

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra technologických zařízení staveb



DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE

2014

Ing. Tomáš DLABAJA

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra technologických zařízení staveb



**Analýza a optimalizace využití komunálních biologicky rozložitelných odpadů
pro výrobu bioplynu a energie**

**Analysis and Optimization of Biodegradable Municipal Waste Utilization for
Biogas and Energy Generation**

Doktorská disertační práce

Obor:

Energetika

Vypracoval:

Ing. Tomáš Dlabaja

Školitel:

doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

Praha 2014

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují“

V Praze, dne.....

.....

podpis

Poděkování

Touto cestou chci velmi poděkovat doc. Ing. Janu Malat'ákovi, Ph.D. za jeho pomoc, společné konzultace a odborné vedení, které mi poskytl při tvorbě této práce.

V Praze, dne.....

.....

podpis

Abstrakt:

Materiálové a energetické využití rizikového biologického odpadu je prioritou jeho nakládání. Tato práce se zabývá využitím kuchyňských odpadů pocházejících z provozů hromadného stravování. Využívání i odstraňování tohoto druhu odpadu musí být v souladu s legislativou, která omezila tradičně využívané metody jako zkrmování, drcení a vypouštění do kanalizace nebo skládkování. Pro tento vlhký a heterogenní odpad se jeví slibně metody anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace. Významnou částí práce jsou laboratorní experimenty zkoumající vhodnost těchto technologií a vliv parametrů procesu na vlastnosti produktů. Při anaerobním vyhnívání za mezofilní teploty 36 °C a době zdržení 20 dnů dosahovala výtěžnost bioplynu 0,35 – 0,55 m³.kg_{os}⁻¹ s podílem metanu 57 – 67 % a stupněm rozkladu organické sušiny 83 – 85 %. Hydrotermální karbonizace byla testována za podmínek 200 °C a 215 °C při iniciační fázi a 190 °C při polymerační fázi při době reakce 2, 4 a 10 hodin. Biouhli vykazovalo výhřevnost 26,5 – 28,5 MJ.kg⁻¹. Na základě účinnosti energetické přeměny a energetické náročnosti obou technologií bylo vypočteno, že z kuchyňských odpadů s obsahem sušiny 27,25 % lze získat čistý energetický zisk 8,8 MJ.kg_{suš}⁻¹ prostřednictvím karbonizace a 4,3 MJ.kg_{suš}⁻¹ prostřednictvím fermentace. Z kalkulace nákladů a výnosů pro bioplynovou stanici o instalovaném elektrickém výkonu 20 – 50 kW_{el} dále vyplývá, že hospodářské výnosy pouze z prodeje elektřiny a tepla nejsou dostatečné k pokrytí investice a provozu. Mezi oběma technologiemi bylo nalezeno několik prospěšných synergií – zlepšení odvoditelnosti, zajištění hygienizace nebo dodatečné zpracování vedlejších produktů.

Klíčová slova: kuchyňský odpad, biologicky rozložitelný odpad, anaerobní fermentace, bioplyn, hydrotermální karbonizace, biouhli.

Abstract:

Material recovery and energy utilisation have very high priority in waste management of biodegradable waste. This dissertation deals with utilisation of kitchen waste coming from public catering. Both its utilisation or treatment must be in accordance with the legislation, which restricts some traditional ways of handling like landfilling, dumping into sewer networks through garbage disposal units or feeding livestock. Anaerobic fermentation and hydrothermal carbonization seem to be suitable methods for this wet and heterogeneous waste. Suitability of the waste and effects of process parameters on quality of outputs were researched by laboratory experiments. The biogas yield after 20 days of fermentation reaches values of 0.35 to 0.55 $\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{vol.solid}}^{-1}$ with methane share of 57 – 67 % and 83 – 85 % degree of organic matter degradation. Hydrothermal carbonization was examined under temperature 200 and 215 °C by initiation phase and 190 °C by polymerization phase. Retention times were 2, 4 and 10 hours. The biochar reached lower heating value of 26,5 to 28,5 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Energy efficiency of both technologies in continuous operation was estimated and energy balance was calculated. For kitchen waste with 27,25 % of total solids it is possible to get energy gain of 8,8 $\text{MJ} \cdot \text{kg}_{\text{tot.solid}}^{-1}$ by hydrothermal carbonization and 4,3 $\text{MJ} \cdot \text{kg}_{\text{tot.solid}}^{-1}$ by anaerobic fermentation. From calculation of costs and revenues for biogas station with capacity of 20 – 50 kW_{el} follows that income coming only from electricity and heat generation cannot cover investment and operating costs. Several synergies were found between the technologies – improved dewatering, hygienization or additional by-products processing.

Keywords: kitchen waste, biodegradable waste, anaerobic digestion, biogas, hydrothermal carbonization, biochar.

Obsah

1	Úvod	8
2	Přehled o současném stavu problematiky	10
2.1	Definice pojmů.....	10
2.2	Problémy odpadového hospodářství s návazností na energetiku a životní prostředí	15
2.3	Vymezení kuchyňských odpadů mezi biologicky rozložitelnými odpady.....	22
2.4	Legislativa a možnosti nakládání s kuchyňským odpadem.....	24
2.4.1	Stručná historie legislativního vývoje odpadového hospodářství.....	24
2.4.2	Legislativa a možnosti nakládání s kuchyňským odpadem.....	25
2.5	Současná produkce a způsoby nakládání s kuchyňským odpadem v ČR ve srovnání s EU	29
2.6	Vhodnost technologií k nakládání s kuchyňskými odpady	33
2.6.1	Kompostování	35
2.6.2	Anaerobní fermentace	36
2.6.3	Spalování	45
2.6.4	Biologické dosoušení biomasy	46
2.6.5	Mikrovlákná depolymerizace	48
2.6.6	Hydrotermální karbonizace	48
2.7	Vybrané metody k nakládání s kuchyňskými odpady.....	51
2.7.1	Anaerobní fermentace	51
2.7.2	Hydrotermální karbonizace	66
3	Cíle práce	79
4	Metody řešení.....	81
4.1	Metodika testů anaerobní fermentace	82
4.1.1	Popis experimentálního zařízení reaktoru v polokontinuálním provozu .	83
4.1.2	Průběh experimentu a vzorkování.....	85
4.1.3	Popis experimentálního zařízení vsádkového reaktoru.....	88
4.1.4	Průběh experimentu a vzorkování.....	89
4.2	Metodika testů hydrotermální karbonizace	91
4.2.1	Popis experimentálního zařízení	92
4.2.2	Průběh experimentu a vzorkování.....	92
4.3	Metodika výpočtu hospodářského výsledku malé bioplynové stanice na kuchyňský odpad	98
4.4	Metodika energetického porovnání technologií anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace pro kuchyňské odpady	99

4.5	Statistická analýza	100
4.5.1	Statistická analýza vztahů mezi veličinami – regresní analýza	100
4.5.2	Rozptyl	100
4.5.3	Směrodatná odchylka	101
5	Výsledky a diskuze.....	102
5.1	Výsledky experimentů anaerobní fermentace.....	102
5.1.1	Vliv předúpravy substrátu	102
5.1.2	Vliv teploty na výtěžnost bioplynu	105
5.1.3	Vliv doby kontaktu na výtěžnost bioplynu.....	107
5.1.4	Vliv zatížení vyhnívacího prostoru organickými látkami	108
5.1.5	Vliv recirkulace vyhnílého digestátu	109
5.1.6	Přítomnost sulfanu	109
5.2	Hospodářský výsledek malé bioplynové stanice na kuchyňský odpad.....	110
5.3	Výsledky experimentů hydrotermální karbonizace	115
5.3.1	Vliv teploty na výhřevnost biouhlí.....	115
5.3.2	Vliv pH	115
5.3.3	Vliv doby zdržení na výhřevnost	117
5.3.4	Výtěžek tuhé složky	118
5.3.5	Prvková analýza	118
5.3.6	Stechiometrická analýza	122
5.3.7	Hydrofóbní vlastnosti biouhlí	124
5.3.8	Koncepce využití procesní vody.....	125
	Test fytotoxicity	126
5.4	Vzájemné energetické porovnání technologií anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace	128
6	Závěr	132
7	Seznam použitých symbolů a zkratk	137
8	Literatura.....	138
9	Rejstřík tabulek	147
10	Rejstřík obrázků	148
11	Přílohy.....	149

1 Úvod

Vedlejším produktem takřka veškeré lidské činnosti je vznik odpadů, jež zatěžují a znečišťují naše životního prostředí. Na závažnost situace v hospodářsky prosperující civilizaci nebyl brán dostatečný zřetel téměř až do okamžiku, kdy jsme slovy Jana Nerudy „nevěděli kam s ním“. Stoupající hustota obyvatelstva a méně volného prostoru pro nelibý odpad dali vzniknout propracovanému odpadovému hospodářství. Likvidace odpadů stojí hodně peněz, energie a prostoru. Proto je současnou snahou především zemí EU nastolit takovou odpadovou politiku, která bude stát v první řadě na předcházení vzniku odpadů a v druhé řadě na hierarchii nakládání s již vytvořeným odpadem. Přednost musí dostat metody materiálového a energetického využívání odpadů a to i za cenu finančních dotací na jejich rozvoj, protože skládkování je i přes nespornou negativní zátěž na životní prostředí stále nejlevnější formou likvidace.

Hromadící se odpad znamená problém, který musí lidská civilizace řešit. Ale problém může znamenat i výzvu. Výzvou je najít tak dobré řešení, abychom ze zpracování odpadu získali další užitek. Některé druhy odpadů lze zpracovávat více způsoby. Výběr optimální varianty závisí na výsledcích testování. Pro některé odpady může být řešením kombinace více stávajících technologií anebo kritická nutnost nalézt zcela novou metodu.

Tato práce se zabývá nakládáním s biologicky rozložitelným komunálním odpadem, konkrétně aktuálními problémy kolem kuchyňských odpadů. Změny v evropské a české legislativě zamezily tradičnímu nakládání s tímto odpadem, a tak je nutno pro něj najít jinou anebo zcela novou metodu nakládání.

Tento druh odpadu představuje potenciální riziko pro zdraví lidí, zvířat a pro životní prostředí. Kuchyňský odpad můžeme buď bezpečnými prostředky likvidovat, nebo ho dále využívat pro jiné účely za předpokladu, že jsou dodrženy přísné legislativní podmínky. Tyto odpady jsou velmi vlhkým heterogenním materiálem, pro který není snadné jednoznačně určit nejlepší řešení. Nabízí se tradiční technologie kompostování, anaerobní fermentace či spalování, anebo novější procesy biologického dosoušení či hydrotermální karbonizace. Tato práce si klade za cíl experimentálně prověřit vhodnost zpracování kuchyňských odpadů metodami anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace a najít takové parametry obou procesů, aby se maximalizoval energetický

výnos ze vstupní suroviny. Provoz těchto technologií musí být rentabilní i za splnění všech legislativních podmínek, které jsou popsány v části literární rešerše.

Nakládání s kuchyňskými odpady stále provázají problémy v rámci odpadového hospodářství. Ne všichni původci tohoto odpadu jsou nakloněni nové legislativě a prohřešky ve sběru a separaci odpadu nejsou výjimkou. Některé nové komunální bioplynové stanice se tak stále potýkají s nedostatkem této očekávané suroviny, která má dobrý potenciál k přeměně na bioplyn, ale v bioplynových reaktorech stále zaujímá jen minoritní podíl. Naopak vhodnost tohoto odpadu pro jednu z nejnovějších technologií - hydrotermální karbonizaci, je nutno teprve ověřit.

Světová energetika v posledních letech prožívá velmi nestabilní období především, co se týče cen energetických zdrojů. Tato situace neumožňuje činit spolehlivé a dlouhodobé predikce, což omezuje investice v energetickém průmyslu, které jsou vesměs dlouhodobou záležitostí. Přesto v Evropě pozorujeme určitou energetickou revoluci, která s sebou přináší rozvoj obnovitelných zdrojů energie a snížení energetické závislosti.

Ve světle všech zmíněných okolností a překážek, je cílem této práce navrhnout moderní nakládání s kuchyňským odpadem, které reaguje na současné potřeby.

2 Přehled o současném stavu problematiky

2.1 Definice pojmů

Veškeré činnosti v oblasti hospodaření s odpady jsou v současnosti usměrňovány právními předpisy. Ty vymezují způsoby nakládání s odpady, role a povinnosti jednotlivých účastníků odpadového hospodářství. Cílem odpadového hospodářství je snížit nepříznivý dopad na životní prostředí, lidské zdraví, dosáhnout efektivního využití energií a zdrojů a nastolit trvale udržitelný vývoj.

Nakládání s odpady je řízeno rozsáhlým souborem právních předpisů, které definují jednotlivé druhy odpadů a upřesňují hranice mezi odpady a materiály, které odpady nejsou.

Odpadové hospodářství je rozsáhlou a komplikovanou problematikou, kterou je vhodné řídit a regulovat. K tomu je nejen nutné popsat a definovat druhy odpadů, nakládání s nimi, ale také nastavit soubor pravidel pro předcházení jejich vzniku a pro jejich opětovné využití. Pro kvalitní celkový výsledek je potřeba brát v potaz celý životní cyklus produktu a odpadu.

Při práci s danou problematikou je nutno se držet správných pojmů z aktuálních předpisů. Evropská a česká legislativa biologicky rozložitelných komunálních odpadů prošla v posledních letech řadou důležitých úprav. Za první významný krok této etapy můžeme označit přijetí směrnice Rady Evropského společenství 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999, o skládkách odpadů. Tato nadnárodní směrnice byla následně realizována do Plánu odpadového hospodářství České republiky (POH ČR) společně s dalšími nadnárodními a národními předpisy, které ovlivňují nakládání s odpady na území ČR.

I. Odpadové hospodářství

Je činností zaměřenou na předcházení vzniku odpadů, na nakládání s odpady a následnou péči o místo, kde jsou odpady trvale uloženy, a kontrolu těchto činností. Nakládání s odpady spočívá v jejich shromažďování, soustředování, sběru, výkupu, třídění, přepravě a dopravě, skladování, úpravě, využívání a odstraňování. (Podle

zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů)

II. Plán odpadového hospodářství ČR (POH ČR)

Stanovuje konkrétní cíle a opatření pro nakládání s odpady na území České republiky. Byl vyhlášen v nařízení vlády č. 197/2003 Sb. a jeho platnost byla určena na deset let - od 1. července 2003 do 30. června 2013. Protože nový POH ČR ještě nebyl dokončen, dne 19. 6. 2013 schválila vláda prodloužení platnosti současného POH ČR. Cíle stanovené v POH ČR směřují zejména k podpoře materiálového využití odpadů a omezení jejich negativního vlivu na lidské zdraví a životní prostředí. V POH ČR jsou zahrnuty cíle pro nakládání s odpady stanovené závaznými předpisy ČR a EU.

III. Katalog odpadů

Katalog stanovuje vyhláška č. 381/2001 Sb., kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů. Původce a oprávněná osoba jsou povinni pro účely nakládání s odpadem odpad zařadit podle § 5 a § 6 zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech pod katalogová čísla stanovená ve vyhlášce 381/2001 sb. (Katalog odpadů).

IV. Komunální odpad (KO)

Je definován jako veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a odpad, který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. (Podle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb.)

Rozsah pojmu v Katalogu odpadů však neodpovídá definici komunálního odpadu podle zákona o odpadech. V katalogu odpadů zahrnuje odpady z domácností a podobné živnostenské, průmyslové odpady a odpady z úřadů. Proto si definujeme také Odpad podobný komunálnímu odpadu.

V. Odpad podobný komunálnímu odpadu

Veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů. (Podle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb.)

VI. Biologicky rozložitelný odpad (BRO)

Jakýkoli odpad, který podléhá aerobnímu nebo anaerobnímu rozkladu. (Podle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb.)

VII. Biologický odpad

Je definován jako biologicky rozložitelný odpad ze zahrad a veřejné zeleně, potravinářský a kuchyňský odpad z domácností, restaurací, stravovacích nebo maloobchodních zařízení a srovnatelný odpad ze zařízení potravinářského průmyslu. (Podle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb.)

VIII. Biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO)

V současnosti zahrnuje všechny druhy biologicky rozložitelného odpadu ve skupině 20 Katalogu odpadů (vyhláška MŽP č. 381/2001 Sb.). Do BRKO náleží odpady papíru a lepenky, biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven, část odpadů oděvů a textilních materiálů, dřevo, biologicky rozložitelný odpad ze zahrad a parků, část směsného komunálního odpadu, odpadu z tržišť a objemného odpadu ve skupině 20.

IX. Vedlejší živočišné produkty (VŽP)

Tyto produkty představují potenciální riziko pro zdraví lidí a zvířat a pro životní prostředí. Toto riziko je třeba vhodně zvládat, buď neškodným odstraněním těchto produktů bezpečnými prostředky, nebo jejich bezpečným využitím pro jiné účely za předpokladu, že jsou dodrženy přísné podmínky, které snižují zdravotní rizika spojená s těmito produkty na minimum.

Mezi odpady vedlejších produktů živočišného původu patří především odpady z výroby a zpracování masa, ryb a jiných potravin živočišného původu (kat. č. 02 02 ..) a biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven (kat. č. 20 01 08). Organické odpady jsou rozděleny do tří kategorií z hlediska hygienických rizik a požadavků na zpracování.

Nakládání s vedlejšími produkty živočišného původu upravuje Nařízení EP a Rady (ES) č. 1069/2009 ze dne 21. října 2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě, a o zrušení nařízení (ES) 1774/2002. Nařízení, které upravuje hygienická a veterinární pravidla pro uvedené vedlejší produkty, nabylo účinnosti od 4. 3. 2011. Nařízení

zohledňuje výsledky přezkumu do té doby platného nařízení (ES) 1774/2002 a začleňuje revidovaná ustanovení do jediného textu.

X. Obnovitelný zdroj energie (OZE)

OZE je takový zdroj, v jehož čerpání lze teoreticky pokračovat další tisíce let.

Označení obnovitelný zdroj energie se používá pro některé vybrané, na Zemi přístupné formy energie, získané primárně především z termojaderného spalování vodíku v nitru Slunce. Dalšími zdroji jsou teplo zemského nitra a setrvačnost soustavy Země-Měsíc. Lidstvo je čerpá ve formách např. sluneční záření, větrné energie, vodní energie, energie přílivu, geotermální energie, biomasy a dalších. (Libra, 2012)

Definice obnovitelného zdroje podle českého zákona o životním prostředí: „Obnovitelné přírodní zdroje mají schopnost se při postupném spotřebovávání částečně, nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka.“ (Zákon č.17/1992 Sb., o životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů)

Definice podle zákona č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů: „obnovitelnými zdroji se rozumí obnovitelné nefosilní přírodní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření, geotermální energie, energie vody, energie půdy, energie vzduchu, energie biomasy, energie skládkového plynu, energie kalového plynu z čistíren odpadních vod a energie bioplynu.“

XI. Národní akční plán pro obnovitelné zdroje energie

Národní akční plán pro obnovitelné zdroje energie: Plán předložený každým členským státem EU v roce 2010. Představuje plán jak dosáhnout určitého (závazného) podílu energie obnovitelných zdrojů energie do roku 2020, včetně energie spotřebované v dopravě, elektřiny, vytápění a chlazení. V těchto plánech se členské státy stanovily podrobný popis cílů, použitých technologií, opatření a reformy, které se použijí k jejich dosažení. (Havránková, 2005)

XII. Cena na krytí vícenákladů spojených s podporou výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, kombinované elektřiny a tepla a druhotných zdrojů.

V České republice je s ohledem na závazky vůči EU podporována výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů (OZE), druhotných zdrojů a dále z kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET). Výrobní náklady na takto vyrobenou elektřinu jsou však obecně vyšší než z klasických elektráren (uhelných a jaderných), proto se všichni koneční zákazníci podílí na hrazení těchto vícenákladů (rozdílu mezi podporovanou cenou elektřiny z OZE, KVET a druhotných zdrojů a průměrnou tržní cenou) formou regulovaného příspěvku. Podpora výše uvedených zdrojů byla zakotvena zákonem č. 180/2005 Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů (zákon byl od 1. ledna 2013 nahrazen zákonem č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie), a zákonem č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů. (Energetický regulační úřad)

2.2 Problémy odpadového hospodářství s návazností na energetiku a životní prostředí

Ve studii Rockström et al. (2009) „Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity“ jsou představeny výsledky mezinárodní studie, která se pokusila odhadnout bezpečné limitní hodnoty pro klíčové environmentální procesy, jejichž překročení by mohlo ohrozit nejenom udržitelnost hospodářství ale i obyvatelnost země. Dříve lidé mohli Zemi znečišťovat a nahromaděnému odpadu se mohli „jednoduše“ vyhnout přestěhováním. Dnešní civilizace je ale tak velká, že tuto strategii dále uplatňovat nelze. Kolem roku 1800 žila na planetě přibližně 1 miliarda lidí, v roce 2014 jejich počet narostl na 7,2 miliardy. Úměrně s růstem populace roste celosvětová spotřeba potravin a pitné vody, která se za posledních 50 let ztrojnásobila, a využití fosilních paliv stouplu čtyřnásobně. Z lokálních problémů se stávají globální. Zdroje jsou omezené a odpadu přibývá. Studie Planetary boundaries definuje devět environmentálních procesů, které by mohly zničit schopnost planety udržovat lidský život. Environmentální procesy, které by měly zůstat v určitých mezích, následky překročení mezních hodnot a možná řešení ke snížení hodnot zobrazuje Tab. 1. Tučně jsou zvýrazněny fakta přímo související s materiálovým a energetickým využitím biologicky rozložitelných odpadů. Autoři studie se domnívají, že již tři procesy překročili své mezní hodnoty – ztráta biodiverzity (rychlost vymírání živočišných druhů), koloběh dusíku (rychlost, s jakou ho člověk odebírá z atmosféry) a klimatické změny (koncentrace oxidu uhličitého).

Tab. 1 Environmentální procesy, následky překročení mezních hodnot a možná řešení ke snížení hodnot

Environmentální proces	Následky překročení hranice	Možná řešení
Ztráta biodiverzity	Selhání pozemských a oceánských ekosystémů	Zpomalit mýcení lesů a obdělávání půdy; platit za služby pro ekosystém
Koloběh dusíku	Rozšíření mrtvých zón v jezerech i oceánech	Omezit použití hnojiv; zpracovávat živočišný odpad; přejít na hybridní vozidla
Koloběh fosforu	Narušení potravinového řetězce v oceánu	Omezit použití hnojiv; zpracovávat živočišný odpad; lépe zpracovávat lidské výkaly
Klimatické změny (koncentr. CO ₂)	Tání polárního ledu a ledovců; regionální změny klimatu	Přechod na nízkouhlíkovou energii a paliva; stanovit cenu za emise uhlíku
Využití půdy	Selhání ekosystému; únik kyslíčnanu uhličitého	Omezit živelný růst měst; zlepšit efektivitu farmaření; platit za služby pro ekosystém
Okyselování oceánů	Mikroorganismy a korály hynou; propady uhlíku se zmenšují	Přechod na nízkouhlíkovou energii a paliva; zmírnit splachování hnojiv
Využití sladké vody	Selhání vodních ekosystémů; zmizení zásob vody	Zlepšit účinnost zavlažování; nainstalovat zařízení s nízkým průtokem
Řídnutí ozonové vrstvy	Záření škodí lidem, zvířatům i rostlinám	Vyřadit hydro-chloro-fluoro-uhlovodíky (HCFC); testovat účinky nových chemikálií

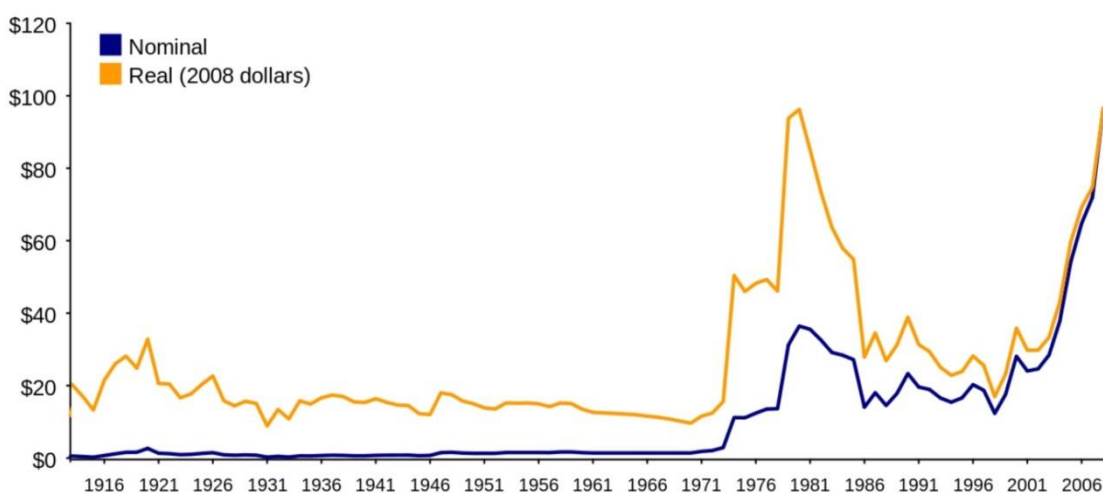
Zdroj: Scientific American (České vydání), červenec 2012

V současné době znamená zajištění energetických potřeb vesměs ničení přírodního prostředí. Cena vyrobené energie z fosilních paliv je z ekonomického pohledu levnější než její výroba z OZE a momentální „pocit dostatku“ fosilních zdrojů není dostatečně silným tématem k rychlému a zásadnímu obratu situace. Mnozí se domnívají, že obrat nastane přirozeně až s rostoucí cenou fosilních paliv a se zvýšením efektivity technologií výroby z OZE.

Například vyčerpání světových zásob ropy se předpovídalo již před 100 lety. Dnešní odhady světových zásob jsou vyšší, než byly odhadovány před 50 lety. Přesnost údajů ale nelze nezávisle potvrdit, lze jen důvěřovat tvrzením státních a soukromých společností.

Zásoby jsou definovány jako "ta množství ropy, o kterých se předpokládá, že budou komerčně vytěžena ze známého ložiska od určitého data dopředu". Mezi zásoby se nezapočítávají ropa a plyn skladované na povrchu. Odhady zásob jsou revidovány s přibýváním geologických dat a znalosti o ložisku, ale také podle změn v ekonomických podmínkách na trhu. Je tedy možné, že daná společnost musí zrevidovat svůj stav zásob na nižší, poklesne-li cena ropy a část zdrojů v ložisku již nemůže být nazývána rezervami, protože odporuje definici ekonomičnosti. Rozlišují se zásoby dokázané, pravděpodobné a možné. (SPE, 2000)

Obr. 1 Vývoj ceny ropy v nominálních a reálných cenách od roku 1910 do 2008.



Zdroj: U.S. Energy Information Administration (<http://www.eia.gov/>)

Jak již bylo zmíněno výše, rozvoj OZE je z části ovlivněn cenou fosilních paliv na světových trzích. Vývoj ceny ropy je znázorněn na Obr. 1. V roce 2013 se cena ropy Brent pohybovala mezi 97 a 119 USD. barel⁻¹. Cena zemního plynu se pohybovala mezi 2,5 a 4 USD.m⁻³. Ceny uhlí kopírovaly snížení cen plynu v USA po výrazném každoročním nárůstu těžby břidlicového plynu v USA od roku 2006. Zvýšená produkce nekonvenčního plynu začala na trhu vytlačovat uhlí. Přebytky uhlí se začaly vyvážet především do Evropy, kde je jeho cena mnohem vyšší. Cena termínového kontraktu na

černé uhlí s dodáním za rok (v 2015) se v Evropě dostala pod hodnotu 90 USD.t⁻¹ suroviny. V Evropě se tak naopak vyplatí vyrábět více elektřiny z uhlí na úkor plynu.

Důležitým pojmem v evropské energetice je německý výraz „Energiewende“ (energetický obrat), který se ve světových energetických kruzích ani nepřekládá do jiných jazyků. Jde o zásadní změnu ve směřování Německé energetiky. O přechod k udržitelné ekonomice cestou využívání OZE. Cílem by mělo být postupné odstranění uhelných a jiných neobnovitelných zdrojů energie.

OZE zahrnující energii z větru, vody, biomasy (včetně bioplynu), slunce, oceánu a také geotermální energii mají nahradit fosilní paliva jako jsou ropa, uhlí, zemní plyn a jaderná paliva. Tab. 2 zobrazuje v procentech cíle Energiewende.

Tab. 2 Cíle Energiewende Německé spolkové republiky

Rok		2015	2020	2022	2030	2040	2050
Skleníkové plyny oproti roku 1990			-40		-55	-70	-80 až -95
Minimální podíly obnovitelných zdrojů	na konečné spotřebě energie		18		30	45	60
	na spotřebě elektřiny		35		50	65	80
Energetická efektivita oproti roku 2008	primární spotřeba energie		-20				-50
	energie na tepelné účely		-20				-80
	energie v dopravě		-10				-40
	spotřeba elektřiny		-10				-25
Elektřina z jádra		-47		-100			

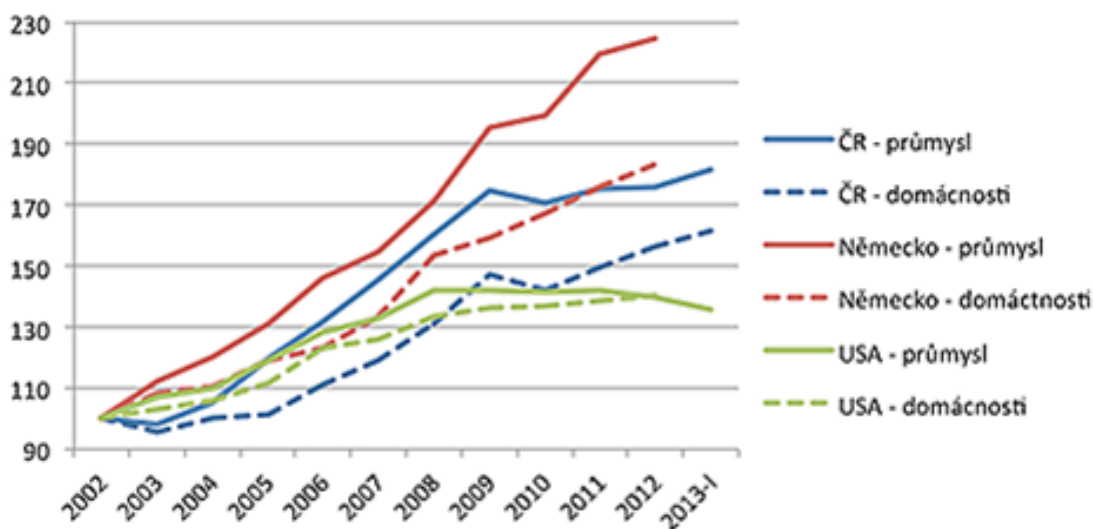
Zdroj: <http://www.ceskapozice.cz/byznys/energetika/nemecka-energetika-atomu-zady-slunci-vetru-celem>

OZE se v Německu v roce 2012 podílely na výrobě elektřiny 23 % a jsou po hnědém uhlí (26 %) druhým největším zdrojem. Další nárůst OZE se očekává

především ve větrné energii, který v roce 2012 představoval největší podíl 36% (biomas 27 %, fotovoltaika 19 %). Německo podporuje OZE především garantovanými cenami a přednostním výkupem v síti. To zapříčiňuje zdražení elektřiny pro koncového uživatele. Německo přenáší toto finanční zatížení především na domácnosti. Obr. 2 zobrazuje rozdílný růst cen elektřiny pro průmysl a domácnosti v Německu, ČR a USA. Cena elektřiny je mimo jiné důležitým faktorem pro konkurenceschopnost hospodářství.

Obr. 2 Růst cen elektřiny pro průmysl a domácnosti v Německu, ČR a USA

(výchozí hodnota 100 rok 2002)



Pramen: Energy Prices and Taxes, 2nd Quarter 2013, OECD

Zdroj: <http://www.ceskapozice.cz/byznys/energetika/nemecka-energetika-atomu-zady-slunci-vetru-celem>

Energetickými změnami neprochází Německo osamoceně. Členské země EU mají stanovené klimatické a energetické cíle v rámci strategie 20/20/20 do roku 2020. Dle vyjádření Evropské komise se bude EU do roku 2030 soustředit více na snížení emisí CO₂ než-li na ambiciózní cíle skrz OZE. Dokument „Cíle v oblasti klimatu a energetiky do roku 2030 pro konkurenceschopné, bezpečné a nízkouhlíkové hospodářství EU“ stanovuje snížení emisí skleníkových plynů o 40 % oproti úrovni roku 1990 a závazný cíl pro celou EU dosáhnout podílu energie z obnovitelných zdrojů ve výši nejméně 27 %. Předseda Evropské komise José Manuel Barroso k tomu uvedl: „Oblast klimatu

je zcela zásadní pro budoucnost naší planety, zatímco skutečně evropská energetická politika je rozhodujícím faktorem pro naši konkurenceschopnost. (Brusel, 22. 1. 2014)

Důvodem vyšší priority na snížení CO₂ oproti cílenému zvyšování OZE je negativní nárůst cen energií z pohledu EU ke konkurenčním obchodním partnerům. Snížit emise CO₂ lze čistšími, ale ne nutně obnovitelnými zdroji energie, např. atomovými elektrárnami.

Velkým problémem současné evropské energetiky je také nefunkční systém obchodování s emisními povolenkami. Jejich hodnota se blíží nule. Vysoký a podporovaný nárůst OZE narušil tržní prostředí. To narušilo hospodárnost klasických elektráren a navýšilo nejistotu nových investic. Současná situace je velmi obtížná pro jasné dlouhodobé předpovědi, ale investice v energetickém sektoru jsou dlouhodobou záležitostí.

Česká republika má formulovanou Státní energetickou koncepci na období 2010-2030. Její poslední aktualizace proběhla v roce 2012. Ale nová vláda zvažuje další aktualizaci v roce 2014. Hlavním posláním Státní energetické koncepce je zajistit spolehlivou, bezpečnou a k životnímu prostředí šetrnou dodávku energie pro potřeby obyvatelstva a ekonomiky ČR, a to za konkurenceschopné a přijatelné ceny za standardních podmínek. Současně musí zabezpečit nepřerušené dodávky energie v krizových situacích v rozsahu nezbytném pro fungování nejdůležitějších složek infrastruktury státu a přežití obyvatelstva. (Státní energetická koncepce 2010-2030)

Prioritou I. je vyvážený mix zdrojů založený na jejich širokém portfoliu, efektivním využití všech dostupných tuzemských energetických zdrojů a udržení přebytkové výkonové bilance ES s dostatkem rezerv. Udržování dostupných strategických rezerv tuzemských forem energie.

Vybrané cíle strategie ČR do roku 2040 související se snižováním emisí CO₂, růstem OZE a využíváním odpadů:

- výstavba dvou nových bloků v Jaderné elektrárně Temelín, výstavbu pátého bloku v Jaderné elektrárně Dukovany a s prodloužení životnosti současných bloků

- rozvoj ekonomicky efektivních OZE s postupným odstraněním finančních podpor na výrobě elektřiny nad 15 %
- zvýšení využití odpadů v zařízení na energetické využívání odpadů s cílem
- dosáhnout až 80 % využití spalitelné složky odpadů po jejich vytrídění do roku 2040
- udržení výroby elektřiny z uhlí ve snižujícím se rozsahu (s cílovou hodnotou v rozmezí 15 - 20 TWh.rok⁻¹)
- zvýšením podílu elektrizovaných systémů veřejné hromadné dopravy (kolejová doprava, příp. trolejbusy) a dále pak zvýšením podílu LNG a CNG v dopravě a později i postupný nárůst elektromobility
- podíl výroby soustav zásobování teplem z domácích zdrojů minimálně 70 % (jádro, uhlí, OZE, druhotné zdroje a odpady), teplo z KVET a OZE vč. tepelných čerpadel na celkové spotřebě tepla minimálně 60 %
- dosáhnout maximalizace energetického využití druhotných zdrojů energie včetně vhodných průmyslových a komunálních odpadů
- prioritně podporovat přímé (termické) využití odpadů bez předchozí úpravy pro kogenerační systémy zásobování teplem v souladu s ochranou životního prostředí zejména ochranou ovzduší
- snížit ukládání biologicky rozložitelných komunálních odpadů v souladu s požadavky EU a zvýšit poplatky za skládkování. Výnosy ze zvýšených poplatků směřovat do podpory energetického využití odpadů, zejména na podporu hierarchie nakládání s odpady
- podporovat kogenerační výrobu energie z bioplynových stanic, které používají jako palivo biologicky rozložitelný odpad z využitelných částí komunálních a zemědělských odpadů a odpadů z potravinářského průmyslu.

(Státní energetická koncepce 2010-2030)

2.3 Vymezení kuchyňských odpadů mezi biologicky rozložitelnými odpady

Biologicky rozložitelné odpady (BRO) jsou významnou komoditou odpadů. Systém nakládání s touto skupinou odpadu řeší Realizační program České republiky pro biologicky rozložitelné odpady, který je začleněný do Plánu odpadového hospodářství.

Odpady biologického původu jsou v komunálním odpadu kvantitativně významnou skupinou odpadů a způsob nakládání s nimi může pozitivně nebo negativně ovlivnit základní složky životního prostředí.

Převážná část těchto odpadů je velmi vhodná k materiálnímu nebo energetickému využití. Biologicky rozložitelný komunální odpad je třeba separovaně sbírat a omezovat jeho ukládání na skládky, kde je zdrojem skleníkového plynu metanu a výluhů v průsakových vodách.

Biologický odpad je hnilobě podléhající, obvykle nevysušený odpad. Existují dva hlavní toky – zelený odpad z parků, zahrad, atd. a kuchyňský odpad. Zelený odpad obvykle obsahuje 50-60 % vody a více dřeva (lignocelulózy), kuchyňský odpad neobsahuje dřevo, ale až 80 % vody. (Zelená kniha, 2008)

Zelená kniha o nakládání s biologickým odpadem v Evropské unii definuje biologický odpad jako biologicky rozložitelný odpad ze zahrad a parků, potravinářský a kuchyňský odpad z domácností, restaurací, stravovacích a maloobchodních zařízení a srovnatelný odpad ze zařízení potravinářského průmyslu. Nezahrnuje odpady z lesního hospodářství a ze zemědělství, hnůj, kal z čistíren nebo jiné biologicky rozložitelné odpady, jako jsou např. přírodní textilie, papír nebo zpracované dřevo. Nezahrnuje ani vedlejší produkty výroby potravin, které se nikdy nestanou odpadem. (Zelená kniha, 2008)

Dle Katalogu odpadů zahrnuje komunální odpady tři podskupiny odpadů BRKO:

20 01 Složky z odděleného sběru (kromě odpadů uvedených v podskupině 15 01)

20 02 Odpady ze zahrad a parků (včetně hřbitovního odpadu)

20 03 Ostatní komunální odpady.

Za biologické odpady z těchto podskupin lze považovat tyto odpady:

20 01 08 – Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven

20 01 25 – Jedlý olej a tuk

20 01 38 – Dřevo neuvedené pod číslem 20 01 37

20 02 01 – Biologicky rozložitelný odpad

20 03 02 – Odpad z tržišť

20 03 04 – Kal ze septiků a žump

Kuchyňský odpad patří mezi BRKO. Pod pojmem kuchyňský odpad se rozumí veškeré odpady potravin pocházející z restaurací, stravovacích zařízení a kuchyní, včetně centrálních kuchyní a domácích kuchyní. Tento odpad z kuchyní a stravoven se zařídí dle vyhlášky č. 381/2001 Sb. (Katalog odpadů) jako odpad katalogového čísla 20 01 08 Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven a v místě vzniku s ním bude nakládáno v režimu zákona o odpadech č. 185/2001.

2.4 Legislativa a možnosti nakládání s kuchyňským odpadem

2.4.1 Stručná historie legislativního vývoje odpadového hospodářství

První norma, která upravovala nakládání s odpady, byla vydána v Československu v roce 1940. Jednalo se o vládní nařízení č. 29/1940 Sb., o hospodaření s odpadky.

První zákon o odpadech pochází z roku 1991. Byl to zákon č. 238/1991 Sb., o odpadech s účinností od 1. 8. 1991. Tímto právním předpisem byly poprvé systematicky stanoveny povinnosti původců odpadů.

Z důvodu přijetí ČR do OECD (21. 12. 1995) a přípravy na vstup do EU vyvstala nutnost provést změny, které by respektovaly požadavky ochrany ŽP, požadavky rozvinutého tržního prostředí a nutnost postupné harmonizace s předpisy OECD a EU. V důsledku toho byl vydán zákon o odpadech č. 125/1997 Sb. Aby legislativa odpadového hospodářství ČR odpovídala skutečným praktickým potřebám a byla v souladu s právem Evropské unie (zahrnující vyjednaná přechodná období) vstoupil dne 1. 1. 2002 v platnost nový zákon o odpadech. Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších změn, je až do současnosti základním právním předpisem pro oblast odpadového hospodářství. Tímto zákonem jsou stanovena pravidla pro předcházení vzniku odpadů a pravidla nakládání s nimi. Dále stanoví práva a povinnosti osob v odpadovém hospodářství a působnost orgánů veřejné správy. Ke dni 20. 6. 2013 byl 34x novelizován, především v souvislosti se vstupem České republiky do Evropské unie (1. 4. 2004) a implementací nových směrnic do české legislativy. Mezi „problémové“ oblasti, které se dočkaly nejvíce změn, patří také nakládání s bioodpady.

Cíle Evropského společenství v odpadovém hospodářství jsou definovány v řadě koncepčních dokumentů. Pro tuto práci je nutno jmenovat především VI. akční plán pro životní prostředí, který vymezuje cíle komunitární environmentální politiky pro období 2002 až 2012. Na jeho základě Evropská komise připravila sedm tematických strategií, které pokrývají sedm environmentálních oblastí a jejich legislativní rámec. Odpadového hospodářství se týká strategie s názvem: Tematická strategie pro předcházení vzniku odpadů a jejich recyklaci. Byla předložena Evropskou komisí dne 21. prosince 2005. Cílem strategie je indikovat způsob prevence vzniku odpadu a podporu recyklace

v členských státech a navrhnout příslušná opatření. Strategie formuluje přístup k životnímu cyklu výrobků, který nezohledňuje pouze znečištění způsobené jejich odpady, ale přístup, který snižuje negativní vlivy na životní prostředí související s využíváním přírodních zdrojů, a to prostřednictvím předcházení vzniku odpadů, jejich využívání formou opětného užití, recyklace a ostatních operací využití. Návrh strategie formuluje vizi Evropy jako „recyklující společnosti“ Navrhuje též zjednodušení odpadové legislativy. (Politika životního prostředí EU, 2006)

2.4.2 Legislativa a možnosti nakládání s kuchyňským odpadem

Kuchyňský odpad patří mezi BRO a potenciální surovinu pro materiálové a energetické využití. Pod pojmem kuchyňský odpad se rozumí veškeré odpady potravin pocházející z restaurací, stravovacích zařízení a kuchyní, včetně centrálních kuchyní a domácích kuchyní. V Katalogu odpadů je zařazen jako organický kompostovatelný kuchyňský odpad, proto je nutné s ním zacházet v souladu se zákonem o odpadech č. 185/2001. Tento zákon stanovuje možnosti a hierarchii nakládání s BRO. Nakládání s kuchyňským odpadem se řídí těmito hlavními legislativními předpisy:

- zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech ve znění pozdějších předpisů,
- vyhláška č. 381/2001 Sb., Katalog odpadů, ve znění pozdějších předpisů,
- vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady, ve znění pozdějších předpisů.

Vyhláška č. 341/2008 Sb. uvádí seznam bioodpadů využitelných v různých zařízeních pro jejich zpracování a zjednodušuje podmínky pro provoz zařízení ke zpracování BRO. Stanovuje například technologické požadavky na kompostárny a bioplynové stanice podle kapacity a typu těchto zařízení a podle druhu zpracovávaných odpadů. To přináší možnost využít výstupy z těchto zařízení (pocházející z bioodpadů) mimo režim zákona o hnojivech. Tato vyhláška tak rozšiřuje možnosti používání výstupu z procesů aerobního a anaerobního rozkladu oproti předchozímu stavu. Zařízení musí být také provozováno v souladu se zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší.

Pro výstupy ze zařízení využívající BRO jsou závazné:

- vyhláška č. 131/2014 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv
- zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd, ve znění pozdějších předpisů

Tento zákon zavádí povinnost registrace pro veškeré digestáty vyráběné použitím odpadů (např. kaly, vedlejší živočišné produkty), včetně těch, které nejsou uváděny do oběhu. Cílem je zlepšení technologické kázně bioplynových stanic, které by mělo vést zejména ke snížení rizika pro půdu, potravní řetězec a omezení pachové zátěže okolí.

- vyhláška č. 504/2004 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě

Kuchyňské odpady mohou mít také charakter vedlejších produktů živočišného původu. Pro ně je nutno zohlednit tato nařízení:

- nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 1069/2009 Sb., o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě, a o zrušení nařízení č. 1774/2002, kterým se stanoví hygienická pravidla týkající se vedlejších produktů živočišného původu, které nejsou určeny k lidské spotřebě

Cílem Nařízení je především zabránit, aby se vedlejší živočišné Produkty, které byly vyhodnoceny jako nevhodné pro lidskou spotřebu, nedostaly do potravinového a krmivového řetězce a nemohly tak představovat riziko pro zdraví lidí a zvířat.

- prováděcí předpis k tomuto nařízení v podobě nařízení Komise č. 142/2011 kterým se provádí nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009

o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě, a provádí směrnice Rady 97/78/ES, pokud jde o určité vzorky a předměty osvobozené od veterinárních kontrol na hranici podle uvedené směrnice

- zákon č. 332/2008 Sb., veterinární zákon
- vyhláška č. 291/2012 Sb., kterou se mění vyhláška č. 94/2010 Sb., o některých veterinárních a hygienických požadavcích na přepravu a zpracování vedlejších živočišných produktů
- vyhláška č. 289/2007 Sb., o veterinárních a hygienických požadavcích na živočišné produkty, které nejsou upraveny přímo použitelnými předpisy Evropských společenství.

Pro použití kuchyňských odpadů jako paliva jsou závazné tyto předpisy:

- zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie
- energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů)
- Vyhláška č. 477/2012 Sb., o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchování dokumentů

Pro nakládání se zbytky z jídelen a kuchyní jsou klíčové dvě normy, a to Nařízení č. 1069/2009 a Katalog odpadů. Nařízení stanoví hygienická pravidla týkající se VŽP, které nejsou určeny k lidské spotřebě. Vedlejší produkty živočišného původu spadají obecně pod působnost zákona č. 166/1999 Sb. veterinární zákon, resp. Nařízení a jeho prováděcího nařízení Komise č. 142/2011. Nařízení dělí živočišné materiály do tří skupin, přičemž kuchyňský odpad patří do třetí kategorie (čl. 6 odst. 1 písm. i) - zmíněná pravidla se netýkají domácností.

Vytříděný kuchyňský odpad z kuchyní, jídelen a stravoven řazený dle Katalogu odpadů pod číslem 20 01 08 mající rostlinný charakter (například zbytky zeleniny a ovoce), který nepřišel do kontaktu se surovinami živočišného původu (například se syrovým masem, syrovými produkty rybolovu, syrovými vejci nebo syrovým mlékem) nepodléhá nařízení č. 1069/2009 Sb. Jeho využití je řízeno vyhláškou č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky

č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Biologicky rozložitelný podíl komunálního odpadu ukládaný na skládky musí být postupně omezován v souladu s harmonogramem stanoveným v POH ČR a krajů a zakotveným v příloze č. 4 k vyhlášce č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu.

Dříve byla většina kuchyňského odpadu používána ke zkrmování hospodářskými zvířaty. Dnes se takto likvidovat nesmí. Zkrmování, s výjimkou kozešinových zvířat, odporuje zákonu č. 91/1996 Sb., o krmivech ve znění pozdějších předpisů a Nařízení EP a Rady (ES) č. 1069/2009, kterým se stanoví hygienická pravidla týkající se vedlejších živočišných produktů (VŽP), které nejsou určeny k lidské spotřebě. Zkrmovat lze pouze zmetkové potraviny, které nebyly v kontaktu s potravinami živočišného původu.

Správným řešením je ukládání zbytků kuchyňských odpadů v uzavřených kontejnerech a jejich předávání specializované firmě k odbornému odstranění.

Tyto odpady se někde, zvláště v jídelnách a restauračních zařízeních, také odstraňují za použití kuchyňských drtičů, kde se organické zbytky, které vzniknou při přípravě a po konzumaci jídla, rozmačkají na částičky o velikosti zrnka rýže. V drtiči je možno takto odstraňovat veškeré zbytky jídel a odpad z vaření, ale také papírové ubrousky. Naopak nelze drtit syrové maso, vláknité zbytky a anorganický odpad. Rozdrcený odpad je pak unášen odpadní vodou do příslušné čistírny odpadních vod. Vypouštění zbytků z jídelen, byť rozdrcených, do kanalizace, je nicméně v rozporu s §38 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách (dále Vodní zákon) ve znění pozdějších předpisů, a §18, odst. 2 zákona č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (Zákon o vodovodech a kanalizacích). Také je zakázáno ředění nebo mísení takových odpadů. Nejednalo by se totiž o vypouštění odpadních vod, ale o vypouštění odpadů do kanalizace. (Hřebíček et al., 2011)

2.5 Současná produkce a způsoby nakládání s kuchyňským odpadem v ČR ve srovnání s EU

Roční produkce kuchyňských odpadů ze stravovacích zařízení (gastroodpadů) v ČR byla v roce 2011 64 556 tun (dle Informačního systému odpadového hospodářství ISOH), což představuje $6,55 \text{ kg.osob}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. V sousedním Německu bylo v roce 2010 vykázáno 726 tisíc tun odpadů ze stravování, což představuje jednotkovou produkci $8,96 \text{ kg.osob}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ (Statistisches Bundestamt), z toho bylo z 99 % využito materiálově či energeticky a pouze 1 % těchto odpadů bylo odstraněno. V ČR bylo 66 % odpadů předáno jiné oprávněné osobě, 11 % kompostováno, 10 % odpadu využito jako paliva nebo k výrobě energie, 4 % odpadu k regeneraci organických látek a 3 % skládkovány.

Studie Evropské komise odhadovala roční produkci potravinového odpadu v EU-27 v roce 2006 na přibližně 89 Mt, tzn. průměr 179 kg.osob^{-1} . Konkrétně kuchyňský odpad pocházející ze stravovacích servisů/cateringu představoval přibližně 14 % z celku, tedy 12,3 Mt, tzn. průměrně 25 kg.osob^{-1} v EU-27. (Preparatory Study of Food Waste across EU 27)

Příloha 1 uvádí experimentálně změřenou produkci kuchyňského odpadu v šesti stravovacích provozech v ČR. Použitá data pocházejí z práce Aleše Komára z Katedry ekonomiky a hygieny výživy, VVŠ PV: „Odpady ve stravovacích provozech a vojenských zařízeních“ z roku 2001 a článku „Opad z provozu stravovacích zařízení“ publikovaném na internetovém portálu Jidelny.cz od Prof. Ing. Františka Božka, CSc. ve spolupráci s Alešem Komárem a Josefem Navrátilem z roku 2005. Srovnání šesti rozdílných stravovacích provozů ukazuje potenciál využití kuchyňských odpadů na bioplynových stanicích. Nejzajímavější statistickou hodnotou je množství vyprodukovaného odpadu na jednoho strávnicka v rozmezí 12,76-38,06 g s průměrnou hodnotou 24,03 g, od níž se příliš neliší 4 z 6 provozů. Na rozdílnou produkci kuchyňských odpadů ve stravovacích provozech má vliv i používání předem upravených potravin. Konvenientní kuchyně může produkovat až o 70 % méně odpadu.

Dle práce Komár, 2011 zkoumající restaurační provoz v centru Prahy je zde do odpadu vyhazováno přibližně 20 % z celkové hmoty zeleniny, 40 % z celkové hmoty

brambor a 10-15 % z celkové hmoty masa. Nedožedené zbytky tvoří přibližně 65 g na porci.

Na semináři Nakládání s kuchyňskými odpady a vedlejšími produkty živočišné výroby ve světle právních předpisů a praktických zkušeností, 8. 12. 2011 v Praze, prezentovala Ing. Ivana Svobodová (ČIŽP OI Praha, OOH) zkušenosti ČIŽP s kontrolou nakládání s kuchyňskými odpady. Za hlavní problémy s nakládáním označila:

- přetrvávající nezákonné zkrmování kuchyňských odpadů (nejen kožehřivými zvířaty a v zájmových chovech)
- kuchyňské odpady končí na skládkách (velká část těchto odpadů končí v komunálním odpadu (občané); odpady jsou přímo ukládány na skládky původci nebo oprávněnými osobami ke sběru odpadů)
- propagace drtičů kuchyňských odpadů.

Správný způsob nakládání s kuchyňskými odpady ve stravovacích zařízeních je důležitý z důvodů předcházení přenosným onemocněním a je upraven vyhláškou Ministerstva zdravotnictví č. 137/2004 Sb., o hygienických požadavcích na stravovací služby, ve znění pozdějších předpisů. Potravinářské odpady, vedlejší živočišné produkty a jiný odpad musí být odstraňovány z míst, kde se nacházejí potraviny. Kuchyňské odpady by měly být sbírány odděleně od ostatního komunálního odpadu. Odvoz obsahu kuchyňských lapolů se provádí sacími vozy a vhodnou formou využití tohoto odpadu je výroba bioplynu. V podmínkách ČR se často odpady ze stravovacích zařízení ukládají do sběrných nádob na směsný komunální odpad a jsou tak odstraňovány za nižší náklady než při předávání separovaných kuchyňských odpadů firmě specializované na jejich sběr a zpracování. Tento postup je v rozporu se zákonem o odpadech (povinnost odpady shromažďovat odděleně a přednostního využití odpadů). Za největší hrozby v nakládání s kuchyňskými odpady je považováno mísení odpadů se směsným komunálním odpadem. Za slabé stránky nízká produkce u původce odpadu, která nemotivuje k zavádění odděleného sběru. (Draft: Plán odpadového hospodářství České republiky na období 2013 – 2022)

Statistická data ohledně produkce odpadu 20 01 08 na území ČR budou pravděpodobně výrazně ovlivněna neúplnou evidencí odpadu, pravděpodobně

u samotných původců odpadu. Taktéž velké odchylky v produkci tohoto odpadu mezi státy EU naznačují rozdílnou kvalitu sběru dat.

Kontrolními orgány nakládání s odpadem 20 01 08 jsou Česká inspekce životního prostředí, krajský úřad příslušného kraje, obecní úřad obce s rozšířenou působností, obecní a újezdní úřad.

Evropská směrnice o odpadech 2008/98/ES zavádí se pětistupňovou hierarchie pro nakládání s odpady, přičemž členské státy jsou povinny zajistit, aby všechny odpady prošly stupněm využití, tj. materiálovým nebo energetickým. Teprve jestliže odpady není možno využít jedním z těchto způsobů, je třeba je bezpečným způsobem odstranit.

Hierarchie nakládání s odpady:

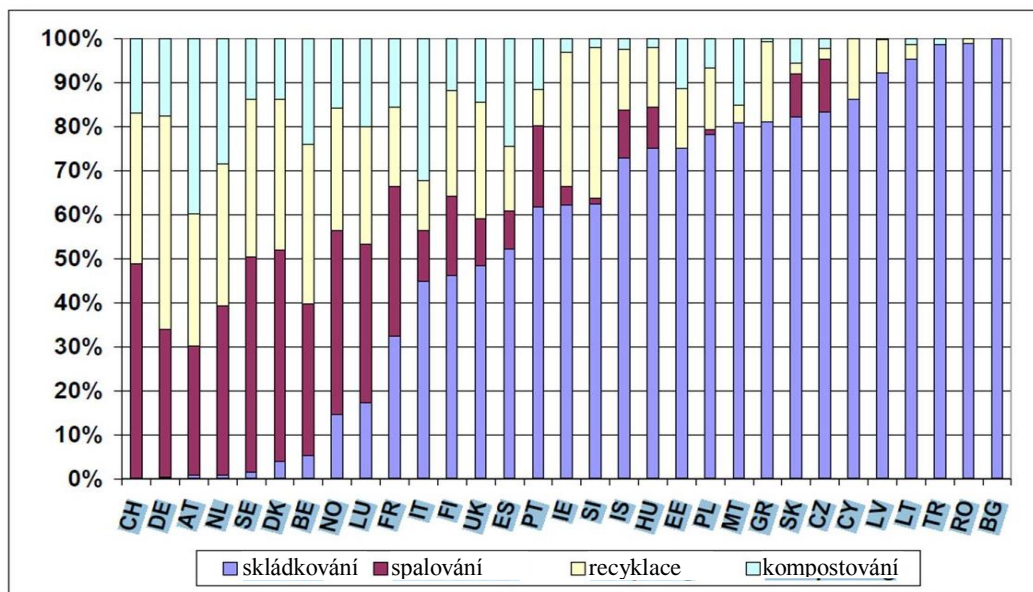
1. Předcházení vzniku dopadů.
2. Opětovné použití.
3. Materiálové využití.
4. Jiné využití (např. energetické).
5. Odstranění.

Pan Ing. Jaroslav Váňa CSc. (2011) z Výzkumného ústavu rostlinné výroby v Praze se domnívá, že k zajištění ekologického nakládání s odpady ze stravování je nutné zorganizovat provozovatelům stravovacích zařízení službu odvozu těchto separovaných odpadů buď podle dohodnutého harmonogramu, nebo na výzvu. Tato služba by měla být spojena s mytím a dezinfekcí nádob a průběžným zajišťováním dokladů pro evidenci odpadů. Firma zajišťující službu musí zabezpečit i ekologické využití odpadů ze stravování. Za neekologické je třeba označit postupy spalování odpadů ze stravování společně se SKO nebo odstraňování těchto odpadů na skládkách. Poté, co provozovatelé stravovacích zařízení budou mít možnost výše uvedenou službu využívat, je třeba systematicky odstranit nezákonné a ekologicky nevhodné způsoby nakládání s odpady ze stravování.

Obr. 3 zobrazuje nakládání s komunálním odpadem ve státech EU v roce 2010. Vyspělé státy západní Evropy nakládají s komunálním odpadem zcela rozdílně než ČR. Prioritu by měla mít recyklace, materiálové a energetické využití a minimální skládkování. Zařízení na energetické využívání odpadů by mělo zpracovávat takový zbytkový komunální odpad, který není možné látkově využít. V číselném vyjádření

byla průměrná hodnota produkce komunálního odpadu v roce 2008 v EU-27 524 kg.osob⁻¹, v ČR 306 kg.osob⁻¹. Podíl skládkovaného komunálního odpadu byl 40 % v EU-27 a 83 % v ČR.

Obr. 3 Nakládání s komunálním odpadem v EU-27 v roce 2010



Zdroj: Eurostat

V ČR je 13 % komunálního odpadu spalováno pro energetické účely. Tři spalovny TKO (v Brně, Praze a Liberci) v roce 2009 spotřebovaly 360 tis. tun odpadu a vyrobily 18 237 MWh elektřiny a 2 764 583 GJ tepla. (Statistika energetického využívání odpadů 1905–2009)

2.6 Vhodnost technologií k nakládání s kuchyňskými odpady

Tato kapitola představuje několik vhodných technologií k nakládání s kuchyňskými odpady a prezentuje jejich současný stav ve vztahu ke kuchyňskému odpadu. Není od věci již v úvodu této kapitoly zdůraznit, že rozšíření a využití kterékoliv technologie nezávisí pouze na jejím pozitivním vlivu na životní prostředí či dobré hospodárnosti provozu. K úspěchu je nezbytná také politická podpora a podpora místní správy, protože oblast energetiky a odpadového hospodářství je mimo jiné také silné politické téma.

Tato práce se zaměřuje na zpracování a využití biologicky rozložitelného odpadu, který pochází z restaurací, stravovacích zařízení a kuchyní a mělo by se s ním nakládat jako s vedlejšími živočišnými produkty podle nařízení ES č. 1069/2009, protože mohou představovat biologické riziko šíření patogenních organismů a infekčních onemocnění (např. mor prasat, kulhavka, slintavka, průjmová onemocnění). Tento odpad by měl být využíván či odstraňován v souladu s tímto nařízením ve speciálních zařízeních jako jsou kompostárny, bioplynové stanice či spalovny za splnění podmínek daných vyhláškou č. 341/2008 Sb. (netýká se odpadu rostlinného charakteru, který nepřišel do kontaktu se surovinami živočišného původu, a kuchyňských odpadů z domácností). Je zakázáno tento odpad drtit a vypouštět do kanalizace, stejně jako je zakázáno tradiční ale stále hojně využívané zkrmování. Protože kuchyňský odpad tvoří značnou část biologicky rozložitelných odpadů, je nutné tento odpad dále zpracovávat dle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. a je stanoveno jeho přednostní využití před odstraněním.

Z výše uvedeného vyplývá, že skládkování, zkrmování a vypouštění do kanalizace by mělo být nahrazeno procesy, které BRO nejenom odstraňují, ale přinášejí navíc materiální či energetický užitek. Mezi nejvýznamnější z procesů materiálového využití BRO patří kompostování a anaerobní fermentace (AF), z kategorie energetického využití lze aplikovat spalování nebo biologického dosoušení biomasy. Pro určení vhodnosti dané technologie pro zvolený druh odpadu, je nezbytné znát parametry suroviny jako jsou chemické složení, fyzikální vlastnosti, kvalita a kvantita odpadu, apod. Pastorek et al. (2004) zmiňuje vlhkost jako velmi důležitý parametr a udává hodnotu 50 % sušiny jako přibližnou hranici mezi mokrymi (např. metanové kvašení, alkoholové kvašení) a suchými procesy (spalování, zplyňování, pyrolýza).

Důležitou součástí úspěšného nakládání s odpadem je rozvoj systému odděleného sběru bioodpadu. J. Hřebíček a kol. v publikaci Projektování nakládání s bioodpady v obcích píše o čtyřech hlavních důvodech pro oddělený sběr a využití BRKO v obci: environmentální, agronomický, ekonomický a legislativní důvod.

a) Hlavním environmentálním důvodem pro odklon BRKO ze směsného komunálního odpadu je minimalizace skládkování těchto odpadů a s ním spojených úniků skládkového plynu, zápachu a výluhů v průsakových vodách.

b) Druhým podstatným důvodem, který hovoří pro zavedení systému odděleného sběru a využívání BRKO, je skutečnost, že většina zemědělských půd v České republice trpí nedostatkem organické hmoty a také neustále klesajícím množstvím základních živin, zejména fosforu a draslíku (Odpad nebo hnojivo: možnosti řešení, 2009). Tento stav je v současnosti řešen navyšováním množství minerálních hnojiv aplikovaných do zemědělské půdy, což je následováno splachem těchto materiálů (obsahujících dusičnany, sírany a fosforečnany) do povrchových vod. Vzhledem k tomu, že BRKO je vhodnou surovinou pro výrobu kompostu, lze výše uvedený problém řešit právě výrazným zvýšením množství produkovaného kompostu z BRKO a jeho aplikací do zemědělských půd na úkor BRKO ukládaných na skládky.

c) Při vhodně zvolené strategii zavádění systému odděleného sběru a využití BRKO může být pro obec významný třetí motiv, kterým je ekonomický přínos plynoucí z provozu zařízení na využívání BRO. Finanční motivací je úspora ze snížení množství směsného KO, a tedy celkové částky, kterou musí obec platit svozové firmě za zpracování odpadu. Prodej kompostu coby kvalitního hnojiva, stejně jako energetické využití odpadu zpracovávaného v bioplynových stanicích pro výrobu elektřiny a tepla, jsou často nezanedbatelnými příjmovými položkami v hospodaření obce v případě, že je provozovatelem tohoto zařízení.

d) Čtvrtý důvod plyne přímo z legislativy, konkrétně z Evropské směrnice 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999, o skládkách odpadů, implementované vyhláškou č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, která se promítla do POH ČR i krajů požadavkem na snížení množství BRKO ve směsném KO a jeho ukládání na skládky.

2.6.1 Kompostování

2.6.1.1 Stručná charakteristika metody

Jedná se o nejlevnější a nejjednodušší metodu na zpracování BRO. Jde o biologický proces využívající biochemickou aktivitu mikroorganismů v aerobním prostředí. Efektivní a rychlý proces rozkladu vyžaduje řízený přívod vzduchu. Kompostování je vhodné pro odpady zejména rostlinného původu (biologické odpady), s obsahem sušiny 40-60 %. Poměr C:N u čerstvě založeného kompostu by se měl pohybovat v rozmezí (20 až 40):1. Výsledným kompostem lze nahradit konvenční minerální hnojiva. Kompostování je navíc přínosné pro zabezpečení koloběhu uhlíku v přírodě, proces obnovy a zlepšení úrodnosti půdy nebo hygienizaci prostředí.

2.6.1.2 Současný stav využití a odhadovaný vývoj

Zákaz využívání kuchyňských odpadů pro některé tradiční metody nakládání vzbudil silnou nevoli. Současná legislativa ale nezakazuje používání kompostování zcela, jen vyčleňuje část KO, pro které je metoda z hygienických důvodů zakázána. Odpad mající rostlinný charakter, který nepřišel do kontaktu se surovinami živočišného původu, lze nadále kompostovat, jen je potřeba zvážit parametry odpadu, především vlhkost KO. V Evropě můžeme najít řadu obrovských kompostáren zpracovávající kuchyňský odpad, nejčastěji v kombinaci se zahradními odpady. Je-li odpad kontaminován cizorodými látkami nebo jinými nevhodnými příměsi, nabízí se kombinace AF s hygienizací a následným kompostováním. Tento model se ukazuje i z ekonomického pohledu efektivní. Velké kombinované zpracovny bioodpadu s bioplynovou stanicí a kompostárnou můžeme najít v mnoha evropských zemích.

Od roku 2011 jsou také KO z domácností vyčleněny z kategorie VŽP (vedlejší živočišný produkt) a je možno s nimi nakládat jako s běžnými bioodpady. Především na vesnicích, tak bude dobrým individuálním řešením pro zpracování KO domácí kompostování, které je z hlediska legislativy považováno za předcházení vzniku odpadu. To má z hlediska hierarchie odpadového hospodářství nejvyšší prioritu a mělo by být upřednostňováno. Proto jsou v obcích často realizovány programy na podporu domácího kompostování.

Různé situace kompostování KO z hlediska legislativních předpisů osvětluje Hanák (2013). V rámci komunitního kompostování není možné nakládat se zbytky z restauračních zařízení či domácností. K tomu slouží obcím jiné nástroje. Běžné jsou také jiné způsoby kompostování nebo nakládání s bioodpadem. Podléhají však odlišné právní regulaci. Oddělený sběr kuchyňského odpadu je tak nakládáním s odpadem, zatímco zpracování rozložitelného odpadu přímo v domácnostech není nijak regulováno, probíhá zcela mimo systém nakládání s komunálním odpadem a z tohoto pohledu se skutečně jedná o předcházení vzniku odpadu. Tato pravidla musí obce respektovat. Řada obcí přitom úspěšně zavedla mnohem velkorysejší systémy sběru a využívání odpadu, kdy jsou sbírány také zbytky ovoce a jídla z domácností. V tomto případě se však již nejedná o komunitní kompostování a s obsahem nádob musí být nakládáno jako s odpadem. Z pohledu obyvatel tyto administrativní rozdíly nejsou postřehnutelné. Vznikají však složité interpretační problémy právního charakteru.

2.6.2 Anaerobní fermentace

2.6.2.1 Stručná charakteristika metody

Anaerobní fermentace (AF), anaerobní digesce či anaerobním vyhníváním je kontrolovaný mikrobiální rozklad organických látek v anaerobním prostředí za vzniku bioplynu a digestátu, který lze využít na půdě jako hnojivo. Bioplyn z bioplynových stanic (BPS) se používá k výrobě tepla, tepla a elektřiny zároveň (kogenerace) nebo tepla, elektřiny a chladu (trigenerace). AF je kombinací energetického a materiálového využití odpadu. Technologie pro AF má mnohem vyšší investiční náklady než kompostování. Jedná se především o reaktor, dopravníky odpadu, zařízení na čištění plynu, kogenerační jednotky nebo čištění odpadních vod. Produkce energie ze spalování bioplynu produkovaného při AF organického odpadu je dle směrnice Rady 2001/77/EC (o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů) klasifikována jako obnovitelná energie, což vede k jejímu zvýšenému využívání. Stavby BPS jsou často podporovány EU či státem.

2.6.2.2 Současný stav využití a odhadovaný vývoj

Anaerobní fermentaci bude v této kapitole věnován větší prostor. Ačkoliv se dá tato technologie považovat za tradiční, prověřenou a široce rozšířenou, tak tenhle závěr se rozhodně nedá říci o prostředí, ve kterém se má prosadit. Během posledních let se několikrát změnila podmínky investiční i provozní podpory, byly upraveny legislativní požadavky pro vstupní i výstupní materiály a AF se uplatňuje i mimo zemědělství. Je využívána od zpracování různých komunálních odpadů až po cíleně pěstovanou biomasu. Tohle vše staví před AF stále další výzvy nebo překážky.

Velká část kapitoly je také věnována vývoji dotační politiky v ČR a Německu, jakožto světovému vůdci v rozvoji této technologie. Nastavení ekonomické podpory má velký vliv na realizovatelnost BPS a souvisí s 1. hypotézou práce, jak bude potvrzeno v kap. 5 Výsledky a diskuze.

Dle materiálu projektu BiogasIN s názvem „Rozvoj udržitelnosti trhu s bioplynem ve Střední a Východní Evropě“ je výroba bioplynu prostřednictvím AF v moderní společnosti široce využívána při zpracování kalů a statkových hnojiv. Cílem je nejen vyrábět obnovitelnou energii, ale také zlepšit hnojivý účinek výstupního digestátu. V zemích s významnou zemědělskou tradicí se zvyšuje zájem o AF jako o způsob nakládání se statkovými hnojivy, recyklaci rostlinných odpadů, řešení levné a současně přátelské k životnímu prostředí. Poslední vývoj v Evropě, USA a dalších částech světa ukazuje na rostoucí zájem farmářů o pěstování energetických plodin využívaných jako vstupní suroviny pro výrobu bioplynu. AF je dnes standardní technologií pro stabilizaci čistírenských kalů, pro zpracování organického průmyslového odpadu z potravinářských a kvasných průmyslových odvětví, stejně tak jako pro zpracování organické frakce tuhého komunálního odpadu. Specifickým případem je využití bioplynu ze stávajících skládek.

Evropský sektor výroby a využití bioplynu čítá již tisíce bioplynových instalací. Největší počet moderních bioplynových stanic mají země jako Německo, Rakousko, Dánsko a Švédsko, které patří mezi technické průkopníky tohoto oboru.

V současnosti existují tři hlavní typy produkce bioplynu v Evropě: skládky (35,9%), ČOV (městské i průmyslové, 12,1%) a účelově navržené BPS (52%).

V Číně se odhaduje kolem 18 milionů venkovských domácích zařízení výroby a využití bioplynu (v roce 2006), a celkový čínský potenciál výroby bioplynu je odhadován na 145 miliard kubických metrů, a například v Indii je v současnosti kolem 5 milionů BPS malého (domácího) rozsahu. Další země, jako Nepál nebo Vietnam, mají také značné množství bioplynových instalací velmi malého, rodinného rozsahu. Většina zařízení výroby a využití bioplynu v Asii využívá velmi jednoduché technologie, které je snadné konstruovat i rozšiřovat. Tyto technologie však nesplňují technické a bezpečnostní normy kladené na technické výrobky a zařízení v Evropě, nebo USA.

Na druhé straně Atlantiku, USA, Kanada a mnoho států Latinské Ameriky, se vydalo cestou rozvoje moderních instalací výroby bioplynu. Příznivé politické podmínky tento trend podporují. Výzkum a získávání potřebných zkušeností probíhá v současné době všude na světě. Hlavním cílem výzkumu je zdokonalovat technologii přeměny biomasy, provozní i procesní stabilitu, výkon a energetickou efektivitu zařízení. Průběžně jsou vyvíjeny a testovány nové fermentory, nové kombinace vstupních substrátů, plnicích systémů, skladovacích zařízení i dalšího vybavení.

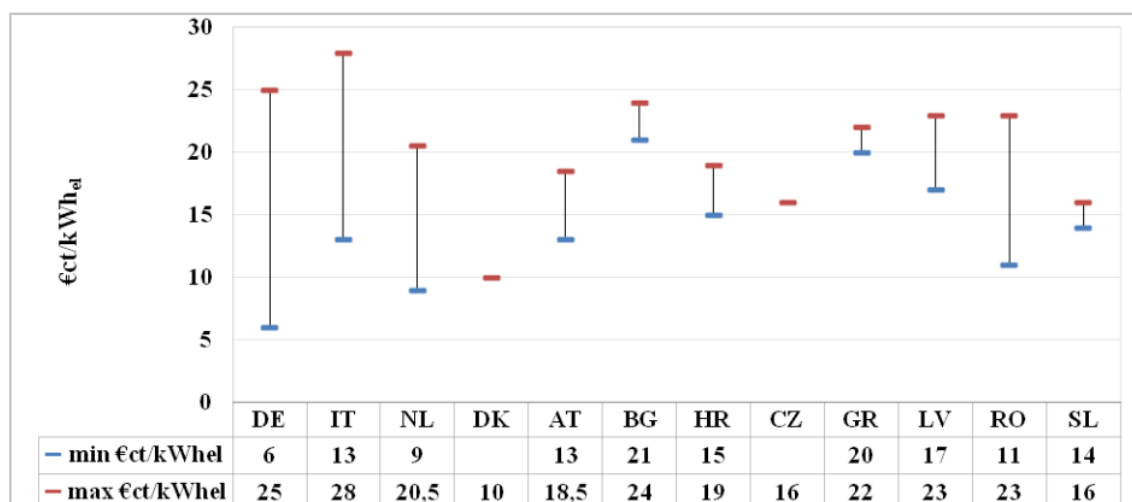
Vedle tradičních druhů vstupních surovin se v některých zemích využívají také cíleně pěstované energetické plodiny. Současný výzkum je zde zaměřen na zvyšování produktivity a rozmanitosti energetických plodin a hodnocení jejich potenciálu pro získávání bioplynu.

Využití bioplynu pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny je typické hlavně pro moderní technologie v Evropě. Bioplyn je také čištěn a zušlechťován na kvalitu zemního plynu. Následně je využíván v dopravě jako obnovitelné palivo (např. Švédsko, Švýcarsko, Německo), kde fungují sítě tohoto upgradovaného bioplynu (biometanu) a plnicí stanice. Úprava bioplynu na biometan, a jeho vtlačení do sítí zemního plynu je relativně novým řešením, ale nové instalace se rozšiřují poměrně rychle (např. Německo, Švédsko, Nizozemí, Rakousko). (Seminář pro administrativní sektor o realizaci projektů výroby a využití bioplynu, 2011)

Německo je zemí, které udává rozvoj bioplynové technologie v Evropě. Vyhlášení zákona o podpoře obnovitelných zdrojů energie (OZE) nastartoval obrovský rozvoj BPS. V České republice byla s časovým odstupem po vzoru Německa nastavena také státní podpora výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie zákonem č. 180/2005

Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů (od 1. ledna 2013 nahrazen zákonem č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie), tj. energie větru, slunečního záření, geotermální energie, vodní energie, energie půdy, vzduchu, biomasy, skládkového plynu, kalového plynu a bioplynu. Obr. 4 zobrazuje porovnání výše výkupních cen pro elektřinu vyráběnou spalováním bioplynu v BPS v několika evropských zemích. Itálie s cenou až 28 ct.kWh^{el} zaručuje nejvyšší cenu mezi "zeměmi BiogasIN". Nejnižší cena se platí v Německu, ale to platí pouze pro část elektřiny vyrobené prostřednictvím bioplynových stanic s kapacitou vyšší než 5 MWel instalované kapacity. (Mechanismy financování bioplynových projektů ve střední a východní Evropě, 2012)

Obr. 4 Srovnání výkupních cen pro elektřinu vyráběnou spalováním bioplynu v BPS (v období 2010-2012)

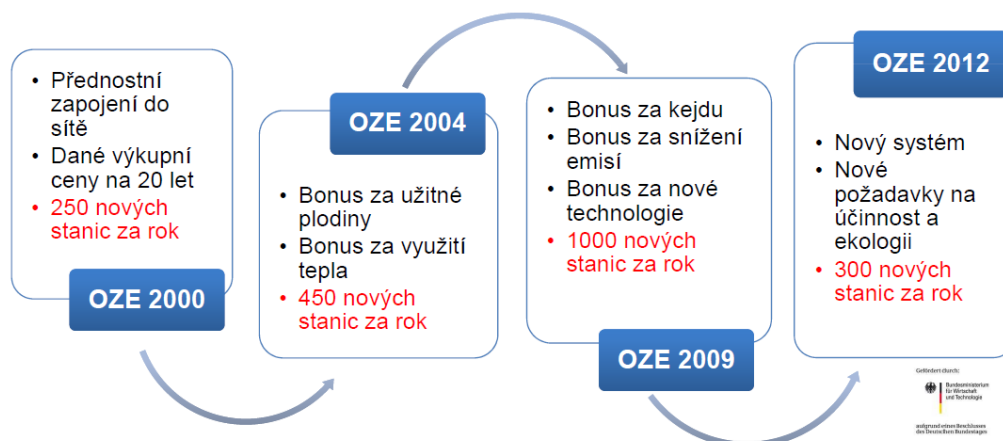


Zdroj: Mechanismy financování bioplynových projektů ve střední a východní Evropě, 2012

Německá podpora OZE byla naposledy změněna zákonem č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie, s platností od 1. 1. 2013.

Obr. 5 prezentuje hlavní změny německého systému EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) čili podpory výroby elektřiny z OZE. Jsou vyzdviženy hlavní body související s výrobou bioplynu, které měly za cíl v různých obdobích vývoje motivovat k vládou preferovaným cílům.

Obr. 5 Vývoj zákona o podpoře OZE v Německu (období 2000-2012)



Zdroj: Friedl, 2013

Podpora OZE často přivodí i nezamýšlené negativní efekty. Zákon z roku 2009 způsobil několik problémů:

- 1) Konkurenci k výrobě potravin a krmiv díky kombinaci bonusu za kejdu s bonusem „NawaRo“
- 2) Zvýšené pěstování monokultur
- 3) Plynné emise ze skládek digestátu
- 4) Neúčinný provoz zařízení

Zdroj: Friedl, 2013

Zákon z roku 2012 usiluje o:

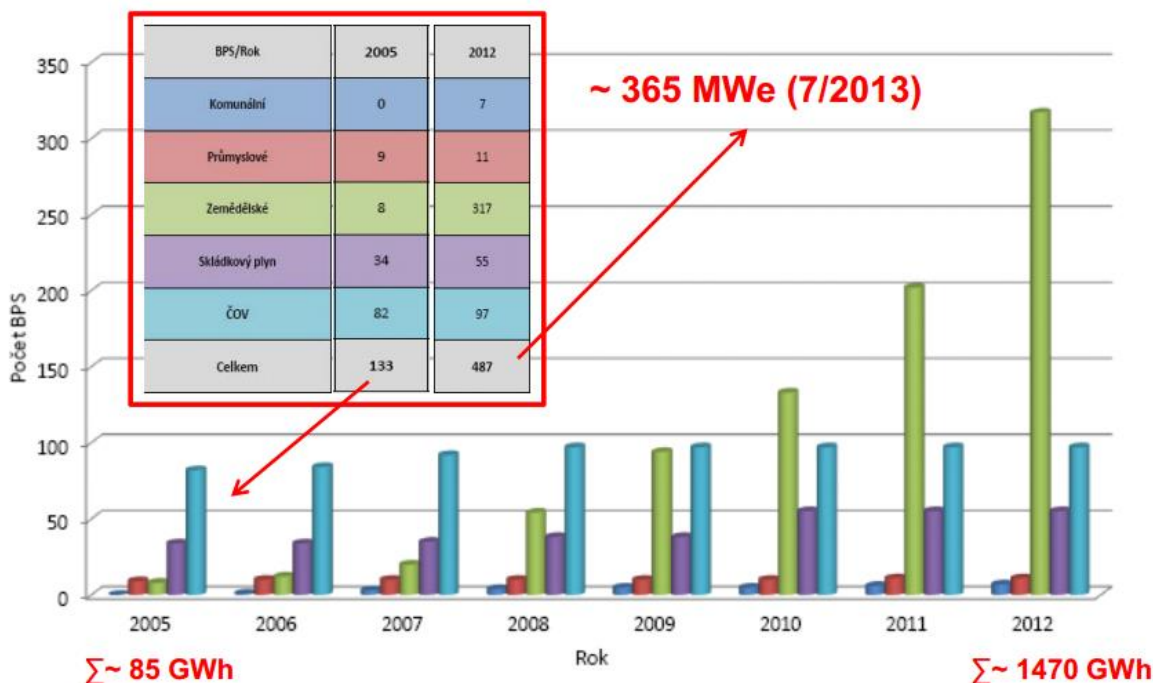
- 1) specializovaný přímý prodej el. energie jako kompenzaci k nerovnoměrné výrobě el. energie ze slunce a větru
- 2) vyšší využití tepla při kogeneraci (celoroční tepelná koncepce)
- 3) zušlechťování plynu a připojení na rozvodnou síť zemního plynu
- 4) malé bioplynové stanice na kejdu (snížení skleníkového efektu v zemědělství)
- 5) bioplynové stanice zpracovávající z 90 % bioodpad

Zdroj: Friedl, 2013

Na Obr. 6 je znázorněn vývoj počtu BPS v ČR za období 2005-2012, kdy došlo k výraznějšímu rozvoji. Počet zemědělských BPS vzrostl z 8 na 317, počet komunálních z 0 na 7. Ale při srovnání počtu BPS na rozlohu země připadalo v ČR

v roce 2012 na jednu BPS 158 km², v Německu 45 km².BPS⁻¹. V ČR je tedy 3,5 krát nižší hustota BPS než v Německu.

Obr. 6 Počet BPS dle druhu, Česká republika, období 2005 - 2012



Zdroj: Voříšek, 2013

V České republice je doposud realizováno pouze několik projektů bioplynových stanic (BPS) zpracovávajících biologicky rozložitelné odpady (BRO), včetně bioodpadů z komunální sféry). Hlavním důvodem nízkého počtu těchto zařízení v počtu několika kusů, oproti zemědělským aplikacím počítajícím se na desítky, lze hledat především v:

- nerozvinutém sektoru odpadového hospodářství v oblasti biologicky rozložitelných odpadů
- obtížné vymahatelnosti práva v oblasti odpadového hospodářství
- komplikovanému kompetenčnímu rozdělení mezi krajskými úřady a krajskými veterinárními správami u některých bioodpadů
- zatím nízkým cenám za zpracování/využití bioodpadů
- vysokým, více než dvojnásobným investičním nákladům oproti zemědělským bioplynovým stanicím
- nižší výkupní ceně za vyrobenou elektrickou energii v kategorii AF2
- omezené dotační podpoře

- přísným podmínkám v oblasti registrace digestátů jako organických hnojiv.

(BIOODPAD – BIOPLYN – ENERGIE, 2009)

Zásadní rozdíly v hospodaření u zařízení BPS provozovaných v západní Evropě a u nás jsou především v ceně za likvidaci bioodpadů a v možnosti uplatnění výstupního materiálu. Poplatek za využití odpadu v BPS se u běžného komunálního BRKO pohybuje mezi 30 – 40 €·t⁻¹, což při ceně 28 korun za euro znamená cenu cca 840–1120 Kč·t⁻¹. V České republice jsou pak příjmy za zpracování těchto odpadů poloviční až třetinové. (Výstavba komunálních bioplynových stanic s využitím BRKO, 2009)

Podíl bioplynu na celkové výrobě elektrické energie v České republice v letech 2012 a 2013 byl 1,6 % a 2,6 %. Meziročně došlo k růstu 63 %.

V roce 2011 dosáhla výroby el. energie z bioplynu 932 GWh, čímž překročila limit stanovený Národním akčním plánem pro rok 2013. Překročení této hodnoty bylo jedním z důvodů pro rozhodnutí vlády a parlamentu ČR k ukončení stávajícího modelu podpory výroby elektřiny. Pro BPS uvedené do provozu od 1. ledna 2014 nestanovil ERÚ provozní podporu elektřiny přes výkupní ceny definované ERÚ. (Energetický regulační věstník, 3/2013)

BPS uvedené do provozu od 1. ledna 2014 budou nově podporovány tzv. doplňkovým zeleným bonusem (k základnímu zelenému bonusu) za výrobu elektřiny v tzv. vysokoúčinné kombinované výrobě elektřiny a tepla (KVET). Definici vysokoúčinné KVET upřesňuje v ČR vyhláška č. 453/2012 Sb. o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů.

Hlavními důvody změn v podpoře OZE jsou dle vyjádření ERÚ:

- soulad s Českou a Evropskou legislativou
- soulad se Státní energetickou koncepcí
- podpora malých decentrálních zdrojů – vznik nové kategorie do 200 kW_{el}
- podpora velkých vysoce efektivních zdrojů, nová hranice nad 5 MW_{el} s ÚPE nad 15%
- podpora zdrojů, které jsou vysoce efektivní a jsou šetrné k životnímu prostředí.

Výše podpory BPS podle data zprovoznění:

- a) Výkupní ceny vyrobené elektřiny v BPS zprovozněných do 31. 12. 2012 a od 1. 1. 2013 jsou uvedeny v Tab. 3:

Tab. 3 Výkupní ceny vyrobené elektřiny v BPS dle data zprovoznění

Zdroj	Výkupní cena 2012 (Kč.kWh ⁻¹)	Výkupní cena 2013 (Kč.kWh ⁻¹) dle metodiky prosté návratnosti
BPS do 550 kW vč. od 1.1.2013	AF1 4,12 (AF2 3,55)	3,55
BPS nad 550 kW vč. od 1.1.2013	AF1 4,12 (AF2 3,55)	3,04

Zdroj: Energetický regulační úřad

- b) Provozní podpora využití tepla z BPS zprovozněných do 31. 12. 2012, od 1. 1. 2013 a od 1. 1. 2014:
- BPS zprovozněné do 31. 12. 2012 ve výši 45 Kč.MWh_{el,brutto}⁻¹, v případě stanic z roku 2012 navíc s požadavkem na využití tepla v úrovni min. 10 % ekvivalentu vyrobené el. energie netto, jinak snížení výkupní ceny o 570 Kč.MWh⁻¹.
 - BPS uvedené do provozu v roce 2013 pak motivace pro využití tepla doplňkovým bonusem za KVET ve výši 455 Kč.MWh_{el,brutto}⁻¹ (navíc k základnímu bonusu ve výši 45 Kč.MWh_{el,brutto}⁻¹).
 - BPS uvedené do provozu v roce 2014 doplňkový bonus za KVET ve výši 900 Kč.MWh_{el,brutto}⁻¹ (navíc k základnímu bonusu ve výši 45 Kč.MWh_{el,brutto}⁻¹).

Přípustné způsoby využití tepla jsou definované výkladovým stanoviskem ERÚ č. 3/2013.

Pro srovnání jsou uvedeny zákonné změny německého EEG, které přidělují nově od roku 2013 významnou podporu dosud méně rozšířenému typu BPS. Podpora je směřována především k rozvoji malých lokálních BPS do 75 kW_{el} při využití 80 % vstupní kapacity pro kejdu/hnůj. Dalším nově podporovaným typem jsou BPS s 90 % vstupní kapacity pro bioodpad (z kategorií 20 02 01, 20 03 01, 20 03 02). S instalovaným výkonem BPS klesá výše podpory. Zákon také předepisuje podmínky

týkající se využití tepla či doby zdržení digestátu ve fermentoru. Výše podpory je uvedena v Tab. 4.

Tab. 4 Výkupní ceny vyrobené elektřiny v BPS v Německu dle EEG 2012

Výkon	Základní výkupní cena	Příplatek – vstupní materiál kat. I	Příplatek – vstupní materiál kat. II	Příplatek za bioodpadu
Do 75 kW	25 ct.kWh ⁻¹	-		
Do 150 kW	14,3 ct.kWh ⁻¹	6 ct.kWh ⁻¹	8 ct.kWh ⁻¹	16 ct.kWh ⁻¹
150 – 500 kW	12,3 ct.kWh ⁻¹			

Pro rozvoj tohoto typu BPS je vysoká podpora v podstatě nutností. Jsou nuceny zpracovávat ne příliš výtěžný odpad a celkové investiční náklady při splnění všech legislativních požadavků se pohybují mezi 5000 – 8000 €. kW_{el}^{-1} . (Pro BPS o velikosti 150 – 500 kW_{el} se udává investice 3000-4000 €. kW_{el}^{-1} . (Pravidla financování projektů výroby a využití bioplynu v zemědělství, 2011))

Jiné doporučení udává velikost investičních nákladů zemědělských bioplynových stanic ve výši 100 – 130 tis. Kč. kW_{el}^{-1} instalovaného elektrického výkonu a pro komunální bioplynové stanice cca 200 tis. Kč. kW_{el}^{-1} (~7500 €. kW_{el}^{-1}). (Habart, 2008)

Na Německém trhu jsou již od konce roku 2012 v nabídce mnoha firem desítky různých konceptů BPS od 30 do 75 kW_{el} . Nabídka pokrývá téměř veškerá technická řešení – mezofilní či termofilní proces, horizontální či vertikální reaktory, diskontinuální i kontinuální, jednostupňové či dvoustupňové atd.

Dalším velkým tématem spjatým s rozvojem zemědělských i komunálních BPS je čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu a jeho vtlačení do rozvodné sítě zem. plynu. Toto využití je již řadu let ve velkém praktikováno ve Švédsko či Švýcarsku. Využití bioplynu v dopravě pak závisí ve značné míře na rozvoji zemního plynu mezi dopravními prostředky dopravě a hustotě čerpacích stanic pro CNG.

2.6.3 Spalování

2.6.3.1 Stručná charakteristika metody

Spalování odpadu s energetickým využitím skýtá řadu nevýhod v případě použití BRO jakožto paliva. Technologie spalování vyžaduje vysoký obsah sušiny v odpadu a nízký obsah škodlivin. Spalováním navíc vznikají skleníkové plyny (CO_2 , NO_x) a popel, který také vyžaduje odborné zneškodnění a v některých případech mohou vznikat toxické zplodiny. Spalováním BRO dochází také k znehodnocení živin, které jsou v odpadu obsaženy. Výstavba spalovny vyžaduje velké investiční prostředky. Nahrazením zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů, zákonem č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie, se na spalování komunálního odpadu (jež dle vyhlášky 477/2012 Sb. obsahuje 60 % biosložky) vztahuje od 1. 1. 2013 podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie.

2.6.3.2 Současný stav využití a odhadovaný vývoj

V České republice jsou v současnosti v provozu tři spalovny komunálního odpadu (Praha, Brno, Liberec). Ve všech se využívá komunální odpad pro výrobu energie.

Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2012 stanovuje:

- pro zařízení uvedená do provozu do 31. prosince 2012 výši zeleného bonusu na 680 Kč.MWh^{-1}
- pro zařízení uvedená do provozu od 1. ledna 2013 dokonce 1830 Kč.MWh^{-1} .

Spalování je v hierarchii nakládání s odpadem na čtvrté prioritě z pěti. Vzhledem k tomu, že ČR je oproti průměru EU-27 v nakládání s komunálním odpadem v recyklaci a kompostování velmi podprůměrná (viz tab. 5), měla by ČR směřovat podstatně větší úsilí také k rozvoji vyšších stupňů využití.

Tab. 5 Přehled nakládání s komunálními odpady v EU v roce 2008

	Produkce komunálních odpadů (kg/obyv.)	Skládkování (%)	Spalování (%)	Recyklace (%)	Kompostování (%)
EU27	524	40	20	23	17
Belgie	493	5	36	35	25
Bulharsko	467	100	0	0	0
Česká republika	306	83	13	2	2
Dánsko	802	4	54	24	18
Německo	581	1	35	48	17

Zdroj: Eurostat

Podmínkou pro energetické využití odpadu je dobrá hořlavost. Z hlediska hierarchie nakládání s odpadem by měl být spalován jen jinak nevyužitelný směsný komunální odpad nebo odděleně sbíraný odpad ze živností. Dobrým palivem jsou také velkoobjemové odpady. Velkoobjemový odpad tvoří většinou starý nábytek, koberce a další věci. Tyto odpady jsou zpravidla před vlastním energetickým využitím rozdrceny.

Mimo tři již fungující spalovny na území ČR, jsou v určitém stádiu příprav také projekty dalších spaloven, a to v Komořanech, Chotíkově a Karviné. Ačkoliv jsou spalovny plně funkční a díky pokročilým technologiím i ekologické řešení, představují ten nejnákladnější způsob zpracování komunálního odpadu. Počáteční investice do jejich výstavby se pohybuje v řádu miliard korun. Postoj EU k dotacím na spalovny KO v ČR se postupem času a s vývojem v EU mění, EU se chce do budoucna zaměřovat výrazně více na třídění a materiálové využití odpadů. (Havelka, 2013)

2.6.4 Biologické dosoušení biomasy

2.6.4.1 Stručná charakteristika metody

Jedná se o novou a málo prověřenou technologii, která využívá aerobní termofilní fermentaci separovaných gastroodpadů a rostlinné biomasy za účelem hygienizace a stabilizace produktu, který splňuje požadavky na biopalivo pro přímé spalování nebo spoluspalování s fosilními palivy. Technologie využívá nucené aerace substrátu

ohřátým vzduchem v hygienizačním boxu a je jí možno provozovat i na kompostárnách. Předpokládá se, že BDB (biologické dosoušení biomasy) biopaliva budou připravovány řízenou aerobní fermentací na provzdušňovaných základkách zemědělské biomasy a nejrozšířenějších biologicky rozložitelných odpadů, zejména stabilizovaných kalů z čistíren odpadních vod a digestátu z bioplynových stanic, které budou využity k iniciaci biologických procesů. Aerobní fermentace bude vedena v termofilním režimu, kdy se substrát může zahřívat až na teplotu kolem 70 °C, což zabezpečí hygienizaci a stabilizaci biopaliva vhodného k substituci hnědého uhlí v menších energetických zařízeních. Protokolárně ověřené zkoušky prokázaly, že navržená technologie zaručuje vlhkost BDB v rozmezí 26 – 28 % hm. a sledované znečišťující látky při spalování BDB na výstupu z kotle nedosáhly limitních hodnot dle NV č. 146/2007 Sb. příloha č. 4. (Váňa, 2011)

2.6.4.2 Současný stav využití a odhadovaný vývoj

Biologické dosoušení biomasy může být zajímavou alternativou ke kompostování a řešit dva časté problémy této technologie – nedostatečný odbyt kompostu do zemědělství a nutnost nakládat s odpady z veřejného stravování, jejichž předepsanou hygienizaci kompostování nezajišťuje. V článku Váňa (2012) je prezentováno využití BDB v kompostárně ve Slavičíně. Přivážené gastroodpady jsou upraveny na zrnitost 12 mm a namíchaný s naštěpkovanou nebo nařezanou lignocelulóзовou biomasou a směs je uložena v betonovém hygienizačním boxu a intenzivně aerována vřáněným vzduchem vstupujícím tryskami v podlaze boxu. Vzduch může být pro urychlení hygienizace ohříván. Hygienizovaná substrát se v důsledku termofilního aerobního fermentačního procesu sám zahřívá na teplotu vyšší než 70 °C a na této teplotě se udržuje po dobu delší než 1 hodina. Po provedené hygienizaci se substrát doplní o další bioodpady. Standardní kompost zraje na kompostárně cca 28 dnů. BDB je možno realizovat za 14 - 21 dnů. Na rozdíl od kompostování preferuje BDB surovinovou skladbu substrátu se širším poměrem C:N cca 50:1 a nižší startovací vlhkost pod 55 %. BDB může nahradit nedostatek biomasy pro energetické využití. Vzroste-li zájem o kompost, je snadné přejít z technologie BDB na klasické kompostování. (Váňa, 2012)

2.6.5 Mikrovlnná depolymerizace

2.6.5.1 Stručná charakteristika metody

Jedná se o novou hybridní technologii německé firmy Bionic Laboratories BLG GmbH. Proces vychází ze dvou rozdílných technologií: termální katalitické depolymerizace a mikrovlnné pyrolýzy. V roce 2013 byl představen první prototyp reaktoru. Schéma procesní linky je zobrazeno v příloze 2. Technologii lze využít jak ke zpracování anorganických, tak organických odpadů, ideálně do 10 % vlhkosti. Vstupní materiál je vysušen, homogenizován a upraven do standardizovaných pelet o rozměru 6 x 40 mm. Pelety jsou vloženy do reaktoru, kde jsou v inertní atmosféře vystaveny zdroji pulzních mikrovln o výkonu 480 kW. Jejich působením dochází k rapidnímu ohřevu molekul vody na 350 °C při podtlaku 0,4 barů a rozpadu organické struktury. V další fázi fungují uhlík a zeolitový katalyzátor jako silné mikrovlnné receptory usnadňující sérii štěpných reakcí vedoucích k rozpadu větších uhlovodíkových molekul. Odpařované uhlovodíky opouští reaktor do kondenzátoru, kde se hromadí kvalitní olejový produkt. Proces v reaktoru je suchý, tudíž nedochází k spékání ani ucpání. Vedlejším produktem je uhlovodíkový plyn, který je spalován v kogenerační jednotce. Z reaktoru je dopravníky odvážen práškový uhelný produkt. V případě bioodpadu včetně KO by měl produkt sloužit jako kvalitní bio-hnojivo. (Bionic Group)

2.6.5.2 Současný stav využití a odhadovaný vývoj

V roce 2013 byl veřejnosti představen první prototypový „downscaled“ reaktor mf60d (viz příloha 3) vycházející z většího reaktoru mf480. Dle vyjádření Firmy Bionic byly zahájeny jednání o komerčním využití. Pro kuchyňský odpad s vysokým podílem vlhkosti je metoda z energetického pohledu spíše nevhodná.

2.6.6 Hydrotermální karbonizace

2.6.6.1 Stručná charakteristika metody

Hydrotermální karbonizace (HTC) je termochemický proces vedoucí k jednoduše a vysoce účinné výrobě hnědého uhlí z biomasy, který v průběhu několika hodin napodobuje vznik hnědého uhlí trvající v přírodě několik milionů let. Reakce HTC biomasy probíhá ve vodném (případně parním) prostředí, čímž je vhodná pro vlhké

biologické substráty. Reakční teplota leží v rozmezí 180-350 °C v závislosti na druhu biomasy. Produktem je porézní, křehký a prášku podobný homogenní produkt s vysokou výhřevností, který lze využít nejen v energetice, ale také v zemědělství či chemickém průmyslu. Což je zajímavá alternativa k prostému spalování či zplynování neupravené biomasy.

2.6.6.2 Současný stav využití a odhadovaný vývoj

Za necelých 10 let se technologie HTC dostala z laboratoře až k několika pilotním provozům. Intenzivní výzkum a vývoj probíhá především v Německu. V roce 2010 uvedla společnost AVA-CO2 Schweiz AG do provozu první demonstrační zařízení v průmyslové velikosti v německém Karlsruhe, na konci roku 2012 pak spustila první průmyslové zařízení HTC na světě u města Relzow. Roční kapacita zařízení je 10 800 t biomasy. Složitým inženýrským problémem je vhodný návrh procesu, tak aby bylo dosaženo pozitivní energetické bilance procesu. Do procesu totiž vstupuje vlhká heterogenní biomasa, kterou je potřeba ohřát a výstupem má být suché biouhli ve formě prášku či pevných briket.

Technologie HTC stále prochází intenzivním výzkumem a vývojem. V odborném tisku najdeme mnoho vědeckých článků o HTC zabývajících se problematikou nakládání s BRO. Články přinášejí nadějně výsledky směrem k průmyslovému uplatnění technologie HTC pro podobné druhy odpadu jakými jsou kuchyňské odpady.

HTC biouhli nalézá řadu různých uplatnění. Experimenty byl ověřen vliv hlavních parametrů procesu a bylo potvrzeno, že lze tak vyrábět homogenní produkt o požadovaných vlastnostech. Uhlí lze využít jako katalyzátor, adsorbér kapalné či plynné fáze, energetický akumulátor, palivový článek, hořlavé palivo nebo půdní hnojivo. (Maria-Magdalena Titirici, 2012) Je tedy otázkou, jestli zůstane jen u nejjednodušší formy využití – spalení, a nebo se biouhli dočká aplikace s vyšší přidanou hodnotou.

Potenciální přínos má HTC také v kombinaci s tradičními technologiemi. HTC například zlepšuje odvodnění čistírenských kalů či redukuje zápach organických látek. Může tedy vylepšit provoz ČOV či bioplynové stanice. Ve studii Kobayashi (2011) jsou procesem HTC zpracovány čistírenské kaly a sledoval se především vliv hydrotermálních podmínek, jako je teplota, tlak, vlhkost a na koncentrace finálních

produktů. Obsah pevných částic z takto zpracovaného čistírenského kalu se zvýšil na 52%, což umožňuje spalovat takto zpracovaný kal bez sušení ve spalovacích zařízeních.

Sušení čistírenských kalů je efektivní způsob jak energeticky využít čistírenské kaly, kde snížení spotřeby energie je jedním z velkých technických problémů. Ve studii Zili (2010) je experimentálně zkoumána možnost hydrotermálního zpracování kalů. Je zjištěno, že při zpracování čistírenských kalů získaném nasycenou parou o teplotě 190 °C a tlaku 2 MPa se může dramaticky zlepšit výkon dehydratace kalu jako produktu. Obsah vody může být snížen až o 55%. Finální produkt je téměř bez zápachu a může být snadno použit jako alternativní palivo.

2.7 Vybrané metody k nakládání s kuchyňskými odpady

V kapitole 2.6 bylo prezentováno několik technologií, které v současné době připadají v úvahu pro nakládání s kuchyňskými odpady. Z těchto metod byly vybrány anaerobní fermentace a HTC jako nejperspektivnější technologie pro tento vlhký, heterogenní a rizikový odpad. Využitelnost těchto dvou technologií je v této práci experimentálně prověřena. Tato kapitola se do detailu věnuje oběma technologiím.

2.7.1 Anaerobní fermentace

2.7.1.1 Principy tvorby bioplynu

Bioplyn patří do koloběhu života podobně jako vznik kyslíku při fotosyntéze. Je nedílnou součástí zániku života při rozkladu organické hmoty při hnilobných procesech. Organická hmota je rozkládána na své původní složky: oxid uhličitý, vodu a minerály, za současného uvolnění některého druhu energie. K vyhnívání organických látek dochází činností metanogenních bakterií za anaerobních podmínek. Například v močálech a rašeliništích, odpadních vodách, skládkách, hnojištích, jímkách na kejdu hospodářských zvířat či v trávících ústrojích přežvýkavců. Za těchto podmínek vzniká při vyhnívání hořlavý plyn metan – energie ve formě chemické sloučeniny, což je podstatný rozdíl oproti aerobnímu rozkladu - kompostování, při kterém dochází k přímému uvolnění tepla jakožto formy energie (Schulz-Eder, 2004).

Produkce bioplynu je výsledkem anaerobního metabolismu bakterií. Tento proces je nazýván anaerobní fermentací (AF). Někdy také anaerobní digescí či anaerobním vyhníváním. AF je biochemickým procesem, sestávajícím z celé řady posloupných fyzikálních, fyzikálně-chemických a biologických procesů. Dnes se pro jeho popis používá tzv. čtyřfázový model (znázorněný v příloze 4), protože tento proces má v podstatě čtyři následující fáze, během nichž se do rozkladu organické hmoty zapojují čtyři skupiny mikroorganismů. (Michal, 2005), (Straka et al., 2006), (Slejška et al., 2002)

Anaerobní fermentace – čtyřfázový model:

I. fáze: Hydrolýza

V prostředí se ještě vyskytuje vzdušný kyslík a jsou přítomny jak anaerobní tak aerobní bakterie. Důležitá je dostatečná vlhkost prostředí přesahující 50 % hmotnostního podílu, protože metanogenní bakterie, které přijdou na řadu ve čtvrté fázi procesu, se nemohou množit ani pracovat v suchém, pevném substrátu jako bakterie aerobní. V této fázi dochází k přeměně makromolekulárních organických látek (bílkoviny, uhlovodíky, tuk, celulóza) pomocí enzymů na nízkomolekulární sloučeniny jako jsou jednoduché cukry, aminokyseliny, mastné kyseliny a vodu.

II. fáze: Acidogeneze

Dochází k vytvoření anaerobního prostředí. Acidofilní bakterie jsou fakultativní anaerobní mikroorganismy schopné aktivace v aerobním i anaerobním prostředí a provádí rozklad na organické kyseliny, oxid uhličitý, vodík, sirovodík a čpavek.

III. fáze: Acetogeneze

V této fázi přeměňují acidogenní kmeny bakterií vyšší organické kyseliny na kyselinu octovou, oxid uhličitý a vodík.

IV. fáze: Metanogeneze

Vlivem metabolismu mikroorganismů dochází k tvorbě metanu. Metanogenní acetotrofní bakterie rozkládají kyselinu octovou na metan a oxid uhličitý. Hydrogenotrofní bakterie produkují metan z vodíku a oxidu uhličitého.

(Straka et al., 2006) (Schulz-Eder, 204) (Gujer, 1983) (Rozzi, 2004)

Základ bioplynových technologií jednoznačně vzešel z procesů čištění splaškových odpadních vod. Teprve technické úspěchy bioplynu v tomto oboru motivovaly snahy o rozšíření aplikace i na jiné organické substráty než kaly z odpadních vod. Tak byly aplikovány procesy AF na nejrůznějších potravinářských i zemědělských odpadech (Dohányos et.al, 1998).

Souběžně s vývojem reaktorových technologií pro AF organických odpadů byla v 60. – 70. letech rozpoznána i nebezpečí plynoucí ze samovolné tvorby bioplynu ve skládkách komunálních odpadů (Straka, 1993)

Řízená AF v bioplynových stanicích je efektivní způsob ekologického zpracování BRO. Výsledným produktem jsou biologicky stabilizovaný substrát s vysokým hnojivým účinkem a bioplyn. Proces AF probíhá ve zmíněných fázích, které ve většině zařízení probíhají současně. Pro dosažení stabilizované metanogeneze a vysokých výtěžků plynu je potřeba zajistit optimální podmínky pro život bakterií.

A) Vliv teploty

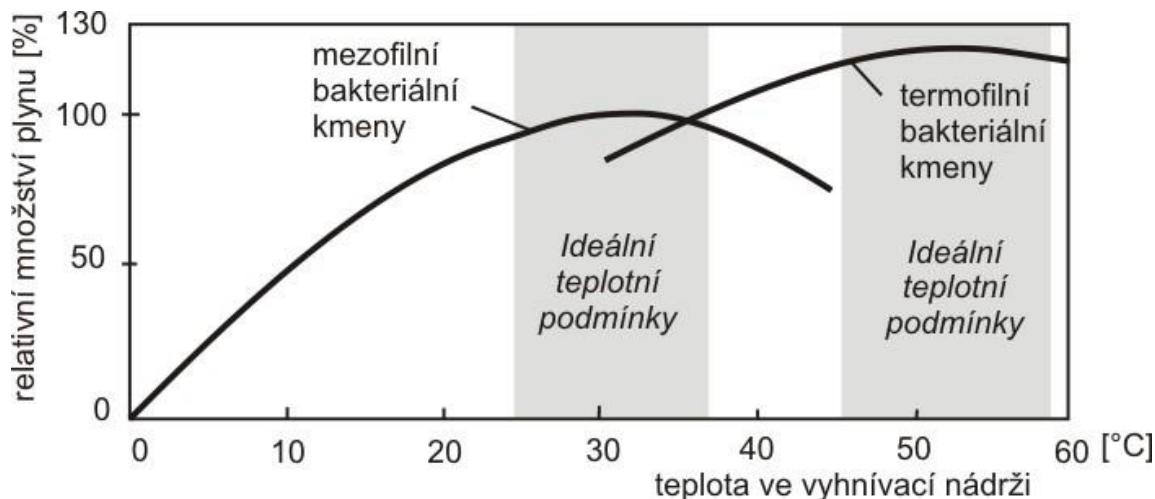
Rychlost procesu vyhnívání je závislá na teplotě. Metanové bakterie pracují v rozmezí od 0 °C do 70 °C. Podle požadavků na teplotu můžeme metanogeny rozdělit do 3 hlavních skupin:

- Psychrofilní kmeny – teploty pod 20 °C
- Mezofilní kmeny – teploty od 25 °C do 35 °C
- Termofilní kmeny – teploty nad 45 °C

Čím vyšší je teplota prostředí, tím intenzivnější je rozklad organických látek a produkce bioplynu. Bakterie jsou také mnohem citlivější na teplotní výkyvy. Ideální teplotní podmínky mezofilních a termofilních kmenů znázorňuje Obr. 7. Současným trendem v bioplynových stanicích s kofermentací je provoz při teplotách nad 40 °C, protože spalováním bioplynu v kogeneračních jednotkách vzniká dostatek (přebytek) odpadního tepla na ohřev.

Při působení psychrofilních kmenů dochází k nižší intenzitě rozkladu, ale dle Kotsyurbenko (1993) vykazují bakterie vyšší efektivitu přeměny.

Obr. 7 Vliv teploty na dosažitelné množství plynu ve vztahu k hodnotě dosažené při optimálních teplotních poměrech



Zdroj: Kaltwasser, 1980

B) Vliv vlhkosti

Jak již bylo zmíněno výše, je potřeba zajistit dostatečnou vlhkost substrátu a zamezit přístupu vzduchu. Vhodné je také zabránit přístupu světla, které brzdí proces.

V praxi se setkáváme se dvěma druhy procesů. Mokrou fermentací s obsahem sušiny menším než 12 % a suchou fermentací s obsahem sušiny od 20 % do 60 %.

C) Vliv pH

Významným faktorem ovlivňujícím metanogenní fermentaci je vliv pH. Bakterie produkující metan mají svá optima většinou v oblasti pH 6,2-7,8. Aktivita acidogenů pH prostředí snižuje, rozvoj metanogenů pak přináší vzestup pH směrem k neutrální či mírně alkalické oblasti. V praxi se optimální hodnota pH materiálu na vstupu do procesu upravuje homogenizací směsných materiálů nebo alkalickými přísadami.

D) Vliv živin

Bakterie nemohou rozkládat lipidy, proteiny, polysacharidy a celulózu v čisté formě. Pro svůj život potřebují také živiny. Stopové prvky, minerální látky a rozpustné dusíkaté látky. Ty se nacházejí v dostatečném množství nejen v hnoji a kejďě, ale také v trávě, kuchyňském odpadu, mlékárenském odpadu či mlátu. Pro praxi je vhodné použít hnůj a kejdu jako základní substrát a ostatní jmenované složky jako přísady. Dosáhne se tak snáze vyrovnaného poměru kyselosti. Navíc denní skladba substrátu je tak stálější a životní prostředí bakterií není vystavováno náhlým změnám, na které ony zpravidla reagují negativně zpomalením metabolismu. K vyšším výtěžkům přispívá

zvětšení kontaktních ploch substrátu. Látky nerozpustné ve vodě by měly být rozdrobeny či najemno rozsekány.

(Straka et al., 2006) (Schulz-Eder, 204)

AF je rovnovážným procesem, kde trvale spolupracují acidogenní a metanogenní organismy, proto vyprodukovaný bioplyn je vždy směsí metanu a oxidu uhličitého, v poměru, který je daný podmínkami procesu AF a kvalitou substrátu. Různé literární zdroje (např. Straka et al., 2006; Schulz et al., 2004) uvádí poměrné zastoupení obou hlavních složek v širokých mezích. Obsah metanu obvykle od 50 % do 85 %, obsah oxidu uhličitého od 20 % do 42 %. Nelze určit přesné hranice obsahů těchto dvou majoritních složek, protože výsledek záleží na mnoha parametrech: použitý substrát a jeho kvalita, typ reaktoru, doba zdržení (označovaná v literatuře také jako doba kontaktu), skladba a přizpůsobení bakteriálních kultur, obsah sušiny, teplota, pH, zatížení vyhnívacího prostoru, promíchávání nebo odplynování substrátu. Zastoupení dalších složek je v řádu procent či desetinách objemového procenta.

Mezi nejvýznamnější minoritní složku patří sirovodík. Agresivní látka, která zapříčiňuje korozi a je toxická pro metanogenní bakterie. K odsiřování bioplynu se využívají především tři základní metody: absorpční (vypírání různými pracími kapalinami), adsorpční (odstraňování záchytem na adsorbentech), katalytické (přeměna na jiné produkty za použití katalyzátoru). (Oude Elferink et al., 1994)(Song et al. 2001)

Dalšími složkami jsou vodní pára, amoniak a molekulární dusík, vodík a kyslík. Menšinové složky bioplynu můžeme rozdělit na látky, které pocházejí z rozkladu přírodních materiálů, nebo na látky, které pocházejí z materiálů uměle vyrobených a mohou negativně ovlivnit proces zpracování bioplynu.

Chemické složení bioplynu, jeho kvalita a množství, záleží především na prostředí, ve kterém mikroby žijí. Kejda a hnůj hospodářských zvířat jsou od poloviny 20. století využívány jako substrát pro AF v mnoha zemědělských zařízeních. Provozovatel neprofituje jen ze samotné výroby bioplynu jakožto formy energie. Lze navíc získat kvalitní hnojivo, zabránit ztrátám na živinách, snížit zatížení pachem nebo hygienizovat kejdu. Významu nabývá tzv. kofermentace, která označuje fermentaci kejdy nebo hnoje společně s organickými látkami, které nevznikají v živočišné výrobě. Těmito organickými látkami mohou být například zbytky z rostlinné výroby, odpady ze

zpracování a výkrmu nebo účelově pěstovaná biomasa. Mluvíme tedy o využití organického odpadu v bioplynových stanicích a kombinaci odpadového, energetického a zemědělského hospodářství. Organické odpady jsou obecně vhodné pro kofermentaci se zvířecími excrementy. Kejda slouží jako základní substrát pro stabilní fermentaci. Kosubstráty mění složení kejdy, obsah sušiny, živin i škodlivin. Proto je obvykle nutné kosubstráty před fermentací předupravit, jak z hygienických tak mechanických důvodů. (Schulz et al., 2004)

Důležitým faktorem pro hodnocení vhodnosti materiálu pro AF je také vlhkost a poměr uhlíkatých a dusíkatých látek, který by měl činit 20:1 až 40:1. Vysoký obsah dusíkatých látek se projevuje negativně na vyšším obsahu NH_3 nebo N_2O . Vyšší obsahy dusíku mají obvykle excrementy hospodářských zvířat, naopak vyšší obsah uhlíku zase materiály rostlinného původu. Optimálního poměru lze dosáhnout i míšením různých materiálů. (Schulz et al., 2004)

Charakteristiku vybraných surovin zobrazuje Tab. 6.

Tab. 6 Vlhkost a obsah uhlíkatých a dusíkatých látek vybraných surovin

Surovina	Vlhkost %	Obsah C v sušině %	Obsah N v sušině %
Kejda prasat	94	41,7	5,4
Kejda skotu	97	42,4	4,0
Kejda drůbeže	90	38,9	6,6
Listí (vlhké)	35	50,6	1,2
Odpad ze zeleniny	85	48,9	2,0
Kuchyňský odpad	73	45,0	1,8
Výlisky z ovoce	75	47,2	0,4
Piliny (vlhké)	65	54,5	0,1

Zdroj: BANOUT, 2002.

Množství bioplynu získané z různých organických substrátů během doby kontaktu se nejčastěji vyjadřuje specifickou nebo měrnou výtěžností bioplynu, která je definována jako produkce bioplynu na 1 kg organické sušiny ($\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kg}_{\text{os}}^{-1}$). Výtěžnost plynu lze vztáhnout také na jednotku objemu vyhnívací nádrže, dobytčí

jednotku nebo 1 m³ čerstvé kejdy, ale v těchto případech by nebyl zohledněn rozdíl v obsahu vody. Specifická výtěžnost bioplynu udává možný energetický potenciál substrátu. Na výtěžnost má ale také vliv stupeň rozkladu čili kolik procent organické sušiny bylo rozloženo během doby kontaktu.

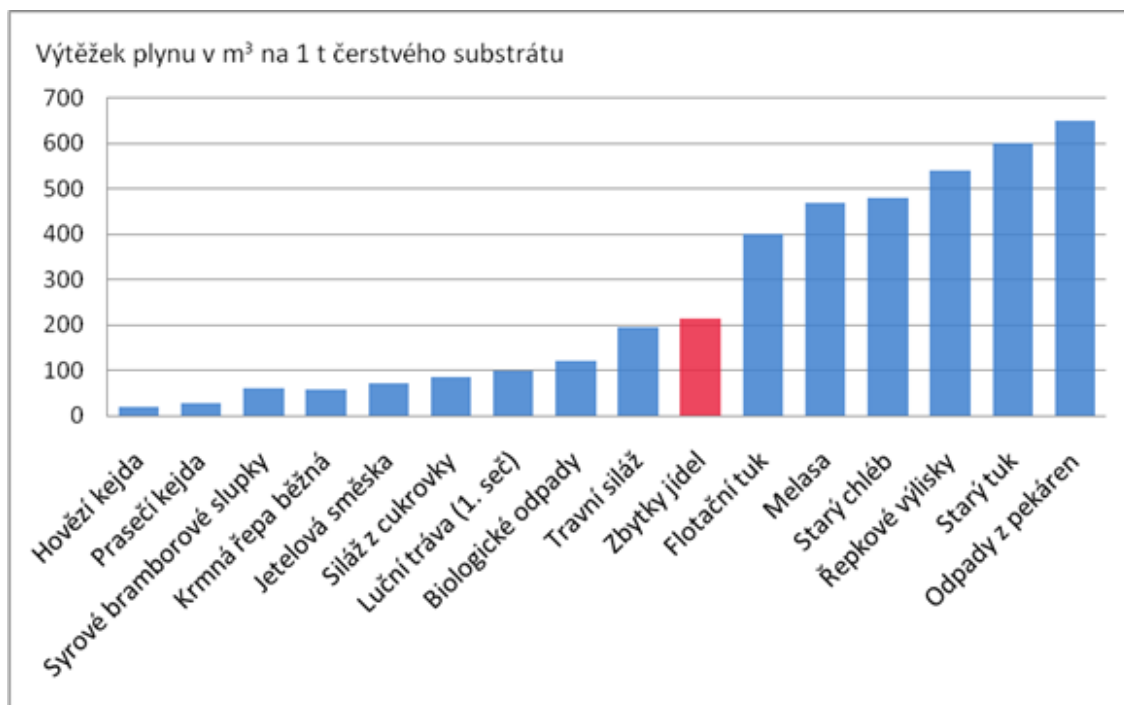
Specifické výtěžky bioplynu pro kuchyňský odpad shrnuje Tab. 7. Srovnání je pouze orientační, protože jak bylo zmíněno výše, výtěžnost bioplynu závisí na mnoha parametrech – kvalitě a druhu substrátu, podmínkách ve fermentoru, použité technologii, atd.

Tab. 7 Měrná výtěžnost bioplynu nebo metanu z kuchyňských odpadů

Jednotka	Výtěžnost	Podmínky	Zdroj
(m ³ CH ₄ ·kg _{suš} ⁻¹)	0,50-0,60		Biogas, 2000
	0,44	50 °C, 28 d	Zhang, 2007
	0,472	37 °C, 28 d	Cho, 1995
(m ³ CH ₄ ·kg _{os} ⁻¹)	0,3408	50 °C, 28 d	Zhang, 2007
	0,3517	40 °C, 30 d	MUŽÍK, 2012
(m ³ CH ₄ ·kg _{SUBSTR} ⁻¹)	0,10518	50 °C, 28 d	Zhang, 2007
(m ³ bioplynu·kg _{os} ⁻¹)	0,657	35 °C, 30 d	El-Mashad et al., 2010
	0,784	35 °C, 25 d	Liu, 2009
(m ³ bioplynu·t _{SUBSTR} ⁻¹)	0,205		Institut für Landtechnik, 1999
	0,245		MUŽÍK, 2009
	0,1438	50 °C, 28 d	Zhang, 2007

Obr. 8 zobrazuje také směrné hodnoty výtěžku bioplynu na 1 tunu uvedeného čerstvého substrátů. Je uvedeno srovnání výtěžnosti zbytku jídel se substráty pocházející ze zemědělství i komunálu. Hodnoty platí za předpokladu kontinuální fermentace při teplotě od 34 do 37 °C a době kontaktu 3 týdny.

Obr. 8 Směrné hodnoty výtěžku bioplynu z různých fermentačních materiálů



Zdroj: Institut für Landtechnik: Biogas-Menge und Qualität, 1999.

Ve studii Mužik et al. (2012) byla ověřována možnost výroby bioplynu z KO a vliv biotechnologické předúpravy vstupních substrátů na výtěžnost metanu. V provedených pokusech byly použity odpady ze závodního stravovacího zařízení, které se dávkuje do BPS Kněžice. Výsledky experimentů ze vsádkových reaktorů v mezofilních podmínkách 40 °C a době zdržení vykázaly nárůst 6 % měrné výtěžnosti bioplynu na množství odbourané organické sušiny s využitím biotechnologické předúpravy.

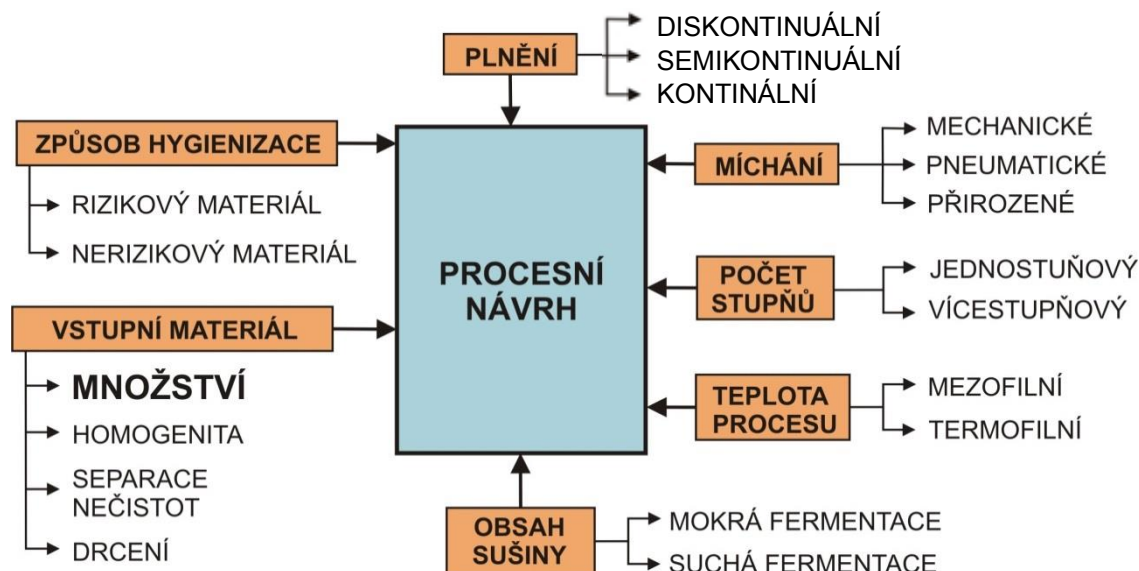
2.7.1.2 Anaerobní fermentace kuchyňských odpadů v praxi

Při realizaci komunální bioplynové stanice, která bude zpracovávat kuchyňský odpad, máme na výběr z mnoha v praxi již úspěšně vyzkoušených technologií, přesto volba jedné konkrétní technologie není jednoduchá a to především z důvodu, že provoz technologie je značně závislý na množství a vlastnostech vstupního materiálu. Na příkladech českých komunálních bioplynových stanic ve Velkém Mýtě (kapacita 4650 t·rok⁻¹, uvedení do provozu r. 2008) či v Úpici (6000 t·rok⁻¹, uvedení do provozu r. 2007) můžeme pozorovat, že se potýkají s nedostatkem vstupních surovin, které musí nakupovat, i to přes svou malou kapacitu. V opačné pozici je například velká německá

komunální bioplynové stanice u Passau (40 000 t.rok⁻¹) zpracovávající zahradní odpad, odpad z údržby zeleně, odpad z výroby potravin, ovoce, zeleninu i kuchyňský odpad metodou suché termofilní fermentace v horizontálních reaktorech společnosti Kompogas. Pozitivních výsledků dosahuje i belgická stanice v Brechtu (55 000 t.rok⁻¹), která brzy po spuštění r. 1992 dosáhla projektovaného maxima a nemohla přijímat více dostupného bioodpadu. Odpad je tvořen z kuchyňského odpadu (10-40 %), odpadů ze zahrad a údržby zeleně (40-75 %) a papíru (14-20 %) a zpracováván v horizontálním reaktoru termofilní fermentací. V Evropě najdeme mnoho příkladů dobře fungujících komunálních bioplynových stanic s různými technologiemi např. typ Valorga, BTA nebo LINDE. Jedná se o mokré i suché procesy pracující v mezofilních i termofilních podmínkách.

Výběr procesní technologie pro bioplynovou stanici je ovlivněn několika základními parametry zobrazenými na Obr. 9. Z příkladů z praxe je zřejmé, že o konkrétní technologii, se kterou jsou spjaty i investiční náklady a návratnost investice, rozhoduje především množství dostupného materiálu a jeho charakter.

Obr. 9 Základní parametry tvorby procesního návrhu technologie pro stanici anaerobní fermentace



Na výše popsané technologie můžeme nazírat z ekonomického hlediska a vyčíslit:

- Investiční náklady na výstavbu bioplynové stanice a procesního zařízení (závisí z velké části na množství a druhu zpracovaného odpadu).

- b) Náklady na provoz (svoz odpadu do stanice, drcení a separace materiálu, ohřev substrátu, laboratorní rozborů vyžadované legislativou, čištění odpadních vod, platy zaměstnanců apod.).

Celková technologická spotřeba elektrické energie se podle velikosti zařízení a instalované technologie může pohybovat i mezi cca 15–30 % z výroby. V případě minimálního využití hygienizace se pohybuje vlastní spotřeba tepla do cca 30 % z objemu výroby. V případě hygienizace veškerého přijímaného materiálu to může být až 80 %. (Výstavba komunálních bioplynových stanic s využitím BRKO, 2009)

- c) Zisk z provozu (náhrady za likvidaci odpadů od jejich původce, zisk z vyrobené elektrické a tepelné energie, prodej kvalitního hnojiva).

Nebo můžeme technologie hodnotit z pohledu životního prostředí a odpadového hospodářství. Čili využít a ekologicky zlikvidovat i takový druh bioodpadu, se kterým není jednoduché pracovat a nepřináší velký zisk. Příkladem může být zvířecí kejda zpracovávaná mokrou fermentací, která nedává velký výtěžek bioplynu a samotný proces vyžaduje hodně energie pro hygienizaci, ohřev substrátu a čerpání suroviny. Zatímco cíleně pěstovaná biomasa nebo odpad z pekáren dosahují při procesu suché fermentace vysoký výtěžek bioplynu, není potřeba je separovat od nežádoucího odpadu, spotřeba energie na ohřev substrátu je nízká a neprodukuje se jiný odpad (odpadní vody) ale jen vedlejší hodnotné produkty (hnojivo).

Protože každá bioplynová stanice je ve své podstatě unikátní pro svou odlišnou skladbu vstupních surovin, nemůže čistě statistické hodnocení ekonomických a procesních parametrů náležitě vypovídat o její výkonnosti a efektivitě technologie. V Tab. 8 jsou zhodnoceny výhody a nevýhody základních technologických parametrů bioplynové stanice.

Tab. 8 Zhodnocení základních parametrů pro volbu technologie anaerobní fermentace

Parametr		Výhoda	Nevýhoda
Obsah sušiny	Suchá fermentace	<ul style="list-style-type: none"> • Menší fermentor • Méně energie na ohřev • Možné i pro nedobře vytríděné odpady s příměsí dřeva, zeminy, kovů, plastů 	<ul style="list-style-type: none"> • Omezené podmínky pro míchání • V ČR nedostatek praktických zkušeností
	Mokrá fermentace	<ul style="list-style-type: none"> • Snazší míchání 	<ul style="list-style-type: none"> • Více energie na ohřev • Větší reaktor • Ředění • U některých materiálů při nedostatečném míchání vznik usazenin nebo příkrovů na hladině • Hodně odpadní vody pokud není recyklována v procesu
Teplota	Mezofilní	<ul style="list-style-type: none"> • Méně energie na ohřev (zvláště při mokré fermentaci) • Menší citlivost na výkyvy teplot • Snadnější uvádění do provozu 	<ul style="list-style-type: none"> • Pomalejší rozklad • Problémy s pěněním při mokré fermentaci
	Termofilní	<ul style="list-style-type: none"> • Více energie na ohřev • Vyšší reakční rychlost • Hlubší rozklad organických látek • Vyšší produkce bioplynu • Lepší hygienizační účinek • Odstraňuje problémy s pěněním • Nižší obsah H₂S v bioplynu 	<ul style="list-style-type: none"> • Více energie na ohřev
Plnění	Diskontinual.	<ul style="list-style-type: none"> • Vhodné pro malou stanici se sezónním přísunem materiálu 	<ul style="list-style-type: none"> • Nestabilní produkce bioplynu
	Kontinuální	<ul style="list-style-type: none"> • Konstantní produkce bioplynu 	<ul style="list-style-type: none"> • Může dojít ke smíchání čerstvého substrátu s vyhnilým a tím ke snížení hygienizačního efektu
Počet stupňů	Jednostupňový	<ul style="list-style-type: none"> • Levnější 	<ul style="list-style-type: none"> • V případě problémů se proces hůře reguluje
	Vícestupňový	<ul style="list-style-type: none"> • Snazší regulace procesu 	<ul style="list-style-type: none"> • Více nádrží = vyšší cena

Pokud bychom předpokládali dostatečné množství výhradně kuchyňského odpadu k provozu bioplynové stanice, preferovanou technologií by byla suchá termofilní fermentace s jedním kontinuálně plněným reaktorem. K dosažení hygienizovaného výstupu a splnění legislativních požadavků je nutno přiřadit drtící a hygienizační jednotku.

V následující Tab. 9 jsou ve čtyřech hlavních kategoriích stručně načrtnuty jednotlivé důležité kroky, které jsou nutné během schvalovacího procesu pro stavbu BPS. Jak již bylo zmíněno v úvodu kap. 2.7 úspěšná realizace BPS nezávisí jen na výběru technologie, v praxi je nezbytná také politická podpora a podpora místní správy.

Tab. 9 Přehled zúčastněných stran během schvalovacího procesu BPS

Schvalování	Výstavba	Provoz	Podpora
Žadatel/provozovatel BPS Národní legislativa Vláda MŽP MZE Krajské úřady Obce Provozovatel sítě Systém národních pobídek	Plánované využití půdy Ochrana vod Životní prostředí Požární ochrana	Připojení do sítě Odpady a hnojiva Bezpečnost Emise Sanitace	Výkupní tarify Zelené certifikáty Investiční dotace

Zdroj: Seminář pro administrativní sektor o realizaci projektů výroby a využití bioplynu, 2011.

Návrh dlouhodobě hospodářsky efektivní BPS by měl počítat s jistou regulací provozu k zajištění odolnosti projektu vůči změnám legislativy, výkupním cenám, flexibility na kvantitu a kvalitu vstupní suroviny. Důležitá je také v rámci možností trhu i diverzifikace příjmů – prodej elektřiny, prodej tepla (nebo v budoucnu i prodej vyčištěného bioplynu v ČR) výkup odpadu, využití digestátu. S tím souvisí i hledání synergie s jinými lokálními provozy, které buď produkují problematický odpad nebo by mohly využít dostupnou energii, především teplo.

Obr. 10 shrnuje možné socioekonomické a ekologické přínosy BPS.

Obr. 10 Socioekonomické a ekologické výhody z procesu anaerobní fermentace



Zdroj: Národní bioplynová mapa, 2012.

Z energetického hlediska je prioritou BPS tvorba bioplynu. Preferovaný je maximálním podíl metanu, který ale musí být ve správné rovnováze s dalšími důsledky fermentace na zpracováváný odpad. Především u zemědělských BPS je velmi důležitá kvalita výstupního digestátu oproti vstupní surovině pro využití v zemědělství a pro celkový vztah k životnímu prostředí. Bioplyn se dnes využívá především ke kombinované výrobě tepla a elektrické energie, k výrobě tepla nebo po vyčištění jako biometan.

Využití bioplynu:

a) Bioplyn na teplo a energii (kogenerace)

Pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie, se bioplyn přeměňuje v kogenerační jednotce (CHP - kombinovaná výroba tepla a elektřiny). Bioplynové elektrárny, díky technologickému pokroku v posledních letech dosáhly vyrovnanosti při výrobě tepla a elektřiny (na jeden kW elektrické energie připadá jeden kW tepelné energie). Elektřina může být dodávána do rozvodné sítě a teplo lze využít pro ohřev fermentoru, stáje, domů nebo může být připojena k teplovodu pro dálkové vytápění. Je to nejrozšířenější varianta transformace bioplynu. (Národní bioplynová mapa, 2012)

Ve většině zemědělských BPS nemůže být vyrobené teplo plně využito, což vede k nižší celkové účinnosti. (Národní bioplynová mapa, 2012)

b) Bioplyn na teplo

Pro výrobu tepla se bioplyn spaluje v kotli. Teplo může být použito pro topný okruh nebo pro výrobu páry. Tato možnost se používá jen v průmyslových závodech s velkou potřebou tepla. Nicméně, kogenerace je preferované řešení, protože energie z bioplynu je lépe využita. (Národní bioplynová mapa, 2012)

c) Bioplyn na biometan

Při výrobě biometanu, bioplyn je přenášen do zařízení, CO₂ je odstraněno, dokud koncentrace CH₄ nedosahuje 96% nebo vyšší, který zlepšuje výrazně energetickou hodnotu plynu. Biometan může být použit mnoha způsoby:

- Injekce do sítě zemního plynu
- Použití, jako paliva pro transport
- Surovina pro chemický průmysl
- Hořlavina pro palivové články

Biometan může být použit ve všech zařízeních určených pro zemní plyn.

(Národní bioplynová mapa, 2012)

Pokud není využíváno vyprodukované teplo, využití energie z bioplynu je obvykle nízké. Ztrácí se tak $\frac{1}{3}$ až $\frac{2}{3}$ primární energie bioplynu. To znamená, že zařízení na výrobu bioplynu je často, z hlediska využití energie, velmi neefektivní proces. Dle publikace „Energetická efektivnost bioplynových stanic“ se stupeň energetického využití bioplynu (zkratka SEVBP) BPS, které využívající teplo z kogenerační jednotky, pohybuje kolem 55 %, viz příloha 5. Pro BPS s úpravou na biometan pro dodávku do plynové sítě je hodnota SEVBP přibližně 75 %, viz příloha 6.

Primární výhodou vtláčení bioplynu do sítě zemního plynu je trvale udržitelný systém získávání energie, s oddělením místa výroby a vlastního využití. Přínosem je nejen flexibilní, místní využití bioplynu s vysokým stupněm účinnosti, ale současně také náhrada fosilních paliv.

Pro úpravu bioplynu na kvalitu zemního plynu existují různé osvědčené postupy a technologie. Uspořádání procesních kroků a technologií závisí na kvalitě bioplynu. V zásadě je možné použít pro úpravu bioplynu stejné procesy jako pro úpravu jiných technických plynů.

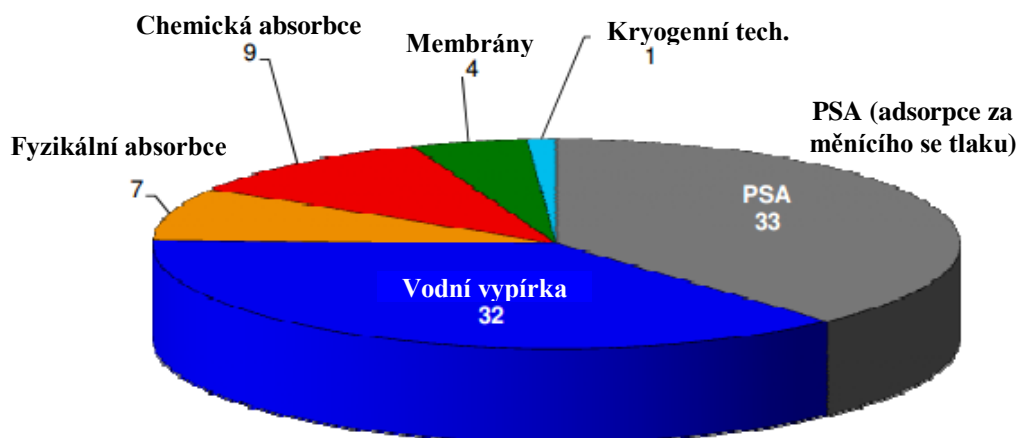
Úprava surového bioplynu z anaerobní digesce vyžaduje 3 základní kroky, které se u různých technologií mohou do určité míry překrývat:

- Odstranění reaktivních plynů (odsíření, odstranění amoniaku)
- Odstranění kapének vody a sušení
- Upgrading, tj. odstranění CO₂ - pro dosažení požadovaného Wobbeho indexu plynu

(Seminář pro administrativní sektor o realizaci projektů výroby a využití bioplynu)

Obr. 11 zobrazuje počet a podíl instalací na úpravu v bioplynu v průmyslovém měřítku v rámci EU v roce 2009. Zobrazuje jak zaběhlé technologie (např. tlaková vodní vypírka, vypírky s organickými rozpouštědly, membránové filtry apod.), tak mladší technologie, které prochází stádiem mladšího vývoje (např. kryogenní technologie).

Obr. 11 Počet a podíl instalací na úpravu bioplynu v EU v roce 2009



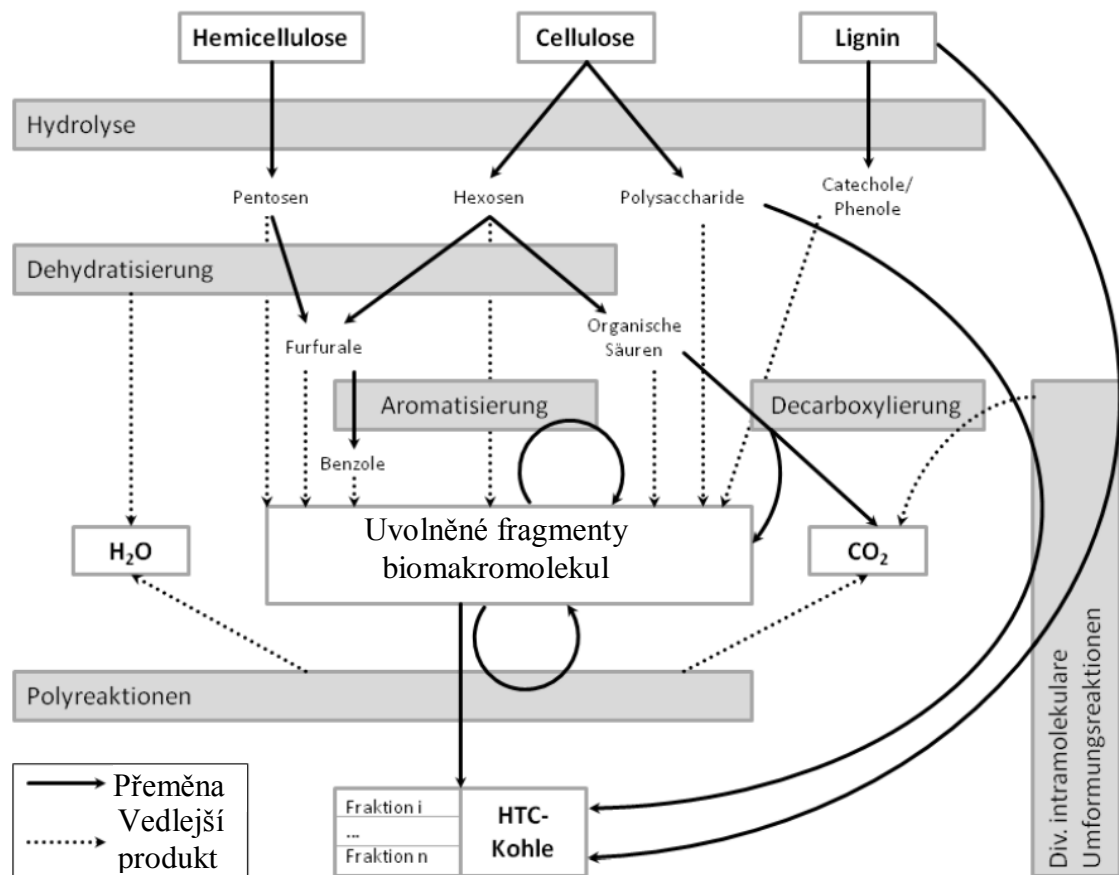
Zdroj: Seminář pro administrativní sektor o realizaci projektů výroby a využití bioplynu, 2011.

2.7.2 Hydrotermální karbonizace

Hydrotermální karbonizace (HTC) je thermochemický proces vedoucí k jednoduché a účinné výrobě hnědého uhlí z biomasy, který v průběhu několika hodin napodobuje vznik hnědého uhlí trvající v přírodě několik miliónů let. Tento proces byl poprvé popsán v roce 1913 německým chemikem Friedrichem Bergiem. HTC se znova dostalo opravdu významné pozornosti až v letech 2004-2006, kdy byl proces detailně popsán prof. Markem Antoniettim v Max-Planckově institutu (Postupim, Německo) (Röthlein, 2011). V současné době je především v Německu věnováno značné úsilí k přenesení slibných dat z laboratoře do průmyslového provozu. V roce 2010 uvedla společnost AVA-CO2 Schweiz AG do provozu první demonstrační zařízení v průmyslové velikosti v německém Karlsruhe, na konci roku 2012 následovalo první průmyslové zařízení HTC na světě s roční kapacitou 10 800 t biomasy. Nejsložitějším úkolem přenesení procesu z výzkumu do praxe byl návrh procesní linky, tak aby proces maximálně využíval rekuperaci a své vlastní teplo z probíhající exotermní reakce. V současnosti je publikováno několik různých konceptů pilotních projektů, např. od společností CS CarbonSolutions Deutschland GmbH, REVATEC GmbH, SunCoal Industries GmbH nebo již zmíněné AVA-CO2 Schweiz AG.

Proces HTC může probíhat v širším rozpětí teplot od 180 do 350 °C. Pásmo teplot určuje vstupní materiál a požadované vlastnosti produktu. Snaha o dosažení nižších reakčních teploty je motivována především energetickou hospodárností. Vstupní materiál je ohříván v subkritické vodě za autogenního tlaku. Kritická teplota a tlak vody leží na hodnotě 373,95 °C a 22,06 MPa. Přítomností oxidu uhličitého může být kritický bod snížen. Vstupní materiál je rozkládán sérii reakcí, které se částečně prolínají. Zahrnují hydrolýzu, dehydrataci, dekarboxylaci, aromatizaci, polymerizaci a kondenzaci. (Libra et al., 2011) (Funke, 2012) Následnost reakcí znázorňuje obr. 12.

Obr. 12 Přehled reakčních mechanismů HTC



Zdroj: Funke, 2012

I. fáze: Hydrolýza

V této fázi dochází ke štěpení chemických vazeb. Dochází k rozkladným reakcím, při kterých se spotřebovává voda.

II. fáze: Dehydratace

Dochází k odštěpování vody z organických sloučenin za vysokých teploty a popřípadě působením dehydratačního katalyzátoru.

III. fáze: Dekarboxylace

Při této chemické reakci dochází k odštěpení oxidu uhličitého (CO₂) z karboxylové skupiny. Karboxylové skupiny jsou součástí karboxylových sloučenin.

IV. fáze: Polymerizace

Polymerizace je chemická reakce, při které z malých molekul (monomerů) vznikají vysokomolekulární látky (polymery). Reakci lze urychlit přidáním polymerizačního činidla.

IV. fáze: Kondenzace

Jedná se o skupenskou přeměnu z plynu na kapalinu.

Významným přínosem prof. Marka Antoniettiho bylo rozdělení procesu HTC do dvou kroků s odlišnými parametry. V prvním tzv. iniciačním kroku je materiál biomasy aktivován pro následnou polymerizaci v druhém tzv. polymerizačním kroku. Iniciační krok probíhá ve vodním prostředí (obsah sušiny mezi 5 – 35 %) s absencí kyslíku v rozmezí teplot 180 – 240 °C v kyselém pH (3 – 6) po dobu několika minut v závislosti na druhu biomasy, tak aby byla většina makromolekulárních látek rozložena na jednodušší a chemicky reaktivnější látky. Aktivace celulózy vyžaduje vyšší teplotu než aktivace škrobu a glukózy. (Titirici et. al, 2007) Druhý krok je zahájen přidáním polymeračního činidla, které zahajuje polymerační proces vedoucí ke vzniku uhlénohličitého materiálu s podílem uhlíku > 50 % hm. a výhřevností > 23 MJ.kg⁻¹, protože dochází k výraznému zvýšení hustoty energie na jednotku objemu. Díky polymeračnímu činidlu může být v tomto kroku také snížena procesní teplota do rozmezí 140 – 220 °C (v závislosti na vstupním materiálu). V důsledku ohřevu dojde v tlakové nádobě k růstu tlaku způsobenému vodní parou k hodnotám do 2,5 – 3 MPa. Probíhající proces se vyznačuje mírně exotermní reakcí. Při využití kvalitní izolace není nutný externí ohřev. Pevná a kapalná složka výsledného produktu může být oddělena filtrací nebo dekantací. Kapalná složka může být opět využita v první fázi reakce k okyselení vstupní biomasy nebo po oxidaci jako polymerační činidlo ve fázi druhé. Produktem procesu je „biouhlí“. Tato pevná složka obsahuje 45-93 % původního uhlíku vstupní biomasy. Zbytek se nachází v kapalně a plynné fázi. Hmotnostní distribuce má obvykle poměr 50-80 % hm. pevné složky, 5-20 % hm. kapalně a 2-5 % hm. plynně. Hlavní složkou plynného produktu je CO₂. (Ramke et. al, 2009), (Hwang et. al, 2010) (Hwang et. al, 2012), (Berge et. al, 2011). Dále mohou být v malém množství detekovány metan, etan, propan, butan a furan. (Lu et. al, 2012)

HTC je exotermní reakcí. Funke (2011) uvádí, že teoretické množství uvolněného tepla není větší než $2,4 \text{ MJ.kg}_{\text{celulózy}}^{-1}$. V experimentech byla naměřena energie $1,07 \text{ MJ.kg}_{\text{celulózy}}^{-1}$ a $0,76 \text{ MJ.kg}_{\text{dřevo}}^{-1}$. Na kinetiku reakce neměla vliv úprava pH nad či pod hodnotu pH 3. Měření potvrzuje, že uvolněné reakční teplo má jen velmi malý vliv na celkovou energetickou rovnováhu procesu. Titirici (2007) udává hodnotu uvolněného reakčního tepla $0,85 \text{ MJ.kg}_{\text{glukózy}}^{-1}$.

Výsledný produkt je závislý na délce procesu trvajícím až 16 hodin. Reakce může být v různých stádiích procesu při neúplném odštěpení vody přerušena a pak vznikají různé předstupně ropných produktů, humus či hnědé uhlí. Výsledný produkt obsahuje přibližně $\frac{2}{3}$ energie vstupní biomasy, zbytek je uvolněn ve formě tepla, které by v ideálním případě mělo být využito v procesu. V průběhu reakce dochází dále k téměř úplnému rozbití makromolekulární struktury původní biomasy, čímž je získán homogenní, porézní, křehký a prášku podobný produkt, který je po vysušení značně jednodušší využít k výrobě elektřiny, tepla či paliva než původní biomasu. (Antonietti et al., 2010), (Titirici et al., 2010), (Funke et al., 2011), (Rillig et al., 2010)

Protože reakce HTC probíhá ve vodním prostředí, lze takto zpracovávat a přednostně využívat především odpadní biomasu s velkým podílem vlhkosti (odpadní kaly, rostlinné zbytky ze zemědělské výroby, odpady z živočišné výroby, organické odpady z potravinářských a průmyslových výrob, zvířecí kejdu, digestát z AF apod.). HTC je především procesem k recyklaci organické hmoty a zadržení uhlíku v tuhé fázi produktu. (Berge et al., 2011), (Funke et al., 2010), (Hwang et al., 2010), (Hwang et al., 2012), (Libra et al., 2011), (Ramke et al., 2009).

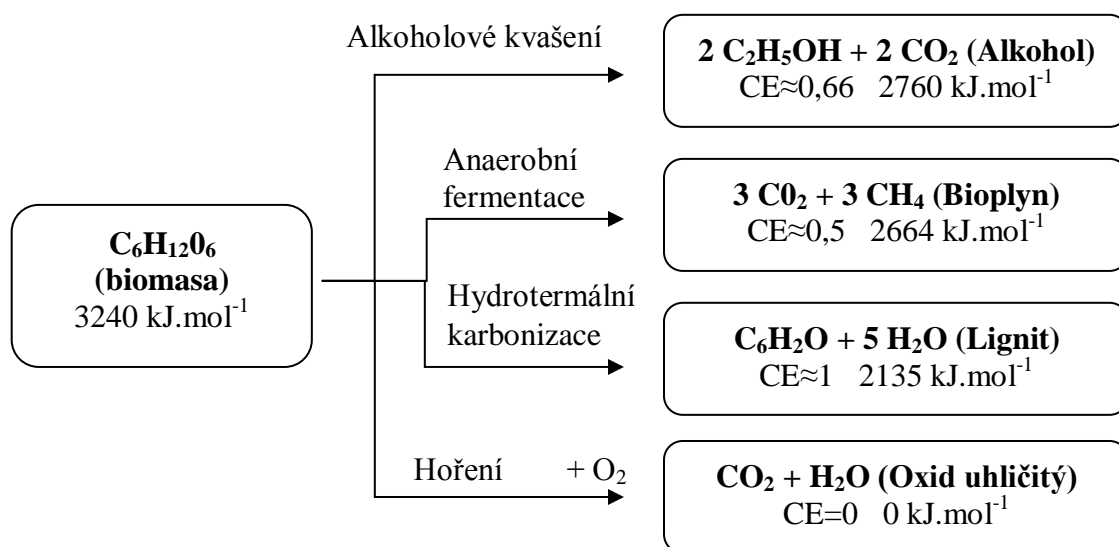
Podmínkami procesu lze kontrolovaně vytvářet cílený funkční povrch produktu. Bylo zjištěno, že tímto procesem lze získat částice se zajímavou nano- či mikrostrukturou s různými kvalitativními vlastnostmi jako jsou chemická a teplotní stabilita, velká adsorpční kapacita nebo vysoká energetická hodnota. (Titirici et al., 2007), (Titirici et al., 2008), (Titirici et al., 2012) (Lu et al., 2011). Lu et al. (2011) dokumentuje, že karbonizace snižuje množství prchavé hořlaviny (pro zbytky jídla z rýže o 41,8 %) a v průměru zvyšuje energetický obsah 1,01 – 1,41 krát. Na objemové množství je zvýšení ještě výraznější od 6,39 do 9,0 násobku.

Protože je biouhlí velmi porézní a má velký specifický povrch. V zemědělství může pomoci zadržovat v půdě živiny a vodu, zvyšovat tak úrodnost půd a zároveň slouží jako úložiště uhlíku (zachování uhlíkové bilance půdy – udržitelnost zemědělské výroby). (Liu et al., 2010), (Libra et al., 2011). Glaser et al. (2001) zmiňuje využití biouhlí k produkci černozemě Terra Preta. Dále ho lze uplatnit v chemickém průmyslu jako katalyzátor či adsorpční látku pro vysokou schopnost vázat vodu či ionty, protože biouhlí lze vyrábět s cílenou nanostrukturou, a mohlo by tak v budoucnu nahradit produkty z fosilních zdrojů. (Cui et al., 2006), (Demir-Cakenet et al., 2009), (Titirici et al., 2007) A to například – metalurgické uhlí a filtrační uhlí, uhlíkové příměsi do pneumatik atd. (Cao et al., 2007) (Paraknowitsch et al., 2009)

Produkt může být také přímo spalován v elektrárnách stejně jako fosilní uhlí či zpracován do formy briket či pelet. Nabízí se také jeho využití v palivových článcích. Jakožto CO₂ neutrální proces je také zajímavou technologií v obchodování s emisními povolenkami.

Obr. 13 zjednodušené porovnává několik procesů ke zpracování biomasy hlediska chemických reakcí, energie výstupního produktu a uhlíkové eficiency přeměny.

Obr. 13 Srovnání chemických reakcí, energie výstupního produktu a uhlíkové eficiency přeměny.



Zdroj: Titirici et al., 2007.

Tab. 10 a tab. 11 uvádí srovnání reakčních podmínek a typického produktu thermochemických přeměn.

Tab. 10 Srovnání podmínek reakce a typického produktu thermochemické přeměny

Proces	Reakční podm. (teplota(°C); doba setrvání páry)	Složení výsledného produktu (% hmot.)		
		Uhlí	Kapalina	Plyn
Pyrolýza: pomalá	~400; h-týden	35	30	35
Pyrolýza: střední	~500; ~10-20 s	20	50	30
Pyrolýza: rychlá	~500; ~1 s	12	75	13
Zplynování	~800; ~10-20 s	10	5	85
Hydroter. karbonizace	~180-250; není setrvání páry, doba reakce ~1-12 h	50-80	5-20% (rozpuštěno v procesní vodě)	2-5

Zdroj: Libra et al., 2011.

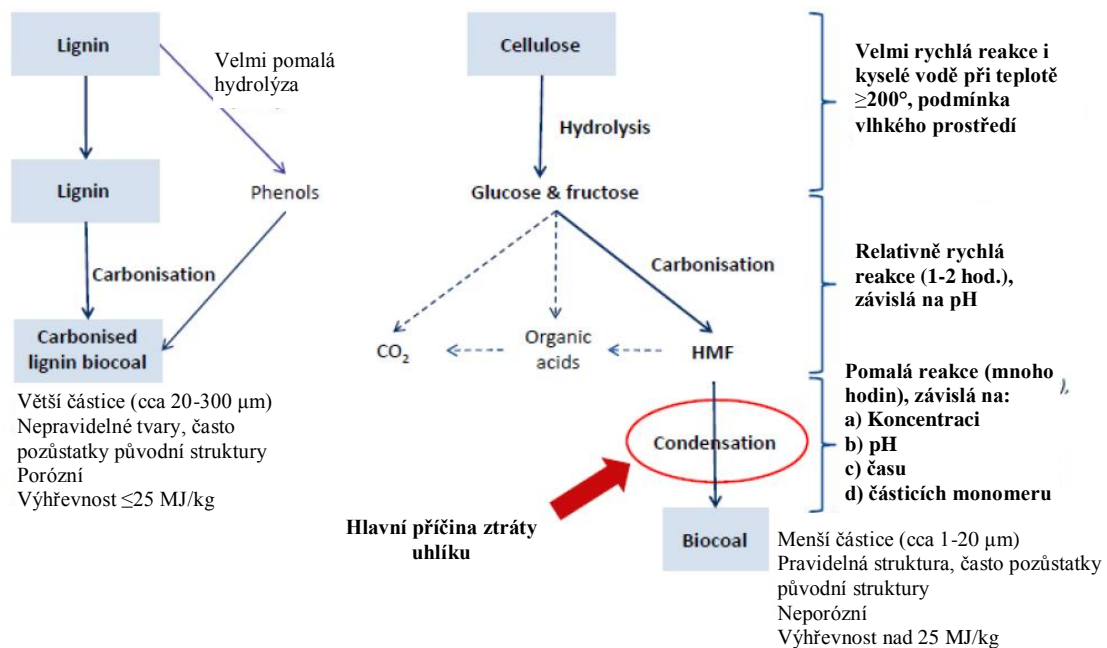
Tab. 11 Srovnání procesních parametrů a produktů thermochemických přeměn

Reakční teplota [°C]	Reakční doba [h]	Reakční atmosféra	Vlhkost suroviny	Distribuce produktu						
				Uhlí			Kapalina		Plyn	
				Podíl [% hm.]	Uhlík [% hm.]	Energie [MJ/kg]	Podíl [% hm.]	Energie [MJ/kg]	Podíl [% hm.]	Energie [MJ/m ³]
300-500	sek.-týdny	inert	suchý	12-35	24-95	11-35	30-75	10-35	13-35	5-30
500-800	sek.	vzduch/O ₂	suchý	10	4-46	Nedost.	5	Nedost.	85	2-20
850-1200	sek.-minuty	vzduch/O ₂	suchý	15-20	2-10	-	-	-	80-90	12-16 MJ/kg
180-250	hod.-dny	inert/limit.O ₂	vlhký	50-80	58-83	18-36	5-20	Nedost.	2-5	Nedost.

Zdroj: Lu et al., 2010.

Na Obr. 14 je prezentován průběh HTC přeměny vstupního materiálu na biouhli podle společnosti AVA-CO₂ v rámci mezinárodní konference International Biomass Conference 5. června 2013 v Lipsku.

Obr. 14 Průběh reakce HTC



Zdroj: Kläusli, 2013.

Příloha 7 znázorňuje grafický průběh experimentu HTC. Jedná se o jednu z možných procesních variant, která vychází z dvoufázového modelu prof. Marka Antoniettiho.

Na Obr. 15 je ukázka biodpadu před zpracováním technologií HTC a výsledný produkt – biouhlí. Biodpad, čistírenský kal, digestát z BPS nebo odpad z kuchyní a stravoven jsou intenzivně zkoumanými odpady v rámci vývoje HTC.

Obr. 15 Ukázka vstupní suroviny (biodpadu) a výstupního produktu (biouhlí) procesu HTC



Zdroj: Blöhse, 2012.

A) Vliv času

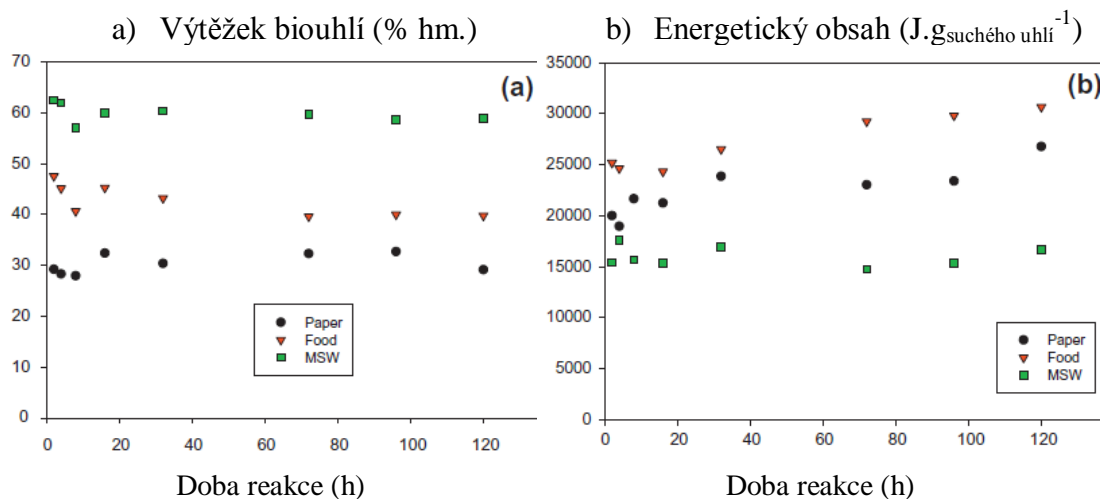
Ve studii Lu (2012) byl zkoumán vliv času – délky reakce (0 – 140 hodin) na výtěžnost biouhli a na energetický obsah (Obr. 16) Obr. 17 Změny v rozložení obsahu uhlíku mezi skupenstvími v průběhu HTC pro králíčí jídlo.. Experimenty probíhaly v 160 ml nerezovém trubkovitém reaktoru, při teplotě 250 °C a koncentraci sušiny 20 % hm. Parametry testovaných vzorků z papíru, králíčího jídla (výrazně nižší vlhkost oproti KO) a smíšeného komunálního odpadu (nadrčená směs obsahovala: 45,5 % papír, 9,6 % sklo, 16,4 % plast, 17,6 % králíčí jídlo, 10,9 % hliníkové plechovky) jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 Prvková analýza vybraných odpadů

Odpadní substrát	% C	% H	% O	% N	% Vlhkosti
Papír (Paper)	36	5	48,1	0,04	7,6
Králíčí jídlo (Food)	42,5	5,8	40,8	3,2	12,6
Směsný kom. odpad (MSW)	28,5	3,8	38,7	0,56	6,3

Zdroj: Lu et al., 2012

Obr. 16 Vliv délky reakce (v hodinách) na výtěžnost biouhli (a) a hodnotu energetického obsahu biouhli (b)



Zdroj: Lu et al., 2012

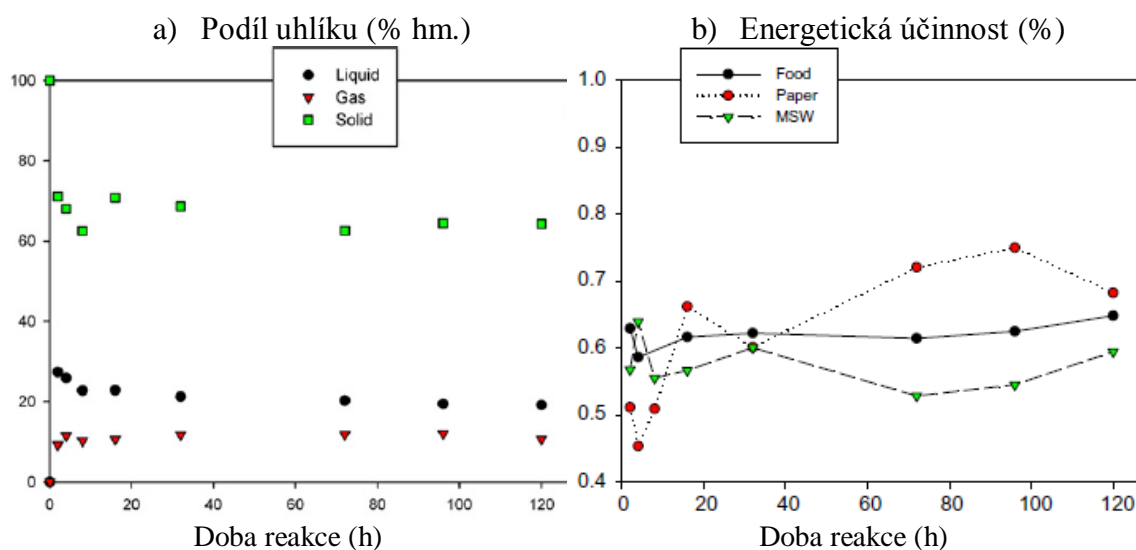
Z obr. 16 a) je zřejmé, že délka reakce má významný vliv na výtěžnost biouhli vztahenou k původní hmotnosti biomasy. Vliv je zřejmý především v prvních 20 hodinách. Je to pochopitelné, protože v tomto intervalu probíhá nejvíce chemických

přeměn než se proces stabilizuje. Pro králíčí jídlo jakožto podobný vzorek kuchyňským odpadům je výtěžnost mezi 40-48 %.

S délkou reakce (obr. 16 b) znatelně roste energetický obsah vzorků papíru i králíčího jídla. Biouhlí z králíčího jídla dosáhlo nejvyšší hodnoty energie přibližně 30 MJ.kg⁻¹ při délce reakce 120 hodin.

Na Obr. 17 je znázorněna změna rozložení uhlíku mezi skupenstvími v závislosti na čase a účinnost energetické přeměny na čase (poměr energie v biouhlí ve srovnání s původním vzorkem).

Obr. 17 Změny v rozložení obsahu uhlíku mezi skupenstvími v průběhu HTC pro králíčí jídlo.



Zdroj Lu et al.,2012

Biouhlí z králíčího jídla obsahovala přibližně 70 % podílu uhlíku v tuhé složce. Nejvyšších hodnot podílu bylo dosaženo v čase 2 a 18 hodin.

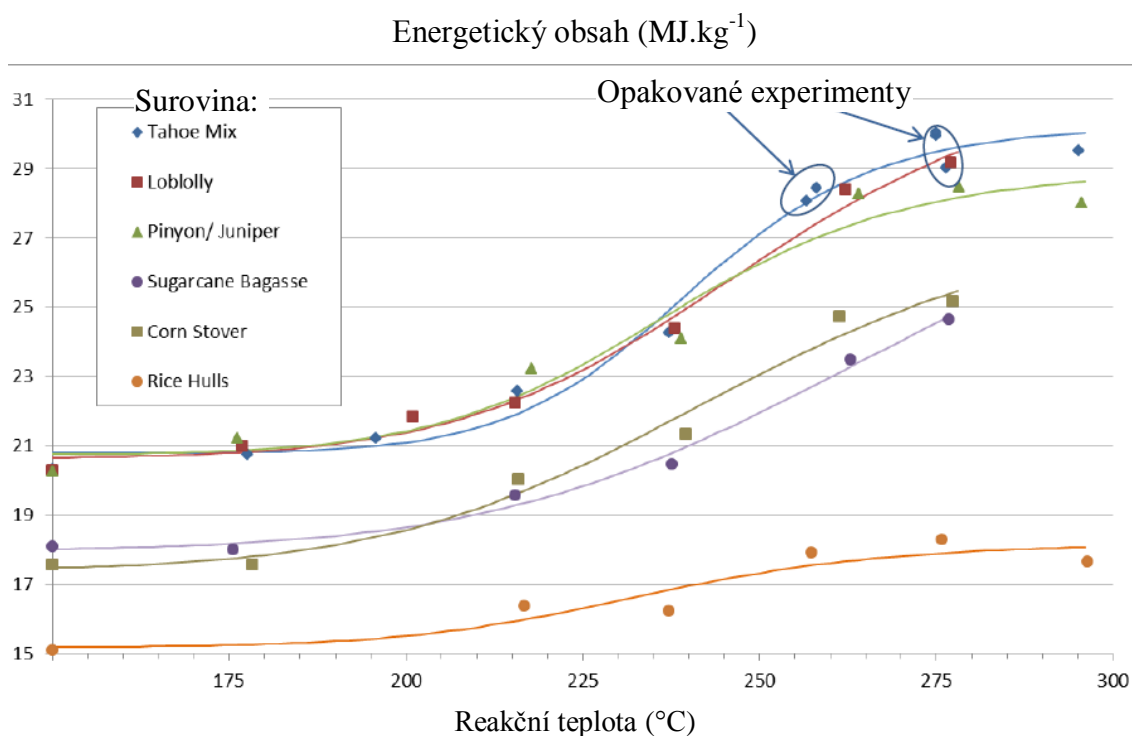
Z obr. 17 b) je zřejmé, že energetická účinnost přeměny závisí také jak na čase, tak substrátu. Pro králíčí jídlo účinnost klesá v úvodních 5 hodinách, poté až do 20. Hodiny roste a dále zůstává přibližně konstantní na hodnotě kolem 65 %.

B) Vliv teploty

Ve studii Broch et al. (2012) byl na lignocelulóзовé biomase zkoumán vliv reakční teploty na energetický obsah, viz Obr. 18. Na všech zkoumaných vzorcích dochází s rostoucí teplotou k růstu energetického obsahu. Tyto výsledky potvrzuje i Titrici et al.

(2012). Vliv reakční teploty je důležitý pro rozklad chemických látek. Funke (2012) uvádí, že hemicelulóza reaguje od 180 °C, lignin od přibližně 200 °C a celulóza od přibližně 220 °C. Li et. al (2013) potvrzuje, že s teplotou roste energetická hustota produktu, viz **Příloha 8**.

Obr. 18 Vliv teploty na energetický obsah



Zdroj: Amber Broch, 2012.

Výsledky ze studie Li et al. (2013) dále dokládají, že výtěžek tuhé složky vzorků potravinových odpadů klesá s dobou reakce a také s teplotou reakce. Nejnižší výtěžek dosáhly vzorky se sušinou 32 % při teplotě 275 °C oproti 225 °C a 250 °C, viz Příloha 9. Stejný efekt byl pozorován na výtěžnost tuhé složky při karbonizaci celulózy, glukózy a dřeva ve studiích Hoekman (2011), Kang (2012) a Knezevic (2009).

C) Vliv tlaku

Třetí důležitou veličinou po teplotě a čase je tlak. Funke (2012) dává tlaku v procesu HTC jen vedlejší roli. Je nutný pouze pro udržení podmínek syté páry v reaktoru.

D) Vliv koncentrace

Podíl vody má především zásadní vliv na energetickou bilanci procesu. Li et al. (2013) ale dokládá vliv koncentrace obsahu sušiny také na podíl obnovené tuhé složky a energetickou hustotu. S koncentrací roste podíl obnovené tuhé složky (viz **Příloha 9**), ale s vyšší koncentrací získáváme procentuálně nižší nárůst energetické hustoty (viz **Příloha 10**).

E) Vliv katalyzátorů

Již v práci Tropsch (1922) je experimentálně potvrzeno, že selektivní přídavky oxidů železa výrazně urychlují karbonizaci. Dále všechny relevantní výzkumy potvrzují nutnost kyselého prostředí pH 3 – 6, které je obvykle upraveno uměle pomocí kyselin citronové, mravenčí či levulové.

F) Vliv substrátu na efektivitu energetické přeměny

Ramke et al. (2011) prezentuje rozdíly vztažené na čistý energetický zisk z biologických substrátů pro technologie AF a HTC. Podle jeho výsledků je bilanční zisk energie ze zbytků jídla při využití HTC ($2,5 \text{ MWh.t}_{\text{suš}}^{-1}$) o přibližně 40 % nižší než při využití AF ($4,25 \text{ MWh.t}_{\text{suš}}^{-1}$), viz příloha 11. Nejlepší energetickou bilanci pro technologii HTC prokázal substrát pivovarského mláta $3,5 \text{ MWh.t}_{\text{suš}}^{-1}$.

Také Blöhse (2012) prověřoval výtěžnost energie ve výsledném tuhém produktu (biouhli) oproti vstupnímu substrátu. Biouhli ze zbytků jídla má energetický výnos 64,9 % původní energie. Další 14,2 % původní energie lze získat zpracováním procesní vody.

Blöhse (2012) ověřuje také uhlíkovou bilanci produktů HTC. Jeho naměřené hodnoty potvrzují výše uvedené výsledky Lu (2012). Distribuce uhlíku je závislá na vstupním substrátu a procesních podmínkách. V tuhém produktu obvykle zůstává 70 – 80 % uhlíku (v závislosti na vstupním substrátu je rozptyl 40 – 90 % pro tuhé skupenství).

Energetický zisk vztažený na obsah energie v původním substrátu se dle Blöhseho (2012) pohybuje obvykle 66 – 80 %. Průměrná hodnota 36 testovaných substrátů měla hodnotu 72 %. Druh biomasy měl na výsledek významný vliv.

G) Energetická bilance technologie HTC

Společnost AVA-CO2 (tvůrce prvního zařízení HTC v průmyslovém měřítku) na konferenci IBC Leipzig (International Biomass Conference) v červnu 2013 prezentovala teoretické možnosti energetické účinnosti HTC za předpokladu spálení biouhlí v kotli. Výpočty jsou vztaženy k pivovarskému mlátu s podílem sušiny 33 %. Předpokládá se okamžité spálení produktu biouhlí se zbytkovou vlhkostí 30 %. Vypočtený energetický zisk je roven 71 % původní energie biomasy, viz příloha 12. Udává, že tato hodnota je přibližně o 30 % vyšší než při využití AF. Tato hodnota koresponduje se s výsledky Ramke et al. (2011) pro pivovarské mláto uvedenými výše.

Podle Stemanna at. al. (2011) je z pohledu energetické náročnosti nejdůležitější minimalizace nákladů k ohřevu biomasy a sušení výsledného produktu. Důležitá je především recyklace energie z horké procesní vody (respektive par). Dle jeho experimentů s dřevěnými třískami se energetický zisk procesu HTC pohyboval mezi 74-78 % energie vstupní biomasy.

Li et al. (2013) prověřoval energetickou bilanci HTC procesu na biomase z kuchyňského odpadu oproti prostému spálení odpadu (viz příloha 13). Do výpočtu bral v potaz tyto energetické operace: A) pro spálení: (1) energii potřebnou k odpaření vody; (2) energii potřebnou k ohřátí tuhé složky na teplotu hoření 1100 °C a (3) experimentálně určený energetický obsah materiálu. Je předpokládána 100 % účinnost přeměny. Všechny tepelné ztráty byly zanedbány, stejně jako energie potřebná k ohřevu samotného reaktoru. B) Pro HTC: (1) energii potřebnou k ohřevu substrátu pro karbonizaci; (2) energie získaná v tuhé a plynné složce; (3) úpravy biouhlí (např. sušení); (4) spálení.

Analýza prezentuje, že kuchyňský odpad o obsahu sušiny 5 % použitý v procesu HTC vede k negativní energetické bilanci. Tento nepříznivý výsledek je z velké části důsledkem nutnosti ohřevu velkého množství vody. HTC pro KO s obsahem sušiny 20 % je již energeticky pozitivní, ale je méně příznivá než spalování (spalování KO s obsahem sušiny 32 %). Karbonizace původního vzorku KO s obsahem 32 % sušiny je energeticky pozitivní a výhodnější než spalování, výsledné množství využitelné energie bylo $13,6 \text{ MJ.kg}_{\text{suš}}^{-1}$, což představovalo 65 % celkové energie biouhlí. Hlavními důvody výhodnosti HTC před spalováním bylo, že ohřev vody při HTC vyžaduje méně energie

než vypaření vody při spalování. Navíc energie vyprodukovaného biouhlí a plynu je srovnatelné s tím, co se očekává při spálení. Sušení získané tuhé složky je energeticky nejnáročnější operací HTC pro odpad se sušinou 32 %. Vyžaduje 1,42 krát více energie než ohřev vody. Pokud by byla tuhá složka vysušena pasivně na vzduchu, byl by energetický zisk mnohem vyšší (Li et al., 2013). Ramke et al. (2009) dokládá, že mechanické odvodnění tuhé složky po HTC je mnohem účinnější než odvodnění surového odpadu. Předsušení na vzduchu je taktéž možné pro proces spalování, ale délka tohoto procesu může vést k problémům se zápachem do okolí (Li et al., 2013).

Funke (2012) shrnuje nejdůležitější předpoklady dobrého návrhu procesní linky HTC:

- Volba reakční teploty a teplotní profil.
- Nízký poměr voda / biomasy.
- Vysoké doby pobytu na snížení TOC ztráty.
- Využití autokatalytického efektu.
- Zhutnění biomasy.
- Materiálová bilance (s rostoucí intenzitou HTC se snižuje výnos uhlí).

3 Cíle práce

Tato práce si klade za cíl odpovědět na otázku, jaká je vhodná technologie pro nakládání s kuchyňským odpadem. Tato technologie musí vyhovovat legislativním předpisům, respektovat požadavky odpadového hospodářství a životního prostředí a být hospodářsky rentabilní. Na základě literární rešerše bylo rozhodnuto experimentálně ověřit zpracování a energetickou bilanci kuchyňského odpadu technologií anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace. Dále se práce zaměřuje na problém s dostatečným množstvím tohoto dopadu. Ten je sice produkován na mnoha místech, ale jen v malém množství, které je nutno svázat. Proto v případě technologie anaerobní fermentace bude práce zaměřena na prověření hospodářského výsledku nového typu malých BPS (BPS s instalovaným el. výkonem pod 100 kW_{el} jsou nejen v ČR výjimečné), které by svou kapacitu uspokojily převážně kuchyňským odpadem a mohly by vzniknout v místech, kde není dosud správně vyřešeno komunální nakládání s kuchyňským odpadem. Stane-li se kuchyňský odpad dominantní surovinou BPS, měly by být parametry procesu anaerobní fermentace přizpůsobeny pro tento odpad tak, aby docházelo k maximální měrné výtěžnosti metanu (v práci počítáno jako objem vyprodukovaného metanu na hmotnost rozložené organické sušiny substrátu) a tím pádem i k lepšímu hospodářskému výsledku celého provozu. Pro ekonomickou efektivnost investice je počítáno s prostou dobou návratnosti 15 let, tj. na období, pro které dříve ERÚ stanovoval výši podpory výkupních cen elektřiny.

Výnos bioplynu a jeho kvalitu lze ovlivnit předúpravou substrátu a také volbou vhodných parametrů procesu – typem reaktoru, teplotou vyhívání, dobou zdržení substrátu ve fermentoru, hodnotou pH, zatížením vyhívacího prostoru nebo rovnoměrností přísunu substrátu. Jejich optimalizací lze zvýšit výtěžnost metanu a výnosy BPS.

- 1. Hypotéza:** V případě, že se výzkumem podaří zvýšit měrnou výtěžnost metanu z kuchyňského odpadu, dosáhnou 15 leté prosté návratnosti i ekonomické investice do velmi malých bioplynových stanic o elektrickém výkonu 20-50 kW_{el}.

Druhou vybranou technologií k experimentálnímu ověření byla zvolena hydrotermální karbonizace, která je ještě ranou a dostatečně neprověřenou alternativou zpracování kuchyňského odpadu v průmyslovém měřítku.

Výzkum a vývoj plnohodnotného zařízení pro hydrotermální karbonizaci je velmi obsáhlou problematikou. Klíčovým problémem procesu je návrh takové procesní linky, která omezí energetické ztráty procesu. Ohřev vstupní biomasy a sušení výstupního produktu jsou energeticky nákladnými operacemi, které spolu s recyklací procesní vody, představují hlavní překážky k dosažení ziskové hospodárnosti.

Vzhledem k rozsáhle problematice tohoto relativně mladého procesu, se bude tato práce zabývat především vlivem parametrů procesu na kvalitu výstupu.

Na základě naměřených výsledků bude proveden teoretický výpočet energetické a materiálové bilance procesu k ověření pozitivního nebo negativního přínosu zpracování kuchyňského odpadu. Tato technologie bude následně porovnána s anaerobní fermentací.

2. Hypotéza: Hydrotermální karbonizace kuchyňských odpadů je v případě kontinuálního provozu energeticky výhodnější než anaerobní fermentace kuchyňských odpadů.

Oba výše zmíněné procesy budou experimentálně prověřeny a vzájemně porovnány. Na základě výsledků literární rešerše a vlastního experimentálního měření bude formulována vhodná metodika k nakládání s kuchyňskými odpady.

4 Metody řešení

Odpady znamenají zátěž a znečištění životního prostředí. Hromadící se odpad znamená problém, který musí lidská civilizace řešit. Ideálním řešením je získat ze zpracování odpadu další užitek. Rozsah užítku závisí na volbě řešení. Pro některé druhy odpadů se nabízí několik možností a výběr optimální varianty závisí na výsledcích testování. Pro některé odpady může být řešením kombinace více procesů nebo potřeba nalezení zcela nové metody.

Tato práce se zabývá aktuálním problémem kolem kuchyňských odpadů, jež se řadí mezi BRKO. Změny v evropské a české legislativě zamezily tradičnímu nakládání s tímto odpadem a je nutno najít jinou, případně zcela novou, metodu nakládání.

Byla sestavena podrobná literární a legislativní rešerše zabývající se problematikou biologicky rozložitelných odpadů a provedeno vyhodnocení změn ze zavedení přísnějších požadavků na zpracování rizikových bioodpadů včetně kuchyňských odpadů. V rámci těchto okolností byl analyzován přínos nejvhodnějších metod k jeho využívání. Hlavní pozornost je věnována metodám anaerobní fermentace (AF) a hydrotermální karbonizace (HTC).

AF se již hojně využívá v praxi a nabízí momentálně dobrý způsob materiálového i energetického využití odpadů. Řízená AF v bioplynových stanicích je efektivní způsob ekologického zpracování BRO. Výsledným produktem jsou biologicky stabilizovaný substrát s hnojivým účinkem a bioplyn. V rámci rešerše byly prošetřeny bioplynové stanice na území ČR a EU zpracovávající bioodpady s výrazným podílem komunálního odpadu a kuchyňského odpadu ve významném množství. Byly popsány a zhodnoceny použité technologie AF a typy využívaných reaktorů.

Druhou zvolenou metodou, která bude experimentálně prověřena, je proces HTC. Tento proces, který je v posledních deseti letech opětovně intenzivně zkoumán, se také jeví jako vhodné řešení pro vlhký rizikový bioodpad typu kuchyňských odpadů.

Vlastní praktické výsledky z experimentů AF a HTC budou porovnány s výsledky z odborné literatury, včetně dalších zmíněných metod v kap. 2.7, především – s kompostováním a spalováním. Budou hodnoceny parametry energetické, ekonomické a ekologické.

4.1 Metodika testů anaerobní fermentace

Výnos bioplynu a jeho kvalitu lze ovlivnit volbou vhodných parametrů procesu a také předúpravou substrátu. Výzkum se zabýval vlivem předúpravy bioodpadu a vlivem procesních podmínek AF na produkci bioplynu.

Řiditelnými faktory experimentu byly:

- předúprava – mechanická a fyzikální dezintegrace
- teplota vyhnívání
- doba zdržení (resp. doba kontaktu) substrátu ve fermentoru
- zatížení vyhnívacího prostoru organickými látkami.

Sledovanými veličinami byly:

- produkce bioplynu včetně jeho složení (CH_4 , CO_2 , H_2S , O_2)
- rozklad organické sušiny.

V rámci měření byl vždy zkoumán vliv jednoho faktoru na sledovanou veličinu. Experimenty byly dle potřeby replikovány.

Experimenty zkoumající vliv dezintegrace byly prováděny na vsádkovém reaktoru, experimenty zkoumající vliv procesních parametrů na reaktoru v polokontinuálním provozu.

Byl sledován nejen obsahem metanu v bioplynu (čili jeho energetická hodnota), ale také přítomnost nežádoucích látek, především H_2S , které způsobují problémy při čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu nebo při využívání bioplynu při spalování v kogeneračních jednotkách. H_2S neboli sulfan či sirovodík se nalézá v plynu velmi často a jeho množství je úměrné složení substrátu. Častou příčinou výskytu sulfanu v bioplynu jsou právě živočišné odpady a potravinářské odpady s vysokým obsahem proteinů. Přítomností sirovodíku, jeho toxicitou na metanogenní bakterie a mechanismy odstraňování se zabývá řada autorů. Jeho přítomnost má velký význam na kvalitu bioplynu.

Byla ověřována možnost využití vyhnílého digestátu jako recyklátu v procesu AF či jako organického hnojiva pro zemědělské využití. V tomto případě musí digestát

splňovat zákonem předepsané podmínky a musí splňovat limitní hodnoty rizikových prvků, ověřené laboratorními rozbory.

4.1.1 Popis experimentálního zařízení reaktoru v polokontinuálním provozu

Laboratorní experiment anaerobní mokré fermentace kuchyňských odpadů byl prováděn na laboratorním zařízení skládajícím se z dvouplášťového fermentoru z nerezové oceli, který byl opatřen mechanickým mícháním, termostatem sloužícím k ohřevu substrátu, počítačem se sondami (měřící pH a teplotu), dávkovacím čerpadlem chemikálií a mokrým plynojemem. Celá sestava mimo počítače je zobrazena na Obr. 19.

Obr. 19 Laboratorní zařízení pro anaerobní fermentaci substrátů



Fermentor byl zkonstruován jako dvouplášťová nerezová izolovaná nádoba o objemu 30 litrů s užitným objemem 25 litrů. Nádoba měla rovné dno a odnímatelné víko. Ve dnu bylo umístěno vypouštěcí hrdlo a hrdlo pro odběr vzorků. Ve spodní polovině válcové části fermentoru byla proti sobě osazena dvě průhledítka DN 65 procházející meziplášťovým prostorem. Na vnitřním válcovém plášti byly přivařeny svislé zarážky zabraňující roztočení substrátu při míchání. Náplň fermentoru byla ohřívána vodou cirkulující meziplášťovým prostorem. Její ohřev byl zajištěn láznovými

termostaty HUBER s regulací teploty. Plášť fermentoru byl zaizolován izolací Ventizol 35, aby se zmenšily tepelné ztráty do okolí.

Míchání substrátu bylo prováděno centrickým dvouvtulovým míchadlem ON 69 1020 o průměru 100 mm, 2 x 4 listy/45° poháněným asynchronním trojfázovým motorem AIS 80B6, typu B5 – přírubový, o výkonu 550 W a otáčkách 915 min⁻¹. Míchadlo bylo umístěno na odnímatelném víku a jeho hřídel opatřena speciální ucpávkou, která zamezovala úniku bioplynu. Elektromotor byl vybaven frekvenčním měničem pro plynulou regulaci otáček v rozsahu 1-50 Hz. Objem fermentoru mohl být míchán automaticky nebo manuálně dle potřeby.

Dávkování čerstvého substrátu bylo prováděno skrz trubici procházející víkem fermentoru a ústící do vnitra nádoby pod hladinu vyhnívajícího substrátu v blízkosti míchadla, tak aby bylo zajištěno efektivní promíchání. Dávkování nejprve probíhalo manuálně jednou denně, později byl systém dávkování dovybaven peristaltickým dávkovacím čerpadlem a 2 l nádrží na substrát. Čerpadlo bylo ovládáno časovým spínačem umožňujícím dávkovat bez přítomnosti obsluhy.

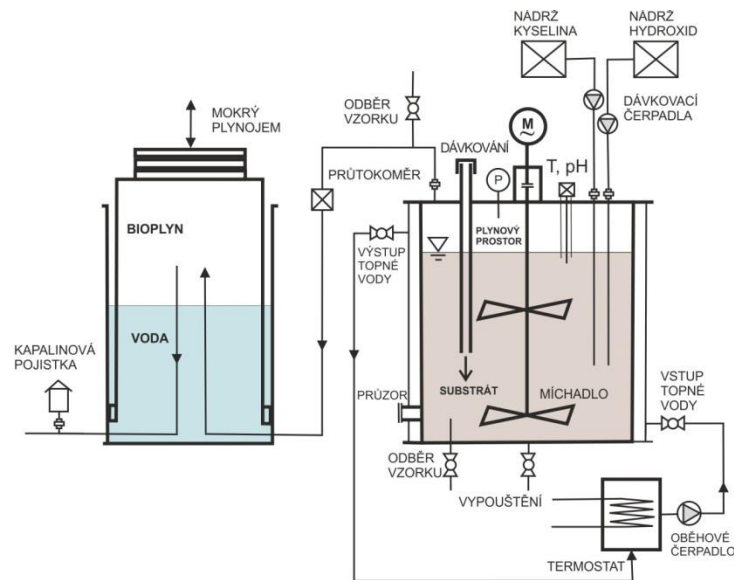
Pro jímání bioplynu byl využit systém mokrého plynojemu, který se skládal z álcové plastové průhledné nádrže naplněné vodou a z nerezového zvonu. Ten se pohyboval vertikálním směrem nahoru nebo dolů v závislosti na produkci bioplynu. Kapalinová pojistka umístěná na odvodním potrubí bioplynu chrání fermentor před poškozením od nedovoleného zvýšení přetlaku a je nastavena na 1,5 násobek pracovního tlaku. Bioplyn mohl odcházet z fermentoru dvěma otvory ve víku. První slouží pro odchod do plynojemu přes průtokoměr Bronkhorst High-Tech typ LOW- Δ P-FLOW, který byl připojený k počítači, druhý otvor byl využíván k analýze bioplynu přístrojem Dräger X-am 7000, který současně detekoval koncentrace CH₄, CO₂, H₂S a O₂.

K případné regulaci pH pomocí kyseliny nebo zásady sloužila peristaltická dávkovací čerpadla s dávkovacími otvory umístěnými na víku nádoby v blízkosti dráhy míchadel, tak aby bylo zajištěno okamžité a rovnoměrné rozmíchání roztoku v celém objemu fermentoru. Aplikační program Magic XBC běžící na PC spolupracoval s připojenými sondami, které snímaly hodnotu pH a teploty uvnitř obou fermentoru. Naměřená data byla přenášena do počítače.

Experiment byl monitorován kamerou s vysokým rozlišením a nočním viděním. Systém byl dále konfigurován pro vzdálené pozorování přes internet a prováděl hodinové snímání experimentu především pro zpětnou kontrolu správného dávkování.

Propojení jednotlivých zařízení je patrné z technologického schématu na Obr. 20.

Obr. 20 Technologické schéma zařízení pro reaktor v polokontinuálním provozu



4.1.2 Průběh experimentu a vzorkování

Laboratorní experiment mokré AF kuchyňských odpadů byl prováděn na fermentoru o objemu 30 l umožňujícím průběžné dávkování a odebírání vzorků v průběhu fermentace. Snahou experimentu bylo přiblížení se podmínkám reálné fermentace na bioplynové stanici v kontinuálním provozu.

Experiment probíhal v pěti etapách. V první etapě byl fermentor naplněn čistírenským kalem (z brněnské ČOV), jehož větší část už prošla fermentací, a tak obsahoval příhodné bakteriální kultury. Za zvolených podmínek popsaných v etapě 1 níže byl znovu nastartován proces řízeného vyhnívání. V druhé etapě bylo zahájeno pravidelné dávkování vyhnivacího prostoru kuchyňským odpadem. Poté, co vyhnívání substrátu obsahoval většinový podíl z kuchyňských odpadů, začala třetí etapa experimentu, která se zabývala vlivem procesní parametrů fermentačního procesu pro maximální produkci bioplynu (respektive metanu). Zkoumal se vliv teploty, vliv doby setrvání substrátu ve fermentoru a vliv zatížení vyhnivacího prostoru. Dávkování

substrátu probíhalo pouze v pracovních dnech. Víkendové pauzy v dávkování ale způsobovaly výpadky v kontinuitě procesu a nedovolovaly změřit vliv faktorů. Proto bylo přistoupeno k úpravám zařízení a systém byl dovybaven peristaltickým dávkovacím čerpadlem a dvoulitrovou nádrží na substrát. Dávkování bylo nově ovládáno časovým spínačem umožňujícím plnění i bez přítomnosti obsluhy. Ve čtvrté etapě experimentu byla věnována pozornost maximalizaci výtěžnosti bioplynu skrz co nejrovnoměrnější přísun substrátu, který pomocí čerpadla mohl probíhat v libovolných intervalech několikrát denně. V páté etapě experimentu probíhala kofermentace kuchyňského odpadu s olejem na smažení. V šesté etapě byla snaha adaptovat proces vyhnívání do termofilních podmínek a pokračovat v měření. Adaptace se nepovedla.

Záznamy měření byly zaznamenávány do šablony záznamu, kterou zobrazuje příloha 14.

Etapa 1: Adaptace

Fermentory byly naplněny směsí vyhnílého a směsného surového kalu. Směs byla promíchána a byl odpuštěn vzorek 0,2 kg směsi ke stanovení parametrů vzniklého substrátu – stanovení sušiny při 105 °C (na sušících vahách Kern MLS 50-3) a ztráty žiháním při 550 °C. Za stálého míchání byly fermentory pozvolna zahřívány na procesní teplotu 36 °C a na této teplotě udržovány po celý experiment. Tlak v reaktoru byl udržován na hodnotě 1,2 kPa. Substrát byl po celý experiment promícháván v pravidelných intervalech po dobu 3 minut s 5 minutovou pauzou. Po 5 dnech bylo množství metanových bakterií v substrátu dostatečné dle obsahu metanu, který tvořil 67 % vznikajícího bioplynu.

Z provozu veřejného univerzitního stravování byl obden přivážen čerstvý kuchyňský odpad, který byl nadrcen drtičem kuchyňského odpadu. V průběhu drcení byl ředěn vodou k dosažení lepší tekutosti. Při plnění fermentoru nebylo možno zcela zabránit vniku okolního vzduchu dovnitř reaktoru a jeho kontaktu se substrátem. Nežádoucí je v tomto případě především přítomnost kyslíku a narušení anaerobního prostředí, jež dočasně brzdí činnost metanogenních bakterií, dokud není kyslík spotřebován hydrolytickými a acidogenními bakteriemi, jejichž část je schopna činnosti v aerobním i anaerobním prostředí. V průběhu 30 dnů bylo v 22 dávkách (každý

pracovní den jedna dávka) dodáno do fermentoru 11,5 kg substrátu kuchyňských odpadů. Tab. 13 uvádí parametry vstupních a výstupních materiálů.

Tab. 13 Průměrné hodnoty hlavních parametrů v závěru adaptační etapy

	Sušina	Organická sušina	Podíl C/N	pH
Surový KO	25-30 %			
Upravený KO před dávkováním do fermentoru	15-17 %	89-94 %	14-24	3.5-5.5
Digestát	3-3.5 %	58-72 %		7.2-7.7

Etapa 2: Vliv doby kontaktu a vliv organického zatížení

Ve třetí etapě experimentu byl zkoumán vliv podmínek fermentačního procesu na produkci bioplynu. Etapa probíhala 97 dnů. V první polovině byla doba zdržení (resp. doba kontaktu) substrátu ve fermentoru udržována na dvaceti dnech, v druhé polovině byla prodloužena na třicet dnů. Zatížení vyhnívacího prostoru v první i druhé polovině klesalo z 5 na 2,5 kg_{os}⁻¹.d⁻¹. Bakterie sice reagují velmi rychle na nové změny v procesu, ale přizpůsobení se novým podmínkám a stabilizace procesu probíhá v řádech týdnů. (Weiland et al., 1991)

Jednou denně v pracovní dny probíhalo dávkování čerstvého substrátu a odpouštění vyhnílého digestátu, který byl analyzován. Čerstvý substrát měl průměrné parametry 15 – 17 % sušiny a 90 – 92 % org. sušiny, pH 3,5-4,5. Vyhnílý digestát měl průměrné parametry 3 – 3,9 % sušiny a 65 – 72 % org. sušiny. Teplota a pH uvnitř fermentoru bylo monitorováno nepřetržitě. Dílčí koncentrace plynů CH₄, CO₂, H₂S a O₂ v bioplynu byly měřeny taktéž jednou denně. Kuchyňské odpady se již v této etapě ukázaly jako vhodná surovina pro AF.

Bylo nainstalováno nové dávkovací čerpadlo, které zamezilo prodávám v dávkování o víkendech i vniku vzduchu do reaktoru. Dalších 30 dnů byl zkoumán vliv organického zatížení. Dávkování substrátu probíhalo v intervalu několika hodin, tak aby se v reaktoru udržovalo rovnoměrné organické zatížení.

Etapa 3: Recirkulace digestátu

Ve třetí etapě experimentu probíhal pokus s recirkulací vypouštěného neupraveného digestátu. Byl využíván k naředění tuhého kuchyňského odpadu při drcení

a substituoval tak dodávky čisté vody do reaktoru. Výhodou vyhnílého digestátu měla být přítomnost vhodných bakterií a tedy urychlení vyhnívacích procesů v čerstvém substrátu. Již dříve byl potvrzen pozitivní přínos recirkulace filtrovaného digestátu (Stabnikova et al., 2008)

Etapa 4: Kofermentace s olejem na smažení

Čtvrtá etapa experimentu byla zaměřena na kofermentaci kuchyňského odpadu s olejem na smažení (odpad vznikající také v kuchyních s 2 – 3 násobnou výtěžností bioplynu). Ačkoliv Li (2011) uvádí pozitivní zlepšení procesu na výtěžnost bioplynu, tak tento efekt nebyl potvrzen. Naopak docházelo k inhibici metanogenního procesu a tato etapa experimentu byla po 5 dnech ukončena.

Etapa 5: Přejít z mezofilních do termofilních podmínek

V páté etapě probíhala adaptace procesu vyhnívání z mezofilních podmínek 36 °C do termofilních podmínek 50 °C. Pro přechod byla zvolena strategie jednostupňového zvýšení teploty. Podle Bouškové (2008) přechod v jednom kroku výrazně zkrátí adaptační čas oproti změně ve více krocích. Míchání fermentoru bylo omezeno na 5 minut denně jen kvůli distribuci tepla ve fermentoru. Adaptace probíhala 30 dní, poté bylo obnoveno dávkování substrátu. Nástupu metanogeneze nezačal ani po 10 dnech. Pravděpodobně pro nedostatek živin nedošlo k rozmnožení termofilních bakterií. Kvůli rekonstrukci laboratoře musel být celý experiment ukončen.

4.1.3 Popis experimentálního zařízení vsádkového reaktoru

K laboratorním experimentům s dávkovým způsobem plnění fermentoru byly využity tři standardní plastové elektrické mixéry na zeleninu o objemu 500 ml s užitným objemem 350 ml. Průhledná nádoba měla rovné dno a odnímatelné víko s míchacím zařízením. Do stěny nádoby byl vyvrtán otvor a opatřen hadičkou s uzávěrem pro odběr vzorků. Nádoby byly ponořeny ve vodě ve skleněném akváriu ohříváném akvarijními topítky, voda byla udržována na teplotě 36 °C. Akvárium bylo nad vodní hladinou zakryto polystyrenovou izolací.

Míchání substrátu bylo zajištěno přímo vlastními míchadly mixérů, které byly připojeny na regulovatelný laboratorní zdroj s regulací napětí a proudu, tak aby mohla

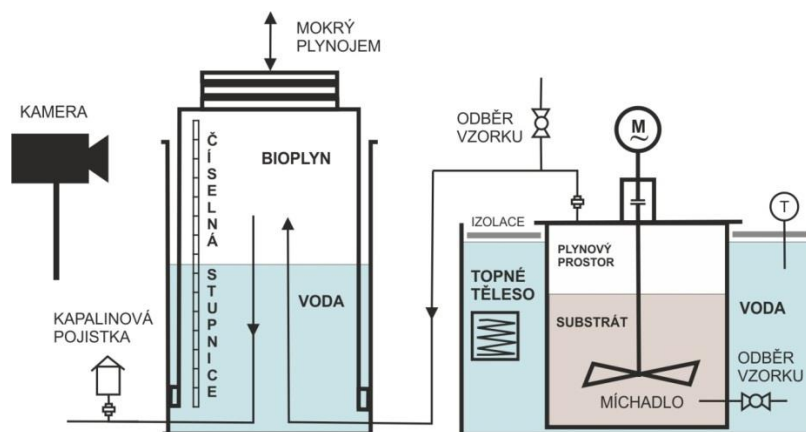
být vhodně nastavena intenzita míchání. Laboratorní zdroj byl dále napojený na časový spínač, aby míchání probíhalo v časových intervalech.

Pro jímání bioplynu byl využit systém mokrého plynojemu, který se skládal ze tří válcových plastových odměrných válců nahoře zatížených a ponořených v nádrži s vodou. Odměrné válce se pohybovaly vertikálním směrem nahoru v závislosti na produkci bioplynu. Kapalinová pojistka umístěná na odvodním potrubí bioplynu chránila fermentory před poškozením od nedovoleného zvýšení tlaku a byla nastavena na 1,5 násobek pracovního tlaku. Bioplyn odcházel z fermentorů otvorem ve víku. Produkce bioplynu byla odečítána ze stupnice na stěnách odměrných válců, které byly monitorovány kamerou s vysokým rozlišením a nočním viděním. Monitorovací systém byl nastaven k pořizování pravidelných snímků v intervalu jedné hodiny.

Při dostatečném množství vyprodukovaného bioplynu byla denně prováděna analýza složení plynu přístrojem Dräger X-am 7000, který současně detekoval koncentrace CH_4 , CO_2 , H_2S a O_2 .

Propojení jednotlivých zařízení je patrné z technologického schématu na Obr. 21.

Obr. 21 Technologické schéma zařízení pro vsádkový reaktor



4.1.4 Průběh experimentu a vzorkování

Cílem experimentu bylo stanovení vlivu předúpravy substrátu na výtěžnost bioplynu a stupeň rozkladu organické sušiny za dobu kontaktu. Experiment byl prováděn na principu jedноступňové mokré AF.

Jako vstupní materiál sloužily zbytky nedojedených obědových pokrmů z provozu veřejného univerzitního stravování, které obsahovaly brambory, těstoviny, rýži, v menším množství kuřecí maso, kuřecí játra, kuřecí kůži, hranolky, kousky vařené papriky, mrkev a kousky rajčat.

Jako základní substrát pro nastartování procesu AF sloužil již vyhnílý kuchyňský odpad, který prošel řízeným procesem vyhnívání při experimentu v kontinuálně plněném reaktoru.

Byly zvoleny 4 druhy předúprav, které byly provedeny ihned po dodávce čerstvého substrátu do laboratoře. Následně bylo u všech vzorků stanoveno množství sušiny při 105 °C (na sušících vahách Kern MLS 50-3), ztráty žiháním při 550 °C a změřeno pH. Poté byly fermentory naplněny směsí čerstvého předupraveného substrátu a substrátu vyhnílého.

Charakteristika předúprav:

- A) kuchyňský odpad nadrcen v drtiči kuchyňského odpadu,
- B) kuchyňský odpad nasekán na částice o velikosti přibližně 15 mm,
- C) pasterizace kuchyňského odpadu - nadrcení a ohřev na teplotu 70 °C a následné vaření 70 minut,
- D) nadrcení a zmražení kuchyňského odpadu na -15 °C po dobu 12 hodin a následné roztání v laboratorní sušárně při 40 °C po dobu 30 minut.

Byly provedeny tři experimenty. V prvním experimentu byly vsádky namíchány v poměru 1:1 (vyhnílý KO : předupravený čerstvý KO). Experiment byl neúspěšně ukončen po 10 dnech, protože nedošlo k nástupu metanogeneze. V druhém experimentu byly vsádky namíchány v poměru 3:1 a ve třech fermentorech byly porovnány předúpravy A, B a C, sledování probíhalo 20 dní. V třetím experimentu byly porovnány předúpravy B, C a D.

V průběhu experimentů bylo jednou denně zaznamenáváno množství vzniklého plynu. V 2., 4., 6. 8. a 10. den byly analyzovány koncentrace plynů CH₄, CO₂, H₂S a O₂. Mezi 10. až 20. dnem experimentu již nebyl v plynojemu dostatek plynu k provedení analýzy. Po skončení experimentu bylo u vsádek stanoveno množství sušiny při 105 °C, ztráty žiháním při 550 °C a změřeno pH.

4.2 Metodika testů hydrotermální karbonizace

Biomasa byla podstoupena sériovému testování s odlišně nastavenými procesními parametry (pH, teplota, doba zdržení, vliv iniciační a polymerační fáze). Základní průběh experimentů vycházel především z patentu Markuse Antoniettiho - PROCESS FOR CONVERTING BIOMASS TO COAL-LIKE MATERIAL USING HYDROTHERMAL CARBONISATION (WO/2009/127727). Byly prováděny základní srovnávací experimenty, při kterých byla biomasa pouze ohřata a udržována na zvolené teplotě bez přídavků jiných činidel. V následných experimentech byly využívány dva kroky HTC (iniciační a polymerační krok). Mezi těmito kroky byla tlaková nádoba ochlazená a otevřena k přidání polymeračního činidla do testovaného vzorku biomasy.

Testovanou biomasou byla směs kuchyňských odpadů a jeho vybrané podmnožiny - brambor, jogurt a cibule.

Řiditelnými faktory experimentu byly:

- teplota reakce
- doba zdržení
- pH
- zatížení vyhnívacího prostoru organickými látkami.

Sledovanou veličinou bylo:

- spalné teplo.

Výstupní suroviny byly analyzovány a porovnány:

- struktura (dostupné vybavení umožňovalo rozlišení snímků v řádu 100 μm , jiná pracoviště publikují v řádu 1 μm , proto bylo od sledování struktury opuštěno)
- spalné teplo,
- spalovací a tepelně emisní vlastnosti produktů

4.2.1 Popis experimentálního zařízení

K výrobě biouhlí sloužila multifunkční tlaková nádoba s příslušenstvím - reaktor BR-300 od společnosti Berghof s užitným objemem 350 ml osazený teploměrem, tlakoměrem a otvorem k externímu tlakování. Ohřev nádoby do teploty 300 °C (cca 220 °C pro vzorek uvnitř nádoby) a míchání vzorku zajišťovalo magnetické ohřívadlo. Laboratorní sestava je zobrazena na Obr. 22.

Obr. 22 Laboratorní zařízení pro hydrotermální karbonizaci



4.2.2 Průběh experimentu a vzorkování

Experimentální měření procesu HTC vycházelo především z uveřejněného patentu Prof. Antoniettiho „Process for converting biomass to coal-like material using hydrothermal carbonisation“ v roce 2009. Experiment zahrnoval fázi iniciační a polymerační. Substráty jsou kvůli lepšímu míchání a proudění materiálu rozmixovány a naředěny na 20 % hm. sušiny, je-li obsah sušiny v surovém stavu vyšší. Suší biomasa je naředěna destilovanou vodou. *pH* před iniciační fází je upraveno do rozmezí 4 – 5 přidáním kyseliny citrónové. Surová biomasa je v uzavřeném reaktoru ohřívána na teplotu 200 nebo 215 °C se zdržením 5 minut. V důsledku ohřevu dochází v reaktoru k růstu tlaku způsobenému vodní parou k hodnotám do 3 MPa. Poté je reaktor zchlazen na teplotu 70 – 80 °, je odebrán vzorek substrátu a do reaktoru vložena polymerační činidla 30% H₂O₂ a FeCl₃·6H₂O definována v patentu. Teplota v druhém polymeračním kroku je nižší než v prvním, je udržována na hodnotě 190 °C s dobou zdržení 2, 4 nebo 10 hodin.

Pro experiment a analýzu jsou vybrány vzorky namixovaných nedojedených zbytků jídla z provozu hromadného univerzitního stravování, surový brambor, cibule a metanový jogurt s 10 % tuku.

Stanovení obsahu vody bylo prováděno dle normy CEN 14774-2 certifikovaným analyzátozem vlhkosti Ohaus MB 25.

Pro zhodnocení palivářských vlastností posuzovaných vzorků byla provedena elementární (prvková) analýza, která je základem každého výpočtu tepelné práce spalovacích zařízení. Při těchto výpočtech se stanoví množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování paliva, množství a složení spalin a měrnou hmotnost spalin (Gürdil et al., 2009). Pro vlastní stechiometrickou analýzu uvažujeme o tzv. dokonalém spalování a referenčním množstvím kyslíku ve spalinách. Výpočet spotřeby vzduchu a množství spalin byl v této práci určen analytickým způsobem, tzn. podle údajů elementární analýzy za pomoci stechiometrických rovnic. Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin jsou udávány za tzv. normálních podmínek, tj. při teplotě $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ kPa}$ a na referenční obsah kyslíku ve spalinách $O_r = 11 \text{ } \%$.

Byly stanoveny jednotlivé procentuální hmotnostní podíly uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody ve vzorcích. Nehořlavé látky paliv, tj. obsah popele a obsah veškeré vody, se určily spálením, resp. sušením příslušného vzorku.

Prvkové elementární analýzy byly uskutečněny Vysokou školou chemicko-technologickou v Praze, Fakultou technologie ochrany prostředí v rámci řešených interních grantů autorů. Prvky uhlík, vodík a dusík byly stanoveny na analyzátoru CHN Elementar vario EL III firmy Elementar podle ČSN ISO 29541. Přesnost metody je výrobcem stanovena pro souběžnou analýzu 5 mg standardu 4-amino-benzen sulfonovou kyselinu v modulu CHNS na $< 0,1\% \text{ abs.}$ pro každý prvek.

Pro stanovení chloru a síry byly vzorky spáleny v kyslíko-vodíkovém plameni na Wickboldově aparatuře podle ČSN EN 15289. Nehořlavé látky paliv, tj. obsah popela a obsah veškeré vody, se určilo spálením, resp. sušením příslušného vzorku. Pro stanovení celkového obsahu vody byl použit certifikovaný analyzátor vlhkosti Ohaus MB 25. Měření bylo realizováno dle normy ČSN EN 14774-1.

Spalné teplo posuzovaných vzorků bylo určeno měřením v kalorimetru IKA 2000 podle ČSN EN 15170 a ČSN EN 14918. Nebo provedeno pomocí automatického adiabatického spalného kalorimetru MS 10 německé firmy Laget v laboratoři Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, ČZU v Praze.

Výhřevnost v práci byla určena výpočtem podle ČSN EN 14918, k čemuž byly využity výsledky elementární analýzy jednotlivých vzorků.

Odfiltrovaná kapalná část výstupního produktu byla prověřována testem fytotoxicity v laboratoři Fakulty agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, ČZU v Praze.

Platná Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší (2012) definuje kvalitativní ukazatele pro tuhá biopaliva pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu do 5 MW včetně. Tyto požadavky na kvalitu tuhých paliv jsou uvedeny v Tab. 14 a budou porovnány s naměřenými výslednými parametry posuzovaných vzorků ze směsi kuchyňského odpadu, brambor, jogurtu a cibule. Pro zhodnocení naměřených hodnot byly použity základní statistické metody.

Tab. 14 Požadavky na kvalitu tuhých paliv z biomasy

Kvalitativní ukazatel	Jednotka	Limitní hodnoty dle celkového jmenovitého příkonu spalovacího zařízení	
		≤ 0,3 MW	> 0,3 – 5 MW
Voda	% hm.	< 15	< 20
Kvalitativní ukazatel v bezvodém stavu			
Výhřevnost	MJ·kg ⁻¹	> 15	> 13
Obsah popela	% hm.	< 10	< 25
Obsah chlóru	mg·kg ⁻¹	< 10 000	< 10 000

Stechiometrické výpočty spalovacích procesů doplňují charakteristiky paliva a jsou základem pro jakýkoliv tepelný výpočet. Jsou důležité zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako pro kontrolu práce stávajících spalovacích zařízení. Při těchto výpočtech se stanoví:

- výhřevnost paliva
- množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování paliva
- množství a složení spalin
- měrná hmotnost spalin.

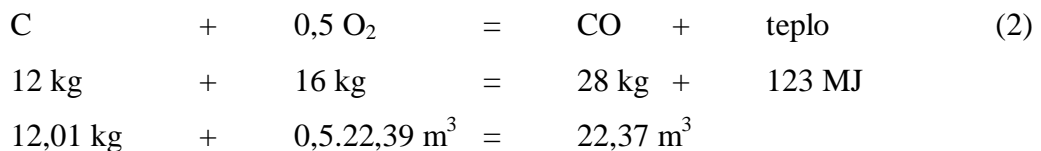
Podle podmínek, které se vytvoří pro spalovací proces, rozeznáváme dokonalé a nedokonalé spalování. Při dokonalém spalování nastane spálení všech hořlavých složek v palivu, takže ve vzniklých spalinách již nejsou hořlavé složky obsaženy.

Dokonalého spalování s teoretickým přebytkem vzduchu (L_{min}), které se dá vypočítat ze stechiometrických vztahů spalovacích rovnic, lze dosáhnout jen při zcela dokonalém promísení paliva se vzduchem a při ideálních spalovacích podmínkách. V praktickém provozu však je pro zajištění dokonalého spalování spotřeba vzduchu (kyslíku) větší než teoretická a závisí na druhu paliva, spalovacího zařízení, oblasti spalování (difúzní nebo kinetická) atd. Mluvíme pak o tzv. přebytku spalovacího vzduchu, který je tím menší, čím dokonaleji se palivo smísí se vzduchem. Poměr mezi skutečnou a teoretickou spotřebou vzduchu se nazývá součinitel přebytku vzduchu n a rovná se:

$$n = \frac{L_{skut}}{L_{min}} = \frac{O_{skut}}{O_{min}} \doteq \frac{20,95}{20,95 - O_2} \doteq \frac{CO_{2,max}}{CO_2}, (-) \quad (1)$$

Přebytek vzduchu je nutný, aby bylo zaručeno dokonalé spalování. Na druhé straně je však nutno mít na zřeteli škodlivost příliš velikého přebytku. Čím více vzduchu se spalování zúčastní, tím více tepla je odnášeno spalinami, klesá spalná teplota, součinitel využití paliva apod. Proto je nutno používat optimální přebytek vzduchu.

Základní stechiometrický vztah pro nedokonalé spalování uhlíku je:



Při spalování uhlíku na CO se spotřebuje pouze poloviční objem kyslíku než při dokonalém spalování na CO_2 . Výhřevnost CO je $12\,645 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$. V důsledku značně vyšší rychlosti reakce hoření vodíku proti průběhu hoření uhlíku je prakticky i při $n < 1$ ztráta nespáleným vodíkem nulová.

Obsah kyslíku ve spalinách je měřítkem přebytku vzduchu jen v případě, že spalování je dokonalé.

Výpočet spotřeby vzduchu a množství spalin je uskutečněno podle údajů elementární analýzy pomocí stechiometrických rovnic (analytický způsob).

Jako okysličovadlo se dále uvažuje suchý vzduch o zjednodušeném složení:

- a) Objemově: 21 % O₂, 78,05 % N₂. Z tohoto složení lze vypočítat poměr kyslíku, dusíku a vzduchu ze vztahu:

$$O_2 : N_2 : vzduch = \frac{21}{21} : \frac{78,05}{21} : \frac{100}{21} = 1 : 3,716 : 4,76 \quad (3)$$

Hmotnostně: 23,2 % O₂, 75,47 % N₂. Obdobně určíme poměr vztahem:

$$O_2 : N_2 : vzduch = \frac{23,2}{23,2} : \frac{75,47}{23,2} : \frac{100}{23,2} = 1 : 3,253 : 4,31 \quad (4)$$

Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu bez vodní páry, při zanedbání vzácných plynů, obsažených v nepatrných množstvích, je uvedeno v tab. 15.

Tab. 15 Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu

Plyn	Objemové složení (%)	Hmotnostní složení (%)
O ₂	21,000	23,200
N ₂	78,050	75,474
Ar	0,920	1,280
CO ₂	0,030	0,046

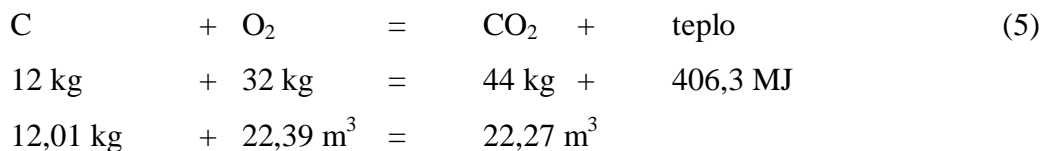
Při přesných výpočtech objemových množství produktů spalování (kouřových plynů) a potřebného objemu spalovacího vzduchu se při spalování vychází z molekulové hmotnosti jednotlivých prvků hořlaviny. Molekulové hmotnosti prvků jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Molekulové hmotnosti prvků v hořlavině

Prvek	Kilomol	
	Hmotnostní (kg)	Objemový (m ³)
Vodík (H)	2,016	22,39
Uhlík (C)	12,01	22,39
Kyslík (O)	32,00	22,39
Síra (S)	32,06	22,39
Dusík (N)	28,02	22,39

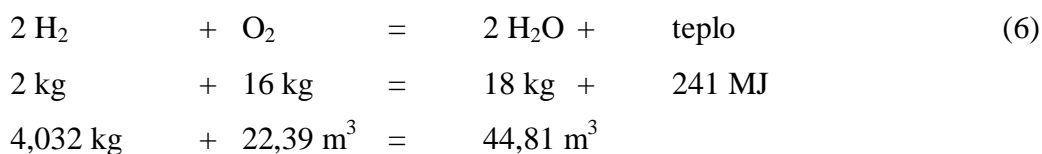
Použitím molekulových hmotností jednotlivých prvků lze vyjádřit vztahy pro oxidační reakce při spalování stechiometrickými rovnicemi:

Spalování uhlíku na oxid uhličitý:



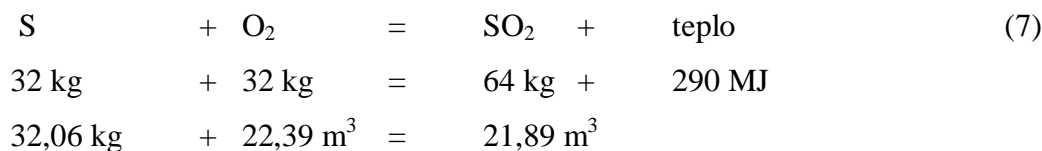
Výhřevnost 1 kg čistého uhlíku je $33,85 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Spalování vodíku na vodní páru:



Výhřevnost 1 kg vodíku je $120,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Spalování síry na oxid siřičitý:



Výhřevnost 1 kg síry je $9,0625 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Pro převod ostatních prvků a vlhkosti (vody) do plynné fáze platí:

Pro dusík:



Pro kyslík:



Pro vlhkost platí:



Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin v rovnicích jsou udávány za tzv. normálních podmínek, tj. při teplotě $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ kPa}$.

4.3 Metodika výpočtu hospodářského výsledku malé bioplynové stanice na kuchyňský odpad

Cílem práce je vyhodnocení hospodářského potenciálu malých bioplynových stanic, ve kterých bude nakládáno s kuchyňskými odpady jakožto hlavní surovinou. Parametry AF budou nastaveny způsobem, který simulovaly laboratorní experimenty – mezofilní podmínky 36 °C, doba zdržení 20 dnů, experimentálně dosažená měrná výtěžnost bioplynu. Bioplyn bude využíván pro kogeneraci a velikost BPS je určena v rozsahu 20 – 50 kW elektrického výkonu kogenerační jednotky. Bude uvažováno s vlastní spotřebou elektrické a tepelné energie pro provoz. BPS vzhledem k charakteru odpadu bude disponovat hygienizační a pasterizační jednotkou.

Horní hranice velikosti BPS je určena s ohledem na potenciálně dostupné množství KO v ekonomicky přijatelné svozové oblasti. Dolní hranice je nastavena s respektem na vyšší měrných investičních nákladů na 1 kW_{el} výkonu, které jsou v případě malých komunálních BPS s hygienizací 2 – 3 krát vyšší než u velkých zemědělských BPS. Dolní hranice také vychází z nabídky BPS pro německý trh, který od roku 2013 podporuje BPS do velikosti instalovaného výkonu 75 kW_{el}.

Velký rozvoj BPS v Evropě nastal především díky podpoře hospodaření pomocí výkupních cen vyrobené elektřiny a investičním dotacím pro podporu OZE. V ČR překročila výroba energie z bioplynu limit stanovený Národním akčním plánem a BPS uvedené do provozu od 1. ledna 2014 budou nově podporovány pouze tzv. doplňkovým zeleným bonusem (k základnímu zelenému bonusu) za výrobu elektřiny v tzv. vysokoúčinné kombinované výrobě elektřiny a tepla (KVET).

Výnosy BPS jsou kalkulovány pro příjmové položky, které jsou dosažitelné v prostředí ČR v roce 2014. V případě, že by nebyla potvrzena návratnost investice pro uvažované typy BPS, povedou navrhována řešení alespoň ke zlepšení hospodářského výsledku.

Protože BPS uvažovaného typu a velikosti nejsou v Evropě v provozu, budou vstupní data vycházet s odhadů a doporučení těchto literárních zdrojů, které se odborně a podrobně zabývají odhadem investičních a provozních nákladů BPS a jejich výnosy:

- Leitfaden Biogas (2013).
- Bioplyn v praxi (2004).
- Mini-Biogasanlage bis 75 kW: Bau, Betrieb und Wirtschaftlichkeit (BiomassMuse).
- Metodika kalkulací nákladů a výnosů bioplynových stanic v zemědělských podnicích. (2013).

4.4 Metodika energetického porovnání technologií anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace pro kuchyňské odpady

Kuchyňské odpady budou experimentálně zpracovány oběma technologiemi. Na základě experimentů budou získány energetické parametry produktů. Srovnání energetických bilancí bude provedeno pro procesní linky fungující v kontinuálním provozu a podklady pro takový výpočet budou čerpána z literární rešerše. Do bilance nebudou zahrnuty energetické ztráty, které by vznikly při transportu surovin k zpracovatelské stanici.

V případě AF bude uvažováno nastavení procesu, které simulovaly laboratorní experimenty – mezofilní podmínky 36 °C, doba zdržení 20 dnů, experimentálně dosažená měrná výtěžnost bioplynu. Bioplyn bude využíván pro kogeneraci, což je důležitý fakt pro určení účinnosti energetické přeměny.

K výpočtu energetické bilance HTC budou vzaty výsledky ze zpracování směšného kuchyňského odpadu na biouhli. Energetické požadavky procesu budou odvozeny z literární rešerše. Biouhli bude využito spálením.

Budou vzájemně porovnány energie v produktech obou technologií – bioplynu z AF a biouhli z HTC. Po odečtení měrné energie spotřebované v procesu a účinnosti kogenerační jednotky, respektive kotle, bude porovnán čistý energetický zisk.

4.5 Statistická analýza

4.5.1 Statistická analýza vztahů mezi veličinami – regresní analýza

Žádný jev přírodě ani ve společnosti nevzniká ani neprobíhá libovolně, ale je ve vztahu k jiným jevům a nemůže být pochopen správně, je-li z těchto vztahů a souvislostí vytržen. Soubor postupů a metod, dovolující řešení otázky závislosti dvou nebo většího počtu veličin, se nazývá regresní a korelační analýza. Tato analýza umožňuje řešit dva základní úkoly: zajistit formu závislosti a vyjádřit ji matematickou funkcí (tzv. regresní funkcí – regresní úloha); určit stupeň síly, s jakou se daná závislost projevuje uprostřed různých rušících vedlejších faktorů – korelační analýza.

Nástrojem regresní analýzy je spojitá regresní funkce jedné či více nezávisle proměnných, udávající střední hodnotu závislé proměnné Y , odpovídající daným hodnotám nezávislých X_j , $j=1, 2, \dots, k$. Logika příčinnosti zkoumaného vztahu je základem specifikace regresní funkce, sledující co nejvýstižnější zobrazení mechanismu účinku faktoru na výsledek. Měřítkem výstižnosti je stupeň přiblížení hodnot závislé proměnné, předpověděných regresních funkcí, skutečným hodnotám této proměnné pozorovaným ve výběrovém souboru.

Veškeré regresní analýzy v této práci budou provedeny za pomoci programu Microsoft Excel 2010.

(Kába, 2006)

4.5.2 Rozptyl

Rozptyl je definován jako součet čtverců odchylek jednotlivých hodnot znaku x od aritmetického průměru \bar{x} , dělený rozsahem souboru:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}. \quad (11)$$

Vzorec představuje prostou formu rozptylu, která je vhodná pro výpočet rozptylu z netříděné řady naměřených hodnot.

Rozptyl s^2 ve tvaru zavedeném v předchozím vzorci (11) používáme u jednorozměrných výběrových souborů pouze jako popisné charakteristiky variability. Chceme-li výběrový rozptyl použít k odhadu, vyjdeme při jeho výpočtu ze tvaru:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 . \quad (12)$$

(Kába, 2007)

4.5.3 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka (s) je definována jako kladná druhá odmocnina rozptylu:

$$s = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{n}} . \quad (13)$$

Výhodou směrodatné odchylky vzhledem k rozptylu je to, že charakterizuje variabilitu v měrných jednotkách sledovaného statistického znaku, zatímco rozptyl je vyjádřen ve čtvercích těchto jednotek.

(Svatošová, 2007)

5 Výsledky a diskuze

5.1 Výsledky experimentů anaerobní fermentace

Experimenty anaerobní fermentace proběhly dle navržené metodiky ve vsádkových i polokontinuálních reaktorech. Nepodařila se transformace procesu z mezofilních do termofilních podmínek. Z důvodu rekonstrukce laboratoře nemohl být experiment v termofilních podmínkách opakován.

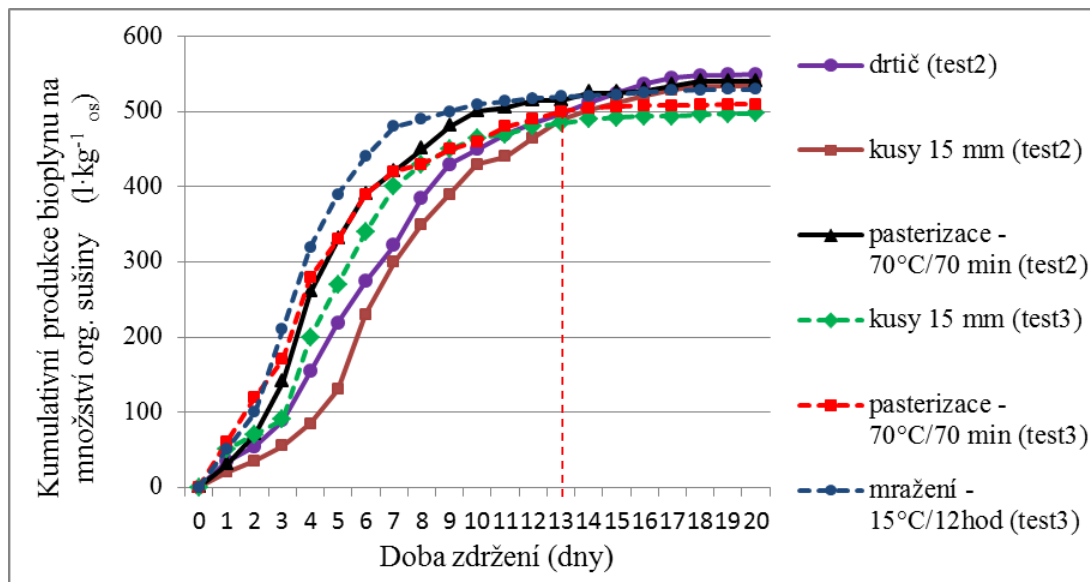
5.1.1 Vliv předúpravy substrátu

Předúprava substrátu a zvýšení jeho biologické rozložitelnosti je založeno na zpřístupnění látek enzymovému rozkladu. Kuchyňské odpady jsou v partikulární formě a důležitým krokem k jejich rozkladu je převedení do lépe přístupné formy - roztoku. Předúprava substrátu zkracuje první fázi rozkladu tzv. hydrolyzu. Tab. 17 uvádí parametry předupravených vzorků a následnou produkci bioplynu a stupeň rozkladu po fermentaci. Obr. 23 zobrazuje specifickou produkci bioplynu vztaženou na množství rozložené organické sušiny ve vzorcích a dobu zdržení. Experimenty byly provedeny za mezofilních podmínek 36 °C, substrát byl pravidelně krátce promícháván v intervalech 15 minut. Tab. 18 udává vypočtenou regresní analýzu naměřených jevů.

Tab. 17 Parametry předupravených vzorků a výsledky fermentace

	sušina (%)	org.sušina (%)	pH	Produkce bioplynu ($l \cdot kg^{-1} os$)	Stupeň rozkladu (%)
A drtič (test2)	16,5	91	4,2	549	82,2
B 15 mm (test2)	17,8	91	4,1	534	81,8
C pasterizace (test2)	17,3	91	4,4	540	84,2
B 15 mm (test3)	16,8	91	3,9	497	82,4
C pasterizace (test3)	16,1	90	4,4	510	83,2
D mražení (test3)	15,3	90	4,4	530	85,3
vyhnilý substrát (inokulum)	3,55	72	7,6		

Obr. 23 Kumulativní produkce bioplynu přepočtena na množství rozložené org. sušiny (podíl metanu byl nejvyšší v desátý den měření u všech vzorků v rozmezí 68 – 71 %, podíl nežádoucích plynů H_2S a O_2 nepřekročil hodnoty 0,5 %, respektive 0,004 %)



Tab. 18 Regresní analýza vztahů mezi veličinami

Označení experimentu	Regresní rovnice	Hladina spolehlivosti
drtič (test2)	$y = -1,7875x^2 + 68,96x - 113,49$	$R^2 = 0,9884$
15 mm (test2)	$y = -1,5902x^2 + 65,837x - 135,96$	$R^2 = 0,9728$
pasterizace (test2)	$y = -2,4874x^2 + 80,798x - 99,55$	$R^2 = 0,9751$
15 mm (test3)	$y = -2,3233x^2 + 75,902x - 103,81$	$R^2 = 0,9732$
pasterizace (test3)	$y = -2,2826x^2 + 73,245x - 58,326$	$R^2 = 0,9784$
mražení (test3)	$y = -2,7176x^2 + 82,764x - 66,272$	$R^2 = 0,9506$

Do srovnání není zahrnut první test se vsádkami smíchanými v poměru 1:1 (vyhníly KO : předupravený čerstvý KO). Test byl ukončen po 10 dnech, protože nedošlo k zapracování anaerobního reaktoru. Příčinou bylo výrazné přetížení vyhnívacího prostoru organickými látkami na množství inokula, jehož následkem byla stimulace procesu acidogeneze a inhibice metanogeneze. Druhý a třetí test proběhl se vsádkami v poměru 3:1.

Z výsledků testů vyplynulo, že jednotlivé předúpravy urychlují především počáteční fázi vyhnívání, ale již kolem 13. dne kontaktu se množství vyprodukovaného bioplynu srovnává. Potvrzuje také Wang et al., 2009. Stupeň rozkladu jednotlivých vzorků se po

20 dnech kontaktu příliš nelišil a vyprodukované množství bioplynu na něm nebylo přímo závislé. Kuchyňské odpady ze zbytků pokrmů se ukázaly jako substrát snadno podléhající hydrolýze bez nutnosti předúprav. Jedním z hlavních důvodů je, že již při přípravě pokrmů či skladování prošla většina potravin vařením či mražením, tudíž předúpravy podobné těmto procesům mají v případě těchto potravin zanedbatelný efekt a zvýšení produkce bioplynu k vyložené energii pro desintegraci substrátu není významné. Naopak významného efektu mohou dosáhnout předúpravy, kterými materiál v průběhu životního cyklu neprošel např. ohřev na 120 °C či mražení při -80 °C (Ma et al., 2010) (Stabnikova et al., 2008). Naopak práce Qiao et al. (2011) ukazují mírné snížení produkce bioplynu (stejně jako množství metanu) z kuchyňských odpadů při hydrotermální předúpravě při 170 °C po 1 hodinu. Jiné druhy biomasy jako prasečí kejda, kravská kejda, mix zeleniny a ovoce nebo čistírenský kal vykázaly zvýšení produkce. U kravské kejdy došlo k zvýšení produkce bioplynu, ale k nižší produkci metanu. V každém případě ale musejí kuchyňské odpady dle nařízení 1774/2002 (ES) upravující veterinární a hygienická pravidla pro vedlejší výrobky živočišného původu projít před vstupem do fermentoru pasterizační hygienizační jednotkou (70 °C po dobu 60 minut) a drcením (maximální velikost částic 12 mm).

Mužík (2012) ověřoval přínos jiného typu předúpravy. Experimentálně ověřil vliv biotechnologické aditiva (enzymatického a bakteriálního roztoku Gasbacking) na výtěžnost metanu. V provedených pokusech byly použity odpady ze závodního stravovacího zařízení, které se dávkuje do BPS Kněžice. Výsledky experimentů ze vsádkových reaktorů v mezofilních podmínkách 40 °C a době zdržení 30 dnů vykázaly nárůst 6 % měrné výtěžnosti bioplynu (a 8,2 % metanu) na množství odbourané organické sušiny.

Na základě uskutečněné statistické analýzy při testování nezávislosti hodnot jednotlivých měření při hladině testu 0,02 nemají jednotlivé předúpravy (drcení, sekání na 15 mm, pasterizace, mražení) vstupních surovin vliv na konečné výsledné parametry výtěžnosti bioplynu.

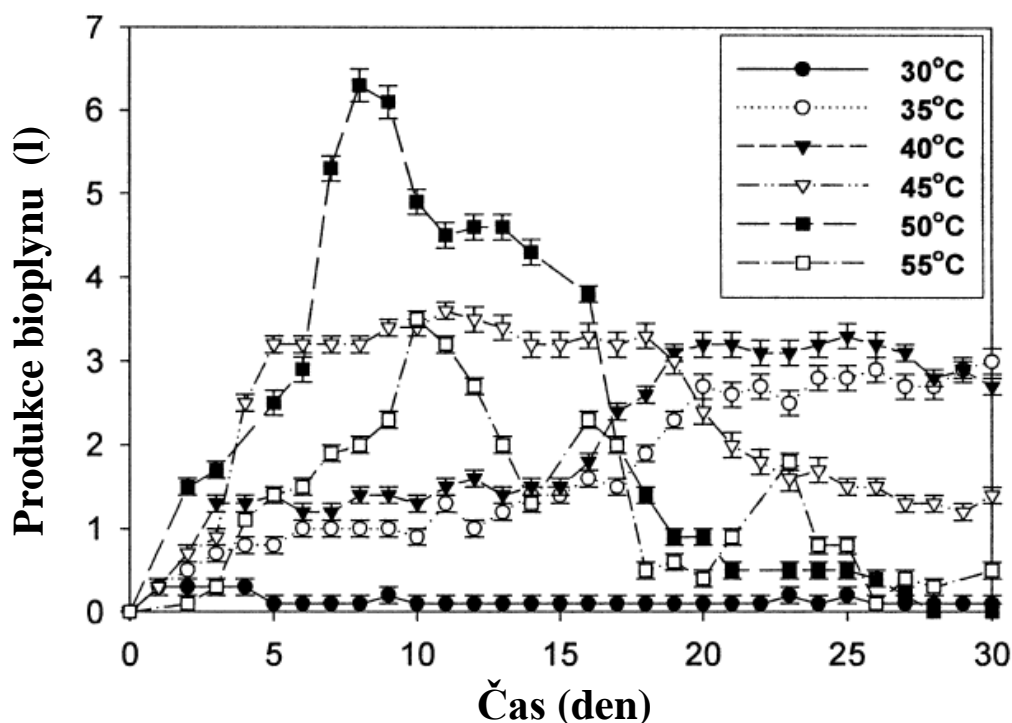
5.1.2 Vliv teploty na výtěžnost bioplynu

Veškeré experimenty AF byly naplánovány v mezofilních podmínkách 36 °C a termofilních podmínkách 50 °C k porovnání vlivu teploty na výtěžnost bioplynu. Na základě literární rešerše Boušková et al. (2004), Iranpour et al. (2002), Zabranská et al. (2002) byla k adaptaci do termofilních podmínek zvolená strategie jednostupňového zvýšení teploty. Podle Bouškové et al. (2004) přechod v jednom kroku výrazně zkrátí adaptační čas oproti změně ve více krocích. Experiment adaptace do nových podmínek se nepodařil. Pravděpodobně pro nedostatek živin nedošlo k rozmnožení termofilních bakterií. Kvůli rekonstrukci laboratoře nemohla být adaptace opakována a celý experiment musel být ukončen. Z tohoto důvodu nejsou výsledky vlivu mezofilních a termofilních podmínek konfrontovány vzájemně, ale jsou srovnány s výsledky AF kuchyňských či potravinářských odpadů z literatury.

Rychlost procesu vyhnívání je na teplotě silně závislá. Zásadně platí: čím vyšší je teplota, tím rychleji nastává rozklad a tím vyšší je produkce plynu, tím kratší je doba vyhnívání a tím nižší je obsah metanu v bioplynu. (Schlulz, 2004)

Kim at. al.(2006) prezentuje srovnání výtěžnosti bioplynu v 8 litrovém vsádkovém reaktoru v rozmezí teplot 30 – 55 °C pro směs potravinářských odpadů s inokulem v poměru 1:1. Výsledky na obr. 24 naznačují, že aktivita metanogenních bakterií roste s teplotou, zatímco pro termofilní bakterie vykazovaly maximum při teplotě <55 °C. Bouallagui et al. (2004) také udává vyšší výtěžnost pro odpad z ovoce a zeleniny v termofilních podmínkách.

Obr. 24 Výtěžnost bioplynu za rozdílných teplot v vsádkovém reaktoru



Zdroj: Kim et al. (2006)

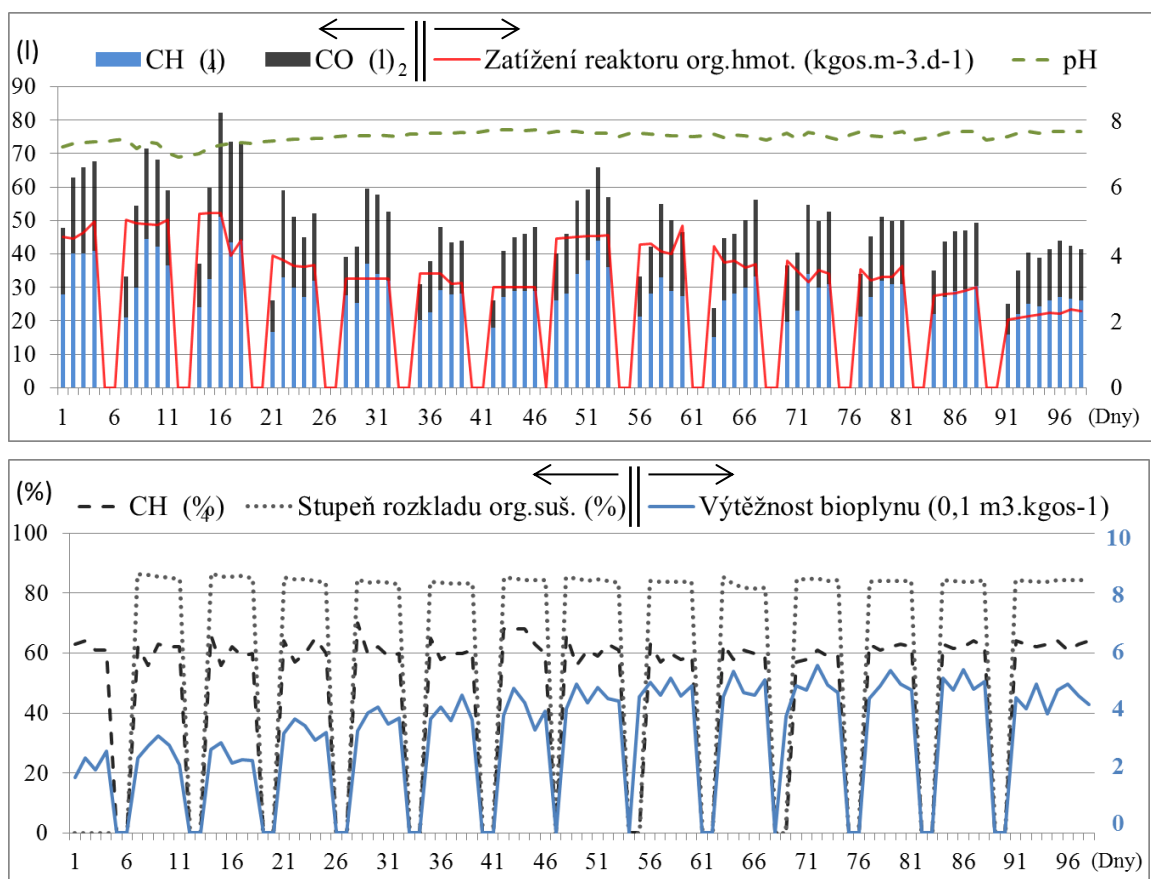
Lee (2009) ve své práci srovnával kofermantaci aktivovaného kalu s kuchyňským odpadem za mezofilních (35 °C), termofilních (55 °C) a hypertermofilních (70 °C) podmínek. Na základě měření je doporučen systém dvoustupňové AF. V první reaktoru za hypertermofilních podmínek proběhne acidogeneze, v druhém reaktoru za termofilních podmínek metanogeneze.

Na Obr. 25 jsou zobrazeny výsledky experimentálního měření. Naměřená výtěžnost bioplynu po zapracování substrátu dosahuje hodnot 0,35 – 0,55 m³.kg_{os}⁻¹ s podílem metanu 57 – 67 %, což potvrzuje hodnoty udávané literaturou (Pastorek et al., 2004), (Dearman et al., 2006), (Lee et al., 2008). Ale dosažená výtěžnost až o 30 % zaostává za srovnáním jiných experimentů v mezofilních podmínkách: El-Mashad et al. (2010) bioplyn 0,657 m³.kg_{os}⁻¹ a metan 0,353 m³.kg_{os}⁻¹ (tedy 53% podíl) za 30 dnů při teplotě 35 °C nebo Liu et al. (2009) bioplyn 784 m³.kg_{os}⁻¹ a metan 0,531 m³.kg_{os}⁻¹ (tedy 67% podíl) za 25 dnů při teplotě 35°, Zhang et al. (2007) metan 0,44 m³.kg_{os}⁻¹ za 28 dnů při 50 °C. Poměrně velký rozptyl výtěžností mezi jednotlivými autory není dán pravděpodobně pouze rozdílnými parametry procesu, ale i tím, že kuchyňský odpad je

obecným pojmenováním různého mixu odpadů z kuchyní a stravoven a jeho složení je poměrně variabilní a nepřesně definované.

Z nashromážděných výsledků je doporučováno vyhnout KO při termofilních podmínkách. Volba vyšší teploty vyplývá nejen z očekávané vyšší výtěžnosti bioplynu, ale také z provozních okolností. Těmi jsou potřeba ohřívat substrát na 70°C pro zajištění hygienizace a pasterizace odpadu a z důvodu obvyklých problémů s využitím přebytečného tepla z kogenerační jednotky.

Obr. 25 Záznam měření anaerobní fermentace v polokontinuálním reaktoru



5.1.3 Vliv doby kontaktu na výtěžnost bioplynu

Kuchyňské odpady pocházející ze zbytků obědových pokrmů se projevují jako vhodný substrát pro mokrou AF s dobrou rozložitelností organické hmoty. Záznam měření je uveden na Obr. 25. Doba zdržení substrátu byla prodlužována z 20 na 30 dnů. Stupeň rozkladu organické sušiny se pohyboval v rozmezí 83 – 85 % bez rozdílu na době zdržení. Tomuto substrátu tedy postačuje k rozkladu kratší doba zdržení než

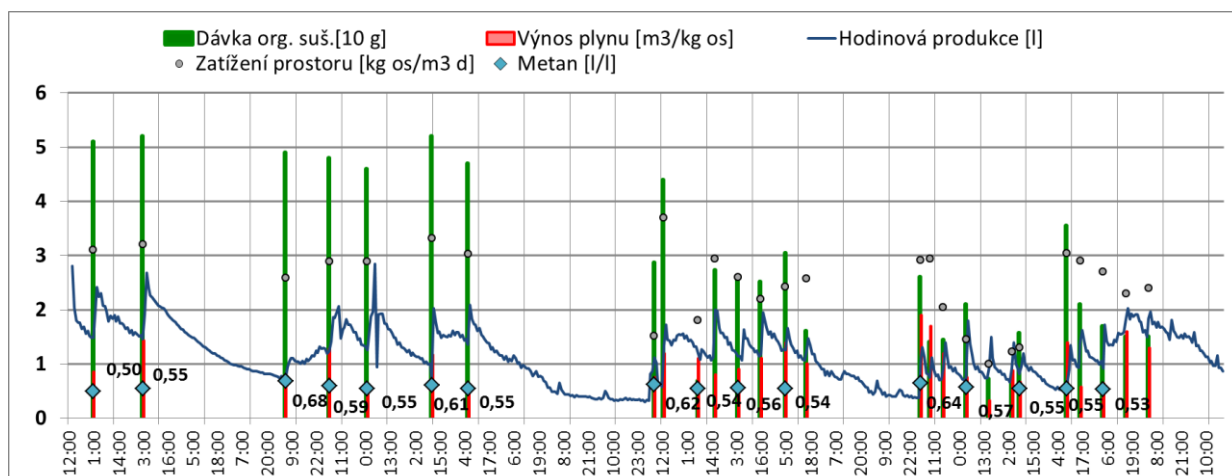
20 dnů a po této době se už blíží maximu své rozložitelnosti při AF při 36°C, což potvrzuje také Kim et al. (2006) i naměřené výsledky ze vsádkového reaktoru na obr. 23.

5.1.4 Vliv zatížení vyhnívacího prostoru organickými látkami

Zatížení udává maximální množství organické sušiny na objem reaktoru a den, které může být dodáno, aniž dojde k překrmení bakterií a inhibici procesu. Velkou komplikací při hledání vlivu jednotlivých faktorů na výtěžnost bioplynu se ukázaly víkendové výpadky v dávkování. Bakterie ve vyhnívacím prostoru během dvou dnů nebyly krmeny a poté trvalo procesu až tři dny dosáhnout předchozí produkce plynu. V tomto režimu proces krátkodobě zvládal zatížení (přetížení) $5 \text{ kg}_{\text{os}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ označované v literatuře jako absolutní horní hranice. Optimum našeho experimentu pro udržení stability procesu a maximální výtěžnosti metanu se nacházelo v rozmezí $2 - 3 \text{ kg}_{\text{os}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, což je nadprůměrná hodnota (obvyklé zatížení při 35°C se nachází mezi $0,5 - 1,5 \text{ kg}_{\text{os}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ dle Schulz, 2004).

Co nejrovnoměrnější přísun substrátu v intervalech i několikrát denně je doporučován k dosažení ideálního zatížení reaktoru a vysoké rovnoměrné produkce plynu. Proto bylo nastaveno automatické dávkování v intervalech několika hodin, tak aby bylo dosaženo co nejrovnoměrnější produkce plynu, která byla zaznamenávána v intervalu jedné hodiny. Čtyřdenní výsek záznamu měření je zobrazen na obr. 26. Měření potvrdilo teoretické předpoklady, že několikahodinové intervaly dávkování zvyšují produkci bioplynu, ale musí být dodrženo správné zatížení reaktoru. Jako problematické se ukázalo, že tak často dávkami ovlivňovaný proces musí být pod neustálou kontrolou a některé dávky musely být vynechány, aby nedošlo k přetížení. Negativní reakce prostředí se projeví až s několikahodinovým zpožděním, proto je obtížné reagovat včas. Mimo celkovou výtěžnost bioplynu, je nutno sledovat především jeho aktuální složení. Bez kvalitní měřicí techniky monitorující data minimálně v intervalu dávkování není tato intenzifikace doporučena.

Obr. 26 Záznam měření intenzivního dávkování



5.1.5 Vliv recirkulace vyhnílého digestátu

V rámci experimentu byla testována také recirkulace vyhnílého digestátu k inokulaci čerstvého substrátu a jako částečné náhrady vody při předúpravě odpadu na drtiči kuchyňského odpadu. Okamžitou odezvou byl útlum procesu. Problém způsobují sloučeniny dusíku, především nadbytek amoniaku v digestátu. I čerstvý kuchyňský odpad obsahuje velký podíl bílkovin, které jsou rozkládány při hydrolýze, což také vede k zvýšené koncentraci amoniaku a amonných iontů ve fermentoru. Potvrzuje také Shahriari (2012) a Liu (2011) doporučují jen omezené využití recirkulace vyhnílého digestátu.

5.1.6 Přítomnost sulfanu

V rámci experimentálního měření byla v bioplynu sledována přítomnost CH_4 , CO_2 , H_2S a O_2 . Sulfan byl pozorně sledován, protože je nežádoucí agresivní látkou, která zapříčiňuje korozi. Množství sulfanu, které se v plynu nalézá, je úměrné složení substrátu. Častou příčinou výskytu sulfanu v bioplynu jsou živočišné odpady a potravinářské odpady s vysokým obsahem proteinů. V experimentu nepřekročila koncentrace H_2S 0,4 % obj. bioplynu.

5.2 Hospodářský výsledek malé bioplynové stanice na kuchyňský odpad

Změny v evropské a české legislativě významně pozměnily pohled na kuchyňské odpady a tradiční nakládání s nimi. Společnost si uvědomila potenciální rizika tohoto odpadu, ale praktické zkušenosti z ČR dokazují, že prostředí ještě dlouho po schválených změnách nebylo připraveno na přechod k jiným technologiím. KO mají prokazatelně vysoký potenciál k materiálovému či energetickému využití a technologie AF může být vhodným řešením jak z pohledu legislativy, tak i vůči požadavkům odpadového hospodářství.

Cílem práce bylo prověřit vhodnost KO jako hlavní suroviny bioplynové stanice. KO je substrátem s velkou výtěžností bioplynu vhodnou pro AF. Z ekonomických důvodů ale nelze svážet KO do dalekých BPS vybavených potřebnou technologií hygienizace a pasterizace, kterých není v ČR mnoho. Práce byla zaměřena na prozkoumání faktorů, které mají vliv na výtěžnost bioplynu, a pro dosažený výsledek ověřit ekonomický smysl realizace malé BPS s instalovaným výkonem 20-50 kW_{el}.

Důležitým vstupním parametrem výpočtu hospodárnosti BPS je výtěžnost a kvalita bioplynu. Pro výpočet jsou použity zaokrouhlené nejvyšší experimentálně dosažené hodnoty z polokontinuálního a vsádkového reaktoru. Je uvažován surový KO:

- obsahem organické sušiny: 25 % hm
- výtěžnost bioplynu: 0,55 m³.kg_{os}⁻³.d⁻¹
- podílem metanu 65 %
- doba zdržení: 20 dnů.

Odhad investičních a provozních nákladů uvažované BPS je proveden na základě výpočtů vycházejících z knihy Leitfaden Biogas (2013), knihy Bioplyn v praxi (2004), knihou Metodika kalkulací nákladů a výnosů bioplynových stanic v zemědělských podnicích (2013) a článku Mini-Biogasanlage bis 75 kW, který se zabývá hospodárností německých BPS do 75 kW, které se změnami EEG v roce 2012 nově získaly významnou podporu. Výpočet hospodárnosti v Tab. 19 je proveden pro podmínky platné v ČR pro rok 2014. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.7.2.2 od 1. 1. 2014 není stanovena provozní podpora elektřiny pro nové zdroje, které vyrábějí elektřinu ze

slunečního záření a spalováním bioplynu v bioplynových stanicích. BPS do 550 MW uvedeny do provozu roku 2013 byly podporovány výkupní cenou $3550 \text{ Kč.MWh}_{\text{el,brutto}}^{-1}$. BPS uvedené do provozu v roce 2014 jsou podporovány jen doplňkový bonus za KVET ve výši $900 \text{ Kč.MWh}_{\text{el,brutto}}^{-1}$ (navíc k základnímu bonusu ve výši $45 \text{ Kč.MWh}_{\text{el,brutto}}^{-1}$).

Pro srovnání jsou uvedeny ceny energií na burze v roce 2014:

- Elektřiny: $900 - 1000 \text{ Kč.MWh}^{-1}$
- Plyn: $900 - 1000 \text{ Kč.MWh}^{-1}$
- Obvyklá cena tepla v ČR v roce 2014 je 500 Kč.GJ^{-1} a více.

Na hospodářský výsledek BPS má vliv také spotřeba vlastní energie. Celková technologická spotřeba elektrické energie se dle rešerše v kapitole 2.7.2.2 pohybuje mezi 10–30 % podle velikosti zařízení a instalované technologie. Spotřeba vlastního tepla vyrobeného kogenerační jednotkou se pohybuje mezi 30 – 80 % v případě hygienizace veškerého přijímaného materiálu. Výkonu $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ a $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ odpovídá denní potřeba substrátu 1,75 t KO, respektive 4,4 t KO. Na základě rešerše odpovídá toto množství odpadu přibližně 70 000, resp. 176 000 porcí jídla denně (při 25 g odpadu·porce⁻¹). Takto vysokou potřebu nemůže uspokojit sběr samotného KO v menším městě. Je potřebné kapacitu doplnit jinými bioodpady, které vznikají v městské infrastruktuře například odpady z pekáren, pivovarů, palíren, škrobáren, jatek nebo tuky a oleji na vaření.

Tab. 19 uvádí odhad investičních nákladů vztažených na malou komunální BPS s hygienizací. Výpočet je počítán na období 15 let. Období 15 let návratnosti investice bylo v minulosti stanoveno ERÚ pro výpočet výše podpory výkupních cen elektřiny z OZE. Tato práce do kalkulace nezahrnuje žádné investiční dotace a do výnosů je započítána podpora za KVET pro rok 2014 a prodej elektřiny za tržní cenu v roce 2014. Za těchto podmínek výnosy pokrývají pouhých 22 % pro $20 \text{ kW}_{\text{el}}$, respektive 36 % pro $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ BPS. Největší podíl nákladů tvoří mzdové náklady na jednoho zaměstnance, který se stará o provoz BPS a svoz substrátu. Do kalkulace nejsou zahrnuty náklady na svoz, ale také chyby výnosy za zpracování odpadu od jeho původců. Tyto výnosy je v praxi komplikované získat. V Německu se tyto výnosy pohybují kolem 1000 Kč.t^{-1} odpadu. V případě tohoto zdroje příjmu by celkové výnosy stouply o více než 300 %. Podobně významnou podporu znamenala dříve státem garantovaná výše výkupních cen

3,55 Kč.kWh_{el}⁻¹. Do kalkulace není zahrnuto ani nakládání s výstupním digestátem, který by v ideálním případě mohl být prodáván ve formě kompostu.

Tab. 19 Odhad investičních nákladů malé komunální BPS pro KO

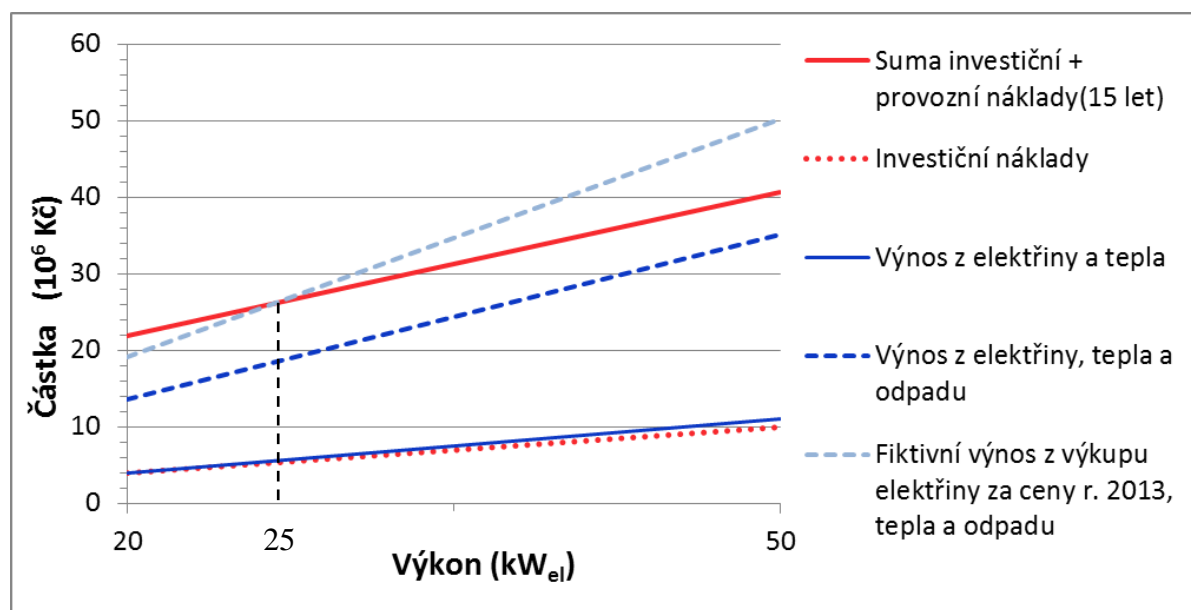
Položka	Poč. inter.	Srovn. v %	Konec inter.	Srovn. v %	Poznámka
Výkon kogenerační jednotky (kW_{el})	20		50		
Elektrická účinnost (%)	30		30		
Tepelná účinnost (%)	60		60		
Potřební denní množství odpadu (t)	1,75		4,4		
Počet porcí jídla (při 25 g odpadu/porce)	70 000		176 000		
Vlastní spotřeba elektřiny BPS (%)	10		10		
Vlastní spotřeba tepla BPS (%)	50		50		
Invest. náklady (při 200 000 Kč.kW_{el}⁻¹)	4 000 000		10 000 000		
Dotace (% invest. nákladů)	0		0		
Provozní náklady (Kč.rok⁻¹)	1 192 400	30%	2 045 000	20%	<i>z inv. nákl.</i>
Podíl nákladů za stavby (%)	68%		68%		
Výše odpisů za stavby (%.rok ⁻¹)	6,25%		6,25%		
Odpisy za stavby (Kč.rok ⁻¹)	170 000	14%	425 000	21%	<i>z prov. nákl.</i>
Podíl nákladů za techniku (%)	32%		32%		
Výše odpisů za techniku (%.rok ⁻¹)	12,50%		12,50%		
Odpisy za techniku (Kč.rok ⁻¹)	160 000	13%	400 000	20%	<i>z prov. nákl.</i>
Podíl dluhového financování (%)	50%		50%		
Úrok (%)	6%		6%		
Financování úrokové platby (Kč.rok ⁻¹)	120 000	10%	300 000	15%	<i>z prov.nákl.</i>
Opravy a údržba staveb (podíl z investičních nákladů) (%)	1%		1%		
Náklady na opravy a údržbu staveb (Kč.rok ⁻¹)	27 200	2%	68 000	3%	<i>z prov. nákl.</i>
Opravy a údržba techniky (podíl z investičních nákladů) (%)	4%		4%		
Náklady na údržbu a opravy techniky (Kč.rok ⁻¹)	51 200	4%	128 000	6%	<i>z prov.nákl.</i>

Položka	Poč. inter.	Srov. v %	Konec inter.	Srov. v %	Poznámka
Pojištění - procentuální sazba z investičních nákladů (%)	1%		1%		
Náklady na pojištění (Kč.rok ⁻¹)	40 000	3%	100 000	5%	<i>z prov.nákl.</i>
Pracovní síla (hod.den ⁻¹)	8		8		
Mzdové náklady (Kč.hod ⁻¹)	300		300		
Roční mzdové náklady (Kč.rok ⁻¹)	624 000	52%	624 000	31%	<i>z prov.nákl.</i>
Výnosy za elektřinu a teplo (Kč.rok⁻¹)	266 682	22%	733 376	36%	<i>z prov. nákl.</i>
Cena za kWh tepla (Kč.kWh ⁻¹)	0,945		0,945		
Výnos za teplo (Kč.rok ⁻¹)	132 989	50%	365 721	50%	<i>z výnosů</i>
Cena za kWh elektřiny (Kč.kWh ⁻¹)	0,95		0,95		
Výnos za elektřinu (Kč.rok ⁻¹)	133 693	50%	367 656	50%	<i>z výnosů</i>
Výnos za zpracování odpadu (při 1000 Kč/t) (Kč.kWh ⁻¹)	638 750	340%	1 606 000	319%	<i>nárůst výnosů</i>
Výnos za výkup elektřiny ceny r. 2013 (při 3,55 Kč.kWh ⁻¹) (Kč.kWh ⁻¹)	499 589	287%	1 373 871	287%	<i>nárůst výnosů</i>
Fiktivní výnos z výkupu elektřiny za ceny r. 2013, tepla a odpadu (Kč.kWh_{el}⁻¹)	1 271 329	107%	3 345 591	164%	<i>z prov. nákl.</i>

Z obr. 27 je zřejmé, že bez zajištění příjmů ze zpracování odpadů (a také případného prodeje digestátu jako hnojiva) nelze dosáhnout návratnosti investice. V případě tzv. fiktivního výnosu, který zahrnuje výnosy z prodeje elektřiny za státem garantované výkupní ceny 3,55 Kč.kWh⁻¹, dosáhla by 15 leté návratnosti investice do BPS o velikosti přibližně 25 kW_{el}. Z kalkulace vyplývá, že větší BPS je má lepší hospodářský výsledek a že kladného výsledku lze dosáhnout jen při využití všech zdrojů příjmu (zpracování odpadu, prodej elektřiny a tepla, prodej digestátu). Tento závěr platí i pro nové německé tzv. mini-BPS s výkonem do 75 kW_{el}. Z kalkulace vyplývá, že ani další zvýšení výtěžnosti KO není tak zásadní pro hospodárnost BPS jako vliv vedlejších příjmů za zpracování odpadu. Zvýšení výtěžnosti bioplynu i o desítky procent sice pomůže navýšit výkon BPS, snížit měrné náklady na ohřev substrátu anebo snížit potřebné množství KO = náklady na svoz. Přesto všechna tato výše vyjmenovaná

zlepšení nemají dostatečný efekt, aby vyrovnaly investiční a provozní náklady BPS a zajistily ekonomickou návratnost investice.

Obr. 27 Analýza hospodářského výsledku BPS v horizontu 15 let
(uvedení do provozu po 1.1.2014)



5.3 Výsledky experimentů hydrotermální karbonizace

Experimenty HTC na kuchyňském odpadu a jeho vybraných podmnožinách (brambor, cibule, smetanový jogurt) proběhly podle plánu. Všechny experimenty byly replikovány.

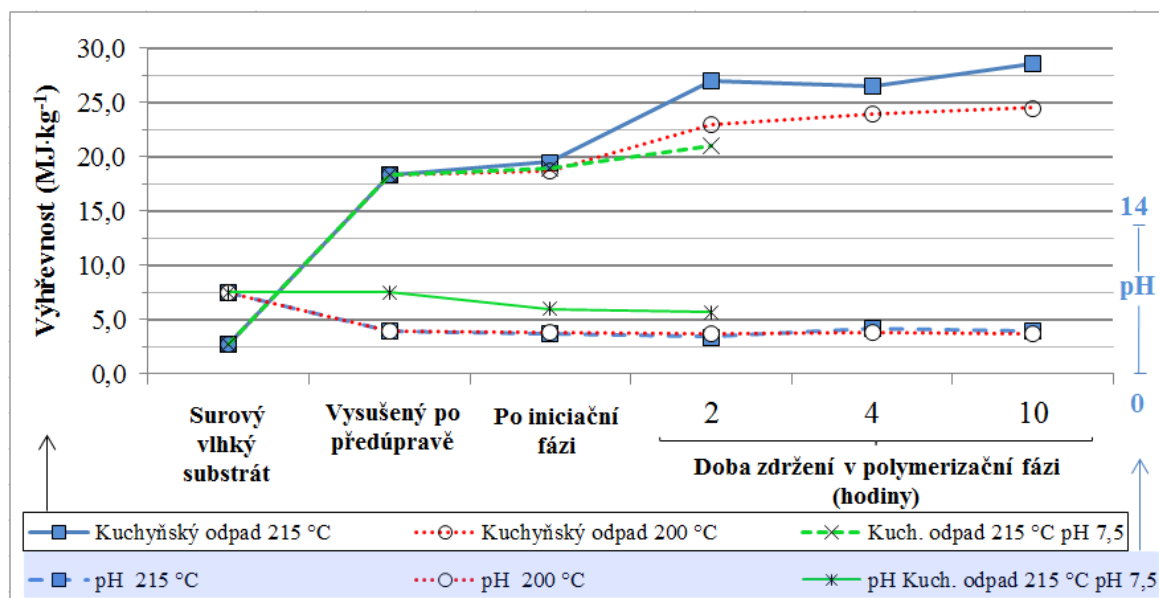
5.3.1 Vliv teploty na výhřevnost biouhlí

Experimentálně byl potvrzen vliv rostoucí teploty na zvýšení výhřevnosti biouhlí ve shodě se studiemi Broch et al. (2012), Lu et al. (2012), Titrici et al. (2012). Homogenizovaná upravená (pH 3,95) směs kuchyňských odpadů prošla iniciační reakcí při teplotě 200 °C a 215 °C. Vyšší teplota napomohla většímu rozkladu původních molekul a následné polymerizaci. Průměrné hodnoty výhřevnosti vzorků po polymerační fázi (190 °C, setrvání 2 hodiny) byly 23,1 a 27,0 MJ.kg⁻¹. Výsledky obou experimentů jsou znázorněny na Obr. 28.

5.3.2 Vliv pH

Byla ověřena podmínka kyselého pH prostředí na průběh HTC reakce. Vzorky kuchyňského odpadu s původním pH 7,5, které prošly iniciační fází při 215 °C a polymerační fází při 190 °C o délce 2 hodiny dosáhly výhřevnosti biouhlí v průměru 21,1 MJ.kg⁻¹ (v reaktoru došlo při iniciační reakci k poklesu pH v průměru na hodnotu pH 5,7). Výsledky experimentu jsou znázorněny na Obr. 28. V tab. 20 jsou uvedeny výsledky opakovaných experimentů (každá teplota třikrát a výsledky určení výhřevnosti v kalorimetru pro každý vzorek třikrát).

Obr. 28 Závislost výhřevnosti a pH směsi kuchyňských odpadů na délce HTC (experimenty při teplotě 215 °C a 200 °C)



Tab. 20 Statistické vyhodnocení experimentů a laboratorního určení výhřevnosti vzorků

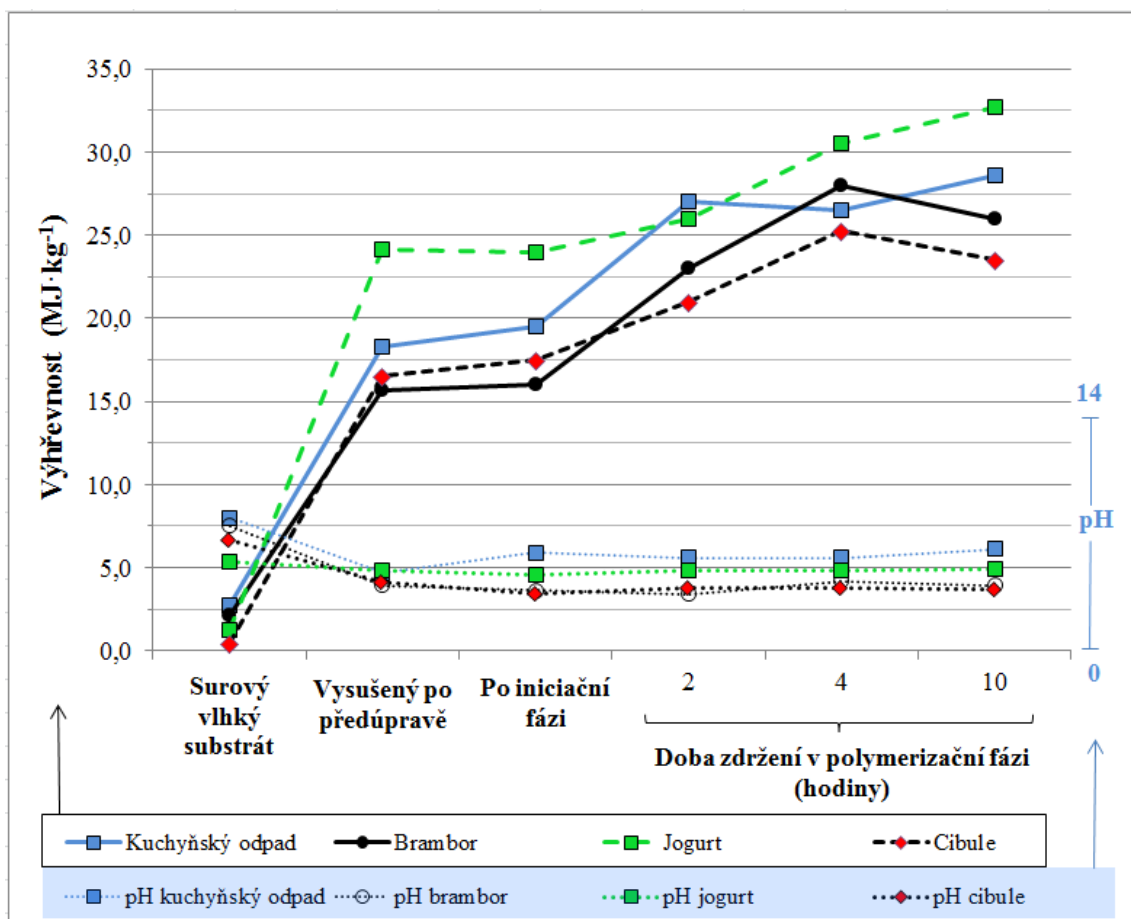
Teplota 2. fáze HTC		200 °C			215 °C		
Délka 2. fáze HTC		2h	4h	10h	2h	4h	10h
Č. exp.	Č. analýzy	výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)			výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)		
1	1	22,92	24,02	24,33	24,93	25,04	26,93
	2	23,75	23,48	24,79	25,85	25,88	26,82
	3	22,43	23,83	24,01	26,62	26,24	28,03
2	4	23,14	24,21	24,25	26,81	25,64	27,58
	5	22,67	24,42	23,96	27,31	26,23	28,87
	6	23,15	25,02	25,09	27,12	27,24	29,12
3	7	24,08	23,88	24,41	27,07	25,79	28,74
	8	22,69	24,97	25,36	27,38	26,27	29,38
	9	24,12	24,33	24,64	27,75	27,13	28,75

Průměr	23,22	24,24	24,54	26,76	26,16	28,25
s²	0,39	0,26	0,38	0,76	0,48	0,32
s	0,63	0,51	0,62	0,87	0,70	0,57
Max.	24,12	25,02	25,36	27,75	27,24	29,38
Min.	22,43	23,48	23,96	24,93	25,04	26,82

5.3.3 Vliv doby zdržení na výhřevnost

Vliv prodloužení doby zdržení na zvýšení výhřevnosti produktu potvrdily experimenty se všemi testovanými substráty – kuchyňský odpad, brambor, cibule, smetanový jogurt. Největší vliv reakční doby na výhřevnost byl prokázán v prvních 4 hodinách polymerační fáze (vždy 190 °C). Rozmixováním homogenzované substráty s upraveným pH (3,95 – 4,8) přidáním kyseliny citronové prošly iniciační fází (vždy 215 °C, 10 minut), poté byl reaktor ochlazen na cca 80 °C a byly přidány polymerační činidla 30% H₂O₂, FeCl₃ · 6 H₂O dle postupu Markuse Antoniettiho. Výsledky měření jsou znázorněny na Obr. 29.

Obr. 29 Výhřevnost a pH biouhli v závislosti na době zdržení pro kuchyňský odpad (zbytky z obědových pokrmů), syrový brambor, smetanový jogurt a syrová cibule.



Výsledky experimentu potvrzují, že zpracování vlhkého heterogenního kuchyňského odpadu metodou HTC vede k zisku homogenního energeticky bohatého materiálu (>24 MJ·kg⁻¹) s velkým obsahem uhlíku (>63 % hm.). Pokles a nárůst hodnoty

výchřevnosti zaznamenaný pro kuchyňský odpad mezi 2. a 5. hodinou polymerizační fáze je pravděpodobně výsledkem souběžného rozpouštění substrátu a vzniku uhlíkatého materiálu. Jiný průběh je pozorován pro brambor a cibuli, které dosáhnou maximálních hodnot výchřevnosti po 5 hodinách polymerizační fáze.

5.3.4 Výtěžek tuhé složky

Podíl vyprodukované tuhé složky k tuhé složce zkoumaných substrátů vstupujícího do reaktoru se nacházel v rozmezí 53 – 74 % hm. V rozmezí délky reakce 2, 4 a 10 hodin vykazovaly různé substráty různá chování. Tato hmotnostní porovnání ale vykazují významnou nepřesnost způsobenou manipulací se vzorky o hmotnosti tuhé složky pouhých několika gramů a obtížným sběrem materiálu z reaktoru, odměrných nádob, filtrační aparatury apod. Li et al. (2013) uvádí ve svých výsledcích hodnoty v rozmezí 60 – 80 % hm. pro vzorky potravinářských odpadů při obsahu sušiny 20 % a teplotě HTC 250 °C v závislosti na době zdržení, viz **Příloha 9**. Výtěžek tuhé složky substrátu s 20 % sušiny pozvolna klesá s délkou reakce. Pro substrát s 5 % sušiny v prvních hodinách stoupá, potom již pozvolna klesá. Výtěžnost tuhé složky souvisí pravděpodobně nejen s délkou reakce, ale také s koncentrací. Souvisí pravděpodobně s rozpustností substrátu v reakčním roztoku (voda a vlastní kapaliny uvolněné z substrátu).

5.3.5 Prvková analýza

Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro surový kuchyňský odpad (HTC 190 °C, 4 h) a surový brambor (HTC 190 °C, 10 h) zobrazuje Tab. 21. Pro vyprodukované biouhlí Tab. 22. Prvkovou analýzu pro smetanový jogurt (HTC 190 °C, 10 h) a surovou cibuli (HTC 190 °C, 4 h) zobrazuje Tab. 23. Pro vyprodukované biouhlí Tab. 24.

Tab. 21 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro kuchyňský odpad a surový brambor

Vzorek surové biomasy	Směs kuchyň. odpadů		Surový brambor	
Voda (% hm.)	0,00	72,85	0,00	76,8
Popel (% hm.)	3,07	0,83	4,61	1,07
C uhlík (% hm.)	46,22	12,55	41,21	9,56
H vodík (% hm.)	6,92	1,88	6,39	1,48
N dusík (% hm.)	2,39	0,65	1,40	0,32
S síra (% hm.)	0,00	0,00	0,00	0,00
O kyslík (% hm.)	41,40	11,24	46,39	10,76
Spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	19,46	4,94	16,78	4,35
Výchřevnost (MJ.kg ⁻¹)	18,36	2,75	15,69	2,15

Tab. 22 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro biouhli z kuchyňského odpadu a surového bramboru

Vzorek biouhli	Biouhli ze směsi kuchyňských odpadů		Biouhli z brambor	
Voda (% hm.)	0,00	2,76	0,00	4,40
Hořlavina prchavá (% hm.)	-	69,17	-	48,34
Hořlavina neprchavá (% hm.)	-	26,55	-	45,41
Popel (% hm.)	1,56	1,52	1,93	1,85
C uhlík (% hm.)	68,86	66,78	68,79	65,77
H vodík (% hm.)	7,98	7,76	5,09	4,87
N dusík (% hm.)	1,31	1,28	2,53	2,42
S síra (% hm.)	0,19	0,19	0,12	0,12
O kyslík (% hm.)	19,39	18,86	21,41	20,47
Chlór Cl (% hm.)	-	0,85	-	0,10
Spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	-	28,57	-	26,00
Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	27,57	26,58	25,97	24,82

Tab. 23 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro smetanový jogurt a surovou cibuli

Vzorek surové biomasy	Smetanový jogurt (10% tuk)		Surová cibule	
Voda (% hm.)	0,00	85,65	0,00	89,96
Popel (% hm.)	5,76	0,84	4,48	0,45
C uhlík (% hm.)	53,93	7,74	43,834	4,40
H vodík (% hm.)	8,00	1,15	5,99	0,60
N dusík (% hm.)	4,52	0,64	1,766	0,18
S síra (% hm.)	0,00	0,00	0,00	0,00
O kyslík (% hm.)	27,79	3,98	43,93	4,41
Spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	25,19	3,56	17,61	2,75
Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	24,11	1,22	16,51	0,397

Tab. 24 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro biouhli ze smet. jogurtu a surové cibule

Vzorek biouhli	Biouhli z jogurtu		Biouhli z cibule	
Voda (% hm.)	0,00	2,99	0,00	4,42
Hořlavina prchavá (% hm.)	-	81,83	-	50,57
Hořlavina neprchavá (% hm.)	-	12,28	-	42,95
Popel (% hm.)	2,99	2,9	2,15	2,06
C uhlík (% hm.)	71,30	69,17	65,76	62,86
H vodík (% hm.)	10,00	9,73	4,91	4,70
N dusík (% hm.)	2,68	2,60	2,74	2,62
S síra (% hm.)	0,19	0,19	0,55	0,53
O kyslík (% hm.)	12,71	12,33	23,56	22,52
Chlór Cl (% hm.)	-	0,09	-	0,29
Spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	-	33,95	-	25,31
Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	32,73	31,75	25,29	24,17

Výsledné prvkové rozborů jsou určující v konečném obsahu vlhkosti, popele, množství síry, chlóru a dusíku v posuzovaných vzorcích pro jejich další energetické využití s ohledem na emisní koncentrace. Množství síry ve vzorcích, jak ukazují výsledné prvkové rozborů, je na velmi nízké úrovni, toto množství síry netvoří při vlastním spalování žádný problém v emisních koncentracích, jak dokládají výsledky stechiometrické analýzy. Nejvyšší koncentrace síry v sušině bylo dosaženo u vzorků biouhlí z cibule 0,55 % hm. Síra odchází rovněž z větší části během spalování do plynné fáze jako SO_2 nebo SO_3 . Emise síry u tepelných zařízení na využití tuhých paliv z obnovitelných zdrojů nepředstavují, co se týče limitních hodnot, zpravidla žádný problém, což potvrzují vybrané vzorky. Rozhodujícím faktorem koncentrace síry v biopalivu může být její korozivní chování.

Koncentrace dusíku, která byla procesem snížena např. u polokoksu ze směsi kuchyňských odpadů a jogurtu na polovinu hodnoty z původního nezpracovaného vzorku, tvoří při teoretickém spalování emisní koncentrace nízké koncentrace, ale je otázkou, za jakých podmínek bude probíhat vlastní spalování za vzniku emisních koncentrací oxidů dusíku (při době reakce 2 hodiny a více).

Hodnoty prvkového rozboru splňují optimální parametry pro použití těchto vzorků biopaliv ve spalovacích zařízeních.

Nejvíce určující pro termické využití tuhých biopaliv je obsah vody a popele v palivu. Rozsah veškeré vody ve všech sledovaných vzorcích před zpracováním je dost vysoký, což následně ovlivňuje výhřevnost paliva. Po finálním zpracování na biouhlí mají vzorky jen zlomek původního obsahu vody, což má velký pozitivní přínos ve výhřevnosti. Zpracované vzorky dosahovaly v původním obsahu vody (do 4,42 % hm.) výhřevnost přesahující hodnotu $24 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

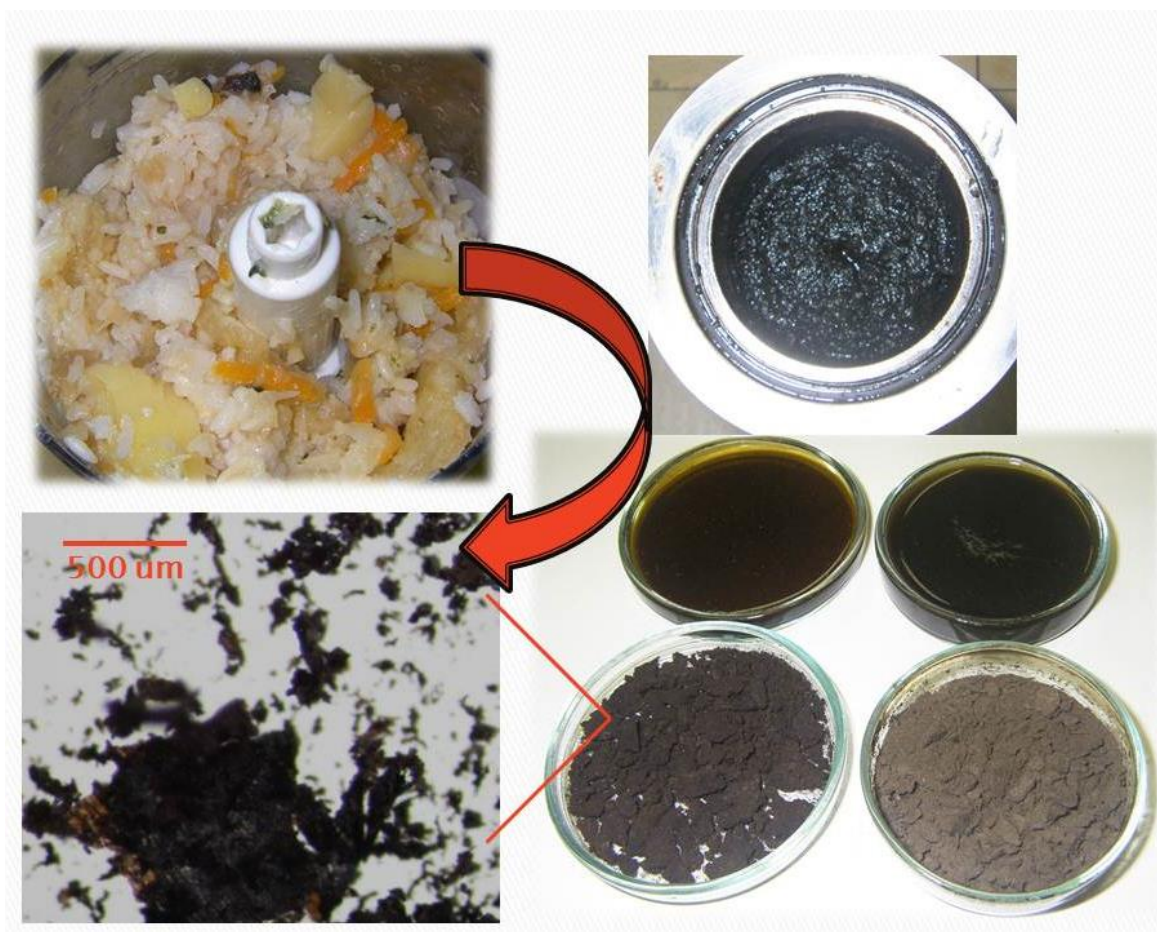
Množství popele v posuzovaných vzorcích nejvíce omezuje následné energetické využití. U posuzovaných vzorků je významné, že při HTC zpracování se množství popele sušiny pohybuje průměrně 2,15 % hm. Množství popele významně ovlivňuje tepelné vlastnosti posuzovaných tuhých vzorků a následně ovlivňuje jak výběr, tak i nastavení spalovacího zařízení.

Nejvýznamnějším parametrem pro energetické hodnocení paliv je celková výhřevnost vzorků před a po zpracování technologií HTC. U všech zkoumaných vzorků

došlo k významnému nárůstu výhřevnosti. Příčina velkého nárůstu výhřevnosti vzorků při HTC zpracování je významný vysoký úbytek vlhkosti v posuzovaných vzorcích. Největší výhřevnosti bylo stanoveno u vzorků biouhlí z jogurtu, kde hodnota výhřevnosti původního vzorku je rovna $31,75 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Dosažené výhřevnosti potvrzují data z literární rešerše. Lu et al. (2011) dosáhl pro vzorky pro zbytky králíčího jídla hodnoty výhřevnosti $\sim 30 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Li et al. (2013) dosáhl při délce reakce 96 hodin a teplotách 225 °C, 250 °C and 275 °C hodnoty $28,36 \text{ MJ.kg}_{\text{suš}}^{-1}$, $33,909 \text{ MJ/kg}_{\text{suš}}^{-1}$ a $34,791 \text{ MJ.kg}_{\text{suš}}^{-1}$.

Proměna vstupní suroviny (kuchyňského odpadu) na výstupní produkt (biouhlí) s detailem na strukturu produktu pod mikroskopem je zobrazena na Obr. 30.

Obr. 30 Proměna vstupní suroviny na výstupní produkt s detailem na strukturu



Popis: vlevo nahoře – KO v mixéru; vpravo nahoře – pohled do reaktoru po polymerační fázi; vpravo dole – odseparovaná tuhá a kapalná složka produktu; vlevo dole – detail biouhlí pod mikroskopem

Fáze přeměny vzorku jogurtu (vzorku s nejvyšší dosaženou výhřevností) na biouhli je znázorněna na Obr. 31

Obr. 31 Vlevo je zobrazen čerstvý smetanový jogurt, uprostřed produkt HTC (190 °C, 4 h) - kapalná a pevná složka, vpravo vysušené biouhli.



5.3.6 Stechiometrická analýza

Stechiometrické výpočty spalovacích procesů doplňují charakteristiky paliva a jsou základem pro jakýkoliv tepelný výpočet. Jsou důležité zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako pro kontrolu práce stávajících spalovacích zařízení. Při těchto výpočtech se stanoví:

- výhřevnost paliva
- množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování paliva
- množství a složení spalin
- měrná hmotnost spalin.

Výsledné hodnoty stechiometrické analýzy vzorků jsou uvedeny v tabulkách tab. 25 a tab. 26.

Tab. 25 Výsledné vybrané hodnoty stechiometrické analýzy přepočtené na referenční obsah kyslíku ve spalínách 11 % (souč. přebytku vzduchu 2,10) pro původní suroviny

Vzorek původní suroviny		Směs kuch. odpadů	Brambory	Jogurt	Cibule
Teoretické množství vzduchu	(kg.kg ⁻¹)	1,61	1,15	1,11	0,52
	(m ³ .kg ⁻¹)	1,24	0,88	0,86	0,40
Teoretické množství suchých spalín	(kg.kg ⁻¹)	3,68	3,22	3,13	2,56
	(m ³ .kg ⁻¹)	1,20	0,87	0,82	0,40
Teoretická koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách	(hm.%)	12,51	10,89	9,06	6,31
	(vol%)	19,34	20,43	17,53	20,55
Výsledné hodnoty suchých spalín při součiniteli přebytku vzduchu 2,10					
Množství oxidu uhličitého ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	0,46	0,35	0,28	0,16
	(m ³ .kg ⁻¹)	0,23	0,18	0,14	0,08
Množství vodní páry ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	1,03	1,00	1,05	1,00
	(m ³ .kg ⁻¹)	1,22	1,19	1,27	1,22
Množství dusíku ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	2,55	1,82	1,77	0,83
	(m ³ .kg ⁻¹)	2,03	1,45	1,41	0,66
Množství kyslíku ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	0,41	0,29	0,28	0,13
	(m ³ .kg ⁻¹)	0,29	0,20	0,20	0,09

Tab. 26 Výsledné vybrané hodnoty stechiometrické analýzy přepočtené na referenční obsah kyslíku ve spalínách 11 % (součinitel přebytku vzduchu 2,10) pro biouhlí

Vzorek biouhlí		Směs kuch. odpadů	Brambory	Jogurt	Cibule
Teoretické množství vzduchu	(kg.kg ⁻¹)	9,55	8,36	10,78	7,90
	(m ³ .kg ⁻¹)	7,36	6,45	8,31	6,09
Teoretické množství suchých spalín	(kg.kg ⁻¹)	11,67	10,75	12,70	10,30
	(m ³ .kg ⁻¹)	6,99	6,27	7,79	5,94
Teoretická koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách	(hm.%)	20,98	22,44	19,97	22,38
	(vol%)	17,71	19,44	16,47	19,61
Výsledné hodnoty suchých spalín při součiniteli přebytku vzduchu 2,10					
Množství oxidu uhličitého ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	2,46	2,42	2,55	2,31
	(m ³ .kg ⁻¹)	1,24	1,22	1,29	1,17
Množství vodní páry ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	0,01
	(m ³ .kg ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	0,00
Množství dusíku ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	1,53	1,18	1,81	1,13
	(m ³ .kg ⁻¹)	1,51	1,14	1,82	1,09
Množství kyslíku ve spalínách	(kg.kg ⁻¹)	15,14	13,28	17,12	12,54
	(m ³ .kg ⁻¹)	12,07	10,59	13,64	10,00
Teoretické množství vzduchu	(kg.kg ⁻¹)	2,44	2,13	2,75	2,02
	(m ³ .kg ⁻¹)	1,70	1,49	1,92	1,41

Podle současné platné vyhlášky č. 415 je požadovaná výhřevnost tuhých biopaliv nad 13 MJ.kg^{-1} pro spalovací zařízení se jmenovitým příkonem nad 0,3 MW. Tento požadavek je vysoce dodržen u všech zpracovaných kuchyňských vzorků technologií HTC. Pro zpracování právě kuchyňských odpadů jednotka HTC může být přímo vhodnou technologií.

Dalším požadavkem ke spalování je přípustné množství vody v tuhém biopalivu, která se pohybuje u zařízení pod jmenovitým příkonem 0,3 MW do 15 % hm., je splněno u všech přepracovaných kuchyňských vzorků.

Limitním kvalitativním ukazatelem pro energetické využití vzorků je obsah popela. Pro spalovací zařízení se jmenovitým tepelným příkonem je přípustné množství do 25 % hm. v palivu. Tento požadavek je rovněž splněn u všech posuzovaných vzorků biouhlí

5.3.7 Hydrofóbní vlastnosti biouhlí

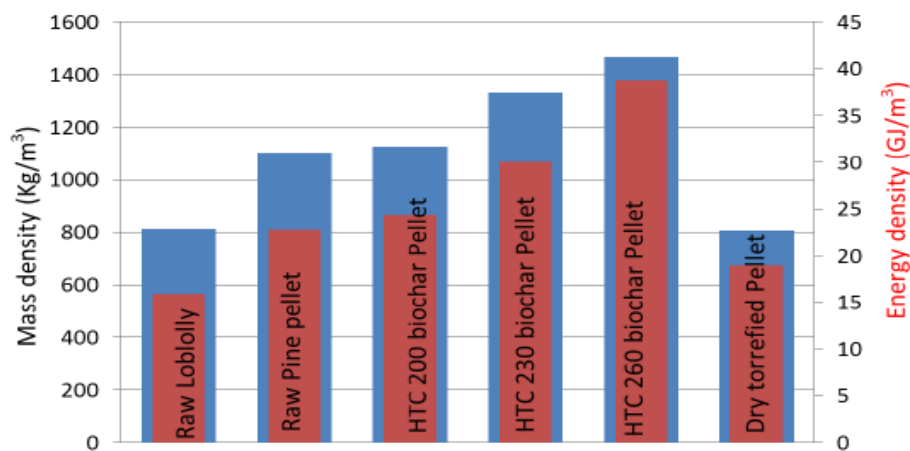
Jednou z udávaných výhod biouhlí oproti surové vlhké biomase by měla být možnost dlouhodobého uskladnění tohoto energeticky hodnotného produktu (především ve formě pelet či briket). Z tohoto důvodu byla také částečně prověřována trvanlivost a stálost biouhlí. Vzorky byly ponechány v laboratoři volně na vzduchu. Jejich degradace a vizuální změny byly porovnány s vysušenými vzorky uloženými v zatemněném exikátoru. Obsah vlhkosti obou skupin vzorků byl po 1 měsíci velmi podobný, viz Tab. 277. Vzorky taktéž nevykazovaly vizuální rozdíly.

Tab. 27 Rozdíly v obsahu vlhkosti (% hm.) mezi vzorky biouhlí uskladněnými v exikátoru a volně na vzduchu. (výsledná hodnota je průměrem tří měření)

	Biouhlí kuchyň. odpad			Biouhlí brambor			Biouhlí jogurt			Biouhlí cibule		
	2 h	4 h	10 h	2 h	4 h	10 h	2 h	4 h	10 h	2 h	4 h	10 h
Exikátor	1,92	2,89	2,97	5,05	4,85	4,92	3,57	2,56	0,59	3,88	3,57	3,81
Vzduch	1,82	2,91	3,51	5,4	5,27	5,4	4,22	3,5	1,2	3,95	3,65	3,78

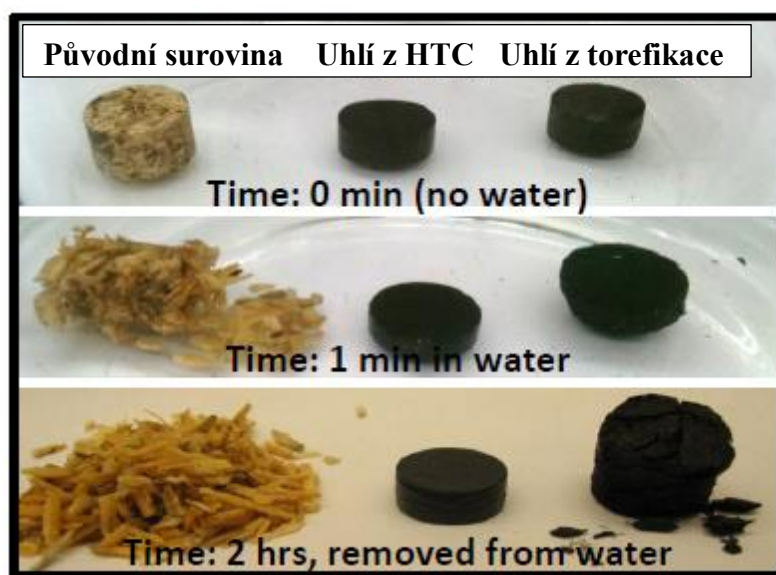
Broch (2012) ve své studii také potvrzuje hydrofóbní vlastnosti a stabilitu pelet z biouhlí, které proklamují společnosti SunCoal nebo AVA-CO2. Na Obr. 32 jsou uvedeny srovnání hmotnostní a energetické hustoty neupraveného a HTC upraveného materiálu zpracovaného do pelet. Obr. 33 zobrazuje výsledky hydrofóbního testu pelet, který potvrdil zvýšenou stabilitu a odolnost proti vlhkosti.

Obr. 32 Porovnání hustota (Mass density) a energetické hustoty (Energy density) pelet ze surového materiálu a produktu HTC



Zdroj: Broch, 2012.

Obr. 33 Test hydrofobních vlastností pelet



Zdroj: Broch, 2012.

5.3.8 Koncepce využití procesní vody

Kapalná část produktu, která je vhodnou metodou odseparována od biouhlí může najít vícero uplatnění. V závislosti na vstupní biomase představuje buď benefit nebo problém. Dle uveřejněného patentu Prof. Antoniettiho „Process for converting biomass to coal-like material using hydrothermal carbonisation“ z roku 2009 je možno s úspěchem tuto procesní kapalinu opětovně využít. Kapalina je přivedena do prvního iniciačního kroku, kde poslouží nejen jako oxidační činidlo, ale tak jako tepelný nosič.

Což lze považovat jako jeden z možných kroků na cestě ke kontinuálnímu procesu, bez něhož metoda HTC nemůže dojít k výraznému uplatnění na trhu.

Jak jsme již zmínili, využití procesní kapaliny závisí na její kvalitě, která je dána především vstupní biomasou. Zajímavou synergií může být výměna substrátů mezi ČOV a zařízením HTC. Proces HTC výrazně zlepšuje odvodnění čistírenského kalu (Ramke, 2011) a také zajistí hygienizaci kalu, která separátně znamená navýšení vstupní energie bez přidání energetické hodnoty produktu. Eliminovat by se také problém s uplatněním kalového kompostu na trhu.

Naopak ČOV a její anaerobní stupeň může využívat, ať už teplou či ochlazenou, procesní kapalinu ze zařízení HTC s množstvím rozpuštěných organických látek. Tok přebytečné kapaliny z jednoho či druhého zařízení navzájem může být také příležitostí pro zpracování dalšího produktu vyskytujícího se v dané oblasti, který je například pro nedostatek vlhkosti nevhodný ke zpracování v HTC.

Důležitým faktorem využití procesní vody je hodnota pH. Bakterie produkující metan při AF mají svá optima většinou v oblasti pH 6,2-7,8. Ačkoliv je hodnota celkového pH prostředí ovlivňována intenzitou dílčích fází AF (hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze), nesmí se hodnota příliš vychýlit z neutrálního stavu. Aktivita acidogenů snižuje pH prostředí, rozvoj metanogenů pak přináší vzestup pH směrem k neutrální či mírně alkalické oblasti. V praxi se optimální hodnota pH materiálu na vstupu do procesu upravuje homogenizací směsných materiálů nebo alkalickými přísadami. Jak již bylo zmíněno, proces HTC musí probíhat ve vodním prostředí, kdy jsou organické látky ze vstupné biomasy rozpouštěny v kapalně složce. pH kapalně složky musí být kyselé v rozmezí pH 2-6. To je upravováno jak uměle, tak v důsledku produkce organických kyselin. V případě použití procesní kapaliny z HTC pro AF je nutné brát v potaz rozdílné požadavky na pH prostředí.

Test fytoxicity

Pro ověření využitelnosti kapalně složky pro zemědělské účely byl proveden test na obsah/koncentraci toxických meziproduktů.

Odfiltrovaná kapalná část výstupního produktu HTC byla prověřena testem fytoxicity v laboratoři Fakulty agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, ČZU

v Praze. Dílčí výsledky zobrazuje Tab. 28. Byly prověřovány vzorky KO a dvou dalších rizikových odpadů – stabilizovaný čistírenský kal a masokostní moučka.

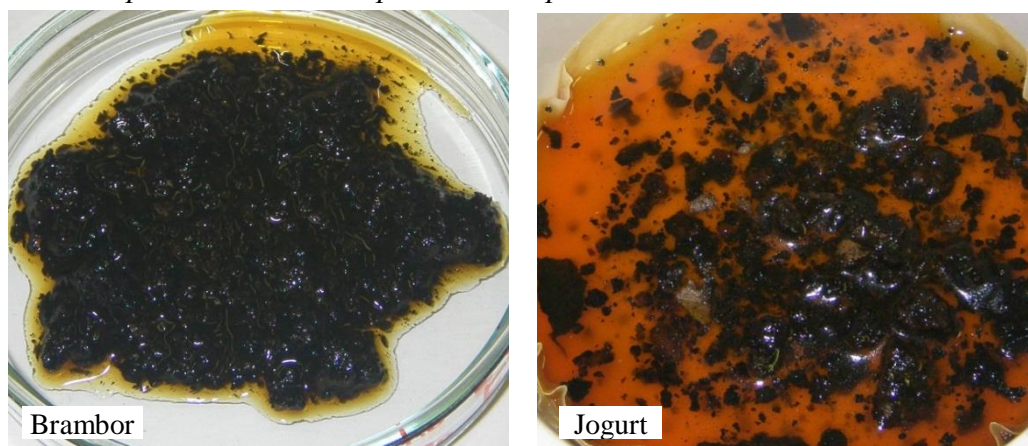
Tab. 28 Základní výsledky testu fytotoxicity vybraných vzorků odfiltrované kapalné složky výstupního produktu (vzorky v původní koncentraci nebo 10 % roztoku)

Vzorek	Počet rostlin	Počet vyklíčených rostlin	Procento klíčivosti
H ₂ O	22	22	100,0
Kuch. odpad - 4h: 10 %	21	21	100,0
Kuch. odpad - 10h: 10 %	23	23	100,0
Kuch. odpad - 2h: 10 %	21	20	95,2
Stab. kal - 2h: 10 %	26	22	84,6
Stab. kal - 2h: 10 %	23	19	82,6
Stab. kal - 4h: 10 %	23	17	73,9
Stab. kal - 10h: 10 %	23	16	69,6
Kuch. odpad - 10h	21	13	61,9
Masokostní moučka - 5h: 10 %	22	12	54,5
Kuch. odpad - 4h	21	5	23,8
Kuch. odpad - 2h	24	4	16,7
Masokostní moučka – 10h	21	3	14,3
Stab. kal - 10h	21	2	9,5
Masokostní moučka - 2h	21	0	0,0
Stab. kal - 4h	25	0	0,0
Masokostní moučka - 5h	23	0	0,0

Z výsledků je zřejmé, že s délkou reakce HTC klesá negativní účinek roztoku na klíčivost rostlin. KO v 10 % roztoku prokazuje negativní vliv pouze při nejkratší délce reakce 2 hod.

Obr. 34 zobrazuje neseparovanou tuhou a kapalnou složku produktu HTC. Vlevo je vzorek ze surového bramboru po iniciační fázi (215 °C, 5 min), vpravo je jogurt po polymerizační fázi (190 °C, 4 h).

Obr. 34 Neseparovaná tuhá a kapalná složka produktu HTC.



5.4 Vzájemné energetické porovnání technologií anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace

Cílem práce je energetické porovnání hydrotermální karbonizace kuchyňských odpadů s anaerobní fermentací a zhodnocení kladů a záporů obou technologií.

Pro určení základních parametrů KO a biouhlí z KO jsou využity naměřené veličiny uvedené v Tab. 29 (pocházející z Tab. 21 a Tab. 22.)

Tab. 29 Hodnoty prvkové analýzy pro surový kuchyňský odpad a biouhlí

Veličina	Surový kuchyňský odpad		Biouhlí z kuchyňského odpadu	
Voda (% hm.)	0	72,85	0	2,76
Popel (% hm.)	3,07	0,83	1,56	1,52
C uhlík (% hm.)	46,22	12,55	68,86	66,78
H vodík (% hm.)	6,92	1,88	7,98	7,76
N dusík (% hm.)	2,39	0,65	1,31	1,28
S síra (% hm.)	0	0	0,19	0,19
O kyslík (% hm.)	41,4	11,24	19,39	18,86
Spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	19,46	4,94	-	28,57
Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	18,36	2,75	27,57	26,58

Výsledek energetické bilance technologií AF a HTC je zobrazen v Tab. 30. Parametry v horní části tabulky vycházejí z experimentálně dosažených hodnot pro oba zkoumané procesy. Parametry v dolní části tabulky vycházejí z literární rešerše, hodnoty účinností a vlastních energetických potřeb jsou dosazeny z konzervativního (pesimistického) pohledu.

Vzájemné energetické srovnání procesů vychází jednoznačně lépe pro technologii HTC. Z 1 t substrátu KO lze získat o 1/3 více energie ve formě biouhli než ve formě bioplynu.

Tab. 30 Energetické srovnání procesů anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace pro kuchyňský odpad

Veličina / Technologie	AF		HTC
Množství substrátu (t~m ³)	1		
Podíl sušiny (%)	27,15		
Podíl org. sušiny (%)	25		
Spec. výtěžnost bioplynu (m ³ .kg _{os} ⁻¹)	550	Výtěžek tuhé složky (%)	60
Obsah metanu v bioplynu (%)	65	Energetický obsah biouhli (MJ.kg ⁻¹)	26,5
Množství vyrobeného bioplynu (m ³)	137,5		
Výhřevnost bioplynu (MJ.m ⁻³)	23,4		
Energie v produktu (brutto) (MJ.t _{substr} ⁻¹)	3217,5		4316,9
Energie v produktu (brutto) (MJ.kg _{suš} ⁻¹)	11,851		15,9
Energie spotřebovaná v procesu %	60	Energie spotřebovaná v procesu (%)	35
Účinnost kogenerační jednotky %	92	Účinnost kotle (%)	85
Energetický zisk (netto) (MJ.t _{substr} ⁻¹)	1158,3		2385,1
Poměr netto/brutto	36%		55%
Energie v produktu (netto) (MJ.kg _{suš} ⁻¹)	4,3		8,8

* ve výpočtu nejsou zahrnuty energetické ztráty pro transport materiálu

Z odhadu energetické přeměny a energetické náročností obou technologií vyplývá, že z KO s 27,25 % sušiny lze získat energii 8,8 MJ.kg_{suš}⁻¹ pomocí HTC a 4,3 MJ.kg_{suš}⁻¹ pomocí AF. Dle studie Ramke (2012) (viz příloha 11)) je brutto energetický zisk KO při HTC 4,25 MWh.t_{suš}⁻¹ = 15 300 MJ.t_{suš}⁻¹, které blíže koresponduje z naší hodnotou 15 841 MJ.t_{suš}⁻¹ (při sušině 27,25 % a 4316,9 MJ.t_{substr}⁻¹).

Dle výsledku srovnání je energetický zisk AF přibližně o 50 % nižší oproti HTC. Lu et al. (2011) (příloha 15) udává konverzi KO prostřednictvím HTC dokonce o 70 % nižší. Naopak Ramke (2011) (příloha 11) vypočítává použití KO pro HTC o 60 % méně výhodnější než AF.

Obecně se dá shrnout, že nejdůležitějším parametrem pro energetické bilance obou technologií je obsah sušiny substrátu. Protože ohřev nadbytečné vody znamená v obou procesech významné energetické ztráty. V případě AF je navíc nutný ohřev na teplotu hygienizace (70 °C), která je v případě mezofilního prostředí dvakrát vyšší než vyžaduje samostatný vyhnívací proces. U HTC leží energetická hranice rentability nad hranicí 5 % hm. sušiny a její výhodnost oproti spalování KO leží u hranice obsahu sušiny 20 % hm. (Li et al., 2013). V případě HTC je tedy klíčový již samotný návrh procesní linky s ohledem na tepelné výměny k minimalizaci externích dodávek energie pro ohřev vlhkého substrátu a případné sušení výstupního produktu.

Tab. 31 zobrazuje SWOT analýzu (silné a slabé stránky) obou konfrontovaných technologií zpracovávajících kuchyňský odpad.

Tab. 31 SWOT analýza anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace pro kuchyňský odpad

Anaerobní fermentace pro kuchyňské odpady		Hydrotermální karbonizace pro kuchyňské odpady	
Strenghts	Weaknesses	Strenghts	Weaknesses
Rozšířená a prověřená technologie	Nevyužití tepla z kogen. jednotky	Vhodné i pro rizikové odpady - přirozená hygienizace	Nový a nerozšířený proces
KO dosahuje vysoké výtěžnosti	Nedostatek odpadu	Zlepšuje odvoditelnost	Nedostatek odpadu
	Chybějící příjmy za zpracování opadu	KO dosahuje vysoké výhřevnosti	Komplikovaný procesní návrh
	Potřeba hygienizace	Snadný odbyt produktu (spálení)	
	Nemožnost recyklace procesní kapaliny	Recyklace procesní kapaliny	
Opportunities	Threats	Opportunities	Threats
Úprava na zemní plyn	Klesající podpora výkupních cen	Biouhli jako produkt pro chem. průmysl	Energetická náročnost
Příjmy za zpracování odpadu a prodej digestátu	Digestát je pouze odpadem	Procesní voda jako hnojivo	Proces. voda jako odpad
		Uskladnění (a recyklace) vlhké biomasy	

Strenghts – silné stránky; Weaknesses – slabé stránky; Opportunities – příležitosti; Threats – hrozby.

Důležitým závěrem z analýzy silných a slabých stránek obou technologií je nalezení několika možných synergií. Těmi jsou především dodatečné navýšení materiálového a energetického využití odpadu:

1) Využití digestátu z AF v procesu HTC

- zvyšuje odvoditelnost produktu
- získání produktu s vyšší měrnou energií a lepší stabilitou

2) Využití procesní vody z HTC v procesu AF

- dodatečná fermentace organických zbytků
- tepelný nosič (vysoká teplota v HTC, nízká teplota v AF)

6 Závěr

Předložená disertační práce přináší návrh energetického a materiálového využití kuchyňských odpadů, které představují potenciální riziko pro zdraví lidí a zvířat a vyžadují tak nakládání v souladu s legislativními podmínkami. Velká část těchto odpadů je považována za vedlejší živočišné produkty a nakládání s nimi je oproti zažitým zvykům omezeno.

K nakládání s kuchyňským odpadem se nabízí řada technologií s různým stupněm využití a dopadem na životní prostředí. Mimo domácí kompostování, které je pravděpodobně nejlepším řešením pro oblasti s malou produkcí tohoto odpadu, byly na základě literární rešerše zvoleny dvě metody k posouzení zpracování tohoto odpadu v průmyslovém měřítku. Technologie anaerobní fermentace i hydrotermální karbonizace splňují jak legislativní požadavky, tak priority odpadového hospodářství.

Významnou součástí práce jsou laboratorní experimenty, které prověřovaly zpracování kuchyňských odpadů oběma technologiemi. Cílem experimentů bylo nejenom ověření vhodnosti obou metod, ale také analyzovat vliv procesních parametrů na výsledný produkt a prověřit energetický zisk celého procesu.

Bylo potvrzeno, že anaerobní fermentace je vhodnou technologií k nakládání s kuchyňskými odpady. Práce si však dále kladla za cíl prověřit ekonomickou efektivnost investice do bioplynových stanic, které by zpracovávaly tento odpad jako hlavní surovinu a profitovaly by z jeho vysoké výtěžnosti. A takové stanice by mohly vznikat v místech, kde dosud není uspokojivě vyřešen systém nakládání s kuchyňským odpadem.

Na výtěžnost bioplynu má vliv již předúprava substrátu, která zkracuje první fázi rozkladu tzv. hydrolýzu. Z výsledků experimentů vyplynulo, že testované předúpravy (jemné drcení, hrubé sekání na kousky 15 mm, ohřev na 70 °C, mražení -15 °C) urychlují především počáteční fázi vyhnívání, ale již kolem 13. dne kontaktu se množstvím vyprodukovaného bioplynu srovnává se vzorky bez předúpravy. Takže kuchyňské odpady ze zbytků pokrmů se ukázaly jako substrát snadno podléhající rozkladu bez nutnosti předúprav. Jedním z hlavních důvodů je, že již při přípravě pokrmů či skladování surovin prošla většina materiálu vařením či mražením, tudíž předúpravy podobné těmto procesům mají v případě tohoto substrátu zanedbatelný

efekt a zvýšení produkce bioplynu k vynaložené energii pro desintegraci substrátu není významné.

Dále bylo experimenty ve vsádkových i polokontinuálních reaktorech prokázáno, že tomuto substrátu postačuje k rozkladu kratší doba zdržení než 20 dnů. Po této době se materiál již blíží maximu své rozložitelnosti při anaerobní fermentaci při 36 °C se stupněm rozkladu organické sušiny v rozmezí 83 – 85 %, který s přibývajícím dnem již významně neroste. Naměřená výtěžnost bioplynu po zapracování substrátu dosahovala hodnot 0,35 – 0,55 m³.kg_{os}⁻¹ s podílem metanu 57 – 67 %.

Optimální zatížení vyhnivacího prostoru organickou hmotou, při kterém byla zachována stabilita procesu a docházelo k maximální výtěžnosti metanu, se nacházelo v rozmezí 2 – 3 kg_{os}.m⁻³.d⁻¹, což je nadprůměrná hodnota v porovnání se zatížením fermentoru na běžných zemědělských BPS. Další navýšení těchto hodnot se jeví jako možné, ale přináší vysoká rizika pro stabilitu procesu a bez kvalitní měřicí techniky, která monitoruje data minimálně v intervalu dávkování, není tato intenzifikace doporučena.

Slabinou každé technologie jsou její vedlejší (nežádoucí/nevyužitelné) produkty. Za ty lze u anaerobní fermentace často považovat i vyhnílý digestát. K jeho redukci a také k náhradě vody při předúpravě substrátu byla prověřována možnost recirkulace vyhnílého digestátu. Ta bohužel přinesla zvýšenou koncentraci amoniaku a amonných iontů ve fermentoru, tedy útlum procesu a není proto doporučována.

Naopak pozitivním zjištěním je nízká koncentrace sulfanu v bioplynu, která nepřekročila hodnotu 0,4 % obj. v bioplynu. Výhodné je i přirozené vytvoření stabilní a přibližně neutrální hodnoty pH ve fermentoru bez nutnosti úprav či přísad, přestože je materiál převážně kyselého charakteru.

Kuchyňský odpad musí projít hygienizací a pasterizací při 70 °C, což představuje dodatečný energetický nárok při zpracování. Ale vezmeme-li v úvahu častý problém s využitím vlastního teplo z kogenerační jednotky, získáme další racionální důvod k provozování bioplynové stanice v termofilních podmínkách. Tyto podmínky přispívají k nárůstu výtěžnosti, ale znamenají také nárůst nákladů na ohřev. Jenže za zmíněných okolností a zajištění vhodných tepelných výměn, může docházet k efektivnímu využití tepla.

Z kalkulace v kap. 5.2 vyplývá, že větší bioplynová stanice (z rozmezí 20-50 kW_{el}) dosahuje lepšího hospodářského výsledku. Pro dosažení ekonomické návratnosti investice je ale nutno využít několik dalších zdrojů příjmu. K prodeji elektřiny a tepla je potřeba přidat také výnosy ze zpracování odpadu a prodej digestátu. BPS uvedené do provozu po 1. 1. 2014 totiž nejsou podporované výkupními cenami elektřiny. Nutnost určité pomoci těmto malým projektům částečně potvrzuje i od roku 2013 v Německu nově zavedená podpora tzv. mini bioplynovým stanicím s výkonem do 75 kW_{el}. Z kalkulace vyplývá, že ani další zvýšení výtěžnosti kuchyňského odpadu není tak zásadní pro hospodárnost stanice jako vliv vedlejších příjmů ze zpracování odpadu. Zvýšení výtěžnosti bioplynu i o desítky procent sice pomůže navýšit výkon stanice, snížit měrné náklady na ohřev substrátu anebo snížit potřebné množství kuchyňského odpadu (= náklady na svoz), ale i přesto všechna tato výše vyjmenovaná zlepšení nemají takový efekt, aby vyrovnaly investiční a provozní náklady stanice a zajistily návratnost investice. Tímto byla vyvrácena 1. hypotéza disertační práce.

Hydrotermální karbonizace je z technologického hlediska nekomplikovanou metodou k výrobě homogenního uhlí-podobného produktu. Musí probíhat ve vodním prostředí a z tohoto důvodu je z hlediska energetické bilance vhodná pro přirozeně vlhké substráty, u nichž je právě vlhkost překážkou k jinému zpracování. Dle experimentů se vlhké kuchyňské odpady ukázaly být příznivým substrátem ke zpracování.

Byl prokázán vliv vyšší teploty iniciační fáze (testováno 200 °C a 215 °C) k většímu rozkladu původních molekul a následné lepší polymerizaci, tedy výtěžnosti tuhé složky - biouhlí.

Byla ověřena nutná podmínka kyselého pH prostředí pro průběh reakce hydrotermální karbonizace.

Experimenty dále potvrdily vliv prodloužení doby zdržení (2, 4 a 10 hodin) na zvýšení výhřevnosti produktu pro všechny testované substráty – směs kuchyňských odpadů, brambor, cibule, smetanový jogurt. Největší vliv reakční doby na výhřevnost byl prokázán v prvních 4 hodinách polymerační fáze (při 190 °C). Výsledky experimentu potvrzují, že zpracování vlhkého heterogenního kuchyňského odpadu metodou HTC vede k zisku homogenního energeticky bohatého materiálu (>24 MJ.kg⁻¹) s velkým obsahem uhlíku (>63 % hm.).

Nejvýznamnějším parametrem pro energetické hodnocení paliv je celková výhřevnost vzorků před a po zpracování technologií HTC. U všech zkoumaných vzorků došlo k významnému nárůstu výhřevnosti. Hlavním důvodem bylo snížení vlhkosti. Největší výhřevnost byla stanovena u vzorku biouhli z jogurtu, kde hodnota výhřevnosti je rovna $31,75 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Podle současné platné vyhlášky č. 415 je požadovaná výhřevnost tuhých biopaliv nad 13 MJ.kg^{-1} pro spalovací zařízení se jmenovitým příkonem nad 0,3 MW. Tento požadavek je vysoce dodržen u všech zpracovaných kuchyňských vzorků technologií HTC.

Byla sledována také degradace a vizuální změny vyprodukovaného biouhli. Dvě skupiny vysušených vzorků byly uchovány v rozdílných podmínkách – na volném vzduchu a v zatemnělém exikátoru. Vlhkost obou skupin vzorků byla po jednom měsíci velmi podobná. Vzorky taktéž nevykazovaly vizuální rozdíly.

Dále byly testovány vlastnosti kapalné složky produktu. Využití procesní kapaliny závisí na její kvalitě, která je dána především vstupní biomasou. Pro případné využití v zemědělství byla kvalita vzorků ověřena testem fytoxicity. Z výsledků vyplývá, že s délkou reakce karbonizace klesá negativní účinek kapalené složky na klíčivost rostlin. Kuchyňský odpad v 10 % roztoku prokazuje negativní vliv pouze při nejkratší délce reakce 2 hodiny.

Práce dále přináší energetické porovnání hydrotermální karbonizace kuchyňských odpadů s anaerobní fermentací a hodnotí klady a zápory obou technologií.

Z odhadu účinností energetických přeměn a energetických náročností obou technologií vyplývá, že z kuchyňských odpadů s obsahem sušiny 27,25 % lze získat čistý energetický zisk $8,8 \text{ MJ.kg}_{\text{suš}}^{-1}$ prostřednictvím karbonizace a $4,3 \text{ MJ.kg}_{\text{suš}}^{-1}$ prostřednictvím fermentace. Energetický zisk anaerobní fermentace je přibližně o 50 % nižší. Obecně se dá shrnout, že nejdůležitějším parametrem pro energetické bilance obou technologií je obsah sušiny substrátu. Protože ohřev nadbytečné vody znamená v obou procesech významné energetické ztráty.

Důležitým závěrem z analýzy silných a slabých stránek obou technologií je nalezení několika možných synergií. Těmi jsou především navýšení materiálového a energetického využití odpadu. Toho lze docílit především dodatečným zpracováním vedlejších produktů procesu. Například zajímavou synergií může být výměna substrátů

mezi čistírnou odpadních vod a zařízením hydrotermální karbonizace. Karbonizace výrazně zlepšuje odvoditelnost i zajišťuje hygienizaci. A protože digestát z bioplynových stanic i čistíren odpadních vod čelí problémům s uplatněním na trhu, nabízí se přepracování na biouhli, které lze snáz využít ke spálení nebo jako kompost.

Naopak při anaerobní fermentaci lze využívat, ať už teplou či ochlazenou, procesní kapalinu z hydrotermální karbonizace s množstvím rozpuštěných organických látek. V případě použití procesních kapaliny z karbonizace a fermentace je ale nutné brát v potaz rozdílné požadavky na pH prostředí.

Bylo zjištěno, že hydrotermální karbonizace kuchyňských odpadů je v případě kontinuálního provozu energeticky výhodnější než anaerobní fermentace kuchyňských odpadů, čímž byla potvrzena 2. hypotéze disertační práce. I přes toto zjištění je doporučováno využívat hydrotermální karbonizaci společně s již rozšířenou technologií anaerobní fermentace, protože obě technologie mohou dohromady vytvářet prospěšnou synergii při zpracování některých druhů odpadů. Především těch, u kterých je v současnosti problém s využitím vedlejších výstupních produktů.

Práce si kladla za cíl najít a prověřit vhodné technologie, které by mohly na průmyslové úrovni řešit problémy v nakládání s kuchyňskými odpady, které vyžadují zvláštní zacházení. Jak anaerobní fermentace, tak hydrotermální karbonizace jsou technologiemi vhodnými pro zpracování kuchyňských odpadů jako primární suroviny. Ale nedostačné množství této suroviny v ekonomicky přijatelné svozové oblasti a malé příjmy plynoucí ze zpracování tohoto odpadu znamenají hlavní problém pro ekonomickou efektivnost investic. Rizikové kuchyňské odpady musí být zpracovávány jen v zařízeních splňujících legislativní požadavky. Ale v těchto zařízeních budou i nadále představovat jen vedlejší surovinu. S pravděpodobným budoucím větším rozvojem lokálních zařízení ke zpracování odpadu a výrobě energie, bude část kuchyňských odpadů, kterou jsou definovány jako vedlejší živočišný produkt, představovat menší část vstupních surovin. Kuchyňské odpady z domácností by měly do budoucna, s vyšší mírou osvěty, směřovat především do domácích kompostérů nebo veřejných sběrných nádob.

7 Seznam použitých symbolů a zkratek

AF	Anaerobní fermentace
BPS	Bioplynová stanice
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad
BRO	Biologicky rozložitelný odpad
ČR	Česká republika
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	Evropské společenství (existující do r. 2009)
EU	Evropská unie
hm.	Hmotnostní
HTC	Hydrotermální karbonizace
KO	Kuchyňský odpad / kuchyňské odpady
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
obj.	Objemový
os	Organická sušina
OSOB	Osoba (případně obyvatel)
SEVBP	Stupeň energetického využití bioplynu
SUBSTR	Vlhký substrát
suš	Sušina
TKO	Tuhý komunální odpad
OZE	Obnovitelný zdroj energie
VŽP	Vedlejší živočišný produkt

8 Literatura

- ANTONIETTI, M., TITIRICI, M. M. Coal from carbohydrates: The “chimie douce” of carbon, *Comptes Rendus Chimie*, Ročník 13, číslo 1-2, vydání leden-únor 2010, s. 167-173, ISSN 1631-0748.
- AVA-CO2 (cit.2013-12-04). Dostupné z: <<http://www.ava-co2.com>>.
- BANOUD, J: Program Composter a možnosti jeho využití při optimalizaci surovinové skladby kompostu. *Biom.cz* (online). 2002-12-04 (cit. 2014-08-24). Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/program-composter-a-moznosti-jeho-vyuziti-pri-optimalizaci-surovinove-skladby-kompostu>>. ISSN: 1801-2655.
- BERGE, N.D., KYOUNG S. RO, JINGDONG MAO, JOSEPH R. V. FLORA, MARK A. CHAPPELL, SUNYOUNG BAE. Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45 (13), s. 5696–5703
- Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse. *Top agrar extra*, 2000.
- BLOODPAD – BIOPLYN – ENERGIE. Odpadové fórum. Tématická informační publikace. 2009. Praha.
- BLÖHSE, D. 2. Hydrothermale Carbonisierung. Wissenschaftskongress der DGAW Abfall- und Ressourcenwirtschaft 29.03. – 30.03.2012 Rostock
- BOŽEK, F., KOMÁR, A., NAVRÁTIL J. Odpad z provozu stravovacích zařízení. Internetový portál. *Jidelny.cz*, 2005. Dostupné z: <<http://www.jidelny.cz/show.aspx?id=292>>
- BROCH, A. Renewable Solid Fuels via Hydrothermal Carbonization (HTC) of Cellulosic Biomass . Pacific West Biomass Conference, January 16-18, 2012.
- CAO, S., SUN, Y., WANG, G. Direct carbon fuel cell: fundamentals and recent developments. *Journal of Power Sources*, 2007, vydání 167, s. 250–257.
- Cíle v oblasti klimatu a energetiky do roku 2030 pro konkurenceschopné, bezpečné a nízkouhlíkové hospodářství EU. European Commission - IP/14/54 22/01/2014
- CUI, X., ANTONIETTI, M., YU, S.-H. Structural effects of iron oxide nanoparticles and iron ions on the hydrothermal carbonization of starch and rice carbohydrates. *Small*. 2006. Ročník 2, číslo 6, s. 756–759.
- DEARMANA, B., BENTHAMB, R.H. Anaerobic digestion of food waste: Comparing leachate exchange rates in sequential batch systems digesting food waste and biosolids. *Waste Management*. Volume 27, Issue 12, 2007, Pages 1792–1799.
- DEDERER, M., MESSNER, J. EEG 2012 und die erwarteten Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Dostupné z: <http://www.lazbw.de/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_gl/Biogas/EEG%202012%20Gesamt.pdf>
- DLABAJA, T. Fermentace kuchyňských odpadů. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2008, s 82.
- DOHÁNYOS, M. Anaerobní čistírenské technologie. NOEL 2000 Brno, s 26. 1998.

- DVOŘÁČEK, T. Ekonomika bioplynových stanic pro zpracování BRO. Biom.cz (online). 2010-07-19 (cit. 2014-03-16). Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/ekonomika-bioplynovych-stanic-pro-zpracovani-bro>>. ISSN: 1801-2655.
- EL-MASHAD, H.M., ZHANG, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. 2010. Bioresource Technology. Volume 101, Pages. 4021-4028. ISSN 0960-8524
- FRIEDL, G. Bioplyn – aktuální trendy v Německu. Konference: Výstavba bioplynových stanic v Česku a Německu. Praha: Hotel Jalta, 22.10.2013.
- FUNKE, A., ZIEGLER, F. Heat of reaction measurements for hydrothermal carbonization of biomass, Bioresource Technology, srpen 2011, ročník 102, vydání 16, s. 7595-7598, ISSN 0960-8524
- FUNKE, A. KNOTEK, P. Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse. Disertační práce, Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin. Vedoucí práce George Tsatsaronis, Berlin, 2012, s. 225.
- FUNKE, A.; MUMME, J.; KOON, M. Cascaded production of biogas and hydrochar from wheat straw: Energetic potential and recovery of carbon and plant nutrients. BIOMASS & BIOENERGY, listopad 2013, ročník 58, s. 229-237.
- Energetická efektivnost bioplynových stanic. SEVEN. 2012. Dostupné z: <<http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/EnEfBPS-komplet.pdf>>.
- Energetický regulační úřad (ERÚ). Dostupné z: <<http://www.eru.cz/>>.
- Energetický regulační věstník. Energetický regulační úřad. Jihlava. Ročník 13. Částka 3/2013. Dostupné z: <https://portal.gov.cz/portal/publikujici/eeuaau7/vestniky/11444_doc.pdf>.
- Eurostat. Statistical office of the European Union. Luxembourg. Dostupné z: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>>.
- GLASER, B., HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humi tropics. Naturwissenschaften, 2001, 88, s. 37-41
- GUJER, W., ZEHNDER, A.J.B. Conversion Processes in Anaerobic Digestion. 1983. Water Science & Technology Vol 15 No 8-9 pp 127–167
- HABART, J. V čem se liší zemědělská a komunální bioplynová stanice – zamyšlení u příležitosti otevření bioplynové stanice v Krásné Hoře a Vysokém Mýtě. Biom.cz (online). 2008-10-27 (cit. 2009-05-10). Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/v-cem-se-lisi-zemedelska-a-komunalni-bioplynova-stanice-zamysleni-u-prilezitosti-otevreni-bioplynovy-stanice-v-krasne-hore>>. ISSN 1801-2655.
- HANÁK, J. Nakládání s bioodpadem v obcích – právní aspekty. Biom.cz (online). 2013-09-09 (cit. 2014-03-09). Dostupné z: <<http://biom.cz/cz-bioodpady-a-kompostovani/odborne-clanky/nakladani-s-bioodpadem-v-obcich-pravni-aspekty>>. ISSN: 1801-2655.
- HAVELKA, P. Spalovny - skutečně ta nejlepší varianta zpracování komunálního odpadu? 2013. Časopis Odpady. 6/2013. ISSN 1210-4922.

- HAVRÁNKOVÁ, V. Jak správně nakládat s odpady. 2005. Praha. Ministerstvo životního prostředí ČR. 15 s. (cit. 2. října 2013). Dostupné z <http://www.socr.cz/file/60/odpady.pdf>.
- HOEKMAN, S.K., BROCH, A., ROBBINS, C. Hydrothermal carbonization (HTC) of lignocellulosic biomass. *Energy & Fuels*, 2011, 25, 1802–1810.
- HŘEBÍČEK, J., PILIAR, F., KALINA, J., MANHART, J., SOUČKOVÁ, K.: Projektování nakládání s bioodpady v obcích. 2. aktualizované vydání. Nakladatelství MŽP, 2011. 103 s. ISBN: 978-80-85763-67-6
- HWANG, I.H., AOYAMA, H., MATSUTO, T., NAKAGISHI, T., MATSUO, T. Recovery of solid fuel from municipal solid waste by hydrothermal treatment. *Waste Management* 2012, 32, s. 410–416.
- CHO, J.K., PARK, S.C. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. *Bioresour. Technol.* 1995, 52 (3), 245–253.
- Institut für Landtechnik, Weihenstephan, LTV-Arbeitskreis Biogas. Biogas-Menge und Qualität. Hrsg. H. Mitterleitner. 1999.
- IRANPOUR, R.S.OH., COX, H.H.J., SHAO, Y.J., MOGHADDAM, O., KEARNEY, R.J., DESHUSSES, M.A., STENSTROM, M.K., AHRING, B.K. 2002. Changing mesophilic wastewater sludge digestion into thermophilic operation at terminal island treatment plant. *Water Environ. Res.* 47 (5), 494–507.
- KALTWASSER, B. J. Biogas: Regenerative Energieerzeugung durch anaerobe Fermentation organischer Abfälle in Biogasanlagen. Bauverlag GmbH. Wiesbaden. 1980.
- KANG, S.M., LI, X.H., FAN, J., CHANG, J. Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of lignin, cellulose, D-xylose, and wood meal. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2012, 51, 9023–9031.
- KIM, J. K., OH, B. R., CHUN, Y. N., KIM S. W. 2006. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste, *Journal of Bioscience and Bioengineering*. Svazek 102, číslo 4, stránky 328-332, ISSN 1389-1723
- KLÄUSLI, T. Umsetzung der HTC in den kommerziellen Maßstab am Beispiel der AVA CO2 AVA-CO2. LEIPZIG - International Biomass Conference. Červen 2013.
- KOMÁR, A. Odpady ve stravovacích provozech vojenských zařízení. Sborník VVŠ PV (Vysoká vojenská škola pozemního vojska ve Vyškově). 2001, č. 3. Dostupné z: http://www.vvs-pv.cz/sbornik_2001_03.htm.
- KOMÁR, A. Nakládání s odpady v gastronomické praxi, Bakalářská práce, UTB Zlín, 2011.
- LI, L., DIEDERICK, R., FLORA, J.R.V., BERGE, N.D. Hydrothermal carbonization of food waste and associated packaging materials for energy source generation. *Waste Management* 33 (2013) 2478–2492
- LIANG L., TOMOAKI N., KUNIO Y.: Effects of hydrothermal treatment on characteristics and combustion behaviors of municipal solid wastes, *Applied Energy*, Ročník 88, číslo 11, listopad 2011, s. 3659-3664, ISSN 0306-2619.

- LIANG L., TOMOAKI N., KUNIO Y. Effects of hydrothermal treatment on characteristics and combustion behaviors of municipal solid wastes, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 11, November 2011, Pages 3659-3664, ISSN 0306-2619
- LIBRA, M., MLYNÁŘ, J., POULEK, V., *Jaderná energie. Kniha-monografie*, Praha : ILSA, 2012, 167 stran, ISBN 978-80-904311-6-4
- LIBRA, J.A., RO, K.S., KAMMANN, C., FUNKE, A., BERGE, N.D., NEUBAUER, Y., TITIRICI, M., FUHNER, C., BENS, O., KERN, J., EMMERICH, K.. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*. 2011. Vydání 2, s. 89-124.
- LIU, Z., ZHANG, F.S., WU, J., 2010. Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment. *Fuel* 89, s. 510–514.
- LIU, I.G., ZHAO, S.H., ZHANG, L.H. Study on Anaerobic Digestion Performance of Kitchen Wastes: Inhibition of Ammonia Nitrogen and Volatile Acid on the Anaerobic methanogenesis. *Advanced Materials Research*, October, 2011, 347-353, s. 2497-2503.
- LU, L., NAMIOKA, T., YOSHIKAWA, K. Effects of hydrothermal treatment on characteristics and combustion behaviors of municipal solid wastes. *Applied Energy*, 2011, 88 (11), s. 3659–3664.
- LU, X., JORDAN, B., BERGE, N.D.. Thermal conversion of municipal solid waste via hydrothermal carbonization: comparison of carbonization products to products from current waste management techniques. *Waste Management*, 2012, 32, 1353–1365.
- KÁBA, B. *Matematická statistika I*. Praha, ČZU, 2006. ISBN 80213-1439-7
- KÁBA, B. *Statistické metody I*. Praha, ČZU, 2007. ISBN 978-80-213-1672-0
- KANG, S.M., LI, X.H., FAN, J., CHANG, J. Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of lignin, cellulose, D-xylose, and wood meal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51, s. 9023–9031.
- KIM J. K., OH B. R., CHUN Y. N., KIM S. W., 2006. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 102: 328-332.
- KNEŽEVIC , D., VAN SWAAIJ, W.P.M., KERSTEN, S.R.A. Hydrothermal conversion of biomass: I. Glucose conversion in hot compressed water. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2009, 48, s. 4731–4743.
- KOBAYASHI N., NOMURA S., FUJIMURA Y., TSUBOI H., KIMOTO T., ITAYA Y.. Effect of Hydrothermal Condition on the Characteristics of Sludge. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2011, 37 (5): 460–467.
- KOTSYURBENKO, O.R., NOZHEVNIKOVA, A., ZAVARZIN, G.A. Methanogenic degradation of organic matter by anaerobic bacteria at low temperature. 1993. *Chemosphere*, 27, s. 1745-61.
- Mechanismy financování bioplynových projektů ve střední a východní Evropě. *BiogasIn*. 2012. Dostupné z:
<http://www.biogasin.org/files/pdf/reports/6.4.%20Biogas%20financing%20mechanisms/D.6.4.3_CzBA_CZ.pdf>.

- MICHAL, P. Bioplyn – energie ze zemědělství. Praha, 2005. 22 s., Informační přehledy ÚZPI. Mini-Biogasanlage bis 75 kW: Bau, Betrieb und Wirtschaftlichkeit. BiomassMuse. (cit. 20013-10-10). Dostupné z: <<http://www.biomasse-nutzung.de/wirtschaftlichkeit-bau-betrieb-mini-biogasanlage-75-kw/>>
- MUŽÍK, O., KÁRA, J. Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR. *Biom.cz* (online). 2009-03-04 (cit. 2014-08-24). Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>>. ISSN: 1801-2655.
- MUŽÍK, O., KÁRA, J., Hanzlíková, I. Odpady ze stravování jako surovina pro výrobu bioplynu. 2012. Agriscience. Dostupné z: <<http://www.agritech.cz/clanky/2012-1-11.pdf>>.
- Národní bioplynová mapa. BiogasIn. 2012. Dostupné z: <http://www.biogasin.org/files/pdf/reports/6.2%20National%20biogas%20enforcement%20policies%20road%20map%20for%20sustainable%20biogas%20market%20development/D.6.2.3_CzBA_CZ.pdf>.
- Nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 1069/2009 Sb., o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě.
- Nařízení Komise č. 142/2011 kterým se provádí nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě
- Odpad nebo hnojivo: možnosti řešení. Eurochem (online). 4.11.2009, (cit. 2013-6-15). Dostupné z: <<http://www.eurochem.cz/index.php?LA=CS&MN=Odpad+nebo+hnojivo++mo%9Enosti+%F8e%9Aen%ED&ProdID=000216066EA1DE860002E8C5&DT=4097&TXTID=2185&PHPSSESSIONID=64a4af8786f2db6d132ca895620706cf>>.
- OUDE ELFERING, S. J. VISSER, A., HULSHOFF, P.L.W., STARMS, A.J.M. sulphate reduction in methanogenic bioreactors. 1994. *FEMS Microbiology Reviews*. 15, p. 119-36.
- PARAKNOWITSCH, J.P., THOMAS, A., ANTONIETTI, M., Carbon colloids prepared by hydrothermal carbonization as efficient fuel for indirect carbon fuel cells. *Chemistry of Materials*, 2009, 21 (7), s 1170–1172.
- PASTOREK Z., KÁRA J., JEVIČ P. Biomasa – obnovitelný zdroj energie. FCC Public, Praha 2004. 276 s. ISBN 80-86534-06-5.
- Petroleum Resources Classification System and Definitions. 2000. Society of Petroleum Engineers. Dostupné z: <http://www.spe.org/industry/docs/Petroleum_Resources_Classification_2000.pdf>.
- Plán odpadového hospodářství České republiky (online). Praha: Ministerstvo životního prostředí. Nabyt účinnosti 1. 7. 2003. (cit. 2. října 2013). Dostupné z <http://www.mzp.cz/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_cr>.
- Plán odpadového hospodářství České republiky na období 2013 – 2022, Odbor odpadů MŽP, 1. Draft, (cit. 2013-20-6). Dostupné z: <http://www.ceskapozice.cz/sites/default/files/file_attachments/poh_1_draft_20.9.2012.pdf>

- POLÁČKOVÁ, J., BOUDNÝ, J., JANOTOVÁ, B., NOVÁK, J. Metodika kalkulací nákladů a výnosů bioplynových stanic v zemědělských podnicích. Ústav Zemědělské ekonomiky a informací, Praha, 2013. ISBN 978-80-7271-203-8
- Politika životního prostředí EU: Sedm tematických strategií, Planeta, Ročník XIV, číslo 10/2006, (cit. 2013-20-6). Dostupné z: [http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/BFEED7D49272A923C125712500403293/\\$file/planeta10_3kor.pdf](http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/BFEED7D49272A923C125712500403293/$file/planeta10_3kor.pdf)
- Pravidla financování projektů výroby a využití bioplynu v zemědělství
BiogasIn. 2011. Dostupné z:
< http://www.biogasin.org/files/pdf/WP3/D.3.8.3_CzBA_CZ.pdf>.
- Preparatory Study of Food Waste across EU 27. European Commission, 2010. Dostupné z:
<http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/bio_foodwaste_report.pdf>.
- QIAO, W., YAN, X., YE, J., SUN, Y., WEI WANG, W., ZHONGZHI ZHANG, Z. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment, *Renewable Energy*, 2011. Volume 36, Issue 12, s. 3313–3318
- RAMKE, H.G., BLOHSE, D., LEHMANN, H.J., FETTIG, J. Hydrothermal carbonization of organic waste. 20th International Waste Management and Landfill Symposium. 2009
- RAMKE, H.G. Hydrothermale Carbonisierung von Biomasse – Chancen, Risiken, aktueller Entwicklungsstand. Fachkongress Zukunftsenergien. 2012.
- RILLIG, C.M., WAGNER, M., SALEM, M., ANTUNES, P.M., GEORGE, C., RAMKE, H.G., TITIRICI, M.M., ANTONIETTI, M. Material derived from hydrothermal carbonization: Effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza, *Applied Soil Ecology*, Volume 45, Issue 3, July 2010, Pages 238-242, ISSN 0929-1393
- ROCKSTRÖM, J., W. STEFFEN, K. NOONE, Å. PERSSON, F. S. CHAPIN, III, E. LAMBIN, T. M. LENTON, M. SCHEFFER, C. FOLKE, H. SCHELLNHUBER, B. NYKVIST, C. A. DE WIT, T. HUGHES, S. VAN DER LEEUW, H. RODHE, S. SÖRLIN, P. K. SNYDER, R. COSTANZA, U. SVEDIN, M. FALKENMARK, L. KARLBERG, R. W. CORELL, V. J. FABRY, J. HANSEN, B. WALKER, D. LIVERMAN, K. RICHARDSON, P. CRUTZEN, AND J. FOLEY. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32.
- ROZZI, A., REMIGI, E. Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic condition: a literature review. 2004. *Reviews in Environmental Science and Technology*, 3(2), s. 93-115.
- SPE - Society of Petroleum and Engineers. Petroleum Resources Classification System and Definitions . February 2000. (cit. 10. října 2008). Dostupné z:
< http://www.spe.org/industry/docs/Petroleum_Resources_Classification_2000.pdf>.
- RÖTHLEIN, R. Back in Black. *Max Planck Research*, 3/2006, Pages 21-25 Dostupné z:
<http://www.mpg.de/974909/F001_Focus_020_025.pdf> (cit. 2011 – 10 - 24)
- Rozvoj udržitelnosti trhu s bioplynem ve Střední a Východní Evropě. BiogasIn. 2010. Dostupné z: < <http://www.biogasin.org/>>.

- Seminář pro administrativní sektor o realizaci projektů výroby a využití bioplynu. BiogasIn. 2011. Dostupné z:
<http://www.biogasin.org/files/pdf/WP3/D.3.4.3_%20CzBA_CZ.pdf>
- SHAHRIARI, H., MOSTAFA WARITH, M., HAMODA, M., KENNEDY, K.J. Effect of leachate recirculation on mesophilic anaerobic digestion of food waste. *Waste Management*. Volume 32, Issue 3, March 2012, Pages 400–403
- SLEJŠKA, A., VÁŇA, J. Anaerobní digesce, fermentace, stabilizace, vyhnívání či zkvašování?. *Biom.cz* (online). 2002-07-16 (cit. 2014-08-24). Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-digesce-fermentace-stabilizace-vyhnivani-ci-zkvasovani>>. ISSN: 1801-2655
- SONG, Z., WILLIAMS C.J., EDYVEAN R.G.J. Coagulation and anaerobic digestion of tannery wastewater. 2001. *Process Safety and Environmental Protection*, 79, p. 23-28.
- Statistisches Bundestamt, Abfallbilanz 2010. Wiesbaden 2014 Dostupné z:
<<https://www.destatis.de>>
- SVANSTROM, M, PATRICK, T.N. ,FROLING, M , PETERSON, A.A. , TESTER, J.W. Choosing between green innovative technologies - Hydrothermal processing of biowastes *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, Volume 10, Issue 1, January 2007, Pages: 177-185, ISSN: 1203-8407
- SVATOŠOVÁ, L. *Statistické metody v příkladech*. Praha, ČZU, 2007. ISBN 978-80-213-1673-7
- SCHULZ, H., EDER, B. *Bioplyn v praxi*. 1. české vydání. HEL, Ostrava 2004. 168 s. ISBN 80-86167-21-6.
- SPE, 2000: *Petroleum Resources Classification System and Definitions*.
- Statistika energetického využívání odpadů 1905–2009. Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2010. Dostupné z: <<http://download.mpo.cz/get/41306/46090/555493/priloha001.pdf>>.
- STEMANN, J., ZIEGLER, F. Assessment of the energetic efficiency of a continuously operating plant for hydrothermal carbonisation of biomass, *World Renewable Energy Congress 2011*, May 2011, Sweden. *Bionergy Technology*.
- Státní energetická koncepce ČR 2010-2030 (akt. 2012). 2012. Ministerstvo průmyslu a obchodu Dostupné z: <<http://databaze-strategie.cz/cz/mpo/strategie/statni-energeticka-koncepce-cr-2010-2030>>.
- STRAKA, F. A KOL. *Bioplyn*. 2. vyd. GAS s.r.o., Praha 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.
- STRAKA F. *Tvorba plynu ve skládkách tuhých komunálních odpadů*. Kandidátská disertační práce, VŠCHT Praha, 1993.
- SVANSTROM, M, PATRICK, T.N. ,FROLING, M , PETERSON, A.A. , TESTER, J.W. Choosing between green innovative technologies - Hydrothermal processing of biowastes *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, Volume 10, Issue 1, January 2007, Pages: 177-185, ISSN: 1203-8407
- TITIRICI, M. M, ANTONIETTI, M. Chemistry and materials options of sustainable carbon materials made by hydrothermal carbonization, *Chem. Soc. Rev.*, 2010, 39, s. 103-116.
- The Bionic Group. (cit.2013-12-04). Dostupné z: <<https://www.bionic-world.net/>>.

TROPSCH, H. ; PHILLIPOVICH, A. Über die künstliche Inkohlung von Cellulose und Lignin in Gegenwart von Wasser. In: Gesammelte Abhandlungen zur Kenntnis der Kohle 7 (1922), s. 84102

VÁŇA J., USŤAK S. Biologicky dosoušená biomasa na bázi bioodpadů jako palivo pro biokotelny a bioelektrárny. Biom.cz (online). 2011-05-30 (cit. 2013-06-24). Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biologicky-dosousena-biomasa-na-bazi-bioodpadu-jako-palivo-pro-biokotelny-a-bioelektrarny>>. ISSN: 1801-2655.

VÁŇA J. Kam se ztrácejí kuchyňské odpady a kam s nimi. Odpadové fórum, 2011, roč. 12, č. 3, s 13-15

VÁŇA J. Regionální kompostárna ve Slavičíně. 2012. Odpadové fórum. 2/2012. ISSN: 1804-0195

VOŘÍŠEK, T. Zkušenosti s financováním bioplynových stanic v ČR a výhled do budoucna. In Výstavba bioplynových stanic v Česku a Německu. Praha: Hotel Jalta, 22.10.2013.

Vyhláška č. 381/2001 Sb., Katalog odpadů, ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č. 504/2004 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě

Vyhláška č. 289/2007 Sb., o veterinárních a hygienických požadavcích na živočišné produkty, které nejsou upraveny přímo použitelnými předpisy Evropských společenství

Vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č. 291/2012 Sb., kterou se mění vyhláška č. 94/2010 Sb., o některých veterinárních a hygienických požadavcích na přepravu a zpracování vedlejších živočišných produktů

Vyhláška č. 453/2012 Sb. o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů

Vyhláška č. 477/2012 Sb., o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchování dokumentů

Vyhláška č. 35/2014 Sb., kterou se mění vyhláška č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů

Vyhláška č. 131/2014 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv

Výstavba komunálních bioplynových stanic s využitím BRKO. CZ Biom - České sdružení pro biomasu. Praha. 2009. Dostupné z:

<<http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplynky.pdf>>.

WEILAND, P., ROZZI, A. The start-up operation and monitoring of high-rate anaerobic treatment systems: Discussor's report. Water Science and Technology, 1991, 24, s. 257–277

WENZLAFF, R., JONKANSI, F. Biogas. RKL. 1984. s. 73

XIAOWEI L., BETH J., NICOLE D. B. Thermal conversion of municipal solid waste via hydrothermal carbonization: Comparison of carbonization products to products from current waste management techniques, *Waste Management*, Volume 32, Issue 7, July 2012, s. 1353-1365 ISSN 0956-053X

ZABRANSKA, J., DOHANYOS, M., JENICEK, P., ZAPLATILKOVA, P., KUTIL, J., The contribution of thermophilic anaerobic digestion to the stable operation of wastewater sludge treatment. *Water Sci. Tech.*, 2002, 46 (4–5), 447–453.

Zákon č.17/1992 Sb., o životním prostředí.

Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravech a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů) (zrušen 1.1.2013)

Zákon č. 332/2008 Sb., veterinární zákon

Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie

Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší.

Zelená kniha, Komise evropských společenství, Brusel, 3. 12. 2008,(cit.2013-20-6).Dostupné z:
<<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0811:FIN:CS:PDF>>

ZHANG R., HAMED M., HARTMAN K., WANG F., LIU G., CHOATE CH., GAMBLE P., 2007. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 98: 929-935.

ZILI J., DAWEI M., HONGYAN M., YOSHIKAWA K. Study on the hydrothermal drying technology of sewage sludge. *Technological Science*, 2010, 53 (1): pp. 160–163.

9 Rejstřík tabulek

<i>Tab. 1 Environmentální procesy, následky překročení mezních hodnot a možná řešení ke snížení hodnot.....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 2 Cíle Energiewende Německé spolkové republiky.....</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 3 Výkupní ceny vyrobené elektřiny v BPS dle data zprovoznění.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 4 Výkupní ceny vyrobené elektřiny v BPS v Německu dle EEG 2012.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5 Přehled nakládání s komunálními odpady v EU v roce 2008.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6 Vlhkost a obsah uhlikatých a dusíkatých látek vybraných surovin.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7 Měrná výtěžnost bioplynu nebo metanu z kuchyňských odpadů.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8 Zhodnocení základních parametrů pro volbu technologie anaerobní fermentace.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 9 Přehled zúčastněných stran během schvalovacího procesu BPS.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 10 Srovnání podmínek reakce a typického produktu termochemické přeměny.....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 11 Srovnání procesních parametrů a produktů termochemických přeměn.....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 12 Prvková analýza vybraných odpadů.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 13 Průměrné hodnoty hlavních parametrů v závěru adaptační etapy.....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 14 Požadavky na kvalitu tuhých paliv z biomasy.....</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 15 Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu.....</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 16 Molekulové hmotnosti prvků v hořlavíně.....</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 17 Parametry předupravených vzorků a výsledky fermentace.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 18 Regresní analýza vztahů mezi veličinami.....</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 19 Odhad investičních nákladů malé komunální BPS pro KO.....</i>	<i>112</i>
<i>Tab. 20 Statistické vyhodnocení experimentů a laboratorního určení výhřevnosti vzorků.....</i>	<i>116</i>
<i>Tab. 21 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro kuchyňský odpad a surový brambor.....</i>	<i>118</i>
<i>Tab. 22 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro biouhli z kuchyňského odpadu a surového bramboru.....</i>	<i>119</i>
<i>Tab. 23 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro smetanový jogurt a surovou cibuli.....</i>	<i>119</i>
<i>Tab. 24 Výsledné hodnoty prvkové analýzy pro biouhli ze smet. jogurtu a surové cibule.....</i>	<i>119</i>
<i>Tab. 25 Výsledné vybrané hodnoty stechiometrické analýzy přepočtené na referenční obsah kyslíku ve spalínách 11 % (souč. přebytku vzduchu 2,10) pro původní suroviny.....</i>	<i>123</i>
<i>Tab. 26 Výsledné vybrané hodnoty stechiometrické analýzy přepočtené na referenční obsah kyslíku ve spalínách 11 % (součinitel přebytku vzduchu 2,10) pro biouhli.....</i>	<i>123</i>
<i>Tab. 27 Rozdíly v obsahu vlhkosti (% hm.) mezi vzorky biouhli uskladněnými v exikátoru a volně na vzduchu. (výsledná hodnota je průměrem tří měření)..</i>	<i>124</i>
<i>Tab. 28 Základní výsledky textu fytotoxicity vybraných vzorků odfiltrované kapalné složky výstupního produktu (vzorky v původní koncentraci nebo 10 % roztoku).....</i>	<i>127</i>
<i>Tab. 29 Hodnoty prvkové analýzy pro surový kuchyňský odpad a biouhli.....</i>	<i>128</i>
<i>Tab. 30 Energetické srovnání procesů anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace pro kuchyňský odpad.....</i>	<i>129</i>
<i>Tab. 31 SWOT analýza anaerobní fermentace a hydrotermální karbonizace pro kuchyňský odpad.....</i>	<i>130</i>

10 Rejstřík obrázků

<i>Obr. 1 Vývoj ceny ropy v nominálních a reálných cenách od roku 1910 do 2008.</i>	17
<i>Obr. 2 Růst cen elektřiny pro průmysl a domácnosti v Německu, ČR a USA</i>	19
<i>Obr. 3 Nakládání s komunálním odpadem v EU-27 v roce 2010</i>	32
<i>Obr. 4 Srovnání výkupních cen pro elektřinu vyráběnou spalováním bioplynu v BPS (v období 2010-2012)</i>	39
<i>Obr. 5 Vývoj zákona o podpoře OZE v Německu (období 2000-2012)</i>	40
<i>Obr. 6 Počet BPS dle druhu, Česká republika, období 2005 - 2012</i>	41
<i>Obr. 7 Vliv teploty na dosažitelné množství plynu ve vztahu k hodnotě dosažené při optimálních teplotních poměrech</i>	53
<i>Obr. 8 Směrné hodnoty výtěžku bioplynu z různých fermentačních materiálů</i>	58
<i>Obr. 9 Základní parametry tvorby procesního návrhu technologie pro stanici anaerobní fermentace</i>	59
<i>Obr. 10 Socioekonomické a ekologické výhody z procesu anaerobní fermentace</i>	63
<i>Obr. 11 Počet a podíl instalací na úpravu bioplynu v EU v roce 2009</i>	65
<i>Obr. 12 Přehled reakčních mechanismů HTC</i>	67
<i>Obr. 13 Srovnání chemických reakcí, energie výstupního produktu a uhlíkové eficiency přeměny</i>	70
<i>Obr. 14 Průběh reakce HTC</i>	72
<i>Obr. 15 Ukázka vstupní suroviny (bioodpadu) a výstupního produktu (biouhli) procesu HTC</i>	72
<i>Obr. 16 Vliv délky reakce (v hodinách) na výtěžnost biouhli (a) a hodnotu energetického obsahu biouhli (b)</i>	73
<i>Obr. 17 Změny v rozložení obsahu uhlíku mezi skupenstvími v průběhu HTC pro králíčí jídlo</i>	74
<i>Obr. 18 Vliv teploty na energetický obsah</i>	75
<i>Obr. 19 Laboratorní zařízení pro anaerobní fermentaci substrátů</i>	83
<i>Obr. 20 Technologické schéma zařízení pro reaktor v polokontinuálním provozu</i>	85
<i>Obr. 21 Technologické schéma zařízení pro vsádkový reaktor</i>	89
<i>Obr. 22 Laboratorní zařízení pro hydrotermální karbonizaci</i>	92
<i>Obr. 23 Kumulativní produkce bioplynu přepočtena na množství rozložené org. sušiny</i>	103
<i>Obr. 24 Výtěžnost bioplynu za rozdílných teplot v vsádkovém reaktor</i>	106
<i>Obr. 25 Záznam měření anaerobní fermentace v polokontinuálním reaktor</i>	107
<i>Obr. 26 Záznam měření intenzivního dávkování</i>	109
<i>Obr. 27 Analýza hospodářského výsledku BPS v horizontu 15 let</i>	114
<i>Obr. 28 Závislost výhřevnosti a pH směsi kuchyňských odpadů na délce HTC</i>	116
<i>Obr. 29 Výhřevnost a pH biouhli v závislosti na době zdržení pro kuchyňský odpad (zbytky z obědových pokrmů), syrový brambor, smetanový jogurt a syrová cibule</i>	117
<i>Obr. 30 Proměna vstupní suroviny na výstupní produkt s detailem na strukturu</i>	121
<i>Obr. 31 Vlevo je zobrazen čerstvý smetanový jogurt, uprostřed produkt HTC (190 °C, 4 h) - kapalná a pevná složka, vpravo vysušené biouhli</i>	122
<i>Obr. 32 Porovnání hustota (Mass density) a energetické hustoty (Energy density) pelet ze surového materiálu a produktu HTC</i>	125
<i>Obr. 33 Test hydrofobních vlastností pelet</i>	125
<i>Obr. 34 Neseparovaná tuhá a kapalná složka produktu HTC</i>	127

11 Přílohy

Příloha 1 Produkce kuchyňských odpadů ve stravovacích provozech

Příloha 2 Schéma procesní linky mikrovlnné depolimerizace

Příloha 3 Prototypový reaktor mikrovlnná depolymerizace – označení mf60d

Příloha 4 Schéma vzniku bioplynu z biologicky rozložitelných odpadů (4 fázový model)

*Příloha 5 Modelový výpočet u BPS významným využitím tepla z kogenerační jednotky
(nad rámec vlastní technologické spotřeby)*

*Příloha 6 Modelový výpočet u BPS s úpravou bioplynu na biometan pro dodávku do
plynové sítě*

Příloha 7 Záznam experimentu HTC

Příloha 8 Vliv teploty na energetickou hustotu produktu

Příloha 9 Vliv koncentrace na výtěžnost tuhé fáze

Příloha 10 Vliv koncentrace na energetickou hustotu

Příloha 11 Energetická bilance různých druhů biomasy pro technologie AF a HTC

Příloha 12 Netto energetická bilance procesu HTC

Příloha 13 Energetické bilance a) HTC, b) spalování

Příloha 14 Potenciální zisk energie ze zpracování odpadů ($10^{-3} \text{ MJ.g}^{-1}$ vlhkého odpadu)^a

Příloha 15 Šablona záznamu měření anaerobní fermentace

Příloha 1 Produkce kuchyňských odpadů ve stravovacích provozech

zařízení	VZ Měřín		MJ-centrum s.r.o.		Gastro Europe s.r.o.	
denní počet strážníků	240		280		1200	
charakter strážníků	dospělí, několik dětí		veřejnost		veřejnost	
charakter porcí	snídaně - švédské stoly obědy a večeře na objednávku z jíd. lístku		jednou denně jako hlavní jídlo		jednou denně jako hlavní jídlo	
druh odpadu/množství	kg/měsíc	g/os/d	kg/měsíc	g/os/d	kg/měsíc	g/os/d
papír	6	0,83	5	0,60	200	5,56
odpady rostlin. původu	70	9,72	60	7,14	200	5,56
ze zeleniny	20	2,78	10	1,19	100	2,78
z brambor	50	6,94	50	5,95	100	2,78
z ovoce	0	0,00	0	0,00	0	0,00
odpady živočišn. původu	38	5,28	11,2	1,33	330	9,17
kosti	30	4,17	0	0,00	300	8,33
skořápky	8	1,11	11,2	1,33	30	0,83
odřezky masa	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Nedojedené potraviny	100	13,89	20	2,38	200	5,56
Tuky z lapačů	0	0,00	1	0,12	10	0,28
Oleje z pánví	60	8,33	10	1,19	150	4,17
Celkem	274,0	38,06	107,2	12,76	890,0	24,72

zařízení	Agrie a.s.		školní kuchyně		vojenská kuchyně	
denní počet strážníků	2000		320		140	
charakter strážníků	veřejnost		studenti SŠ		dospělí	
charakter porcí	jednou denně jako hlavní jídlo		Snídaně, oběd, večeře		Snídaně, oběd, večeře	
druh odpadu/množství	kg/měsíc	g/os/d	kg/měsíc	g/os/d	kg/měsíc	g/os/d
papír	2	0,03	7,4	0,77	5	1,19
odpady rostlin. původu	250	4,17	52	5,42	45	10,71
ze zeleniny	150	2,50	15	1,56	12	2,86
z brambor	100	1,67	37	3,85	33	7,86
z ovoce	0	0,00	0	0,00	0	0,00
odpady živočišn. původu	300	5,00	47	4,90	5	1,19
kosti	250	4,17	36	3,75	0	0,00
skořápky	50	0,83	11	1,15	5	1,19
odřezky masa	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Nedojedené potraviny	200	3,33	77	8,02	30	7,14
Tuky z lapačů	20	0,33	43,2	4,50	27	6,43
Oleje z pánví	330	5,50		0,00		0,00
Celkem	1102,0	18,37	226,6	23,60	112,0	26,67

Vysvětlení některých hodnot: **VZ Měřín** - kosti jen k vývaru na polévky, maso objednané již opracované, žádné tuky z lapačů - bakteriální digesce, tuky a oleje - více smažených pokrmů,

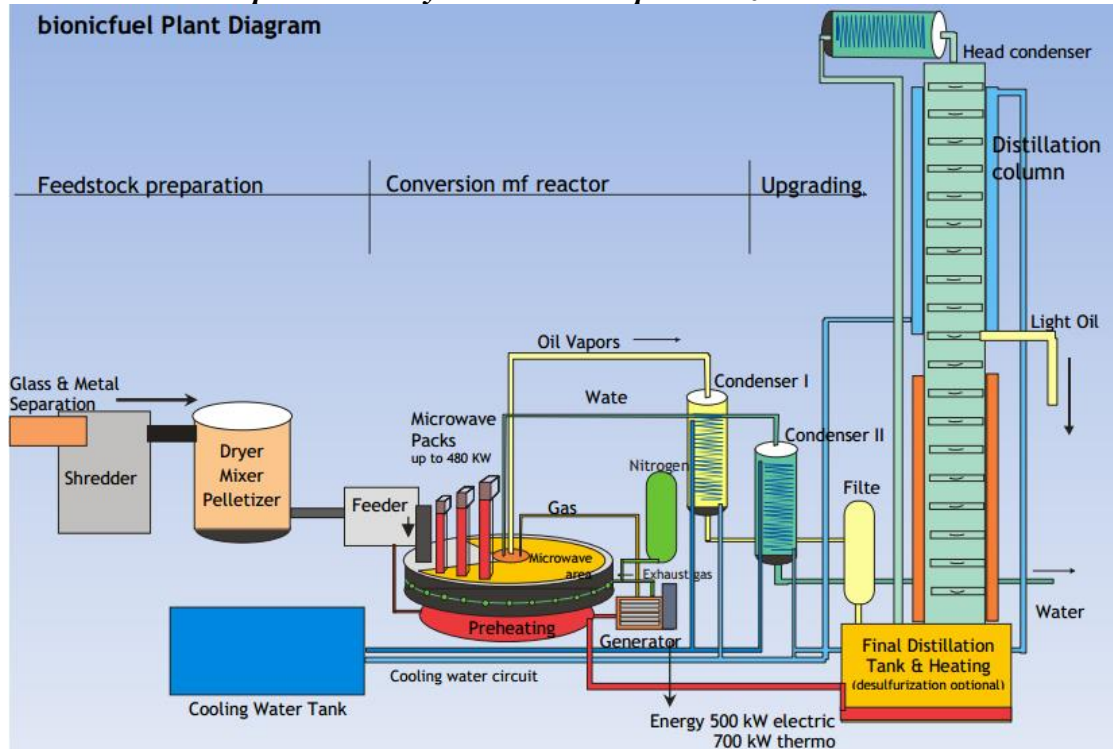
horší kvalita brambor - více čištění, množství nedojedených potravin dostatečně nevysvětleno.
MJ-centrum s.r.o. - odebírá již očištěnou zeleninu, bez kostí - polévky jen vyvářením masa,
horší kvalita brambor - více čištění

Gastro Europe s.r.o. - mnoho kostí na vývary a omáčky

Agrie a.s. - tuky a oleje - více smažených pokrmů

Zdroj: Komár, 2001; Božek et al., 2005

Příloha 2 Schéma procesní linky mikrovlnné depolymerizace



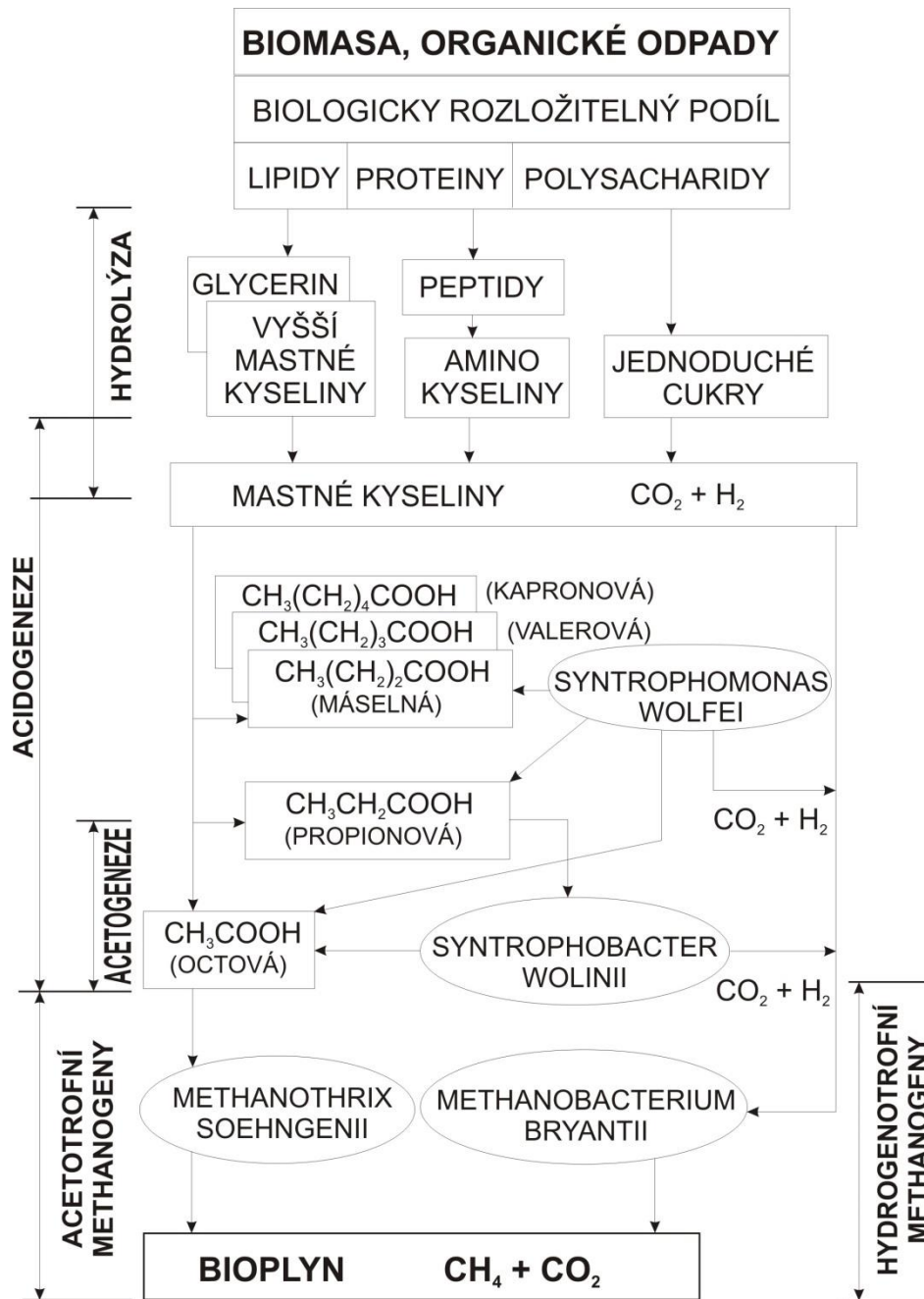
Zdroj: Bionic Group

Příloha 3 Prototypový reaktor mikrovlnná depolymerizace – označení mf60d



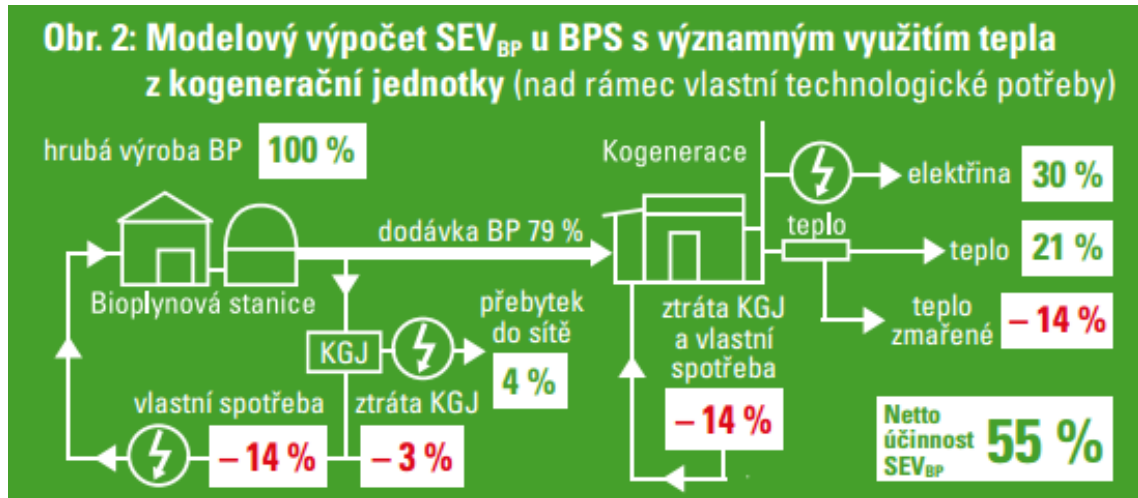
Zdroj: https://www.bionic-world.net/images/pdf/Bionic-microfuel-brochure_%2020130101_eng_rev09.pdf

Příloha 4 Schéma vzniku bioplynu z biologicky rozložitelných odpadů: 4 fázový model



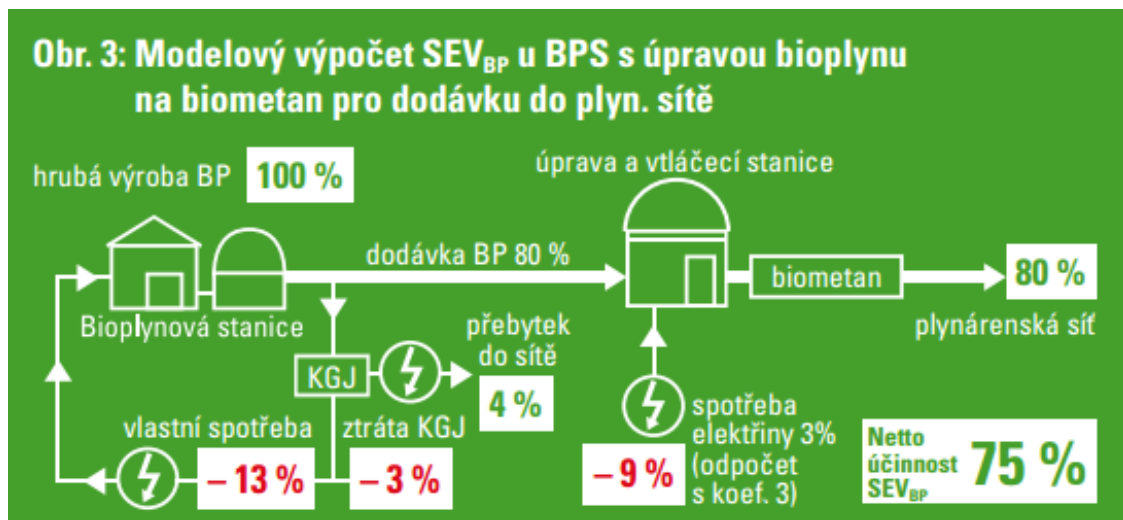
Zdroj: Straka, 2006

Příloha 5 Modelový výpočet u BPS významným využitím tepla z kogenerační jednotky (nad rámec vlastní technologické spotřeby)



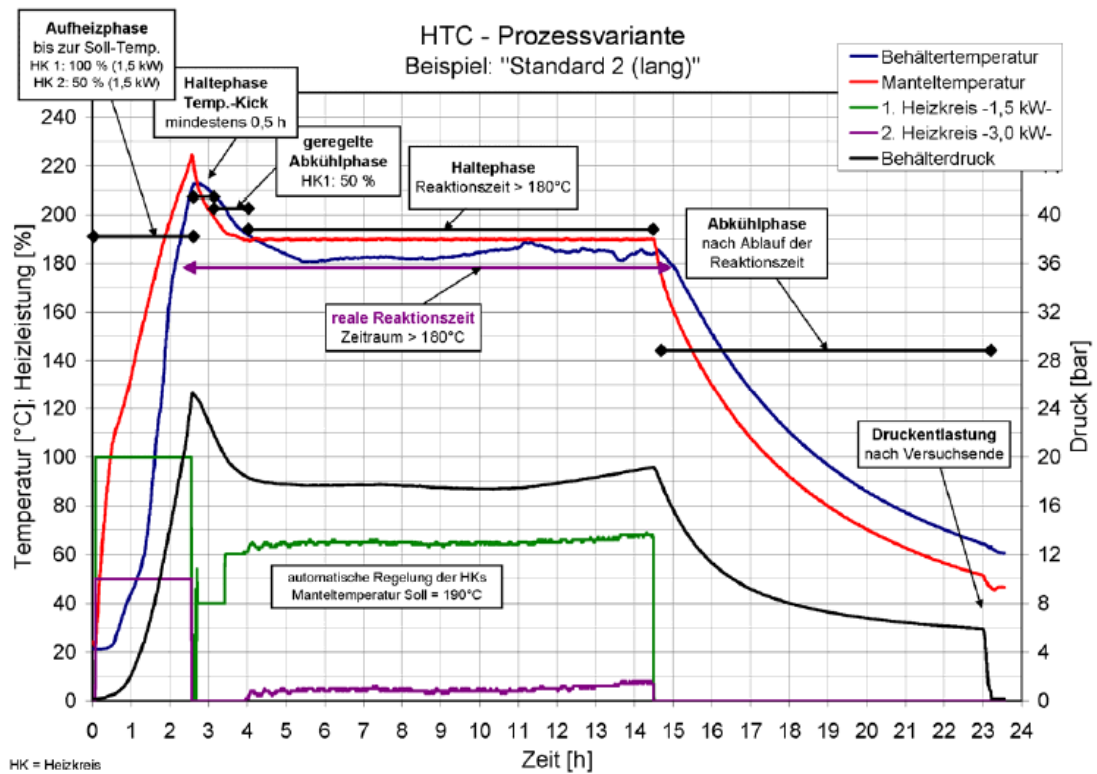
Zdroj: Energetická efektivnost bioplynových stanic, 2012.

Příloha 6 Modelový výpočet u BPS s úpravou bioplynu na biometan pro dodávku do plyn. sítě



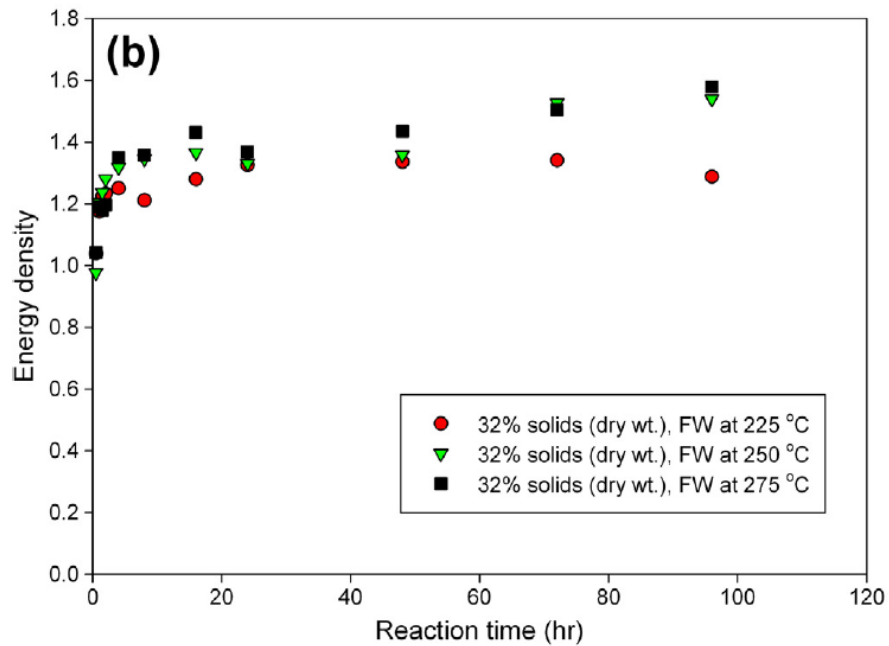
Zdroj: Energetická efektivnost bioplynových stanic, 2012.

Příloha 7 Záznam experimentu HTC



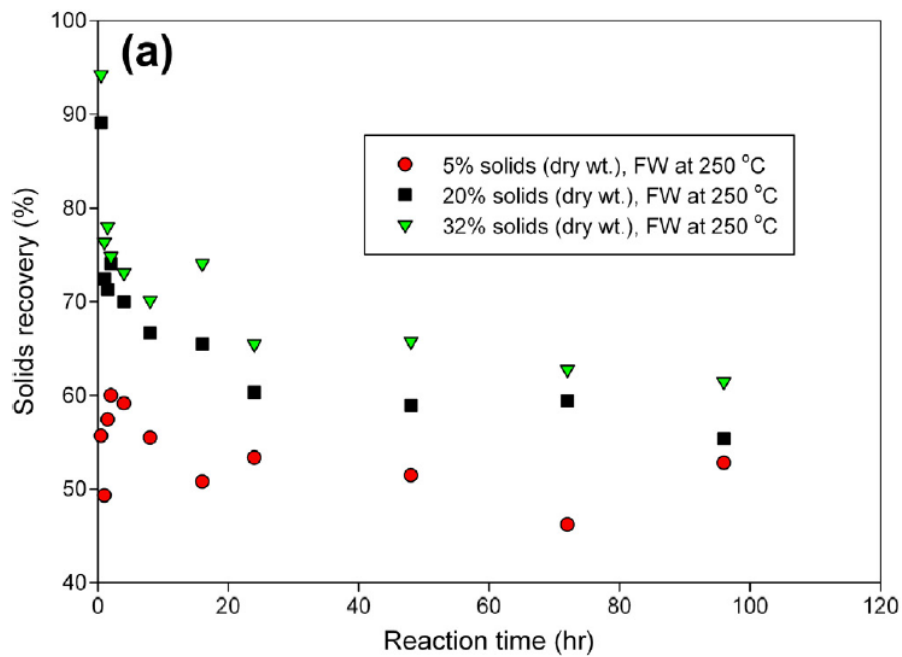
Zdroj: Ramke, 2012.

Příloha 8 Vliv teploty na energetickou hustotu produktu



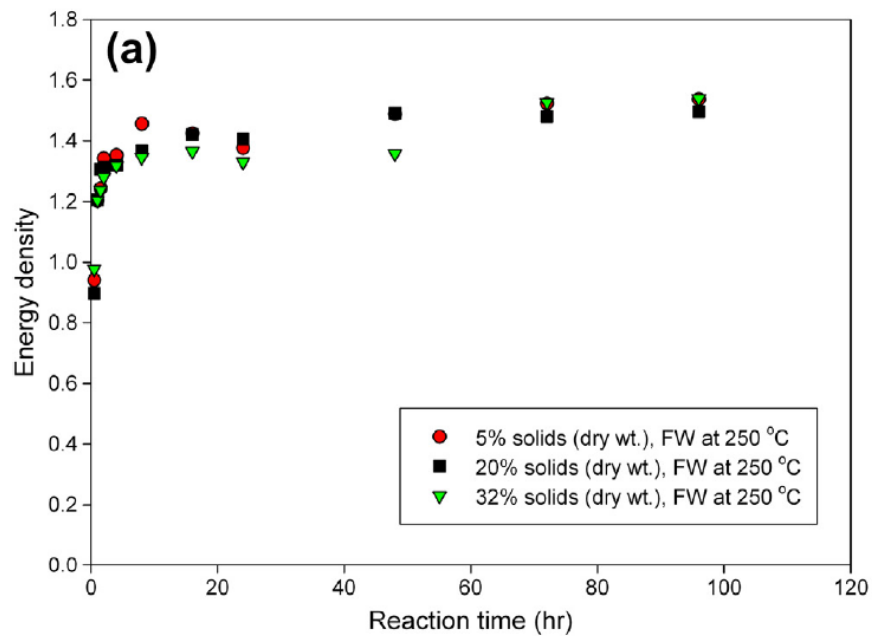
Zdroj: Li, 2013.

Příloha 9 Vliv koncentrace na výtěžnost tuhé fáze



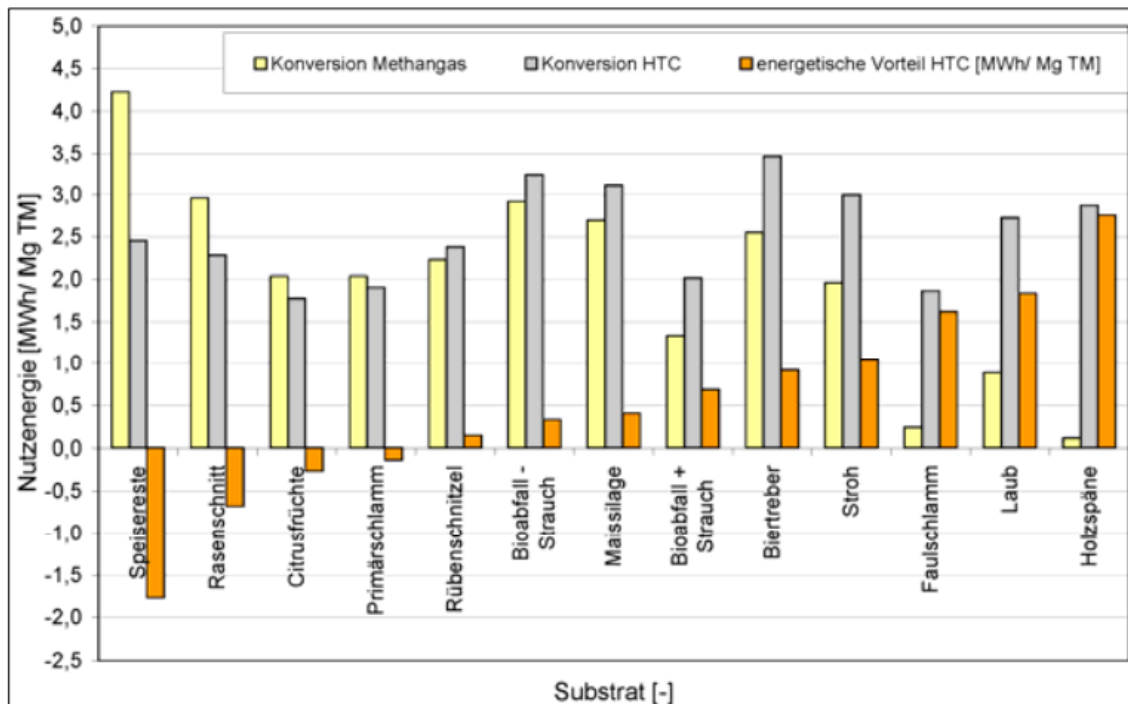
Zdroj: Li, 2013.

Příloha 10 Vliv koncentrace na energetickou hustotu



Zdroj: Li, 2013.

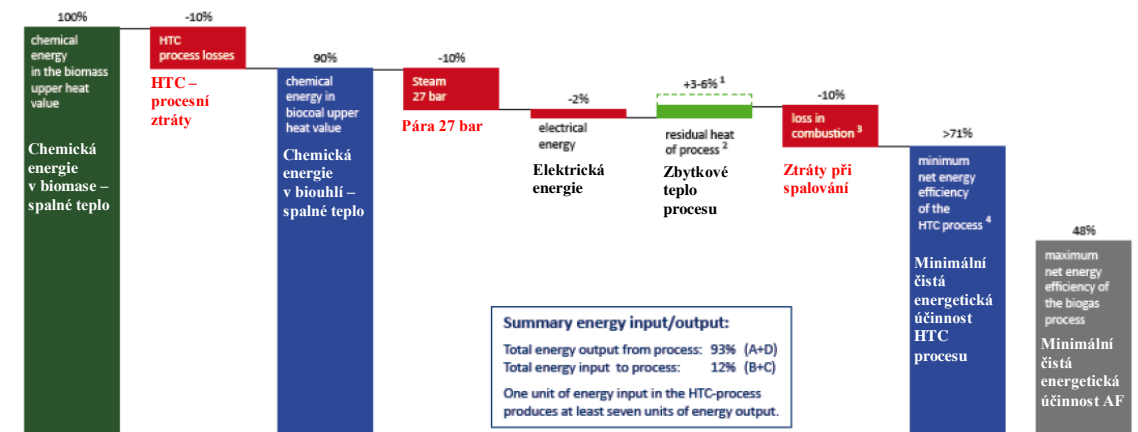
Příloha 11 Energetická bilance různých druhů biomasy pro technologie AF a HTC



Zdroj: Ramke, 2011.

Příloha 12 Netto energetická bilance procesu HTC

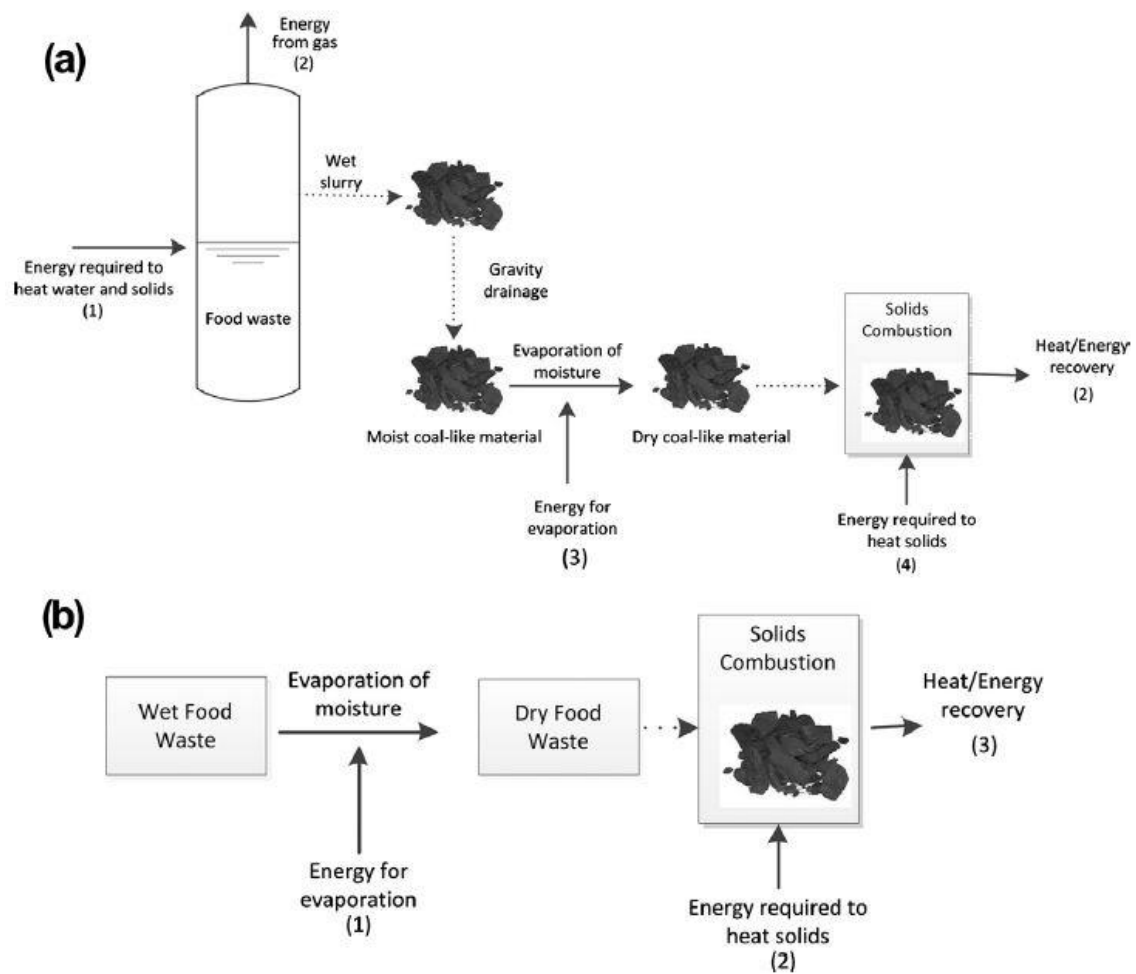
NET ENERGY EFFICIENCY



Zdroj: AVA-CO2, 2013

- 1) Závisí na lokálních podmínkách. Potenciál je 6%. Předpokládáme, že pouze 50% zbytkového tepla je využito.
- 2) Voda o přibližně 90 °C – předpoklad sušiny v biomase je 33 %.
- 3) Předpoklad je 30% zbytkové vlhkosti v biouhli, 4% popela a boiler nevybavený kondenzačním ekonomizérem. Možnost snížení ztráty o 2-3% s ekonomizérem.
- 4) 71% je minimální čistý energetický zisk. Možnost zvýšit na 79%. Srovnání s anaerobní fermentací (AF) – maximální energetická účinnost 48 %.

Příloha 13 Energetické bilance a) HTC, b) spalování



Zdroj: Li et al., 2013

Příloha 14 Šablona záznamu měření anaerobní fermentace

Datum (dd.mm.rr)
Čas záznamu
pH
Teplota (°C)
Tlak (kPa)
Objem (l)
CH ₄ (%)
CO ₂ (%)
H ₂ S (%)
O ₂ (%)
<i>Vzorek dávkovaného subst.</i>
Hmotnost vzorku (g)
sušina (%)
org.sušina (%)
pH
Zatížení vyhnivacího prost.
<i>Vzorek před nadávkováním</i>
Hmotnost vzorku (g)
sušina (%)
org.sušina (%)
<i>Vzorek po nadávkování</i>
Hmotnost vzorku (g)
sušina (%)
org.sušina (%)

Příloha 15 Potenciální zisk energie ze zpracování odpadů (10^{-3} MJ.g⁻¹ vlhkého odpadu)^a

Odpadní materiál	Skládkování	Kompostování	Anaerobní fermentace	Spalování	HTC
Papír	5,7	0	-	12,9	7,8
Jídlo ^c	1,98	0	2,6-3,6 ^d	5,43	11,94 ^b
Směsný komunální odpad	2,1	0	-	15,5	9,76

^a Předpokládáme 100% přeměnu energie a energetický obsah metanu je 38 MJ/m³

^b Maximální energie po 120 h reakce

^c Typický vzorek jídla s 70 % vlhkostí

^d Výtěžnost metanu dle Levis at. al. (2010): 136 m³/Mg odpadu a předpoklad 50-70 % metanu

Zdroj: Lu et al., 2011