívány jak procesy mechanické, tak procesy biologické (Tambone et al., 2011). Mechanické procesy úpravy surového odpadu slouží k přípravě vstupního materiálu pro navazující biologické procesy. Jsou nezbytné z důvodu heterogenity vstupního odpadu a jeho složek (Velis et al., 2009). Mechanická úprava, kterou v případě směsného komunálního odpadu zajišťuje drcení, lisování, míchání a třídění (Velis et al.,

2010), je využívána před sušením i po něm. Při zpracování čistírenských kalů mechanickou úpravu představuje převážně míchání s vylehčující složkou, jako je např. sláma, piliny posekaná tráva nebo dřevní štěpka (Bialowiec et al., 2015), ale lze i nalézt publikace, kdy je čistírenský kal vylehčován kalem již předsušeným v rámci dané technologie (Winkler et al., 2013; Zhang et al., 2015).

2.2. Biologické procesy

Při biologických procesech dochází k aerobnímu rozkladu organických látek v odpadu. Tento rozklad slouží jako hlavní zdroj tepla pro sušení. Biologickou dekompozici zajišťuje široké společenstvo mikroorganismů, které katabolizuje organický substrát skrze biochemické reakce za účelem uspokojení nároků na svůj metabolismus a růst (Velis et al., 2009; Richard, 2004). Vzhledem k optimálním teplotám pro biosušení (35 - 65 °C) zde převažují mezofilní a termofilní mikroorganismy jako aktinomycey a sporulující bakterie (Frei et al., 2004; Navaee-Ardeh et al., 2011).

Činnosti rozkladných mikroorganismů během sušení lze rozdělit do tří fází. První fází je proliferace, pro kterou je typický prudký nárůst teploty a zároveň nejvyšší rozkladná aktivita (Adani et al., 2002; Velis et al., 2009; Tambone et al., 2011). V menších systémech dosahují teploty maxima 50 – 62 °C, ve větších pak až 70°C (Richard, 2004; Roy et al., 2006). Jak však uvádí Barrington et al. (2002), teploty nad 65°C již společenstvo mikroorganismů poškozují. Právě během proliferace dochází k neefektivnějšímu sušení (Zhao et al., 2010). V její počáteční fázi do teploty 40°C dochází k výrazné nitrifikaci amonných iontů (Avalos Ramirez et al., 2012). Fází proliferace střídá fáze exponenciálního poklesu početnosti mikroorganismů, na kterou navazuje fáze konstantního sušení, při níž teplota v bioreaktoru klesá na okolní úroveň (Velis et al., 2009; Tambone et al., 2011). Postupná stagnace rozkladných procesů společenstvem mikroorganismů je způsobena zvýšením koncentrace metabolitů, nedostatkem vody či vyčerpáním organické hmoty (Adani et al., 2002; Zhang et al., 2008a).

Rozklad organické hmoty společenstvem mikroorganismů lze popsat následující rovnicí (Mason, 2006):



2.3. Energetické využití produktu biosušení

Z pohledu energetického využití odpadu jako paliva je zásadní jeho výhřevnost. Ta je kromě nízkého obsahu vody, který hraje hlavní roli, úzce spjata také s podílem nerozložených organických látek v odpadu. Právě ty totiž mají vysokou kalorickou hodnotu (Tom et al., 2016). Její hodnota je oproti původnímu odpadu o 30 až 40 % vyšší (Wiemer and Kern, 1996 in Adani et al., 2002), a to i přesto, že část energie je spotřebována v průběhu biosušení vlivem aerobního rozkladu a mineralizace organických látek (Velis et al., 2009). Z těchto důvodů se jeví jako vhodná metoda úpravy odpadu právě biosušení, jehož hlavním produktem je odpad s nízkým podílem vlhkosti a nejvyšším možným podílem organické složky (Velis et al., 2011; Tabone et al., 2011; Zawadzka et al., 2010). Jak připomíná dále Velis et al. (2009), další výhodou biosušení je výrazné snížení přilnavosti výstupní hmoty, a tudíž lepší vlastnosti pro další mechanické zpracování.

Nízká vlhkost produktu je kromě dalšího využití rovněž žádoucí z hygienických a bezpečnostních důvodů a usnadňuje transport i skladování produktu. Jde zejména o zápach, výluhy kapalné složky, tvorba bioplynu a s tím spojené riziko spontánního vznícení (Adani et al., 2002; Tabone et al., 2011). To vše může vést k materiálním škodám, kontaminaci životního prostředí a újmám na zdraví (Yasuhara et al., 2010). Pro účel prevence těchto negativních dopadů byly vyvinuty metody zjišťující potenciální mikrobiální aktivitu odpadu založené na měření spotřeby kyslíku ve standardizovaných podmínkách (Barrena et al., 2006). Jednou z nich je tzv. index potenciální dynamické respirace (PDRI), který představuje vhodný nepřímý indikátor negativních dopadů (Scaglia et al., 2011a). Modifikací této metody vznikl tzv. index reálné dynamické respirace (RDRI), který již nevyžaduje standardizované podmínky a je vhodný pro zjištění rizika samovznícení při skladování a přepravě (Scaglia et al., 2001b).

2.4. Princip sušení a faktory ovlivňující jeho proces

Jak již bylo řečeno výše, k sušení v bioreaktoru dochází vlivem tepla, které se uvolňuje při exotermických reakcích aerobního rozkladu, a vedle toho rovněž vlivem proudění vháněného vzduchu do bioreaktoru. Vlivem zvýšení teploty dochází k postupné difuzi molekul vody na povrch částic, odkud se odpařuje a je odnášena z odpadu proudícím vzduchem spolu s ostatními unikajícími plyny. Malé množství vody může být z odpadu odstraněno jako výluh. Roli při difuzi hraje skutečnost, zda je voda kapilárně vázána, či je volná (Frei et al., 2004; Velis et al., 2009).

Vzhledem ke skutečnosti, že vodu z povrchu odnáší proud vzduchu, je míra vysušení závislá na kapacitě vzduchu pro odnos páry. Při dosažení maxima této kapacity mluvíme o bodu saturace, po němž následuje již kondenzace (Velis et al., 2009). Čím je teplota vzduchu vyšší a jeho vlhkost na vstupu do bioreaktoru nižší ve srovnání se vzduchem v odpadu, tím je větší jeho kapacita a efektivněji dochází k odnosu, a tedy i vysoušení. Pokud by byla vlhkost proudícího vzduchu vyšší než v odpadu, došlo by naopak k nežádoucí absorpci vody a nárůstu vlhkosti odpadu.

Kvalita výstupu procesu biosušení, který může být dále využit jako palivo, je ovlivněna několika faktory. Jak již bylo zmíněno, některé z faktorů souvisí se systémem aerace. Jde o směr proudění vzduchu, o jeho intenzitu, teplotu a vlhkost. Vedle toho jsou dalšími faktory doba zdržení v bioreaktoru, jeho konstrukce, případná inokulace mikrobiálním společenstvem a vlastnosti odpadu (velikost částic sušeného odpadu, obsah organické složky, pH, poměr C/N) (Velis et al, 2009; Pilnáček, 2014).

2.5. Systém aerace

2.5.1. Způsob aerace

Ve většině případů, je k sušení používáno jednosměrné provzdušňování. Jak se však ukázalo ve studiích Adani et al. (2002) a Sugni et al. (2005), jednosměrnost způsobuje v odpadu teplotní a vlhkostní gradient, což má negativní dopad na homogenitu výhřevnosti při následném využití výstupu jako paliva. Vzduch je obvykle do bioreaktoru vháněn spodním příívodem a opouští ho horním odtahem, ve výzkumech se lze však setkat i s opačným směrem proudění (Sugni et al., 2005; Velis et al., 2009).

Adani et al. (2002) došel k závěru, že, čím je intenzita aerace vyšší, tím výraznější je teplotní gradient. Při vhánění vzduchu shora, byla teplota naměřená u dna téměř dvakrát vyšší než teplota u stropu. V případě gradientu vlhkosti byla situace opačná. Nejnižší vlhkost byla dosažena v nejvyšší vrstvě, nejvyšší pak ve spodní vrstvě (Sugni et al., 2005). Gradient vlhkosti lze podle Sugni et al. (2005) vysvětlit klesající kapacitou vzduchu pro odnos páry, kdy se vzduch nasytí vodní párou již v horní vrstvě a nemůže již další páru absorbovat v nižších vrstvách. V této souvislosti autor rovněž připomíná skutečnost, že intenzita organické dekompozice, a tedy i gradient teploty, úzce souvisí s gradientem vlhkosti. Čím delší dobu je v dané vrstvě bioreaktoru vyšší vlhkost, tím déle může probíhat mikrobiální dekompozice a je tak i udržována vyšší teplota.

Jak již bylo zmíněno výše, poslední fází sušení dochází k postupnému poklesu teploty v bioreaktoru na úroveň okolní teploty. V této fázi tedy teplotní gradient zaniká, to však neplatí pro gradient vlhkosti, obsahu organických látek (měřen jako hmotnost těkavých organických látek), a tím i pro gradient výhřevnosti (Velis et al., 2009). Řešením tohoto problému se již zabývali někteří autoři (Frei et al., 2004; Shao et al., 2012; Zawadzka et al., 2010). Zatímco se Frei et al. (2004) ve studii soustředil na rovnoměrné provzdušňování pomocí perforovaných trubic prostupujících tělesem odpadu, Shao et al. (2012) a Zawadzka et al. (2010) použili pro provzdušnění metodu přetlaku a podtlaku, resp. jeho kombinaci. Právě kombinace podtlaku a přetlaku během procesu, vedla k odstranění nežádoucích gradientů (Zawadzka et al., 2010).

V případě Zhang et al. (2008a) byla testována metoda kombinovaného sušení. Ta spočívá v rozdělení sušení na 2 fáze – na fázi hydrolytickou, při které dochází za anaerobních podmínek k rozkladu buněk a na fázi samotného aerobního sušení. Tato metoda tak zajišťuje odstranění i vody, která je jinak vázána uvnitř buněk.

2.5.2. Intenzita aerace

Intenzita provzdušnění má významný vliv na teplotu, množství odnášené vlhkosti, složení mikrobiálního společenstva a míru dekompozice organické složky. Z pohledu výhřevnosti produkovaného paliva se tedy jeví jako zásadní faktor (Adani et al., 2002; Velis et al., 2009). Dle výsledků pokusu Adani et al. (2002) měla rostoucí míra intenzity aerace vliv na odstranění vlhkosti za současného zachování co nejvyššího obsahu organické složky a tedy

i výhřevnosti. Při čtyřnásobném zvýšení intenzity aerace se zde vlivem vyššího úbytku vody zvýšila výhřevnost přibližně o 40 % procent. Vedle toho Adani et al. (2002) i Avalos Ramirez et al. (2012) vysvětlují tyto výsledky také klesající rozkladnou aktivitou mikroorganismů v důsledku nedostatku vody. Podle Colomer-Mendoza et al. (2013) zvýšení aerace prokazatelně vedlo také ke snížení výsledné hmotnosti, nicméně vztah mezi zvýšením intenzity a poklesem hmotnosti u rostlinného odpadu nebyl lineární.

Nejvyšší aktivita mikroorganismů je dosažena rovněž při nejvyšší intenzitě provzdušnění, je tomu tak z důvodu vysoké dostupnosti kyslíku (Avalos Ramirez et al., 2012). K zajímavému zjištění dospěl Cai et al. (2012), který uvádí nárůst vlhkosti v souvislosti s nárůstem rozkladné aktivity mikroorganismů v počáteční fázi sušení. Vysvětluje to náhlou zvýšenou produkcí metabolitů, která ještě není dostatečně kompenzována evaporací v důsledku sušení. Vysoká intenzita aerace má i vedlejší dopad, kterým je prevence zhutnění sušeného materiálu. Dochází při ní totiž vlivem vysoké intenzity k lepší homogenizaci, podobně jako při míchání (Zhao et al., 2010).

Na druhou stranu, jak uvádí Adani et al., (2002) a Bialowiec et al., (2015), zvýšená intenzita aerace může vést vlivem dobré prostupnosti pro proudící vzduch k tomu, že ztráta tepla ochlazením převažuje nad produkcí tepla z rozkladných procesů. V takovém případě může dojít k nevratnému zastavení metabolismu mikrobiálního společenstva. To se již na sušení nepodílí a nejedná se tak o proces biosušení.

2.6. Doba zdržení v bioreaktoru

Doba zdržení odpadu v bioreaktoru je jedním z faktorů, který ovlivňuje úplnost probíhajících biochemických i fyzikálních procesů. Z pohledu využití zpracovávaného odpadu jako paliva je za účelem dosažení maximální výhřevnosti zájem o co nejkratší dobu zdržení, aby se minimalizoval úbytek jeho organické složky a nesnižovala se tak palivu energetická hodnota. Délka doby zdržení se podepisuje i na ekonomické náročnosti, proto je z důvodu co nejnižších nákladů nutné proces ukončit v momentě, kdy je dosažena vlhkost dle požadavků odběratele paliva (Navaee-Ardeh et al., 2010). Z přehledu provozovatelů zařízení na biosušení a výsledků studií v Pilnáček (2014) vyplývá, že doba zdržení se v laboratorních i provozních podmínkách pohybuje v závislosti na technologiích a vlastnostech substrátu od 7 do 30 dní.

2.7. Inokulace

Ve studiích Zhang et al. (2008b) a Navaee-Ardeh et al. (2010) byl zkoumán vliv inokulace na průběh biosušení. Zhang et al. (2008b) došel k závěru, že při jednoduchém aerobním sušení vedla inokulace, na rozdíl od kombinované metody (viz kap. 2.5.1 Způsob aerace), prokazatelně k rychlejšímu započatí rozkladu a navíc se urychlil i rozklad hůře rozložitelných organických látek. Inokulované odpady vykazovaly nižší vlhkost a obsah organické složky. Ve studii Navaee-Ardeh et al. (2010) byl zkoumán vliv inokulace recyklovaným kalem z výroby papíru. Ten měl prokazatelně pozitivní vliv na početnost mezofilních i termofilních mikroorganismů, vedl k dosažení vyšších teplot v bioreaktoru a zlepšil aeraci.

2.8. Chemické a fyzikální vlastnosti odpadu

Aby mohlo dojít k efektivnímu sušení, je nutné, aby mohl odpadem proudit vzduch, z toho důvodu je důležitá poréznost odpadu, která se odvíjí od velikosti částic, a dále jeho vlhkost. Poréznost roste spolu s velikostí částic. Z toho důvodu je vhodné před samotné sušení zařadit mechanickou fázi, při které je odpad upraven do požadované velikosti částic (Velis et al., 2009). Pokud je prostupnost pro vzduch tělesem odpadu malá a odpad je nehomogenní, mohou se vytvářet vzduchové cesty, které vedou k tvorbě anaerobních oblastí a neefektivnímu sušení. To má v konečném důsledku vliv na rozdíly ve výhřevnosti paliva (Frei et al., 2004).

Z pohledu obsahu organické složky se jeví jako zásadní složitost molekul. Ze studií Adani et al. (2002) a Tambone et al. (2011) vyplývá, že sušení probíhá rychleji v případě vyššího počátečního obsahu snadno rozložitelných organických látek. Pro organický rozklad se jeví jako optimální neutrální pH (Navaee-Ardeh et al., 2010). Vliv poměru C/N na rozklad organických látek a dosaženou teplotu zkoumali Larsen et McCartney (2000). Zjistili, že s rostoucím poměrem intenzita rozkladu klesá, a tím pádem i dosažená teplota. Jako optimální uvádí poměr C/N 18 až 30.

V řadě studií byly za účelem zlepšení podmínek pro biosušení provedeny pokusy s úpravou chemických a fyzikálních vlastností vstupního substrátu. Bialowiec et al., (2015) smíchal separát z digestátu s dřevní štěpkou. Ve studiích Winkler et al., (2013) a Zhang et al., (2015) byl vstupním substrátem kal z čistírny komunálních odpadních vod, který byl před

procesem biosušení smíchán s již vysušeným původním substrátem, čímž se opět zvýšil obsah sušiny.

2.9. Další možnosti využití procesu biosušení v odpadovém hospodářství

Jak již bylo několikrát zmíněno výše, proces biosušení se ve světě již běžně používá pro zpracování směsného komunálního odpadu (Adani et al., 2002; Velis et al., 2009; Wang et al., 2009; Tambone et al., 2011; Tom et al., 2016), jehož produkce v souvislosti s rostoucí spotřebou společnosti stále stoupá společně s rostoucími energetickými nároky. Je proto pochopitelné, že právě pro tento druh odpadu je proces biosušení nejlépe popsán a komerčně využíván. Vedle toho se však biosušení jeví jako proces vhodný ke zpracování i jiných druhů odpadu – zejména kalů z čistíren odpadních vod (Winkler et al., 2013; Zhang et al., 2015) či digestátu z bioplynových stanic, které nebyly dosud příliš zkoumány (Bialowiec et al., 2015).

2.10. Bioplyn a vedlejší produkt jeho výroby – digestát

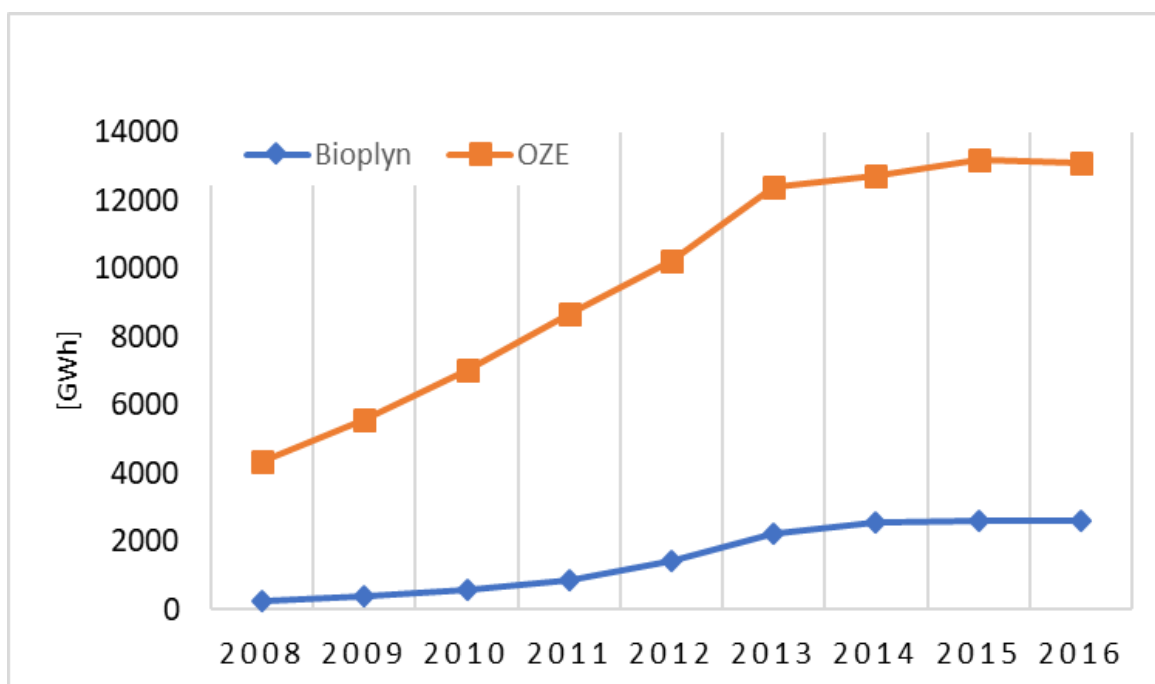
2.10.1. Bioplyn

Bioplyn je směs plynů vznikající jako produkt biochemických reakcí při anaerobní digesci organických materiálů. Jeho hlavní složkou je metan, oxid uhličitý a voda (Piwowar et al., 2016). Nejvyužívanějším organickým substrátem je odpad ze zemědělské činnosti, dále je to komunální odpad a odpad z čistíren odpadních vod (Pivato et al., 2016). Technologie je vhodná na zpracování zemědělského odpadu z rostlinné i živočišné produkce (Piwowar et al., 2016). Vzhledem k původu substrátu je pro stanice na výrobu bioplynu typická vysoká decentralizace (Holm-Nielsen et al., 2009).

Bioplynové stanice mohou ve venkovských oblastech představovat dostupný zdroj obnovitelné energie a zároveň přispět ke snížení zátěže životního prostředí způsobené zemědělskou činností (Prochnow et al., 2009; Chen et al., 2012). Kromě environmentálního a energetického aspektu zde však také mohou zlepšit sociální a ekonomické podmínky obyvatel (Song et al., 2014). Tato technologie nakládání s odpady zejména ze zemědělské činnosti totiž umožňuje jednak produkci obnovitelné energie z bioplynu a dále produkci organických hnojiv, která mohou nahradit hnojiva minerální (Bialowiec et al., 2015; Dahlin et al., 2017). Jak zmiňuje Piwowar et al. (2016), obnovitelná

energie z bioplynu je při současné závislosti na fosilních palivech také vhodným nástrojem, jak zvýšit energetickou bezpečnost země.

O rostoucí popularitě bioplynových stanic svědčí jejich zvyšující se počet v Evropě. Meziroční nárůst v produkci energie z bioplynu byl v rámci EU mezi lety 2011 a 2012 téměř 16 % (Pivato et al., 2016). Popularitu si získává zejména v Německu, kde se za 23 let zvýšil počet bioplynových stanic ze 140 na 10800 (Lebuhn et al., 2014; Dahlin et al., 2017). Ze zemí bývalého východního bloku si velkého potenciálu bioplynu všímají zejména v Polsku, kde je mu věnována řada studií (Iglinski et al., 2012; Piwowar et al., 2016). Rostoucí trend počtu bioplynových stanic platí i pro ČR, tempo růstu je zde však úzce spjato s výkupní cenou elektřiny z bioplynu, která je ve srovnání s předchozími lety nižší (web 1). Růst proto stagnuje, jak je patrné z Grafu č. 1. Ke konci roku 2016 bylo u nás v provozu 567 licencovaných bioplynových stanic, které tvoří 25 % energie z obnovitelných zdrojů (web 2)



Graf č. 1: Vývoj produkce elektrické energie z bioplynu a obnovitelných zdrojů (OZE) v ČR v letech 2008-2016 (web 2).

Jedním z hlavních problémů produkce bioplynu je logistika. Vzdálenosti mezi většími bioplynovými stanicemi (s výkonem vyšším než 0,5 MW) jsou velké a přeprava obou zásadních substrátů – vstupní biomasy a zbývajícího digestátu, je náročná (Bialowiec et al.,

2015). Digestát lze definovat jako zbytek po fermentačním procesu vznikající anaerobní fermentací při výrobě bioplynu v bioplynových stanicích.

Jako jedno z řešení logistického problému se nabízí přímé použití digestátu z bioplynových stanic jako hnojiva. Digestát je totiž organické hnojivo bohaté na živiny, které vrací zpátky do prostředí a může tak snížit aplikaci minerálních hnojiv a zlepšit půdní vlastnosti (Pivato et al., 2016). Obsahuje základní rostlinné živiny jako dusík (3 - 14 % obsah v sušině), fosfor (0,2 - 3,5 % obsah v sušině) a draslík (1,9 – 4,3 % obsah v sušině), jejichž poměr je určen původní surovinou (Nkoa, 2014). Díky obsahu ne zcela biologicky odbouratelných látek jako celulóza a lignin je pro půdu zdrojem organického uhlíku. Pozitivní dopad tohoto substrátu jako půdního a rostlinného hnojiva byl již prokázán (Garg et al., 2005; Zaid et al., 2005). Digestát může představovat vhodnou alternativu také k rašelině, která je ve velkém množství využívána v zahradnictví. Těžba rašeliny způsobuje mnoho environmentálních problémů a zásoby rašeliny, kterou nelze považovat za obnovitelný zdroj, rychle ubývají (Dahlin et al., 2017).

I v případě použití digestátu jako hnojiva však existuje celá řada problémů. Jednak může dojít k předávkování hnojivy, zejména pokud na zemědělských plochách dochází i k organickému hnojení ze živočišné výroby. To může vést k narušení poměru mezi vodou a vzduchem v půdě a ke kontaminaci půdy a podzemní vody dusíkem. Jsou-li proto pěstební plochy v nejbližším okolí malé ve srovnání s produkcí digestátu, vyžaduje jeho použití další náklady na jeho transport a skladování, což může vést k záporným číslům v ekonomické bilanci (Rehl et Müller, 2011; Dahlin et al., 2017). Použitelnost digestátu jako hnojiva je rovněž omezena v zimních měsících a v oblastech ohrožených eutrofizací. Dalším problémem pro životní prostředí při použití nestabilizovaného digestátu je emise NH_3 a jiných zapáchajících látek. Podle Badran (2011) může být přibližně 70 % vstupujícího dusíku emitováno do okolí. Jak uvádí Pötsch et al. (2004) in Bialowiec et al. (2015), dochází k tomuto jevu zejména, pokud má digestát pH vyšší než 8. Případně problematický může být i obsah patogenních organismů a organických komplexů, které mohou negativně ovlivnit půdní biotu (Teglia et al., 2010). Komplikací je i skladování digestátu mezi jeho výrobou a vyvezením na pole, které vyžaduje stavbu zvláštních nádrží (Voca et al., 2005).

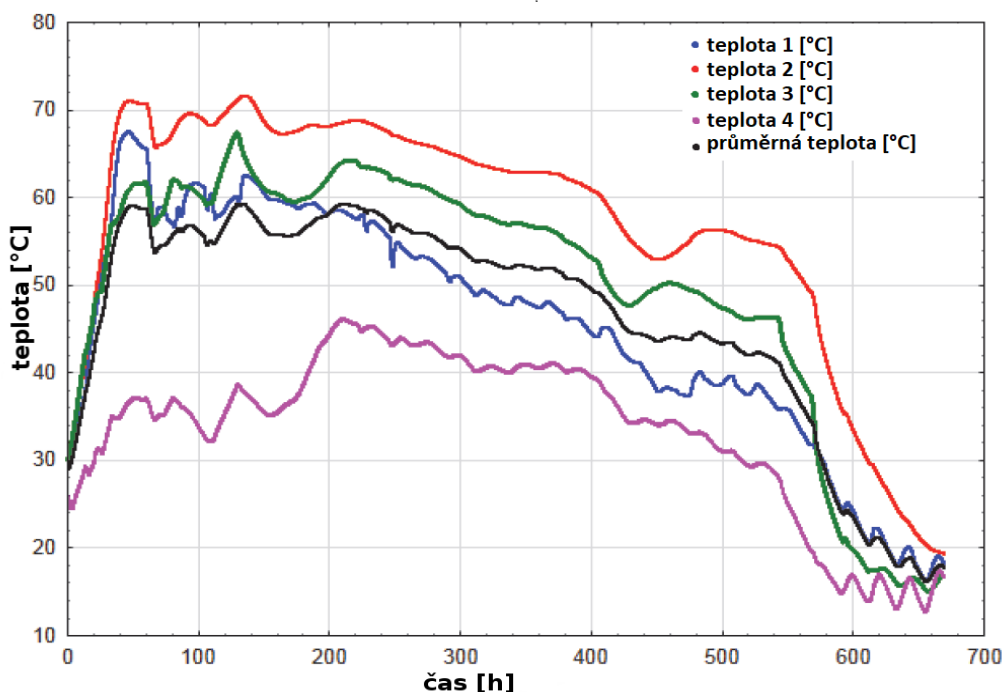
2.11. Biosušení digestátu

Jak uvádí Pivato et al. (2016) a Dahlin et al. (2017), se zvyšujícím se počtem bioplynových stanic jde ruku v ruce výrazný nárůst množství digestátu, pro který je nutné hledat další využití. Průměrná bioplynová stanice v SRN o výkonu 500kW vyprodukuje ročně zhruba 7600 m³ digestátu. Objem digestátu a jeho vlastnosti se však mohou velmi měnit v závislosti na vstupním substrátu (Dahlin et al., 2017).

Nejrozšířenějším způsobem fermentace je v Evropě tzv. mokrá fermentace. Jejím produktem je digestát s vysokou vlhkostí a obsahem sušiny pouhých 3 - 8 %. Nejjednodušším způsobem dehydratace digestátu je jeho separace na tekutou (tzv. fugát) a tuhou frakci (tzv. separát) použitím odstředivek a pásových lisů. Tím je zvýšen obsah sušiny v separátu na 20 – 30 % (ČBA, 2017). Tím však nelze zajistit dostatečné snížení vlhkosti. Skladování i transport digestátu v surovém stavu je vlivem vysoké vlhkosti značně komplikován. K jeho reálnému využití jako hnojiva i paliva je tedy nutné jeho vysušení, kterým lze předejít řadě logistických problémů. Jako jedním z řešení těchto problémů se jeví proces biosušení (Bialowiec et al., 2015).

Biosušením digestátu, resp. separátu z bioplynových stanic se ve své studii zabývá Bialowiec et al., (2015). Jak autoři uvádí, jedná se o první známou studii zaměřenou na digestát. Před vložením digestátu do bioreaktoru byl surový digestát dehydratován na šroubovém odlučovači, tím se separovala kapalná fáze. Procesu biosušení v bioreaktoru podléhal po dobu 4 týdnů pouze separát o vlhkosti 78 %, který byl navíc smíchán s dřevní štěpkou v poměru 45:55. Během procesu byla měřena teplota a spotřeba energie. Provozdušňování bylo jednosměrné. Vzduch byl do bioreaktoru vháněn spodním vstupem a odváděn horním odtahem. Podle očekávání byl pozorován teplotní gradient, a to po celou dobu experimentu (viz Graf č. 2). Nejnižší teploty byly naměřeny u dna bioreaktoru, nejvyšší naopak u stropu (maximum 72 °C). Tento jev vysvětluje Bialowiec et al., (2015) stejně jako Adani et al., (2002) postupným snižováním intenzity provzdušnění směrem vzhůru v tělese substrátu. V nižších vrstvách nebyl kladen proudícímu vzduchu takový odpor a navzdory dobrému okysličení, které vede k intenzivnějším rozkladným procesům, a tedy i tvorbě tepla, zde převažovalo ochlazení substrátu konvekcí proudícího vzduchu. Z obrázku 2 je patrné, že teplota se v bioreaktoru měnila podle fáze procesu. V prvních 10 dnech byla průměrná teplota 55 až 60 °C, v následujících dvou týdnech byl pozorován pokles na 40 °C, v posledním

týdnu se bioreaktor ochladil na 20 °C. Téměř stejný teplotní trend včetně gradientu byl zaznamenán ve studiích Tom et al., (2016), Adani et al., (2002), Tambone et al., (2011) věnovaným biosušení směsného komunálního odpadu. Teplotní průběh ve zmíněných studiích odpovídá fázím mikrobiální aktivity popsaných v kap. 2.2. Nejstrmější nárůst byl stejně jako v Bialowiec et al., (2015) pozorován v prvních dvou dnech procesu, kdy bylo dosaženo teploty 70 °C. Strmý nárůst lze vysvětlit proliferační fází mikroorganismů, při které je mikrobiální aktivita nejvyšší, dochází k intenzivnímu rozkladu organické hmoty, a tedy i nejvyšší produkci tepla (Velis et al., 2009; Tom et al., 2016). Množství tepelné energie generované v průběhu této fáze se podle autorů pohybuje v rozmezí 17,8 až 24,7 kJ (Mason, 2006; Bialowiec et al., 2015).

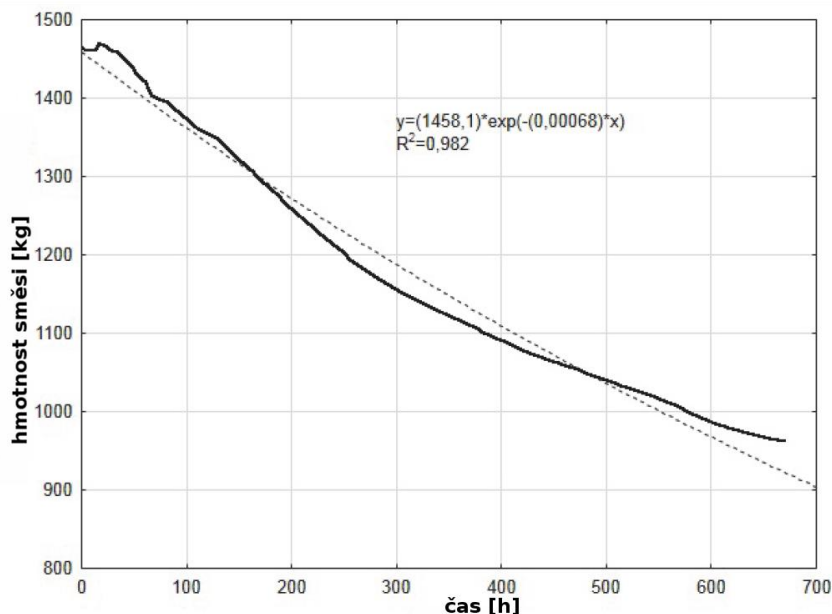


Graf č. 2: Průběh teploty v bioreaktoru během sušení (Bialowiec et al., 2015).

Z Grafu č. 2 je dále patrné, že se rozklad organické hmoty po přibližně 10 dnech začal postupně zpomalovat a v posledním týdnu byl zaznamenán rapidní pokles teploty v bioreaktoru. Autoři to vysvětlují znatelným zhoršením podmínek pro život mikroorganismů v důsledku velmi malé vlhkosti, která způsobila zpomalení jejich metabolismu a následnou mineralizaci organických látek (Bialowiec et al., 2015). Stejná situace byla popsána v Adani et al., (2002) po 285 hodinách biosušení.

Při biosušení byl pozorován výrazný úbytek hmotnosti vstupní směsi (viz Graf č. 3). Rychlost úbytku byla 0,99 kg / h. Výsledkem biosušení byl substrát o hmotnosti 76 % z původní hmotnosti separátu a 34 % z původní hmotnosti směsi separátu a dřevní štěpky. Rychlost úbytku hmotnosti je v případě separátu nesrovnatelně vyšší než v případě biosušení komunálního odpadu v Tom et al., (2016). Přesto je výsledný úbytek hmotnosti v případě komunálního odpadu vyšší - výstupní substrát vážil 66 % z původní hmotnosti. Jak uvádí dále Tom et al., (2016), úbytek hmotnosti 34 % je nižší než skutečná ztráta vody evaporací, to vysvětluje kondenzací vody, která se vracela zpátky do bioreaktoru.

Výsledky v Bialowiec et al., (2015) dále ukázaly velmi příznivou energetickou bilanci. Celková spotřeba elektrické energie činila necelých 15 kWh, což odpovídá spotřebě 0,03 kWh na snížení hmotnosti o 1 kg. Pokud budeme vycházet ze současné průměrné ceny elektrické energie – cca 4 Kč za 1 kWh (energie123.cz), dojdeme k závěru, že náklad na snížení hmotnosti o 1 kg je 12 haléřů.



Graf č. 3: Závislost úbytku hmotnosti směsi separátu a dřevní štěpky na čase v průběhu biosušení (Bialowiec et al., 2015).

3. Experimentální část

3.1. Použité přístroje

Název přístroje:

Analytické váhy – Sartorius Extend

Sušicí pec – Lab Memmert UFB 500

Žíhací pec – MLW – veb elektro bad frankhausen

pH metr - Schott instruments lab 850

Třepačka – LT3 s.reich

oscilační mlýn - Retsch MM 400

Elementární analyzátor - EA1108

3.2. Použité chemikálie

Název chemikálie:

NaOH (hydroxid sodný)

HCl (kyselina chlorovodíková)

BaCl₂ (chlorid barnatý)

fenolftalein

methylovanž

Na₂B₄O₇ (tetraboritan sodný)

3.3. Odběr separátu na bioplynových stanicích

Odběry vzorků na jednotlivé testy biosušení (cykly) probíhaly na třech bioplynových stanicích - Krásná Hora, Kosova Hora a Mokrovraty. Jedná se o bioplynové stanice zemědělského typu, tím bylo zajištěno srovnatelné složení separátu. Na všech odběrných místech se vzorek odebíral stejným způsobem.

Jednalo se o čerstvý separát, který byl odebírán z několika míst hromady v prostoru separátoru. Na odebírání byla použita hliníková lopatka. Na převoz vzorku byl využit 30 litrový plastový sud. Tato kapacita odpovídala množství separátu, které bylo potřeba na naplnění bioreaktoru.

Celkem takto proběhlo 10 odběrů v časovém období od 1. 11. 2015 až 30. 6. 2016.

3.4. Popis jednotlivých bioplynových stanic (BPS)

3.4.1. Kosova Hora

Provoz BPS Kosova Hora byl zahájen v roce 2011. Součástí stanice je fermentor s příjmovou jímkou na kejdu, siláž a senáž, plynojem s kapacitou až 600m³, provozní budova s kogenerační jednotkou, trafostanice a dvě jímky na digestát s kapacitou až 11 168 m³.

Fermentor jsou dvě betonové nádrže (kruh v kruhu) uzavřené stropem. Objem obou nádrží je 5 191m³. Obsahuje míchadla, která tento materiál promíchávají. Doba zdržení substrátu (kejdy a siláže nebo senáže) je 70 dní (web 3).



Obr. 1: Fermentor bioplynová stanice Kosova Hora (web 4).

3.4.2. Krásná Hora

Zahájení provozu v roce 2008. Jako vstupní surovina se zde zpracovává hovězí kejda a kukuřičná siláž o celkovém objemu 33 070 tun ročně. Fermentor je stejného typu jako v Kosově Hoře a to dvoustupňový (kruh v kruhu). Technologický proces je totožný jako u předchozí BPS.



Obr. 2: Bioplynová stanice Krásná Hora (web 5).

3.4.3. Mokrovraty

Bioplynová stanice byla uvedena do provozu v roce 2011. Zpracovává se zde kejda, silážovaná kukuřice, travní senáž a hnůj. Doba zdržení je zde stejná jako u předchozích bioplynových stanic (web 6).



Obr. 3: Bioplynová stanice Mokrovraty (web 6).

3.5. Popis laboratorního bioreaktoru a nastavené podmínky

Experiment probíhal v modelovém bioreaktoru na biosušení, který byl zkonstruován v rámci řešení diplomové práce (Pilnáček, 2014) zaměřené na biosušení směsného komunálního odpadu. Součástí této sestavy bylo dmychadlo Secoh SLL 50, biofiltr pro eliminaci zápachu, membránový plynoměr multirange BK G4 BO a PC.

Hlavní část bioreaktoru tvoří PVC válec vysoký 120cm s průměrem 40cm. Tato nádoba slouží pro ukládání separátu pro vysušení. Separát ode dna oddělovalo síto s velikostí oka 3 mm, aby docházelo k rozptýlení vzduchu po celém dně. Pro ještě lepší rozptýlení vzduchu v celém separátu byly do bioreaktoru respektive do separátu vloženy čtyři perforované trubice, které směřovaly ke spodnímu otvoru na přívod vzduchu. Pro odvod případně vznikajícího výluhu byl na dně vytvořen otvor s odvodem do vzduchotěsné Erlenmayerovy baňky. Nade dnem byl umístěn otvor pro přívod vzduchu, ve víku válce pak otvor pro odvod vzduchu. Pro zajištění tepelné izolace byl bioreaktor obalen 10 cm silnou vrstvou minerální vlny.

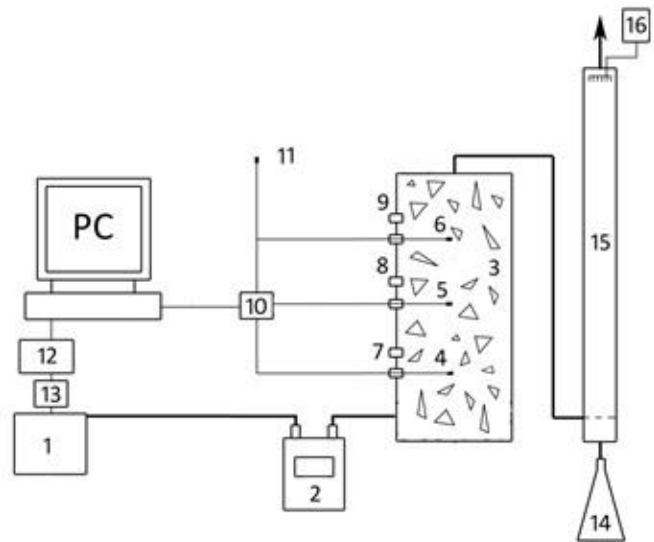
Ve stěně bioreaktoru ve třech výškových hladinách byly umístěny otvory pro sondy, které měřily teplotu v určitých výškách uvnitř bioreaktoru. Byly použity sondy Papouch THT 2. Čtvrtá sonda byla umístěna mimo bioreaktor pro měření teploty a vlhkosti vzduchu v laboratoři. Mezi dmychadlem a bioreaktorovou komorou byl připojen membránový plynoměr multirange BK G4 BO pro měření celkového objemu prošlého vzduchu. Dmychadlo bylo ovládáno přes USB I/O modul Papouch Quido 2/2 a relé.

Součástí bioreaktoru byl biofiltr, který byl zařazen, aby eliminoval zápach při experimentu v laboratoři. Biofiltr obsahoval rašelinu, keramzit, kůru, kompost a vhodné bakteriální inokulum dodané firmou Dekonta, a.s.

Po celou dobu experimentu byla automaticky zaznamenávána teplota ve třech vrstvách bioreaktoru. Byla zaznamenávána také teplota a vlhkost vzduchu v laboratoři. Interval zaznamenávání byl 5 sekund. Pro záznam byl použit měřicí software Wix od firmy Papouch.

Ke zpracování získaných dat byl použit software Microsoft excel a statistický program R.

- 1 Zdroj vzduchu
- 2 Plynoměr
- 3 Sušený odpad
- 4 Teplotní sonda
- 5 Teplotní sonda
- 6 Teplotní sonda
- 7 Port pro odběr vzorků
- 8 Port pro odběr vzorků
- 9 Port pro odběr vzorků
- 10 PC konvertor
- 11 Teplotní a vlhkostní sonda (laboratoř)
- 12 USB I/O modul pro spínání zdrojů vzduchu
- 13 Relé pro spínání zdroje vzduchu
- 14 Erlenmayerova baňka pro odvod kondenzátu
- 15 Náplň biofiltru (kompost, rašelina, kůra)
- 16 Živný roztok pro biofiltr



Obr. 4: Schéma bioreaktoru na biosušení (Pilnáček, 2014).



Obr. 5: Bioreaktor na biosušení separátu (Pilnáček, 2014).

3.6. Spouštění jednotlivých experimentů

3.6.1. Popis spouštění jednotlivých experimentálních cyklů

Odběr vzorku na bioplynových stanicích vždy probíhal den předcházející spuštění nového cyklu. Prvních 6 experimentálních cyklů sloužilo ke studiu procesu biosušení u předem neupraveného separátu z celkem tří bioplynových stanic zemědělského typu (BPS). První dva vzorky pocházely z BPS Kosova Hora, následující tři vzorky byly odebrány v BPS Krásná Hora a poslední vzorek pocházel z BPS Mokrovraty. Aby byla zajištěna reprezentativnost vzorku, byl separát odebírán z více míst hromady pod separátorem a vzorek následně zhomogenizován. Množství odebraného vzorku bylo 30 kg. Před plněním byl ještě sud převážen k zjištění přesné hmotnosti separátu, který byl vložen do bioreaktoru. Plnění bioreaktoru probíhalo následujícím způsobem: bioreaktor byl pomyslně rozdělen na tři vrstvy (spodní, střední, horní). Při tvorbě jednotlivých vrstev bylo odebráno 3x 100 g vzorku z dané části pro stanovení vstupní sušiny a dále 200 g vzorku pro doplňující analýzy - respirace, ztráta žíháním, stanovení pH a poměr C/N. Před vlastní analýzou (prováděla se hromadně po ukončení testů biosušení) byly vzorky uchovány v mrazničce. Po naplnění celého bioreaktoru separátem byla na horní vrstvu umístěna vrstva slámy o výšce cca 10 cm pro zachycování kondenzační vody. Po hermetickém uzavření bioreaktoru byly do tří otvorů vloženy sondy na měření teploty v bioreaktoru.

Před spuštěním bylo změřeno množství vzduchu, které proteče bioreaktorem za 1 minutu. Stejně měření bylo prováděno po ukončení pokusu. Naměřené hodnoty byly mezi sebou porovnány, zda nedošlo k výrazné změně průtoku vzduchu v průběhu experimentu. Při spuštění a po ukončení byla dále zaznamenána přesná hodnota na membránovém plynoměru multirange BK G4 BO pro zjištění přesného množství vzduchu, které proteče bioreaktorem za celou dobu pokusu (viz Tabulka č. 1). Spuštění dmyhadla bylo nastaveno v 15 minutovém intervalu a následné provzdušňování trvalo 2 minuty. Nastavení vycházelo ze závěrů práce Pilnáček, (2014), kde bylo studováno sušení komunální odpadu. Celková spotřeba vzduchu byla odvozena ze spotřeby experimentálního cyklu s nejvyšší dosaženou účinností vysušení (27,54%). Fixní způsob provzdušňování byl zvolen záměrně, aby bylo možné porovnávat výsledky jednotlivých cyklů. Po ukončení celého cyklu bylo odebráno opět 3 x 100g vzorků z každé vrstvy pro stanovení výstupních parametrů.

Tabulka č. 1 znázorňuje minutový průtok vzduchu na počátku a na konci cyklu a celkový objem vzduchu prošlý bioreaktorem za jeden experimentální cyklus.

Tabulka č. 1 Průtok vzduchu bioreaktorem.

Cyklus	Průtok vzduchu na začátku cyklu (l/min)	Průtok vzduchu na konci cyklu (l/min)	Celkový objem vzduchu v daném cyklu (m ³)
Kosova Hora 1	71	73	106,87
Kosova Hora 2	72	75	109,48
Krásná Hora 1	72	73	101,86
Krásná Hora 2	73	72	110,69
Krásná Hora 3	72	71	106,53
Mokrovraty	74	71	111,73
Krásná Hora s úpravou sušiny 1	78	76	105,63
Krásná Hora s úpravou sušiny 2	75	73	104,63
Krásná Hora s úpravou sušiny a C/N 1	76	79	100,79
Krásná Hora s úpravou sušiny a C/N 2	75	73	100,27

3.6.2. Porovnání účinnosti procesu při optimalizaci vybraných vstupních parametrů

Separát z BPS Krásná Hora byl vybrán pro následující experimenty, jejichž cílem bylo porovnat účinnost procesu po optimalizaci klíčových vstupních parametrů jako je obsah sušiny a poměr prvků C/N.

Při úpravě poměru C/N pomocí vylehčovacích materiálů (zvolili jsme v zemědělském provozu běžně dostupnou slámu) dochází zároveň ke zvýšení obsahu sušiny celé vsádky a nebylo by tedy zřejmé, který z těchto parametrů má na případnou změnu účinnosti hlavní vliv. V první sadě experimentů jsme proto uměle navýšili pouze obsah vstupní sušiny, a to přimícháním separátu předem vysušeného v laboratorní sušárně. V praxi je tento postup realizovatelný při použití již vysušeného materiálu z procesu biosušení.

3.6.3. Popis spouštění experimentálních cyklů po optimalizaci vstupní sušiny substrátu

Pokus probíhal celkem ve dvou opakováních (dva po sobě jdoucí experimentální cykly za stejných podmínek). Polovina odebraného vzorku separátu byla předsušena v elektrické sušárně po dobu 24 hodin při teplotě 105°C. Poté byl materiál přimíchán do původního substrátu v objemovém poměru 1:1. Po důkladné homogenizaci na plachtě byl touto směsí plněn bioreaktor. Jako v předchozích případech byly odebrány vzorky pro vstupní analýzy. Následující postup byl totožný, jako u předchozích experimentů.

3.6.4. Popis spouštění experimentálních cyklů po optimalizaci vstupní sušiny a poměru C/N substrátu

Postup experimentů byl naprosto totožný s popisem uvedeným v předchozí kapitole. Pouze místo vysušeného substrátu byla pro navýšení vstupní sušiny a zároveň poměru C/N použita sláma v objemovém poměru 1:1.

3.7. Stanovení vstupních a výstupních veličin

3.7.1. Stanovení sušiny

Postup:

Vzhledem k charakteru materiálu byla použita navážka pro stanovení sušiny řádově 100g. Pro tento účel byly zhotoveny dostatečně velké misky s hliníkové fólie. Stanovení probíhalo ve třech paralelách na vstupu a ve třech paralelách pro každou ze tří vrstev (horní, střední a spodní) na výstupu každého experimentu. Po zaznamenání navážky byly hliníkové misky se vzorky sušeny po dobu 5 hodin při teplotě 105°C. Po ukončení sušení byly misky umístěné do exikátoru, kde se nechaly vychladnout, poté byly zváženy.

Výpočet:

$$DR = 100 * Md/Mw$$

DR – podíl sušiny v procentech

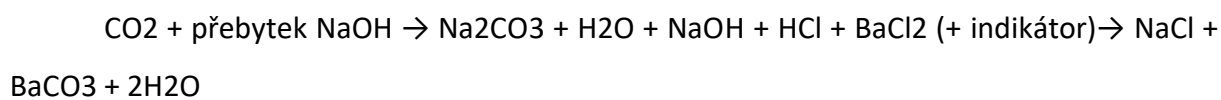
Md – hmotnost vysušeného vzorku

Mw – navážka vzorku

3.7.2. Respirace

Princip:

V roztoku hydroxidu sodného (NaOH) se absorbuje oxid uhličitý (CO₂), který produkují organismy při aerobním rozkladu organické hmoty. Množství nezreagovaného hydroxidu sodného se stanoví titrační kyselinou chlorovodíkovou (HCl).

**Postup:**

Do skleněných lahví se vzduchotěsným uzávěrem, bylo naváženo 10g vzorku (separátu) a vložen kalíšek s 3ml 1 N NaOH. Takto byly vždy připraveny tři vzorky pro každý běh, poté byly ještě založené tři slepé vzorky (BLANKY). To znamenalo vložení kalíšku s 3ml 1 N NaOH do sklenic bez vzorku. Tyto vzorky byly ponechány 24 hodin inkubovat při laboratorní teplotě. Doba inkubace 24h byla zvolena na základě testů zaměřených cíleně na optimalizaci metody pro tento účel. Při použití delšího času (jako je toho například u stanovení respirace půdních mikrokosmů) již došlo k vyčerpání hydroxidu a znemožnění odečtu správného výsledku. Po ukončení inkubace bylo zbývající NaOH kvantitativně převedeno do kádinky. Dále se přidalo 3,5 ml BaCl₂ a fenolftaleinu. Titrování probíhalo do bodu ekvivalence kyselinou chlorovodíkovou. Poté byla zaznamenána přesná spotřeba HCl.

Výpočet:

$$R = (A - B) \cdot c_{\text{HCl}} \cdot 6005 / (\text{navážka} \cdot \text{sušina} \cdot \text{do inkubace})$$

A – spotřeba HCl na titraci blanku v ml

B – spotřeba HCl na titraci vzorku v ml

cHCl – přesná koncentrace roztoku v HCl v mol⁻¹l = (10,489/ faktor HCl) * 0,1

6005 – Přepočtový koeficient

Stanovení faktoru HCl:**Postup:**

Do kádinky bylo naváženo přesně 0,200g tetraboritanu sodného a přilito 20ml destilované vody. Vše se nechalo rozmíchat na míchadle. Poté bylo přidáno několik kapek methylovaného a titrovalo se kyselinou chlorovodíkovou do oranžového zbarvení. Pro výpočet faktoru HCl byla využita přesná spotřeba HCl při titraci.

3.7.3. Ztráta žiháním**Postup:**

Stanovení probíhalo ve třech paralelách. Nejdříve byly žihací kelímky vysušeny po dobu 3 hodin při teplotě 105°C v sušící peci a poté byly kelímky umístěny do exikátoru, kde byly ponechány vychladnout. Po vychladnutí byly kelímky zváženy na analytických vahách s přesností 0,001g a hodnoty byly zaznamenány. Dále bylo do kelímků vloženo 2 g (přesná hodnota bylo zapsána) vzorku a byly ponechány sušit dvanáct hodin při teplotě 60°C v sušící peci. Po této době byly opět kelímky zváženy a umístěny na 5 hodin do žihací pece při teplotě 550°C. Po ukončení žihání byly vzorky znovu umístěny do exikátoru a nechány vychladnout, poté byly zváženy na analytických vahách.

Výpočet:

$$z\check{z} = \frac{m_{k0} - m_{k1}}{m_{k0} - m_k} * 100 \quad (\%)$$

m_k – hmotnost prázdného kelímku

m_{k0} – hmotnost kelímku se vzorkem před žiháním

m_{k1} – hmotnost kelímku se vzorkem po žihání

3.7.4. Stanovení pH půdy ve vodném výluhu

Postup:

Měření probíhalo vždy ve třech paralelách. Ke stanovení pH je používán vodný výluh poměru 1:5 (hm.). Odebráno bylo tedy 10 g separátu, vloženo do PE lahvičky a zalito 50ml deionizované vody. Takto připravené vzorky byly umístěny na třepačku, kde byly třepány 1 hodinu, a poté byly nechány přes noc odstát. Po odstátí byl každý vzorek filtrován přes filtrační papír. Z tohoto výluhu byla již pomocí pH metru změřena přesná hodnota pH separátu.

3.7.5. Poměr C/N

Princip:

Metoda je založena na kompletní a okamžité oxidaci vzorku zážehovým spalováním, které přemění všechny organické a anorganické látky ve spaliny. Výsledné spaliny procházejí přes redukční pec a jsou vtaženy do chromatografické kolony nosným plynem Heliem, kde jsou separovány a detekovány tepelnou vodivostí reaktoru, který dává výstupní signál, který je úměrný koncentraci jednotlivých složek.

Postup:

Měření probíhalo vždy ve třech paralelách. Po 30g vzorku bylo vloženo na 6 hodin do sušící pece při teplotě 60°C. Dále bylo každých 30g vzorku rozděleno po 10g. Toto množství bylo vždy vkládáno do kapslí, které jsou součástí oscilačního mlýnu. Po upevnění kapslí byl nechán každý vzorek 30 sekund mlít, takto rozdrčené vzorky byly zabalené do cínových mističek, které jsou umístěny uvnitř automatického dávkovacího kolotoče, který je kontinuálně proplachován heliem a kuličky byly vhazovány v nastaveném intervalu do spalovacího reaktoru (vertikálně umístěná křemenná trubice), kde je 1020 °C. Když byly vzorky vpraveny do pece, proud helia je dočasně obohacován o čistý kyslík a vzorek se zažehne v atmosféře kyslíku. V těchto podmínkách i tepelně odolné látky zcela oxidují. Spaliny procházejí přes měď, odstraní se zbytek kyslíku a dojde k redukci oxidů dusíku na elementární dusík. Výsledná směs je změřena na chromatografické koloně, kde byly jednotlivé části odděleny a eluovány na dusík N₂, oxid uhličitý (CO₂), vodu a oxid siřičitý (SO₂) za pomoci Thermal Conductivity Detector, který přeposlal signál do pc se softwarem EAGER100.

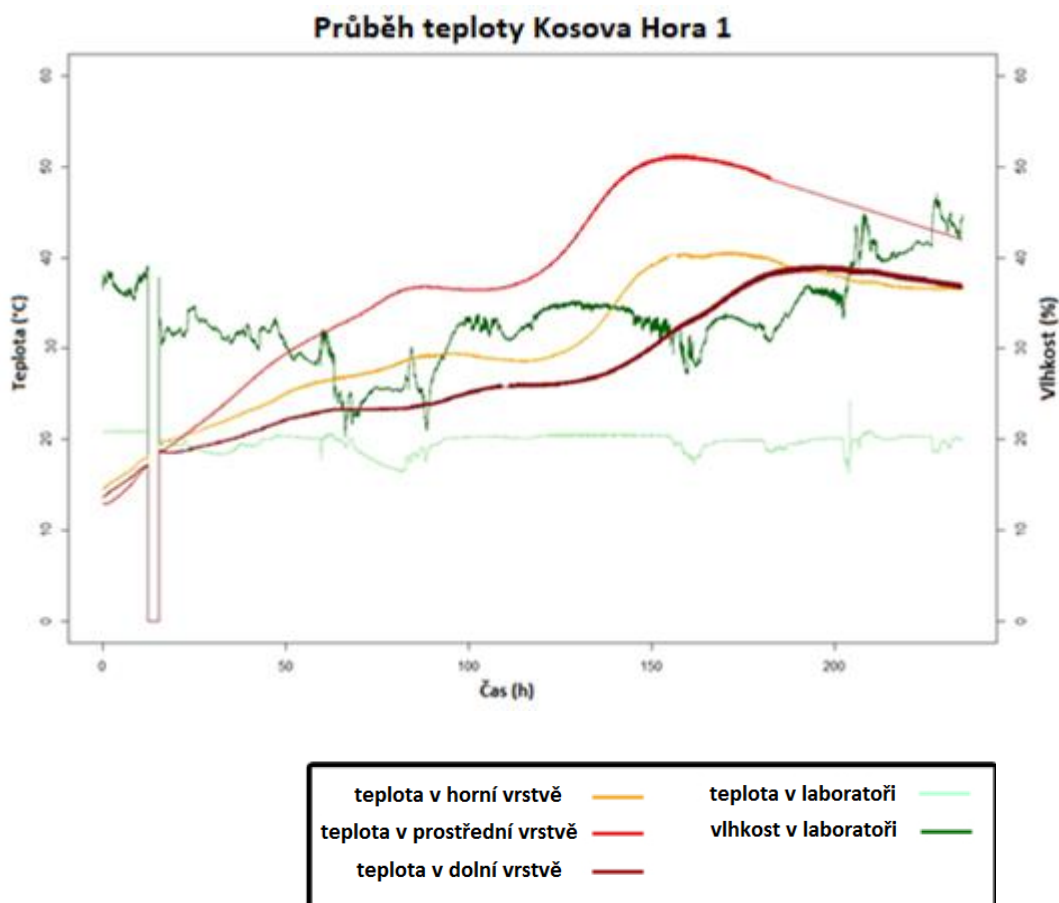
4. Výsledky

4.1. Vývoj teploty v bioreaktoru u jednotlivých experimentálních cyklů

4.1.1. Vývoj teploty v bioreaktoru u cyklů se samotným separátem

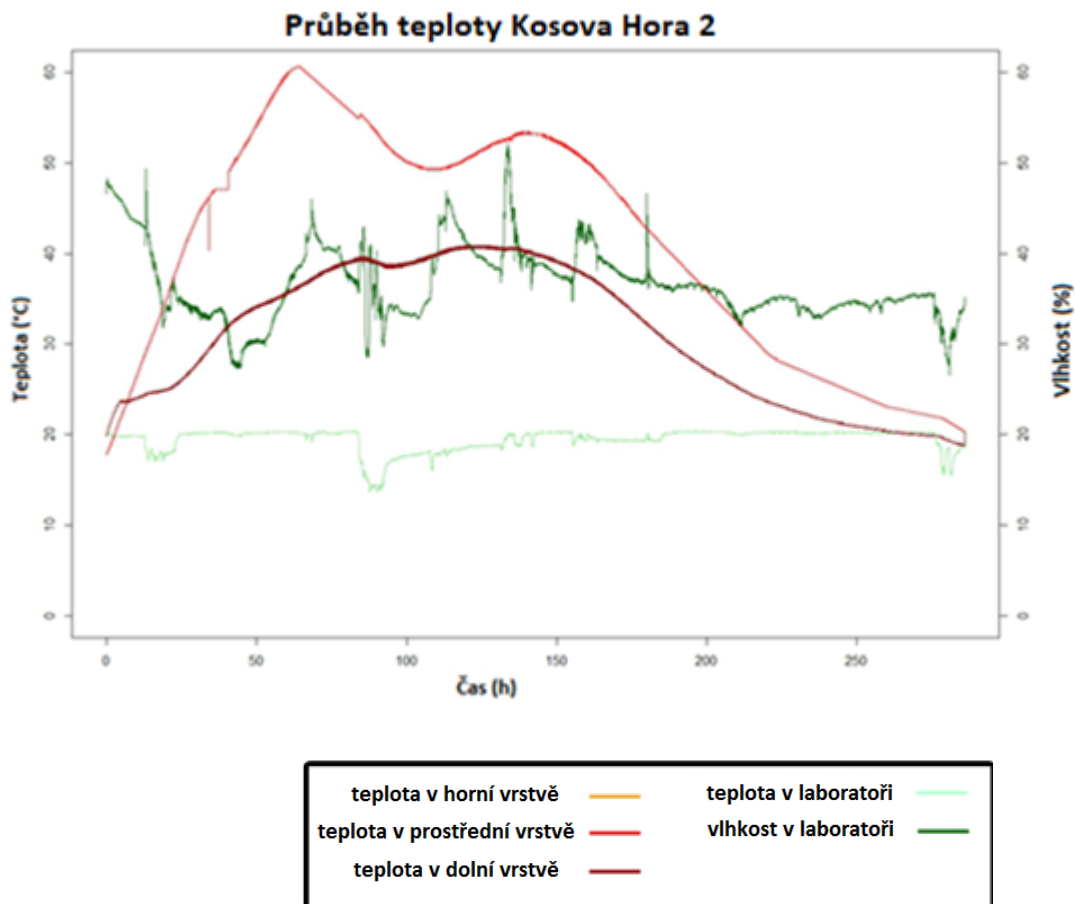
4.1.1.1. Kosova Hora

Graf č. 4 ukazuje nárůst teploty v prvním cyklu u separátu z BPS Kosova hora. Teplota začala stoupat již od samého začátku. Od 80. hodiny došlo ve všech vrstvách k zastavení růstu a dokonce k malému poklesu, ale poté opět teplota v bioreaktoru začala prudce stoupat a zastavila se na hodnotě 51,3°C, což byla maximální teplota, které bylo dosaženo ve střední vrstvě. Od šestého dne začala teplota pouze klesat. V horní vrstvě bylo dosaženo maximální teploty 40,6°C a ve spodní 39,2°C.



Graf č. 4: Průběh teploty u cyklu Kosova Hora 1.

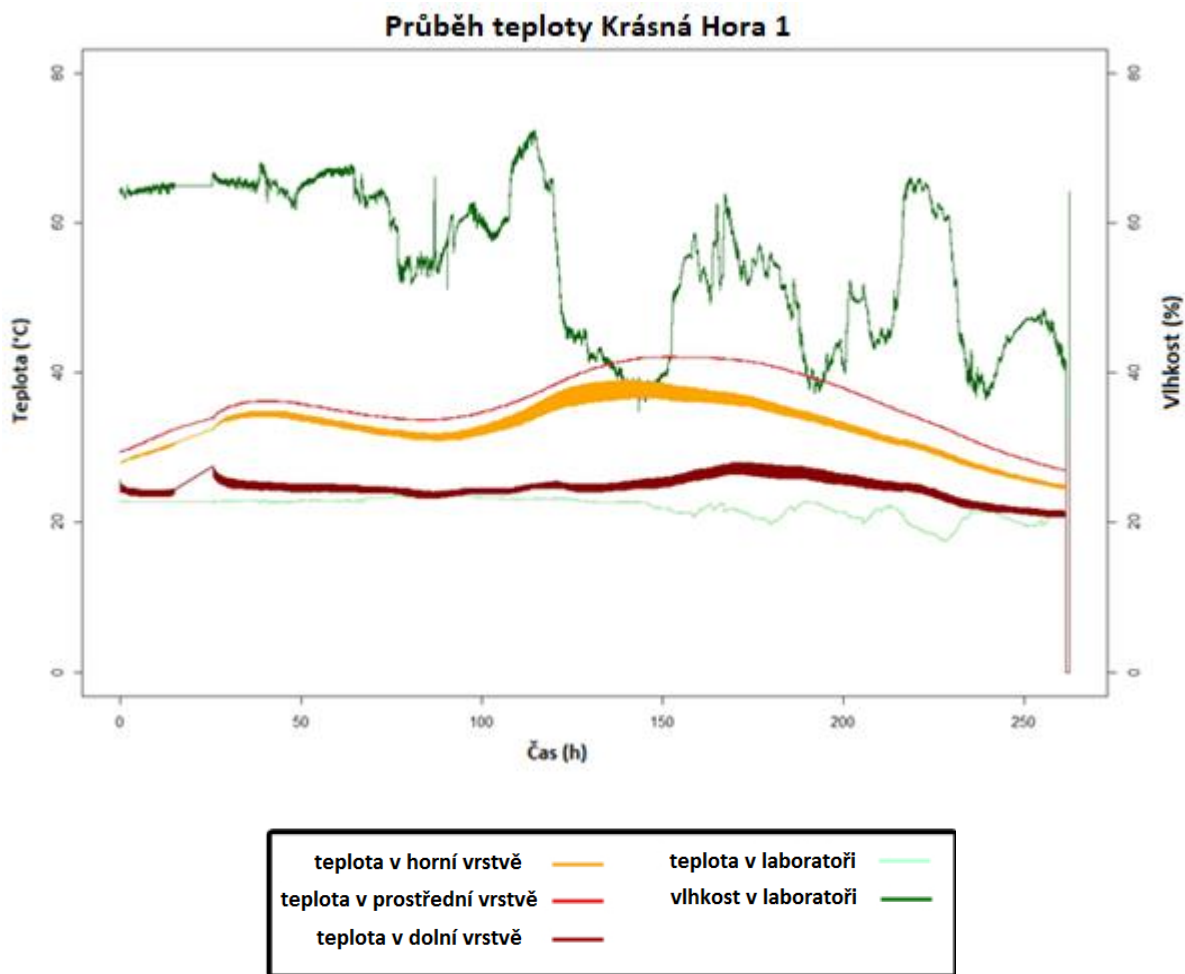
Na Grafu č. 5 je popsán průběh teploty 2. cyklu z BPS Kosova Hora. Na grafu je vidět, že teplota ve střední vrstvě prudce stoupala hned od samého začátku a svého maxima dosáhla již po 2,5 dne od spuštění cyklu. Poté teplota klesala a zastavila se těsně pod hranici 50°C a opět na chvíli začala stoupat, ale maximum 60,7°C, kterého bylo dosaženo ze začátku, nebylo překonáno. Od 150. hodiny cyklu se teplota v celém bioreaktoru postupně snižovala. Ve spodní vrstvě bylo dosaženo 40,9°C. Teplota v horní vrstvě v tomto běhu nebyla měřena z technických důvodů, které nastaly hned na začátku.



Graf č. 5: Průběh teploty u cyklu Kosova Hora 2.

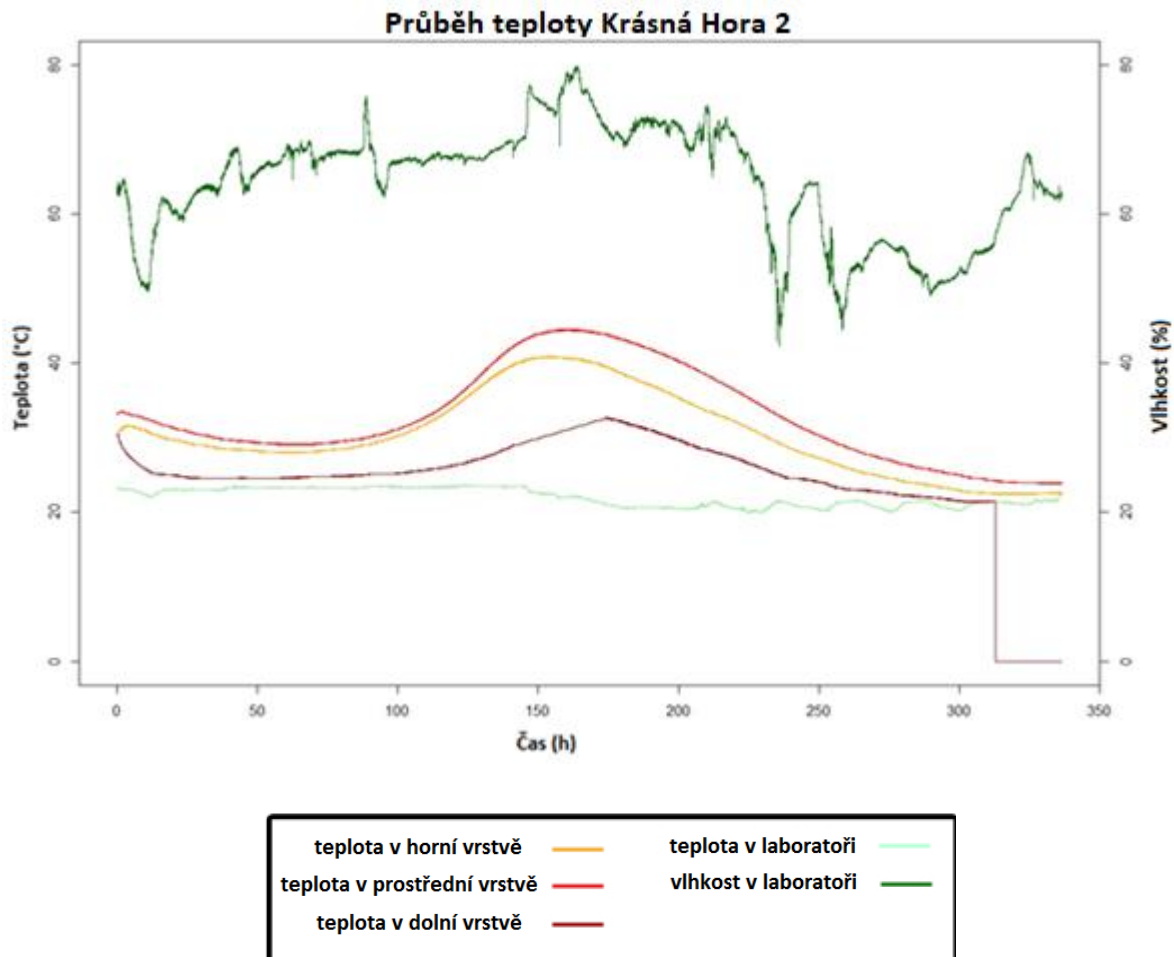
4.1.1.2. Krásná Hora

Graf č. 6 znázorňuje vývoj teploty u 1. cyklu z BPS Krásná Hora. Zde nárůst teploty nebyl příliš velký. Maximální hodnota byla dosažena ve střední vrstvě 42,2°C o trochu nižší byla dosažena v horní vrstvě a to 39°C. Ve spodní vrstvě byla naměřena maximální teplota 30,6°C.



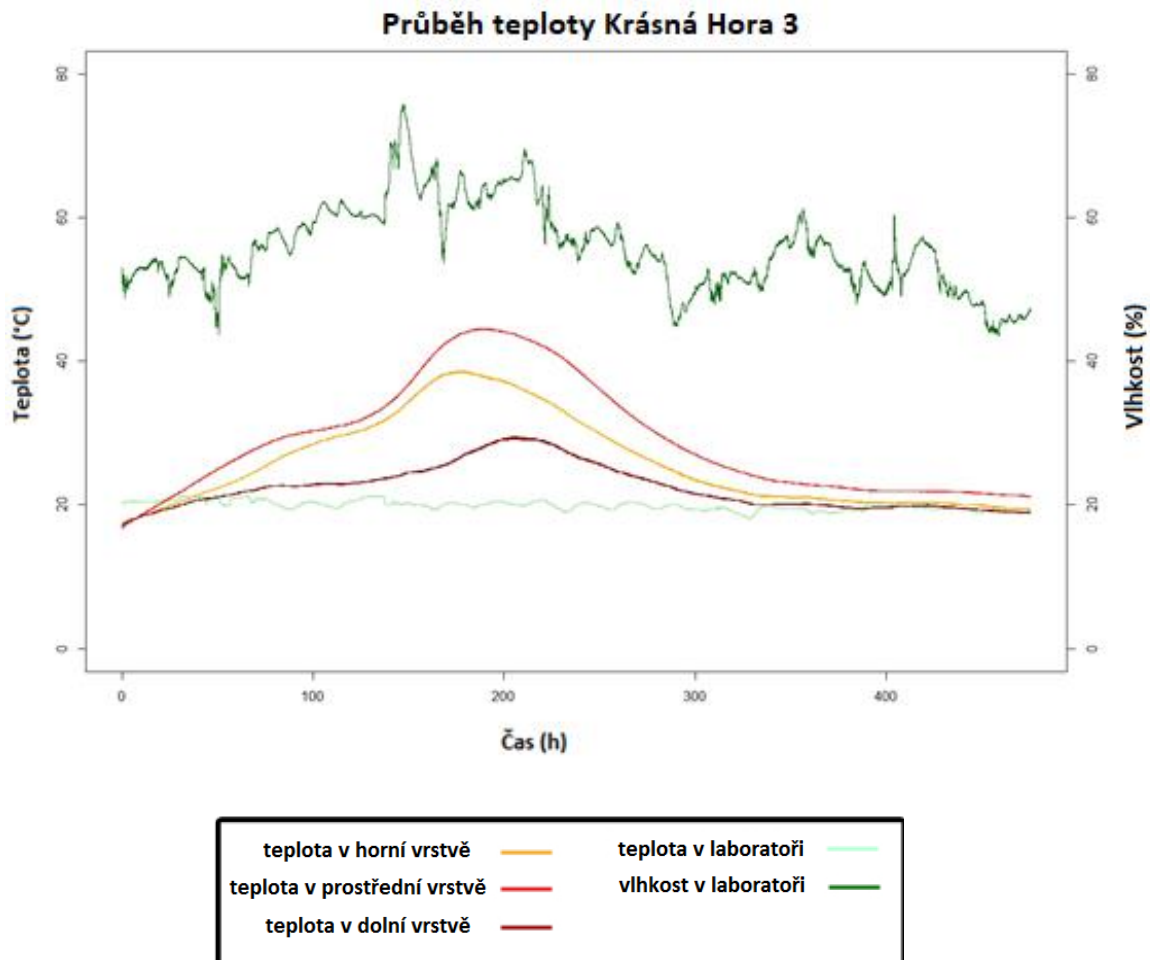
Graf č. 6: Průběh teploty u cyklu Krásná Hora 1.

Graf č. 7 popisuje 2. cyklus z BPS Krásná Hora. Průběh teploty je velmi podobný, jako u prvního cyklu. Maximální teploty 44,5°C bylo dosaženo 6. den ve střední vrstvě. Od této doby již teplota začala pozvolna klesat v celém bioreaktoru. V horní vrstvě bylo dosaženo 41°C a ve spodní 32,7°C.



Graf č. 7: Průběh teploty u cyklu Krásná Hora 2.

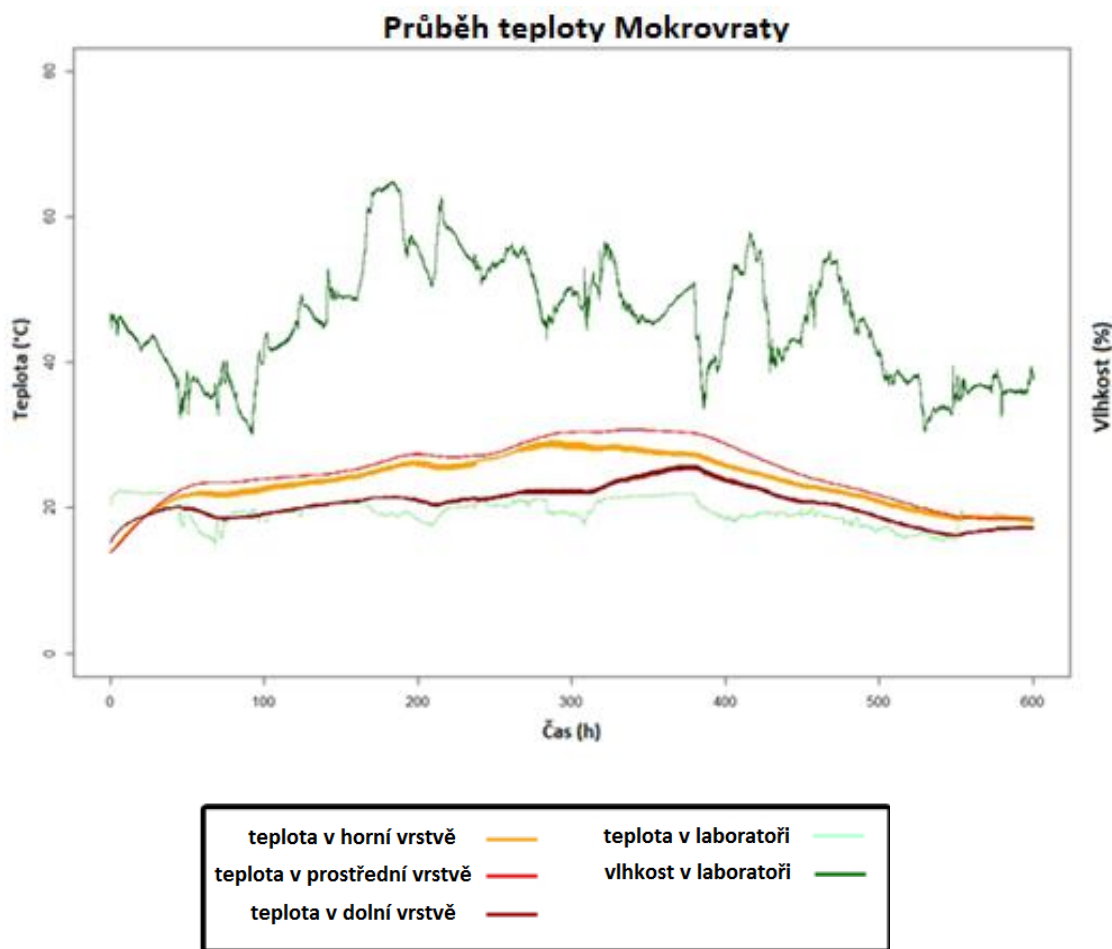
Graf č. 8 popisuje průběh teploty ve 3. cyklu z BPS Krásná Hora. Všechny cykly z Krásné Hory měly velmi podobný průběh. Od začátku začala teplota pozvolna stoupat ve všech vrstvách. Jako ve druhém cyklu i zde byla dosažená maximální teplota 44,5°C ve střední vrstvě. Této teploty bylo dosaženo až 7. den od spuštění běhu. Ve spodní vrstvě byla maximální teplota 29,5°C a v horní vrstvě 38,6°C.



Graf č. 8: Průběh teploty u cyklu Krásná Hora 3.

4.1.1.3. Mokrovraty

Graf č. 9 znázorňuje průběh teploty u cyklu z BPS Mokrovraty. U tohoto separátu bylo dosaženo nejvyšší maximální teploty. Nedošlo k významnému nárůstu teploty v žádné vrstvě v bioreaktoru. Maximální teplota 30,8°C byla dosažena ve střední vrstvě. Ve spodní vrstvě se teplota zastavila na hodnotě 25,9°C a v horní vrstvě na 29,3°C.

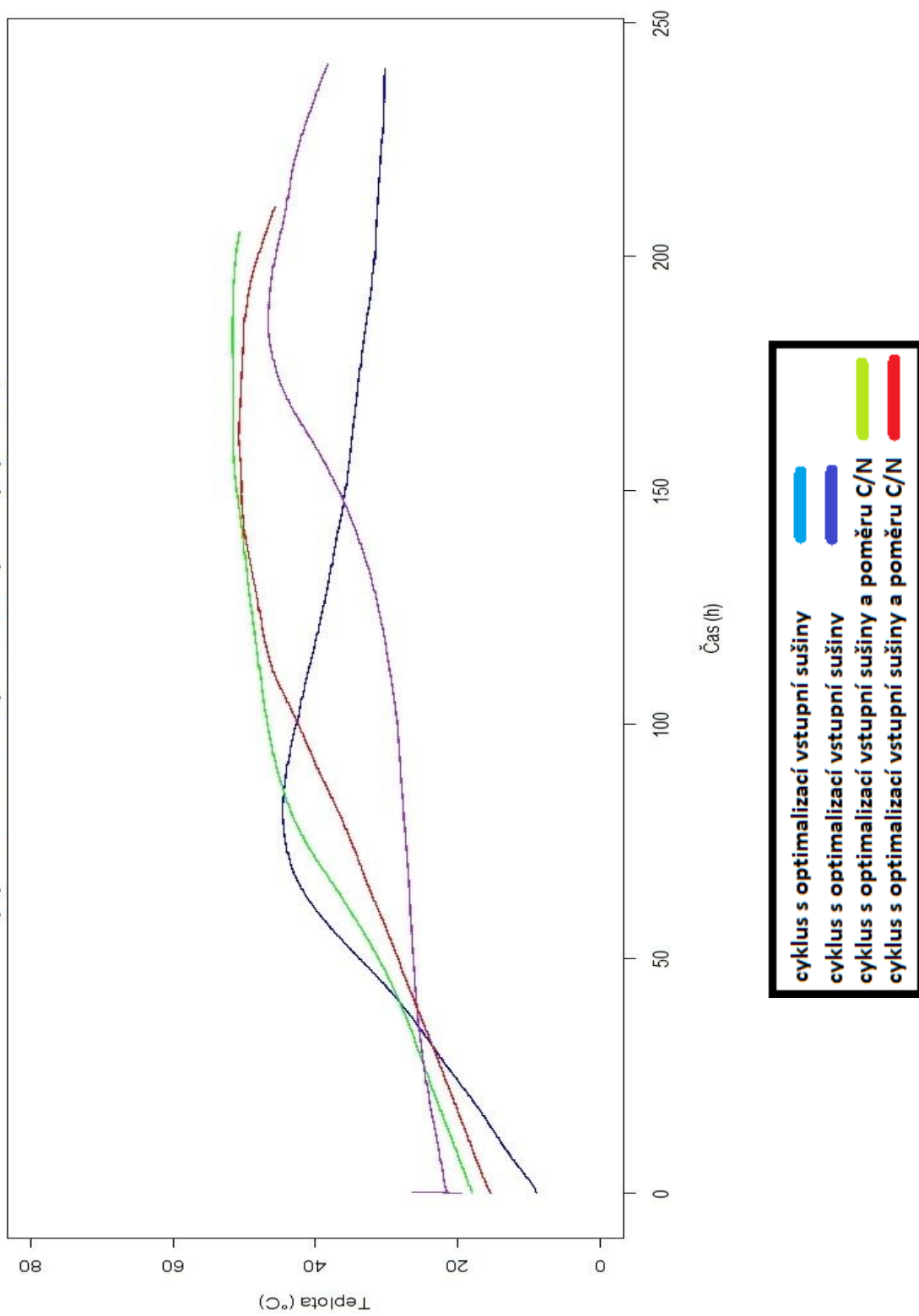


Graf č. 9: Průběh teploty u cyklu Mokrovraty.

4.1.2. Vývoj teploty v bioreaktoru u cyklů s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N substrátu

Graf č. 10 znázorňuje průběh teplot ve střední vrstvě u cyklů z BPS Krásná Hora, kde došlo k optimalizaci vstupní sušiny (modrá a fialová křivka) a k optimalizaci vstupní sušiny a zároveň k optimalizaci C/N (zelená a červená křivka). Při optimalizaci pouze vstupní sušiny (modrá křivka) byl nárůst teploty rychlejší než u optimalizace vstupní sušiny a poměru C/N, ale maximální teplota byla nižší u obou cyklů s optimalizací pouze vstupní sušiny. U druhého cyklu (fialová křivka) s optimalizací vstupní sušiny došlo k nárůstu teploty až po šesti dnech. Byla zde dosažena maximální teplota 46,3 °C u prvního cyklu bylo dosaženo 40,4°C. Oba průběhy teplot v bioreaktoru u cyklů s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N byly velmi podobné. Nárůst teploty začal již 2,5 dne od začátku cyklů. Maximální teploty bylo dosaženo 6. den od spuštění. U těchto cyklů byla dosažena vyšší maximální teplota než u předchozích s optimalizací pouze vstupní sušiny. U prvního cyklu s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N byla maximální teplota 51,7 °C a druhého cyklu bylo dosaženo teploty 50,8 °C.

Cykly z BPS Krásná Hora s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N



Graf č. 9: Průběhy teplot u cyklů z Krásné Hory s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N.

4.2. Účinnost vysušení separátu

Tabulka č. 2 znázorňuje procentuální část vstupní, výstupní sušiny a účinnost vysušení u běhů, kde byl jako vstupní surovinou neupravený separát.

Tabulka č. 2: Vstupní /výstupní sušina a účinnost vysušení bez optimalizace vstupního substrátu.

Cyklus	Vstupní sušina (%)	Výstupní sušina - spodní vrstva (%)	Výstupní sušina - střední vrstva (%)	Výstupní sušina - horní vrstva (%)	Účinnost vysušení - spodní vrstva (%)	Účinnost vysušení - střední vrstva (%)	Účinnost vysušení - horní vrstva (%)
Kosova Hora 1	29,27 ± 0,01	34,63 ± 0,02	31,48 ± 0,01	33,71 ± 0,06	5,36	2,21	4,44
Kosova Hora 2	33,08 ± 0,02	40,33 ± 0,02	41,37 ± 0,02	31,39 ± 0,06	7,25	8,29	-1,69
Krásná Hora 1	22,52 ± 0,05	22,51 ± 0,02	23,52 ± 0,01	24,82 ± 0,01	-0,01	1,01	2,29
Krásná Hora 2	24,94 ± 0,01	24,77 ± 0,01	25,42 ± 0,01	28,81 ± 0,01	-0,17	0,48	3,87
Krásná Hora 3	33,69 ± 0,06	22,86 ± 0,01	23,89 ± 0,01	28,83 ± 0,01	-10,83	-9,81	-4,86
Mokrovraty	20,25 ± 0,01	19,69 ± 0,01	20,38 ± 0,02	23,72 ± 0,01	-0,56	0,13	3,47

Tabulka č. 3 znázorňuje procentuální část vstupní, výstupní sušiny a míru vysušení u běhu s optimalizací vstupní sušiny pomocí předsušeného separátu.

Tabulka č. 3: Vstupní /výstupní sušina a účinnost vysušení s optimalizací sušiny z BPS Krásná Hora.

Cyklus	Vstupní sušina (%)	Výstupní sušina - spodní vrstva (%)	Výstupní sušina - střední vrstva (%)	Výstupní sušina - horní vrstva (%)	Účinnost vysušení - spodní vrstva (%)	Účinnost vysušení - střední vrstva (%)	Účinnost vysušení - horní vrstva (%)
Krásná Hora s úpravou sušiny 1	37,72 ± 0,03	39,73 ± 0,02	35,98 ± 0,02	40,06 ± 0,02	2,01	-1,74	2,34
Krásná Hora s úpravou sušiny 2	34,25 ± 0,04	34,30 ± 0,02	31,98 ± 0,03	28,32 ± 0,02	0,05	-2,27	-5,93

Tabulka č. 4 znázorňuje procentuální část vstupní, výstupní sušiny a míru vysušení u běhu s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N pomocí slámy.

Tabulka č. 4: Vstupní /výstupní sušina a účinnost vysušení s optimalizací sušiny a poměru C/N z BPS Krásná Hora.

Cyklus	Vstupní sušina (%)	Výstupní sušina - spodní vrstva (%)	Výstupní sušina - střední vrstva (%)	Výstupní sušina - horní vrstva (%)	Účinnost vysušení - spodní vrstva (%)	Účinnost vysušení - střední vrstva (%)	Účinnost vysušení - horní vrstva (%)
Krásná Hora s úpravou sušiny a C/N 1	31,52 ± 0,06	22,49 ± 0,04	20,15 ± 0,04	21,13 ± 0,02	-9,03	-11,37	-10,39
Krásná Hora s úpravou sušiny a C/N 2	28,74 ± 0,01	15,14 ± 0,02	21,63 ± 0,02	15,16 ± 0,03	-13,60	-7,11	-13,58

4.3. Vstupní veličiny a jejich vliv na maximální teplotu separátu

Tabulka č. 5 uvádí hodnoty vstupních sledovaných parametrů a maximální teploty dosažené u jednotlivých cyklů, kde byl vstupní substrát neupravený separát.

Tabulka č. 5: Maximální teploty a vstupní parametry u cyklů bez optimalizace vstupního substrátu.

Cyklus	Max. teplota - Spodní vrstva (°C)	Max. teplota - Střední vrstva (°C)	Max. teplota - Horní vrstva (°C)	pH vstupního vzorku	C/N poměr	Ztráta žíháním vstupního vzorku	Respirace
Kosová Hora 1	39,2	51,3	40,6	8,19 ± 0,00	23,53 ± 1,93	85,67% ± 0,01	24,1 ± 0,2
Kosová Hora 2	40,9	60,7	*	8,02 ± 0,07	19,51 ± 1,61	83,95% ± 0,01	27,5 ± 1,7
Krásná Hora 1	30,6	42,2	39	8,50 ± 0,05	23,33 ± 0,89	87,21% ± 0,00	19,9 ± 1,6
Krásná Hora 2	32,7	44,5	41	8,17 ± 0,07	24,23 ± 2,13	87,77% ± 0,01	12,2 ± 1,1
Krásná Hora 3	29,5	44,5	38,6	8,20 ± 0,02	25,07 ± 1,13	88,31% ± 0,00	12,3 ± 0,4
Mokrovraty	25,9	30,8	29,3	8,94 ± 0,13	25,29 ± 2,30	76,79% ± 0,02	26,9 ± 1,1

* z technických důvodů nezměřeno

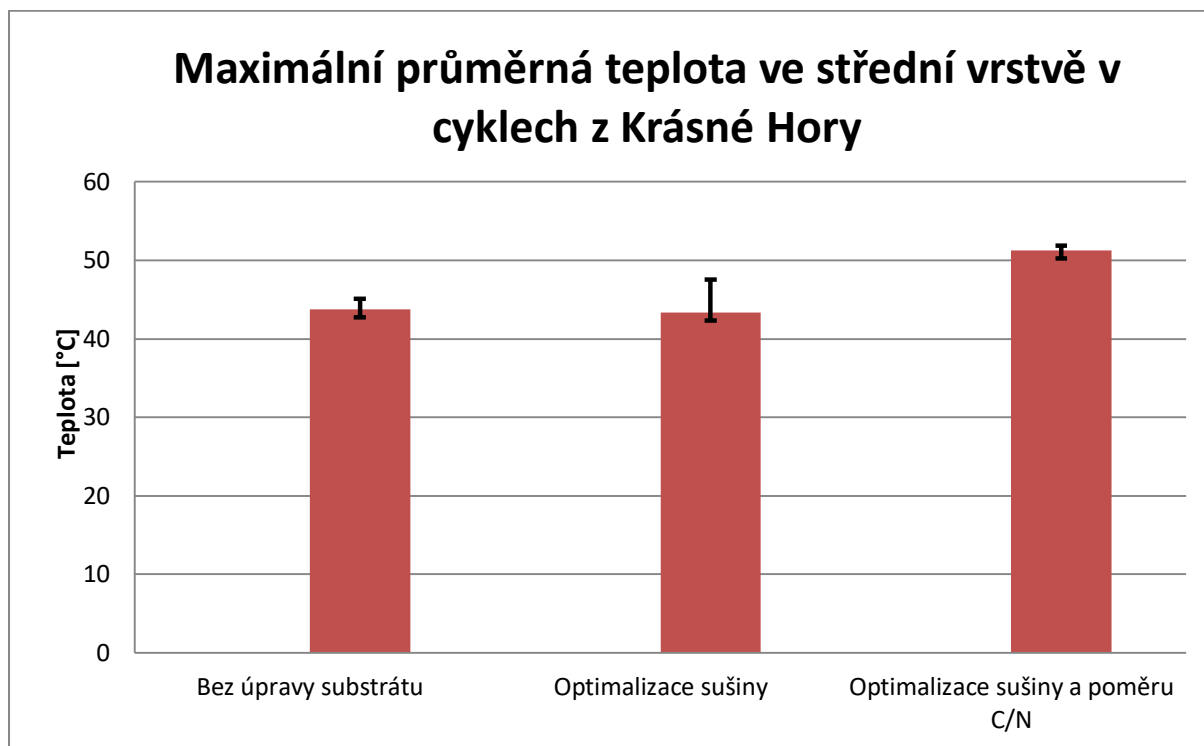
Tabulka č. 6 uvádí hodnoty vstupních sledovaných parametrů a maximální teploty dosažené u jednotlivých cyklů, kde došlo k optimalizaci sušiny a poměru C/N u vstupního substrátu.

Tabulka č. 6: Maximální teploty a vstupní parametry u cyklů s optimalizací vstupní sušiny a s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N z BPS Krásná Hora.

Cyklus	Max. teplota - Spodní vrstva (°C)	Max. teplota - Střední vrstva (°C)	Max. teplota - Horní vrstva (°C)	pH vstupního vzorku	C/N poměr	Ztráta žíháním vstupního vzorku
Krásná Hora s úpravou sušiny 1	34,1	40,4	32,8	8,78 ± 0,03	21,82 ± 0,49	95,31% ± 0,01
Krásná Hora s úpravou sušiny 2	34,3	46,3	*	8,84 ± 0,04	20,93 ± 0,26	93,91% ± 0,02
Krásná Hora s úpravou sušiny a C/N 1	37,5	51,7	40,3	8,29 ± 0,09	20,96 ± 0,36	96,14% ± 0,00
Krásná Hora s úpravou sušiny a C/N 2	36,8	50,8	*	8,25 ± 0,16	24,20 ± 0,37	92,65% ± 0,01

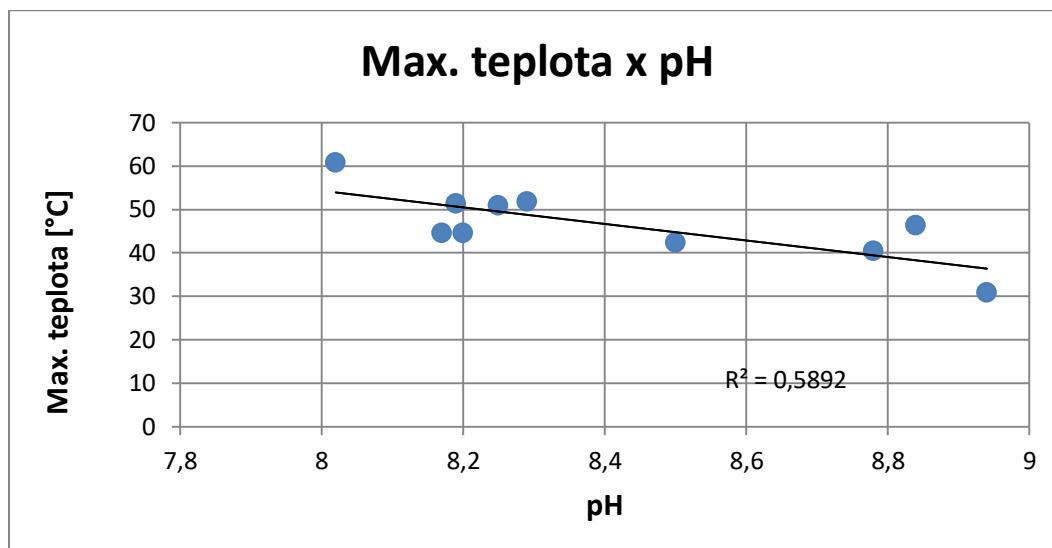
* z technických důvodů nezměřeno

V Grafu č. 10 jsou znázorněny maximální průměrné teploty ve střední vrstvě u cyklů pouze z BPS Krásná Hora. Cykly bez úpravy substrátu s optimalizací vstupní sušiny a s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N. Je zde patrné, že nejvyšší průměrná teplota ve střední vrstvě v separátu z Krásné Hory byla dosažena u cyklu, kde došlo k optimalizaci vstupní sušiny a poměru C/N a naopak nejnižší při optimalizaci pouze vstupní sušiny.

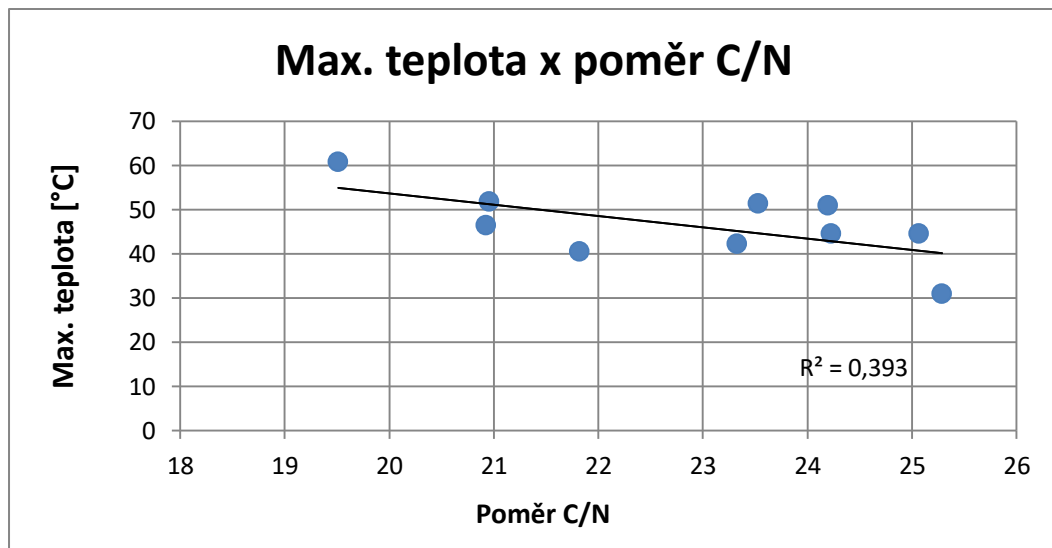


Graf č. 10: Maximální průměrná teplota ve střední vrstvě u cyklů z BPS Krásná Hora.

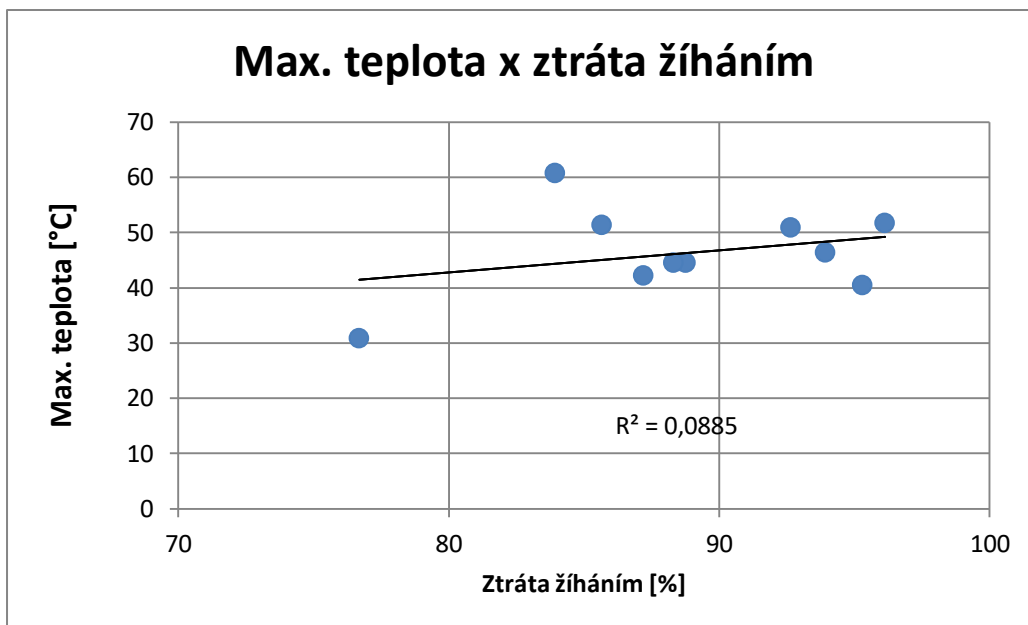
4.4. Závislost dosažené maximální teploty a sledovaných vstupních parametrů



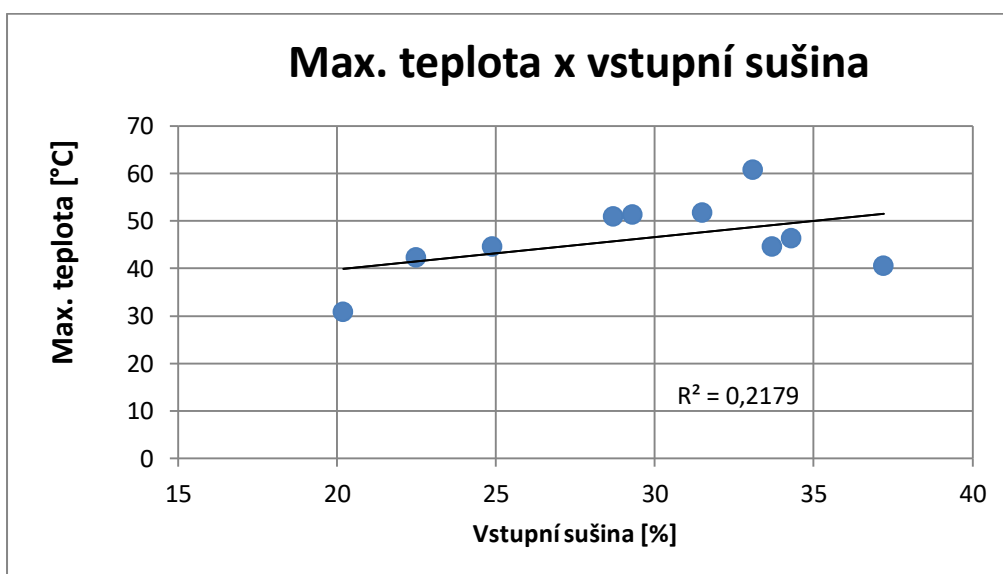
Graf č. 11: Závislost maximální dosažené teploty ve střední vrstvě na pH v substrátu.



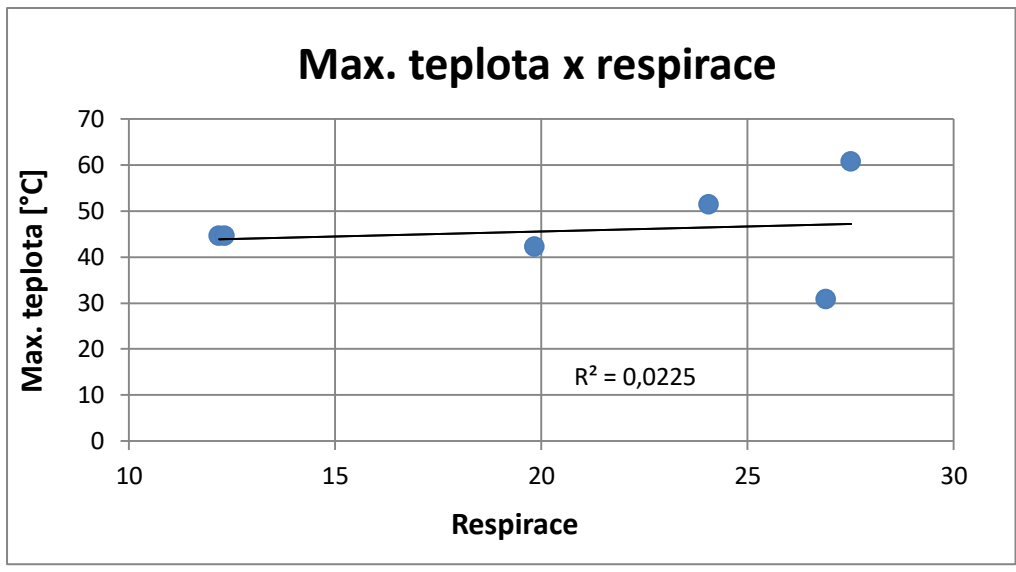
Graf č. 12: Závislost maximální dosažené teploty ve střední vrstvě na poměru C/N v substrátu.



Graf č. 13: Závislost maximální dosažené teploty ve střední vrstvě na množství organické hmoty v substrátu.



Graf č. 14: Závislost maximální dosažené teploty ve střední vrstvě na procentuálním zastoupení vstupní sušiny v substrátu.



Graf č. 15: Závislost maximální dosažené teploty ve střední vrstvě na respiraci substrátu.

5. Diskuze

5.1. Biosušení neupraveného separátu

U prvních 6 cyklů byl použit jako vstupní substrát samotný separát z BPS, na kterém bylo testováno, zda je tento druh odpadu vhodný pro proces biosušení a lze ho po této úpravě dále využít. Tento způsob zpracování separátu byl doposud velmi málo popsán. V jediné známé studii zaměřené na biosušení separátu (Bialowiec et al. 2015) není používán neupravený separát, ale směs separátu a dřevní štěpky.

Vzorky pro první dva cykly byly odebrány v BPS v Kosova Hora. Jak je patrné z grafů č. 4 a grafu č. 5, od samého začátku u obou cyklů prudce stoupala teplota. Tento nárůst odpovídá první fázi sušení tzv. proliferaci, kdy dochází k nejvyšší mikrobiální aktivitě a tedy k intenzivnímu rozkladu organické hmoty a produkci tepla. (Adani et al., 2002; Velis et al., 2009; Tambone et al., 2011).

Nejvyšších teplot bylo při cyklech z BPS Kosova Hora dosaženo ve střední vrstvě. Vývoj teploty u druhého cyklu z Kosovy Hory (viz Graf č. 5) se velmi podobá vývoji teplot u experimentu, který prováděl Bialowiec et al., (2015) se separátem smíchaným s dřevní štěpkou (viz Graf č. 2). Na rozdíl od výsledků z Kosové Hory zde však bylo dosaženo nevyšších teplot v horní vrstvě. Bialowiec et al., (2015) a Adani et al., (2002) vysvětlují tento jev postupným snižováním intenzity provzdušnění směrem vzhůru vlivem zhoršené prostupnosti pro proudící vzduch. Tento rozdíl oproti výsledkům Bialowiec et al. (2015) lze vysvětlit odlišným charakterem vstupního separátu (resp. vstupní směsi). Separát z BPS Kosova Hora se jevil jako velmi slibný substrát, co se týče dosažené teploty v bioreaktoru, přesto však zde byla míra vysušení velmi malá (viz Tabulka č. 2). Malá míra vysušení bude souviset s vlastnostmi substrátu, nikoli s konstrukcí a fungováním bioreaktoru. Tento bioreaktor využil Pilnáček, (2014) u biosušení komunálního odpadu, kde dosáhl průměrné míry vysušení ve spodní vrstvě 21,47% a v horní vrstvě 14,44%. Experiment byl proto zopakován s použitím separátů z dalších zdrojů, a to BPS Krásná Hora a Makrovraty.

V případě cyklů z BPS Krásná Hora nebyl nárůst teploty ve srovnání s výsledky Kosovy Hory tak vysoký. Průměrná maximální teplota ve střední vrstvě u těchto tří cyklů byla 43,7 °C,

tedy ve srovnání s cykly u Kosovy Hory o 17°C nižší. Pokud porovnáme separát z Kosovy Hory a Krásné Hory dle vstupních parametrů (vstupní sušina, poměr C/N, ztráta žíháním), které byly měřeny u každého cyklu, tak jsou velmi podobné (viz Tabulka č. 5). Jediným vysvětlením, proč byla teplota u separátu z BPS Krásná Hora nižší než z Kosovy hory, je rozdílné mikrobiální složení, protože množství organické hmoty v separátu bylo podobné u všech cyklů (viz Tabulka č. 5). Z Grafu č. 13 navíc není patrná závislost mezi množstvím organické hmoty a maximální dosaženou teplotou. Hypotéze o odlišném mikrobiálním složení, které způsobilo rozdílná teplotní maxima, odpovídá i naměřená respirace, která byla v případě Kosovy Hory vyšší (viz Tabulka č. 5).

Přesto však na základě naměřených hodnot respirace v prvních 6 cyklech (viz Tabulka č. 5 a Graf č. 15) nelze tento parametr považovat z pohledu určení vhodnosti separátu pro proces biosušení za relevantní. Z hodnot respirace v prvních 6 cyklech je patrné, že separáty z prvních dvou cyklů z BPS Kosova Hora respirovaly více, než separáty z BPS Krásná Hora v důsledku čehož dosáhly vyšších maximálních teplot. Tento závěr však nelze učinit v případě srovnání separátu z BPS Kosova Hora a BPS Mokrovraty. Ačkoli jsou hodnoty respirace separátu z těchto dvou BPS velmi podobné, je maximální dosažená teplota u separátu z BPS Mokrovraty skoro poloviční. Pro zjištění, zda je respirace spolehlivým ukazatelem vhodnosti separátu pro proces biosušení je tedy nutné provést další experimenty. Zároveň by do budoucna bylo vhodné otestovat jiné modifikace metody měření respirace (např. použití kumulativních hodnot několikadenního měření místo jednorázového stanovení 24 hodinové respirace).

U separátu z BPS Mokrovraty byla maximální teplota ve střední vrstvě nejnižší ze všech cyklů (30,8°C). Takto nízkou teplotu lze vysvětlit nejvyšším pH u ze všech separátů, které bylo 8,94. U všech ostatních separátů se pohybovalo pH okolo 8 (viz Tabulka č. 5). Podle Navaee-Ardeh et al.(2010) je pro mikrobiální rozklad optimální neutrální pH. S jeho růstem tedy mikrobiální aktivita klesá, což můžeme názorně vidět v Grafu č. 11, ze kterého je patrná silná závislost mezi hodnotou pH a maximální dosaženou teplotou. Při manipulaci se separátem z BPS Makovraty byl navíc silně cítit uvolňující se amoniak), což souvisí s posunem do zásadité oblasti pH). Ten může také působit na přítomnou mikrobiální komunitu inhibičně.

Z prvních experimentů s neupraveným vstupním substrátem vyplývá, že nejvyšších teplot bylo dosaženo vždy ve střední vrstvě. Maximální teploty v této vrstvě sice naznačovaly, že se separát zahřívá, přesto však byla i v těchto vrstvách účinnost vysušení velmi malá. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že separát z BPS zemědělského typu nelze bez předchozí úpravy použít k přepracování na alternativní palivo a bude tedy potřeba provést optimalizaci složení vstupního separátu.

5.2. Biosušení separátu po úpravě vstupních parametrů

Po prvních šesti cyklech, kdy nedošlo k dostatečnému vysušení separátu, byla provedena optimalizace jeho složení. Prvním krokem bylo navýšení podílu sušiny vstupního substrátu. To bylo dosaženo smícháním vstupního substrátu s již předsušeným separátem. Ze srovnání vstupní sušiny u cyklů, kde byl použit pouze samotný separát (viz Tabulka č. 2) a separátu s upravenou vstupní sušinou (viz Tabulka č. 3) je patrné, že touto optimalizací došlo k navýšení podílu sušiny u vstupního substrátu přibližně o 10 %.

Navzdory zvýšení podílu sušiny však také nedošlo k dostatečnému vysušení (viz Tabulka č. 3). Z Grafu č. 14 je vidět slabá závislost podílu vstupní sušiny na dosažené maximální teplotě. Tento výsledek je v rozporu s výsledky ve Winkler et al., (2013), Huiliñir and Villegas, (2015) a Zhang et al., (2015), kde navýšení vstupní sušiny a snížení vlhkosti kalů z čistíren odpadních vod vedlo k prokazatelně vyššímu vysušení.

Při druhé úpravě separátu byla zároveň optimalizována vstupní sušina i poměr C/N. Ve studii Bialowiec et al., (2015) byla pro tuto optimalizaci zvolena dřevní štěpka. V případě našeho experimentu byla použita z důvodu vyšší dostupnosti v zemědělství sláma. Z metodiky v Bialowiec et al., (2015) nevyplývá, zda byla dřevní štěpka přidána z důvodu zvýšení podílu vstupní sušiny nebo rovněž současně z důvodu zvýšení poměru C/N. Při optimalizaci vstupního substrátu smícháním se slámou došlo k nižšímu zvýšení podílu vstupní sušiny než při optimalizaci vstupní sušiny pomocí vysušeného separátu. Po této úpravě separátu došlo u obou cyklů k zvýšení maximální dosažené teploty (viz Tabulka č. 6), nicméně účinnost vysušení byla ze všech cyklů nejnižší. Mechanismus navýšení teploty u takto

upraveného substrátu nicméně není stále přesně popsán. Z tohoto důvodu bude potřeba dalšího studia. Z Grafu č. 10 je patrné, že z pohledu maximálních dosažených teplot ve středních vrstvách u všech cyklů z BPS Krásná Hora vyšly nejlépe cykly s optimalizací vstupní sušiny a poměru C/N. To vypovídá o závislosti mezi poměrem C/N a maximální dosaženou teplotou. Tuto závislost potvrzuje Graf č. (max. teplota a poměr C/N). Podle Larsen et McCartney (2000) je optimální poměr C/N pro rozklad organických látek 18 až 30, což splňovaly separáty ze všech BPS.

Závěrem lze konstatovat, že optimalizace vstupního separátu z pohledu navýšení podílu sušiny a navýšení C/N nevedla, na rozdíl od obdobné optimalizace v případě čistírenských kalů (Winkler et al., 2013; Zhang et al., 2015), k dostatečnému vysušení separátu, a je tedy pro další přepracování separátu jako alternativního paliva nedostačující.

6. Závěr

Závěrem předložené diplomové práce jsou tato zjištění.

Prvním cílem této diplomové práce bylo zjistit, zda separát tj. tuhá frakce digestátu z bioplynových stanic, může být vhodným substrátem pro proces biosušení. Z prvních 6 experimentálních cyklů, u kterých byl vstupním substrátem pouze neupravený separát je zřejmé, že bez jeho předchozí úpravy nelze dosáhnout takových teplot, aby došlo k dostatečnému vysušení, a tedy k následnému využití jako alternativní palivo např. do elektráren, cementáren či tepláren. Přestože bioplynové stanice, odkud pocházel testovaný materiál, pracují v kontinuálním režimu anaerobní digesce (což znamená, že fermentační zbytek není z principu 100% proreagovaný), neumožňuje složení digestátu uspokojivý průběh procesu biosušení bez jakékoliv předchozí úpravy. Druhým cílem práce byla optimalizace metody měření respirační aktivity substrátu jako ukazatelem kvality separátu pro proces biosušení. Z výsledků provedených experimentálních cyklů, nelze jednoznačně říci, zda respirace měřená modifikovanou metodou může být ukazatelem použitelnosti substrátu pro tento způsob úpravy. Důvodem je anomální chování vzorku separátu z BPS Makovraty. Do budoucna bude nutné provést více experimentů, aby bylo potvrzeno nebo zamítnuto považovat respirační aktivitu substrátu jako indikátor kvality substrátu pro proces biosušení.

Třetím cílem této diplomové práce bylo porovnání účinnosti procesu biosušení vybraného substrátu po úpravě klíčových vstupních parametrů. Úpravy vstupní sušiny bylo dosaženo promícháním se separátem předem vysušeným v sušárně, úpravy vstupní sušiny a poměru C/N bylo dosaženo přimícháním slámy jako vylehčujícího materiálu a zdroje uhlíku. Ani v jedné z variant nedošlo k zvýšení účinnosti procesu biosušení, přestože u variant s přidavkem slámy byla pozorována maximální dosažená teplota o 5,4°C vyšší. Použité způsoby optimalizace vstupní suroviny tedy také nevedly k uspokojivému zvýšení účinnosti metody biosušení.

Závěrem lze konstatovat, že přestože z pohledu přepracování separátu z bioplynových stanic zemědělského typu na alternativní palivo nebyly výsledky tohoto výzkumu pozitivní, existují možnosti jak toto téma dále rozvíjet. V současné době existují tendence používat separát jako podestýlku pro zemědělská zvířata. U všech provedených experimentálních cyklů, bylo pozorováno, že proces biosušení pozitivně ovlivňuje

organoleptické vlastnosti separátu (zejména odstranění nepříjemného zápachu) a může přispět k zlepšení kvality podestýlky, a to zřejmě i po hygienické stránce. Toto zjištění by mohlo sloužit jako téma k dalšímu výzkumu v oblasti biosušení separátu.

Do budoucna by bylo zajímavé porovnat dobu zdržení v bioplynové stanici a efektivitu procesu biosušení a otestovat použití jiných organických materiálů pro vstupní úpravu separátu.

Reference

Adani F., Baido D., Calcaterra E., Genevini P. (2002), The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste, *Biosource Technology*, 83, 173-179 p.

Avalos Ramirez A., Godbout S., Léveillé F., Zegan D., Larouche J.-P. (2012), Effect of temperature and air flow rate on carbon and nitrogen compounds changes during the biodrying of swine manure in order to produce combustible biomasses, *Journal of Chemical Technology*, 87 (6), 831-836 p.

Badran N.M. (2001), Residual effect of nutrient-enriched organic residues on growth and nutrient utilization by corn plants grown on a sandy soil, *Annals of Agricultural Sciences Moshtohor Journal*, 39(1), 717–736 p.

Barrena R., Vazquez R., Sánchez A. (2006), The use of respiration indices in the composting proces: a review, *Waste Management*, 24, 37-47 p.

Barrington S., Choinière D., Trigui M., Knight W. (2002), Compost airflow resistance, *Biosystems engineering*, 81 (4), 433-441 p.

Bialowiec A., Wisniewski D., Pulka J., Siudak M., Jakubowski B., Myslak B. (2015), Biodrying of the digestate from agricultural biogas plants (polsky), *MIDDLE POMERANIAN SCIENTIFIC SOCIETY OF THE ENVIRONMENT PROTECTION - Annual Set The Environment Protection*, 17, 1554-1568 p.

Cai L., Gao D., Chen T.-B., Liu H.-T., Zheng G.-D., Yang Q.-W. (2012), Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying, *Bioresource Technology*, 117, 13-19 p.

Colomer-Mendoza F. J., Herrera-Prants L., Robles-Martinez F., Gallardo-Izquierdo A., Pina-Guzman A. B. (2013), Effect of airflow on biodrying of gardening wastes in reactors, *Journal of Environmental Sciences*, 25 (5), 865-872 p.

Dahlin J., Nelles M., Herbes C. (2017), Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments, *Resources, Conservation and Recycling*, 118, 27-38 p.

Frei K. M., Cameron D., Stuart P. R. (2004), Novel drying proces using forced aeration through a porous biomass matrix, *Drying Technology: An International Journal*, 22 (5), 1191-1215 p.

Garg A., Smith R., Hill D., Longhurst P. J., Pollard S. J. T., Simms N. J. (2009), An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from unicipal solid waste, *Waste management*, 29 (8), 2289-2297 p.

Garg R.N., Pathak H., Das D.K., Tomar R.K (2005), Use of fly ash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil, *Environmental Monitoring and Assesement*, 107(1/3), 1–9 p.

Holm-Nielsen J. B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. (2009), The future of anaerobic digestion and biogas utilization, *Bioresource Technology*, 100 (22), 5478-5484 p.

Huiliñir C., Villegas M. (2015), Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge, *Water Research*, 82, 118-128 p.

Chen S.Q., Chen B.(2012), Sustainability and future alternatives of biogas-linked agrosystem (BLAS) in China: an energy-based analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3948–3959 p.

Igliński B., Buczkowski R., Iglińska A., Ciszoch M., Piechota G., Kujawski W. (2012), Agricultural biogas plants in Poland: investment proces, economical and environmental aspects, biogas potencial, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (7), 4890-4900 p.

Larsen K. L., McCartney D. M. (2000), Effect of C:N ratio on microbial aktivity and N retention: Bench-scale study using pulp and paper biosolids, *Compost Science & Utilization*, 8 (2), 147-159 p.

Lebuhn M., Munk B., Effenbrger M. (2014), Agricultural biogas production in Germany-from practice to mikrobiology basics, *Energy, Sustainability and Society*, 4 (10)

Mason I. G. (2006), Mathematical modeling of the composting proces: A review, *Waste Management*, 26, 3-21 p.

Moriarty P., Honnery D. (2016), Can renewable energy power the future?, *Energy Policy*, 93, 3-7 p.

Navaee-Ardeh S., Bertrand F., Stuart P. R. (2011), Development and experimental evaluation of a 1D distributed model of transport phenomena in a continuous biodrying proces for pulp and paper mixed sludge, *Drying technology*, 29 (2), 135-152 p.

Nkoa R. (2014), Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review, *Agronomy for Sustainable Development*, 34 (2), 473–492 p.

Pilnáček V. (2014), Studie využití technologie biosušení komunálních odpadů, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, diplomová práce

Pivato A., Vanin S., Raga R., Lavagnolo M. C., Barausse A., Rieple A., Laurent A., Cossu R. (2016), Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment, *Waste Management*, 49, 378-389 p.

Piwowar A., Dzikuć M., Adamczyk J. (2016), Agricultural biogas plants in Poland – selected technological, market and environmental aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 69-74 p.

Pötsch E.M., Pfundtner E., Much P. (2004), Nutrient Content and hygienic properties of fermentation residues from agricultural biogas plants. Land use systems in grassland dominated regions, Proceedings of the 20th General Meeting of the European Grassland Federation, Luzern, Switzerland, 21– 24 June 2004, 1055–1057 p.

Prochnow A., Heiermann M., Plöchl M., Linke B., Idler C., Amon T., Hobbs P.J. (2009), Bioenergy from permanent grassland – A review: 1. Biogas. *Bioresource Technology*, 100, 4931–4944 p.

Rada E. C., Franzielli A., Taiss M., Ragazzi M., Panaitescu V., Apostol T. (2010), Lower heating value dynamics during municipal solid waste bio-drying, *Environmental Technology*, 28 (4), 463-469 p.

Rehl T., Müller J. (2011), Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies, *Resources Conservation and Recycling*, 56, 92–104 p.

Scaglia B., Acutis M., Adani F. (2011a), Precision determination for the dynamic respirometric index (DRI) method used for biological stability evaluation on municipal solid waste and derived products, *Waste Management*, 31, 2-9 p.

Scaglia B., Paradisi L., Adani F. (2011b), Intra- and inter-laboratory variability in Real Dynamic Respiration Index (RDRI) method used to evaluate the potential rate of microbial self heating of solid recovered fuel, *Bioresource Technology*, 102, 3591-3594 p.

Shao L.-M., He X., Yang N., Fang J.-J., Lü F., He P.-J. (2012), Biodrying of municipal solid waste under different ventilation modes: drying efficiency and aqueous pollution, *Waste management & Research*, 30 (12), 1272-1280 p.

Song Z., Zhang C., Yang Feng Y., Ren G., Han X. (2014), Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 204-213 p.

Sugni M., Calcaterra E., Adani F. (2005), Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow, *Bioresource technology*, 96, 1331-1337 p.

Tambone F., Scaglia B., Scotti S., Adani F. (2011), Effects of biodrying process on municipal solid waste properties. *Bioresource technology*, 102 (16), 7443-7450 p.

Teglia C., Tremier A., Martel J.-L. (2010), Characterization of solid digestates: Part 1, Review of existing indicators to assess solid digestates agricultural use, *Waste and Biomass Valorization*, 2 (1), 43-58 p.

Tom A. P., Pawels R., Haridas A. (2016), Bodydrying proces: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content, *Waste management*, 49, 64-72 p.

Velis C.A., Longhurst P. J., Drew G.H., Smith R., Pollard S. J. T. (2009), Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of proces science nad engineering, *Bioresource Technology*, 100 (11), 2747-2761 p.

Velis C.A., Longhurst P. J., Drew G.H., Smith R., Pollard S. J. T. (2010), Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical- biological treatment (MBT) of waste, a comprehensive assessment, *Critical reviews in Environmental science and technology*, 40 (12), 979-1105 p.

Voca N. Kricka T. Cosic T. Rupic V. Jukic Z. Kalambura S. (2005), Digested residue as a fertilizer after the mesophilic process of anaerobic digestion, *Plant Soil Environment*, 51, 262–266 p.

Wang L., Gang H., Gong X., Bao L. (2009) Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing, *Renewable energy*, 34, 2074-2079 p.

Winkler M.-K.H., Bennenbroek M H., Horstink F. H., van Loosdrecht M. C. M., van de Pol, G.-J. (2013), The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge, *Bioresource Technology*, 147, 124-129 p.

Yasuhara A., Amano Y., Shibamoto T. (2010), Investigation of the self-heating and spontaneous ignition of refuse-derived fuel (RDF) during storage, *Waste Management*, 30 (7), 1161-1164 p.

Zaid M.S., Ghozoli M.A., Lamhy M.A. (2005), Residual effect of some organic residues produced from biogas on growth and nutrients utilization by wheat plants, *Annals of Agricultural Sciences Moshtohor Journal*, 43(2), 955–972 p.

Zawadzka A., Liliana K., Ledakowicz S. (2010), Autothermal biodrying of municipal solid waste with high moisture content, *Chemical Papers*, 64 (2), 265-268 p.

Zhang D.-Q., He P.-J., Jin T.-F., Shao L.-M. (2008b), Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation, *Bioresource Technology*, 99 (18), 8796-8802 p.

Zhang D.-Q., Shao L., Jin T., Han J. (2008a), Biodrying municipal solid waste with high water content by combined hydrolytic-aerobic technology, *Journal of environmental sciences*, 20 (12), 1534-1540 p.

Zhang J., Cai X., Qi L., Shao Ch., Lin Y., Zhang J., Zhang Y., Shen P., Wei Y. (2015), Effect of aeration strategy on the evolution of dissolved organic matter (DOM) and microbial community structure during sludge bio-drying, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 7321-7331 p.

Zhao L., Gu W.-M., He P.-J., Shao L.-M. (2010), Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge, *Water Research*, 44 (20), 6144-6152 p.

Webové stránky:

Web 1 dostupný na www.czba.cz

Web 2 dostupný na www.eru.cz/cs/elektrina/cenova-rozhodnuti

Web 3 dostupný na www.farmtec.cz/vystavba-bioplynovy-stance

Web 4 dostupný na www.zdkh.cz

Web 5 dostupný na www.bps.zsdo.cz

Web 6 dostupný na www.zskh.cz